

2.2 Pojačavač snage

Autori: prof. dr Predrag Petković, dr Srđan Đorđević,

2.2.1 Cilj vežbe

Ova vežba treba da omogući studentima da sagledaju osobine pojačavača velikih signala koji rade u klasi AB i B. Očekuje se da studenti uoče uticaj položaja radne tačke tranzistora na

- izobličenje signala - talasne oblike signala na izlazu pojačavača snage,
- stepen iskorišćenja,
- maksimalnu korisnu snagu na potrošaču.

2.2.2 Teorijska postavka vežbe

Osnovna namena pojačavača snage jeste da obrađuju velike signale. Ovo implicira dva oprečna zahteva.

Prvi se odnosi na željenu snagu na potrošaču. Pretpostavimo da je potrebno da se na potrošaču, recimo zvučniku, čija je otpornost (zapravo impedansa) $R_P=8\ \Omega$, ostvari korisna snaga od $P_k=10\text{W}$. Polazeći od definicionog izraza za korisnu snagu

$$P_k = V_P I_P = \frac{V_P^2}{R_P} = R_P I_P^2, \quad (2.2.1)$$

Iako se računa da će efektivna vrednost napona na potrošaču biti $V_P=8.94\text{V}$, odnosno maksimalni napon $V_{Pm}=12.65\text{V}$, dok je efektivna vrednost struje kroz potrošač $I_P=1.12\text{A}$, odnosno njena maksimalna vrednost je $I_{Pm}=1.58\text{A}$. Ukoliko bi se pojačavač sa ovakvim zahtevima realizovao u konfiguraciji sa zajedničkim sorsom/emitorom (vežba 1.1), treba obezbedi ukupni naponski dinamički opseg od najmanje $2 \cdot V_{Pm}=25.3\text{V}$ i strujni $2 \cdot I_{Pm}=3.16\text{A}$. (Ovo je neophodno da bi se obe poluperiode signala pojavile na izlazu.) U slučaju da se radi o idealnom aktivnom elementu (recimo bipolarnom tranzistoru) sa linearnim karakteristikama, treba mu obezbediti jednosmerno napajanje od najmanje $2 \cdot V_{Pm}$, a usvojićemo da to bude $V_{CC}=26\text{V}$. Jednosmerna struja kroz tranzistor morala bi da bude najmanje I_{Pm} , da bi pri negativnoj amplitudi trenutna vrednost kolektorske struje bila $i_C \geq 0$. Usvojimo da je $I_C=1.6\text{A}$, i da je $V_{CE}=V_{CC}/2=13\text{V}$. To znači da će

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

se u mirnom radnom režimu, samo zbog polarizacije tranzistora, na njemu trošiti kroz zračenje (disipirati) snaga od:

$$P_d = V_{CE} I_C = 26V \cdot 1.6A = 41.6W . \quad (2.2.2)$$

Ukoliko u kolu nema drugih gubitaka, na osnovu ukupnog bilansa snaga lako se izračunava da jednosmerni izvor napajanja mora da obezbedi snagu od najmanje

$$P_{CC} = P_k + P_d = 51.6W . \quad (2.2.3)$$

Dakle da bi se obezbedilo potrebnih 10W mora da se uloži 51.6W. Odavde proizlazi da je stepen iskorišćenja ovog pojačavača:

$$\eta = \frac{P_k}{P_{CC}} = \frac{10W}{51.6W} 100 = 19.4\% . \quad (2.2.4)$$

Praktično, ovo znači da se više od 80% snage nepotrebno potroši. S obzirom da se radi o velikim signalima i velikim snagama, to predstavlja veliki gubitak (baterija se brzo prazni). Naravno, dobro bi bilo da je stepen iskorišćenja što veći (najbolje 100%).

Imajući u vidu da se snaga izvora za napajanje, po definiciji izračunava kao:

$$P_{CC} = V_{CC} \cdot I_C , \quad (2.2.5)$$

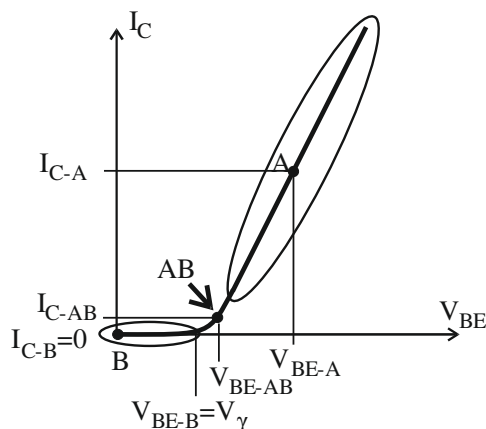
može se zaključiti iz prethodnog primera da izvor mora da obezbedi ukupnu struju od $I_{CC} = P_{CC}/V_{CC} = 1.98A$.

Drugi zahtev odnosi se na što manje izobličenje signala. Naime, iz prethodnog primera vidi se da aktivni element treba da koristi gotovo celu radnu oblast tranzistora koja obuhvata strujni opseg $0 < I_C - I_{Pm} \leq i_C \leq I_C + I_{Pm}$ i naponski $0 < V_{CE} - V_{Pm} \leq v_{CE} \leq V_{CE} + V_{Pm} \leq V_{CC}$. Da bi se to postiglo sa realnim tranzistorima, neminovno je da se koristi i nelinearni deo karakteristike tranzistora. Odavde proističe zaključak da *pojačavači snage unose nelinearna izobličenja signala*. Lako se zaključuje da su za veće snage potrebne veće struje, čime se ulazi u nelinearniji deo karakteristika, tako da se očekuju i veća nelinearna izobličenja. Ključni uticaj na stepen izobličenja ima izbor radne tačke tranzistora. Slika 2.2.1 ilustruje prenosne karakteristike tranzistora sa naznačenim položajem pojedinih zona izbora mirne radne tačke tranzistora.

Ukoliko se radna tačka izabere u linearnoj oblasti rada tranzistora, kaže se da tranzistor radi u klasi A. Tranzistor će raditi u klasi B ukoliko je radna tačka u oblasti gde je $0 \leq V_{BE} \leq V_\gamma$, gde je V_γ napon praga provođenja tranzistora. (Trebalo bi se dodati da se u klasi B može raditi i u oblasti gde je $V_{BE} < 0$).

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

napomenuti da se striktno pod klasom B podrazumeva samo $V_{BE} \approx V_\gamma$). Između ove dve oblasti nalazi se nelinearni deo karakteristike. Kada se radna tačka tranzistora podesi na granici linearnog dela, kaže se da pojačavač radi u klasi AB. (Klasa C podrazumeva da se, u odsustvu ulaznog signala, tranzistor nalazi dublje u zakočenju $V_{BE} < 0$.)



Slika 2.2.1. Oblasti izbora radne tačke tranzistora

Važno je uočiti da kroz tranzistor koji radi u klasi A protiče znatna jednosmerna struja (označena sa I_{C-A} na slici 2.2.1) i u odsustvu naizmeničnog signala. To znači da će na njemu da se troši snaga i kada nema signala na potrošaču, čime se znatno smanjuje stepen iskorišćenja pojačavača, η . Sa druge strane, za umereno velike ulazne signale, u okolini tačke A, zavisnost I_C od napona V_{BE} je linearna, tako da je izobličenje izlaznog signala malo.

Kada je radna tačka tranzistora postavljena u položaj B, kroz tranzistor ne teče jednosmerna struja u odsustvu ulaznog signala, $I_{C-B} = 0$. Tada je tranzistor zakočen. Tek kada ulazni signal postane veći od V_γ tranzistor će početi da vodi. Ovo je dobro, jer se ne gubi snaga kada tranzistor nije pobuđen, što neminovno povećava stepen iskorišćenja pojačavača, η . Međutim cena za ovo plaća se u domenu izobličenja signala jer je u okolini ove radne tačke zavisnost struje od napona izuzetno nelinearna.

