

1.3 Negativna povratna sprega

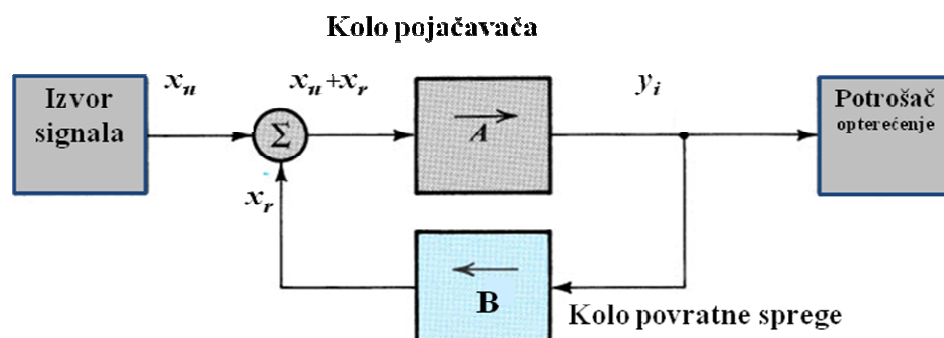
Autori: prof. dr Predrag Petković, dr Srđan Đorđević

1.3.1 Cilj vežbe

Očekuje se da studenti, na primeru redno-naponske negativne povratne sprege, sagledaju uticaj negativne povratne sprege na amplitudsku karakteristiku, ulaznu i izlaznu otpornost pojačavača, šumove i na nelinearna izobličenja.

1.3.2 Teorijska postavka vežbe

Pojačavači kod kojih se deo izlaznog signala vraća na ulaz, nazivaju se pojačavači sa povratnom spregom. Slika 1.3.1 prikazuje opštu šemu pojačavača sa povratnom spregom na kome su pojačavač i kolo povratne sprege jasno razdvojeni. Jednostavnosti radi pretpostavimo da se kroz kolo pojačavača, označenog sa A i kolo povratne sprege označenog sa B , signali prostiru u smeru koji pokazuju strelice. Ukoliko je vraćeni signal suprotnog znaka od ulaznog, on umanjuje ulazni signal, tako da će i izlazni signal biti manji. Takva vrsta sprege naziva se *negativna povratna sprega*. (Ukoliko su vraćeni i ulazni signal u fazi, kaže se da postoji *pozitivna povratna sprega*. Pod određenim uslovima pozitivna povratna sprega izaziva oscilovanje, tako da će njoj biti posvećena naredna vežba pod nazivom Oscilatori).



Slika 1.3.1. Principijelna šema pojačavača sa povratnom spregom

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprege

Imajući u vidu da signali mogu biti naponski ili strujni i da, u opštem slučaju, ne moraju da imaju istu prirodu na ulazu i izlazu, na slici su označeni sa x , na ulazu i sa y na izlazu. Indeksi u , i i r označavaju signale na ulazu, izlazu pojačavača i izlazu kola povratne sprege (reakcije), respektivno. Sa slike 1.3.1 očigledno je da će signal na ulazu kola pojačavača bez povratne sprege biti jednak x_u+x_r . Kada se ovaj signal pojača A puta, na izlazu će se javiti signal $y_i=A(x_u+x_r)$. Kolo povratne sprege ima zadatak da oslabi izlazni signal koji ga pobuđuje, tako da se na izlazu kola povratne sprege javlja signal $x_r=By_i$, gde je $|B| < 1$ koeficijent sprege. Imajući ovo u vidu, može se zaključiti da je, u opštem slučaju, pojačanje pojačavača sa povratnom spregom definisano jednačinom (1.3.1):

$$A_r = \frac{y_i}{x_u} = \frac{A}{1-AB} A_r = \frac{y_i}{x_u} = \frac{A}{1-AB} \quad (1.3.1)$$

Proizvod $A \cdot B$ naziva se *kružno pojačanje*. Lako se da zaključiti da je kod negativne povratne sprege $A \cdot B < 0$. To znači da je tada $1 - A \cdot B > 1$. Veličina $1 - A \cdot B$ naziva se *funkcija povratne sprege*. Na osnovu (1.3.1) sledi da je pojačanje pojačavača sa negativnom povratnom spregom manje od pojačanja pojačavača bez povratne sprege, odnosno da se uvođenjem negativne povratne sprege ukupno pojačanje smanjuje. Međutim, smanjenje pojačanja praćeno je poboljšanjem ostalih osobina pojačavača i to:

- a. Povećava se propusni opseg pojačavača.
- b. Smanjuje se osetljivost pojačanja na promene parametara kola (usled promene temperatura, starenja, zamene jednog tranzistora drugim,...)
- c. Povećava se dinamički opseg pojačavača, odnosno veličina ulaznog signala kojim se pobuđuje pojačavač
- d. Smanjuju se nelinearna izobličenja,
- e. Smanjuje se šum generisan unutar pojačavača.

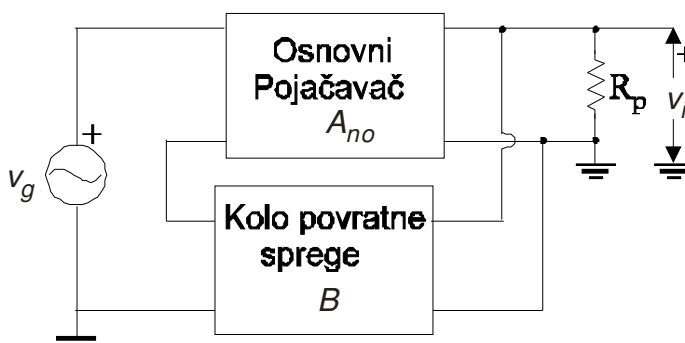
Izraz (1.3.1) ukazuje na jednu važnu činjenicu koja se često koristi u projektovanju pojačavača. Naime, u slučajevima kada je $|A \cdot B| \gg 1$ pojačanje pojačavača sa povratnom spregom ne zavisi od pojačanja pojačavača bez povratne sprege A koje se često naziva i pojačanje u *otvorenoj petlji*. Iz (1.3.1) očigledno je tada $A_r = -1/B$. Navedeni uslov najlakše ispunjavaju pojačavači sa velikim pojačanjem u otvorenoj petlji, što je karakteristika operacionih pojačavača. (Preporučujemo da u ovom kontekstu analizirate izraze za pojačanje različitih kola iz vežbe "Primena operacionih pojačavača").

Sa stanovišta ulaznih priljučaka kolo pojačavača može se povezati sa kolom povratne sprege redno ili paralelno. Sa druge strane, signal koji se sa izlaza prosleđuje na ulaz, može biti proporcionalan naponu ili struji. Otuda postoje četiri konfiguracije pojačavača sa povratnom spregom, poznate kao

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

- 1) *redno – naponska*
- 2) *redno – strujna*
- 3) *paralelno – naponska*
- 4) *paralelno – strujna.*

Konkretno u okviru ove laboratorijske vežbe razmatraće se i meriti karakteristike redno-naponske povratne sprege. Principijelna šema redno-naponske povratne sprege prikazana je na slici 1.3.2. Razmatraće se uticaj kola povratne sprege na naponsko pojačanje pojačavača tako da veličinama y_i i x_u sa slike 1.3.1 odgovaraju veličine v_i i v_g sa slike 1.3.2, respektivno.



Slika 1.3.2. Principijelna šema pojačavača sa redno-naponskom povratnom spregom

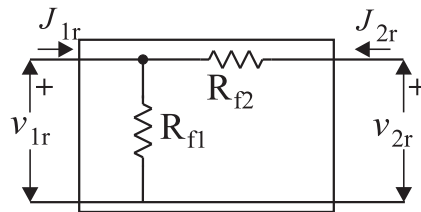
1.3.2.1 Uticaj negativne povratne sprege na amplitudsku karakteristiku

Primena izraza (1.3.1) na naponsko pojačanje pojačavača sa redno-naponskom negativnom povratnom spregom sa slike 1.3.2 daje:

$$A_{nr} = \frac{v_i}{v_g} = \frac{A_{no}}{1 - A_{no}B}, \quad (1.3.2)$$

gde je: A_{no} naponsko pojačanje osnovnog pojačavača (pojačanje pojačavača bez povratne sprege), B je koeficijent prenosa kola povratne sprege.

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega



Slika 1.3.3. Kolo povratne sprega

Koeficijent povratne sprega ukazuje na veličinu signala koji se vraća na ulaz pojačavača i to u odnosu na vrednost izlaznog signala. Zapravo matematički se određuje kao količnik vraćenog i izlaznog signala. Za kolo sa slike 1.3.3 vraćeni signal (v_{1r}) predstavlja napon na otporniku R_{f1} . S obzirom da kolo predstavlja naponski razdelnik, on je proporcionalan naponu na izlazu pojačavača ($v_{2r}=v_i$), tako da je koeficijent povratne sprega definisan izrazom:

$$B = \frac{v_{1r}}{v_{2r}} \Big|_{i_{1r}=0} = h_{12r} = \frac{R_{f1}}{R_{f1} + R_{f2}} \leq 1. \quad (1.3.3)$$

Prethodni izraz ukazuje da je, u ovom slučaju, koeficijent sprega najveći kada je $B=1$, što se postiže za slučaj da je $R_{f2}=0$, (kratak spoj). Najmanji koeficijent sprega $B=0$, postiže se za $R_{f1}=0$ ili $R_{f2} \rightarrow \infty$ (prazan hod=prekid).

