

POVRATNA SPREGA

Pojam povratne sprege ima dva osnovna sadržaja:

Povratna sprege predstavlja **tehniku projektovanja** kojom se modifikuju karakteristike kola u cilju realizacije željenih karakteristika.

Povratna sprege takođe predstavlja **analitički metod** kojim se ispituje uticaj nekog parametra kola na funkcije kola.

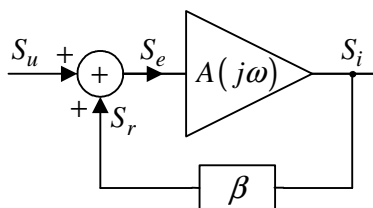
Povratna sprege kao tehnika projektovanja zasniva se na odmeravanju odziva kola na pobudni signal i dovođenju skaliranog odmerenog izlaznog signala na ulaz kola zajedno sa pobudnim signalom.

Avg.08.

IR20AE Željko Aleksić

1

Blok – šema kola sa povratnom spregom:



$$S_i = A(j\omega) \cdot S_e = A(j\omega) \cdot (S_u + S_r)$$

$$S_i = A(j\omega) \cdot (S_u + \beta \cdot S_i)$$

↑ ↑
unilateralni blokovi (prenos samo u jednom smeru)

$$A_r(j\omega) = \frac{S_i}{S_u} = \frac{A(j\omega)}{1 - \beta A(j\omega)}$$

$A(j\omega)$ ← pojačanje bez povratne sprege ↖ "Blekova formula"

β [ili $\beta(j\omega)$] ← faktor povratne sprege (projektuje se tako da ima stabilnu vrednost, najčešće pasivno kolo sa R i eventualno C)

$A_r(j\omega)$ ← pojačanje sa povratnom spregom

$F(j\omega) = 1 - \beta A(j\omega)$ ← funkcija povratne sprege

$\beta A(j\omega)$ ← kružno pojačanje

Avg.08.

IR20AE Željko Aleksić

2

$$|A_r(j\omega)| = \frac{|A(j\omega)|}{|1 - \beta A(j\omega)|} = \frac{|A(j\omega)|}{|F(j\omega)|}$$

$|F(j\omega)| > 1 \Rightarrow |A_r(j\omega)| < |A(j\omega)|$ ← negativna povratna sprega

$|F(j\omega)| < 1 \Rightarrow |A_r(j\omega)| > |A(j\omega)|$ ← pozitivna povratna sprega

$$A_r = \frac{A}{1 - \beta A} \Rightarrow \frac{dA_r}{dA} = \frac{1 \cdot (1 - \beta A) - A \cdot (-\beta)}{(1 - \beta A)^2} = \frac{1}{(1 - \beta A)^2} \Rightarrow dA_r = \frac{dA}{(1 - \beta A)^2}$$

Uticaj povratne sprega na stabilnost pojačanja (u odnosu na varijacije parametara od kojih zavisi):

$$\frac{dA_r}{A_r} = \frac{1 - \beta A}{A} \cdot \frac{dA}{(1 - \beta A)^2} = \frac{dA}{A} \cdot \frac{1}{1 - \beta A}$$

povratna sprega smanjuje relativnu varijaciju pojačanja onoliko puta koliko iznosi funkcija povratne sprega

negativna povratna sprega smanjuje relativne varijacije pojačanja, a pozitivna ih povećava

Avg.08. IR20AE Željko Aleksić 3

Smanjenje nelinearnih izobličenja:

Smanjenje relativne varijacije pojačanja ne zavisi od uzroka zbog kojeg dolazi do promene. Pošto je pojačanje nagib prenosne karakteristike $s_I = f(s_U)$, smanjenje relativne varijacije pojačanja, prema izvedenom $\frac{dA_r}{A_r} = \frac{dA}{A} \cdot \frac{1}{1 - \beta A}$ izrazu, predstavlja i linearizaciju prenosne karakteristike, odnosno smanjenje nelinearnih izobličenja.

