

5. Pojačala s povratnom vezom

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 može biti pozitivna ili negativna. *Negativna povratna veza* smanjuje izlazni signal, a *pozitivna povratna veza* ga povećava. U elektronici se primjenjuju obje vrste povratne veze.

U pojačalima se koristi negativna povratna veza. Iako smanjuje izlazni signal, a time i pojačanje pojačala negativna povratna veza 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.

I u dosadašnjoj analizi pojačala javljali su se primjeri pojačala s negativnom povratnom vezom. Jedan od primjera je pojačalo s bipolarnim tranzistorom u spoju zajedničkog emitera s emitorskom degeneracijom, u kojem emitorski otpornik nije premošten kondenzatorom. U tom sklopu emitorski otpornik povezuje izlazni i ulazni krug pojačala, odnosno preko njega se uspostavlja negativna povratna veza. Naponsko pojačanje poprima približni iznos $A_v \approx -(R_C \parallel R_T) / R_E$, odnosno jednako je omjeru otpora otpornika spojenih u kolektorskom i emitorskom krugu tranzistora. Uvođenjem degeneracije, odnosno povratne veze 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.

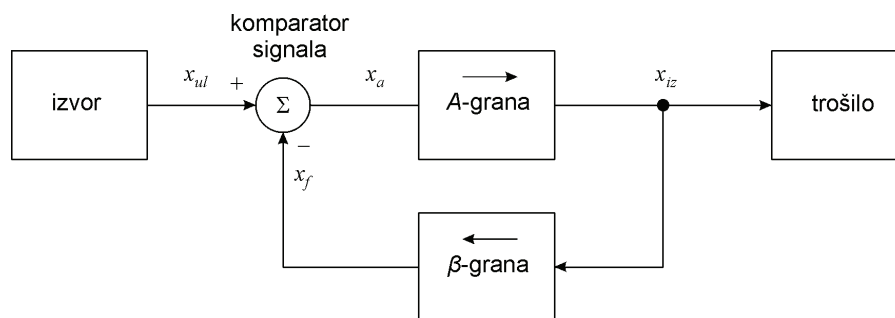
5.1 Struktura pojačala s povratnom vezom

Shematski prikaz pojačala s povratnom vezom dan je na slici 5.1. Veličine x su signali koji su u pojačalu naponi ili struje. A -grana je osnovno pojačalo bez povratne veze. Ulazni signal A -grane je x_a , izlazni signal je x_{iz} , pa je pojačanje funkcija A -grane

$$A = \frac{x_{iz}}{x_a}. \quad (5.1)$$

Izlazni signal A -grane x_{iz} ujedno je **uzorak** koji se dovodi na ulaz β -grane ili grane povratne veze. U pojačalu se β -grana najčešće ostvaruje pasivnom mrežom, najčešće sastavljenom od otpornika. Za β -granu izlazni signal je x_f , pa je **koeficijent povratne veze**

$$\beta = \frac{x_f}{x_{iz}}. \quad (5.2)$$



Slika 5.1 – Shematski prikaz pojačala s povratnom vezom.

Signal x_f je **povratni signal** pojačala s povratnom vezom. Na ulazu, u **komparatoru signala**, signal x_f oduzima se od signala x_{ul} koji dolazi iz izvora ili generatora signala. Razlika ta dva signala dovodi se na ulaz A -grane

$$x_a = x_{ul} - x_f . \quad (5.3)$$

Pojačanje pojačala s povratnom vezom A_f dobiva se kao omjer izlaznog signala x_{iz} predanog trošilu i ulaznog signala x_{ul} koji daje izvor. Kombiniranjem jednadžbi (5.1)-(5.3) dobiva se

$$A_f = \frac{x_{iz}}{x_{ul}} = \frac{A}{1 + \beta A} . \quad (5.4)$$

Gornji izrazi vrijede uz određene pretpostavke. Prva je pretpostavka da se pojačanje pojačala bez povratne veze A ne mijenja s priključkom izvora, trošila i grane povratne veze. U stvarnosti to nije slučaj, pa pri analizi pojačala s povratnom vezom treba uzeti u obzir utjecaj opterećenja izvora, trošila i grane povratne veze na pojačanje osnovnog pojačala A . Druga je pretpostavka da signal od ulaza prema izlazu prolazi isključivo kroz A -granu, a vraća se isključivo kroz β -granu. Ta je pretpostavka uglavnom zadovoljena. U pojačalu je dominantan tok signala od ulaza prema izlazu, iako se mali dio signala vraća. Taj se povrat signala javlja u tranzistoru preko kapaciteta spojenog s izlaza na ulaz. Primjer je kapacitet bipolarnog tranzistora C_{bc} u pojačalu u spoju zajedničkog emitera ili kapacitet C_{gd} u pojačalu u spoju zajedničkog uvoda. Iako je β -grana najčešće pasivna mreža, koja jednako dobro vodi signal u oba smjera, u pojačalu s povratnom vezom signal se kroz β -granu pretežno prenosi od izlaza prema ulazu, jer je razina izlaznog signala znatno veća od razine ulaznog signala. To vrijedi tim više što je iznos pojačanja A veći, što se postiže primjenom većeg broja stupnjeva u osnovnom pojačalu.

Umnožak βA naziva se **pojačanje u petlji povratne veze**. Ako je umnožak βA pozitivan povratna veza je negativna. Prema slici 5.1, u tom se slučaju povratni signal x_f oduzima od signala izvora x_{ul} smanjujući ulazni signal x_a A -grane. Rezultat je manji iznos pojačanja A_f pojačala s povratnom vezom u odnosu na iznos pojačanja A pojačala bez povratne veze. Pojačanje A_f manje je od pojačanja A za faktor $1 + \beta A$, pri čemu se faktor

$$F = 1 + \beta A \quad (5.5)$$

naziva **faktor povratne veze**. Povratna veza je jača ako je faktor povratne veze veći.

Često se u pojačalima s povratnom vezom postiže veliki umnožak βA . Ako je povratna veza jaka, tj. ako je $\beta A \gg 1$ pojačanje A_f prema (5.4) teži $A_f \approx 1/\beta$. U tom je slučaju pojačanje pojačala s povratnom vezom isključivo određeno koeficijentom povratne veze β . Kako se ta grana sastoji od pasivnih elemenata koji su znatno precizniji od poluvodičkih elemenata, uz $A_f \approx 1/\beta$ pojačalo s povratnom vezom postiže precizno i stabilno pojačanje.

5.2 Poboljšanje svojstava pojačala s negativnom povratnom vezom

5.2.1. Stabilizacija pojačanja

Promjena pojačanja A osnovnog pojačala izaziva manju promjenu pojačanja A_f pojačala s povratnom vezom. Uz pretpostavku da se koeficijent povratne veze β ne mijenja, diferenciranjem obje strane izraza (5.4) dobiva se

$$dA_f = \frac{dA}{(1 + \beta A)^2}, \quad (5.6)$$

odakle slijedi

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + \beta A} \frac{dA}{A} = \frac{1}{F} \frac{dA}{A}. \quad (5.7)$$

Prema (5.7) relativna promjena pojačanja A_f manja je od relativne promjene pojačanja A za faktor povratne veze F . Porastom faktora F pojačalo s povratnom vezom manje je osjetljivo na promjene pojačanja 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%?

Rješenje:

Relativna promjena pojačanja A_f računa se primjenom (5.7)

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1 + \beta A} \frac{dA}{A} = \frac{1}{1 + 0,01 \cdot 10^4} \cdot 20 = 0,198\%.$$

Osjetljivost pojačanja A_f manja je $1 + \beta A = 1 + 0,01 \cdot 10^4 = 101$ puta od osjetljivosti pojačanja A .

5.2.2. Linearizacija prijenosne karakteristike pojačala

Smanjivanjem iznosa pojačanja A_f u odnosu na iznos pojačanja A osnovnog pojačala linearizira se prijenosna karakteristika pojačala s povratnom vezom.

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:

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

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

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 $\beta = 0,01$.

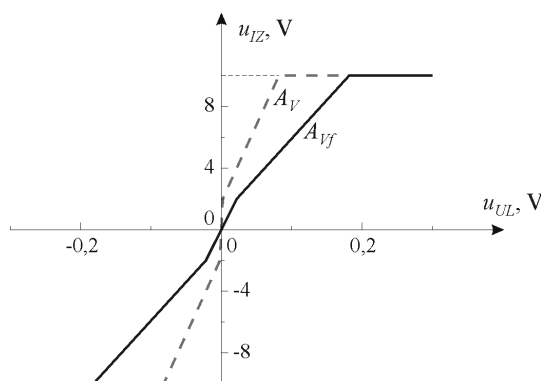
Rješenje:

Prijenosna karakteristika pojačala s povratnom vezom aproksimira se također po odsječcima. Vrijedi

$$\text{za } |u_{IZ}| < 2 \text{ V} \rightarrow A_{Vf1} = \frac{A_{V1}}{1 + \beta A_{V1}} = \frac{1000}{1 + 0,01 \cdot 1000} = 90,9,$$

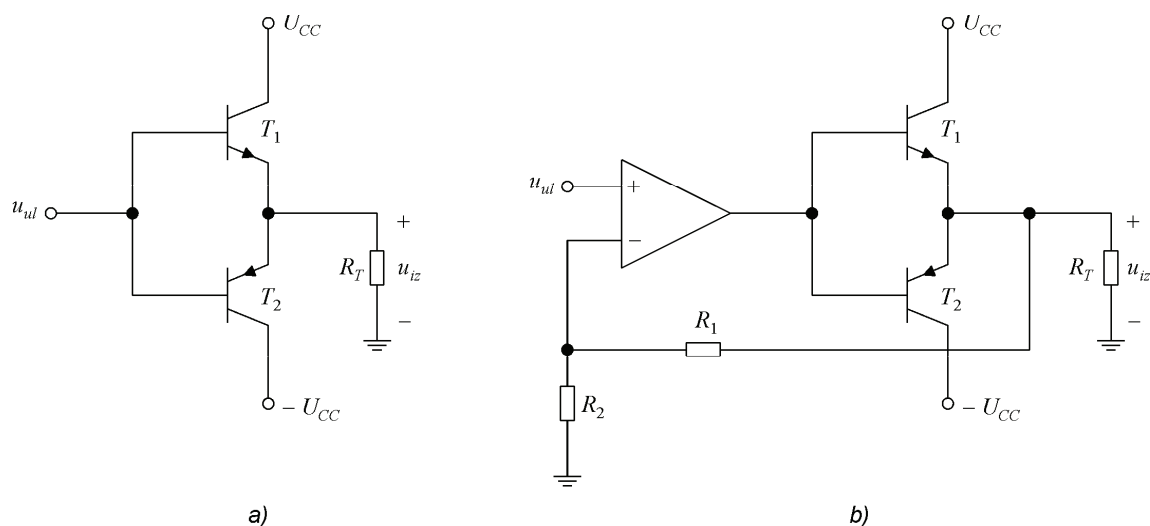
$$\text{za } 2 \text{ V} < |u_{IZ}| < 10 \text{ V} \rightarrow A_{Vf2} = \frac{A_{V2}}{1 + \beta A_{V2}} = \frac{100}{1 + 0,01 \cdot 100} = 50.$$

Obje su prijenosne karakteristike prikazane na slici 5.2, karakteristika osnovnog pojačala crtkano, a karakteristika pojačala s povratnom vezom punom crtom. Iz slike je vidljivo kako je karakteristika pojačala s povratnom vezom linearnija.

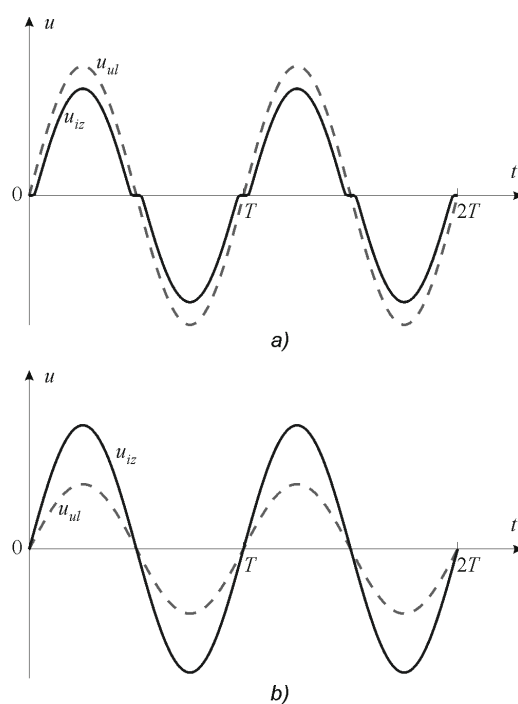


Slika 5.2 – Ilustracija utjecaja negativne povratne veze na lineariziranje prijenosne karakteristike pojačala.

Negativna povratna veza može se iskoristiti za linearizaciju prijenosne karakteristike izlaznog pojačala klase B, čime se uklanjanju preskočna izobličenja. Na slici 5.3a prikazano je protutaktno izlazno pojačalo klase B. Na slici 5.3b to je pojačalo kao izlazni stupanj uključeno u pojačalo s povratnom vezom, u kojem se kao ulazni stupanj koristi operacijsko pojačalo u spoju neinvertirajućeg pojačala. Povratna veza ostvarena je otpornicima R_1 i R_2 . Za oba pojačala valni oblici ulaznih i izlaznih napona dani su na slici 5.4, pri čemu su ulazni naponi prikazani crtkano, a izlazni naponi punim crtama.



Slika 5.3 – Limerizacija prijenosne karakteristike pojačala:
a) izlazno protutaktno pojačalo klase B,
b) pojačalo s povratnom vezom u kojem je izlazni stupanj pojačalo sa slike a.