Pretpostavimo da je naponsko pojačanje pojačavača bez povratne sprega veliko i negativno, što je karakteristika pojačavača sa zajedničkim emitorom, odnosno sorsom (negativno naponsko pojačanje ukazuje da je izlazni napon suprotne faze od ulaznog). To znači da je kružno pojačanje $A_{no}B < 0$, odnosno da je funkcija povratne sprega $(1 - A_{no}B) > 1$: Odavde proističe važan zaključak da će naponsko pojačanje kola sa povratnom spregom, A_{nr} , biti manje od pojačanja pojačavača bez povratne sprega, A_{no} . Nameće se pitanje kakav je uticaj koeficijenta povratne sprega, B , na kružno pojačanje, odnosno funkciju povratne sprega?

S obzirom da kolo sa slike 1.3.3 karakteriše $0 \leq B \leq 1$, to znači da bi pojačanje pojačavača sa povratnom spregom moglo da se kreće u granicama

$$1 < \left| \frac{A_{no}}{1 - A_{no}B} \right| \leq |A_{nr}| \leq |A_{no}|. \quad (1.3.4)$$

U slučaju da je $A_{no}=-100$, pojačanje pojačavača sa povratnom spregom moglo bi da se kontroliše u granicama od (-0.99) do -100. Praktično ovo znači da bi se za $R_{f1}=R_{f2}/4$ dobilo $B=0.2$, odnosno $A_{nr} \approx -5$.

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

Do sada smo razmatrali ponašanje kola u kome pojačanje pojačavača bez povratne sprege ne zavisi od frekvencije. To je teoretski slučaj koji u praksi važi samo pri frekvencijama na kojima je amplitudska karakteristika konstantna. U opštem slučaju (kao što se videlo u prvoj vežbi) propusni opseg pojačavača bez povratne sprege ograničen je donjom, f_d , i gornjom, f_g , graničnom frekvencijom tako da može da se iskaže izrazom (1.3.5):

$$A_n(f) = \frac{A_{no}}{(1 - j \frac{f_d}{f})(1 + j \frac{f}{f_g})} \quad (1.3.5)$$

Na osnovu rezultata merenja iz prve vežbe očigledno je $f_d \ll f_g$. To znači da pri niskim frekvencijama $f \approx f_d$ dominira prvi član u imeniocu, zato što je $(f/f_g) \approx 0$. Pri visokim frekvencijama $f \approx f_g$ dominira drugi član u imeniocu, zato što je $(f_d/f) \approx 0$, dok na srednjim frekvencijama $f_d \ll f \ll f_g$ može da se smatra da je pojačanje konstantno jer je $(f_d/f) \approx 0$ i $(f/f_g) \approx 0$. Primenom izraza (1.3.1) na pojačanje pojačavača sa povratnom spregom pri niskim i visokim frekvencijama daje:

$$A_{nr}(f) = \frac{\frac{A_{no}}{(1 - j \frac{f_d}{f})}}{1 - \frac{A_{no}}{(1 - j \frac{f_d}{f})} B} = \frac{\frac{A_{no}}{1 - A_{no} B}}{(1 - j \frac{f_d}{(1 - A_{no} B) f})} = \frac{A_{nr}}{(1 - j \frac{f_{dr}}{f})} \quad \text{za } f \approx f_d \ll f_g$$

$$A_{nr}(f) = \frac{\frac{A_{no}}{(1 - j \frac{f}{f_g})}}{1 - \frac{A_{no}}{(1 - j \frac{f}{f_g})} B} = \frac{\frac{A_{no}}{(1 - j \frac{f}{(1 - A_{no} B) f_g})}}{(1 - j \frac{f}{f_{gr}})} = \frac{A_{nr}}{(1 - j \frac{f}{f_{gr}})} \quad \text{za } f \approx f_g \gg f_d$$

(1.3.6)

Na osnovu prethodnih izraza može se zaključiti da je donja granična frekvencija kola sa povratnom spregom umanjena u odnosu na donju graničnu frekvenciju pojačavača bez povratne sprege za $(1 - A_{no} B)$ puta, dok je gornja granična frekvencija povećana za $(1 - A_{no} B)$ puta, odnosno za vrednost funkcije povratne sprege. Dakle, donja granična frekvencija je smanjena, a gornja povećana.

$$f_{dr} = \frac{f_d}{(1 - A_{no} B)}, \quad f_{gr} = (1 - A_{no} B) f_g \quad (1.3.7)$$

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

Iz ovoga proističe zaključak da uvođenje negativne povratne sprege povećava propusni opseg pojačavača. S obzirom da je $f_g \gg f_d$, podsećamo na činjenicu (proverenu tokom prve vežbe) da je propusni opseg pojačavača $BW = f_g - f_d \approx f_g$. Važnu karakteristiku pojačavača predstavlja proizvod propusnog opsega i maksimalnog pojačanja pojačavača. Ova veličina označava se sa GBW (*Gain BandWidth*). Interesantno je da se utvrdi uticaj negativne povratne sprege na GBW . Za pojačavač bez povratne sprege, koji ima naponsko pojačanje A_{no} i širinu propusnog opsega BW , GBW iznosi:

$$GBW = A_{no} \cdot BW = A_{no} \cdot (f_g - f_d) \approx A_{no} \cdot f_g \quad (1.3.8)$$

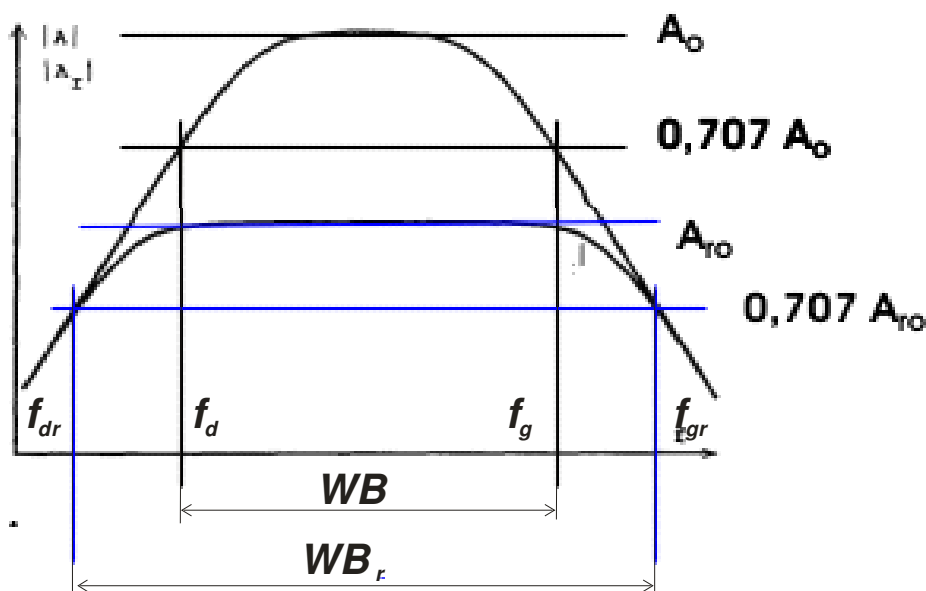
Imajući u vidu (1.3.2) i (1.3.7) za pojačavač s povratnom spregom dobija se:

$$GBW_r = A_{nr} \cdot BW_r \approx A_{nr} \cdot f_{gr} = \frac{A_{no}}{1 - A_{no}B} \cdot f_g \cdot (1 - A_{no}B) = A_{no} \cdot f_g = GBW \quad (1.3.9)$$

Oдавde se zaključuje uvođenje negativne povratne sprege ne utiče na proizvod pojačanja i propusnog opsega pojačavača– proizvod je konstantan.

Uticaj negativne povratne sprege na amplitudsku karakteristiku pojačavača ilustrovan je na slici 1.3.4.

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega



Slika 1.3.4 Uticaj negativne povratne sprege na amplitudsku karakteristiku pojačavača

Ukoliko se “unutar” amplitudske karakteristike pojačavača bez povratne sprege ucrtta karakteristika sa manjim pojačanjem uočava se da će se propusni opseg povećati.