Kompromis između efikasnosti i izobličenja predstavlja dovođenje tranzistora u radnu tačku AB. Kao što slika 2.2.1 ilustruje, tada kroz tranzistor teče relativno mala struja I_{C-AB} . Time se gubici snage na tranzistoru znatno redukuju $P_{dt} = V_{CE} \cdot I_{C-AB}$. Sa druge strane, za napone $V_{BE} > V_{BE-AB}$ zavisnost struje od napona približno je linearna.

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

Važno je uočiti način na koji se položaj radne tačke tranzistora preslikava u polje prenosne naponske karakteristike pojačavača. Kao što je poznato, tranzistor može da radi u konfiguraciji sa zajedničkim emitorom/sorsom, zajedničkim kolektorom/drejnem i zajedničkom bazom/gejtom. Pojačavači snage obično se vezuju za potrošače sa relativno malom otpornošću kao što su zvučnici (impedansa reda veličine 8Ω). Zato se najčešće realizuju u konfiguraciji koja ima najmanju izlaznu otpornost, a to je konfiguracija sa zajedničkim kolektorom/drejnem. To znači da se izlaz pojačavača nalazi na otporniku R_P vezanom za emitor/sors. (S obzirom da se u ovoj vežbi kao aktivni element koristi bipolarni tranzistor, nadalje će biti reči o pojačavaču sa zajedničkim kolektorom ali osnovni zaključci važe i za pojačavače sa zajedničkim drejnem). Tada je $v_{iz} = R_P i_C$. Istovremeno važi i da je $v_{iz} = V_{CC} - v_{CE}$, tako da se izlazni signal može naći u opsegu $0 \leq v_{iz} = R_P i_C = V_{CC} - v_{CE} \leq V_{CC} - V_{CES}$. To znači da je, do ulaska tranzistora u zasićenje, napon na izlazu srazmeran struji kroz tranzistor. Dakle, u oblasti gde je struja linearna funkcija ulaznog napona, i prenosna karakteristika $v_{iz}(v_{ul})$, biće linearna. Tamo gde je zavisnost $I_C(V_{ul})$ nelinearna (u okolini $v_{ul} = V_\gamma$) i zavisnost $v_{iz}(v_{ul})$, biće nelinearna.

Prenosna karakteristika pojačavača snage koji radi u konfiguraciji sa zajedničkim kolektorom (pojačanje < 1 , ne obrće fazu) prikazana je na slici 2.2.2. Slike 2.2.2.a, 2.2.2.b i 2.2.2.c prikazuju prenosne karakteristike u slučaju da je radna tačka podešena u klasi A, B i AB, respektivno. Važno je uočiti razlike u talasnim oblicima izlaznog signala sa tri stanovišta:

- vrednost jednosmerne komponente,
- maksimalna vrednost ulaznog signala pri kojoj tranzistor ulazi u zasićenje i
- linearnost zavisnosti od ulaznog signala (reprodukcija ulaznog signala).

Pojačavač radi u klasi A

- Jednosmerna komponenta izlaznog napona (napon na emitoru tranzistora) iznosi $V_E = R_P I_{C-A}$. Ukoliko se zanemari potrošnja na ostalim elementima pojačavača (struja baze i struje kroz odgovarajuće otpornike), ukupna snaga koju mora da obezbedi izvor napajanja u odsustvu korisnog signala približno iznosi $P_{CC-A} = V_{CC} \cdot I_{C-A}$. Imajući u vidu da I_{C-A} nije mala, lako je zaključiti da se, i u odsustvu korisnog signala, troši značajna snaga, samo na polarizaciju pojačavača.
- Maksimalni neizobličeni signal na izlazu ograničen je sa donje strane naponom $V_{iz} = 0$ za $V_{ul} < V_\gamma$, a sa gornje naponom $V_{iz} = V_{CC} - V_{CES}$, kada tranzistor ulazi u zasićenje. Ovom naponu odgovara maksimalni ulazni napon označen

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

sa V_{ulmax} . Maksimalni dinamički opseg obezbeđuje radna tačka koja se nalazi na sredini prenosne karakteristike.

- c. Za ulazne signale veće od V_{ulmax} , dolazi do odsecanja vrha signala, kao što pokazuje talasni oblik označen sivom linijom na slici 2.2.2.a. Za ulazne signale manje od V_{γ} odseca se vrh negativne poluperiode signala. Između tih vrednosti prenosna karakteristika je linearna, tako da je izlazni signal neizobličen sa pozitivnim pojačanjem manjim od jedan, s obzirom da se radi o pojačavaču sa zajedničkim kolektorom.

Pojačavač radi u klasi B

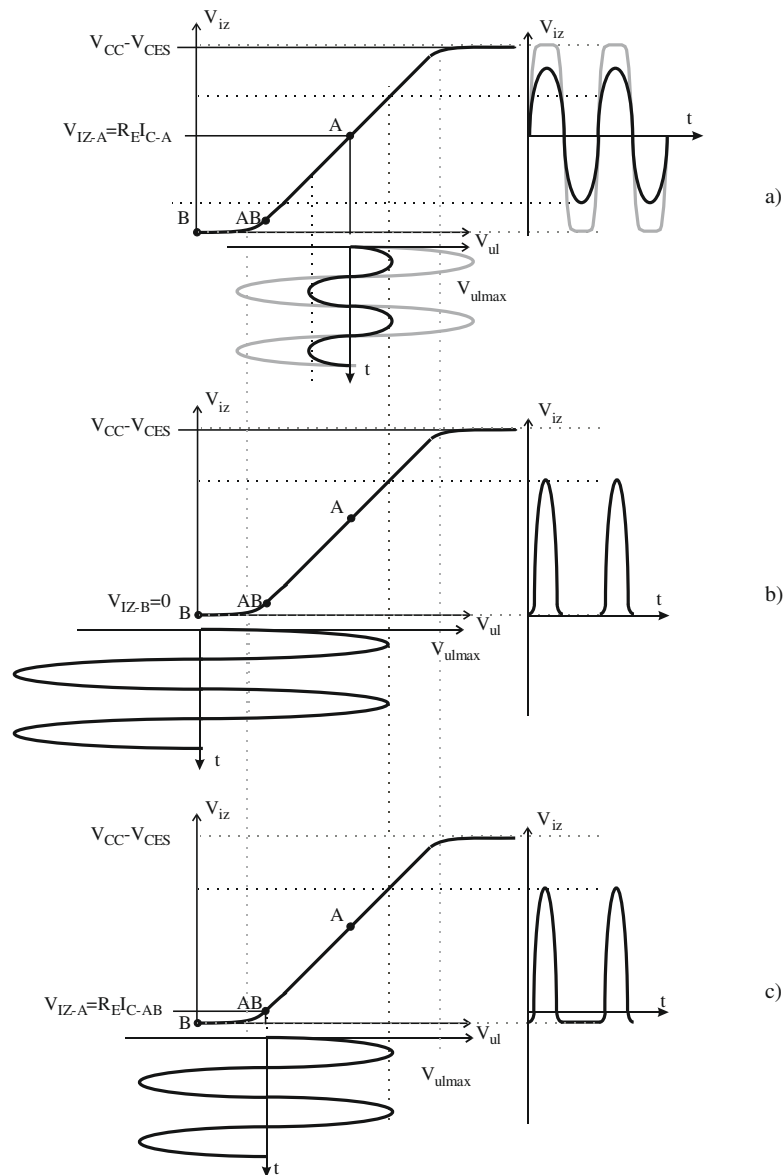
- a. Kroz pojačavač u klasi B ne teče struja u odsustvu ulaznog signala, odnosno $I_{C-B}=0$. Tranzistor je zakočen. Zato je, tada, i $P_{CC-B}=V_{CC} \cdot I_{C-B}=0$, čime se postiže znatno veći stepen korisnog dejstva nego kod pojačavača koji rade u klasi A.
- b. Strogo gledano klasa B definiše se za ulazni napon $V_{BE-B} = V_{\gamma}$, ali se tolerišu i manje vrednosti do $V_{BE-B} = 0V$. To znači da pojačavač koristiti veoma veliki opseg ulaznog signala u granicama $0 \leq v_{ul} \leq V_{ulmax}$, a koji obuhvata široku radnu oblast tranzistora od zakočenja do ulaska u zasićenje. Nažalost, na izlazu se javlja samo jedna poluperioda signala. Kao što će se videti u narednom odeljku ovo se jednostavno rešava uvođenjem komplementarnog tranzistora, tako da se dinamički opseg može proširiti do granica $-V_{ulmax} \leq v_{ul} \leq V_{ulmax}$.
- c. U okolini $v_{ul} \approx V_{\gamma}$, nelinearnost $I_C(V_{BE})$ karakteristike preslikava se u prenosnu karakteristiku pojačavača, tako da je za $v_{ul} \leq V_{\gamma}$, izlazni napon $v_{iz} = 0$, a za malo veće ulazne napone izlazni signal je znatno izobličen.