Slika 5.4 – Ulazni i izlazni naponi pojačala sa slike 5.3:
a) naponi pojačala sa slike 5.3a, b) naponi pojačala sa slike 5.3b.

U izlaznom pojačalu sa slike 5.3a oba tranzistora vode zanemarivu struju za ulazne napone koji su po iznosu manji od napona koljena propusno polariziranog spoja emiter-baza. Rezultat su preskočna izobličenja, zbog kojih je, prema slici 5.4a, izlazni napon izobličen. Ako se prema slici 5.3b izlazno pojačalo uključi kao izlazni stupanj u pojačalo s povratnom vezom, povratna veza uklanja izobličenja. To se vidi sa slike 5.4b gdje valni oblik izlaznog napona u_{iz}

jednak valnom obliku ulaznog napona u_{ul} . Veća amplituda izlaznog napona od amplitude ulaznog napona rezultat je naponskog pojačanja koje osigurava operacijsko pojačalo.

5.2.3. Proširenje frekvencijskog pojasa

Primjenom povratne vezom mijenja se frekvencijski odziv pojačala. Ako je u području visokih frekvencija frekvencijski odziv osnovnog pojačala dominantno određen jednim paralelno spojenim kapacitetom njegova se prijenosna karakteristika može opisati izrazom

$$A(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j\omega/\omega_g}, \quad (5.8)$$

gdje je A_0 pojačanje na srednjim frekvencijama, a frekvencija pola ujedno je i gornja granična frekvencija pojačala ω_g . Ukoliko se na takvo pojačalo primijeni negativna povratna veza, s frekvencijski neovisnim koeficijentom povratne veze $\beta = \beta_0 \neq f(j\omega)$, frekvencijski odziv pojačala s povratnom vezom je

$$A_f(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 + \beta A(j\omega)}. \quad (5.9)$$

Uvrštenjem (5.8) u (5.9) dobiva se

$$A_f(j\omega) = \frac{A_{0f}}{1 + j\omega/\omega_{gf}}, \quad (5.10)$$

gdje su

$$A_{0f} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0}, \quad (5.11)$$

$$\omega_{gf} = \omega_g (1 + \beta A_0). \quad (5.12)$$

U pojačalu s povratnom vezom pojačanje na srednjim frekvencijama A_{0f} smanjuje se $1 + \beta A_0$ puta, a gornja granična frekvencija ω_{gf} povećava se $1 + \beta A_0$ puta u odnosu na odgovarajuće veličine A_0 i ω_g osnovnog pojačala. Pri tome produkt pojačanje-gornja granična frekvencija ostaje jednak

$$A_{0f} \omega_{gf} = A_0 \omega_g. \quad (5.13)$$

Na sličan način može se analizirati utjecaj povratne veze na niskofrekvencijski odziv pojačala. Za osnovno pojačalo čiji frekvencijski odziv u području niskih frekvencija dominantno određuje jedan serijski spojen kondenzator može se pisati

$$A(j\omega) = A_0 \frac{j\omega/\omega_d}{1 + j\omega/\omega_d}. \quad (5.14)$$

A_0 je pojačanje na srednjim frekvencijama, a frekvencija ω_d je donja granična frekvencija pojačala. Primjenom negativne povratne veze, s frekvencijski neovisnim koeficijentom β

frekvencijski odziv pojačala s povratnom vezom poprima oblik prema (5.9). Uvrštenjem (5.14) u (5.9) i sređivanjem dobiva se

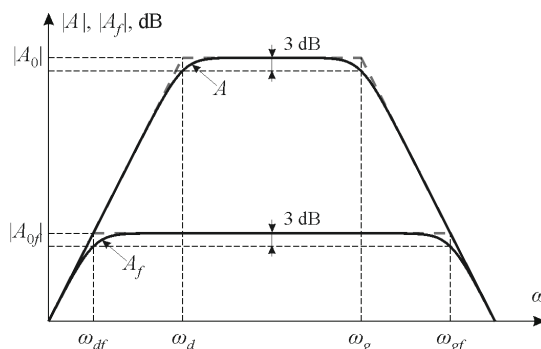
$$A_f(j\omega) = A_{0f} \frac{j\omega/\omega_{df}}{1 + j\omega/\omega_{df}}, \quad (5.15)$$

gdje je pojačanje na srednjim frekvencijama A_{0f} određeno izrazom (5.11), a donja granična frekvencija ω_{df} je

$$\omega_{df} = \frac{\omega_d}{1 + \beta A_0}. \quad (5.16)$$

Primjenom povratne veze donja granična frekvencija smanjuje se $1 + \beta A_0$ puta.

Ukupan utjecaj negativne povratne veze na proširenje frekvencijskog pojasa prikazan je na slici 5.5. Aproximirane amplitudne karakteristike osnovnog pojačala A i pojačala s negativnom povratnom vezom A_f prikazane su crtkano, a točne karakteristike punim crtama.



Slika 5.5 – Amplitudna frekvencijska karakteristika osnovnog pojačala A i pojačala s negativnom povratnom vezom A_f .

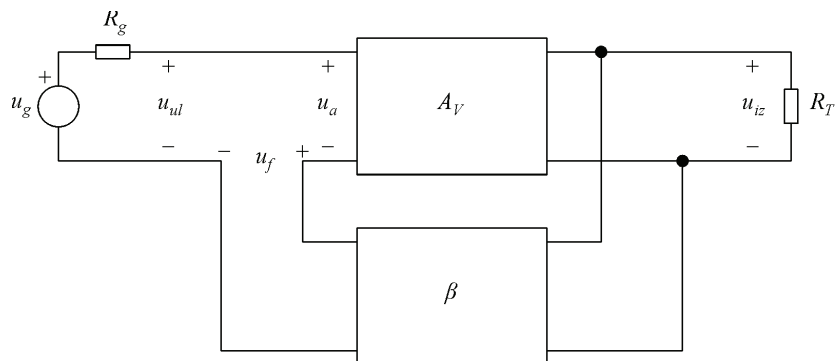
5.3 Vrste povratnih veza

U shematskom prikazu na slici 5.1 pojedini signali pojačala s povratnom vezom označeni su s x . U stvarnim pojačalima ti su signali naponi ili struje. S obzirom da ulazni i izlazni signali mogu biti naponi ili struje razlikuju se četiri vrste povratnih veza.

5.3.1. Naponska-serijska povratna veza

Ako su signali na ulazu i izlazu pojačala s povratnom vezom naponi shema sa slike 5.1 poprima oblik prikazan na slici 5.6. Izlazni signal osnovnog pojačala je napon u_{iz} , a ulazni napon u_a , pa se za osnovno pojačalo određuje naponsko pojačanje

$$A_v = \frac{u_{iz}}{u_a}. \quad (5.17)$$



Slika 5.6 – Shematski prikaz naponske-serijske povratne veze.

Uzorak je napon u_{iz} , a povratni signal je napon u_f . To su ulazni i izlazni signal grane povratne veze, čiji je koeficijent

$$\beta = \frac{u_f}{u_{iz}}. \quad (5.18)$$

Generator signala, koji predaje pojačalu ulazni napon u_{iz} , nadomješten je naponskim izvorom u_g i unutarnjim otporom R_g . Vodeći računa da se na ulaz pojačala dovodi ulazni napon generatora signala umanjen za povratni signal $u_a = u_{ul} - u_f$, te kombinacijom izraza (5.17) i (5.18) pojačanje pojačala s povratnom vezom je naponsko pojačanje

$$A_{vf} = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{A_v}{1 + \beta A_v}. \quad (5.19)$$

U nazivima pojedinih vrsta povratnih veza sadržane su dvije informacije:

- koji se izlazni signal pojačala koristi kao uzorak i
- kakva se veza u komparatoru signala koristi za usporedbu povratnog signala s ulaznim signalom kojeg daje generator signala.

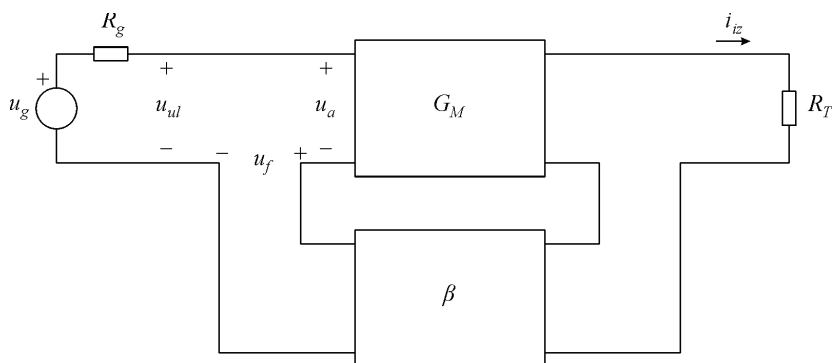
U shematskom prikazu sa slike 5.6 izlazni signal, odnosno uzorak je napon, pa je povratna veza naponska. Na ulazu pojačala povratni signal u_f i ulazni signal u_{ul} uspoređuju se u serijskoj vezi i povratna veza je serijska. Ukupni naziv za vezu prema slici 5.6 je naponska-serijska povratna veza.

5.3.2. Strujna-serijska povratna veza

Na slici 5.7 prikazana je konfiguracija povratne veze u kojoj su na izlazu pojačala signali struje, a na ulazu su naponi. Pojačanje osnovnog pojačala računa se kao omjer izlazne struje i_{iz} i ulaznog napona u_a . To je strminsko pojačanje

$$G_M = \frac{i_{iz}}{u_a}. \quad (5.20)$$

Povratni signal iz β -grane je napon u_f , a uzorak je struja i_{iz} , pa je koeficijent povratne veze



Slika 5.7 – Shematski prikaz strujne-serijske povratne veze.

$$\beta = \frac{u_f}{i_{iz}}. \quad (5.21)$$

Ulazni signal osnovnog pojačala je ulazni napon generatora signala umanjen za povratni signal $u_a = u_{ul} - u_f$. Karakteristično pojačanje pojačala s povratnom vezom je strminsko pojačanje

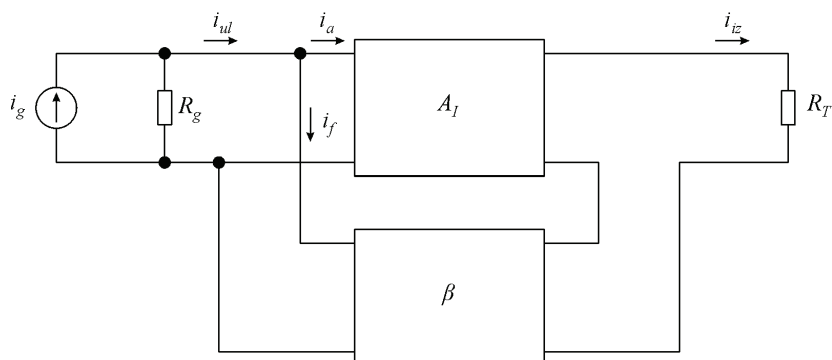
$$G_{Mf} = \frac{i_{iz}}{u_{ul}} = \frac{G_M}{1 + \beta G_M}. \quad (5.22)$$

Strminsko pojačanje osnovnog pojačala G_M ima dimenziju simensa. Prijenosna funkcija β -grane mora imati recipročnu dimenziju, tj. dimenziju oma i pojačanje u petlji povratne veze βG_M je bezdimenzijski broj.

Budući je uzorak povratne veze sa slike 5.7 struja, a na ulazu pojačala veza povratnog signala u_f i ulaznog signala u_{ul} je serijska, povratna veza je strujna-serijska povratna veza.

5.3.3. Strujna-paralelna povratna veza

U konfiguraciji povratne veze sa slike 5.8 ulazni i izlazni signali su struje. Za osnovno pojačalo određuje se omjer izlazne struje i_{iz} i ulazne struje i_a , tj. strujno pojačanje



Slika 5.8 – Shematski prikaz strujne-paralelne povratne veze.

$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_a} . \quad (5.23)$$

Za β -granu ulazni signal je struja i_{iz} , a izlazni signal je struja i_f , pa je koeficijent povratne veze

$$\beta = \frac{i_f}{i_{iz}} . \quad (5.24)$$

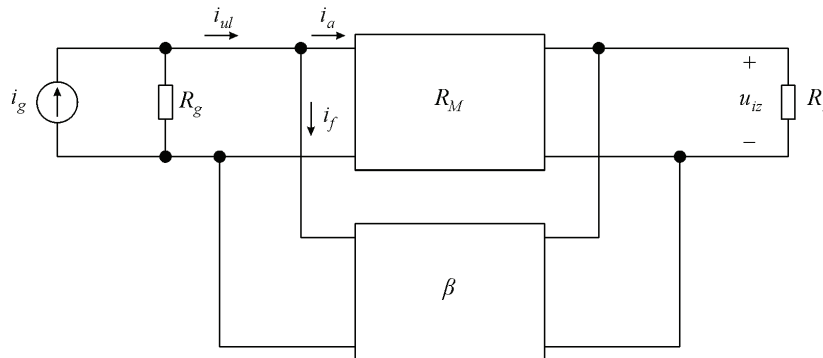
Generator ulaznog signala nadomješten je strujnim izvorom i_g i paralelno spojenim unutarnjim otporom R_g . Na ulazu se od ulazne struje generatora signala i_{ul} oduzima povratna struja i_f , dajući ulaznu struju osnovnog pojačala $i_a = i_{ul} - i_f$. Povezivanjem navedenih izraza pojačanje pojačala s povratnom vezom je strujno pojačanje

$$A_{ff} = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = \frac{A_I}{1 + \beta A_I} . \quad (5.25)$$

Uzorak povratne veze sa slike 5.8 je struja, a na ulazu pojačala povratni signal i_f i ulazni signal i_{ul} uspoređuju se u paralelnom spoju, pa se radi o strujnoj-paralelnoj povratnoj vezi.