Pojačavač bez povratne sprega Pojačavač sa negativnom povr. spregom

Avg.08. IR20AE Željko Aleksić 4

Negativna povratna sprega poboljšava i druge karakteristike pojačavača

Širi propusni opseg:

Za pojačavač bez povratne sprege, sa jednom vremenskom konstantom (jednom frekventno zavisnom impedansom), čije pojačanje sa povećanjem učestanosti opada, pojačanje je oblika

$$A(j\omega) = \frac{A(0)}{1 + j\omega/\omega_g}, \text{ gde je } \omega_g \text{ granična učestanost, tj. učestanost na}$$

kojoj je kvadrat modula pojačanja (snaga) upola manji nego na niskim učestanostima. Kada se primeni povratna sprega

$$A_r(j\omega) = \frac{\frac{A(0)}{1 + j\omega/\omega_g}}{1 - \beta \frac{A(0)}{1 + j\omega/\omega_g}} = \frac{A(0)}{1 - \beta A(0)} \frac{1}{1 + \frac{j\omega}{\omega_g [1 - \beta A(0)]}} = \frac{A_r(0)}{1 + \frac{j\omega}{\omega_{gr}}},$$

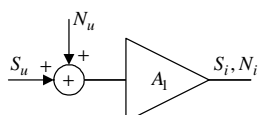
tj. granična učestanost je $1 - \beta A(0)$ puta veća.

Avg.08.

IR20AE Željko Aleksić

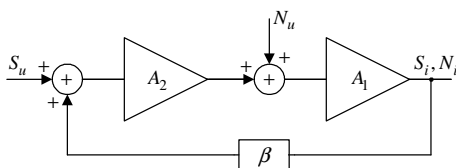
5

Potiskivanje smetnji ukoliko njihov izvor nije na ulazu pojačavača sa negativnom povratnom spregom:



$$\leftarrow \frac{S_i}{N_i} = \frac{S_u}{N_u} \quad \leftarrow \text{signal}$$

$$\leftarrow \text{smetnja}$$



$$\leftarrow \frac{S_i}{N_i} = \frac{S_u \frac{A_2 A_1}{1 - \beta A_2 A_1}}{N_u \frac{A_1}{1 - \beta A_2 A_1}} = A_2 \frac{S_u}{N_u}$$

(koristi se npr. za eliminaciju brujanja iz izvora napajanja pojačavača snage)

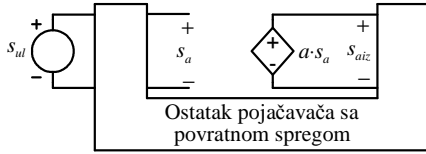
Avg.08.

IR20AE Željko Aleksić

6

Određivanje povratnog odnosa i pojačanja sa povratnom spregom

U opštem slučaju pojačavača blokovi A i β nisu unilateralni četvorpoli, a petlja povratne spregu ne obuhvata ceo pojačavač od ulaza do izlaza. Opštiji model pojačavača koji ima povratnu spregu u odnosu na neki idealni zavisni generator $a \cdot s_a$ u ekvivalentnoj šemi kola je:



Za linearno kolo ostatka pojačavača sa povratnom spregom može da se napiše:

$$\begin{aligned} s_{iz} &= A_d \cdot s_{ul} + A_2 \cdot s_{aiz} \\ s_a &= A_1 \cdot s_{ul} + A_{inv} \cdot s_{aiz} \end{aligned}$$

Pojačanje sa povratnom spregom može da se dobije rešavanjem datih jednačina uz uslov $s_{aiz} = a \cdot s_a$. Rešavanjem se dobija:

$$A_r = \frac{s_{iz}}{s_{ul}} = \frac{A_1 \cdot a \cdot A_2}{1+T} + A_d \quad \text{gde je } T = -a \cdot A_{inv}$$

Uvođenjem $A_\infty = A_r \Big|_{T \rightarrow \infty} = \frac{A_1 \cdot a \cdot A_2}{T} + A_d$

ovo može da se napiše u obliku

$$A_r = A_\infty \frac{T}{1+T} + \frac{A_d}{1+T}$$

A_1 i A_d su pojačanja od ulaznog generatora do kontrolnog ulaza zavisnog generatora i do izlaza celog pojačavača, pri $s_{aiz} = 0$, dakle pri $a = 0$. A_{inv} i A_2 se određuju pri $s_{ul} = 0$ i predstavljaju pojačanja od priključaka signala s_{aiz} do kontrolnog ulaza zavisnog generatora odnosno do izlaza celog pojačavača. Proizvod $-a \cdot A_{inv} = T$ naziva se povratnim odnosom ("return ratio"). On može da se odredi raskidanjem petlje na izlazu zavisnog generatora i priključivanjem u smeru toka signala test generatora istog tipa. Na drugom paru krajeva dobijenih raskidanjem stavlja se kratak spoj ako je zavisni (test) generator strujni, odnosno otvorena veza ako je naponski.