Pojačavač radi u klasi AB

- a. Srećna je okolnost da se izobličenje u okolini $v_{ul} \approx V_{\gamma}$ može korigovati već pri relativno malim strujama I_C . Zato izbor radne tačke u klasi AB omogućava kompromis između dobrih osobina klase A (mala izobličenja) i klase B (mali gubici, veliki dinamički opseg ulaznog signala). Slika 2.2.2.c pokazuje da u klasi AB mora da postoji mala komponenta jednosmernog ulaznog napona i u odsustvu ulaznog signala pri kome protiče struja I_{C-AB} . Ukupno opterećenje izvora napajanja u odsustvu signala iznosiće $P_{CC-AB}=V_{CC} \cdot I_{C-AB} \ll P_{CC-A}$, ali je $P_{CC-AB} > P_{CC-B} = 0W$.
- d. Postojanje malog jednosmernog ulaznog napona umanjuje dinamički opseg ulaznog signala na $V_{ul-AB} \leq v_{ul} \leq V_{ulmax}$.

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

- e. Degradiranje ovih karakteristika, nagrađeno je većom linearnošću. Iako se na izlazu ovih pojačavača javljaju samo pozitivne poluperiode ulaznog signala, one nisu izobličene. Druga poluperioda može se rekonstruisati uvođenjem još jednog aktivnog elementa u simetričnoj sprezi.



CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

Slika 2.2.2 Prenosna karakteristika pojačavača u konfiguraciji sa zajedničkim kolektorom koji radi u a) klasi A, b) klasi B, c) klasi AB

Do sada je bilo reči o izobličenjima ali nismo definisali meru izobličenja signala. Pojačavači sa linearnom prenosnom karakteristikom ne unose izobličenje. To znači da će se na izlazu linearnog pojačavača pobuđenog prostoperiodičnim signalom $V_m \sin(\Delta t)$ javiti signal iste frekvencije. Svaka nelinearnost vodi ka izobličenju signala koja se manifestuje postojanjem komponenta signala na frekvencijama $V_{nm} \sin(n\Delta t)$, gde je $n=2, 3, \dots$. Ove komponente nazivaju se višim harmonikama osnovnog signala. Za merenje izobličenja koristi se veličina nazvana *klir faktor* koja se definiše za n -ti harmonik kao količnik amplitude n -tog i amplitude osnovnog signala, odnosno prvog harmonika. Ukupni klir faktor naziva se i *ukupno harmonijsko izobličenje* a označava se sa k ili *THD (Total Harmonic Distortion)*:

$$k = THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} V_{nm}^2}}{V_{1m}} = \sqrt{\sum_{n=2} k_n^2} \quad (2.2.6)$$

Podsećamo da se nelinearna izobličenja mogu smanjiti uvođenjem negativne povratne sprege, o čemu je bilo reči u vežbi 1.3.

Poznato je da se najveća snaga može predati potrošaču kada je on prilagođen izlaznoj otpornosti pojačavača. Kod pojačavača snage nema smisla govoriti o izlaznoj otpornosti pojačavača u radnoj tački (u klasi B ona je beskonačna, jer ne teče struja). Ipak, blisko je pameti da postoji neka optimalna vrednost otpora potrošača pri kojoj se postiže maksimalna snaga. Na ovo ukazuje sledeća jednostavna analiza. Na potrošaču čija je otpornost $R_p=0 \Omega$ (kratak spoj), napon $V_p=0 V$, pa je i ukupna snaga $P_p= I_p \cdot V_p=0 W$. S druge strane, pri $R_p \rightarrow \infty$ (prekid) ne teče struja ($I_p=0 A$), pa je $P_p= I_p \cdot V_p=0 W$. To znači da između ove dve ekstremne vrednosti mora da postoji vrednost R_p pri kojoj se na potrošaču oslobađa maksimalna snaga. Ova vrednost određuje se eksperimentalno.

S obzirom da je naponsko pojačanje pojačavača koji rade u konfiguraciji sa zajedničkim kolektorom/drejnjom, manje od jedan, njima prethodi takozvani pretpojačavački stepen. Njegov zadatak jeste da obezbedi željeno naponsko pojačanje.

2.2.2.1 Simetrični pojačavači snage u klasi B sa komplementarnim parom

Na slici 2.2.3.a prikazana je električna šema pojačavača snage sa komplementarnim parom tranzistora koji rade u klasi B.

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

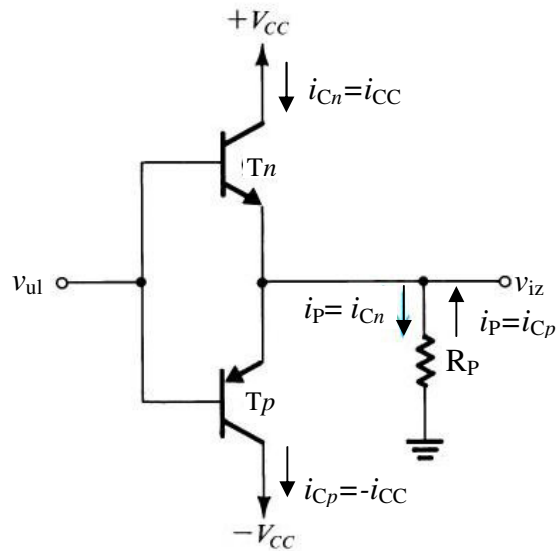
U odsustvu ulaznog signala $v_u=0$, oba tranzistora su zakočena jer je $V_{BE1}=V_{BE2}=0$, što je nedovoljno da bi BE spojevi bili direktno polarisani. Kada ulazni napon dovoljno poraste $v_{ul}>V_{\gamma n}\approx 0.4V$, *npn* tranzistor T_n počinje da vodi. Istovremeno počinje da teče struja $i_{Cn}=i_{CC}$. S obzirom da je tada T_p još dublje u zakočenju, celokupna struja $i_{E1}\approx i_{C1}=i_P$ teče kroz potrošač R_P . U negativnoj poluperiodi, pri $v_u<V_{\gamma p}$ počinje da vodi tranzistor T_p , dok je T_n još dublje u zakočenju, a struja kroz potrošač $i_P=i_{E2}\approx i_{Cp}$ teče ka naponu $-V_{CC}$.

