

Pojačalo snage C klase

Sudar, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:346502>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-27**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.

Sveučilišni studij

POJAČALO SNAGE C KLASE

Završni rad

Ivan Sudar

Osijek, 2016.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 22.09.2016.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada

Ime i prezime studenta:	Ivan Sudar
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
Mat. br. studenta, godina upisa:	3782, 28.08.2013.
OIB studenta:	25734077671
Mentor:	Doc.dr.sc. Tomislav Matić
Sumentor:	
Naslov završnog rada:	Pojačalo snage C klase
Znanstvena grana rada:	Elektronika (zn. polje elektrotehnika)
Predložena ocjena završnog rada:	Vrlo dobar (4)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 Jasnoća pismenog izražavanja: 2 Razina samostalnosti: 2
Datum prijedloga ocjene mentora:	22.09.2016.
Datum potvrde ocjene Odbora:	29.09.2016.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 24.09.2016.

Ime i prezime studenta:

Ivan Sudar

Studij:

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

3782, 28.08.2013.

Ephorus podudaranje [%]:

1

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Pojačalo snage C klase**

izrađen pod vodstvom mentora Doc.dr.sc. Tomislav Matić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak završnog rada.....	1
2. POJAČALA SNAGE	2
2.1. Bipolarni tranzistori i statička radna točka.....	4
2.2. Podjela u klase.....	7
2.2.1. Klasa A.....	7
2.2.2. Klasa B	8
2.2.3. Klasa AB	9
2.2.4. Klasa C	10
2.2.5. Klasa D.....	10
2.2.5. Klasa E	10
2.2.6. Klasa F.....	11
3. POJAČALO SNAGE C KLASE.....	12
3.1. Osnovna obilježja tranzistora snage i granični parametri	13
3.2. Proračun pojačala snage C klase.	16
3.3. Odabir tranzistora za izradu pojačala.	18
4. SIMULACIJA I MJERENJA.....	19
4.1. Simulacija pojačala za sinusni signal.	21
4.2. Simulacija za pilasti pobudni signal.....	28

4.3. Simulacija za pravokutni pobudni signal.	30
4.4. Pojačanje i korisnost.....	31
5. ZAKLJUČAK	34
SAŽETAK / ABSTRACT.....	36
ŽIVOTOPIS	37

1. UVOD

Tema ovog rada su pojačala snage, točnije pojačala snage C klase. U detaljnijoj razradi pojačala ove klase biti će opisana glavna komponenta pojačala snage te neke njene glavne karakteristike. Pojačalo snage ima zadaću predati trošilu što veću izmjeničnu snagu uz što manja izobličenja i što veći stupanj korisnog djelovanja. Glavna komponenta pojačala snage je tranzistor. Tranzistori su poluvodičke elektroničke komponente koje služe za: pojačavanje električnih signala, kao elektronička sklopka, za stabilizaciju napona, modulaciju signala, te razne druge primjene. Nadalje, opisane su karakteristike tranzistora, kao što su: izlazna karakteristika, granični parametri te dobivanje statičke radne točke. Statička radna točka određuje podjelu pojačala snage u klase. Pojačalo snage C klase se koristi za pojačavanje snage u području visokih frekvencija. Statička radna točka pojačala snage C klase nalazi se u području zapiranja tranzistora. U konačnici, prikazana je izvedba pojačala snage C klase s bipolarnim tranzistorom te rezultati simulacije.

U prvom poglavlju rada opisana su pojačala snage općenito, te kako se pojačala snage dijele u klase. Svaka klasa je predstavljena te je objašnjeno zašto toj klasi pojačalo pripada.

U drugom poglavlju detaljnije je obrađeno pojačalo snage C klase što i je tema ovog rada.

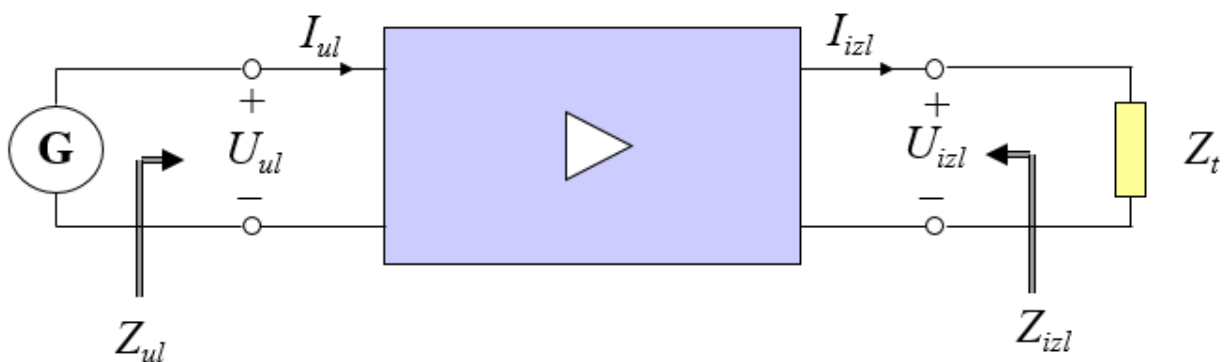
U trećem poglavlju analizirala se simulacija pojačala snage C klase u programskom sučelju Multisim, te su prikazani rezultati mjerenja.

1.1. Zadatak završnog rada.

Zadatak ovog završnog rada je opisati načelo rada pojačala snage C klase. Projektirati pojačalo snage C klase u izvedbi s bipolarnim tranzistorom i izraditi simulacijski model u programskom paketu Multisim(R). Prikazati rezultate simulacije.

2. POJAČALA SNAGE

Općenito pojačalo u elektrotehnici označava linearni elektronički sklop koji se koristi za pojačavanje električkih signala. Električni signal koji se pojačava može biti strujni ili naponski, s time da ovisno kakva veličina je dovedena na ulaz ta veličinu će se dobiti pojačana na izlazu tog pojačala. Stoga pojačava li se strujni električni signal na izlazu pojačala dobiva se pojačani strujni električni signal, ista analogija vrijedi za naponski električni signal. Generator ulaznog električnog signala priključen je na ulazne stezaljke pojačala, dok na izlazne stezaljke se spajaju trošila kojima se predaje pojačani signal što se najbolje vidi na slici 2.1.



Sl. 2.1. Prikaz pojačala sa spojem generatora i trošila. [3]

Na slici 2.1 prikazani su točni smjerovi struja te polaritet napona. Oznake struja i napona prikazuju da je riječ o efektivnim vrijednostima. Pojačalo na slici 2.1. označeno je plavom bojom i simbolom trokuta, početna ideja pojačalo predstavlja kao kutiju u kojoj se nalaze: aktivne električne komponente (bipolarni ili unipolarni tranzistor), pasivne električne komponente (diode), linearne disipativne komponente (otpornici) i linearne reaktivne komponente (zavojnice i kondenzatori).

Prilikom djelovanja aktivnih elektroničkih komponenti kao što su bipolarni i unipolarni tranzistor dolazi do pojačanja signala u pojačalu. Da bi se dobio ispravan rad aktivnih elektroničkih komponenti u pojačalu potrebno je svaku komponentu dovesti u odgovarajuće radno područje. Odgovarajuće radno područje je ono u kojem dolazi do izražaja pojačivačko djelovanje aktivne komponente, a dovode se u to stanje pod djelovanjem istosmjernog napona i struje.

Ako se npr. pojačava strujni signal pomoću pojačala koje je projektirano pomoću bipolarnog tranzistora u spoju zajedničkog emitera, tada je potrebno tranzistor dovesti u centralni dio normalnog aktivnog područja gdje je faktor strujnog pojačanja tranzistora puno veći od 1. [1]

Tranzistor se dovodi u odgovarajuće radno područje tako da se na njegove elektrode dovede istosmjerni napon što dovodi do zaključka da pojačalo u radu uvijek mora biti spojeno na izvor istosmjernog napona. Pojačalo pojačava signal tako što ulaznoj snazi električnog signala dodaje snagu pojačala dobivene iz istosmjernog izvora.

$$P_{iz} = P_{ul} + (1 - K)P_0 \quad (2 - 1)$$

Prema jednadžbi 2-1 izlazna snaga P_{iz} pojačala jednaka je zbroju ulazne snage P_{ul} i unutarnje snage pojačala P_0 . $(1 - K)$ u jednadžbi 2-1 označava gubitak snage izvora zbog povećanja nivoa izmjeničnog signala. K u jednadžbi 2-1 je broj između 0 i 1.

Do sada opisana pojačala se nazivaju signalna pojačala jer pojačavaju strujni ili naponski električni signal pri čemu je bitna linearnost njihovog rada. Izlazna razina snage kod ovih pojačala je često mala. Na izlazu složenijih pojačala često izlazni signal treba imati značajniji iznos snage koju predaje trošilu manjeg otpora, poput zvučnika u audiopojačalima.

U nastavku ovog rada detaljno se analizira pojačalo snage. Pojačalo snage ima zadaću predati trošilu što veću izmjeničnu snagu uz što manja izobličenja i što veći stupanj korisnog djelovanja. Pod većom izmjeničnom snagom podrazumijeva se vrijednost izlaznog signala oko 1 W. Korisnost je za pojačalo snage, kao energetska jedinica vrlo važan element. Korisnost predstavlja odnos izlazne izmjenične snage P_{iz} i ukupne snage privedene pojačalu P_0 . Pojačalo snage treba se promatrati kao sklop u kojem nastaje proces pretvorbe istosmjerne energije izvora napajanja u izmjeničnu energiju frekvencije jednake pobudnoj frekvenciji. U čemu se zapravo i vidi osnovna razlika između pojačala naponskog ili strujnog signala i pojačala snage. Budući da rade s većim signalima, tranzistori pojačala snage ne rade u linearnom režimu, nego do izražaja dolazi nelinearnost njihovih karakteristika. Treba voditi računa da aproksimacija nelinearnih elemenata s linearnim modelima više nije točna. Iako pojačala snage rade s velikim signalima, linearnost im

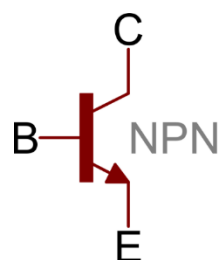
je jedno od ključnih svojstava, te se njihovim projektiranjem nelinearna izobličenja izlaznog signala nastoje maksimalno smanjiti.

2.1. Bipolarni tranzistori i statička radna točka

Tema ovog rada je projektirati pojačalo snage C klase u izvedbi s bipolarnim tranzistorom, stoga se u ovom poglavlju opisuju bipolarni tranzistori te njihova statička radna točka. Razumijevanje statičke radne točke je potrebno kako bi se razumjela podjela pojačala snage u klase.

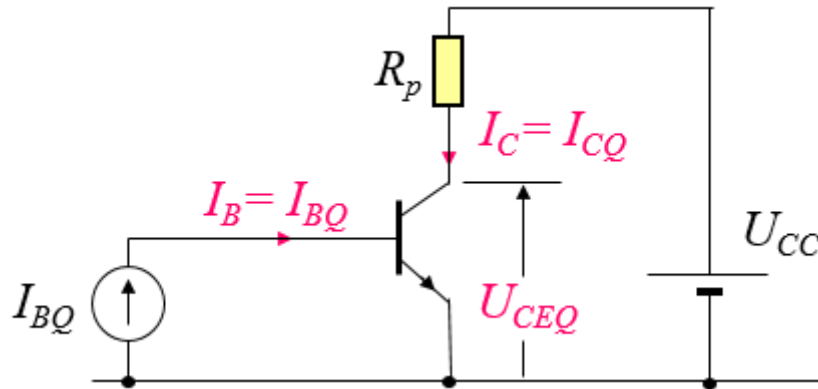
Tranzistori su poluvodičke elektroničke komponente koje služe za: pojačavanje električnih signala, kao elektronička sklopka, za stabilizaciju napona, modulaciju signala, te razne druge primjene. Tranzistori su postali osnovni tvorni element mnogih elektroničkih krugova, integriranih krugova te elektroničkih računala. Osnovna podjela tranzistora je na bipolarne i unipolarne tranzistore. Bipolarni tranzistori su tranzistori kod kojih vodljivost ovisi o manjinskim nositeljima električnog naboja, za razliku od unipolarnih kod kojih vodljivost ovisi samo o većinskim nositeljima električnog naboja.

