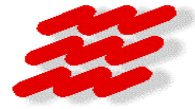




Univerza v Ljubljani



Fakulteta za elektrotehniko

Audio mešalnik
(seminarska naloga pri predmetu
Komunikacijska vezija)

Patrik Ritoša

patrik.ritosa@email.si

Ljubljana, 27/01/2003

Vsebinsko kazalo

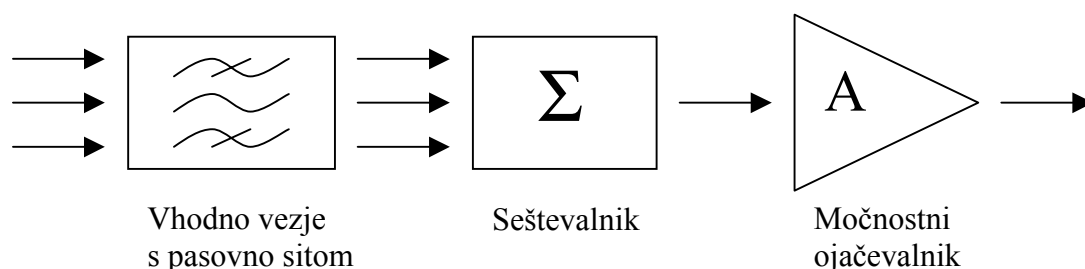
Uvod	3
1. Vhodni predojačevalnik in vhodni pasovni filter	3
1.1. Vezalna shema in frekvenčna karakteristika	4
2. Seštevalnik	5
3. Močnostni ojačevalnik (izhodna stopnja)	7
3.1. Princip delovanja	8
3.2. Pozitivni učiki op. oj. in negativne povratne vezave	8
3.2.1. Vpliv napetostnega kolena	8
3.2.2. Učinek diod	9
3.2.3. Nesimetrije med NPN in PNP tranzistorji	10
3.2.4. Valovitost napajanja	11
3.3. Izhodne moči	13
3.3.1. Moč na bremenu	13
3.3.2. Moč na tranzistorju	13
3.3.3. Dimenzioniranje hladilnega telesa	15
4. Napajalno vezje	16

Kazalo slik

Slika 1: Blok shema vezja	3
Slika 2: Blok shema vhodnega filtra	4
Slika 3: Frekvenčna karakteristika filtra	5
Slika 4: Blok shema seštevalnika	5
Slika 5: Vhodni signali v seštevalnik	6
Slika 6: Izhodni signal iz seštevalnika	6
Slika 7: Blok shema končne močnostne stopnje	7
Slika 8: Vpliv kolenske napetosti tranzistorja	8
Slika 9: Napetost U_{BE} na tranzistorjih	9
Slika 10: Stabilizacija delovne točke z diodama	10
Slika 11: Krmilni tok tranzistorjev (i_b)	11
Slika 12: Vpliv valovitosti napajanja (karakteristika tranzistorja)	11
Slika 13: Vpliv valovitosti napajanja na bremenu	12
Slika 14: Vpliv valovitosti napajanja z uporabo op. oj.	12
Slika 15: Napetost in tok na tranzistorju	13
Slika 16: Potrošnja moči na tranzistorju v odvisnosti od krmiljenja (k)	14
Slika 17: Karakteristika hladilnega telesa	15
Slika 18: Blok shema napajalnega vezja	16

Uvod

Osnovna naloga audio mešalnika je, da dovedene audio signale na vhod zmeša (sešteje). Za ta postopek je potrebno vhodne signale najprej obdelati, saj v principu ni nujno, da je vsak vhodni signal že primeren za nadaljno obdelavo. V ta namen služi vhodna stopnja. Naslednja faza je seštevanje signalov za kar posrbi seštevalno vezje. In kot zadnja faza je močnostni del, ki rezultirajoči signal ustrezno priredi, da ga je moč posredovat tudi na zelo nizko breme kot je npr. zvočnik. Opisani princip je prikazan na Sliki 1.



Slika 1: Blok shema vezja

1. Vhodni predojačevalnik in vhodni pasovni filter

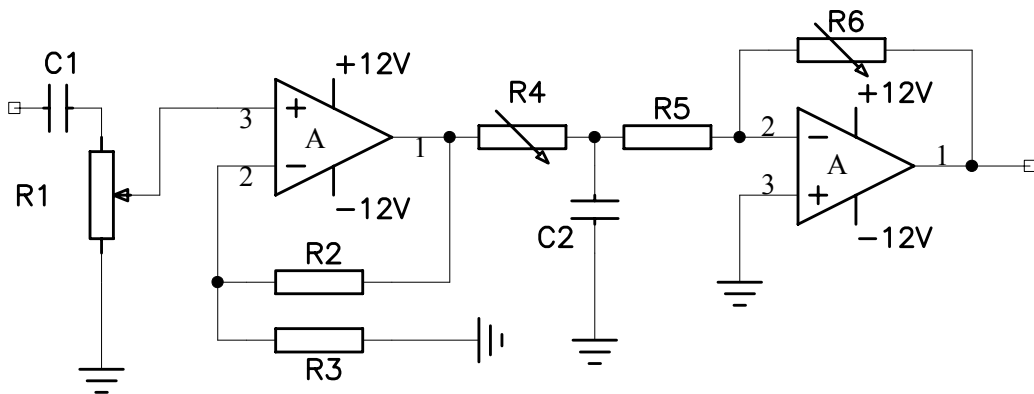
Naloga vhodnega vezja je, da vstrečno ajači oziroma oslabi signal doveden na vhod, tako da je ta ustrezne velikosti za nadaljno obdelavo. Rešitev tega problema je prikazano na Sliki 2, kjer z kombinacijo uporabnega delilnika R1 in op. oj. vhodni signal poljubno oslabimo oz. ojačamo za željeno vrednost.

Naloga pasovnega filtra je izločanje visokih in nizkih frekvenc. Nizke frekvence in enosmerne komponente (frekvence pod slušno mejo 20Hz) so v audio sistemih nezaželene, ker po nepotrebem trošijo napajalno energijo in kar se mi zdi še bolj pomembno, brez potrebe grejejo ojačevalne elemente, zlesti močnostne tranzistorje v končni stopnji. Še en negativen učinek se pojavi pri uporabi operacijskih ojačevalnikov, kjer kljub majhni vhodni napetosti lahko dodana enosmerna napetost popelje op. oj. v nasičenje.