Prenosna karakteristika pojačavača jednostavno se konstruiše spajanjem prenosnih karakteristika tranzistora T_n i T_p . Za ulazne napone $V_{\gamma p} < v_{ul} < V_{\gamma n}$ oba tranzistora su zakočena, ne teče struja $i_P=0$, tako da je $v_{iz}=R_P i_P=0$. Za $V_{\gamma n} < v_{ul} < V_{satn}$ $v_{iz}=R_P i_{Cn}$, tako da prati karakteristiku $I_{Cn}(V_{BE n})$, tranzistora T_n . To znači da je u okolini napona $V_{\gamma n}$ izražena veoma nelinearna karakteristika, dok za veće napone ulazi u linearnu oblast. Za napone $v_{ul}>V_{satn}$, tranzistor T_n ulazi u zasićenje, tako da izlazni napon postaje konstantan $v_{iz}=V_{CC}-V_{CESn}$. To se manifestuje odsecanjem većih signala odnosno ograničavanjem maksimalne vrednosti izlaznog signala na vrednost $V_{CC}-V_{CESn}$, kao što pokazuju signali označeni sivom linijom na slici 2.2.3.b. Slična pojava se nanifestuje za negativne ulazne signale. Za ulazni signal $V_{satp} < v_{ul} < V_{\gamma p}$, izlazni napon proporcionalan je struji kroz T_p , $v_{iz}=R_P i_{Cp}$. Za male negativne napone u okolini $V_{\gamma p}$, izražena je nelinearna zavisnost $I_{Cp}(V_{BE p})$. Sa smanjenjem ulaznog napona tranzistora T_p prelazi u linearnu oblast koja traje sve dok ulazni napon ne postane manji od V_{satp} . Tada tranzistor ulazi u zasićenje, pa se izlazni napon ograničava na maksimalnu negativnu vrednost od $v_{iz}=-V_{CC}+V_{CESp}$.

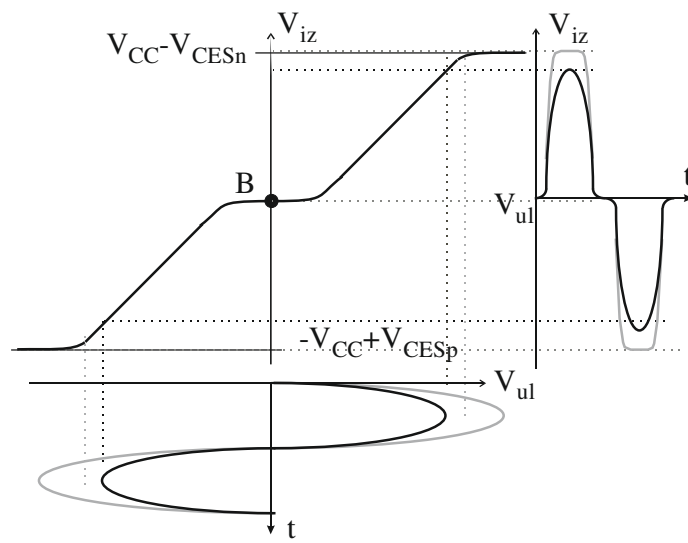
Skrećemo pažnju na karakteristično izobličenje signala u okolini $v_{iz}=0$ V po kome se prepoznaje rad pojačavača u klasi B. Može se dokazati¹ da je maksimalni stepen iskorišćenja pojačavača snage u klasi B $\eta < 78,5\%$. Podsećamo da kod pojačavača klase A maksimalni stepen iskorišćenja iznosi $\eta < 50\%$.

¹ Videti 6.2 u [1]

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage



a)



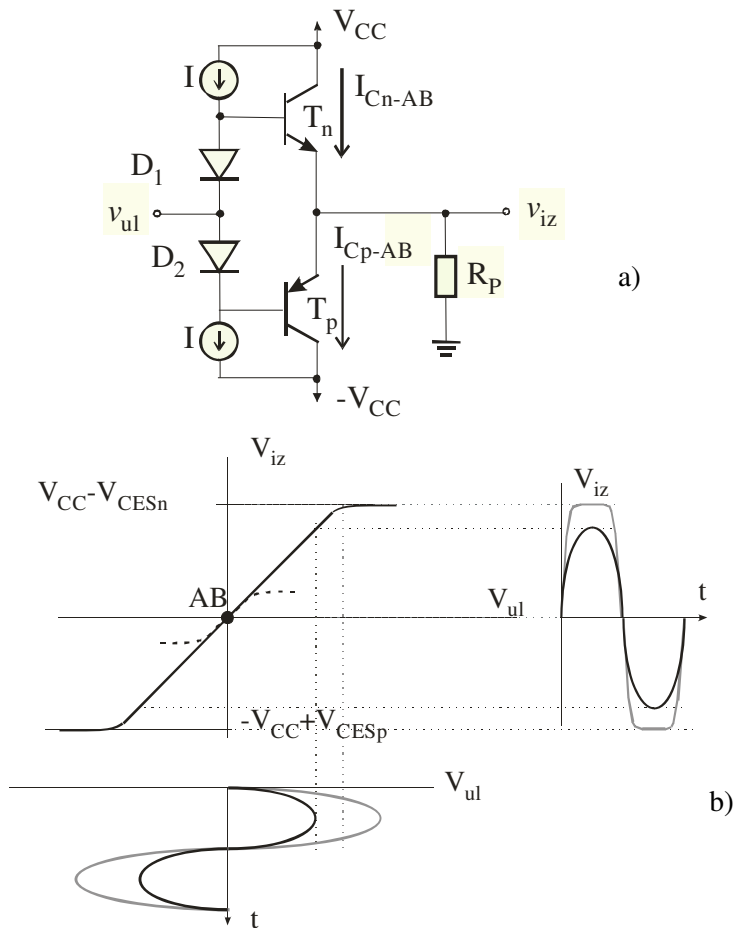
b)

Slika 2.2.3 Simetrični pojačavač snage u klasi B
a) principna električna šema, b) prenosna karakteristika

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

2.2.2.2 Simetrični pojačavači snage u klasi AB sa komplementarnim parom

Slika 2.2.4.a prikazuje principsku šemu pojačavača koji radi u klasi AB. Preko dioda D_1 i D_2 obezbeđuje se pomeranje radne tačke u klasu AB. Strujni izvori služe da obezbede polarizaciju dioda (veličina struje kroz diode, određuje napon na diodama). Jedina razlika u odnosu na analizu pojačavača koji radi u klasi B odnosi se na povećanje jednosmernog napona na bazama tranzistora za iznos napona na direktno polarisanim diodama. Ukoliko je $V_{D1}=V_{D2}=V_{BE_n}=-V_{BE_p}$, tada će u odsustvu ulaznog signala napon na izlazu biti $V_{iz}=0V$.



Slika 2.2.4 Simetrični pojačavač snage u klasi AB
a) principska električna šema, b) prenosna karakteristika

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

Međutim važno je uočiti da se izgubilo izobličenje signala u okolini $v_{iz}=0$ V, koje je karakteristično za rad pojačavača u klasi B.

Dakle, može se zaključiti da pojačavač u klasi AB ima manja izobličenja ali i manji stepen iskorišćenja od pojačavača koji radi u klasi B. Ovaj zaključak biće verifikovan merenjima u okviru ove laboratorijske vežbe.

2.2.3 Opis virtuelnog instrumenta

U programskom okruženju LabView kreiran je virtuelni instrument pomoću koga će se posmatrati talasni oblici napona i struja i meriti parametri pojačavača koji rade u klasi B i klasi AB.