$$A_r = A_\infty \frac{T}{1+T} + \frac{A_d}{1+T} = A_d \frac{1 + \frac{A_\infty T}{A_d}}{1+T} = A_d \frac{1+T_n}{1+T}$$

$$T_n = \frac{A_\infty T}{A_d} = \frac{\left(\frac{A_1 a A_2}{T} + A_d\right) T}{A_d} = \left(\frac{A_1 a A_2}{A_d T} + 1\right) T = a \left(\frac{A_1 A_2}{A_d} - A_{inv}\right)$$

$$s_{iz} = A_d s_{ul} + A_2 s_{aiz} \quad s_{iz} = 0: \quad s_{ul} = -\frac{A_2}{A_d} s_{aiz}$$

$$s_a = A_1 s_{ul} + A_{inv} s_{aiz}$$

$$s_{ul} = 0: \quad s_a = A_{inv} s_{aiz}$$

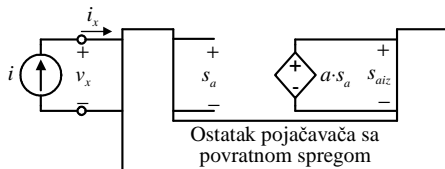
$$T = -a \frac{s_a}{s_{aiz}} \Big|_{s_{ul}=0} = -a A_{inv}$$

$$s_{iz} = 0: \quad s_a = A_1 s_{ul} + A_{inv} s_{aiz} = \left(-A_1 \frac{A_2}{A_d} + A_{inv}\right) s_{aiz}$$

$$T_n = -a \frac{s_a}{s_{aiz}} \Big|_{s_{iz}=0} = -a \left(A_{inv} - A_1 \frac{A_2}{A_d}\right)$$

Određivanje impedanse sa povratnom spregom

Model i jednačine su u osnovi isti kao za određivanje pojačanja sa povratnom spregom, samo je odziv u ovom slučaju napon na priključcima ulaznog strujnog izvora.



Za linearno kolo ostatka pojačavača sa povratnom spregom može da se napiše:

$$\begin{aligned} s_{ul} &= i_x; & s_{iz} &= v_x \\ v_x &= A_d \cdot i_x + A_2 \cdot s_{aiz} \\ s_a &= A_1 \cdot i_x + A_{inv} \cdot s_{aiz} \end{aligned}$$

A_d je ulazna impedansa pri $s_{aiz}=0$, dakle pri $a=0$ (kada ne deluje povratna sprega). A_{inv} se određuje pri $i_x=0$ i predstavlja pojačanje od priključaka signala s_{aiz} do kontrolnog ulaza zavisnog generatora.

Proizvod $-a \cdot A_{inv} = T|_{i_x=0}$ predstavlja povratni odnos pri $i_x=0$, dakle pri otvorenim krajevima na paru priključaka x . On može da se odredi raskidanjem petlje na izlazu zavisnog generatora i priključivanjem test generatora s_j istog tipa u smeru toka signala. Na drugom paru krajeva dobijenih raskidanjem stavlja se kratak spoj ako je zavisni generator strujni, odnosno otvorena veza ako je naponski.

Za $v_x=0$ (kratak spoj na paru priključaka x) određen je povratni odnos pri kratkom spoju na priključcima x :

$$T|_{v_x=0} = T_n = a \left(\frac{A_1 A_2}{A_d} - A_{inv} \right).$$

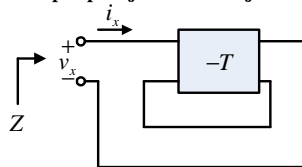
Avg.08.