Visoke frekvence (nad slušno mejo 20kHz) v bistu poleg tega, da trošijo napajalno energijo nimajo drugih negativnih učinkov, vendar sem se odločil za zgornjo omejitev zaradi varnosti pred nezaželeno oscilacijo ojačevalnih stopenj s povratno vezavo (zlasti pri uporabi op. oj.).

1.1. Vežalna shema in frekvenčna karakteristika

Z uporabo kvalitetnik op. oj. je frekvenčna karakteristika relativno lahko izračunljiva in zelo stabilna.



Slika 2: Blok shema vhodnega filtra

Vrednosti elementov:

$R1 = 100k\Omega$ $C1 = 100nF$ Op. Oj.
 $R2 = 10k\Omega$ $C2 = 10nF$ TL072CR
 $R3 = 1k\Omega$
 $R4 = 800\Omega$
 $R5 = 1k\Omega$
 $R6 = 10k\Omega$

Spodnja meja je prosto določljiva iz $R1$ in $C1$, kjer ne vpliva kako nastavimo delilno razmerje upora $R1$, kajti je vhodna upornost op. oj. zelo visoka.

$$f_{SP} = \frac{1}{2\pi \cdot R1 \cdot C1} = 15.9Hz$$

Upora $R2$ in $R3$ poleg upora $R1$ služita, za nastavitve vhodnega signala na ustrezen nivo za nadaljne stopnje. Na vhodu za mikrofona je vhodno ojačanje nekoliko večje (60dB), v primerjavi z ostalimi vhodi (40dB), kajti tam je vhodni signal bistveno manjši.

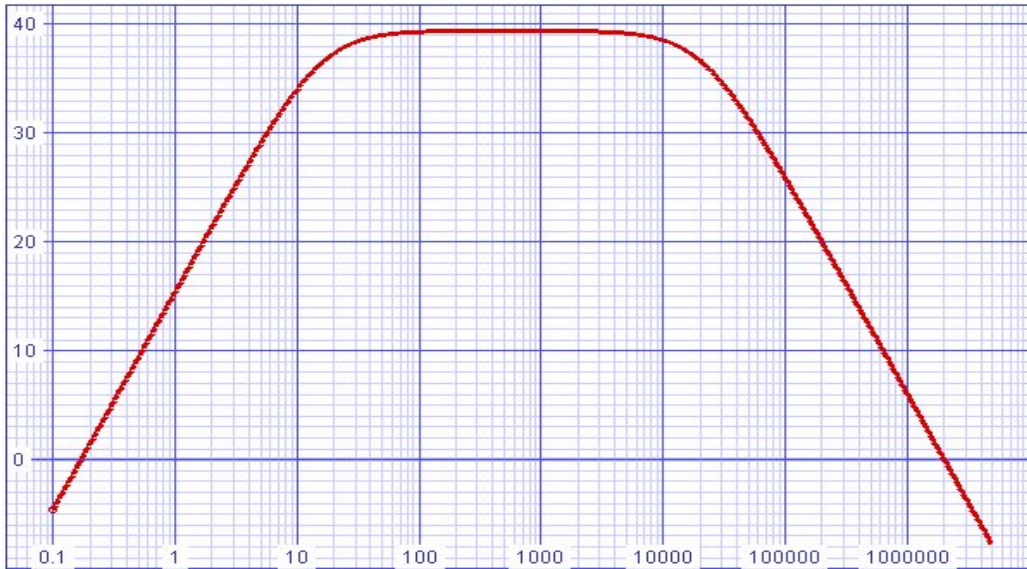
Zgornjo mejo dobimo z analizo drugega dela vezja (od upora $R4$ dalje) in po krajšem izračunu pridemo do naslednje odvisnosti:

$$Au = \frac{R6}{R4 + R5} \cdot \frac{1}{1 + j\omega C \cdot R4 \parallel R5}$$

$$f_{ZG} = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot R4 \parallel R5} = 21.5kHz$$

Iz rezultata je razvido, da je frekvenčna meja neodvisna od upora R6. To je zelo dobro, kajti upor R6 se zelo spreminja, saj z njim določamo ojačanje filtra in posledično velikost dotičnega signala na izhodu.

Frekvančna karakteristika:



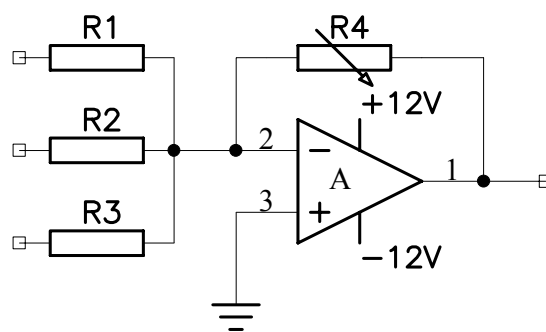
Slika 3: Frekvenčna karakteristika filtra

Izmerjene vrednosti:

$A_U = \underline{\hspace{2cm}}$
 $f_{SP} = \underline{\hspace{2cm}}$
 $f_{ZG} = \underline{\hspace{2cm}}$

2. Seštevalnik

Naloga seštevalnika je, da sešteje signale izhodne signale predhodnjih stopenj in rezultat posreduje na naslednjo stopnjo. To nalogo zelo preprosto dosežemo z uporabo operacijskega ojačevalnika zvezanega po spodnji shemi.