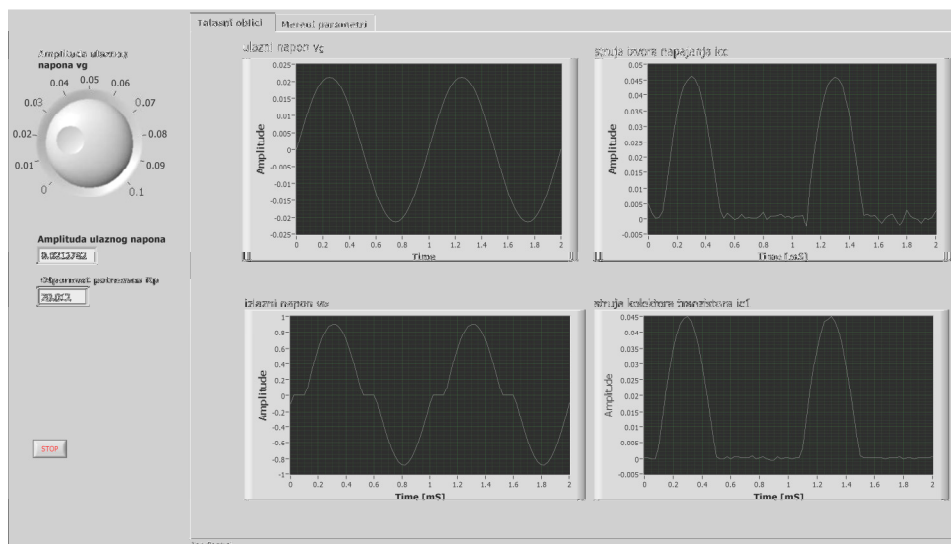
Osnovni prozor virtuelnog instrumenta prikazan je na slici 2.2.5.

U levom delu prozora nalazi se dugme potencijometra za promenu amplitude ulaznog napona čija je frekvencija fiksirana na 1 kHz. Ispod njega se očitava izmerena vrednost amplitude ulaznog napona. U dnu leve strane prozora prikazuje se izmerena vrednost otpora potrošača. Centralni deo instrumenta sadrži dva taba. Prvi, pod nazivom „Talasni oblici“ služi da se posmatraju talasni oblici napona i struja. Ova opcija se uključuje u delu vežbe u koji se odnosi na prvi deo zadatka. Izgled prozora za slučaj koji se odnose na pojačavač podešen za rad u klasi B prikazan je na slici 2.2.5.a. Posmatraju se talasni oblici ulaznog i izlaznog napona, kao i struje izvora za napajanje i kolektorske struje tranzistora *n_{pn}* tranzistora.

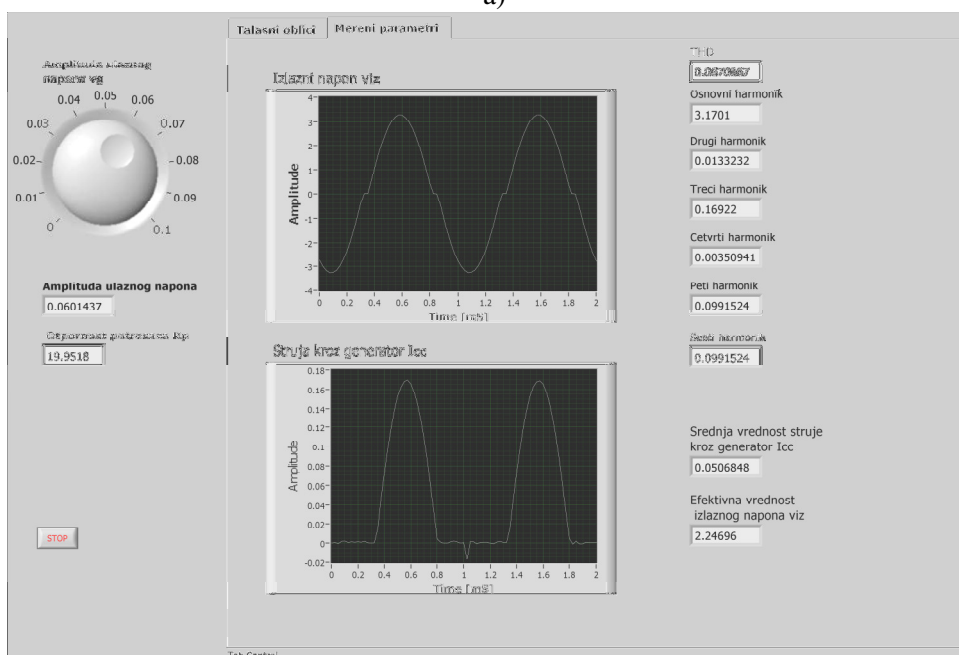
U drugom delu zadatka treba uporediti pojačavače koji rade u klasama B i AB sa stanovišta vrednosti izobličenja i maksimalne korisne snage. Zato virtuelni instrument treba da omogući merenja na osnovu kojih se mogu izračunati klir faktor, korisna snaga na potrošaču i snaga izvora napajanja. Ove opcije ugrađene su kroz tab nazvan je „Mereni parametri“.

Izgled prozora koji se otvara aktiviranjem ovog taba prikazan je na slici 2.2.5.b. U levom delu prozora posmatraju se simultano talasni oblici izlaznog napona i struje napajanja i_{CC} , čime se stiče utisak o klasi u kojoj pojačavač radi. U desnom delu mogu se očitati vrednosti ukupnog klir faktora, THD (*Total Harmonic Distortion*), kao i pojedinačni klir faktori prvih šest harmonika izlaznog signala. Ispod ovih polja prikazuju se izmerene vrednosti jednosmerne struje napajanja (srednja vrednost) i efektivne vrednosti napona na potrošaču. Na osnovu dobijenih izmerenih rezultata lako se izračunavaju korisna snaga na potrošaču (2.2.1), ukupna snaga izvora napajanja (2.2.5) i ukupan klir faktor (2.2.6).

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage



a)



b)

Slika 2.2.5 Osnovni prozor virtuelnog instrumenta
a) uključen tab „Talasni oblici“ b) uključen tab „Mereni parametri“

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

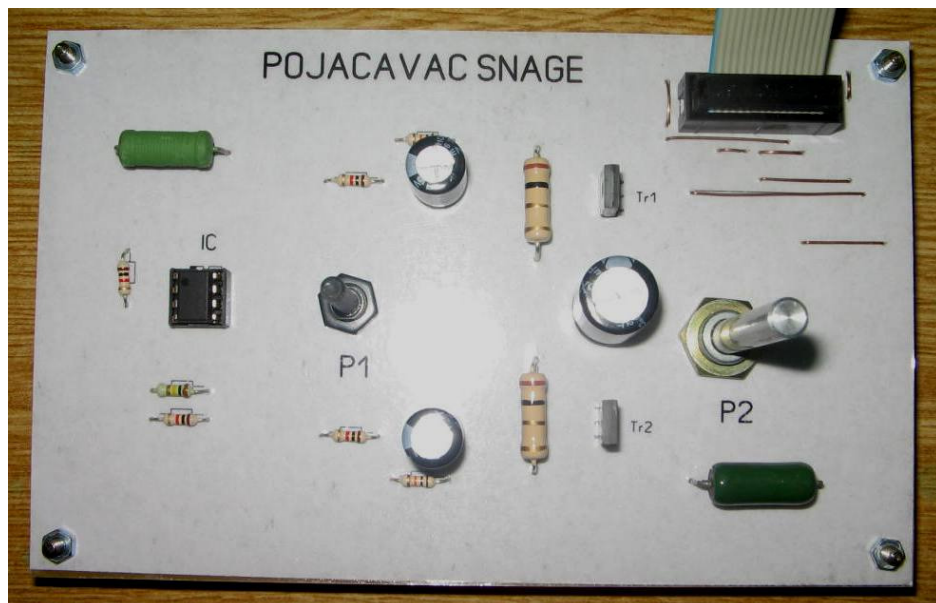
2.2.4 Uputstvo za rad

2.2.4.1 Zadatak

- Uočiti uticaj položaja radne tačke tranzistora (B i AB) na talasne oblike izlaznog signala, struje napajanja, kolektorske struje tranzistora Tr1 kod simetričnih pojačavača snage sa komplementarnim tranzistorima.
- Izmeriti stepen izobličenja (klir faktor) i stepen iskorišćenja (efikasnost) simetričnih pojačavača snage u klasi B i AB.
- Odrediti vrednost otpornosti potrošača pri kojoj se ostvaruje maksimalna korisna snaga na izlazu pojačavača snage koji radi u klasi B i AB.