Bipolarni tranzistori su građeni tako da dopiranjem čistog poluvodiča nastaje struktura u kojoj se između dva područja istog tipa vodljivosti nalazi područje suprotnog tipa vodljivosti. Ovisno o tome razlikujemo dva tipa bipolarnih tranzistora: NPN i PNP. Kod bipolarnih tranzistora razlikuju se tri različita kontakta: baza (B), emiter (E), kolektor (C), prikazana slikom 2.2.



Sl. 2.2. Simbol NPN tranzistora s označenim priključnicama.

Važan parametar bipolarnog tranzistora je izlazna karakteristika, koja prikazuje ovisnost istosmjernje kolektorske struje i napona između kolektora i emitera pod utjecajem struje baze. Pomoću izlazne karakteristike određujemo položaj statičke radne točke. Kako bi se odredila statička radna točka, tranzistor se postavlja u statičko djelovanje prema slici 2.3.



Sl. 2.3. Tranzistor u statičkim uvjetima rada. [3]

Iz ove sheme potrebno je napisati Kirchhoffov zakon za napone u izlaznom krugu koji glasi:

$$U_{CC} - I_C R_P - U_{CE} = 0 \quad (2 - 2)$$

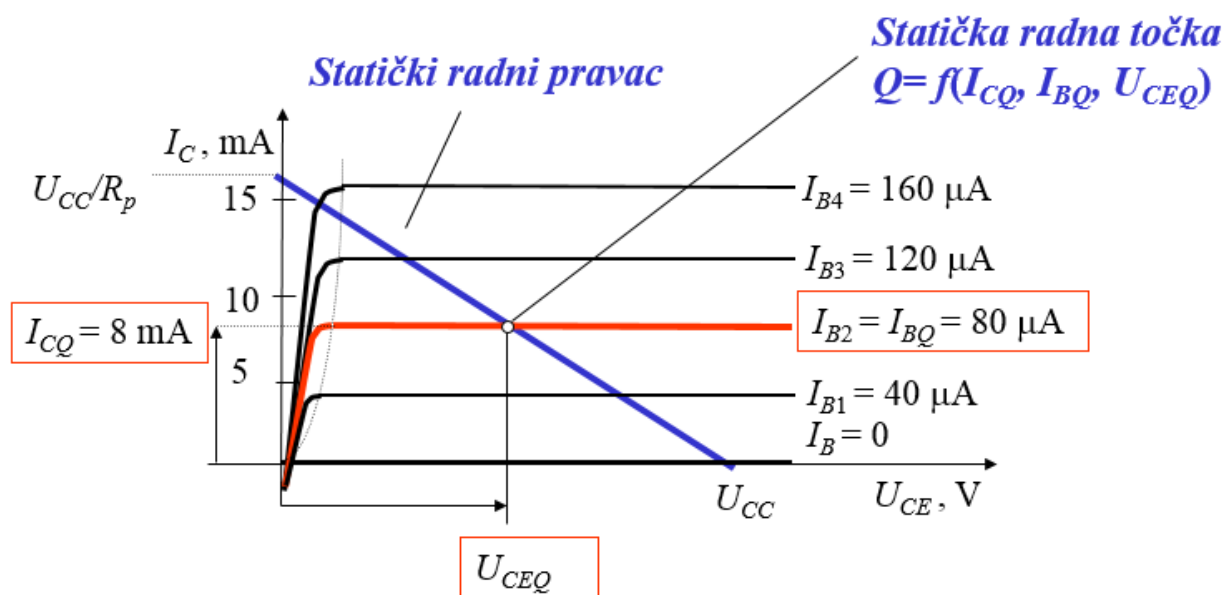
Jednadžba 2-2 je potrebna za određivanje statičkog radnog pravca tranzistora. Da bi se nacrtao statički radni pravac potrebno je odrediti nultočke na x i y osi izlazne karakteristike. Nultočka na y-osi dobije se tako da se u jednadžbi 2-2 traži vrijednost struje I_C u slučaju kad je napon U_{CE} jednak nuli.

$$I_C = \frac{U_{CC}}{R_P} \quad (2 - 3)$$

Dok se nultočka na x osi dobije iz početne jednadžbe 2-2 uz uvjet da je struja I_C jednaka nuli.

$$U_{CE} = U_{CC} \quad (2 - 4)$$

Nultočke se unose u izlaznu karakteristiku tranzistora te se provlači pravac kroz njih. Statička radna točka se nalazi na sjecištu statičkog radnog pravca i struje baze kao što je prikazano na slici 2.4.



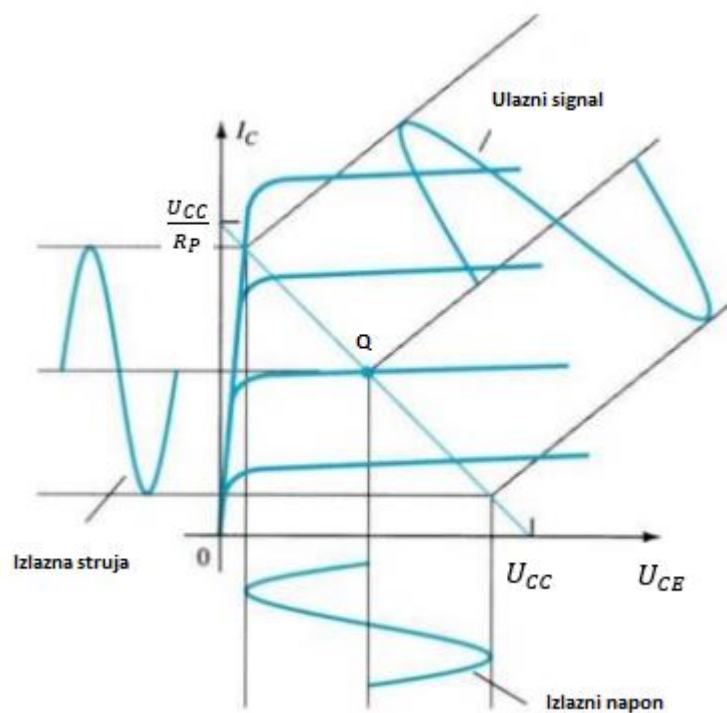
Sl. 2.4. Izlazna karakteristika bipolarnog tranzistora sa statičkom radnom točkom i pravcem.[3]

2.2. Podjela u klase.

Podjela pojačala snage u klase ovisi od položaja statičke radne točke u polju izlaznih karakteristika tranzistora. U nisko frekvencijskoj tehnici razlikuju se tri klase, a to su: A, B i AB klasa pojačala. Kod visokofrekvencijskih pojačala razlikuju se klase: C, D, E, F. Koja su predstavljena kao pojačala visoke korisnosti.

2.2.1. Klasa A

Pojačalo radi u klasi A ukoliko je radna točka pojačala približno na sredini radnog područja, tako da struja kroz tranzistor teče tijekom cijele periode ulaznog signala kako prikazano na slici 2.5. gdje je statička radna točka označena s Q, te je također prikazana izlazna struja koja teče tijekom cijele periode.

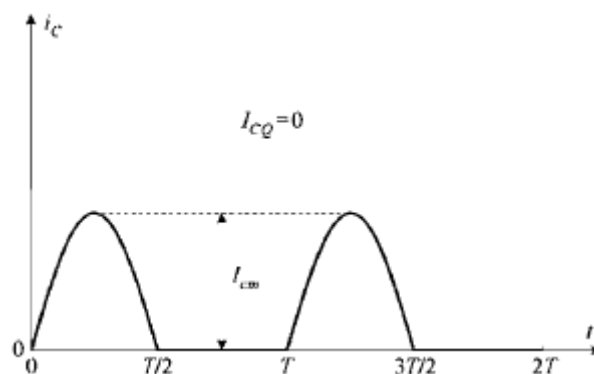


Sl. 2.5. Položaj statičke radne točke kod A klase.

Kroz tranzistor teče stalna istosmjerna struja bez obzira na prisutnost ulaznog izmjeničnog signala. Ta struja izaziva trošenje snage istosmjernog izvora i disipaciju snage u tranzistoru. Zbog toga je stupanj iskorištenja vrlo mali. Snaga koja se može realizirati u ovoj klasi je relativno mala, no u pogledu izobličenja dobivaju se povoljni rezultati pogotovo pri vrlo malim ulaznim signalima gdje izobličenja skoro da i ne postoje. A klasa pojačala pogodna je za pojačala struje i napona jer daje mala nelinearna izobličenja uz visok stupanj strujnog ili naponskog pojačanja, ali nije baš pogodna za pojačala snage jer je istosmjerni izvor kojeg smatramo kao napajanje pojačala stalno opterećen pa je efikasnost dosta mala. Najviše se koriste kao pojačala malih snaga (antenska predpojačala), u sustavima gdje je potrebna mala distorzija (gitarska pojačala), odnosno kada treba pojačavati snagu signala promjenjive amplitude.

2.2.2. Klasa B

Kod ove klase statička radna točka tranzistora nalazi se na prekidnom potencijalu odnosno na granici normalnog aktivnog područja i područja zapiranja. Što dovodi do zaključka da kolektorska struja tranzistora teče samo u slučaju kada na ulazu postoji izmjenični signal. Ukoliko ulaznog signala nema kolektorska struja ima vrijednost 0. Kada na ulazu postoji izmjenični signal, kolektorska struja teče samo polovinu svake periode. Potvrda prethodne tvrdnje vidljiva je na slici 2.6. gdje je prikazana kolektorska struja koja teče samo polovinu periode.

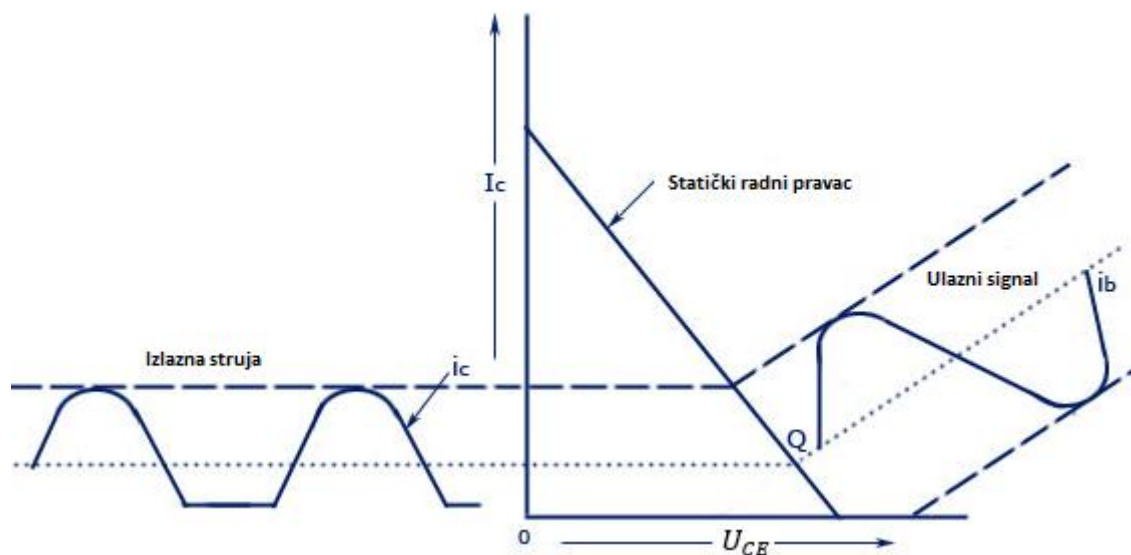


Sl. 2.6. Prikaz kolektorske struje pojačala snage B klase. [4]

Stoga se ovo pojačalo izvodi s dva tranzistora u protutaktnom spoju, pri čemu svaki nosi samo jednu poluperiodu ulaznog signala. Tranzistori moraju biti jednakih svojstava s tim da je jedan PNP tipa, a drugi NPN. Pojačalo realizirano s jednim tranzistorom davalo bi signal s velikim nelinearnim izobličenjem jer bi se u izlazni krug prenosile samo one poluperiode koje propuštaju spoj baza emiter. Iz razloga što kolektorska struja ne teče čitavo vrijeme kroz tranzistor nego samo u prisutnosti ulaznog signala efikasnost pojačala snage B klase je veća od efikasnosti pojačala snage A klase. Koristi se na višoj energetskej razini, posebice kada treba pojačavati snagu signala promjenjive amplitude i užega frekvencijskog pojasa.