1.3.2.2 Uticaj negativne povratne sprege na ulaznu i izlaznu otpornost pojačavača

Generalno gledano, redno priključivanje otpornosti povećava, dok paralelno smanjuje ekvivalentnu otpornost između dva priključka. Imajući u vidu da se sa stanovišta ulaza kola povratne sprege može priključiti redno ili paralelno, konfiguracije sa rednom vezom na ulazu povećavaju ulaznu otpornost pojačavača, dok konfiguracije sa paralelnom vezom umanjuju ulaznu otpornost pojačavača. Ukoliko se traži da vraćeni signal bude proporcionalan izlaznom naponu, jasno je da kolo povratne sprege mora biti priključeno paralelno sa potrošačem. Takva veza sa stanovišta potrošača neminovno dovodi do smanjenja izlazne otpornosti u odnosu na pojačavač bez povratne sprege (paralelna veza kola povratne sprege i izlazne pojačavača bez povratne sprege). Sa druge strane, ukoliko se kolom povratne sprege vraća signal koji je proporcionalan struji kroz potrošač, neophodno je da kolo povratne sprege bude priključeno na red sa potrošačem. U

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

tom slučaju, sa stanovišta potrošača, ukupna izlazna otpornost pojačavača se povećava.

Ove logične zaključke potvrđuje i analiza pojačavača sa povratnom spregom, pa se može dokazati¹ da konfiguracije sa rednom povratnom spregom povećavaju ulaznu otpornost proporcionalno vrednosti funkcije povratne sprege, a da je paralelna konfiguracija umanjuje za istu vrednost. Slično, sa stanovišta izlaza pojačavača, može se dokazati² da paralelna konfiguracija umanjuje, a redna povećava izlaznu otpornost proporcionalno vrednosti funkcije povratne sprege.

Za slučaj pojačavača sa redno naponskom povratnom spregom sa slike 1.3.2, to znači da će ulazna otpornost biti povećana za $(1-A_{no}B)$ puta, dok će izlazna otpornost biti smanjena $(1-A_{no}B)$ puta³:

$$\begin{aligned} R_{ur} &= R_{uo} \cdot (1 - A_{no}B) \\ R_{izr} &= \frac{R_{izo}}{1 - A_{no}B} \end{aligned} \quad , \quad (1.3.10)$$

gde su: R_{uo} i R_{izo} ulazna i izlazna otpornost pojačavača bez povratne sprege, R_{ur} i R_{izr} ulazna i izlazna otpornost pojačavača sa povratnom spregom.

1.3.2.3 Uticaj negativne povratne sprege na šumove nastale unutar pojačavača

Pod šumom se podrazumeva svaki neželjeni signal na izlazu kola. Postoje različiti izvori šuma, kako po prirodi nastanka, tako i po mestu nastanka u kolu. Neki šumovi dolaze iz spoljašnjeg okruženja, indukovane smetnje od okolnih uređaja, varijacija napona napajanja i slično. Pored toga postoje interni šumovi koji se generišu u samim komponentama od kojih je pojačavač sastavljen. Uzroci te kategorije šuma vezuju se za fiziku materijala od kojih su realizovane komponente u kolu. Najjednostavnije uzroci šuma mogu da se objasne usled sudara nosilaca naelektrisanja unutar materijala kroz koji protiče struja. Ovo implicira da će pri većim temperaturama šum biti veći (ubrzano haotično kretanje nosilaca), kao i da će snažnije komponente (veća struja) ali i komponente sa velikom otpornošću (otežani put nosilaca) generisati veći šum. Dakle šum se u većoj ili manjoj meri stvara u svim komponentama (otpornici, kondenzatori, bipolarni MOS, JFET tranzistori,...). Kriterijum za „podnošljivost“ šuma predstavlja njegovo poređenje sa nivoom korisnog signala. Ukoliko je nivo

¹ Videti poglavlje 4.2 u [1]

² Videti poglavlje 4.2 u [1]

³ Videti poglavlje 4.2.4 u [1]

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

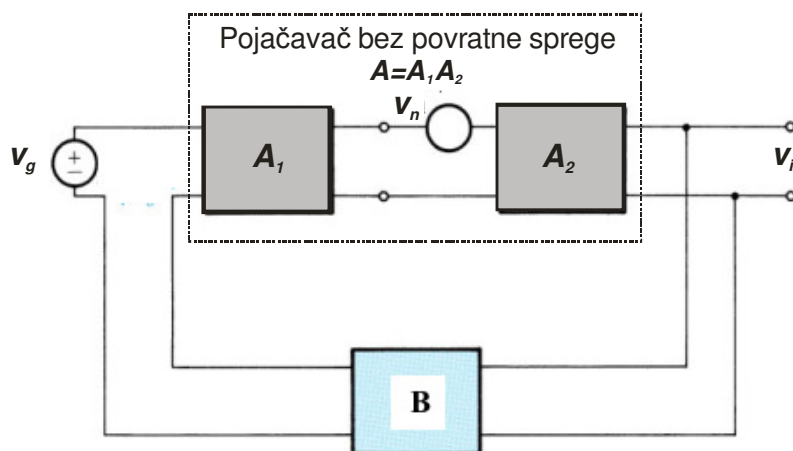
korisnog signala dovoljno veći od nivoa šuma, šum je prihvatljiv. Meru prihvatljivosti šuma predstavlja odnos signal-šum koji se u engleskoj literaturi označava sa SNR ili S/N (*Signal to Noise Ratio*). Po definiciji SNR predstavlja količnik snage korisnog signal i snage šuma:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} = \left(\frac{V_s}{V_n}\right)^2, \text{ odnosno } SNR_{dB} = 10 \log\left(\frac{P_s}{P_n}\right) = 20 \log\left(\frac{V_s}{V_n}\right), \quad (1.3.11)$$

U svakom slučaju, težnja je da se postigne što veći SNR .

Logično je da će šumovi koji se dovedu na ulaz pojačavača biti podjednako pojačani kao i koristan signal na ulazu. Odavde proističe da će odnos SNR ostati isti. Značajno je da se smanji uticaj šumova koji nastaju unutar pojačavača. Radi se o šumovima kojih nema na ulazu, ali se javljaju u svakoj komponenti pojačavača i kasnije prostiru do izlaza zajedno sa korisnim signalom.

Da bi se analizirao uticaj negativne povratne sprege na ove šumove, predstavimo pojačavač sa pojačanjem A , kao kaskadnu vezu dva pojačavača sa pojačanjima A_1 i A_2 , tako da je $A = A_1 \cdot A_2$. Pri tome, podrazumevamo da se prvi deo pobuđuje samo korisnim signalom, a da se šum generiše i dodaje korisnom signalu na ulazu drugog dela, kao što pokazuje slika 1.3.5.



1.3.5 *Ilustracija uticaja povratne sprege na šum generisan unutar pojačavača*

Imajući u vidu da je koristan signal v_g u kolu sa slike 1.3.5 pojačan $A_1 A_2$ puta, a da je signal šuma pojačan samo A_2 puta, lako se dobija vrednost izlaznog signala kao:

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

$$v_{iz} = \frac{A_1 A_2}{1 - A_1 A_2 B} v_g + \frac{A_2}{1 - A_1 A_2 B} v_n = \frac{A_1 A_2}{1 - AB} v_g + \frac{A_2}{1 - AB} v_n. \quad (1.3.12)$$

Prvi član (uz v_g) predstavlja koristan signal na izlazu, dok drugi član (uz v_n) predstavlja napon šuma na izlazu. Odavde proističe, da je odnos SNR na izlazu A_1 puta veći u odnosu na slučaj kada ne bi bilo povratne sprege:

$$SNR_{dB} = 20 \log \left(\frac{\frac{A_1 A_2}{1 - AB} v_g}{\frac{A_2}{1 - A} v_n} \right) = 20 \log \left(A_1 \frac{v_g}{v_n} \right) = 20 \log(A_1) + 20 \log \left(\frac{v_g}{v_n} \right). \quad (1.3.13)$$

Dobijeni rezultat ukazuje na važnu činjenicu koja se često praktično primenjuje. Naime, audio pojačavači najčešće se izvode kao višestepeni, kod kojih je drugi stepen pojačavač snage. Pojačavačima snage biće posvećena druga vežba u narednom ciklusu. Za sada dovoljno je istaći njihove osnovne karakteristike a to su:

- malo naponsko pojačanje (stepen sa zajedničkim kolektorom/drejnjom),
- zahtevaju veliku struju iz izvora za napajanje što na konačnoj izlaznoj otpornosti izvora izaziva velike padove napona, tako da napon V_{CC} (V_{DD}) sadrži i promenljivu komponentu koja se manifestuje kao šum,
- nelinearna prenosna karakteristika.

S obzirom da je njegovo pojačanje malo, prethodi mu stepen sa velikim naponskim, a malim strujnim pojačanjem (stepen sa zajedničkim emitorom/sorsom). Šum generisan u njima daleko je manji od šuma koji se javlja u pojačavaču snage. Da bi se anulirao šum iz pojačavača snage negativna povratna sprega sa izlaza (zvučnik) vraća se na ulaz prvog stepena. Time se veliki šum iz pojačavača snage oslabljuje u odnosu na korisni signal za iznos pojačanja prvog stepena.