2.2.4.2 Opis makete

Izgled makete prikazan je na slici 2.2.6.

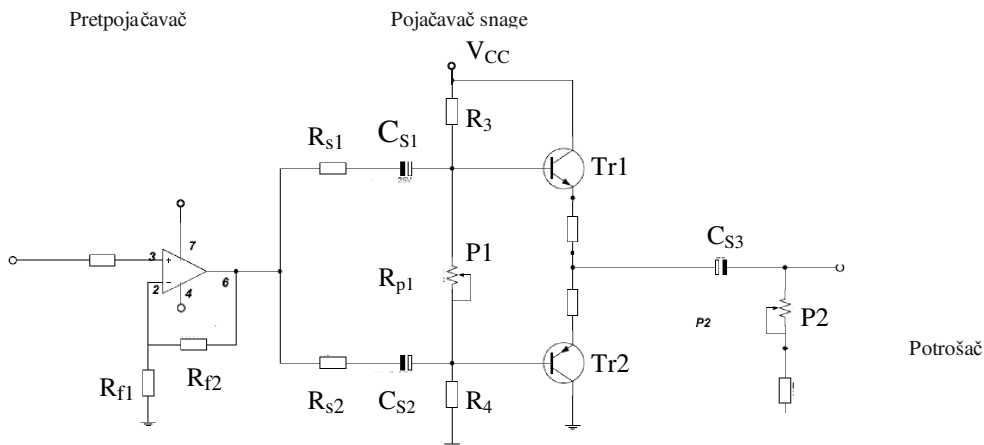


Slika 2.2.6 Izgled makete za vežbu „Pojačavač snage“

Na maketi je realizovan simetričan pojačavač snage sa komplementarnim tranzistorima BD235 (*nnp* tipa) i BD236 (*pnp* tipa). Pojačavaču snage prethodi pojačavač napona realizovan od operacionog pojačavača uA741 vezanog u konfiguraciji neinvertorskog pojačavača sa pojačanjem 101, koje definišu

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

otpornici označeni sa $R_{f1}=1\text{ k}\Omega$ i $R_{f2}=100\text{ k}\Omega$ na slici 2.2.7. Sa izlaza pretpojačavača preko RC kola $R_{s1}=1\text{ k}\Omega$, $C_{s1}=470\text{ }\mu\text{F}$, signal se dovodi do baze *npn* tranzistora Tr1, i simetrično, preko $R_{s2}=1\text{ k}\Omega$ i $C_{s2}=470\text{ }\mu\text{F}$, do baze *pnp* tranzistora Tr2. Režim rada oba tranzistora (klasa B ili AB) podešava se naponom na potencijometru P1. Njime se jednosmerni napon između baza izlaznih tranzistora može kontrolisati u opsegu od 0V do $(R_{p1}\cdot V_{CC})/(R_{p1}+R_3+R_4)=2.28\text{ V}$. Ovaj opseg je dovoljan da kontroliše položaj radne tačke od B do AB. Ovakva prepolarizacija tranzistora razlikuje se od onih prikazanih na slikama 2.2.3.a i 2.2.4.a, ali ima istu ulogu. Druga važna razlika odnosi se na asimetrično napajanje. Naime, umesto $\pm V_{CC}$ upotrebljeno je napajanje od 0 do $V_{CC}=12\text{ V}$. Ovo ima za posledicu da će jednosmerni napon na emitorima tranzistora Tr1 i Tr2 biti $V_{CC}/2$ u odsustvu signala. Treća modifikacija odnosi se na dva otpornika male vrednosti u emitorskom kolu. Njihova je uloga da zaštite tranzistore od pregorevanja. Naime, pri velikim emitorskim strujama na njima se ostvaruje pad napona dovoljan da umanjuje V_{BE} , a time i I_B , što neminovno dovodi do smanjenja I_E . Skrećemo pažnju na dimenzije ovih otpornika. Iako su im vrednosti male ($2\text{ }\Omega$) od njih se očekuje da propuste velike izlazne struje, tako da su deklarirani za snagu od 4 W. Otpornici u pretpojačavačkom stepenu i u baznom kolu deklarirani su za snage od $1/4\text{ W}$.



Slika 2.2.7 Električna šema kola makete

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

Izlaz pojačavača opterećuje redna veza potencijometra P2 i otpornika od 4Ω . Ovaj otpornik služi da ograniči struju kratkog spoja u slučaju da je P2 podešen na 0Ω i smešten je ispod makete. On je deklarisan za snagu od 5 W □ Potrošač je kondenzatorom C_{s3} odvojen galvanski od emitora tranzistora, tako da će u odsustvu ulaznog signala na potrošaču biti napon od 0 V . Dok tranzistor Tr1 vodi, C_{s3} se puni, da bi se u sledećoj poluperiodi, kada je Tr1 zakočen, praznio preko tranzistora Tr2 koji će tada provesti.

2.2.4.3 Tok rada

Potencijometrom P1 podešava se radna tačka izlaznih tranzistora. Kada je potencijometar P1 u krajnje levom položaju, baze tranzistora komplementarnog para (Tr1 i Tr2) praktično su spojene. Tranzistori ne vode i pojačavač radi u klasi B. Ukoliko se povećava otpornost između baza tranzistora pomoću potencijometra P1 u određenom trenutku proteći će jednosmerna struja kroz izlazne tranzistore. U tom slučaju pojačavač funkcioniše u klasi AB. Klasa u kojoj radi pojačavač može se utvrditi praćenjem talasnog oblika izlaznog signala.

Potencijometrom P2 reguliše se otpornost potrošača R_p .

a) Uticaj položaja radne tačke tranzistora (B i AB) na talasne oblike signala

U ovom delu vežbe potrebno je skicirati talasne oblike sledećih signala:

- Ulaznog napona, v_g ;
 - Izlaznog napona na potrošaču, v_{iz} ;
 - Struje kroz izvor napajanja, i_{CC} ;
 - Struje kolektora *npn* tranzistora, i_{C1} .
- A. Na virtuelnom instrumentu uključiti tab “talasni oblici”.
- B. Podesiti amplitudu ulaznog napona na vrednost od 20 mV .
- C. Potencijometrom P2 podesiti otpornost potrošača na vrednost od 20Ω .
- D. Podesiti potencijometar P1 u krajnji levi položaj tako da radne tačke izlaznih tranzistora budu podešene za rad pojačavača u klasi B.
- E. Skicirati talasne oblike ulaznog napona, izlaznog napona, struje kroz jednosmerni izvor napajanja i struje kolektora izlaznog *npn* tranzistora u dijagramu sa slike 2.2.8.a. Koristiti istu razmeru za vremensku osu. Posebno naznačiti tačke na osi u kojima napon ili struja menja znak.