5.3.4. Naponska-paralelna povratna veza

Ako su izlazni signali naponi, a ulazni signali struje povratna veza poprima konfiguraciju prema slici 5.9. Za osnovno pojačalo određuje se otporno pojačanje dano omjerom izlaznog napona u_{iz} i ulazne struje i_a



Slika 5.9 – Shematski prikaz naponske-paralelne povratne veze.

$$R_M = \frac{u_{iz}}{i_a} . \quad (5.26)$$

Omjer povratne struje i_f i uzorka, tj. napona u_{iz} određuje koeficijent povratne veze

$$\beta = \frac{i_f}{u_{iz}} . \quad (5.27)$$

Ulazna struja osnovnog pojačala i_a je ulazna struja generatora signala i_{ul} umanjena za povratnu struju i_f , tj. $i_a = i_{ul} - i_f$. Pojačanje pojačala s povratnom vezom je otporno pojačanje

$$R_{Mf} = \frac{u_{iz}}{i_{ul}} = \frac{R_M}{1 + \beta R_M}. \quad (5.28)$$

Budući je uzorak napon, a na ulazu je komparator signala izveden kao paralelni spoj ulazni struje i_{ul} i povratne struje i_f , povratne veza sa slike 5.9 je naponska-paralelna.

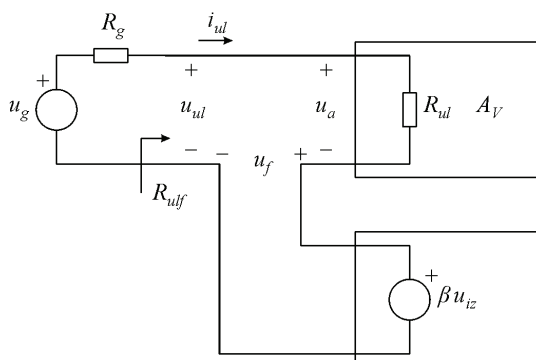
5.4 Utjecaj povratne veze na ulazni i izlazni otpor pojačala

Osim što mijenja pojačanje pojačala, povratna veza utječe i na promjenu ulaznog i izlaznog otpora pojačala.

5.4.1. Utjecaj na ulazni otpor

Ulazni otpor pojačala s povratnom vezom uvjetovan je vrstom ulaznog i povratnog signala, te načinom njihovog povezivanja u komparatoru signala. U komparatoru signala naponi se uspoređuju u serijskom, a struje u paralelnom spoju ulaznog i povratnog signala.

Na slici 5.10 prikazan je ulazni krug pojačala s naponskom-serijskom povratnom vezom. U ulaznom krugu ulazni napon u_{ul} i povratni napon u_f spojeni su serijski. Ulazni krug osnovnog pojačala nadomješten je njegovi ulaznim otporom



Slika 5.10 – Ulazni krug pojačala s naponskom-serijskom povratnom vezom.

$$R_{ul} = \frac{u_a}{i_{ul}}. \quad (5.29)$$

Budući da je uzorak u ovoj povratnoj vezi napon u_{iz} , povratni signal je napon $u_f = \beta u_{iz}$. Ulazni otpor pojačala s naponskom-serijskom povratnom vezom je

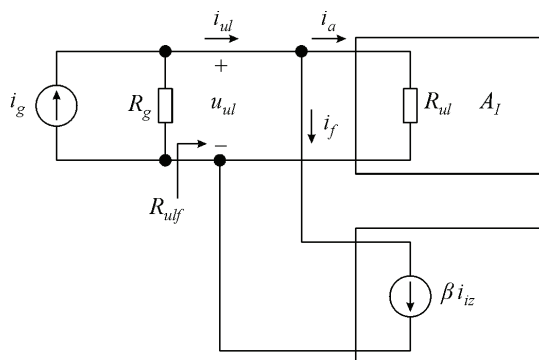
$$R_{ulf} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = \frac{u_{ul}}{u_a/R_{ul}} = R_{ul} \frac{u_a + u_f}{u_a} = R_{ul} \left(1 + \frac{u_f}{u_a} \frac{u_{iz}}{u_a} \right) = R_{ul} (1 + \beta A_V). \quad (5.30)$$

U odnosu na pojačalo s naponskom-serijskom povratnom vezom, pojačalo sa strujnom-serijskom povratnom vezom ima jednak ulazni krug pojačala, ali izlazni signal osnovnog pojačala i uzorak β -grane je struja i_{iz} . Time je pojačanje osnovnog pojačala strminsko pojačanje $G_M = i_{iz}/u_a$, a koeficijent povratne veze $\beta = u_f/i_{iz}$. Da bi se odredio ulazni otpor pojačala sa strujnom-serijskom povratnom vezom u ulaznom krugu sa slike 5.10 treba naponsko pojačanje A_V zamijeniti sa strminskim pojačanjem G_M , a naponom upravljan naponski izvor βu_{iz} sa strujno upravljanim naponskim izvorom βi_{iz} . Analizom takve sheme dobiva se ulazni otpor pojačala sa strujnom-serijskom povratnom vezom

$$R_{ulf} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = R_{ul} \left(1 + \frac{u_f}{i_{iz}} \frac{i_{iz}}{u_a} \right) = R_{ul} (1 + \beta G_M). \quad (5.31)$$

Može se zaključiti da serijska povratna veza povećava ulazni otpor osnovnog pojačala, pri čemu faktor povećanja odgovara faktoru povratne veze $F = 1 + \beta A$.

Slika 5.11 prikazuje ulazni krug pojačala sa strujnom-paralelnom povratnom vezom. Ulazni otpor osnovnog pojačala je



Slika 5.11 – Ulazni krug pojačala sa strujnom-paralelnom povratnom vezom.

$$R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_a}. \quad (5.32)$$

Uzorak je izlazna struja i_{iz} , a povratni signal je struja $i_f = \beta i_{iz}$. Može se pisati

$$\frac{1}{R_{ulf}} = \frac{i_{ul}}{u_{ul}} = \frac{i_{ul}}{R_{ul} i_a} = \frac{1}{R_{ul}} \frac{i_a + i_f}{i_a} = \frac{1}{R_{ul}} \left(1 + \frac{i_f}{i_{iz}} \frac{i_{iz}}{i_a} \right) = \frac{1}{R_{ul}} (1 + \beta A_I), \quad (5.33)$$

odakle slijedi

$$R_{ulf} = \frac{R_{ul}}{1 + \beta A_I}. \quad (5.34)$$

Slično se određuje ulazni otpor pojačala s naponskom-paralelnom povratnom vezom. Ulazni krug tog pojačala jednak je ulaznom krugu sa slike 5.11. U odnosu na strujnu-paralelnu

povratnu vezu, izlazni signal osnovnog pojačala i uzorak β -grane je napon u_{iz} , pa su pojačanje osnovnog pojačala i koeficijent povratne veze $R_M = u_{iz}/i_a$ i $\beta = i_f/u_{iz}$. Zbog toga za naponsku-paralelnu povratnu vezu u shemi na slici 5.11 strujno pojačanje A_I treba zamijeniti s otpornim pojačanjem R_M , a strujno upravljani strujni izvor βi_{iz} s naponski upravljanim strujnim izvorom βu_{iz} . U tom slučaju vrijedi

$$\frac{1}{R_{ulf}} = \frac{i_{ul}}{u_{ul}} = \frac{1}{R_{ul}} \left(1 + \frac{i_f}{u_{iz}} \frac{u_{iz}}{i_a} \right) = \frac{1}{R_{ul}} (1 + \beta R_M), \quad (5.35)$$

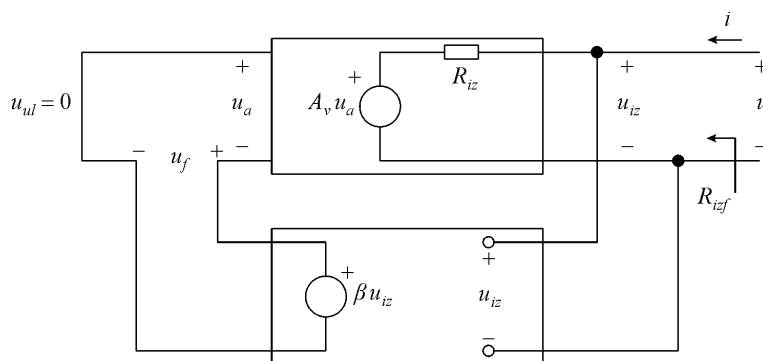
$$R_{ulf} = \frac{R_{ul}}{1 + \beta R_M}. \quad (5.36)$$

Paralelna povratna veza smanjuje ulazni otpor osnovnog pojačala za faktor povratne veze $F = 1 + \beta A$.

5.4.1. Utjecaj na izlazni otpor

Na izlazni otpor pojačala s povratnom vezom utječe vrsta izlaznog signala pojačala koji je ujedno i uzorak, tj. ulazni signal β -grane. Izlazni signal je napon u naponskoj ili struja u strujnoj povratnoj vezi.

Primjer pojačala s naponskom povratnom vezom je pojačalo s naponskom-serijskom povratnom vezom sa slike 5.6. Karakteristično pojačanje te povratne veze je naponsko pojačanje $A_{vf} = u_{iz}/u_{ul}$. Da bi se odredio izlazni otpor, ulazni naponski izvor u_{ul} kratko se spaja, a umjesto trošila na izlaz pojačala spaja se naponski izvor u , koji u izlaz pojačala daje struju i . Na taj način dobivena je shema na slici 5.12. U shemi je izlazni krug osnovnog naponskog pojačala nadomješten naponski upravljanim naponskim izvorom $A_v u_a$ i serijski spojenim izlaznim otporom R_{iz} . S A_v označeno je naponsko pojačanje A_v neopterećenog osnovnog pojačala koje se dobiva kada je izlaz odspojen



Slika 5.12 – Shema pojačala s naponskom-serijskom povratnom vezom sa slike 5.6 za određivanje izlaznog otpora.

$$A_v = \lim_{R_T \rightarrow \infty} A_v. \quad (5.37)$$

Izlazni otpor pojačala s povratnom vezom određuje se iz shema sa slike 5.12 kao $R_{izf} = u/i$. Struja i je

$$i = \frac{u - A_v u_a}{R_{iz}}. \quad (5.38)$$

Uz ulazni napon $u_{ul} = 0$ vrijedi

$$u_a = -u_f = -\beta u_{iz} = -\beta u, \quad (5.39)$$

$$i = \frac{u + \beta A_v u}{R_{iz}}, \quad (5.40)$$

$$R_{izf} = \frac{u}{i} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta A_v}. \quad (5.41)$$

Sličnom analizom određuje se izlazni otpor naponske-paralelne povratne veze prikazane na slici 5.9. Izlazni otpor je

$$R_{izf} = \frac{u}{i} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta R_m}, \quad (5.42)$$

gdje je R_m otporno pojačanje R_M neopterećenog osnovnog pojačala uz odspojen izlaz

$$R_m = \lim_{R_T \rightarrow \infty} R_M. \quad (5.43)$$

Obje naponske povratne veze smanjuju izlazni otpor osnovnog pojačala za faktor $1 + \beta A$, pri čemu je A pojačanje neopterećenog osnovnog pojačala.

Kod strujnih povratnih veza izlazni signal i uzorak je struja. Za pojačalo sa strujnom-paralelnom povratnom vezom sa slike 5.8 karakteristično pojačanje je strujno pojačanje $A_{jf} = i_{iz}/i_{ul}$. Pri određivanju izlaznog otpora tog pojačala ulazni strujni izvor i_{ul} se odspaja, a na izlaz pojačala spaja se naponski izvor u , koji izlazu pojačala daje struju i . To je prikazano u shemi na slici 5.13. Izlazni krug osnovnog strujnog pojačala nadomješten je strujno upravljanim strujnim izvorom $A_i i_a$ i paralelno spojenim izlaznim otporom R_{iz} . A_i je strujno pojačanje neopterećenog osnovnog pojačala koje se dobiva uz kratko spojen izlaz

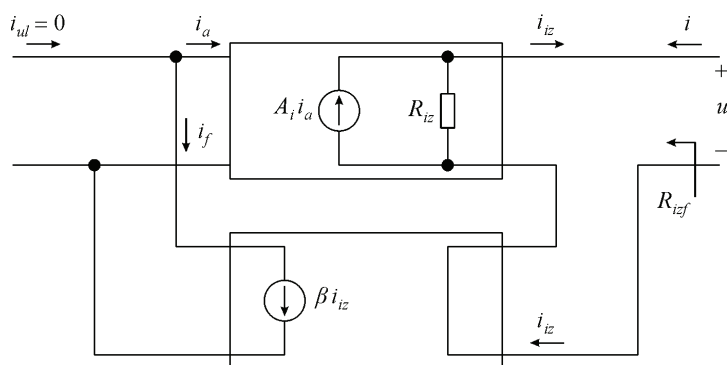
$$A_i = \lim_{R_T \rightarrow 0} A_I. \quad (5.44)$$

Uz $i_{ul} = 0$, ulazna struja osnovnog pojačala je

$$i_a = -i_f = -\beta i_{iz} = \beta i, \quad (5.45)$$

pa je izlazni napon

$$u = R_{iz} (i + A_i i_a) = R_{iz} (i + \beta A_i i). \quad (5.46)$$



Slika 5.13 – Shema pojačala sa strujnom-paralelnom povratnom vezom sa slike 5.8 za određivanje izlaznog otpora.