IR2OAE Željko Aleksić

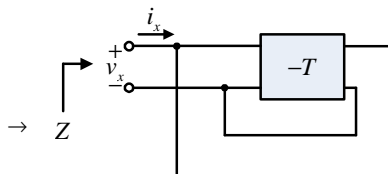
9

$$\frac{s_{iz}}{s_{ul}} = \frac{v_x}{i_x} = Z = A_d \frac{1+T_n}{1+T} = Z|_{a=0} \cdot \frac{1+T|_{v_x=0}}{1+T|_{i_x=0}} = Z|_{a=0} \cdot \frac{1+T|_{KS}}{1+T|_{OV}} \quad \leftarrow \text{ "Blekmanova formula" }$$

U praksi su najznačajniji i najčešći slučajevi kada je jedan od dva povratna odnosa u gornjem izrazu jednak nuli a drugi ima projektovanu vrednost. Ako se posmatrani par priključaka x dobije raskidanjem redne grane u petlji, raskidanjem se ukida tok signala u petlji pa je $T|_{OV}=0$, a $T|_{KS}$ ima projektovanu vrednost T . Dakle, u ovom slučaju povratna sprega povećava ulaznu impedansu na priključcima x $1+T$ puta. \rightarrow



Ako se posmatrani par priključaka x izvuče iz dva čvora otočno (paralelno) u odnosu na tok signala u petlji, kratkospajanjem priključaka se ukida tok signala u petlji pa je $T|_{KS}=0$, a $T|_{OV}$ ima projektovanu vrednost T . Dakle, u ovom slučaju povratna sprega smanjuje ulaznu impedansu na priključcima x $1+T$ puta. \rightarrow



Avg.08.

IR2OAE Željko Aleksić

10

Četiri topologije povratna spregе

Zbog mogućnosti povećanja ili smanjenja impedanse sa povratnom spregom u zavisnosti od položaja priključaka u odnosu na tok signala u petlji, pobudni generator i potrošač obično se priključuju na pojačavač sa povratnom spregom tako da povratna sprega stabilise prenosnu funkciju pojačavača željenog tipa (naponsko pojačanje, strujno pojačanje, transkonduktansa ili transrezistansa) u odnosu na promene otpornosti generatora odnosno potrošača.

Ako je **pobudni** signal u željenoj prenosnoj funkciji napon, poželjna je velika ulazna impedansa sa povratnom spregom (tada je mali uticaj otpornosti generatora na pojačanje), pa se pobudni generator priključuje redno. Ako je pobudni signal struja, pobudni generator se priključuje otopno. (Ako bi se, posle izbora načina priključivanja, priključio idealni pobudni generator suprotnog tipa, kružno pojačanje bi postalo jednako nuli.)

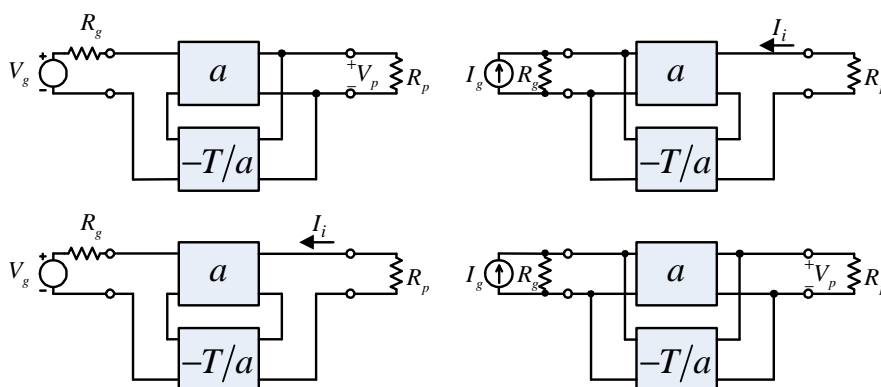
Ako je **izlazni** signal u željenoj prenosnoj funkciji napon, poželjna je mala izlazna impedansa kola sa povratnom spregom, pa se potrošač priključuje otopno. Ako je izlazni signal struja, potrošač se priključuje redno.

Avg.08.

IR20AE Željko Aleksić

11

Svakom od četiri tipa prenosne funkcije odgovara određen način priključivanja generatora odnosno potrošača na pojačavač sa povratnom spregom. Otpornost generatora odnosno potrošača učestvuju u formiranju povratnog odnosa T kao i pojačanja sa povratnom spregom pojačavača A . Četiri topologije povratne spregе prikazane su na slikama:



Rednim priključivanjem sumiraju se naponi, a struja je ista za sva tri para priključaka (A , $-T/a$ i pobuda ili potrošač).

Paralelnim priključivanjem sumiraju se struje, a napon je isti za sva tri para priključaka (A , $-T/a$ i pobuda ili potrošač).