2.2.3. Klasa AB

Ova klasa zauzima mjesto između klase A i klase B jer je nešto lošija po efikasnosti od B klase a bolja od A klase jer statička radna točka tranzistora leži u normalnom aktivnom području sasvim blizu granice sa zapornim područjem.



Sl. 2.7. Položaj statičke radne točke kod AB klase [5]

Kolektorska struja u statičkoj radnoj točki je nešto malo veća od 0, ali opet manja nego u A klasi. Korisna snaga je u nekoj mjeri smanjena od klase B, ali zbog smanjenja izobličenja kvaliteta ovih pojačala je bolja. Izmjenična kolektorska struja u ovoj klasi teče duže od jedne poluperiode. Koriste se na nešto većoj energetskej razini i kada treba pojačavati snagu promjenjive amplitude

2.2.4. Klasa C

Ova klasa će detaljnije biti objašnjena u poglavlju 3. Pojačalo snage C klase. Jer to je glavna tema ovog rada.

2.2.5. Klasa D

Klasa D je izdvojena od ostalih klasa jer radi na potpuno drugačijem principu. Ova vrsta pojačala svrstava se u digitalna pojačala, zbog samog oblika signala, iako se pod digitalnim pojačalima smatraju svi oni sklopovi koji pojačavaju digitalni signal. Pojačala snage D klase baziraju se na pulsno-širinskoj modulaciji. Trajanje poluperioda pravokutnog signala ovisi o razini analognog ulaznog signala. Na izlazu iz pojačala se nalazi pravokutni signal sa samo dvije razine. Ovaj oblik podsjeća na digitalni zapis signala sa dvije razine te se stoga pojačala D klase nazivaju digitalna. Potrebno je dodati filter koje će iz pravokutnog signala izdvojiti osnovni harmonik i predati ga trošilu.

Korisnost pojačala D klase ovisi i o korisnosti filtra, koji valja sastaviti iz kondenzatora i zavojnice visoke dobrote Q_0 . [2]

2.2.5. Klasa E

Pojačala ove klase sastoje se od aktivnog tropola koji radi kao sklopka i pasivne izlazne mreže.

Prema [2] U idealnom pojačalu tranzijentni odziv izlazne mreže na periodično otvaranje i zatvaranje aktivnog trolola kao sklopke mora biti ovih obilježja:

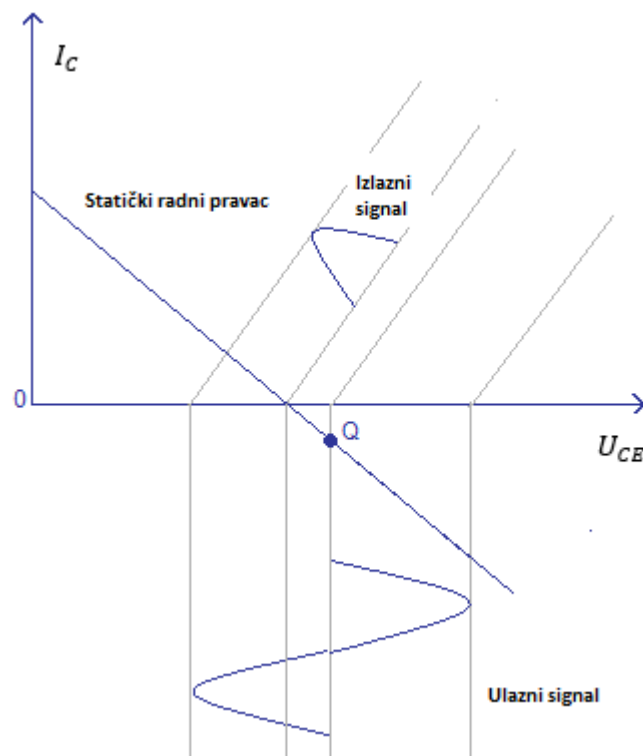
- pri prijelazu iz stanja vođenja u stanje zapiranja (pri otvaranju sklopke) valja odgoditi porast napona na aktivnom trololu sve dok se razina struje kroz trolol ne smanji do nule
- pri prijelazu iz stanja zapiranja u stanje vođenja (pri zatvaranju sklopke) mora se razina napona na trololu smanjiti do nule prije nego što počne teći struja kroz trolol
- nagib valnog oblika napona na trololu mora uvijek biti jednak nuli u trenutku kad napon padne na nulu, tj. u tom trenutku derivacija funkcije napona mora biti jednaka nuli.

2.2.6. Klasa F

Pojačala snage F klase karakterizira izlazna mreža s više rezonantnih frekvencija koje se pojavljuju na frekvenciji pobudnog signala, ali i na frekvencijama jednog ili više harmonika pobudne frekvencije. Prilikom rada aktivnog trolola u aktivnom području ovi sklopovi pripadaju biharmonijskim, odnosno poliharmonijskim pojačalima.

3. POJAČALO SNAGE C KLASE

Pojačalo snage C klase se koristi za pojačavanje snage u području visokih frekvencija. Statička radna točka nalazi se u području zapiranja tranzistora. Stoga je istosmjerna kolektorska struja jednaka nuli, a struja kolektora teče kraće od jedne poluperiode. Kao što je prikazano na slici 3.1. gdje se vidi da je statička radna točka označena s Q u području zapiranja, te izlazni signal teče manje od poluperiode.



Sl. 3.1. Položaj statičke radne točke pojačala snage C klase.[7]

Stoga se može zaključiti da ova klasa ima velika izobličenja. Korisnost i izlazna snaga su vrlo veliki, zbog čega je ova klasa pojačala pogodna za primjenu u predajnicima. Izobličenja se iskorjenjuju korištenjem oscilatornih krugova.

Izvor istosmjernog napona koji je priključen na bazu drži tranzistor na negativnom prednaponu da tranzistor dolazi u stanje vođenja samo kratki dio pozitivne poluperiode ulaznog napona kad je trenutna vrijednost ulaznog napona veća od vrijednosti sume napona napajanja baze i ulaznog signala. To znači da kroz trošilo u kolektorskom krugu teče struja samo mali dio periode ulaznog napona. Stoga je privedena snaga iz izvora napajanja vrlo mala. Kut protjecanja kod pojačala snage C klase je između 0 i π . Smanjenjem kuta protjecanja povećava se korisnost pojačala. Položaj statičke radne točke u zapornom području određuje kut protjecanja. Što je statička točka dalja od normalnog aktivnog područja to je kut manji. Kod pojača snage C klase kut protjecanja odabire se između $\frac{2}{3}\pi$ i $\frac{5}{6}\pi$.

3.1. Osnovna obilježja tranzistora snage i granični parametri

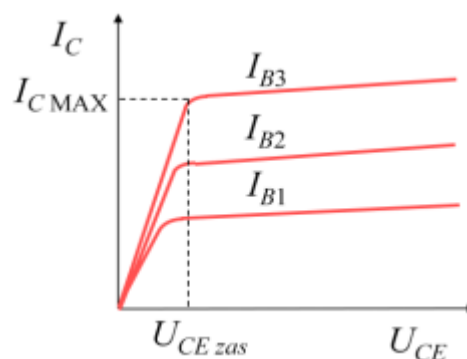
Tranzistor je osnovna komponenta svakog pojačala snage, sam razvoj tranzistora snage uvelike je pridonio njegovu upotrebu i razvoj u radiokomunikacijskim sustavima. Pomoću tranzistora se poboljšava korisnost uređaja, povećava se pouzdanost i postiže se jednostavnije održavanje. Najveća prednost upotrebe tranzistora umjesto elektronke je njegov životni vijek. Tranzistor u pojačalima snage ima zadatak dati željenu izlaznu snagu uz dobru korisnost i dovoljno pojačanje snage u određenom frekvencijskom području. Maksimalna vrijednost snage tranzistora određena je maksimalnom vrijednosti napona i struje. Maksimalna vrijednost napona je određena naponom proboja tranzistora.

Za sigurna i ekonomična rješenja sklopova visokofrekvencijskih pojačala snage valja dobro upoznati mogućnosti i ograničenja u radu tranzistora. Ta ograničenja mogu biti frekvencijska, naponska, strujna i ograničenja snage.[2] Navedena ograničenja se mogu pronaći u tvorničkim podacima tranzistora i ona služe za određivanje najveće dopuštene radne veličine u sklopu pojačala.

Granične frekvencije f_T tranzistora govore o ponašanju tranzistora na višim frekvencijama, a definirane su za faktor strujnog pojačanja h_{fe} . Granična frekvencija tranzistora spojenog u spoj zajedničkog emitera nastaje onda kada faktor strujnog pojačanja poprimi vrijednost jedan. Porast radne frekvencije tranzistora pogoršava njegov rad.

bilježimo nagli rast struje kolektora. Područje zasićenja označeno je oznakom ZAS i postoje propusne veze u spojevima emiter-baza i kolektor-baza. Oznakom NAP označeno je naponsko aktivno područje u kojem tranzistor obavlja radnu funkciju. U ovom području spoj kolektor-baza su u zapornoj polarizaciji, dok je emiter-baza propusno polarizirana. Oznakom ZAP označeno je zaporno područje rada tranzistora, sama riječ govori da je tranzistor u režimu zapiranja te radi kao otvorena sklopka. Kolektor-baza i emiter-baza su u zapornoj polarizaciji. Oznaka PROBOJ označava područje lavinskog ili primarnog proboja, koje nastaje pri većim kolektorskim naponima kada podizanje napona U_{CE} uzrokuje povećanje kolektorske struje što označava proboj napona, te u konačnici uništenje tranzistora.

Strujna ograničenja povezana su s konstrukcijom tranzistora, dimenzijama unutarnjih vodiča, a usko su povezana s ograničenjima snage, koja su povezana s toplinom koja nastaje u tranzistoru. Vrijednost maksimalne kolektorske struje navedene u katalogima tranzistora označavaju graničnu vrijednost za visokofrekvencijske tranzistore snage koji su u sklopu pojačala određeni naponom zasićenja. Važno je napomenuti da kratkotrajna prekoračenja vrijednosti strujnog ograničenja neće prouzročiti velike štete, kao što to može učini prekoračenje naponskog ograničenja.



SI 3.4. Granična vrijednost kolektorske struje. [2]

Slika 3.4. prikazuje graničnu vrijednost struje $I_{C\text{MAX}}$ koja je određena naponom zasićenja $U_{CE\text{zas}}$. Ograničenja snage u tranzistorima ograničene su toplinskim ograničenjima i sekundarnim probojem. Toplinska ravnoteža u tranzistoru vlada kada se dio njegove snage koji ne dospije do trošila predaje okolini preko kućišta i hladnjaka tranzistora. Ograničenje snage zbog sekundarnog proboja nastaje zbog toga što sekundarni proboj ograničava dopustive vrijednosti struja. Spoj baza

– kolektor otežava odvod topline iz središta spoja, te zbog toga u prisutnosti većih struja nastaju vruće točke, te dolazi do proboja spoja zbog staljivanja materijala.

Dvije najvažnije pojave koje se mogu pojaviti u tranzistorima kod pojačala snage su:

- pojava sekundarnog proboja;
- pojava elektromigracije.