Slika 4: Blok shema seštevalnika

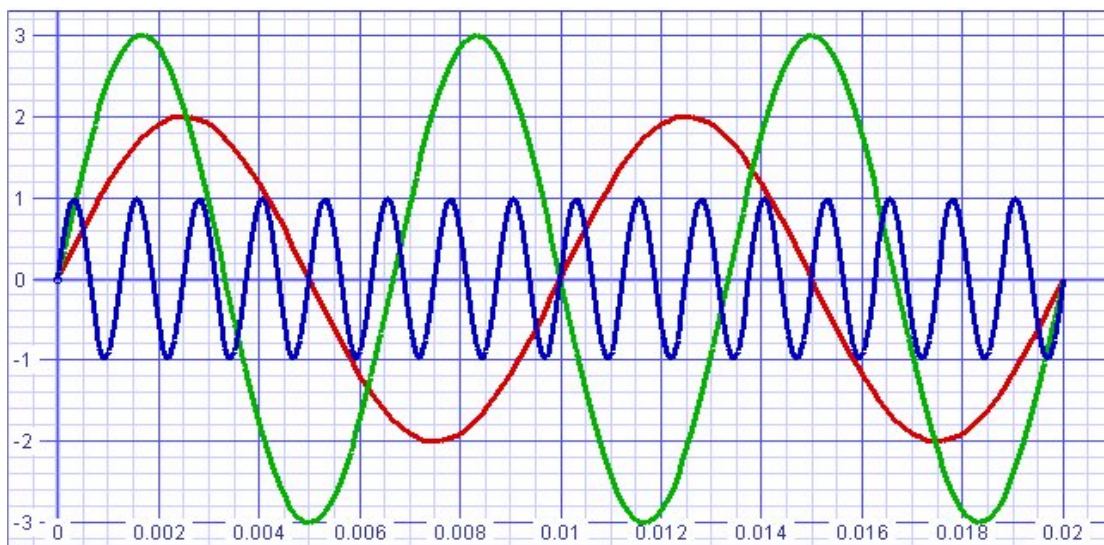
Operacija seštevanja se obnaša po naslednji enačbi:

$$U_{IZH} = -R4 \cdot \left(\frac{U_{VH1}}{R1} + \frac{U_{VH2}}{R2} + \frac{U_{VH3}}{R3} \right)$$

Iz te je razvidno, da lahko vhodne signale poljubno utežimo (npr. lahko bi signalu iz mikrofona določili večjo težo, ker je ta običajno manjši od ostalih vhodnih signalov). Iz enačbe tudi sledi, da je celotno ojačanje odvisno predusem od upora R4. To lastnost sem izrabil za določanje jakost izhodnega signala ("volume").

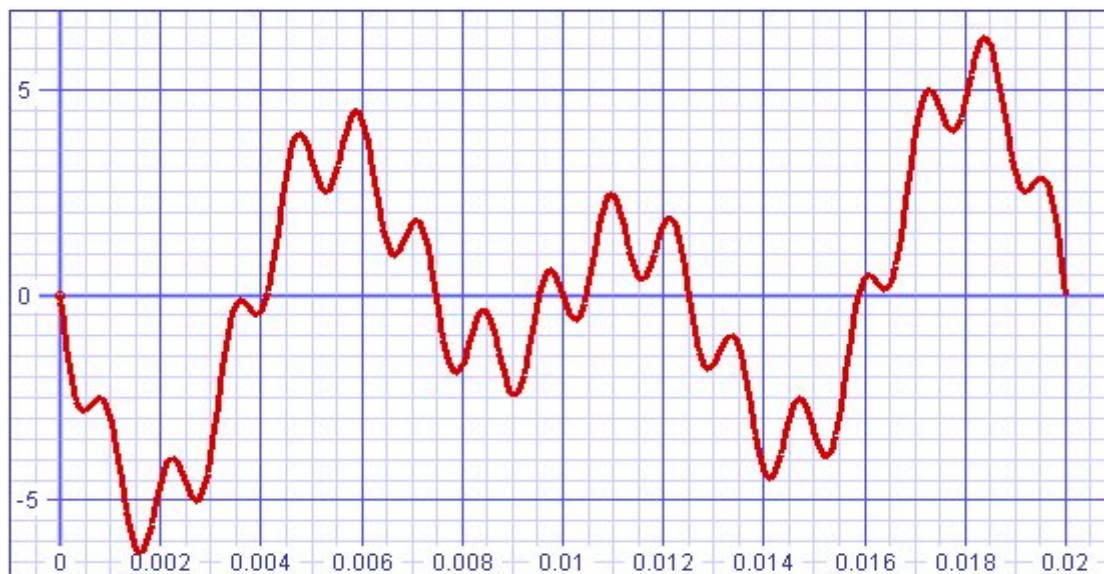
Primer mešanja (seštevanja):

Vhodni signali:



Slika 5: Vhodni signali v seštevalnik

Izhodni signal:



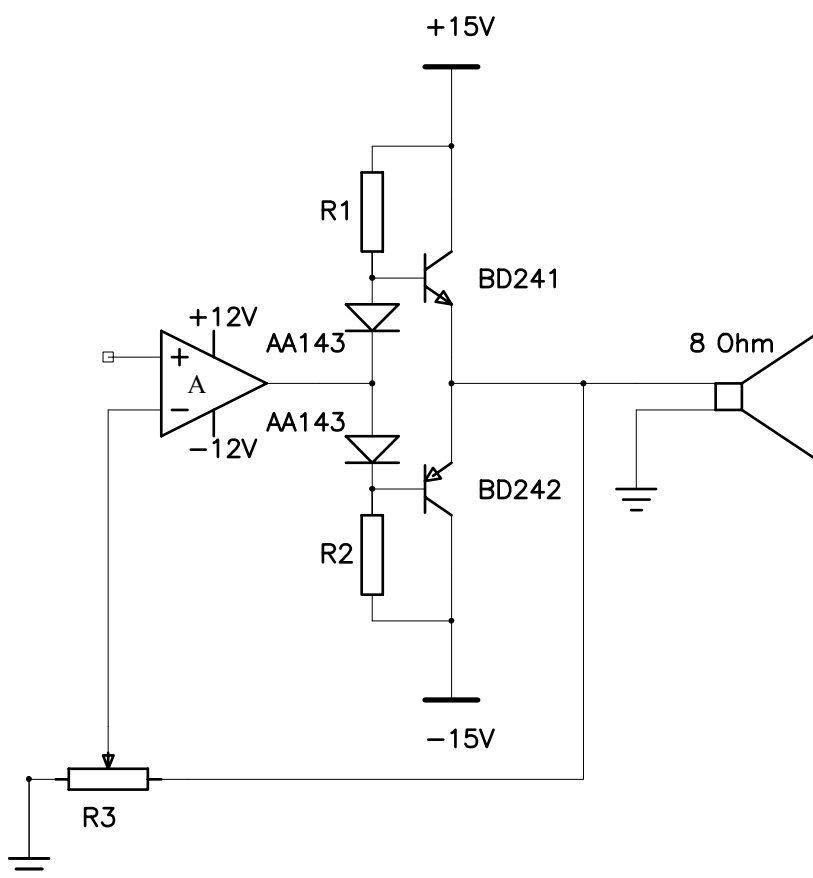
Slika 6: Izhodni signal iz seštevalnika

Vrednosti elementov:

R1 = 1k Ω Op. Oj.
R2 = 1k Ω TL072CR
R3 = 1k Ω
R4 = 10k Ω

3. Močnostni ojačevalnik (izhodna stopnja)

Glavna naloga izhodne stopnje je, da krmili breme z signalom ki ga sprejema iz predhodnje stopnje. Ker op. oj. sam kot tak ni dovolj močen, da bi lahko krmilil nizko ohmsko breme, kot je zvočnik sem se odločil za uporabo bipolarnih tranzistorjev v vezavi prikazani na spodnji sliki.



Slika 7: Blok shema končne močnostne stopnje

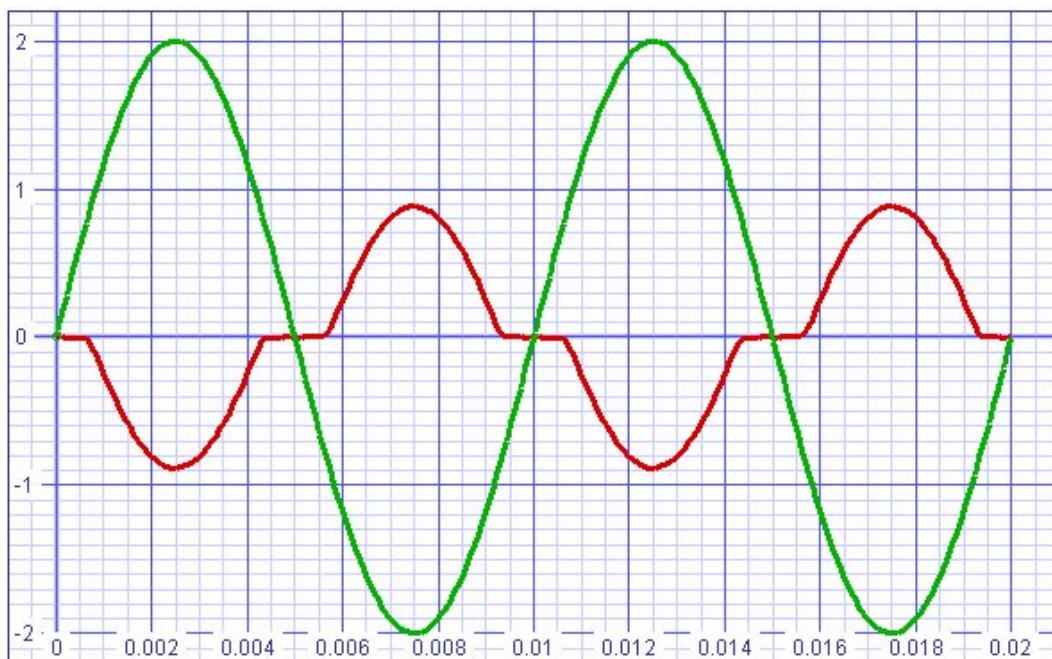
3.1. Princip delovanja

Operacijski ojačevalnik krmili tranzistorja, ki nato vsak v eni polperidi napajata breme (pretvarjata baterijsko moč v bremensko moč– B razred ojačevalnika). Negativna povratna vezava, ki poteka preko uporovnega delilnika R3 pripomore k temu, da je napetost na bremenu povsem enake oblike kot vhodna napetost, le za določen faktor ojačana. Tak način krmiljenja (op. oj. z negativno povratno vezavo) odpravi vse nesimetrije, ki jih vnašajo bipolarni tranzistorji in še nekatere druge nezaželene učike opisane v nadaljevanju.

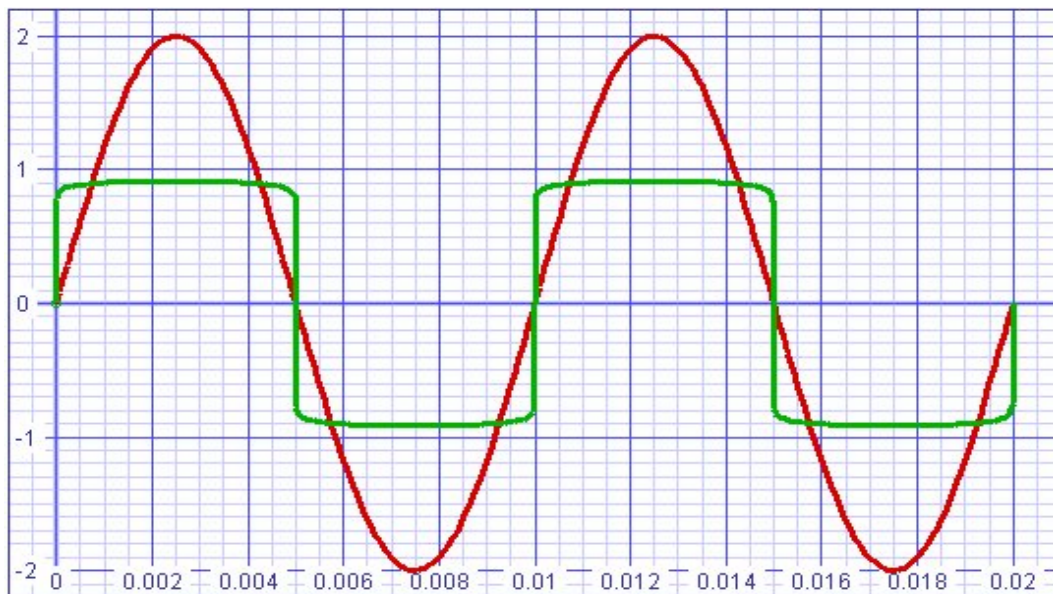
3.2. Pozitivni učiki op. oj. in negativne povratne vezave

3.2.1. Vpliv napetostnega kolena

Kot prvega bi rad omenil vpliv kolena tranzistorja, ki moti predusem majhne signale in jih močno popači, kar je zelo lepo vidno na Sliki 8. Rešitev z op. oj. in negativno povratno vezavo ta vpliv močno zmanjšamo kajti zaradi povratne vezave op. oj. teži k temu, da bo izhodna napetost enaka vhodi in ustrezno krmili bazo tranzistorja. Krmilna napetost oziroma napetost U_{BE} , je prikazana na Sliki 9.



Slika 8: Vpliv kolenske napetosti tranzistorja



Slika 9: Napetost U_{BE} na tranzistorjih

Iz druge Slike 9 je razvidno, da je za lep izhodni sinusni signal potrebna skoraj da pravokotna napetost U_{BE} (idealno op. oj.). Problem predstavljajo strmi prehodi čez ničlo, kajti op. oj. ima omejeno maksimalno hitrost dvigovanja napetosti, ki za uporabljen tranzistor znaša $13V/\mu s$. Problem postane viden predusem pri visokih frekvencah, kjer se na izhodnem signalu ob prehodu čez ničlo pojavi stopnica («začetek signala manjka»).

Okviren izračun zgornje frekvenčne meje za podan op. oj.:

$S = 13V/\mu s$ (maksimalna strmina)

$A = 15V$ (maksimalna amplituda)

$$f(t) = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t)$$

$$f'(t) = A \cdot 2\pi f \cdot \cos(2\pi f \cdot t)$$

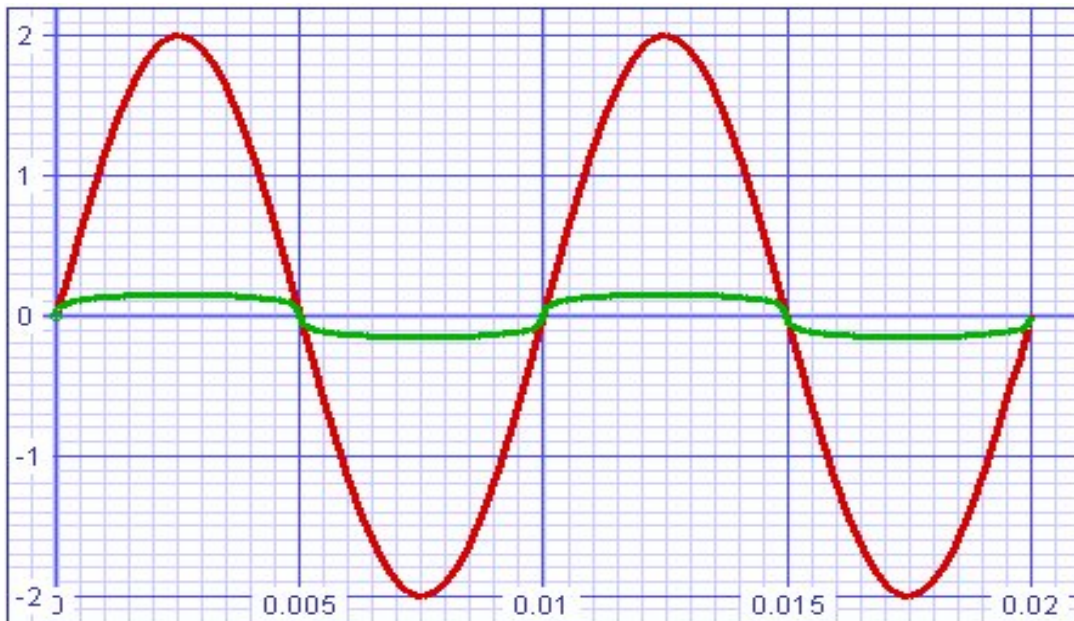
$$f'(t)_{\max} = A \cdot 2\pi f = S \Rightarrow f_{\max} = \frac{S}{A \cdot 2\pi} = \frac{13V / \mu s}{15V \cdot 2\pi} = 137.9kHz$$

Rešitev tega problema je v tem, da nastavimo določeno prenapetosti med bazo in emitorjem obeh tranzistorjev na takšno vrednost, da se izognemo napetosti kolena (tik nad njo ali pa v njeni okolici). Vendar pa v tej smeri ne smemo pretiravati, kajti pri preveliki prenapetosti bi bila oba tranzistorja odprta, tudi če na vhodu ni signala in tekel bi relativno velik enosmerni tok, ki bi nepotrebno grel tranzistorja.

3.2.2. Učinek diod

Možna rešitev zgoraj opisanega problema je z uporabo diod vezanih vzporedno z tranzistorji, ki neprestano zagotavljajo določeno napetost med bazo in emitorjem tranzistorja. Tukaj se pojavi problem, če je kolenska napetost diod večja od kolenske napetosti tranzistorja. Idealna rešitev bi bila, če bi vezali vzporedno povsem enaka tranzistorja in bi prvemu določili minimalen mirovni tok (tokovno zrcalo).

Konkretno v vezju sem se oločil zaradi enostavnosti za prvo rešitev z diodami, kjer sem izbral Germanijeve diode, ki imajo približno napetost kolena 0.3V. S tem sem preprečil velike mirovne tokove in nekoliko zmanjšal učinek zaradi omejene hitrosti dvogovanja napetosti, ki pa v bistvu v mojem primeru pri audio frekvancah in z izbranim op. oj. niti ne pride tolko do izraza ($f_{\max}=20\text{kHz}$).



Slika 10: Stabilizacija delovne točke z diodama

Pri simulaciji sem predpostavil, da imajo diode nekoliko nižjo napetost kolena, kot tranzistorja, zato so stopnice (srmi prehodi) še nekoliko vidne, vendar so bistveno manjše kot na Sliki 9 (brez diod).

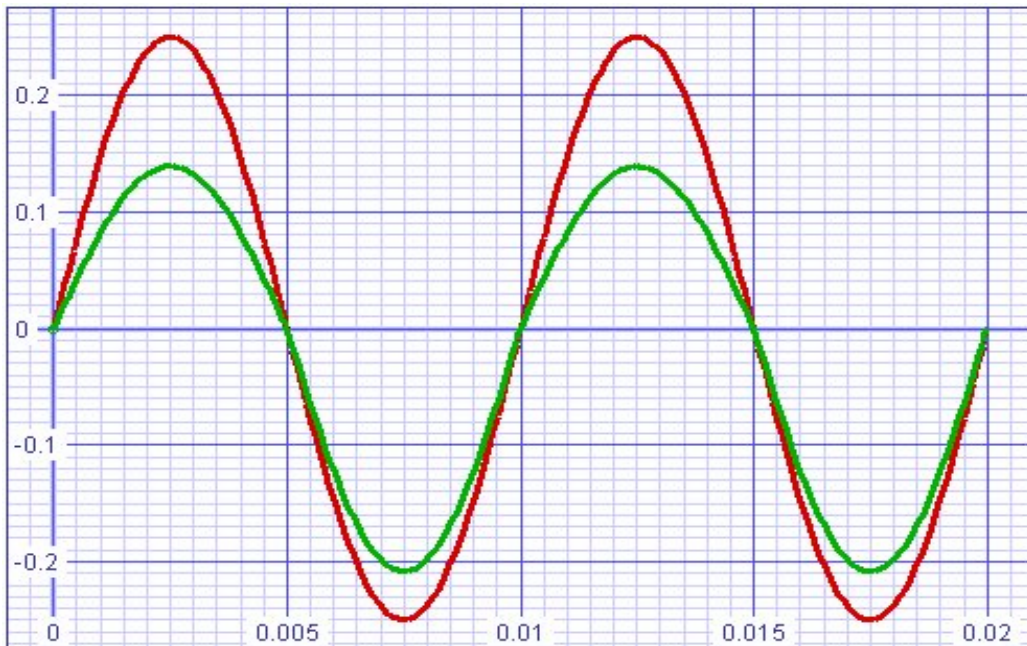
3.2.3. Nesimetrije med NPN in PNP tranzistorji

V tem primeru mislim predvsem na neenakosti med tokovnim ojačanjem β , ki se razlikuje za NPN in PNP komplementarne tranzistorje.

Kataloški podatki za β_{\min} :

BD241 (npn)	25
BD242 (pnp)	20

Rešitev tega problema zagotavlja, kot že povedano op. oj. z negativno povratno vezavo, ki ustrezno krmili bazo tranzistorja. Učinek je lepo viden iz Slike 11.

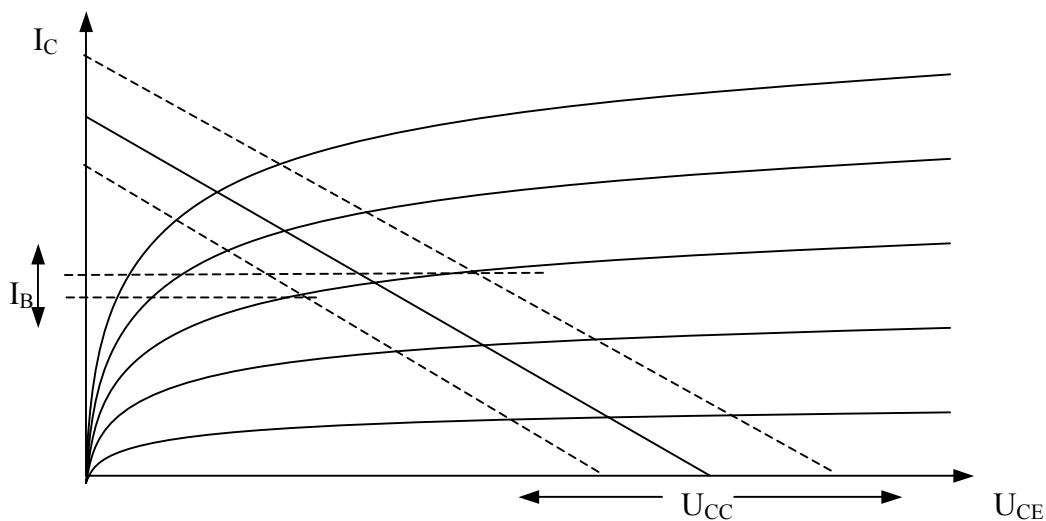


Slika 11: Krmilni tok tranzistorjev (i_b)

Slika predstavlja bazni (nesimetričen) in bremeski (simetričen) tok. V negativni polperiodi (aktiven PNP tranzistor), pritekata v bazo nekoliko večji tok, tako da dosežemo v obeh primerih enak bremeski tok.

3.2.4. Valovitost napajanja

Problem valovitosti se pojavi zlasti v primerih, ko dosežemo enosmerno napetost s pomočju usmerjanja izmenične (omrežne) napetosti. Ta valovitost se nato preko tranzistorske karakteristike prenese na breme in tam povzroča nezaželen brum.



Slika 12: Vpliv valovitosti napajanja (karakteristika tranzistorja)

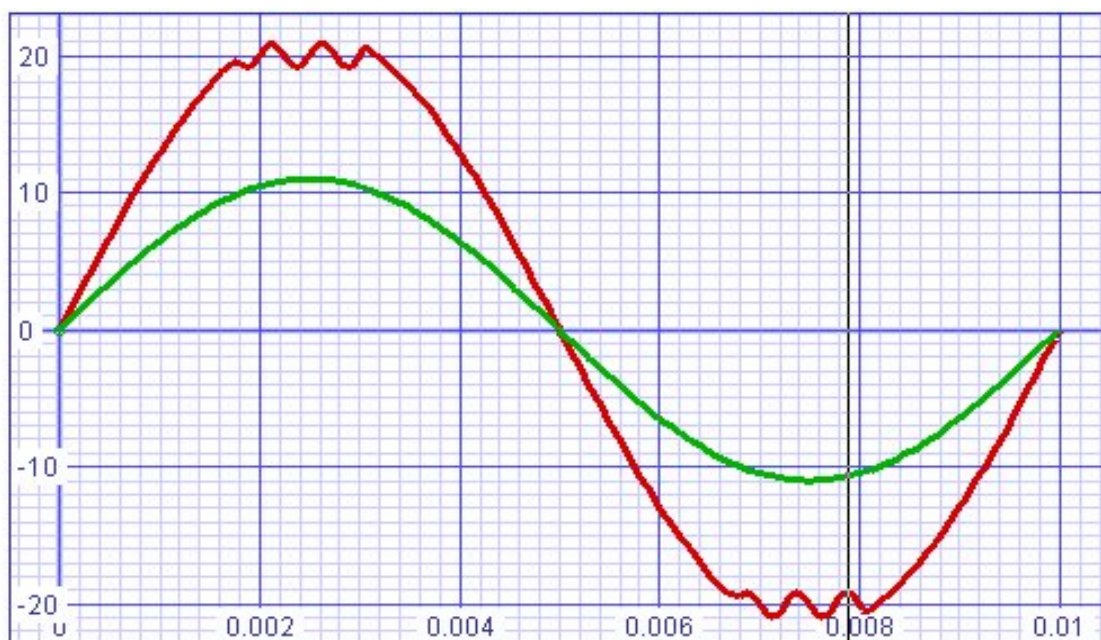


Slika 13: Vpliv valovitosti napajanja na bremenu

Zgornja slika prikazuje motnje zaradi neidealne napajalne napetosti (višje frekvence). Z uporabo op. oj. in negativno povratno vezavo se ta vpliv izloči (napetostni sledilnik), oziroma vsa valovitost ostane na tranzistorju po enačbi:

$$U_{BE} = U_{CC} - U_B$$

V tem primeru pa nikakor ne upliva na kvaliteto signala na bremenu, seveda dokler je bremenski signal dovolj majhen. Kajti, ko pride bremenski signal v območje blizu prekoračitve enostavno ni več dovolj napajalne napetosti, da bi lahko izhodni signal sledil vhodnemu. Primer je prikazan na Sliki 14.



Slika 14: Vpliv valovitosti napajanja z uporabo op. oj.

Tudi v tem primeru sem predstavil motečo frekvenco z višjo frekvenco na vrhovih sinusa.

3.3. Izhodne moči

3.3.1. Moč na bremenu

Pri določanju moči na bremenu ni posebnih težav, lahko jo preprosto izračunamo iz nečbe:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

ali

$$P = \frac{U \cdot I}{2},$$

če govorimo o efektivni moči ob predpostavki, da smo dali kot vhodni signal sinusni signal.

Bolj zanimiva je moč, ki se troši na tranzistorju, kajti ta je nezaželena in je potrebno vezje pravilno dimenzionirati, da bo pravilno deloval pod zastavljenimi pogoji.

3.3.2. Moč na tranzistorju

Tudi v tem primeru je moč odvisna tako od napetosti na tranzistorju kot od toka skozenj, le da so tukaj razmere nekoliko drugačne. Stanje prikazuje spodnja slika.



Slika 15: Napetost in tok na tranzistorju

Kot je razvidno iz Slike 15, v primeru ko tok skozi tr. narašča (spodnja črta) napetost na tr. pada (zgornja črta). Od tod sledi, da je v obeh ekstremih (tranzistor popolnoma zaprt in tranzistor popolnoma odprt) moč na tranzistorju enaka 0W, kar pa velja samo teoretično. V praksi tudi, ko je tranzistor popolnoma odprt se na njem nahaja določena minimalna napetost in troši minimalna moč.

Iz omenjenih razlogov je potrebno za ustrezno dimenzioniranje tranzistorja poiskati pri kateri vrednosti napetosti oz. toka se na tranzistorju troši največja moč (najslabši primer) in koliko znaša.

Izračun:

$$u_T(t) = U_{CC} - u_B \cdot \sin(\omega t) = U_{CC} (1 - k) \sin(\omega t)$$

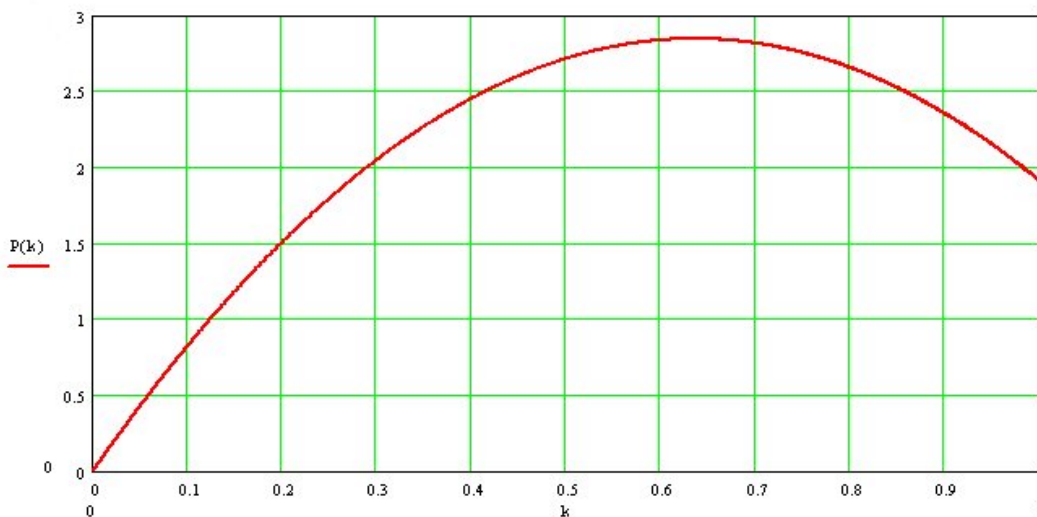
$$k = \frac{u_B}{U_{CC}}$$

$$p(t) = u_T(t) \cdot i_B(t) = U_{CC}^2 \cdot (1 - k \sin(\omega t)) \frac{k \sin(\omega t)}{R_B}$$

$$P(k) = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} p(t) dt$$

$$P'(k) = 0 \Rightarrow k$$

Iz zadnje enačbe dobimo k (faktor izkrmiljenja), pri katerem je potrošnja moči na tranzistorju največja in sicer pri $k=2/\pi$, kar je razvidno tudi iz spodnjega grafa.



Slika 16: Potrošnja moči na tranzistorju v odvisnosti od krmiljenja (k)

Graf je izračunan za napajalno napetost 15V, zato lahko kar iz grafa približno očitamo največjo potrošnja moči na posameznem tranzistorju. Lahko pa jo izračunamo s pomočjo naslednje enačbe, ki jo dobimo, če v zgornjo enačbo za P(k) vstavimo $k=2/\pi$:

$$P_{\max} = \frac{U_{CC}^2}{\pi^2 \cdot R_B} = \frac{(15V)^2}{\pi^2 \cdot 8\Omega} = 2.85W$$

Na tem mestu bi rad poudaril, da sem večino simulacij opravil s programom Spice Opus in uporabil idealizirane elemente oz. nastavil parametre tako, da je bil željen pojav viden. Vsi rezultati niso primerni za realno oceno, so pa zelo koristni za razumevanje delovanja vezija.

3.3.3. Dimenzioniranje hladilnega telesa

Kot posledica potrošnje moči na tranzistorju se tranzistor greje. To toploto je potrebno od tranzistorja odvajati proč, ker v nasprotnem primeru se tranzistor uniči. Potrebno hladilno telo se izračuna iz naslednjih podatkov:

Kataloški podatki:

$R_{JC} = 3.125^{\circ}\text{C}/\text{W}$ (termična upornost med spojem in ohišjem)

$R_{JA} = 62.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ (termična upornost med spojem in okolico)

$T_{\max} = 150^{\circ}\text{C}$ (maksimalna temperatura spoja)

Izberemo:

$T = 30^{\circ}\text{C}$ (temperatura okolice)

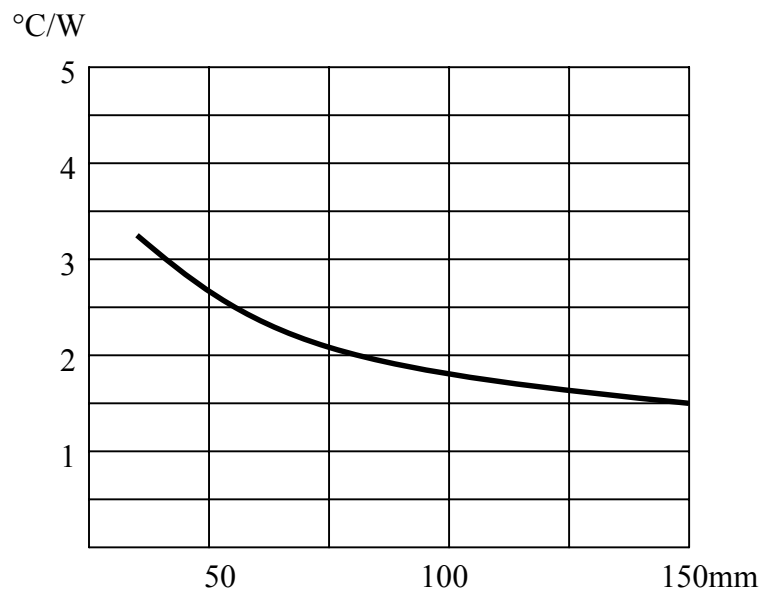
Izračunano iz prejšnje enačbe:

$P_d = 4 \times 3\text{W}$ (disperzijska moč vseh štirih tranzistorjev)

$$R_{HT} = \frac{T_{\max} - T}{P_d} - R_{JC} = \frac{150^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}}{12\text{W}} - 3.125^{\circ}\text{C}/\text{W} = 6.875^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

Od tod sledi potrebna upornost oz. prevodnost dodatnega hladilnega telesa, s pomočjo katere odčitamo iz podanega grafa za posamezno hladilno telo še ustrezne dimenzije telesa.

Primer grafa za izbrano hladilno telo:



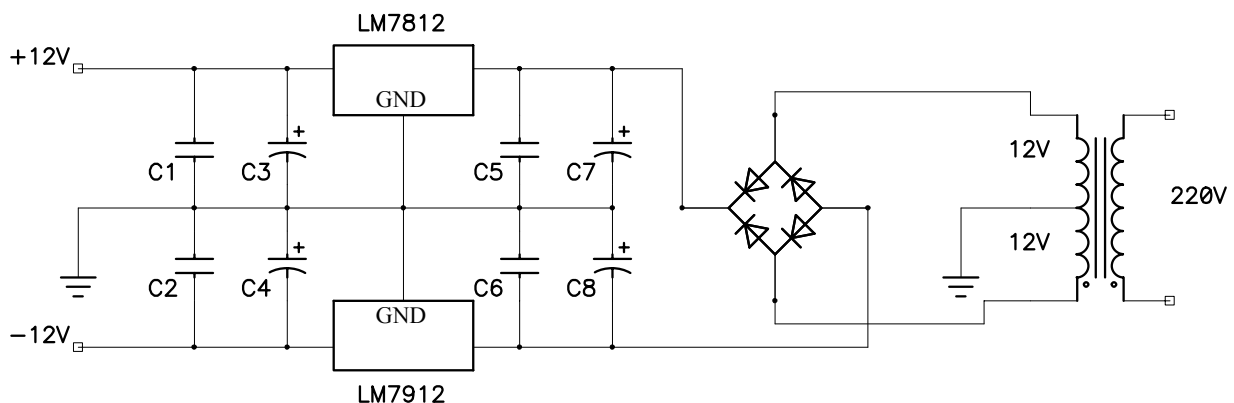
Slika 17: Karakteristika hladilnega telesa

Pri natančnejši izbiri dimenzije hladilnega telesa igrata vlogo še dva faktorja α in β s katerima je potrebno dodatno množiti odčitano dimenzijo:

- $\alpha = 1$ Za vertikalni položaj hladilnih rež
- $\alpha = 1.15$ Za horizontalni položaj hladilnih rež
- $\beta = 1$ Za svetlo površino telesa
- $\beta = 0.85$ Za temno površino telesa

4. Napajalno vezje

V osnovni shemi na prvi strani je napajalno vezje izpuščeno, ker ne igra bistvene vloge za opis in analizo vezja, vendar pa je ključnega pomena za dejansko delovanje. Odločil sem se za varianto narisanano na spodnji sliki.



Slika 18: Blok shema napajalnega vezja

Način delovanja je naslednji: izmenično napetost usmerimo z diodami ter valovitost nekoliko zadržimo s pomočjo kondenzatorjev C5, C6, C7, C8. Dobljeno napetost peljemo na napetostne stabilizatorje LM7812 (stabilizator pozitivne napetosti) in LM7912 (stabilizator negativne napetosti), ki v bistvu odrežeta napetosti, ki so višje od +12V oziroma nižje od -12V. Od tu dalje sta so še kondenzatorji C1, C2, C3, C4, ki še dodatno zgladijo morebitno valovitost tako, da na izhodu dobimo zelo stabilno napetost.

Zelo stabilna napetost je predpogoj predusem za pravilno delovanje op. oj. , kajti kot je zgoraj pokazano na končno – izhodnjo stopnjo ta niti ne upliva toliko.

Vrednosti elementov:

$C1 = 100\text{nF}$

C2 = 100nF
C3 = 1000μF
C4 = 1000μF
C5 = 100nF
C6 = 100nF
C7 = 2200μF
C8 = 2200μF