Avg.08.

IR20AE Željko Aleksić

12

Na ulazu se sumira signal koji nije zajednički za generator, ulaz pojačavača a i vraćeni izlazni signal iz $-T/a$ bloka:

- kod rednog vezivanja pobude sumira se napon → **redna** povratna spregra
- kod paralelnog vezivanja pobude sumira se struja → **paralelna** povratna spregra

Na izlazu pojačavača se kolom povratne sprege odmerava signal koji je zajednički za izlaz pojačavača a , potrošač i ulaz $-T/a$ bloka:

- kod paralelnog vezivanja potrošača to je napon → **naponska (ili paralelna)** povratna spregra
- kod rednog vezivanja potrošača to je struja → **strujna (ili redna)** povratna spregra

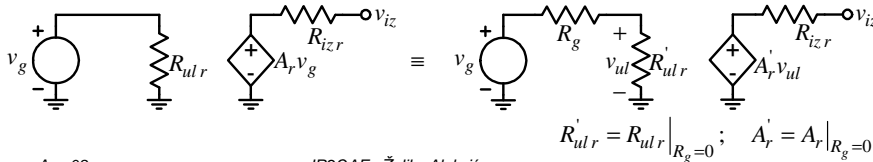
za stabilizaciju

- naponskog pojačanja
- strujnog pojačanja
- transkonduktanse
- transrezistanse

koristi se

- redno-naponska povratna spregra (sl. gore levo str.11)
- paralelno-strujna povratna spregra (sl. gore desno)
- redno-strujna povratna spregra (sl. dole levo)
- paralelno-naponska povratna spregra (sl. dole desno)

U cilju utvrđivanja uticaja otpornosti generatora ili otpornosti potrošača na karakteristike pojačavača sa povratnom spregom, pogodno je ekstrahovati ove otpornosti iz izračunatih funkcija. Kada je jedna od ovih otpornosti poznata, ekstrakcija druge otpornosti iz izračunatih funkcija vrši se stavljanjem idealne vrednosti u dobijene izraze i naknadnim dodavanjem otpornosti u model nezavisnog generatora na ulazu ili dodavanjem potrošača na izlazu. Za ulaznu otpornost, ako je pobuda Tevenenov generator:

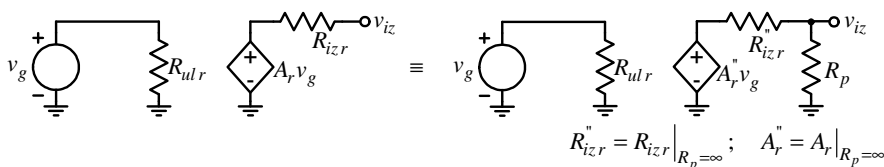


Avg.08.

IR20AE Željko Aleksić

13

Za izlaznu otpornost, ako se izlaz pojačavača modeluje Tevenenim generatorom:



Ako je pobuda Nortonov generator, idealna vrednost njegove otpornosti je beskonačna. Na izlazu pojačavača, ako se izlaz modeluje Nortonovim generatorom, idealna vrednost potrošača je jednaka nuli.

Faza kružnog pojačanja

$$A_r(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{1 - \beta(j\omega) \cdot A(j\omega)}$$

pojačavač osciluje na učestanosti ω_0

$$\omega = \omega_0 : \beta(j\omega_0) \cdot A(j\omega_0) = A\beta(j\omega_0) = 1 \angle 0 \Rightarrow |A_r(j\omega_0)| = \infty$$

$|A\beta(j\omega_0)| > 1, \arg A\beta(j\omega_0) = 0 \leftarrow$ šum beskonačno male amplitude se prolaskom kroz petlju stalno pojačava (nestabilan izl. sig.)

$|A\beta(j\omega_0)| < 1, \arg A\beta(j\omega_0) = 0 \leftarrow$ prolaskom kroz petlju šum slabi, pozitivna p. s.

$\arg A\beta = -\pi \Rightarrow |F| = |1 - \beta A| > 1$ (za bilo koju vrednost $|A\beta|$) \leftarrow negativna p. s.

\Rightarrow Za pojačavač sa negativnom p.s. mora da se projektuje $\arg A\beta(j0) = -\pi$

Avg.08.

IR20AE Željko Aleksić

14