Sekundarni proboj obilježava pojavu nestabilnosti temperatura u tranzistoru što dovodi do smanjenja napona proboja. Nastaje na višim strujnim nivoima koje protječu pn-spojevima tranzistora što dovodi do nejednolikog zagrijavanja te pojave vrućih točaka na pn-spojevima. Formiranjem vrućih točaka povećava se uniformnost struja kroz tranzistor te dolazi do dodatnog zagrijavanja kristala. Ako uz odgovarajući iznos napona i struje temperatura pn-spoja dosegne kritičnu vrijednost, tranzistor tada doživljava sekundarni proboj koji predstavlja kratki spoj između emitera i kolektora.

Pojavu transporta metalnih iona kroz vodič nastalog protjecanjem istosmjerne struje nazivamo elektroimigracija. Ova pojava nije ovisna o obliku i veličini voda, ali je intenzitet veći kod tanjih vodova, te ovisi o gustoći struja i raste pri rastu te gustoće.

3.2. Proračun pojačala snage C klase.

Prema [2]: Proračun visokofrekvencijskog pojačala klase C započinjemo izborom tranzistora.

Poželjno je da on ima ove osobine:

1. Veliki faktor strujnog pojačanja u željenom području frekvencija;
2. mali otpor zasićenja r_s , kako i pri vršnoj vrijednosti impulsa kolektorske struje bila što manja disipacija tranzistora;
3. malu ulaznu impedanciju, da se postigne što veće pojačanje snage;
4. veliku ukupnu disipaciju tranzistora, kako bi se dobile velike izlazne snage;
5. visoke napone proboja.

Pojačanje snage pojačala snage C klase dobivamo prema izrazu:

$$A_p \approx \left(\frac{f_T}{f}\right)^2 \frac{(U_{CC} - U_s)^2}{2r_I P_k} \quad (3 - 1)$$

Gdje je : f_T – granična frekvencija

f – osnovna frekvencija ulaznog signala

U_{CC} – napon napajanja kolektora

U_s – napon zasićenja

r_I – realni dio ulazne impedancije tranzistora

P_k – korisna snaga.

Pojačalo će imati veće vrijednosti pojačanja snage uz vršnu kolektorsku struju pri kojoj nema većeg opadanja strujnog pojačanja. Od ostalih parametara poželjno je imati veliki napon napajanja, manji napon zasićenja, mali ulazni otpor tranzistora i manju korisnu snagu, tada će doći do velikog pojačanja pojačala.

3.3. Odabir tranzistora za izradu pojačala.

Prema uputama u poglavlju 3.2. po kojim načelima biramo tranzistor za pojačalo snage. Za pojačalo snage C klase najbolje karakteristike ima tranzistor oznake BC237.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{CBO}	collector-base voltage	open emitter	–	50	V
V_{CEO}	collector-emitter voltage	open base	–	45	V
I_{CM}	peak collector current		–	200	mA
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	–	500	mW
η_{FE}	DC current gain BC237 BC237B	$I_C = 2\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}$	120 200	460 460	
f_T	transition frequency	$I_C = 10\text{ mA}; V_{CE} = 5\text{ V}; f = 100\text{ MHz}$	100	–	MHz

Tab. 3.1. Parametri tranzistora BC237 [6]

Iz tablice 3.1 vidimo da će ovaj tranzistor dobro obavljati svoju funkciju u pojačalu snage C klase, jer ima dobar faktor strujnog pojačanja, veliku disipaciju snage.

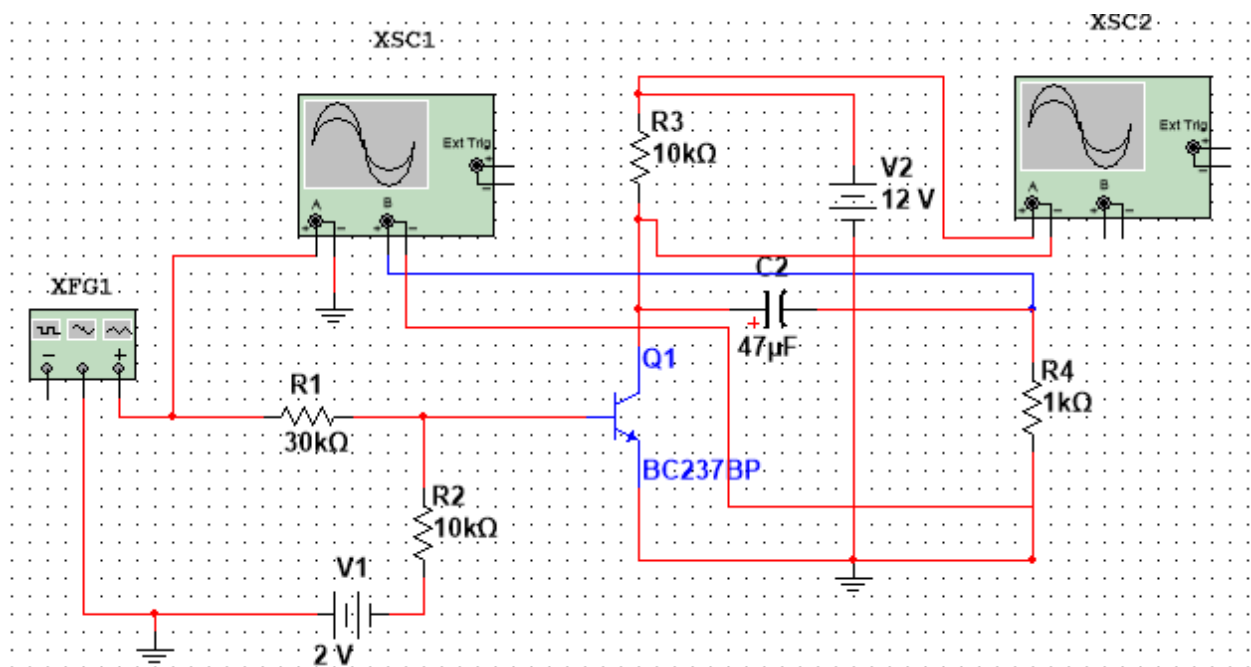
Nakon odabira prikladnog tranzistora, na red dolazi odabir veličine otpornika. Raspon veličina otpornika na kolektorskoj strani kod osnovnog pojačala snage c klase odredit ćemo pomoću struje kolektora. U tablici 3.1. vidi se da je maksimalna kolektorska struja iznosi 200 mA, iz relacije 2-3 dobije se minimalna vrijednost otpornika koja iznosi 60 Ω . Maksimalna vrijednost određena je tokom provjere simulacije, te je ustanovljeno da pri prekoračenju vrijednosti otpora od 1 M Ω dolazi do izobličenja izlaznog signala. U konačnici vrijednost otpornika na kolektorskoj strani postavljena je na 10 k Ω , pri toj vrijednosti kolektorska struja iznosi 1 mA.

Vrijednost otpornika na bazi iznosi 10 k Ω , pri toj vrijednosti struja baze je nešto manja od 0,9 mA.

Ove vrijednosti postavljaju statičku radnu točku tako da kolektorska struja teče jako kratko, što označava da će izlazni napon trajati onaj dio perioda u kojem struja ne teče. Te s time izlazni napon traje oko 90 % perioda.

4. SIMULACIJA I MJERENJA

Prije same simulacije i mjerenja potrebno je osmisлити shemu pojačala snage C klase, odrediti parametre komponenata kako bi radna točka zadovoljila potrebe pojačala C klase. Nakon uspješnog odabira svih komponenata i parametara preostaje složiti shemu pojača. Pa su tako na slici 4.1 prikazana shema s potrebnim uređajima za pobudu i mjerenje signala koja. Slika 4.1. prikazuje osnovnu izvedbu pojačala snage c klase.



Sl. 4.1. Shema osnovnog pojačala.

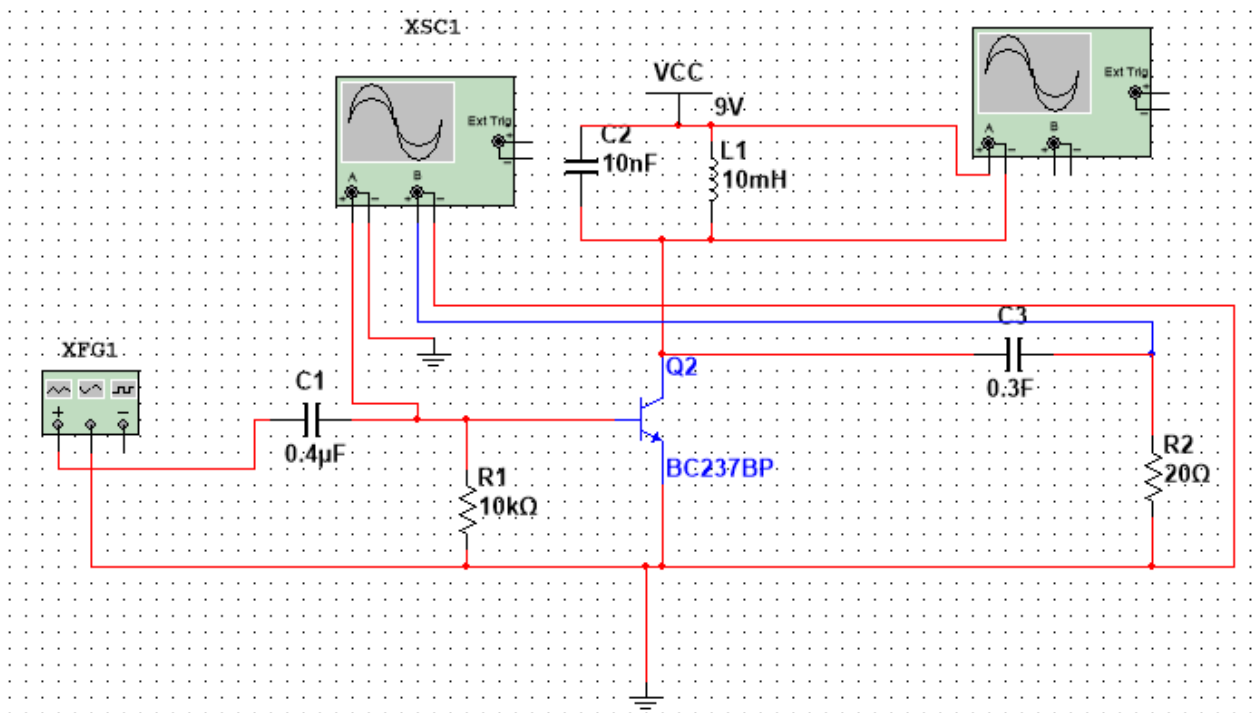
Funkcijski generator na shemi označen je oznakom *XFG1* i ima zadaću pojačalu predati pobudni signal. Parametri signala kojeg generator predaju su: frekvencija 100 Hz, amplituda 3 V. Pri provođenju mjerenja potrebno je promijeniti valni oblik ulaznog signala, te provesti mjerenja za sinusnu, pilastu i pravokutnu pobudu.

Osciloskop označen oznakom *XSC1* prikazuje ulazni i izlazni valni oblik signala, dok će drugi osciloskop označen oznakom *XSC2* prikazuje valni oblik struje kolektora I_C te valni oblik napona

kolektor-emiter U_{CE} . Svi kanali na osciloskopima postavljeni su na vrijednost 5 V po podjeljku, dok je x-os postavljena na vrijednost 100 μ s po podjeljku.