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

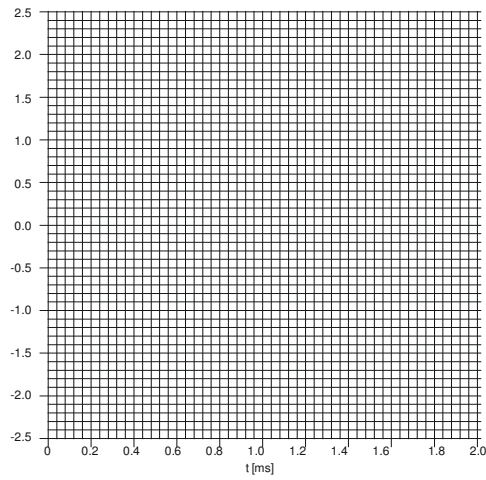
- F.** Struja kroz aktivni element teče samo u delovima pozitivne poluperiode ulaznog signala kada je amplituda veća od prekidnog napona. Odrediti ugao proticanja struje kolektora J_{c1} :

$$\theta_1 = \frac{\Delta t}{T} \cdot 2\pi = \underline{\hspace{2cm}}$$

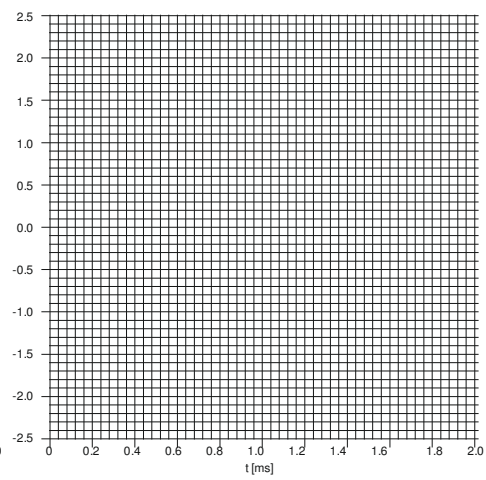
gde je: Δt vremenski interval u toku koga tranzistor Tr1 provodi,
 T perioda signala koja iznosi 1 ms.

- G.** Okretati osovinu potenciometra P1 i posmatrati promenu talasnog oblika izlaznog napona.
- H.** Kada P1 dostigne krajnji desni položaj skicirati talasne oblike ulaznog napona, izlaznog napona, struje kroz jednosmerni izvor napajanja i struje kolektora izlaznog *npn* tranzistora u dijagrame sa slike 2.2.8.b. Koristiti istu razmeru za vremensku osu. Posebno naznačiti tačke na osi u kojima napon ili struja menja znak.
- I.** Odrediti ugao proticanja struje kolektora $\theta_2 = \frac{\Delta t}{T} \cdot 2\pi = \underline{\hspace{2cm}}$

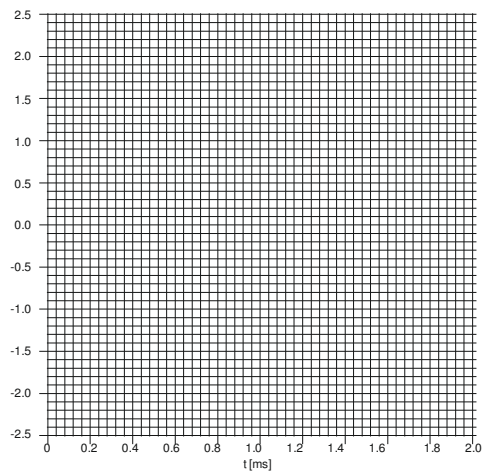
CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage



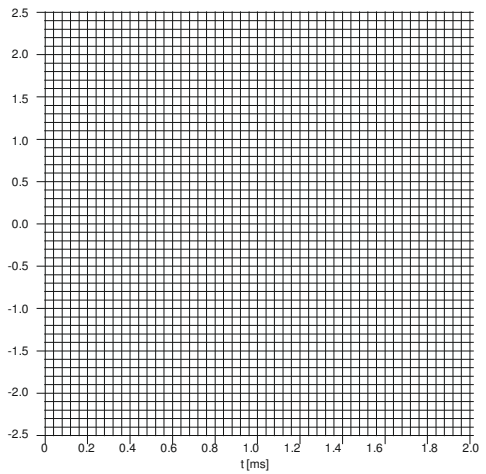
Ulazni napon v_g (klasa B)



Ulazni napon v_g (klasa AB)

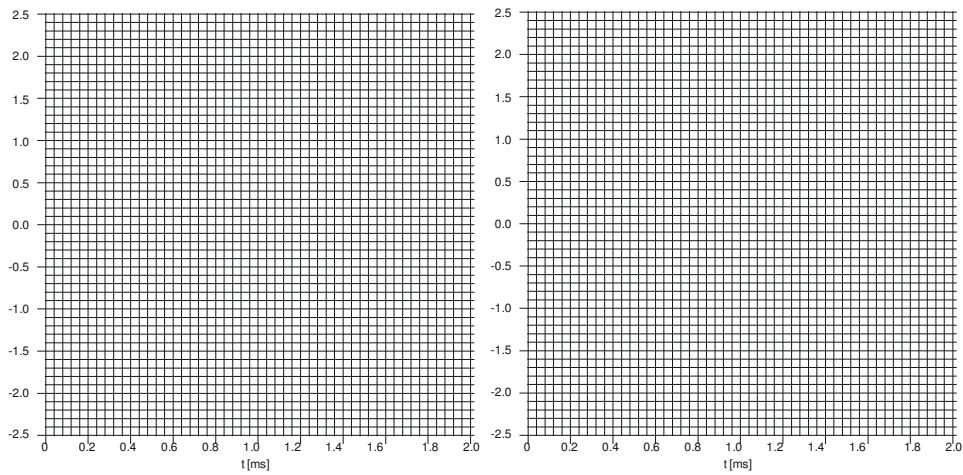


Napon na potrošaču v_{iz} (klasa B)

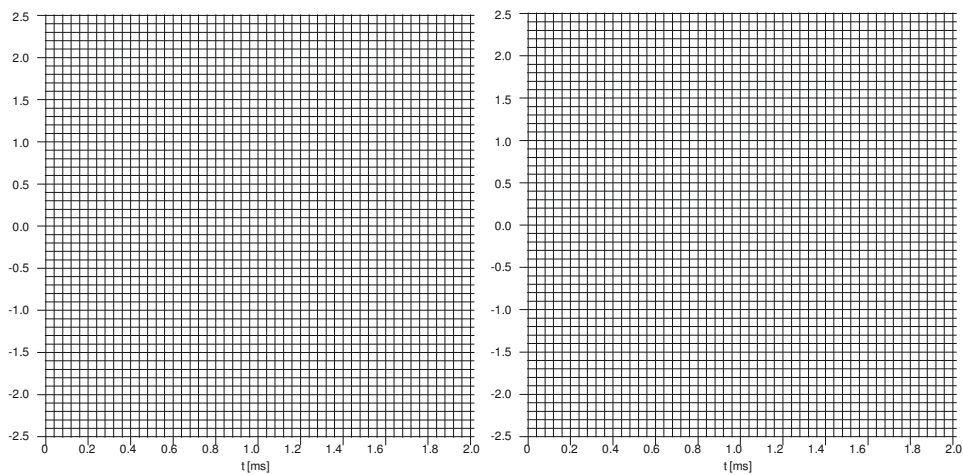


Napon na potrošaču v_{iz} (klasa AB)

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage



Struja kroz izvor napajanja i_{CC} (klasa B) Struja kroz izvor napajanja i_{CC} (AB)



Struja kolektora tranzistora i_{C1} (klasa B) Struja kolektora tranzistora i_{C1} (AB)

a)

b)

Slika 2.2.8 *Talasnici signala pojačavačasnage*
a) u klasi B b) u klasi AB

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

b) Uticaj položaja radne tačke tranzistora (B i AB) na klir faktora i stepen iskorišćenja