Izlazni otpor pojačala s povratnom vezom je

$$R_{izf} = \frac{u}{i} = R_{iz} (1 + \beta A_i). \quad (5.47)$$

Na sličan način dobiva se izlazni otpor strujne-serijske povratne veze sa slike 5.7

$$R_{izf} = \frac{u}{i} = R_{iz} (1 + \beta G_m). \quad (5.48)$$

G_m je strminsko pojačanje neopterećenog osnovnog pojačala koja se određuje uz kratko spojen izlaz

$$G_m = \lim_{R_T \rightarrow 0} G_M. \quad (5.49)$$

Serijske povratne veze povećavaju izlazni otpor izlazni otpor osnovnog pojačala za faktor $1 + \beta A$, gdje je A pojačanje neopterećenog osnovnog pojačala.

Pri određivanju ulaznog i izlaznog otpora grane povratnih veza nadomještene su idealiziranim modelima koji ne sadrže otporne komponente. U analizi stvarnih pojačala otpori β -grane uključuju se u ulazni i izlazni krug A -grane.

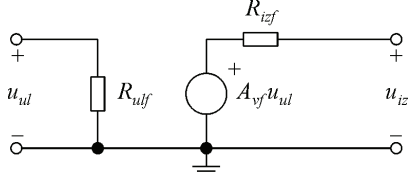
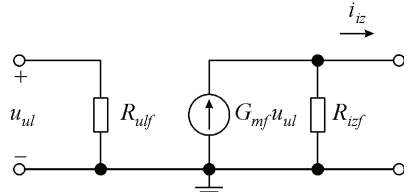
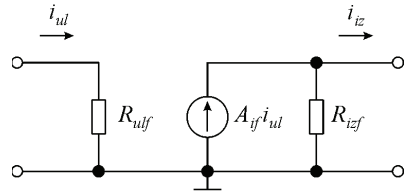
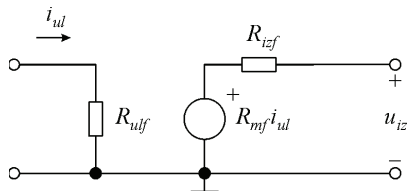
5.5 Utjecaj vrsta povratnih veza na svojstva pojačala

Negativna povratna veza stabilizira pojačanja pojačala i mijenja im ulazne i izlazne otpore čime se realna pojačala po svojim svojstvima približavaju svojstvima idealnih pojačala. Svojstva i modeli pojačala s negativnom povratnom vezom dani su u tablici 5.1. Vidljivo je kako približavanje svojstvima određenog tipa pojačala ovisi o vrsti povratne veze.

Za pojačala s naponskom-serijskom povratnom vezom u kojima je ostvaren veliki umnožak $\beta A \gg 1$ vrijedi

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + \beta A_v} \rightarrow \frac{1}{\beta}, \quad (5.50)$$

Tablica 5.1 – Modeli pojačala s povratnom vezom.

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	$R_{ulf} \rightarrow \infty$ $R_{izf} \rightarrow \infty$
Strujna-paralelna		Strujno pojačalo	$R_{ulf} \rightarrow 0$ $R_{izf} \rightarrow \infty$
Naponska-paralelna		Otporno pojačalo	$R_{ulf} \rightarrow 0$ $R_{izf} \rightarrow 0$

$$R_{ulf} = R_{ul} (1 + \beta A_V) \rightarrow \infty, \quad (5.51)$$

$$R_{izf} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta A_V} \rightarrow 0. \quad (5.52)$$

Povratna veza stabilizira naponsko pojačanje A_{Vf} koje postaje ovisno o preciznim pasivnim elementima. Osim toga povećava ulazni i smanjuje izlazni otpor, pa se pojačala s jakom naponskom-serijskom povratnom vezom približavaju svojstvima idealnog naponskog pojačala.

Svojstva pojačala sa strujnom-serijskom povratnom vezom u kojima je ostvaren veliki umnožak $\beta A \gg 1$ su

$$G_{Mf} = \frac{G_M}{1 + \beta G_M} \rightarrow \frac{1}{\beta}, \quad (5.53)$$

$$R_{ulf} = R_{ul} (1 + \beta G_M) \rightarrow \infty, \quad (5.54)$$

$$R_{izf} = R_{iz} (1 + \beta G_m) \rightarrow \infty. \quad (5.55)$$

Povratna veza stabilizira strminsko pojačanje G_{Mf} i povećava ulazni i izlazni otpor. Na taj način pojačala s jakom strujnom-serijskom povratnom vezom približavaju se svojstvima idealnog strminskog pojačala.

Ako je u pojačalima sa strujnom-paralelnom povratnom vezom ostvaren veliki umnožak $\beta A \gg 1$ tada vrijedi

$$A_{If} = \frac{A_I}{1 + \beta A_I} \rightarrow \frac{1}{\beta}, \quad (5.56)$$

$$R_{ulf} = \frac{R_{ul}}{1 + \beta A_I} \rightarrow 0, \quad (5.57)$$

$$R_{izf} = R_{iz} (1 + \beta A_I) \rightarrow \infty. \quad (5.58)$$

Povratnom vezom stabilizira se strujno pojačanje A_{If} , smanjuje se ulazni i povećava izlazni otpor. Time se pojačala s jakom strujnom-paralelnom povratnom vezom približavaju svojstvima idealnog strujnog pojačala.

Pojačala s naponskom-paralelnom povratnom vezom i s velikim umnoškom $\beta A \gg 1$ postižu svojstva

$$R_{Mf} = \frac{R_M}{1 + \beta R_M} \rightarrow \frac{1}{\beta}, \quad (5.59)$$

$$R_{ulf} = \frac{R_{ul}}{1 + \beta R_M} \rightarrow 0, \quad (5.60)$$

$$R_{izf} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta R_m} \rightarrow 0. \quad (5.61)$$

Djelovanjem povratne veze stabilizira se otporno pojačanje R_{Mf} i smanjuju se ulazni i izlazni otpor, pa se pojačala s jakom naponskom-paralelnom povratnom vezom približavaju svojstvima idealnog otpornog pojačala.

U modelima u tablici 5.1 pojačanja pojedinih pojačala s povratnom vezom modelirana su ovisnim izvorima u izlaznom krugu. Pri tome se u ovisnim izvorima javljaju pojačanja neopterećenih pojačala. A_{vf} i R_{mf} su pojačanja A_{vf} i R_{mf} uz odspojen izlaz, a A_{if} i G_{mf} pojačanja A_{If} i G_{Mf} uz kratko spojen izlaz.

5.5 Postupak analize pojačala s povratnom vezom

Korištenjem navedenih svojstava može se odrediti postupak analize stvarnih pojačala s povratnom vezom. Postupak se sastoji od više koraka koji su navedeni u tablici 5.2.

Prvi korak je prepoznavanje povratne veze u pojačalu. Treba utvrditi koji dijelovi sklopa čine osnovno pojačalo, tj. A -granu, a koji dijelovi β -granu povratne veze. Nakon toga treba

ustanoviti je li uzorak, tj. ulazni signal β -grane, napon ili struja, odnosno da li se na ulazu ulazni signal iz generatora signala i povratni signal iz β -grane uspoređuju u serijskoj ili paralelnoj vezi. Na taj način određuje se vrsta povratne veze.

Tablica 5.2 – Postupak analize pojačala s povratnom vezom.

Karakteristika	Vrsta povratne veze			
	Naponska-serijska	Strujna-serijska	Strujna-paralelna	Naponska-paralelna
Uzorak x_{iz}	napon	struja	napon	struja
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 *	$i_{ul} = 0$	$i_{ul} = 0$	$u_{ul} = 0$	$u_{ul} = 0$
$A = x_{iz}/x_a$	$A_V = u_{iz}/u_a$	$G_M = i_{iz}/u_a$	$A_I = i_{iz}/i_a$	$R_M = u_{iz}/i_a$
$\beta = x_f/x_{iz}$	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}	$R_{iz} / (1 + \beta A_V)$	$R_{iz} (1 + \beta G_M)$	$R_{iz} (1 + \beta A_I)$	$R_{iz} / (1 + \beta R_M)$
* Opisani postupak određuje osnovno pojačalo bez povratne veze uz opterećenje elemenata β -grane.				

U drugom koraku pojačalo s povratnom vezom rastavlja se na osnovno pojačalo ili A -granu, te na granu povratne veze ili β -granu. Pri utvrđivanju konfiguracije osnovnog pojačala treba voditi računa kako elementi β -grane opterećuju ulazni i izlazni krug pojačala. Opterećenje β -grane u ulaznom krugu osnovnog pojačala određuje se prekidom povratne veze u izlaznom krugu. Naponska povratna veza prekida se kratkim spajanjem izlaza, tj. s $u_{iz} = 0$, a strujna povratna veza odspajanjem izlaza tj. s $i_{iz} = 0$. Opterećenje β -grane u izlaznom krugu osnovnog pojačala određuje se prekidom povratne veze u ulaznom krugu. To se postiže odspajanjem ulaza ($i_{ul} = 0$) kod serijske povratne veze, odnosno kratkim spajanjem ulaza ($u_{ul} = 0$) kod paralelne povratne veze.

Iz dobivene konfiguracije osnovnog pojačala određuje se pojačanje A -grane. Pri tome treba voditi računa da se za određenu vrstu povratne veze određuje ne bilo koje, već odgovarajuće

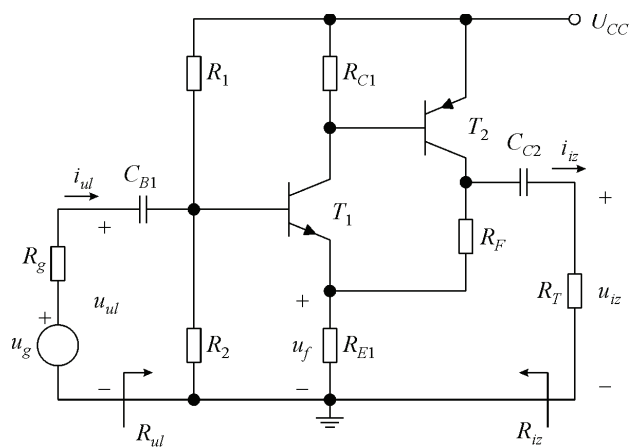
pojačanje prema tablici 5.2. Npr. za naponsku-serijsku povratnu vezu izračunava se naponsko pojačanje A_V . Nakon toga određuje se odgovarajući koeficijent povratne veze β .

Iz poznatih pojačanja A i koeficijenta povratne veze β izračunavaju se karakteristične veličine pojačala s povratnom vezom A_f , R_{ulf} i R_{izf} . Ovim postupkom određuje se samo pojačanje A_f karakteristična za vrstu povratne veze primijenjene kod analiziranog pojačala. Tako se za strujnu-paralelnu povratnu vezu određuje strujno pojačanje A_{If} . Ostala pojačanja određuju se posredno korištenjem pojačanja A_f karakterističnog za tu vrstu povratne veze, te ulaznog otpora R_{ulf} i otpora trošila R_T .

Pojačala s povratnom vezom ne moraju se analizirati primjenom opisanog postupka već se mogu proračunavati na klasičan način pomoću nadomjesne sheme za dinamičku analizu. Opisani postupak u pravilu pojednostavnjuje analizu, posebno u slučajevima kada se osnovno pojačalo sastoji od više stupnjeva pojačala. Osim toga razlaganjem pojačala na osnovno pojačalo i na granu povratne veze i njihovom analizom dobiva se uvid na utjecaj povratne veze na svojstva pojačala: na vezu koeficijenta povratne veze s pojačanjem pojačala s povratnom vezom, na promjenu ulaznog i izlaznog otpora pojačala i slično.

Primjer 5.3

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 5.14. 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 $U_T = 25 \text{ mV}$.



Slika 5.14 – Pojačalo iz primjera 5.3.

Rješenje:

Najprije se provodi statička analiza. Pad napona na otporniku R_{C1} jednak je naponu emiter-baza tranzistora T_2

$$R_{C1} (I_{CQ1} + I_{BQ2}) = -U_{BEQ2}.$$

Zanemarenjem struje I_{BQ2} u odnosu na struju I_{CQ1} iz gornjeg izraza slijedi

$$I_{CQ1} \approx \frac{-U_{BEQ2}}{R_{C1}} = \frac{U_\gamma}{R_{C1}} = \frac{0,7}{1,4} = 0,5 \text{ mA} .$$

Nadomještavanje otpornog djelila s otpornicima R_1 i R_2 u krugu baze tranzistora T_1 daje

$$U_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{CC} = \frac{40}{360 + 40} \cdot 15 = 1,5 \text{ V} ,$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 360 \parallel 40 = 36 \text{ k}\Omega .$$

Za ulazni krug tranzistora T_1 , uz $I_{CQ1} \gg I_{BQ1}$ može se pisati

$$U_{BB} \approx R_B \frac{I_{CQ1}}{\beta} + U_{BEQ1} + R_{E1} (I_{CQ1} - I_{CQ2}) ,$$

odakle se određuje struja kolektora tranzistora T_2

$$\begin{aligned} -I_{CQ2} &= \frac{U_{BB} - U_{BEQ1} - R_B I_{CQ1}/\beta}{R_{E1}} - I_{CQ1} = \frac{U_{BB} - U_\gamma - R_B I_{CQ1}/\beta}{R_{E1}} - I_{CQ1} = \\ &= \frac{1,5 - 0,7 - 36 \cdot 0,5/100}{0,5} - 0,5 = 0,74 \text{ mA} . \end{aligned}$$

Kolektorska struja I_{CQ2} *pnp* tranzistora je negativna. Izlazni naponi tranzistora u statičkoj radnoj točki su

$$U_{CEQ1} = U_{CC} - R_{C1} I_{CQ1} - R_{E1} (I_{CQ1} - I_{CQ2}) = 15 - 1,4 \cdot 0,5 - 0,5 \cdot (0,5 + 0,74) = 13,7 \text{ V} ,$$

$$U_{CC} = -U_{CEQ2} - R_F I_{CQ2} + R_{E1} (I_{CQ1} - I_{CQ2}) ,$$

$$-U_{CEQ2} = U_{CC} + R_F I_{CQ2} - R_{E1} (I_{CQ1} - I_{CQ2}) = 15 - 5 \cdot 0,74 - 0,5 \cdot (0,5 + 0,74) = 10,7 \text{ V} .$$

Naponi $U_{CEQ1} > U_{BEQ1}$ i $U_{CEQ2} < U_{BEQ2}$ i oba tranzistora rade u normalnom aktivnom području.