Osim osnovnog pojačala snage c klase može se izvesti i pojačalo snage c klase sa sinkroniziranim radom. Budući da izlazni napon nije replika ulaznog potrebno je ubaciti rezonantni krug, stoga pojačalo ove kategorije na kolektorskoj strani tranzistora umjesto otpornika ima paralelni spoj zavojnice i kondenzatora. Rezonantna frekvencija tog spoja određena je izrazom 4-1.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4 - 1)$$



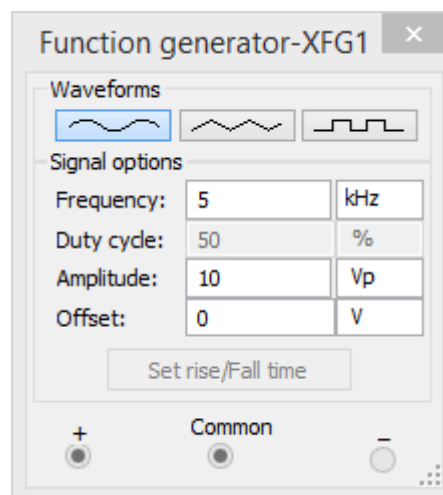
Sl. 4.2. Shema pojačala sa sinkroniziranim radom.

Vrijednost kapaciteta u titrajnom krugu iznosi $C=10$ nF, vrijednost induktiviteta iznosi 10 mH. Rezonantna frekvencija prema izrazu 4-1 iznosi 15,9 kHz. Osim u klase, pojačala se mogu podijeliti prema frekvencijskom opsegu. Audio pojačalo se odnosi na pojačalo koje djeluje u rasponu od 20 Hz do 20 kHz. S druge strane, radio-frekvencijsko pojačalo je ono koje pojačava frekvencije iznad 20 kHz. Radio-frekvencijska pojačala u AM radio pojačava frekvencije između

535 i 1605 kHz, dok radio-frekvencijska pojačala FM radio pojačava frekvencije između 88 i 108 MHz. Provođenjem simulacije ustanovljeno je da projektirano pojačalo sa sinkroniziranim radom (slika 4.2.) djeluje u rasponu od 1 kHz do 300 kHz.

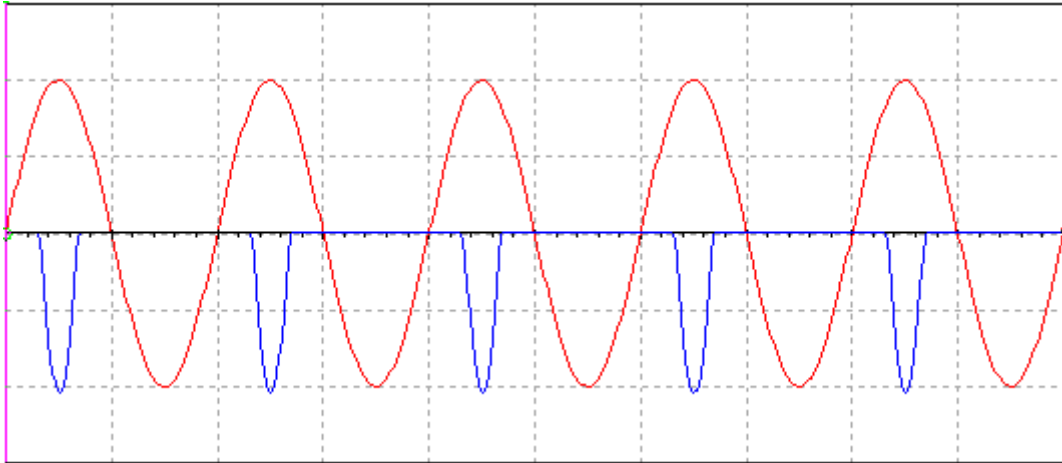
4.1. Simulacija pojačala za sinusni signal.

Uz već navedene i postavljene parametre potrebno je još na funkcijskom generatoru odabrati sinusni pobudni signal. Slika 4.2. prikazuje izgled prozora za postavljanje parametara funkcijskog generatora.

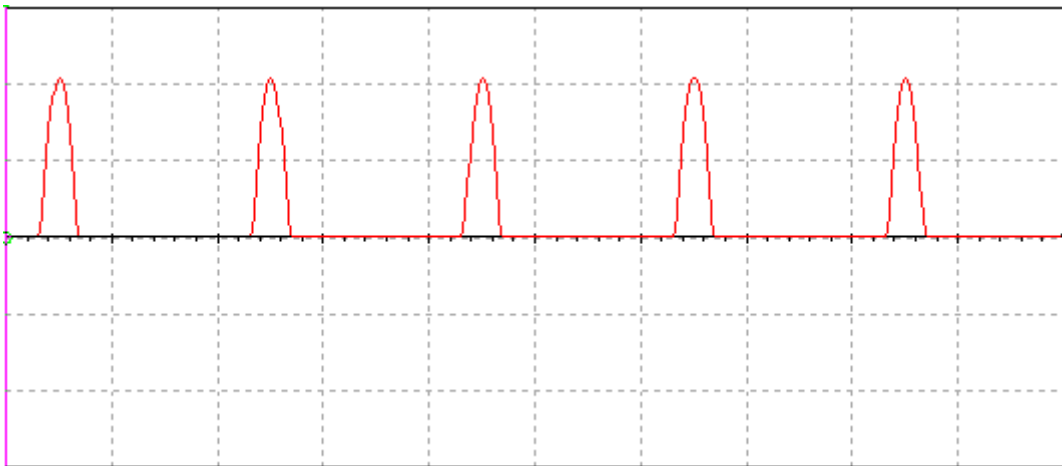


Sl. 4.3. Parametri funkcijskog generatora.

Zatim je potrebno očitati slike s osciloskopa. Slika 4.4. prikazuje odnos ulaznog i izlaznog signala. Ulazni signal označen je crvenom bojom, dok je izlazni signal označen plavom. Ulazni signal ima amplitudu 10 V.



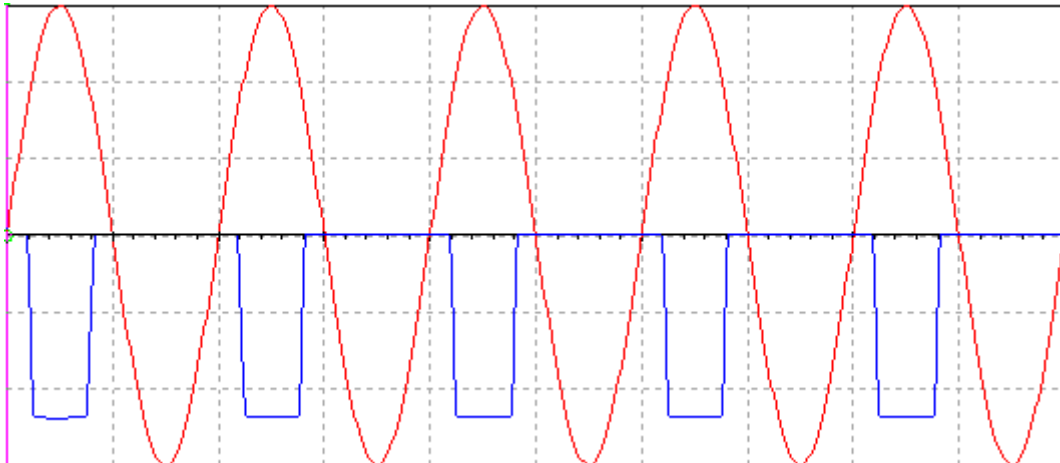
Sl. 4.4. *Odnos ulaznog i izlaznog signala za sinusnu pobudu amplitude 10 V.*



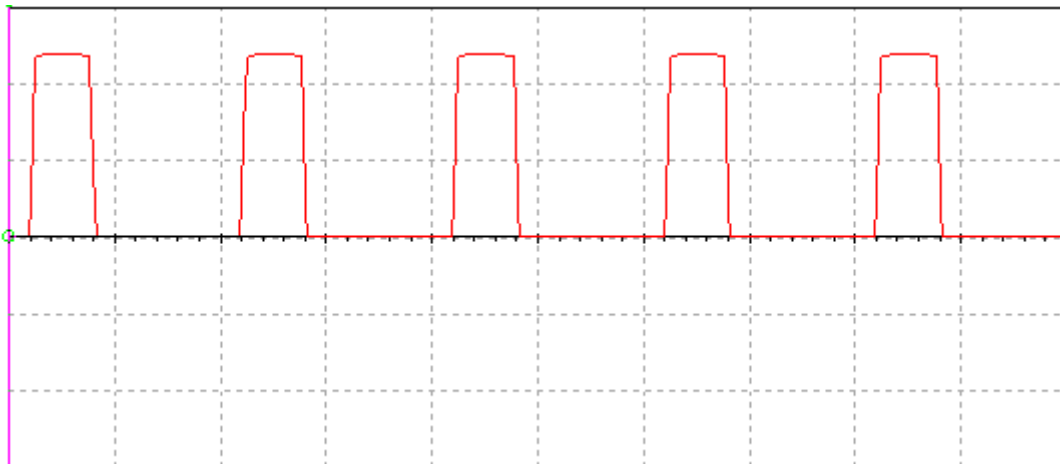
Sl. 4.5. *Strujni valni oblik kolektorske struje I_C za sinusnu pobudu amplitude 10 V.*

Na slici 4.5. se vidi da je kut protjecanja manji od π . Što potvrđuje teorijsku osnovu da je kut protjecanja kod pojačala snage C klase u rasponu od 0 do π .

Na slikama 4.6. i 4.7. amplituda ulaznog signala biti će povećana na 15 V.



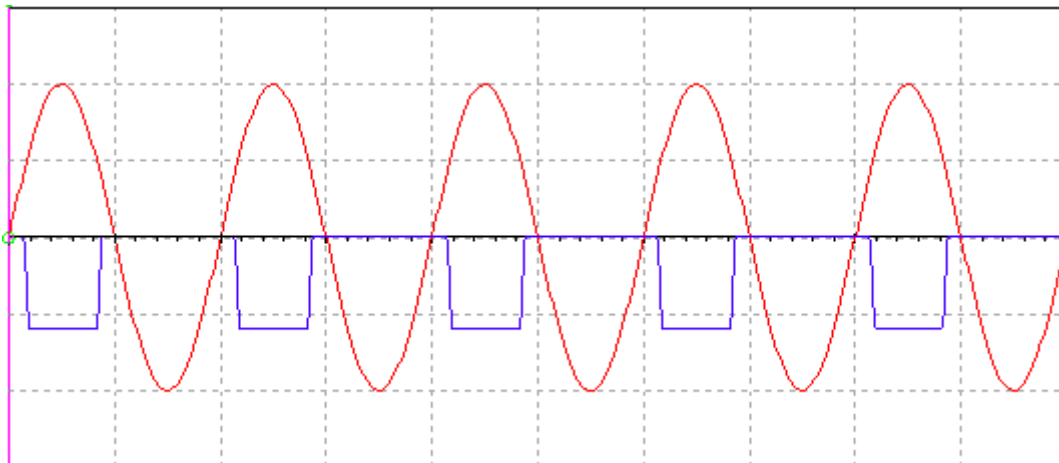
Sl. 4.6. Odnos ulaznog i izlaznog signala za sinusnu pobudu amplitude 15 V.



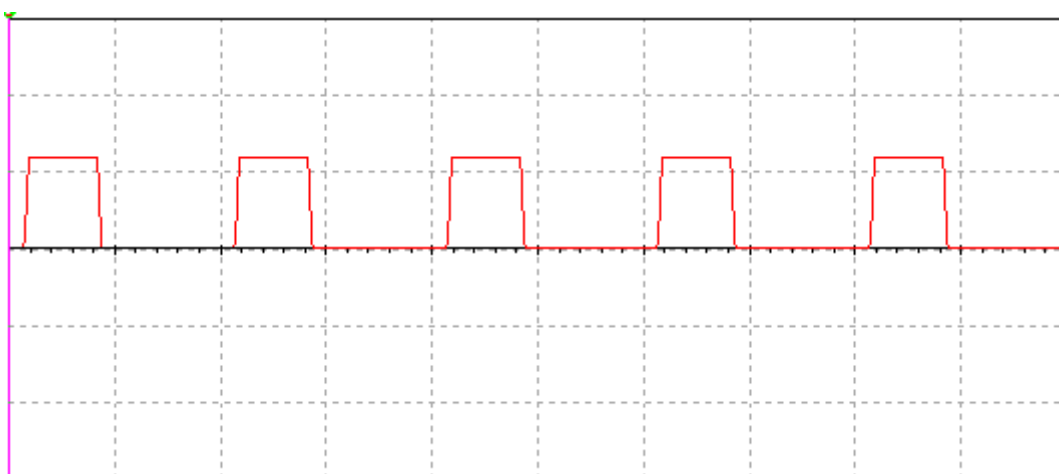
Sl. 4.7. Strujni valni oblik kolektorske struje I_C za sinusnu pobudu amplitude 15 V.