- A.** Na virtuelnom instrumentu uključiti tab “Mereni parametri”.
- B.** Podesiti potenciometar P_1 u krajnji levi položaj tako da radne tačke izlaznih tranzistora budu podešene za rad pojačavača u klasi B.
- C.** Povećavati amplitudu ulaznog napona, v_g , dok se ne dobije maksimalna vrednost neizobličenog izlaznog napona v_{iz} , odnosno do granice odsecanja vrhova signala. Vrednost ulaznog napona za koju je zadovoljen ovaj uslov je približno u opsegu između 60 mV i 80 mV. Rezultate merenja uneti u tabelu 2.2.1.
- D.** Podesiti amplitudu ulaznog napona na vrednost od 20 mV.
- E.** Potenciometrom P_2 podesiti otpornost potrošača na vrednost od 20 Ω .
- F.** Očitati efektivnu vrednost napona na potrošaču v_{iz} i srednju vrednosti struje kroz potrošač I_{CC} .
- G.** Na osnovu (2.2.1) izračunati korisnu snagu, P_k ; znajući da je $V_{CC}=12$ V primenom (2.2.5) izračunati snagu izvora za napajanje P_{CC} , a zatim i faktor iskorišćenja η . Rezultate upisati u tabelu 2.2.2.
- J.** Očitati vrednosti prvih šest harmonika (H_1 do H_6) izlaznog signala i na osnovu njih odrediti klir faktor k . Sve preostale više harmonike zanemariti pri određivanju klir faktora. Rezultate merenja i proračuna upisati u tabelu 2.2.3. Uporediti rezultat sa očitano vrednišću THD .
- K.** Ponoviti postupak iz tačaka E-J za amplitudu ulaznog napona v_{gmax} koja je određena u tački C.
- L.** Podesiti potenciometar P_1 u krajnji desni položaj tako da radne tačke izlaznih tranzistora budu podešene za rad pojačavača u klasi AB. Posmatrati talasni oblik izlaznog napona.
- M.** Ponoviti postupak iz tačaka C-K.

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

Tabela 2.2.1

	v_{gmax} [mV]	v_{izmax} [V]
Klasa B		
Klasa AB		

Tabela 2.2.2

ulazni napon v_g	klasa	I_{CC} (mA)	P_{CC} (mW)	v_{iz} (V)	P_K (mW)	η
20 mV	B					
	AB					
v_{gmax}	B					
	AB					

Tabela 2.2.3

ulazni napon v_g	klasa	H1	H2	H3	H4	H5	H6	k
20 mV	B							
	AB							
v_{gmax}	B							
	AB							

c) Određivanje optimalne vrednosti otpornosti potrošača

U ovom delu vežbe potrebno je snimiti zavisnost izlazne snage pojačavača od otpornosti potrošača $P_k=f(R_p)$.

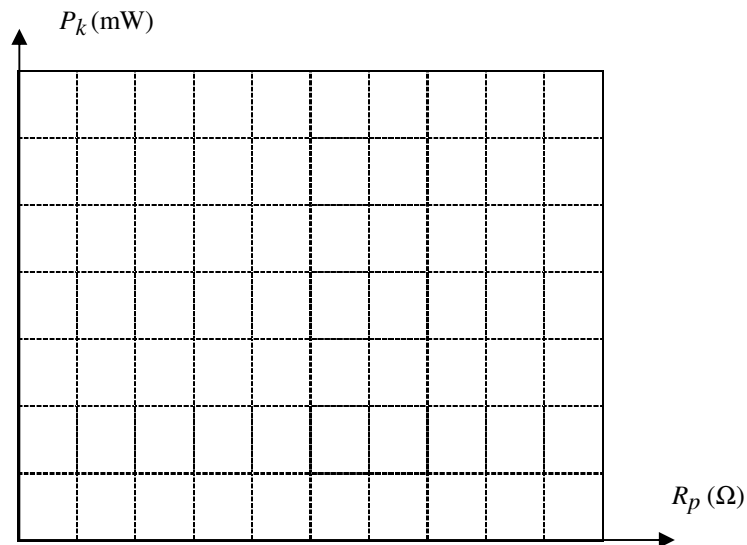
- A.** Na virtuelnom instrumentu uključiti tab “Mereni parametri”.
- B.** Podesiti amplitudu ulaznog napona na vrednost od 40 mV.
- C.** Podesiti potencijometar P1 u krajnji levi položaj tako da radne tačke izlaznih tranzistora budu podešene za rad pojačavača u klasi B.
- D.** Menjati vrednost potencijometra P2 od 4 Ω do 22 Ω u koracima od po 2 Ω , očitavati vrednosti izlaznog napona, v_{iz} , i upisivati ih u tabelu 2.2.4.

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage

- E. Na osnovu (2.2.1) izračunati korisnu snagu, P_k za svaku izmerenu vrednost v_{iz} . Rezultate upisati u tabelu 2.2.4.
- F. Podesiti potenciometar P1 u krajnji desni položaj tako da radne tačke izlaznih tranzistora budu podešene za rad pojačavača u klasi AB. Posmatrati talasni oblik izlaznog napona.
- G. Ponoviti postupak iz tačaka D, E i F.
- H. Na osnovu vrednosti iz tabele 2.2.4 nacrtati u koordinatnom sistemu sa slike 2.2.9.a zavisnost $P_k=f(R_p)$ za pojačavač koji radi u klasi B.
- I. Na osnovu vrednosti iz tabele 2.2.4 nacrtati u koordinatnom sistemu sa slike 2.2.9.b zavisnost $P_k=f(R_p)$ za pojačavač koji radi u klasi AB.

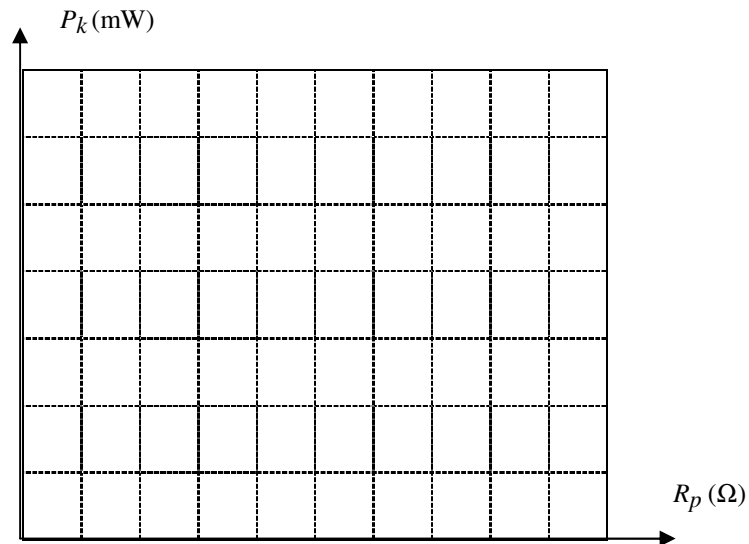
Tabela 2.2.4

$R_p (\Omega)$		4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Klasa B	$v_{iz} (V)$										
	$P_k (mW)$										
Klasa AB	$v_{iz} (V)$										
	$P_k (mW)$										



Slika 2.2.9.a Zavisnost $P_k=f(R_p)$ za pojačavač koji radi u klasi B

CIKLUS 2 VEŽBA 2: Pojačavač snage



Slika 2.2.9.b Zavisnost $P_k=f(R_p)$ za pojačavač koji radi u klasi AB

2.2.5 Pitanja za proveru znanja

Uporediti karakteristike pojačavača snage klase B i klase AB sa stanovišta maksimalne korisne snage i izobličenja.

Datum: _____

Student: _____

Overava: _____