Kao primer šumova generisanih unutar pojačavača, u ovoj vežbi posmatra se nestabilisani napon napavanja V_{CC} . Zapravo, jednosmerni napon napajanja dobijen iz mrežnog napona frekvencije 50 Hz, korišćenjem usmerača sa kapacitivnim filtrom sadrži, osim jednosmerne i naizmjeničnu komponentu⁴. Usled toga, menja se položaj radne tačke tranzistora u pojačavaču, čime se menja pojačanje tranzistora sa frekvencijom 50 Hz. Ovo se preslikava na promenu amplitude izlaznog signala u istom ritmu. S obzirom da se radi o frekvenciji koja pripada donjoj granici čujnog opsega, ovaj tip šuma manifestuje se na izlazu audio

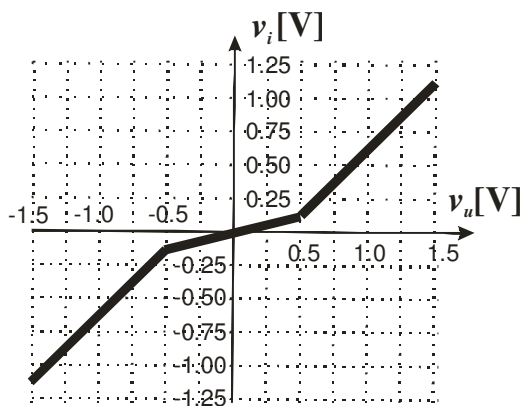
⁴ Videti poglavlje 8 u [1]

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

pojačavača kao brum. Važno je uočiti da se ne radi o šumu koji je doveden na ulaz pojačavača, nego se on generiše unutar pojačavača.

1.3.2.4 Uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja

Kao primer nelinearnog pojačavača posmatraćemo simetrični pojačavač sa komplementarnim parom koji radi u klasi B⁵. Pretpostavićemo da je za ulazne napone $|v_u| < 0.5\text{V}$ pojačanje 0.25, dok je za $|v_u| > 0.5\text{V}$ pojačanje 1. Prenosna karakteristika ovog pojačavača prikazana je na slici 1.3.6.

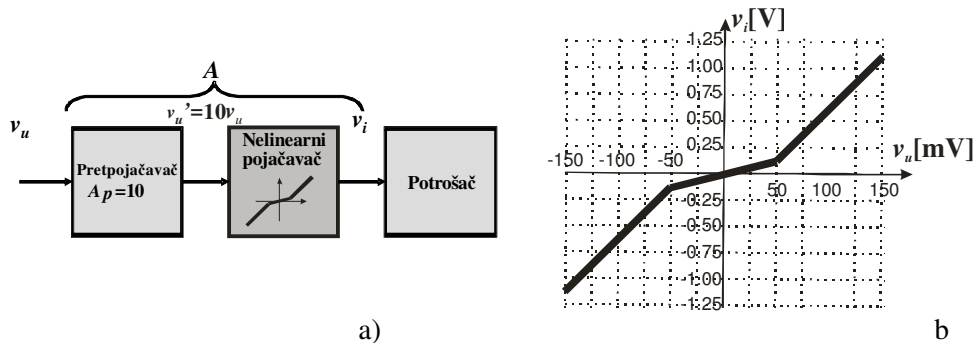


Slika 1.3.6 Prenosna karakteristika nelinearnog simetričnog pojačavača snage u klasi B

Pretpostavimo da je neophodno ostvariti ukupno pojačanje 10. Tada bi, bez primene povratne sprege, trebalo pobuditi ovaj pojačavač snage stepenom koji ima pojačanje 10. Toliko naponsko pojačanje mogu da obezbede samo pojačavači sa zajedničkim emitorom/sorsom, a oni obrću fazu ulaznog signala. U tu svrhu koriste se linearni pojačavači koji rade u klasi A. Blok šema takvog pojačavača prikazana je na slici 1.3.7.a. U tom slučaju, dobija se pojačavač čija ukupna prenosna karakteristika izgleda kao na slici 1.3.7.b. Ona je, čigledno, i dalje nelinearna, sa pojačanjem u opsegu ulaznih napona $|v_u| < 50\text{mV}$ od $A=A_p \cdot A_n=10 \cdot 0.25=2.5$ i pojačanjem $A=A_p \cdot A_n=10 \cdot 1=10$ u opsegu $|v_u| > 50\text{mV}$.

⁵ Viđeti poglavlje 6.4.1 u [1]

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega



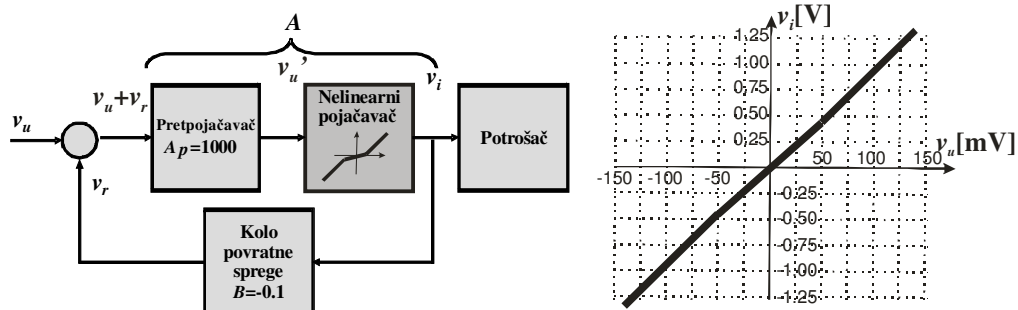
Slika 1.3.7 a) Blok šema pojačavača bez povratne sprege sa pojačanjem $A=10$

b) Prenosna karakteristika pojačavača sa slike a)

Primenu negativne povratne sprege u korekciji nelinearnih izobličenja objasnimo na primeru kola sa slike 1.3.8. Kao izlazni stepen koristi se isti pojačavač snage kao u prethodnom primeru sa prenosnom karakteristikom prikazanom na slici 1.3.6. Da bi se dobio izraz za pojačanje koji ne zavisi od pojačanja u otvorenoj petlji, treba obezbediti uslov $AB \gg 1$. Zato se bira da pojačanje prepojačavača bude $A_p=1000$. S obzirom da se traži da ukupno pojačanje bude $A_r=10$, bira se koeficijent povratne sprege od $B=-0.1$. Pod ovim uslovima lako se izračunava da u opsegu ulaznih napona $|v_{ul}| < 50\text{mV}$, pojačanje u otvorenoj petlji iznosi $A=A_p \cdot A_n=1000 \cdot 0.25=250$, što uz $B=-0.1$ daje $A_r=250/26=9.61$. U opsegu ulaznih napona $|v_{ul}| > 50\text{mV}$ pojačanje u otvorenoj petlji iznosi $A=A_p \cdot A_n=1000 \cdot 1=1000$, tako da ukupno pojačanje pojačavača sa povratnom spregom iznosi $A_r=1000/101=9.90$. Kao rezultat dobija se prenosna karakteristika prikazana na slici 1.3.8.b. Očigledno je da je linearnost značajno poboljšana⁶.

⁶ Fizičko objašnjenje ove pojave može se naći na [2], „Pojačavači sa negativnom povratnom spregom (1 od 2).pdf“

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega



Slika 1.3.8

- Blok šema pojačavača sa povratnom spregom ukupnog pojačanja $A=10$
- Prenosna karakteristika pojačavača sa slike a)

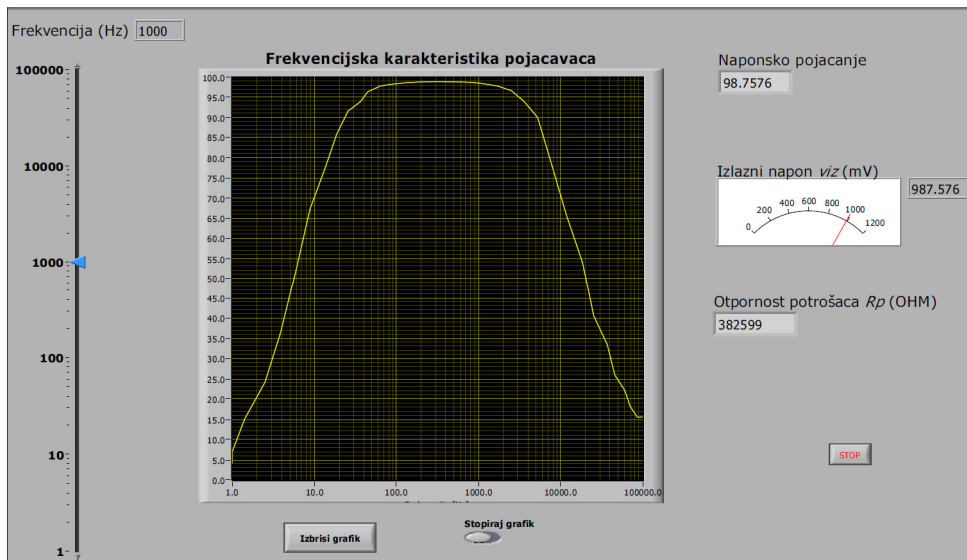
Pre izrade ovog dela vežbe savetujemo čitaocima da, na osnovu datih prenosnih karakteristika na slikama 1.37 i 1.3.8, skiciraju talasne oblike napona na izlazu ukoliko se na ulaz dovodi prostoperiodični signal amplitude 150mV.

1.3.3 Opis virtuelnog instrumenta

U programskom okruženju LabView kreirana su dva virtuelna instrumenta. Jedan je namenjen za merenje amplitudske karakteristike i izlazne otpornosti pojačavača, dok drugi predstavlja osciloskop kojim se posmatraju talasni oblici napona na izlazu pojačavača sa negativnom povratnom spregom.

Glavni prozor virtuelnog instrumenta namenjenog za snimanje amplitudske karakteristike pojačavača prikazan je na slici 1.3.9.

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega



Slika 1.3.9 Prozor programa u kome se meri amplitudska karakteristika pojačavača sa negativnom povratnom spregom

Na levoj strani glavnog prozora nalazi se klizač označen sa „Frekvencija (Hz)“. Njime se zadaje frekvencija pobudnog signala, dok je amplituda fiksirana na 10 mV. Trenutno podešena vrednost frekvencije očitava se u prozoru iznad klizača. U centralnom delu glavnog prozora iscrtava se amplitudska karakteristika pojačavača brzinom promene frekvencije pomoću klizača. Da bi se dobila amplitudska karakteristika, potrebno je merenja započeti od najniže frekvencije (1 Hz) do maksimalne frekvencije (100 kHz). U desnom delu prozora postoje tri indikatorska polja sa oznakama „Otpornost potrošača R_p (OHM)“, „Izlazni napon viz (mV)“ i „Naponsko pojačanje“.

U polju „Otpornost potrošača R_p (OHM)“ očitava se vrednost otpornosti kojom je opterećen pojačavač (R_p na slici 1.3.2, odnosno na slici 1.3.4). Vrednost izlaznog napona očitava se u numeričkom obliku dok se, istovremeno prikazuje i na instrumentu sa kazaljkom u sredini desnog dela prozora. Na vrhu, u polju „Naponsko pojačanje“ ispisuje se proračunata vrednost naponskog pojačanja kao bezdimenziona veličina (V/V).

Aktiviranje instrumenta za iscrtavanje grafika počinje selektovanjem strelice u gornjem levom uglu ekrana, a slika se „zamrzava“ prebacivanjem dugmeta „Stopiraj grafik“ u desni položaj“.

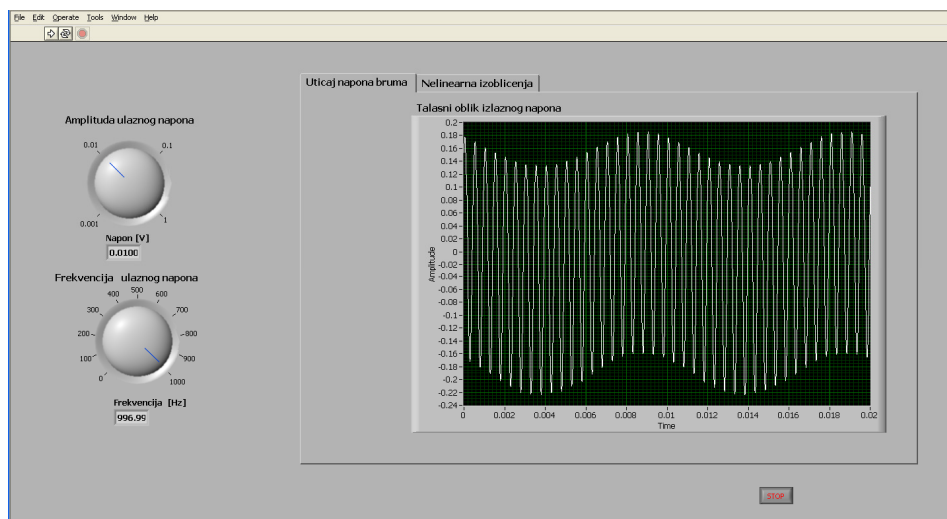
Nacrtana amplitudska karakteristika briše se pritiskom na dugme „Izbriši grafik“.

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

Drugi virtuelni instrument služi da omogući posmatranje talasnih oblika napona na izlazu kako bi se uočio uticaj negativne povratne sprege na šumove generisane unutar pojačavača i na nelinearna izobličenja.

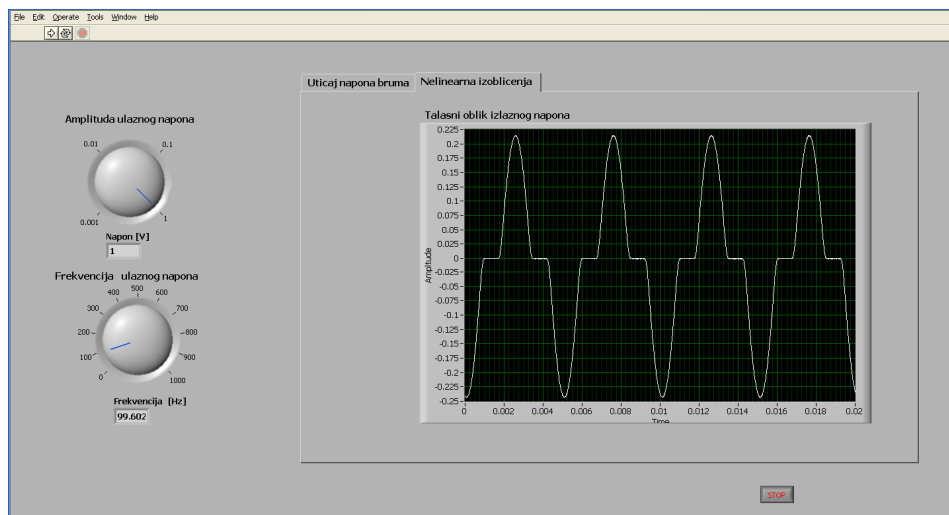
Sa leve strane osnovnog prozora nalazi se kontrola pobudnog signala u vidu dva rotirajuća dugmeta. Gornjim se podešava amplituda, a donjim frekvencija. Ispod svakog dugmeta nalazi se prozor u kome se očitava trenutno podešene vrednosti napona (u voltima) i frekvencije (u Hz).

Deo prozora za prikaz rezultata sadrži dva taba. Prvi se odnosi na posmatranje uticaja napona šuma. Izgled virtuelnog instrumenta sa aktiviranim tabovima „Uticaj napona bruma“ i „Nelinearna izobličenja“ prikazan je na slikama 1.3.10.a. i 1.3.10.b, respektivno.



Slika 1.3.10 a) Prozor programa u kome se posmatra uticaj napona bruma

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega



Slika 1.3.10.b Prozor programa u kome se posmatra uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja

Levim klikom miša na belu strelicu (↔) u gornjem levom uglu osnovnog porzora virtuelni instrument se uključuje, dok se klikom na dugme „STOP“ u donjem desnom uglu isti isključuje.

1.3.4 Uputstvo za rad

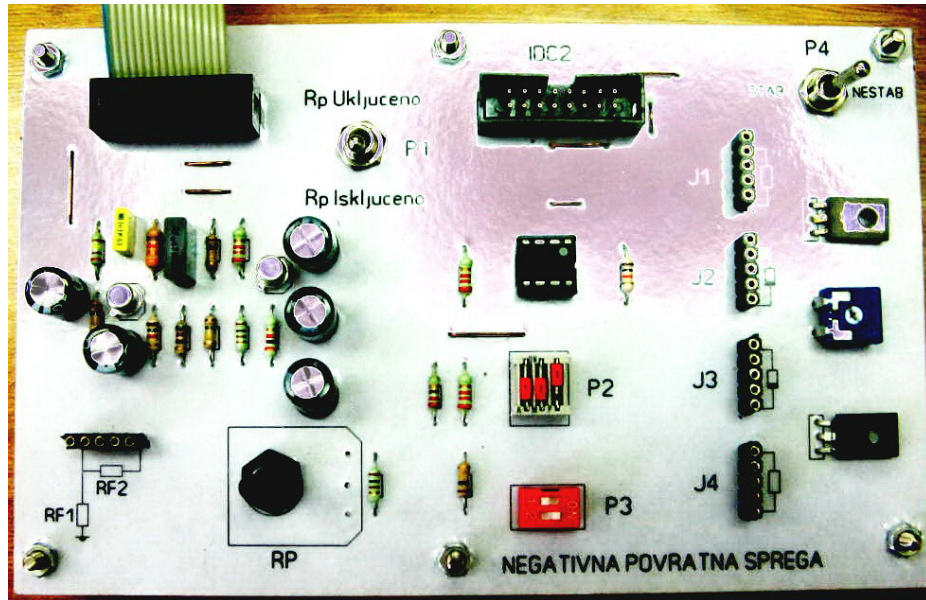
1.3.4.1 Zadatak

- Izmeriti uticaj jačine negativne povratne sprege na amplitudsku karakteristiku pojačavača napona sa redno-naponskom povratnom spregom.
- Izmeriti uticaj jačine negativne povratne sprege na izlaznu otpornost pojačavača napona sa redno-naponskom povratnom spregom.
- Uočiti uticaj negativne povratne sprege na šumove nastale unutar pojačavača napona sa redno-naponskom povratnom spregom.
- Uočiti uticaj negativne povratne sprege na nelinearna izobličenja pojačavača napona sa redno-naponskom povratnom spregom.

1.3.4.2 Opis makete

Izgled makete prikazan je na slici 1.3.11.

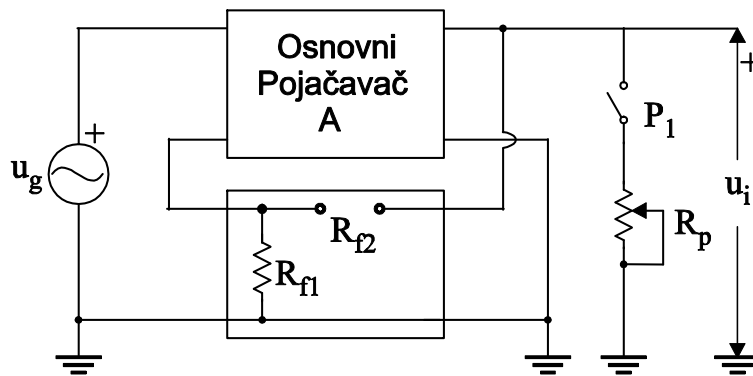
CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega



Slika 1.3.11. Izgled makete za vežbu Negativna povratna sprega

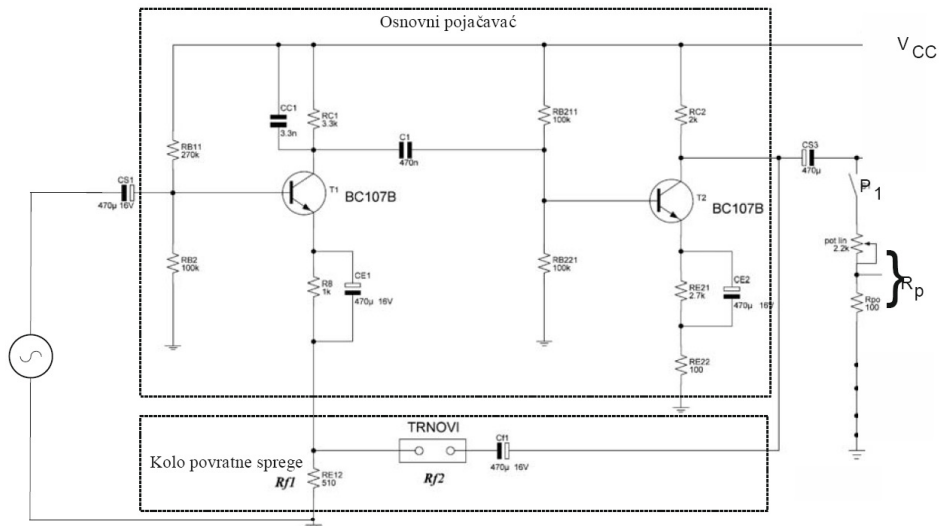
Na istoj štampanoj ploči realizovana su dva pojačavača sa negativnom povratnom spregom.

Prvi je namenjen za realizaciju prva dva zadatka. On se nalazi u levom delu pločice. Blok šema prve makete prikazana je na slici 1.3.12. Osnovni pojačavač bez povratne sprege realizovan je kao dvostepeni koga čine dva bipolarna tranzistora BC107B u konfiguraciji sa zajedničkim emitorom sa pratećim pasivnim elementima.



a)

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega



b)

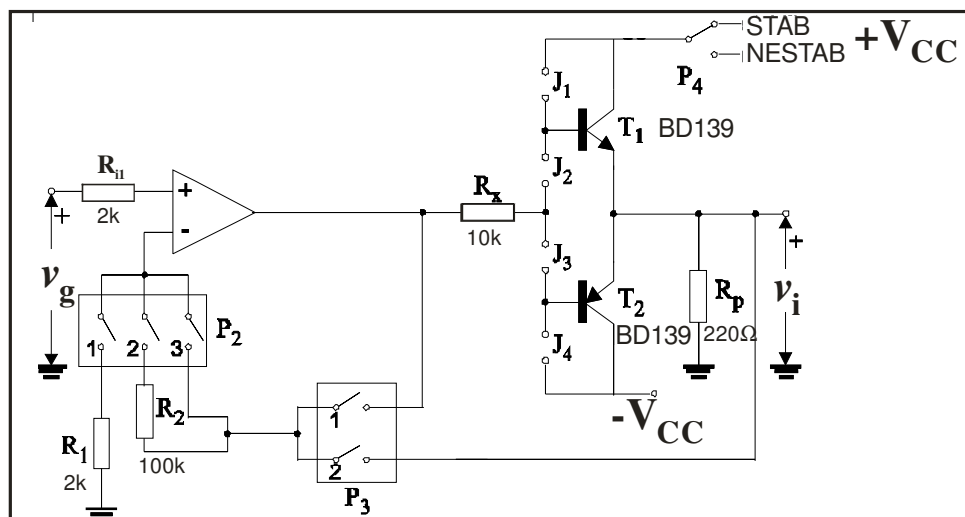
Slika 1.3.12 a) Blok šema veza kola makete za zadatke a) i b)

b) Eleektrična šema veza kola makete za zadatke a) i b)

Kolo povratne sprege sastoji se od razdelnika napona koji čine R_{f1} i R_{f2} . Otpornik R_{f1} ugrađen je na maketi i ima fiksnu vrednost od 510Ω . Predviđeno je da se veličina koeficijenta povratne sprege kontroliše promenom otpornika R_{f2} . Studenti fizički stavljaju otpornike odgovarajućih vrednosti u konektore realizovane od “trnova” ispod kojih je napisano RF2. Kontrola otpora potrošača obavlja se rotirajućim potenciometrom preko osovine označene sa R_P . Da bi se pojačavač zaštitio od kratkog spoja na izlazu (u položaju potenciometra $R_p=0 \Omega$) na red sa njim vezan je otpornik od 100Ω . Otpornost potrošača može se isključiti prebacivanjem prekidača P1 u položaj “Pp Isključeno”. Preko otpornika R_{E22} ostvaruje se lokalna redno-strujna negativna povratna sprega kojom se smanjuje pojačanje drugog stepena. Kondenzatori C_{S1} , C_1 , C_{S3} i C_{f1} , razdvajaju jednosmerne signale na granici generator-pojačavač, prvi-drugi stepen, pojačavač-potrošač i izlaz osnovnog pojačavača-kolo povratne sprege. Naravno, za naizmenični signal predstavljaju kratak spoj. Kondenzatori C_{E1} i C_{E2} presvajaju R_{E1} i R_{E21} za naizmenični signal. Kondenzator C_{C1} , zajedno sa C_1 predstavlja razdelnik napona za naizmenični signal (uveden je da koriguje amplitudsku karakteristiku i ograniči $f_g < 20 \text{ kHz}$, isključivo iz praktičnih razloga vezanih za ovu vežbu).

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

Električna šema kola na kome se posmatra uticaj negativne povratne sprege na šum i nelinearna izobličenja prikazana je na slici 1.3.13. Fizički, ovo kolo smešteno je na desnoj polovini makete. Ono se sastoji od simetričnog pojačavača snage sa komplementarnim tranzistorima T_1 (BD139) i T_2 (BD140). Pojačavač se napaja iz izvora sa stabilisanim ili nestabilisanim naponom $\pm V_{CC}$. Izbor tipa izvora obavlja se prebacivanjem prekidača P_4 u položaje označene sa "STAB" ili "NESTAB". Izborom pasivnih komponenata koje se fizički ubacuju u konektore označene sa J_1, J_2, J_3 i J_4 može se kontrolisati položaj radne tačke ovih tranzistora (AB ili B). Pojačavač snage opterećen je potrošačem $R_p=220\ \Omega$ i pobuđuje se iz prepojačavača preko otpornika $R_x=10\text{k}\Omega$. Prepojačavač je realizovan na osnovu integrisanog operacionog pojačavača LM258 u konfiguraciji neinvertujućeg pojačavača sa naponskim pojačanjem $A_p=50$ (otpornici $R_1=2\text{k}\Omega$ i $R_2=100\text{k}\Omega$). U kolu povratne sprege vezani su prekidači P_2 i P_3 , kao i otpornici označeni na slici 1.3.13 sa $R_1=2\text{k}\Omega$ i $R_2=100\text{k}\Omega$.



Slika 1.3.13 Šema veza kola makete za zadatke c) i d)

1.3.4.3 Toka rada

Pre početka rada klizač za podešavanje frekvencije pobudnog signala postaviti na minimalnu vrednost (donji položaj).

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

a) Uticaj negativne povratne sprege na frekventijsku karakteristiku pojačavača

Sva merenja u okviru ove tačke obavljaju se pri neopterećenom pojačavaču, $R_p \rightarrow \infty$. Veza između izlaza pojačavača i otpora potrošača prekida se otvaranjem prekidača P_1 u šemi kola sa slike 1.3.12.

- A.** Snimiti amplitudsku karakteristiku pojačavača bez povratne sprege ($R_{f2} \rightarrow \infty$). Merenje se obavlja podizanjem klizača za kontrolu frekvencije ulaznog napona od krajnjeg donjeg do krajnjeg gornjeg položaja.
- B.** Podesiti frekvenciju pobudnog generatora v_g na vrednost $f=1$ kHz. Očitati naponsko pojačanje na srednjim frekvencijama A_{no} . Nakon toga smanjivati/povećavati frekvenciju dok se ne registruje pad pojačanja na vrednost jednaku $0.707 A_{no}$. Zapisati dobijene vrednosti za donju graničnu frekvenciju f_{do} i gornju graničnu frekvenciju f_{go} . Dobijene vrednosti uneti u prvu vrstu Tabele I.
- C.** Ponoviti postupke iz tačaka A i B za tri različite vrednosti otpornosti R_{f2} (tri vrednosti koeficijenta povratne sprege) koje su date u Tabeli 1.3.1. (Vrednost otpornika R_{f1} u kolu povratne sprege iznosi $R_{f1}=510 \Omega$).
- D.** Na osnovu izraza (1.3.2), (1.3.3) i (1.3.7), datih u teorijskoj postavci, formirati tabelu sa teorijski proračunatim vrednostima za pojačanje na srednjim frekvencijama i granične frekvencije. Kao A_{no} , f_{do} i f_{go} koristiti izmerene vrednosti za naponsko pojačanje i granične frekvencije kada nema povratne sprege ($R_{f2} \rightarrow \infty$). Izračunate vrednosti uneti u Tabelu 1.3.2.

R_{f2} (k Ω)	A_{nr}	f_d (Hz)	f_g (kHz)
∞			
200			
100			
50			

Tabela 1.3.1

R_{f2} (k Ω)	B	A_{nr}	f_d (Hz)	f_g (kHz)
200				
100				
50				

Tabela 1.3.2

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

1.3.5 Uticaj negativne povratne sprege na izlaznu otpornost pojačavača

U ovom delu vežbe potrebno je odrediti vrednost izlazne impedanse pojačavača na srednjim frekvencijama primenom metoda poluskretanja. Podesiti frekvenciju generatora na $f=1$ kHz.

- A. Za kolo bez povratne sprege ($R_{f2} \rightarrow \infty$) odrediti vrednost izlaznog napona v_{iz0} za neopterećeni pojačavač ($R_p \rightarrow \infty$), kada je prekidač P_1 otvoren. Nakon toga zatvoriti prekidač i podešavati vrednost otpornosti potrošača potencijometrom R_p sve dok se ne dobije vrednost izlaznog napona koja je dvostruko manja od napona neopterećenog pojačavača. Očitati vrednost otpora potrošača. Prema definiciji, tada je izmerena vrednost otpornosti potrošača jednaka izlaznoj otpornosti pojačavača $R_{iz}=R_p$. Upisati očitane vrednosti za v_{iz0} i R_{iz} u Tabelu 1.3.3.
- B. Ponoviti postupak iz tačke A za tri vrednosti otpornosti R_{f2} koje su date u Tabeli 1.3.3.
- C. Na osnovu izraza (1.3.3) i (1.3.10), datih u teorijskoj postavci, formirati tabelu sa teorijski proračunatim vrednostima za izlaznu otpornost pojačavača pri srednjim frekvencijama. Kao A_{no} i R_{izo} koristiti izmerene vrednosti za naponsko pojačanje i izlaznu otpornost u kolu bez povratne sprege ($R_{f2} \rightarrow \infty$). Izračunate vrednosti uneti u Tabelu 1.3.4.

R_{f2} (k Ω)	v_{iz0} (V)	A_{nr}	R_{iz} (Ω)
∞			
200			
100			
50			

Tabela 1.3.3

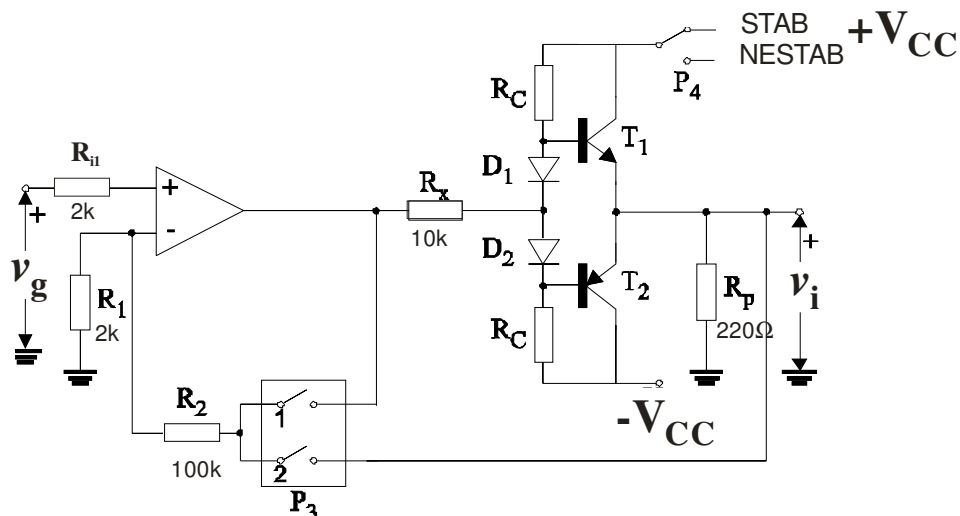
R_{f2} (k Ω)	B	R_{iz} (Ω)
200		
100		
50		

Tabela 1.3.4

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

1.3.6 Uticaj negativne povratne sprega na napon bruma

Povezati desni deo makete (slika 1.3.13) tako da se realizuje pojačavač prema šemi sa slike 1.3.14. Da bi se realizovala šema potrebno je da prekidači budu postavljeni u položaje prikazane u tabeli 1.3.5.



Slika 1.3.14 Šema pojačavača koji demonstrira uticaj negativne povratne sprega na napon bruma

P2	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;"> ON DIP </div>	
----	--	--

Tabela 1.3.5

Kolo se pobuđuje sinusoidalnim signalom amplitude 20 mV i frekvencije 1 kHz. Otpornici R_1 , R_2 , R_p , R_x , tranzistori T_1 , T_2 kao i operacioni pojačavač ugradjeni su u maketi. Preostale elemente, otpornike $R_c=100\text{ k}\Omega$ kao i diode treba povezati prema sledećoj tabeli:

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

J ₁	J ₂	J ₃	J ₄
R _C	D ₁	D ₂	R _C

Tabela 1.3.6

Diode D₁ i D₂ služe da obezbede jednosmernu polarizaciju tranzistora T₁ i T₂ tako da pojačavač radi u klasi AB.

Dovesti nestabilisani napon na +V_{CC} prebacivanjem prekidača P₄ u položaj „NESTAB“. Položaj prekidača P₃ određuje da li negativna povratna sprega obuhvata izvor šuma. Prilikom promene položaja prekidača P₃ voditi računa da se ne postave istovremeno oba prekidača u zatvoreni položaj.

A Negativnu povratnu spregu primeniti samo na prvi pojačavački stepen prebacivanjem prekidača P₃ u stanje prikazano u tabeli 1.3.7:

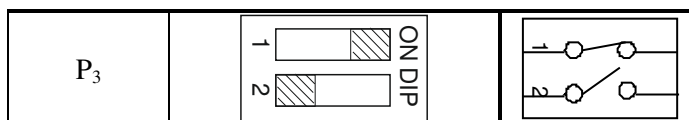


Tabela 1.3.7

B Skicirati talasni oblik napona za kolo pojačavača bez negativne povratne sprege u slučaju kada je napajanje nestabilisano u dijagram sa slike 1.3.15.a.