Na izlazu je spojen niskopropusni CR filter, koji propušta sve vrijednosti ispod određene frekvencije. Povećanjem ulazne amplitude, povećala se i izlazna amplituda, ali zbog filtra na izlazu, izlazni signal je odrezan na 12 V. Na slici 4.7. iz strujnog valnog oblika vidi se da je kut protjecanja manji od π . Trajanje perioda na slici 4.7. iznosi 200 μs , trajanje strujnog impulsa iznosi 66,7 μs . Kut protjecanja određuje se tako da se vrijeme trajanja strujnog impulsa podijeli s vremenom periode. Dobivena vrijednost se pomnoži s 360° . Nakon množenja dobije se vrijednost kuta protjecanja koja u ovom slučaju iznosi 120° .

Na slikama 4.8. i 4.9. amplituda ulaznog signala biti će povećana na 20 V. Na osciloskopu je također povećana vrijednost podioka na 10 V/div.



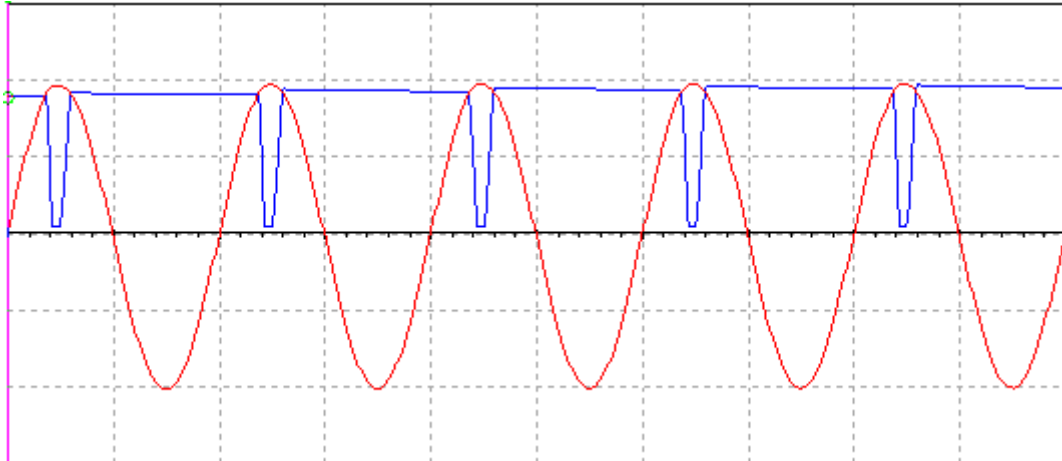
Sl. 4.8. Odnos ulaznog i izlaznog signala za sinusnu pobudu amplitude 20 V.



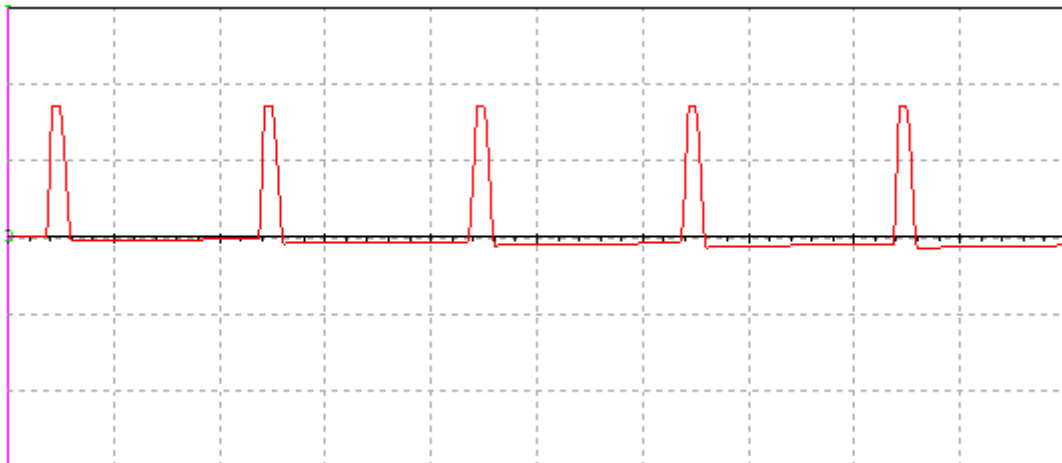
Sl. 4.9. Strujni valni oblik kolektorske struje I_C za sinusnu pobudu amplitude 20 V.

Iz simulacije osnovnog pojačala snage C klase vidimo da je izlazni napon zbog vrste tereta u području zapiranja. Stoga je potrebno koristiti pojačala sa sinkroniziranim radom sl. 4.2.

Slika 4.10. prikazuje odnos ulaznog i izlaznog signala kod pojačala snage s sinkroniziranim radom. Ulazni signal označen je crvenom bojom, dok je plavom bojom označen izlazni signal. Amplituda ulaznog signala je 10 V.



Sl. 4.10. Odnos ulaznog i izlaznog signala za sinusnu pobudu amplitude 10 V (pojačalo sa sinkroniziranim radom).

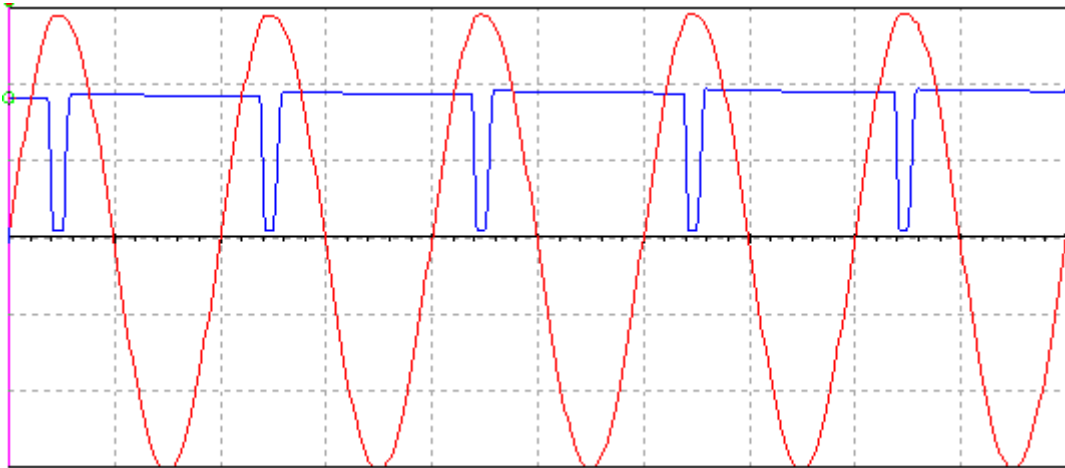


Sl. 4.11. Strujni valni oblik kolektorske struje I_C za sinusnu pobudu amplitude 10 V (pojačalo sa sinkroniziranim radom).

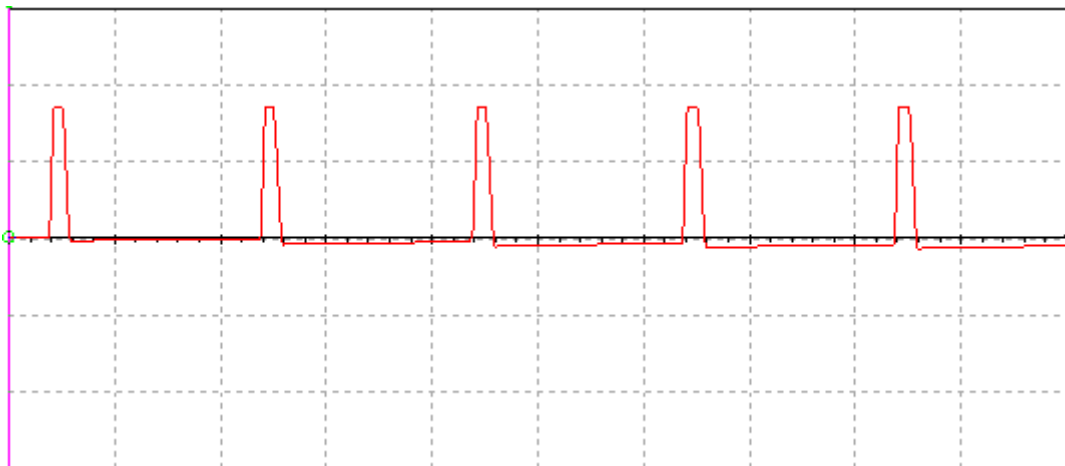
Ukoliko se usporede slike 4.4. i 4.10. vidi se razlika u radu osnovnog pojačala snage C klase i pojačala snage C klase sa sinkroniziranim radom. Gdje za razliku od osnovnog pojačala kod kojeg

je izlazni signal na teretu u zapornom području, kod pojačala sa sinkroniziranim radom se vidi da je izlazni signal na teretu u aktivnom području.

Na slikama 4.12. i 4.13. prikazani su valni oblici za amplitudu ulaznog signala 15 V.

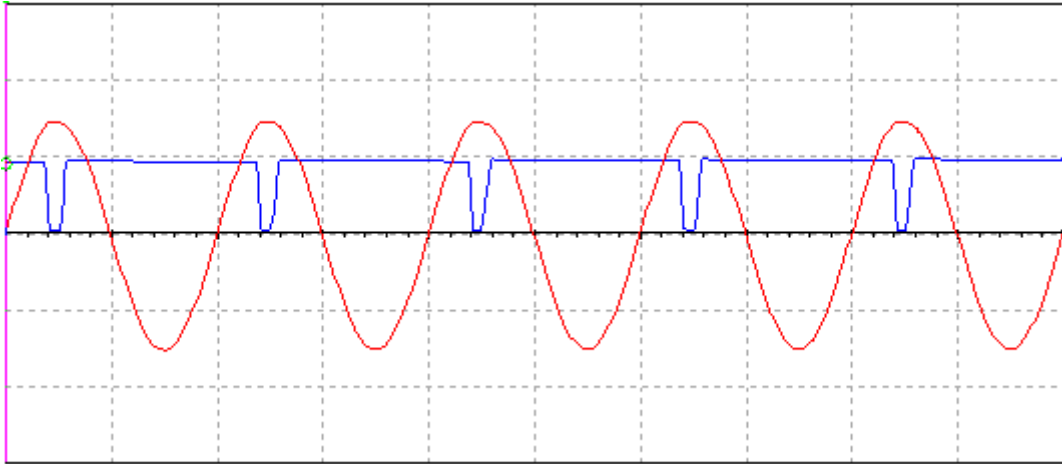


Sl. 4.12. Odnos ulaznog i izlaznog signala za sinusnu pobudu amplitude 15 V (pojačalo sa sinkroniziranim radom).