Ulazni dinamički otpori u statičkoj radnoj točki su

$$r_{be1} = \frac{U_T}{I_{BQ1}} = \frac{\beta U_T}{I_{CQ1}} = \frac{100 \cdot 0,025}{0,5} = 5 \text{ k}\Omega ,$$

$$r_{be2} = \frac{U_T}{-I_{BQ2}} = \frac{\beta U_T}{-I_{CQ2}} = \frac{100 \cdot 0,025}{0,74} = 3,38 \text{ k}\Omega .$$

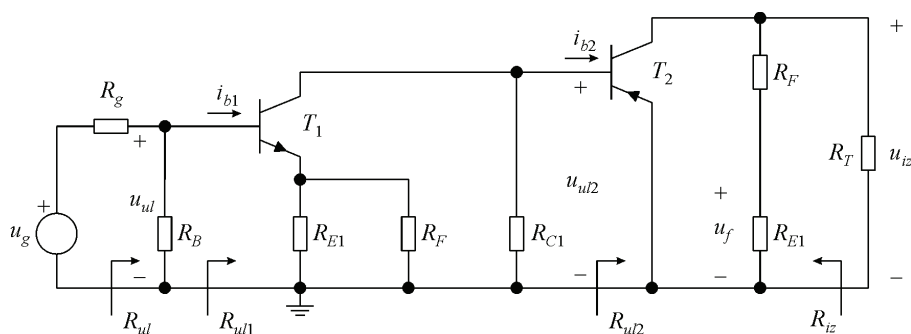
Uz zanemarenje porasta struja kolektora s naponima u_{CE} u normalnom aktivnom području izlazni dinamički otpori $r_{ce} \rightarrow \infty$.

Sklop sa slike 5.14 je pojačalo s povratnom vezom. Povratna veza ostvarena je otpornicima R_F i R_{E1} kojima se dio izlaznog napona u_{iz} vraća na ulaz pojačala. Povratni signal u_f je pad napona na otporniku R_{E1} . Napon u_f uspoređuje s ulaznim naponom pojačala u_{ul} i smanjuje

ulazni napon osnovnog pojačala, tj. napon između baze i emitera tranzistora T_1 . Uzorak je napon, a ulazni napon osnovnog pojačala i povratni signal na ulazu spojeni su serijski, pa je povratna veza naponska-serijska.

U dinamičkoj analizi pojačala koristi se opisani postupak rješavanja pojačala s povratnom vezom. Prvi korak je izdvajanje A -grane ili osnovnog pojačala, pri čemu treba uzeti u obzir opterećenje β -grane u ulaznom i izlaznom krugu. Ulazni krug A -grane određuje se prekidom povratne veze u izlaznom krugu, tj. kratkim spajanjem izlaza ($u_{iz} = 0$). Time se jedan priključak otpornika R_F spaja na masu, pa se u ulaznom krugu otpornik R_F spaja paralelno otporniku R_{E1} u emiteru tranzistora T_1 . Izlazni krug A -grane određuje se prekidom povratne veze u ulaznom krugu, odnosno odspajanjem ulaza. Prekidom ulazne struje pojačala na ulazu se odspaja tranzistor T_1 , pa je u izlaznom krugu između kolektora tranzistora T_2 i mase spojena serijska kombinacija otpornika R_F i R_{E1} .

Slika 5.15 prikazuje A -granu pojačala sa slike 5.14 u dinamičkim prilikama. Prilikom crtanja A -grane čvor napona napajanja spojen je na masu, a kondenzatori C_{B1} i C_{C2} , koji djeluju u području niskih frekvencija, kratko su spojeni.



Slika 5.15 – A -grana pojačala sa slike 5.14 u dinamičkim prilikama.

Osnovno pojačalo je kaskada dva stupnja. Prvi stupanj je pojačalo u spoju zajedničkog emitera s emitterskom degeneracijom, a drugi stupanj je pojačalo u spoju zajedničkog emitera bez emitterske degeneracije.

U tablici 5.2 koristi se stupac za naponsku-serijsku povratnu vezu. Za A -granu računa se naponsko pojačanje

$$A_V = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{u_{iz}}{u_{ul2}} \frac{u_{ul2}}{u_{ul}} = A_{V2} A_{V1},$$

gdje su s A_{V2} i A_{V1} označena naponska pojačanja drugog i prvog stupnja osnovnog pojačala. Prema slici 5.15 vrijedi

$$R_{ul2} = \frac{u_{ul2}}{i_{b2}} = r_{be2} = 3,38 \text{ k}\Omega,$$

$$A_{V2} = \frac{u_{iz}}{u_{ul2}} = -h_{fe} \frac{(R_F + R_{E1}) \parallel R_T}{R_{ul2}} = -100 \cdot \frac{(4,5 + 0,5) \parallel 5}{3,38} = -74,0,$$

$$R_{ul1} = \frac{u_{ul}}{i_{b1}} = r_{be1} + (1 + h_{fe})(R_{E1} \parallel R_F) = 5 + 101 \cdot (0,5 \parallel 4,5) = 50,5 \text{ k}\Omega ,$$

$$A_{V1} = \frac{u_{ul2}}{u_{ul}} = -h_{fe} \frac{R_{C1} \parallel R_{ul2}}{R_{ul1}} = -100 \cdot \frac{1,4 \parallel 3,38}{50,5} = -1,96 ,$$

$$A_V = A_{V2} A_{V1} = -74,0 \cdot (-1,96) = 145 .$$

Koeficijent povratne veze može se odrediti iz izlaznog kruga A -grane

$$\beta = \frac{u_f}{u_{iz}} = \frac{R_{E1}}{R_F + R_{E1}} = \frac{0,5}{4,5 + 0,5} = \frac{1}{10} .$$

Pojačanje u petlji povratne veze βA_V je pozitivno, što znači da je povratna veza negativna.

Naponsko pojačanje pojačala s povratnom vezom je

$$A_{Vf} = \frac{A_V}{1 + \beta A_V} = \frac{145}{1 + 145/10} = 9,35 .$$

Naponska-serijska povratna veza stabilizira naponsko pojačanje. Pojačanje je približno jednako $A_{Vf} \approx 1/\beta$, što znači da je određeno otporima otpornika R_F i R_{E1} i ne ovisi o promjenjivim parametrima tranzistora.

Prema slici 5.14 povratna veza djeluje na ulazu pojačala u emiteru tranzistora i ne djeluje na otpornike R_1 i R_2 otpornog djelila. To znači da povratna veza mijenja ulazni otpor R_{ul1} osnovnog pojačala sa slike 5.15. Za pojačalo s povratnom vezom ulazni otpor R_{ul1f} je

$$R_{ul1f} = R_{ul1}(1 + \beta A_V) = 50,5 \cdot (1 + 145/10) = 783 \text{ k}\Omega .$$

Naponska-serijska povratna veza povećava ulazni otpor R_{ul1} . Ukupni ulazni otpor R_{ul} pojačala s povratnom vezom je

$$R_{ulf} = R_B \parallel R_{ul1f} = 36 \parallel 783 = 34,4 \text{ k}\Omega .$$

Otporno djelilo smanjuje veliki ulazni otpor pojačala s povratnom vezom.

Prema slici 5.15 izlazni otpor A -grane je

$$R_{iz} = R_F + R_{E1} = 4,5 + 0,5 = 5 \text{ k}\Omega .$$

Da bi se odredio izlazni otpor pojačala s povratnom vezom treba izračunati naponsko pojačanje neopterećenog osnovnog pojačala

$$A_v = \lim_{R_T \rightarrow \infty} A_V = A_{V2} A_{V1} ,$$

$$A_{V2} = \lim_{R_T \rightarrow \infty} A_{V2} = -h_{fe} \frac{R_F + R_{E1}}{R_{ul2}} = -100 \cdot \frac{4,5 + 0,5}{3,38} = -148 ,$$

$$A_v = A_{v2} A_{v1} = -148 \cdot (-1,96) = 290.$$

Izlazni otpor pojačala s povratnom vezom je

$$R_{izf} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta A_v} = \frac{5}{1 + 290/10} = 167 \, \Omega.$$

Naponska-serijska povratna veza smanjuje izlazni otpor R_{iz} .

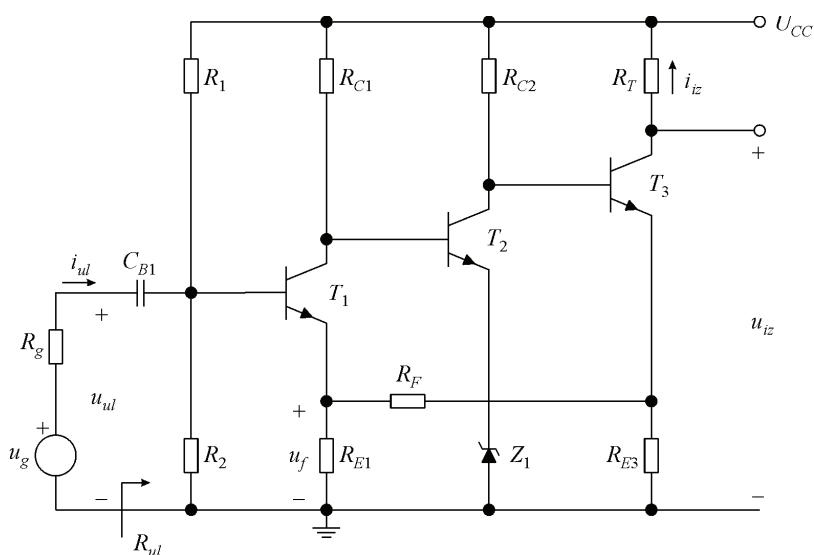
Za pojačalo s naponskom-serijskom povratnom vezom strujno pojačanje A_{If} računa se posredno pomoću naponskog pojačanja A_{Vf}

$$A_{If} = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = \frac{u_{iz}/R_T}{u_{ul}/R_{ulf}} = A_{Vf} \frac{R_{ulf}}{R_T} = 9,35 \cdot \frac{34,4}{5} = 64,3.$$

Naponska-serijska povratna veza ne stabilizira strujno pojačanje pojačala. Naime strujno pojačanje ovisi o otporu trošila R_T , a preko ulaznog otpora R_{ulf} ovisi o parametrima tranzistora.

Primjer 5.4

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 5.16. 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 $U_T = 25 \text{ mV}$.



Slika 5.16 – Pojačalo iz primjera 5.4.

Rješenje:

Prvo se određuju statičke radne točke tranzistora. U emiteru tranzistora T_2 spojena je Zenerova dioda Z_1 . Kada bi bez te diode emiter tranzistora T_2 bio spojen na masu, napon U_{CEQ1} tranzistora T_1 bio bi jednak naponu U_{BEQ2} umanjenom za pad napona na otporniku R_{E1} . Uz tako mali napon U_{CEQ1} tranzistor T_1 radio bi na rubu područja zasićenja ili u zasićenju. Uloga Zenerove diode je da svojim naponom U_Z poveća izlazni napon U_{CEQ1} tranzistora T_1 i pomakne njegovu statičku radnu točku dublje u normalno aktivno područje. Za padove napona na otporniku R_{C1} , spoju baza-emiter tranzistora T_2 i Zenerovoj diodi Z_1 može se pisati

$$U_{CC} = R_{C1}(I_{CQ1} + I_{BQ2}) + U_{BEQ2} + U_Z.$$

Uz zanemarenje struje baze I_{BQ2} u odnosu na struju kolektora I_{CQ1} struja I_{CQ1} jednaka je

$$I_{CQ1} \approx \frac{U_{CC} - U_{BEQ2} - U_Z}{R_{C1}} = \frac{U_{CC} - U_{\gamma} - U_Z}{R_{C1}} = \frac{12 - 0,7 - 3,5}{6} = 1,3 \text{ mA}.$$

Otporno djelilo u krugu baze tranzistora T_1 može se nadomjestiti po Theveninu

$$U_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{CC} = \frac{25}{150 + 25} \cdot 12 = 1,71 \text{ V},$$

$$R_B = R_1 \parallel R_2 = 150 \parallel 25 = 21,4 \text{ k}\Omega.$$

Ako se s I_{RFQ} označi statička struja koja teče kroz otpornik R_F od emitera tranzistora T_3 prema emiteru tranzistora T_1 , te ako se zanemari struja I_{BQ1} u odnosu na struju I_{CQ1} za ulazni krug tranzistora T_1 vrijedi

$$U_{BB} \approx R_B \frac{I_{CQ1}}{\beta} + U_{BEQ1} + R_{E1}(I_{CQ1} + I_{RFQ}),$$

odakle je struja I_{RFQ}

$$I_{RFQ} \approx \frac{U_{BB} - U_{BEQ1} - (R_B/\beta + R_{E1})I_{CQ1}}{R_{E1}} = \frac{1,71 - 0,7 - (21,4/100 + 0,5) \cdot 1,3}{0,5} = 164 \text{ }\mu\text{A}.$$

Izjednačavanjem pada napona na serijskom spoju otpornika R_F i R_{E1} s padom napona na otporniku R_{E3} dobiva se

$$R_F I_{RFQ} + R_{E1}(I_{CQ1} + I_{RFQ}) \approx R_{E3}(I_{CQ3} - I_{RFQ}).$$

U gornjem je izrazu zanemarena struja I_{BQ3} u odnosu na struju I_{CQ3} . Iz te se jednadžbe može izraziti struja I_{CQ3}

$$I_{CQ3} \approx \frac{R_{E1} I_{CQ1} + (R_{E1} + R_F + R_{E3}) I_{RFQ}}{R_{E3}} = \frac{0,5 \cdot 1,3 + (0,5 + 20 + 0,5) \cdot I_{RFQ}}{0,5} = 8,19 \text{ mA}.$$

Struja I_{RFQ} dosta je manja od struje I_{CQ1} , a pogotovo od struje I_{CQ3} . Za padove napona na otporniku R_{C2} , spoju baza-emiter tranzistora T_3 i otporniku R_{E3} vrijedi

$$U_{CC} \approx R_{C2}(I_{CQ2} + I_{BQ3}) + U_{BEQ3} + R_{E3} I_{CQ3},$$

odakle se dobiva struja I_{CQ2}

$$I_{CQ2} \approx \frac{U_{CC} - U_{BEQ2} - (R_{C2}/\beta + R_{E3})I_{CEQ3}}{R_{C2}} = \frac{12 - 0,7 - (4/100 + 0,5) \cdot 8,19}{4} = 1,72 \text{ mA}.$$

Izlazni naponi U_{CEQ} pojedinih tranzistora su

$$U_{CEQ1} \approx U_{CC} - (R_{C1} + R_{E1})I_{CQ1} = 12 - (6 + 0,5) \cdot 1,3 = 3,55 \text{ V},$$

$$U_{CEQ2} \approx U_{CC} - R_{C2} I_{CQ2} - U_Z = 12 - 4 \cdot 1,72 - 3,5 = 1,62 \text{ V},$$

$$U_{CEQ3} \approx U_{CC} - (R_T + R_{E3})I_{CQ3} = 12 - (0,5 + 0,5) \cdot 8,19 = 3,81 \text{ V},$$

Za sva tri napona vrijedi $U_{CEQ} > U_{BEQ}$ i tranzistori rade u normalnom aktivnom području.

Ulazni dinamički otpori u statičkoj radnoj točki su

$$r_{be1} = \frac{U_T}{I_{BQ1}} = \frac{\beta U_T}{I_{CQ1}} = \frac{100 \cdot 0,025}{1,3} = 1,92 \text{ k}\Omega,$$

$$r_{be2} = \frac{U_T}{I_{BQ2}} = \frac{\beta U_T}{I_{CQ2}} = \frac{100 \cdot 0,025}{1,72} = 1,45 \text{ k}\Omega,$$

$$r_{be3} = \frac{U_T}{I_{BQ3}} = \frac{\beta U_T}{I_{CQ3}} = \frac{100 \cdot 0,025}{8,19} = 305 \text{ }\Omega.$$

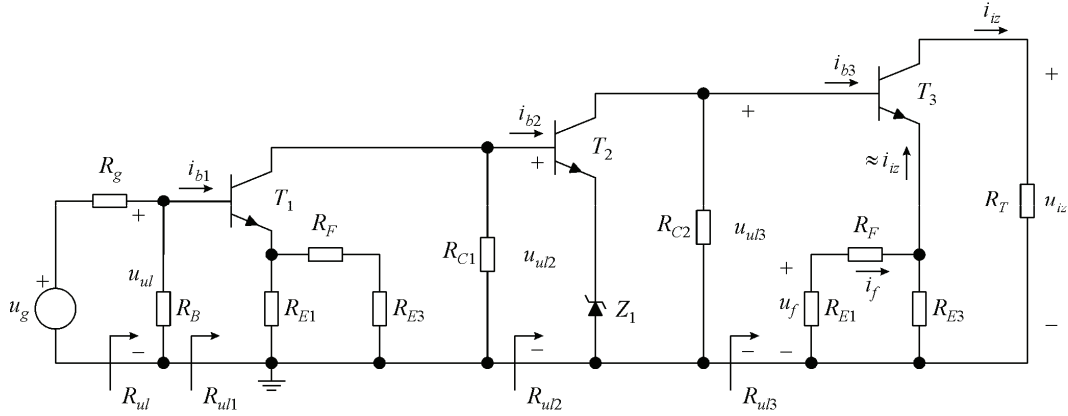
Uz zanemarenje porasta struja kolektora s naponima u_{CE} u normalnom aktivnom području izlazni dinamički otpori $r_{ce} \rightarrow \infty$.

Povratna veza u sklopu sa slike 5.16 ostvarena je otpornicima R_{E3} , R_F i R_{E1} . Zanemarenjem struje baze tranzistora T_3 u emiter tog tranzistora teče izmjenična struja i_{iz} . Ta se struja kao uzorak javlja na ulazu pasivne β -grane sastavljene od otpornika R_{E3} , R_F i R_{E1} . Dio izlaznog signala vraća se preko β -grane na ulaz pojačala. Povratni signal je pad napona u_f na otporniku R_{E1} , koji se uspoređuje s ulaznim naponom pojačala u_{ul} i smanjuje ulazni napon osnovnog pojačala, tj. napon između baze i emitera tranzistora T_1 . Uzorak je struja, a ulazni napon osnovnog pojačala i povratni signal na ulazu uspoređuju se u serijskom spoju, pa je povratna veza strujna-serijska.

Prema opisanom postupku rješavanja pojačala s povratnom vezom, iz pojačala s povratnom vezom treba izdvojiti osnovno pojačalo ili A -granu. Pri tome treba uključiti opterećenje koje β -grana unosi u ulazni i izlazni krug A -grane. Ulazni krug A -grane određuje se prekidom povratne veze u izlaznom krugu, što se kod strujne povratne veze postiže odspajanjem izlaza ($i_{iz} = 0$). Time se odspaja tranzistor T_3 , pa se u uzlaznom krugu u emiteru tranzistora T_1 otpornika R_{E1} paralelno spaja serijski spoj otpornika R_F i R_{E3} . Kod serijske povratne veze izlazni

krug A -grane određuje se prekidom povratne veze u ulaznom krugu, odnosno odspajanjem ulaza. Prekidom ulazne struje pojačala na ulazu se odspaja tranzistor T_1 , čime se u izlaznom krugu u emiteru tranzistora T_3 otporniku R_{E3} paralelno spaja serijski spoj otpornika R_F i R_{E1} .

A -grana pojačala sa slike 5.16 s uključenim opterećenjima β -grane prikazana je na slici 5.17. A -grana je prikazana za dinamičke prilike i dobivena je kratkim spajanjem čvora napona napajanja na masu, te kratkim spajanjem kondenzatora C_{B1} , koji djeluje u području niskih frekvencija. Osnovno pojačalo je kaskada tri stupnja, pri čemu su sva tri stupnja pojačala u spoju zajedničkog emitera s emitterskom degeneracijom.



Slika 5.17 – A -grana pojačala sa slike 5.16 u dinamičkim prilikama.

Prema tablici 5.2 kod pojačala sa strujnom-serijskom povratnom vezom određuje se strminsko pojačanje $G_M = i_{iz}/u_{ul}$ A -grane. Prema slici 5.17 može se pisati

$$G_M = \frac{i_{iz}}{u_{ul}} = \frac{i_{iz}}{u_{iz}} \frac{u_{iz}}{u_{ul3}} \frac{u_{ul3}}{u_{ul2}} \frac{u_{ul2}}{u_{ul}} = \frac{i_{iz}}{u_{iz}} A_{V3} A_{V2} A_{V1}.$$

$$\frac{i_{iz}}{u_{iz}} = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ mA/V}.$$

$$R_{ul3} = \frac{u_{ul3}}{i_{b3}} = r_{be3} + (1 + h_{fe}) \left[(R_F + R_{E1}) \parallel R_{E3} \right] = 0,305 + 101 \cdot \left[(20 + 0,5) \parallel 0,5 \right] = 49,6 \text{ k}\Omega,$$

$$A_{V3} = \frac{u_{iz}}{u_{ul3}} = -h_{fe} \frac{R_T}{R_{ul3}} = -100 \cdot \frac{0,5}{49,6} = -1,01,$$

$$R_{ul2} = \frac{u_{ul2}}{i_{b2}} = r_{be2} + (1 + h_{fe}) r_z = 1,45 + 101 \cdot 0,01 = 2,46 \text{ k}\Omega,$$

$$A_{V2} = \frac{u_{ul3}}{u_{ul2}} = -h_{fe} \frac{R_{C2} \parallel R_{ul3}}{R_{ul2}} = -100 \cdot \frac{4 \parallel 49,6}{2,46} = -150,$$

$$R_{ul1} = \frac{u_{ul}}{i_{b1}} = r_{be1} + (1 + h_{fe}) \left[R_{E1} \parallel (R_F + R_{E3}) \right] = 1,92 + 101 \cdot \left[0,5 \parallel (20 + 0,5) \right] = 51,2 \text{ k}\Omega,$$

$$A_{V1} = \frac{u_{ul2}}{u_{ul}} = -h_{fe} \frac{R_{C1} \parallel R_{ul2}}{R_{ul1}} = -100 \cdot \frac{6 \parallel 2,46}{51,2} = -3,41,$$

$$G_M = \frac{i_{iz}}{u_{iz}} A_{V3} A_{V2} A_{V1} = 2 \cdot (-1,01) \cdot (-150) \cdot (-3,41) = -1033 \text{ mA/V}.$$

Emitorska degeneracija u drugom stupnju pojačala uzrokovana je dinamičkim otporom r_Z Zenerove diode Z_1 . Taj je otpor mali, pa je degeneracija slabo izražena i drugi stupanj ima veliki iznos naponskog pojačanja. Primjenom Zenerove diode u sklopu se podešava određeni istosmjerni pad napona, a pri tome mali dinamički otpor Zenerove diode neznatno smanjuje pojačanje pojačala.

Koeficijent povratne veze β može se odrediti iz izlaznog kruga A -grane sa slike 5.17. Uz veliki faktor strujnog pojačanja h_{fe} tranzistora T_3 u njegov emiter teče izlazna struja, pa vrijedi

$$\beta = \frac{u_f}{i_{iz}} = \frac{u_f}{i_f} \frac{i_f}{i_{iz}} = -R_{E1} \frac{R_{E3}}{R_F + R_{E1} + R_{E3}} = \frac{-0,5 \cdot 0,5}{20 + 0,5 + 0,5} = -\frac{1}{84} \text{ V/mA}.$$

Pojačanje u petlji povratne veze βG_M je pozitivno i povratna veza je negativna.

Strmisko pojačanje pojačala s povratnom vezom je

$$G_{Mf} = \frac{G_M}{1 + \beta G_M} = \frac{-1033}{1 + 1033/84} = -77,7 \text{ mA/V}.$$

Strujna-serijska povratna veza stabilizira strmisko pojačanje pojačala s povratnom vezom. Strmisko pojačanje pojačala, koja je približno jednako $G_{Mf} \approx 1/\beta$, određuju otpori otpornika R_F , R_{E1} i R_{E3} , a ne promjenjivi parametri tranzistora.

Na ulazu pojačala povratna veza djeluje u emiteru tranzistora T_1 , a ne djeluje na otpornike R_1 i R_2 otpornog djelila. Time povratna veza mijenja ulazni otpor R_{ul1} pojačala sa slike 5.17. Za pojačalo s povratnom vezom ulazni otpor R_{ul1f} je

$$R_{ul1f} = R_{ul} (1 + \beta G_M) = 52,1 \cdot (1 + 1033/84) = 693 \text{ k}\Omega.$$

Strujna-serijska povratna veza povećava ulazni otpor R_{ul1} . Ukupni ulazni otpor R_{ul} pojačala s povratnom vezom

$$R_{ulf} = R_B \parallel R_{ul1f} = 21,4 \parallel 693 = 20,8 \text{ k}\Omega.$$

smanjuje otporno djelilo.

Naponsko i strujno pojačanje A_{Vf} i A_{If} pojačala sa strujnom-serijskom povratnom vezom računaju se posredno pomoću strmiskog pojačanja G_{Mf}

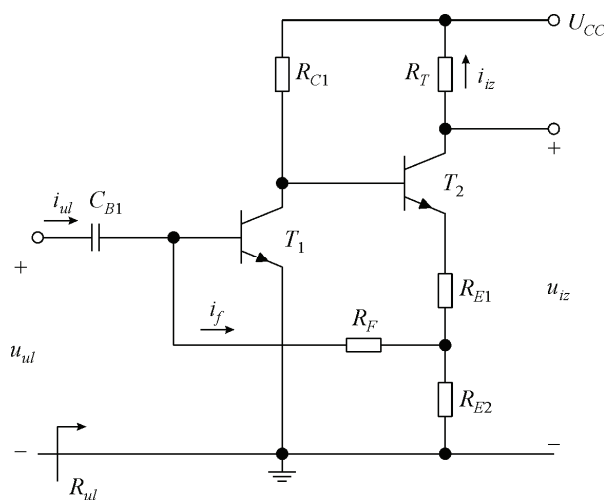
$$A_{Vf} = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{i_{iz} R_T}{u_{ul}} = G_{Mf} R_T = -7,77 \cdot 0,5 = -3,89,$$

$$A_{If} = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = \frac{i_{iz}}{u_{ul}/R_{ulf}} = G_{Mf} R_{ulf} = -7,77 \cdot 20,8 = -162.$$

Strujna-serijska povratna veza ne stabilizira naponsko i strujno pojačanje pojačala. Ta su pojačanja ovisna o otporu trošila R_T i o parametrima tranzistora.

Primjer 5.5

Primjenom postupka za analizu pojačala s povratnom vezom odrediti pojačanja $A_{vf} = u_{iz}/u_{ul}$ i $A_{if} = i_{iz}/i_{ul}$, te otpor R_{ulf} pojačala na slici 5.18. Analizu provesti u području srednjih frekvencija. Zadano je: $U_{CC} = 15 \text{ V}$, $R_{C1} = 6 \text{ k}\Omega$, $R_F = 15 \text{ k}\Omega$, $R_{E1} = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{E2} = 500 \Omega$ 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 $U_T = 25 \text{ mV}$.



Slika 5.18 – Pojačalo iz primjera 5.5.

Rješenje:

Najprije se provodi statička analiza pojačala. Zbog velikog faktora strujnog pojačanja β za oba tranzistora vrijedi $I_{BQ} + I_{CQ} \approx I_{CQ}$. Analizom sklopa mogu se pisati slijedeće jednačbe

$$U_{BEQ1} \approx -R_F \frac{I_{CQ1}}{\beta} + R_{E2} I_{CQ2},$$

$$U_{CC} \approx R_{C1} I_{CQ1} + U_{BEQ2} + (R_{E1} + R_{E2}) I_{CQ2}.$$

Iz prve jednačbe je

$$I_{CQ2} \approx \frac{U_{BEQ1} + R_F I_{CQ1}/\beta}{R_{E2}},$$

što uvršteno u drugu jednačbu daje

$$U_{CC} \approx R_{C1} I_{CQ1} + U_{BEQ2} + \frac{R_{E1} + R_{E2}}{R_{E2}} \left(U_{BEQ1} + R_F \frac{I_{CQ1}}{\beta} \right).$$

Uz $U_{BEQ1} = U_{BEQ2} = U_\gamma$, iz gornjeg izraza može se odrediti struja I_{CQ1}

$$I_{CQ1} \approx \frac{U_{CC} - U_\gamma \left(1 + \frac{R_{E1} + R_{E2}}{R_{E2}} \right)}{\frac{R_{E1} + R_{E2}}{R_{E2}} \frac{R_F}{\beta} + R_{C1}} = \frac{15 - 0,7 \cdot \left(1 + \frac{1 + 0,5}{0,5} \right)}{\frac{1 + 0,5}{0,5} \cdot \frac{15}{100} + 6} = 1,89 \text{ mA}.$$

Struja I_{CQ2} je

$$I_{CQ2} \approx \frac{U_\gamma + R_F I_{CQ1} / \beta}{R_{E2}} = \frac{0,7 + 15 \cdot 1,89 / 100}{0,5} = 1,97 \text{ mA}.$$

Izlazni naponi U_{CEQ} tranzistora su

$$U_{CEQ1} \approx U_{CC} - R_{C1} I_{CQ1} = 15 - 6 \cdot 1,89 = 3,66 \text{ V},$$

$$U_{CEQ2} \approx U_{CC} - (R_T + R_{E1} + R_{E2}) I_{CQ2} = 15 - (2 + 1 + 0,5) \cdot 1,97 = 8,11 \text{ V},$$

Za oba napona vrijedi $U_{CEQ} > U_{BEQ}$, pa tranzistori rade u normalnom aktivnom području.

Ulazni dinamički otpori u statičkoj radnoj točki su

$$r_{be1} = \frac{U_T}{I_{BQ1}} = \frac{\beta U_T}{I_{CQ1}} = \frac{100 \cdot 0,025}{1,89} = 1,32 \text{ k}\Omega,$$

$$r_{be2} = \frac{U_T}{I_{BQ2}} = \frac{\beta U_T}{I_{CQ2}} = \frac{100 \cdot 0,025}{1,97} = 1,27 \text{ k}\Omega.$$

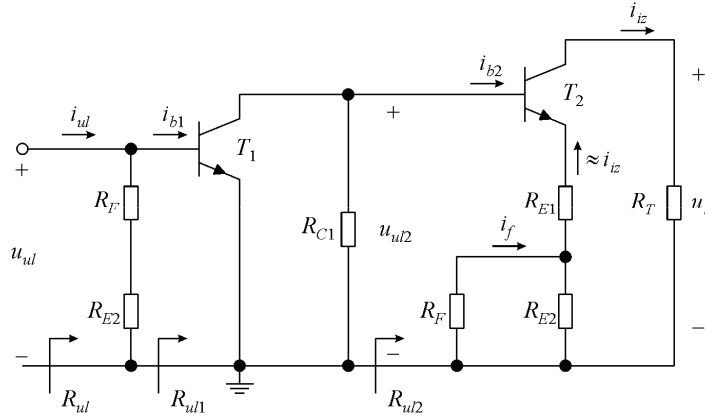
Uz zanemarenje porasta struja kolektora s naponima u_{CE} u normalnom aktivnom području izlazni dinamički otpori $r_{ce} \rightarrow \infty$.

U pojačalu sa slike 5.18 povratna veza ostvarena je otpornicima R_{E2} i R_F . Ako se zanemari struje baze tranzistora T_2 u emiter tog tranzistora teče izmjenična izlazna struja i_{iz} , koja je uzorak na ulazu pasivne β -grane sastavljene od otpornika R_{E2} i R_F . Povratni signal je struja i_f koja teče kroz otpornik R_F od baze tranzistora T_1 prema spoju s otpornicima R_{E1} i R_{E2} . Ta se struja uspoređuje s ulaznom strujom pojačala i_{ul} i smanjuje struju baze i_{b1} tranzistora T_1 , koja je ulazna struja osnovnog pojačala. Uzorak je struja, a ulazna struja osnovnog pojačala i povratni signal na ulazu uspoređuju se u paralelnom spoju, pa je povratna veza strujna-paralelna.

Dinamička analiza započinje izdvajanjem osnovnog pojačala ili A -grane iz pojačala s povratnom vezom sa slike 5.18. U ulaznom i izlaznom krugu A -grane treba uključiti opterećenje koje unosi β -grana. Ulazni krug A -grane određuje se prekidom povratne veze u izlaznom krugu, odnosno odspajanjem izlaza ($i_{iz} = 0$). Time se odspaja tranzistor T_2 i prekida se njegova struja, pa se u ulaznom krugu između baze tranzistora T_1 i mase javlja serijska kombinacija otpornika R_F i R_{E2} . Izlazni krug A -grane određuje se prekidom povratne veze u ulaznom krugu, što se Kod

paralelne povratne veze postiže kratkim spajanjem ulaza. Time se u izlaznom krugu u emiteru tranzistora T_2 otporniku R_{E2} paralelno spaja otpornik R_F .

Slika 5.19 prikazuje A -granu pojačala sa slike 5.18 s uključenim opterećenjima β -grane. Shema na slici 5.19 vrijedi za dinamičke prilike i dobivena je kratkim spajanjem čvora napona napajanja na masu, te kratkim spajanjem kondenzatora C_{B1} , koji djeluje u području niskih frekvencija. Osnovno pojačalo je kaskada dva stupnja, od kojih je prvi stupanj pojačalo u spoju zajedničkog emitera bez emitterske degeneracije, a drugi stupanj je pojačalo u spoju zajedničkog emitera s emitterskom degeneracijom.



Slika 5.19 – A -grana pojačala sa slike 5.18 u dinamičkim prilikama.

Za pojačalo sa strujnom-paralelnom povratnom vezom određuje se strujno pojačanje $A_I = i_{iz}/i_{ul}$ A -grane. Analizom sheme sa slike 5.19. dobiva se

$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = \frac{i_{iz}}{i_{b2}} \frac{i_{b2}}{i_{b1}} \frac{i_{b1}}{i_{ul}}.$$

$$\frac{i_{iz}}{i_{b2}} = -h_{fe} = -100.$$

$$R_{ul2} = \frac{u_{ul2}}{i_{b2}} = r_{be2} + (1 + h_{fe})[R_{E1} + R_F \parallel R_{E2}] = 1,27 + 101 \cdot [1 + 20 \parallel 0,5] = 152 \text{ k}\Omega,$$

$$\frac{i_{b2}}{i_{b1}} = -h_{fe} \frac{R_{C1}}{R_{C1} + R_{ul2}} = -100 \cdot \frac{6}{6 + 152} = -3,80,$$

$$R_{ul1} = \frac{u_{ul1}}{i_{b1}} = r_{be1} = 1,32 \text{ k}\Omega,$$

$$\frac{i_{b1}}{i_{ul}} = \frac{R_F + R_{E2}}{R_F + R_{E2} + R_{ul1}} = \frac{15 + 0,5}{15 + 0,5 + 1,32} = 0,922,$$

$$A_I = \frac{i_{iz}}{i_{b2}} \frac{i_{b2}}{i_{b1}} \frac{i_{b1}}{i_{ul}} = -100 \cdot (-3,80) \cdot 0,922 = 350.$$

Koeficijent povratne veze β može se odrediti iz izlaznog kruga A -grane sa slike 5.19. Uz veliki faktor strujnog pojačanja h_{fe} tranzistora T_2 u njegov emiter teče struja i_{iz} , pa vrijedi

$$\beta = \frac{i_f}{i_{iz}} = \frac{R_{E2}}{R_F + R_{E2}} = \frac{0,5}{15 + 0,5} = \frac{1}{31}.$$

Pojačanje u petlji povratne veze βA_I je pozitivno i povratna veza je negativna.

Strujno pojačanje pojačala s povratnom vezom je

$$A_{If} = \frac{A_I}{1 + \beta A_I} = \frac{350}{1 + 350/31} = 28,5.$$

Strujna-serijska povratna veza stabilizira strujno pojačanje pojačala s povratnom vezom, koje je približno jednako $A_{If} \approx 1/\beta$. Pojačanje A_{If} je stabilizirano, jer ga određuju otpori otpornika R_F i R_{E2} , a ne promjenjivi parametri tranzistora.

Ulazni otpor A -grane je

$$R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = (R_F + R_{E2}) \parallel R_{ul1} = (15 + 0,5) \parallel 1,32 = 1,22 \text{ k}\Omega,$$

a ulazni otpor pojačala s povratnom vezom je

$$R_{ulf} = \frac{R_{ul}}{1 + \beta A_I} = \frac{1,22}{1 + 350/31} = 99,3 \text{ }\Omega.$$

Strujna-paralelna povratna veza smanjuje ulazni otpor R_{ul} .

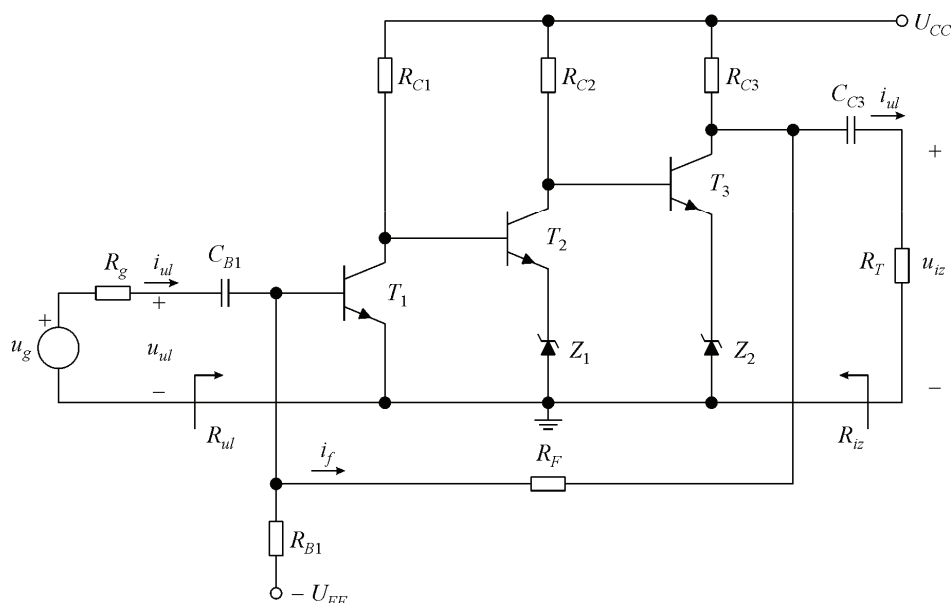
Naponsko pojačanje A_{Vf} pojačala sa stujnom-paralelnom povratnom vezom može se odrediti posredno pomoću strujnog pojačanja A_{If}

$$A_{Vf} = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{i_{iz} R_T}{i_{ul} R_{ulf}} = A_{If} \frac{R_T}{R_{ulf}} = 28,5 \cdot \frac{2}{0,0993} = 574.$$

Strujna-paralelna povratna veza ne stabilizira naponsko pojačanje pojačala, koje ovisi o otporu trošila R_T i preko otpora R_{ulf} o parametrima tranzistora.

Primjer 5.6

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 5.20. 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 $R_T = 3 \text{ k}\Omega$. 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 $r_{Z1} = r_{Z2} = 10 \text{ }\Omega$. Naponski ekvivalent temperature $U_T = 25 \text{ mV}$.



Slika 5.20 – Pojačalo iz primjera 5.6.

Rješenje:

Slično kao i u pojačalu sa slike 5.16, Zenerove diode Z_1 i Z_2 osiguravaju veće napone U_{CEQ1} i U_{CEQ2} tranzistora T_1 i T_2 , odnosno veće hodove signala u izlaznim karakteristikama tih tranzistora. Za padove napona u granama s otpornikom R_{C1} i diodom Z_1 , odnosno s otpornikom R_{C2} i diodom Z_2 vrijedi

$$U_{CC} = R_{C1}(I_{CQ1} + I_{BQ2}) + U_{BEQ1} + U_{Z1},$$

$$U_{CC} = R_{C2}(I_{CQ2} + I_{BQ3}) + U_{BEQ2} + U_{Z2}.$$

Zanemarenjem struja I_{BQ2} u prvoj i I_{BQ3} u drugoj jednačbi iz gornjih se određuju struje I_{CQ1} i I_{CQ2}

$$I_{CQ1} \approx \frac{U_{CC} - U_{BEQ1} - U_{Z1}}{R_{C1}} = \frac{U_{CC} - U_{\gamma} - U_{Z1}}{R_{C1}} = \frac{12 - 0,7 - 3}{8} = 1,04 \text{ mA},$$

$$I_{CQ2} \approx \frac{U_{CC} - U_{BEQ2} - U_{Z2}}{R_{C2}} = \frac{U_{CC} - U_{\gamma} - U_{Z2}}{R_{C2}} = \frac{12 - 0,7 - 6}{3} = 1,77 \text{ mA}.$$

Statička struja koja teče kroz otpornik R_{B1} od baze tranzistora T_1 prema negativnom naponu napajanja $-U_{EE}$ je

$$I_{RB1Q} = \frac{U_{BEQ1} - (-U_{EE})}{R_{B1}} = \frac{U_{\gamma} + U_{EE}}{R_{B1}} = \frac{0,7 + 12}{15} = 847 \text{ } \mu\text{A},$$

pa je struja koja teče kroz otpornik R_F od kolektora tranzistora T_3 bazi tranzistora T_1 jednaka

$$I_{RFQ} = I_{RB1Q} + I_{BQ1} = I_{RB1Q} + I_{CQ1}/\beta = 847 + 1040/100 = 857 \mu\text{A}.$$

Ta struja određuje istosmjerni potencijal kolektora tranzistora T_3

$$U_{CQ3} = U_{BEQ1} + R_F I_{RFQ} = U_\gamma + R_F I_{RFQ} = 0,7 + 10 \cdot 0,857 = 9,27 \text{ V}.$$

Iz izraza za pad napona na otporniku R_{C3}

$$U_{CC} - U_{CQ3} = R_{C3} (I_{CQ3} + I_{RFQ}),$$

određuje se struja I_{CQ3}

$$I_{CQ3} = \frac{U_{CC} - U_{CQ3}}{R_{C3}} - I_{RFQ} = \frac{12 - 9,27}{1} - 0,857 = 1,87 \text{ mA},$$

Izlazni naponi U_{CEQ} tranzistora su

$$U_{CEQ1} \approx U_{CC} - R_{C1} I_{CQ1} = 12 - 8 \cdot 1,04 = 3,68 \text{ V},$$

$$U_{CEQ2} \approx U_{CC} - R_{C2} I_{CQ2} - U_{Z1} = 12 - 3 \cdot 1,77 - 3 = 3,69 \text{ V},$$

$$U_{CEQ2} = U_{CQ3} - U_{Z2} = 9,27 - 6 = 3,27 \text{ V},$$

Za sva tri napona vrijedi $U_{CEQ} > U_{BEQ}$ i tranzistori rade u normalnom aktivnom području.

Ulazni dinamički otpori u statičkoj radnoj točki su

$$r_{be1} = \frac{U_T}{I_{BQ1}} = \frac{\beta U_T}{I_{CQ1}} = \frac{100 \cdot 0,025}{1,04} = 2,40 \text{ k}\Omega,$$

$$r_{be2} = \frac{U_T}{I_{BQ2}} = \frac{\beta U_T}{I_{CQ2}} = \frac{100 \cdot 0,025}{1,77} = 1,41 \text{ k}\Omega,$$

$$r_{be3} = \frac{U_T}{I_{BQ3}} = \frac{\beta U_T}{I_{CQ3}} = \frac{100 \cdot 0,025}{1,87} = 1,34 \text{ k}\Omega.$$

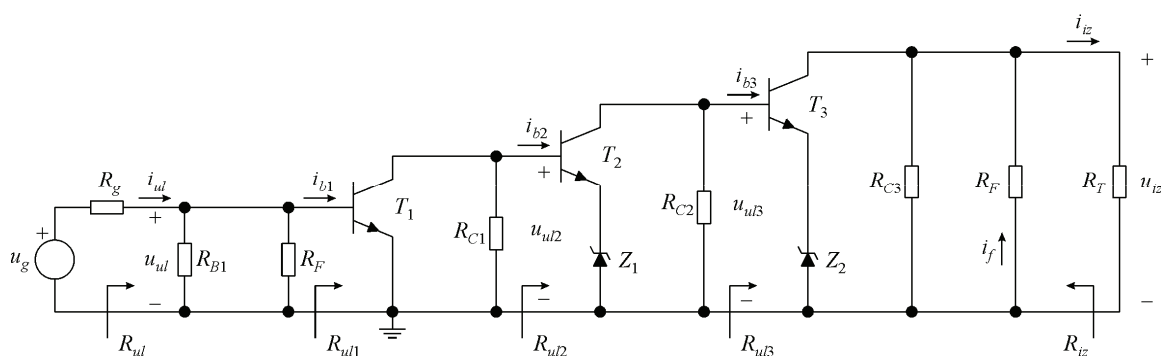
Uz zanemarenje porasta struja kolektora s naponima u_{CE} u normalnom aktivnom području izlazni dinamički otpori $r_{ce} \rightarrow \infty$.

U pojačalu sa slike 5.20 povratna veza ostvarena je otpornikom R_F , koji predstavlja pasivnu β -granu. Uzorak na ulazu β -grane je izlazni napon u_{iz} , a povratni signal je struja i_f koja teče kroz otpornik R_F od baze tranzistora T_1 prema kolektoru tranzistora T_2 . Struja i_f uspoređuje se s ulaznom strujom pojačala i_{ul} i smanjuje ulaznu struju osnovnog pojačala, tj. struju baze i_{b1} tranzistora T_1 . Kako je uzorak napon, a ulazna struja osnovnog pojačala i povratni signal na ulazu uspoređuju se u paralelnom spoju, povratna veza je naponska-paralelna.

Prvi korak u dinamičkoj analizi je izdvajanje osnovnog pojačala ili A -grane iz pojačala s povratnom vezom sa slike 5.20, pri čemu u ulaznom i izlaznom krugu A -grane treba uključiti opterećenje koje unosi β -grana. Ulazni krug A -grane određuje se prekidom povratne veze u

izlaznom krugu. Za naponsku povratnu vezu to se postiže kratkim spajanjem izlaza. čime se u ulaznom krugu otpornik R_F spaja između baze tranzistora T_1 i mase. Izlazni krug A -grane određuje se prekidom povratne veze u ulaznom krugu. Kod paralelne povratne veze postiže kratkim spajanjem ulaza, pa se u izlaznom krugu otpornik R_F spaja između kolektora tranzistora T_3 i mase.

A -granu pojačala sa slike 5.20 prikazana je na slici 5.21. To je shema za dinamičke prilike i dobivena je kratkim spajanjem čvorova napona napajanja U_{CC} i $-U_{EE}$ na masu, te kratkim spajanjem kondenzatora C_{B1} i C_{C3} , koji djeluju u području niskih frekvencija. Osnovno pojačalo je kaskada tri stupnja, od kojih je prvi stupanj pojačalo u spoju zajedničkog emitera bez emitorske degeneracije, a druga dva stupnja su pojačala u spoju zajedničkog emitera s emitorskom degeneracijom. Emitorska degeneracija u ta dva stupnja je posljedica malih dinamičkih otpora Zenerovih dioda spojenih u emiterima tranzistora T_2 i T_3 .



Slika 5.21 – A -grana pojačala sa slike 5.20 u dinamičkim prilikama.

Za pojačalo sa naponskom-paralelnom povratnom vezom za A -granu računa se otporno pojačanje $R_M = u_{iz}/i_{ul}$ A -grane. Za shemu na slici 5.21. vrijedi

$$R_M = \frac{u_{iz}}{i_{ul}} = \frac{u_{iz}}{u_{ul3}} \frac{u_{ul3}}{u_{ul2}} \frac{u_{ul2}}{u_{ul}} \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = A_{V3} A_{V2} A_{V1} R_{ul} .$$

$$R_{ul3} = \frac{u_{ul3}}{i_{b3}} = r_{be3} + (1 + h_{fe}) r_{Z2} = 1,34 + 101 \cdot 0,01 = 2,35 \text{ k}\Omega ,$$

$$A_{V3} = \frac{u_{iz}}{u_{ul3}} = -h_{fe} \frac{R_{C3} \parallel R_F \parallel R_T}{R_{ul3}} = -100 \cdot \frac{1 \parallel 10 \parallel 3}{2,35} = -29,7 .$$

$$R_{ul2} = \frac{u_{ul2}}{i_{b2}} = r_{be2} + (1 + h_{fe}) r_{Z1} = 1,41 + 101 \cdot 0,01 = 2,42 \text{ k}\Omega ,$$

$$A_{V2} = \frac{u_{ul3}}{u_{ul2}} = -h_{fe} \frac{R_{C2} \parallel R_{ul3}}{R_{ul2}} = -100 \cdot \frac{3 \parallel 2,35}{2,42} = -54,5 .$$

$$R_{ul1} = \frac{u_{ul}}{i_{b1}} = r_{be1} = 2,40 \text{ k}\Omega ,$$

$$A_{V1} = \frac{u_{ul2}}{u_{ul}} = -h_{fe} \frac{R_{C1} \parallel R_{ul2}}{R_{ul1}} = -100 \cdot \frac{8 \parallel 2,42}{2,40} = -77,4.$$

$$R_{ul} = \frac{u_{ul}}{i_{ul}} = R_{B1} \parallel R_F \parallel R_{ul1} = 15 \parallel 10 \parallel 2,40 = 1,71 \text{ k}\Omega,$$

$$R_M = A_{V3} A_{V2} A_{V1} R_{ul} = -29,7 \cdot (-54,5) \cdot (-77,4) \cdot 1,71 = -214 \cdot 10^3 \text{ V/mA}.$$

Koeficijent povratne veze β određuje se iz izlaznog kruga A -grane

$$\beta = \frac{i_f}{u_{iz}} = -\frac{1}{R_F} = -\frac{1}{10} \text{ mA/V}.$$

Pojačanje u petlji povratne veze βR_M je pozitivan i povratna veza je negativna.

Otporno pojačanje pojačala s povratnom vezom je

$$R_{Mf} = \frac{R_M}{1 + \beta R_M} = \frac{-214 \cdot 10^3}{1 + 214 \cdot 10^3 / 10} = -10 \text{ V/mA}.$$

Strujna-serijska povratna veza stabilizira otporno pojačanje pojačala s povratnom vezom. Pojačanje $R_{Mf} = 1/\beta$ određeno je otporom otpornika R_F i ne ovisi o promjenjivim parametrima tranzistora.

Ulazni otpor pojačala s povratnom vezom je

$$R_{ulf} = \frac{R_{ul}}{1 + \beta R_M} = \frac{1,71}{1 + 214 \cdot 10^3 / 10} = 80 \text{ m}\Omega.$$

Naponska-paralelna povratna veza smanjuje ulazni otpor R_{ul} . Zbog vrlo jake povratne veze ulazni otpor R_{ulf} je vrlo mali.

Izlazni otpor osnovnog pojačala je

$$R_{iz} = R_{C3} \parallel R_F = 1 \parallel 10 = 909 \text{ }\Omega.$$

Za dobivanje izlaznog otpora pojačala s povratnom vezom treba odrediti otporno pojačanje neopterećenog osnovnog pojačala.

$$R_m = \lim_{R_P \rightarrow \infty} R_M = A_{V3} A_{V2} A_{V1} R_{ul}.$$

$$A_{V3} = \lim_{R_P \rightarrow \infty} A_{V3} = -h_{fe} \frac{R_{C3} \parallel R_F}{R_{ul3}} = -100 \cdot \frac{1 \parallel 10}{2,35} = -38,7.$$

$$R_m = A_{V3} A_{V2} A_{V1} R_{ul} = -38,7 \cdot (-54,5) \cdot (-77,4) \cdot 1,71 = -279 \cdot 10^3 \text{ V/mA}.$$

Izlazni otpor pojačala s povratnom vezom je

$$R_{izf} = \frac{R_{iz}}{1 + \beta R_m} = \frac{909}{1 + 279 \cdot 10^3 / 10} = 33 \text{ m}\Omega .$$

Naponska-paralelna povratna veza smanjuje izlazni otpor R_{iz} . Izlazni otpor R_{izf} je vrlo mali zbog vrlo jake povratne veze.

Naponsko i strujno pojačanje A_{vf} i A_{if} pojačala sa naponskom-paralelnom povratnom određuje se posredno pomoću otpornog pojačanja R_{Mf}

$$A_{vf} = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} = \frac{u_{iz}}{i_{ul} R_{ulf}} = \frac{R_{Mf}}{R_{ulf}} = - \frac{10 \cdot 10^3}{80 \cdot 10^{-3}} = -125 \cdot 10^3 ,$$

$$A_{if} = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} = \frac{u_{iz}/R_T}{i_{ul}} = \frac{R_{Mf}}{R_T} = - \frac{10}{3} = -3,33 .$$

Naponska-paralelna povratna veza ne stabilizira naponsko i strujno pojačanje pojačala. Ta su pojačanja ovisna o otporu trošila R_T , a preko otpora R_{ulf} ovisna su i o parametrima tranzistora.