C Negativnom povratnom spregom obuhvatiti izvor šuma, tako što se vrati izlazni signal drugog pojačavačkog stepena. Prebaciti prekidač P₃ u stanje prikazano u tabeli 1.3.8:

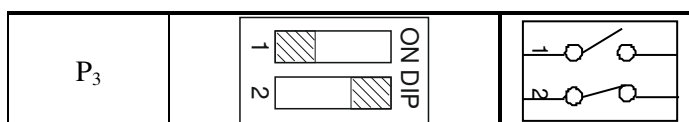
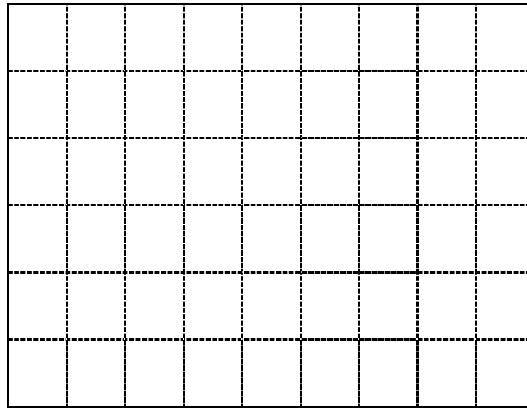


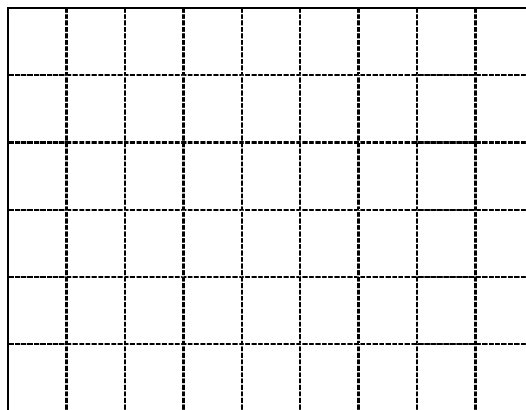
Tabela 1.3.8

D Skicirati talasni oblik napona za kolo pojačavača sa negativnom povratnom spregom u slučaju kada je napajanje nestabilisano u dijagram sa slike 1.3.15.b.

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega



a) Bez povratne sprege



b) Sa povratnom spregom

Slika 1.3.15 *Talasni oblici izlaznog napona*
a) bez povratne sprege b) sa povratnom spregom

1.3.7 Uticaj negativne povratne sprege na izobličenja

Povezati desni deo makete (slika 1.3.13) tako da se realizuje pojačavač prema šemi sa slike 1.3.16. Da bi se realizovala šema potrebno je da prekidači u P_2 budu postavljeni u sledeće položaje:

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

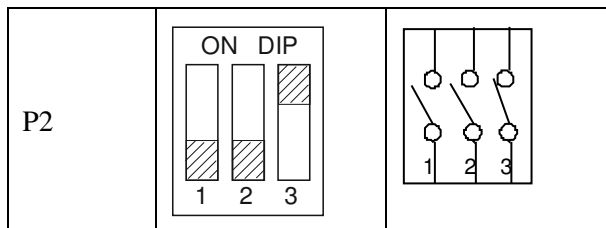
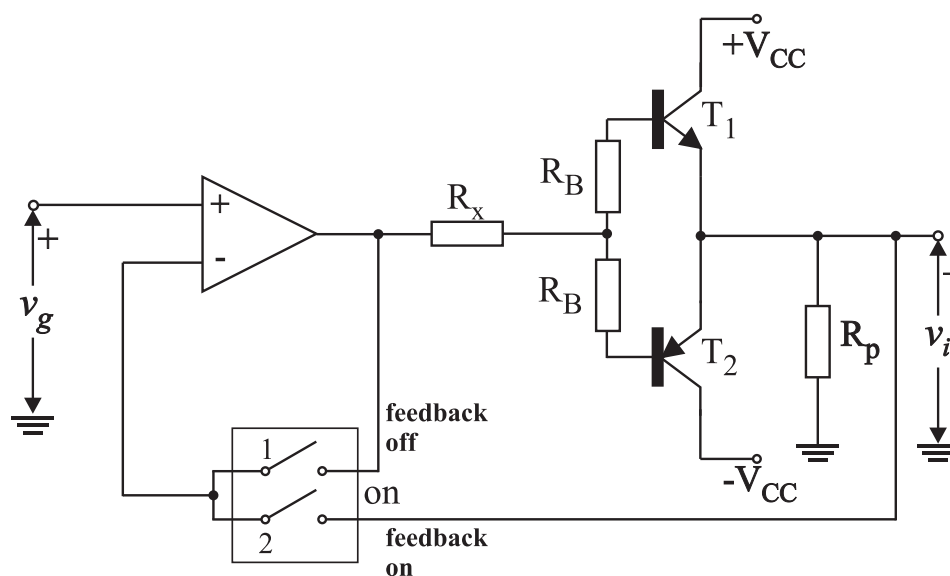


Tabela 1.3.9

Konektore J_1 i J_4 ostaviti nepovezane (izvaditi R_C iz tačke d), a u konektorima J_2 i J_3 diode zameniti otpornicima $R_B=100 \Omega$. Time se postiže da tranzistori T_1 i T_2 rade u klasi B. Naime, u odsustvu signala pobude jednosmerni napon na bazama tranzistora jednak je nuli, tako da su oba tranzistora zakočena.

Dovesti stabilisani napon na $+V_{CC}$ prebacivanjem prekidača P4 u položaj „STAB“. Položaj prekidača P3 određuje da li negativna povratna sprega obuhvata izobličeni signal na izlazu pojačavača snage. Prilikom promene položaja prekidača P3 voditi računa da se ne postave istovremeno oba prekidača u zatvoreni položaj.



Slika 1.3.16 Šema pojačavča sa izlaznim stepenom koji radi u klasi B

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

A Negativnu povratnu spregu primeniti samo na prvi pojačavački stepen prebacivanjem prekidača P_3 u stanje prikazano u tabeli:

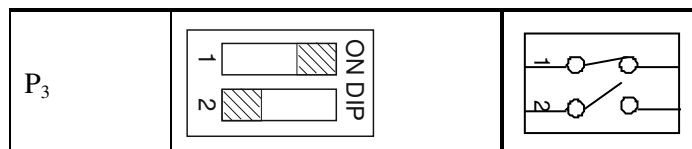


Tabela 1.3.10

B Skicirati talasni oblik napona na izlazu pojačavača bez negativne povratne sprege u dijagram sa slike 1.3.17.a.

C Negativnom povratnom spregom obuhvatiti nelinearni pojačavač, tako što prekidač P_3 postavi u stanje prikazano u tabeli:

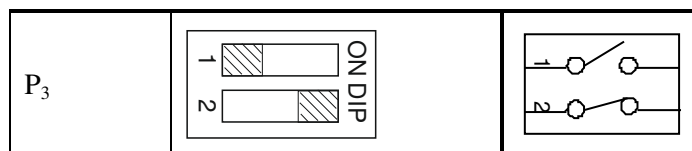
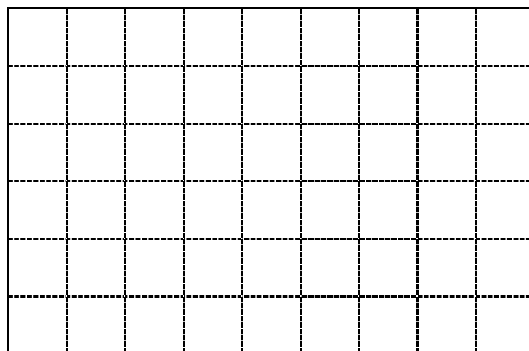


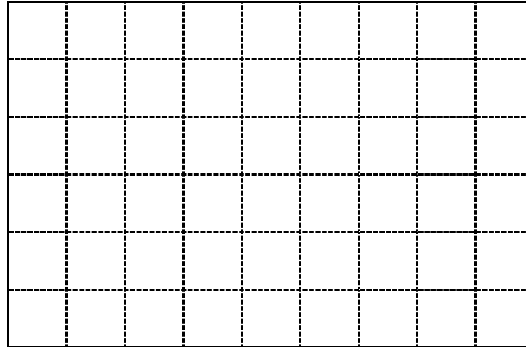
Tabela 1.3.11

D Skicirati talasni oblik napona na izlazu pojačavača bez negativne povratne sprege u dijagram sa slike 1.3.17.b.



a) Bez povratne sprege

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega



b) Sa povratnom spregom

Slika 1.3.17 Talasni oblici izlaznog napona
a) bez povratne sprege b) sa povratnom spregom

CIKLUS 1 VEŽBA 3: Negativna povratna sprega

1.3.8 Pitanja za proveru znanja

1. Kako negativna povratna sprega utiče na pojačanje pojačavača?
2. Ako je AB kružno pojačanje pojačavača sa negativnom povratnom spregom a f_{no} i f_{vo} označavaju granične frekvencije pojačavača bez povratne sprege na niskim i visokim frekvencijama, respektivno, napisati izraze za proizvod pojačanja i propusnog opsega pojačavača sa i bez negativne povratne sprege.
3. Kako negativna povratna sprega utiče na nelinearna izobličenja i zašto.
4. Kako negativna povratna sprega utiče na šumove.

Datum: _____

Student: _____

Overava: _____