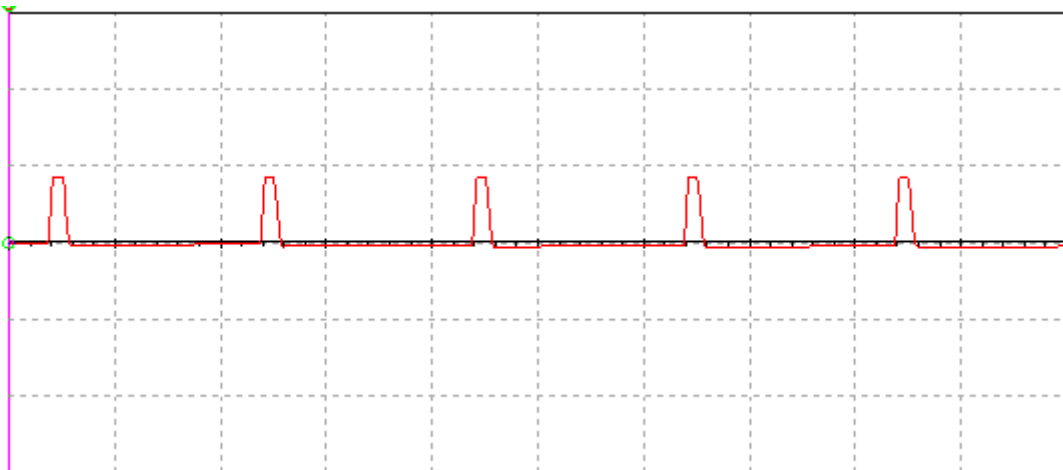


Sl. 4.13. Strujni valni oblik kolektorske struje I_C za sinusnu pobudu amplitude 15 V (pojačalo sa sinkroniziranim radom).

Na slikama 4.14. i 4.15. prikazani su valni oblici za amplitudu ulaznog signala 20 V. Na osciloskopu je također povećana vrijednost podioka na 10 V/div.



Sl. 4.14. Odnos ulaznog i izlaznog signala za sinusnu pobudu amplitude 20 V (pojačalo sa sinkroniziranim radom).



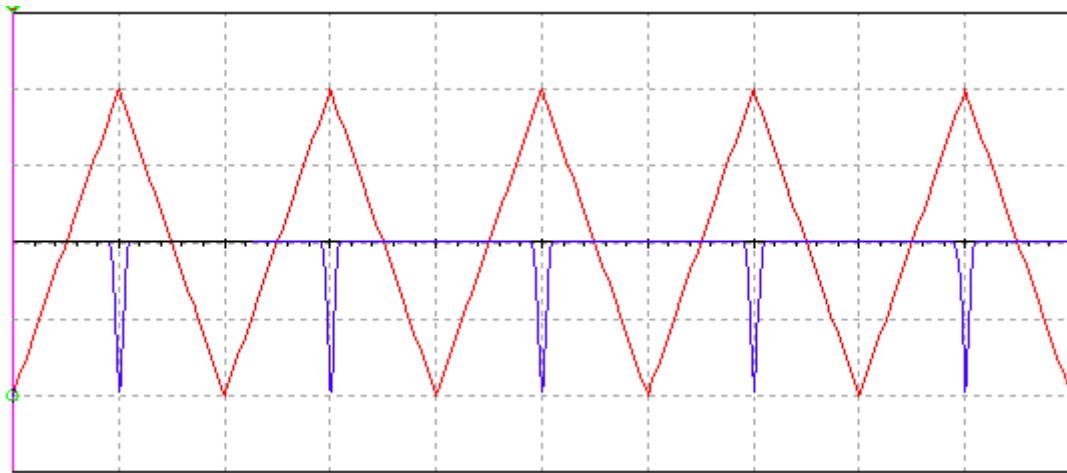
Sl. 4.15. Strujni valni oblik kolektorske struje I_C za sinusnu pobudu amplitude 20 V (pojačalo sa sinkroniziranim radom).

Vidi se da za iste ulazne amplitude kod oba pojačala može povući analogija usporedbi izlaznih signala kao pri usporedbi slika 4.4. i 4.10. navedenoj na 25 stranici ovog rada.

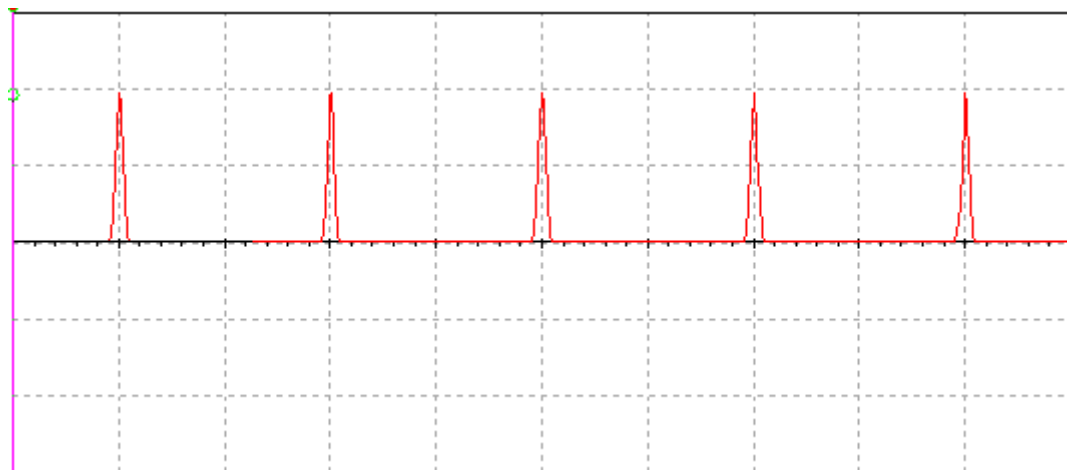
4.2. Simulacija za pilasti pobudni signal.

Na već postavljene parametre potrebno je samo promijeniti valni oblik pobudnog signala u pilasti.

Slike 4.16. i 4.17. prikazuju odziv na pilasti ulazni signala osnovnog pojačala snage c klase. Amplituda ulaznog signala je 10 V.

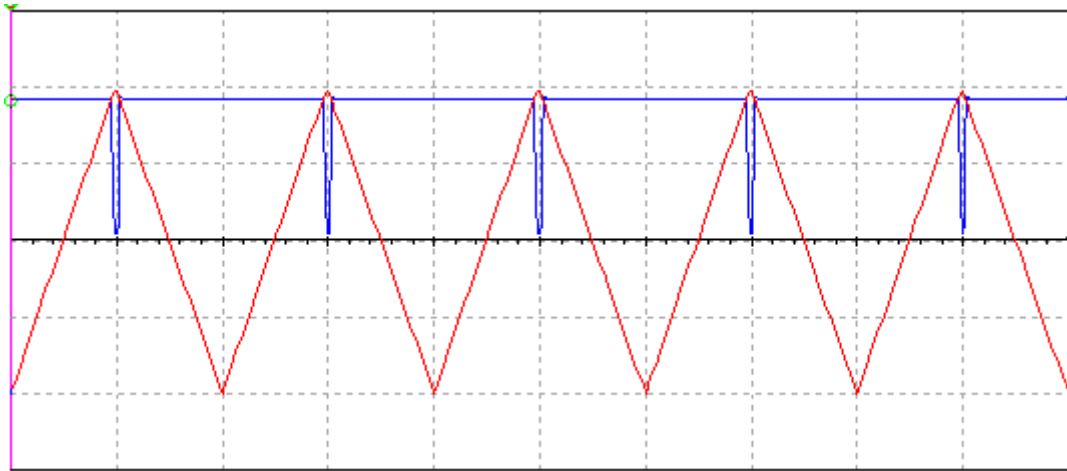


Sl. 4.16. Odnos ulaznog i izlaznog signala za pilastu pobudu amplitude 10 V.

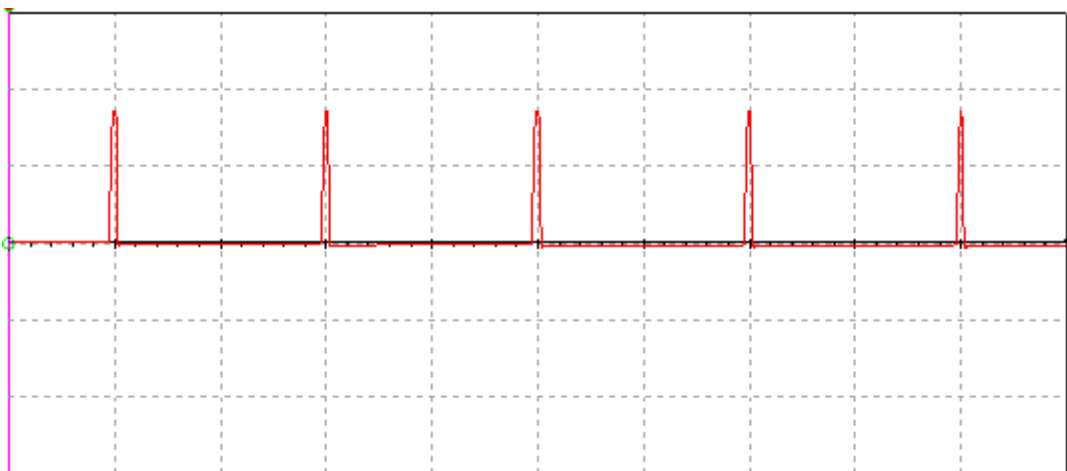


Sl. 4.17. Strujni valni oblik kolektorske struje I_c za pilastu pobudu amplitude 10 V.

Slike 4.18. i 4.19. prikazuju odziv na pilasti ulazni signal pojačala snage c klase s sinkroniziranim radom.



Sl. 4.18. Odnos ulaznog i izlaznog signala za pilastu pobudu amplitude 10 V (pojačalo sa sinkroniziranim radom).

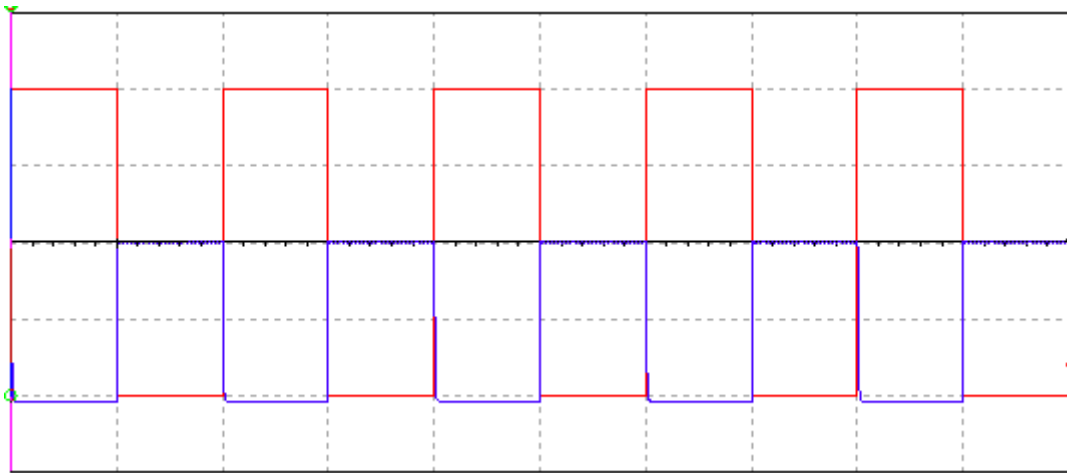


Sl. 4.19. Strujni valni oblik kolektorske struje I_c za pilastu pobudu amplitude 10 V (pojačalo sa sinkroniziranim radom).

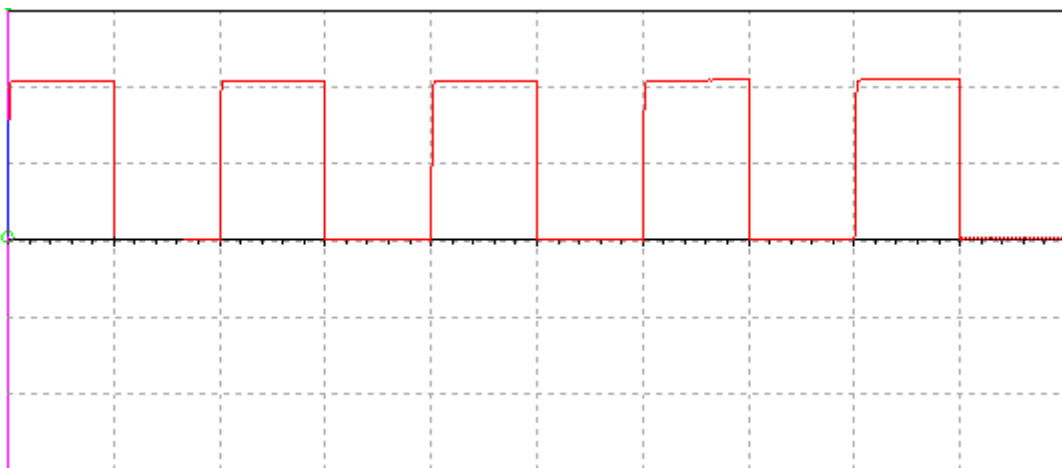
Kod pilaste pobude vidi se da pojačalo radi prema teorijskom opisu, kolektorska struja teče kraće od pola perioda ulaznog signala.

4.3. Simulacija za pravokutni pobudni signal.

Svi parametri ostaju isti, samo dolazi do promjene valnog oblika ulaznog signala u pravokutni oblik.



Sl. 4.20. Odnos ulaznog i izlaznog signala za pravokutnu pobudu amplitude 10 V.



Sl. 4.21. Strujni valni oblik kolektorske struje I_c za pravokutnu pobudu amplitude 10 V.

Na slikama 4.20. i 4.21. prikazani su odnosi ulaznog i izlaznog signala te struje kolektora za iste parametre kao kod sinusne i pilaste pobude. Kolektorska struja za pravokutnu pobudu zauzima veći dio perioda nego kod pobude sinusnog i pilastog signala, stoga i izlazni signal ima manji period postojanja te se može zaključiti da pojačalo predaje manju snagu za ovaj oblik ulaznog signala.

4.4. Pojačanje i korisnost.

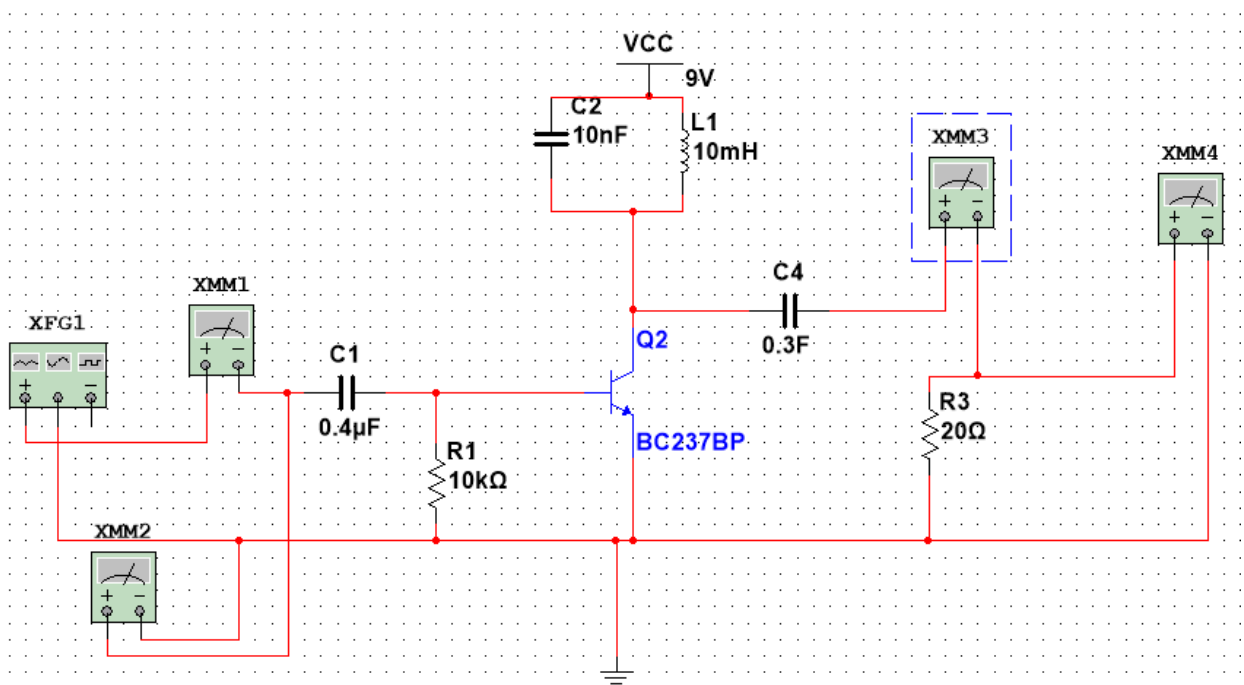
Pojačanje pojačala izračuna se po sljedećem izrazu 4 – 2.

$$A = \frac{P_{izl}}{P_{ul}} \quad (4 - 2)$$

Ulazna i izlazna snaga se izračuna po izrazu 4 – 3.

$$P = U \cdot I \quad (4 - 3)$$

Iz jednadžbe 4-3 vidi se da je za izračun snaga potrebno znati vrijednost ulazne i izlazne struje. Stoga treba dodati instrumente kojima će se izmjeriti potrebne vrijednosti.



Sl. 4.22. Shema za mjerenje pojačanja.

Izmjerene efektivne vrijednosti ulaznog signala:

$$U_{ul}=7,071 \text{ V}$$

$$I_{ul}= 4,188 \text{ mA}$$

Izračun snage ulaznog signala:

$$P_{ul}= U_{ul} \cdot I_{ul}=7,071 \cdot 4,188 \cdot 10^{-3}= 0,0296 \text{ W}$$

Izmjerene efektivne vrijednosti izlaznog signala:

$$U_{izl}= 2,272 \text{ V}$$

$$I_{izl}= 113,595 \text{ mA}$$

Izračun snage izlaznog signala:

$$P_{izl}= U_{izl} \cdot I_{izl}=2,272 \cdot 113,595 \cdot 10^{-3}= 0,258 \text{ W}$$

Pojačanje:

$$A = \frac{P_{izl}}{P_{ul}} = \frac{0,258}{0,0296} = 8,716$$

Korisnost pojačala definirana je omjerom izmjenične snage predane trošilu i ukupne snage privedene pojačalu. Snaga predana trošilu je ona snaga koju trošilo apsorbira i jednaka je korisnoj snazi.

Korisnu snagu računamo po sljedećem izrazu:

$$P_k = \frac{U_b}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} U_b I_m \quad (4 - 4)$$

Gdje je: - P_k - korisna snaga

- U_m - maksimalna vrijednost napona na otporniku R3

- I_m - maksimalna vrijednost napona na otporniku R3

Snaga privedena pojačalu računa se prema sljedećem izrazu:

$$P_s = U_b I_s \quad (4 - 5)$$

Gdje je: - P_s – privedena snaga

- U_b – napon baterije

- I_s – srednja vrijednost izlazne struje

Prema slici 4.7. kut protjecanja je 120° stoga prema [2] korisna snaga iznosi:

$$P_k = 0,1955U_b I_m$$

Dok privedena snaga iznosi:

$$P_s = 0,218U_b I_m$$

Te se prema izrazu 4-6 izračuna korisnost pojačala koja iznosi 0,897.

$$\eta = \frac{P_k}{P_s} \quad (4 - 6)$$

5. ZAKLJUČAK

Tema ovog rada su pojačala snage C klase. Pojačala u osnovnom smislu riječi su linearni elektronički sklopovi koji se koriste za pojačavanje električkih signala. Takva pojačala pojačavaju električne naponske ili strujne signale koji na izlazu daju male snage. Pojačala snage imaju zadaću predati trošilu što veću izmjeničnu snagu uz što manja izobličenja i što veći stupanj korisnog djelovanja. Pojačala snage sastoje se od komponenata koje mogu biti aktivne, pasivne, linearne reaktivne i linearne disipativne. Najvažnija komponenta pojačala je ona aktivna komponenta, u ovom radu zadatak je pojačalo snage C klase u izvedbi s bipolarnim tranzistorom, stoga je glavna komponenta pojačala bipolarni tranzistor. Tranzistori su poluvodičke elektroničke komponente koje služe za: pojačavanje električnih signala, kao elektronička sklopka, za stabilizaciju napona, modulaciju signala, te razne druge primjene. Najvažnija značajka tranzistora je njegova izlazna karakteristika i statička radna točka kojom tranzistor definira klasu pojačala snage. Jer u ovisnosti od položaja statičke radne točke doznaje se kojoj klasi pojačalo snage pripada. Pojačalo snage C klase se koristi za pojačavanje snage u području visokih frekvencija. Statička radna točka pojačala snage C klase nalazi se u području zapiranja tranzistora. Kolektorska struja teče kraće od poluperiode ulaznog signala, u periodu gdje kolektorska struja ne teče, bilježi se postojanje izlaznog napona koji je aproksimiran s naponom kolektor-emiter. Kut protjecanja pojačala snage C klase određen je između 0 i π . Smanjenjem kuta protjecanja povećava se efikasnost pojačala. Stoga je pojačalo snage C klase efikasnije od pojačala snage A, AB i B klase.

LITERATURA

- [1] P. Biljanović, Elektronički sklopovi, Školska knjiga, Zagreb, 1989.
- [2] I.Modlic, B.Modlic, Pojačala snage, Školska knjiga, Zagreb, 1982.
- [3] Predavanja prof.dr.sc. T. Švedek iz kolegija Elektronika 2.
- [4] M. Đ. Mihajlović, Tranzistorski NF pojačivači, Tehnička knjiga, Beograd, 1978.
- [5] <http://www.circuitstoday.com/class-ab-power-amplifiers> dostupno 23. lipnja. 2016.
- [6] <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/16092/PHILIPS/BC237/493/2/BC237.html> dostupno 23. lipnja. 2016.
- [7] <http://www.circuitstoday.com/class-c-power-amplifier> dostupno 23. lipnja. 2016.

SAŽETAK / ABSTRACT

U radu su opisana pojačala snage koja imaju zadatak predati trošilu što veću izmjeničnu snagu uz što manja izobličenja i što veći stupanj korisnog djelovanja, te osnovna podjela pojačala u klase. Detaljnije je opisano načelo rada pojačala snage C klase. Kako je tranzistor glavni element pojačala snage, opisan je rad bipolarnog tranzistora te njegove osnovne karakteristike i ograničenja. Potom je potrebno izraditi shemu te simulaciju u programskom sučelju Multisim te prikazati izlazni signal pojačala snage za različite oblike pobudnog signala. Rezultati mjerenja prikazana su s dva osciloskopa, pri tome da je na jednom prikazan ulazni signal i izlazni signal kako bi se vidjelo pojačanje pojačala. Na drugom osciloskopu je prikazan signal kolektorske struje, preko kolektorske struje vidi se o kojoj je vrsti pojačala riječ, jer trajanje postojanja kolektorske struje određuje klasu.

Ključne riječi: pojačalo snage, klase pojačala, tranzistori snage, statička radna točka, pojačanje.

The paper describes power amplifiers which have a task to submit the consumer as more AC power with less distortion and a greater pump efficiency, and basic division of the amplifiers in certain classes. It describes the principle of operation amplifiers C-class. As the transistor is the main element of the amplifiers, the work of the bipolar transistor and its main features and limitations are described. Then it is necessary to make the scheme and simulation programming interface called Multisim and display the output power of the amplifiers for different forms of the input signal. The measurement results are shown on two oscilloscopes, where one oscilloscope shows input and output signal to see amplifier gain. The other oscilloscope shows the signals of collector current. Collector current shows us what kind of class the amplifier is because the duration of the existence of the collector current is determined by class.

Keywords: power amplifier, class amplifiers, power transistors, static working point, gain.

ŽIVOTOPIS

Ivan Sudar rođen je u Vinkovcima, 24. kolovoza 1994. godine. Osnovnu školu „August Cesarec“ pohađao je u Ivankovu u razdoblju od 2001. do 2009. godine. Nakon završene osnovne škole upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića Vinkovci u Vinkovcima, koju je završio 2013. godine. Iste te godine upisao je sveučilišni studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku.