


Ojačenje in obdelava zvoka

<i>Avdio ojačevalniki</i>		103
<i>Predojlačevalniki v avdio napravah</i>		111
<i>Avdio efekti</i>		121
<i>Echo in vzorčenje</i>		129
<i>Reverb v praksi</i>		135

Avdio ojačevalniki



Zvok lahko ojačimo. K sreči! To lahko praktično zelo dobro preverimo na kakšnem koncertu, ko organizatorji in tonski tehniki na kup zložijo več deset kubičnih metrov zvočnikov, ki jih napajajo z več deset kilovati električne moči. Tako lahko drobčno bitje na odru zabava več tisoč glavo množico poslušalcev na velikem stadionu in vsi doživljajo predstavo tako, kot bi stali pod odrom. Moč lahko enostavno povečajo z dodajanjem zvočnikov in ojačevalnikov.



ELEKTRONIKA ZA ZAČETNIKE



Kvaliteta zvoka in varnost ojačenja (primerljivost z originalnim signalom) vhodnega signala sprem-

da lahko danes poslušamo res dober zvok, se upravičeno sprašujejo: »Zakaj smo se pa potem ves čas toliko trudili?«

Ljata zgodovino ojačevalnikov že od samega začetka. Pretokla sta se prek faz šumenja, prasketanja in pokov ter v zlatem Hi-Fi obdobju (high-fidelity, visoka vernost), sredi 70-tih let prejšnjega stoletja dočakala standardizacijo minimalnih zahtev, ki naj bi jih dober ojačevalnik dosegal. V tem obdobju je moralo biti vse v zvezi z zvokom resnično naj-naj. Uveljavljalo se je prepričanje avdiofilov, da tako pač mora biti, že zaradi občutljivega človekovega sluha, ki takoj zazna vsako nepravilnost. To zaznavanje je še danes predvsem primerjalno in temelji na subjektivnem občutku vsakega posameznika.

V tem tisočletju, ko je vsa ta oprema vrhunske kakovosti dostopna v skoraj mikroskopski izvedbi, pa je mladim čisto dovolj dober že hreščec zvok z zvočnika mobilnega telefona, ki je v monofonski tehniki in ima tako ozko frekvenčno območje kot telefon v času Alexandra Graham-Bella (izumitelj telefona, telefonskega prenosa govora s pomočjo toka, po žicah) ob prijavi patenta marca 1876. Vsi tisti, ki so vse svoje življenje posvetili temu,

Med rokerji se je že od prvih VOX-ovnaprej (ojačevalnik, ki so ga uporabljali Beatli!) tudi pri nas udomačil izraz »feršterker«, kar je slovenska izpeljanka nemškega samostalnika Verstärker, ki pomeni ojačevalnik. Ampak - kako ta reč deluje? Zakaj nastanejo popačenja? Ali bo 100 W ojačevalnik tudi 100-krat močnejši kot 1W? Kako bi lahko takšen ojačevalnik naredili sami v svoji delavnici, priključili nanj mikrofona ali kitaro in s tem vsaj za eno pesem postali zvezda večera? Vabim vas, da si preberete članek in izveste vse to in še kaj več!

PREPROSTO IN KAR SE DA RAZUMLJIVO



izhodni signal, s katerim bi potem krmil-

$$A_U = \frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{\text{Izhodna napetost}}{\text{Vhodna napetost}} = \text{Napetostno ojačenje}$$

$$A_I = \frac{I_{izh}}{I_{vh}} = \frac{\text{Izhodni tok}}{\text{Vhodni tok}} = \text{Tokovno ojačenje}$$

$$A_P = A_U \times A_I = \text{Močnostno ojačenje}$$

Slika 1: Formule za izračun ojačenja

ili zvočnike. Vemo, da imajo zvočniki relativno nizko impedanco (upornost pri izmeničnih frekvencah). To pomeni, da moramo pri ojačevalnikih velikih moči računati z relativno visoko napetostjo in tokom.

Ločimo med ojačevalniki malih signalov in močnostnimi ojačevalniki. Za ojačevalnike malih signalov lahko trdimo, da so napetostni ojačevalniki. Pri njih so pomembne tri glavne značilnosti: vhodna impedanca, izhodna impedanca in ojačenje. Ojačenje je faktor, s katerim ojačevalnik ojači vhodni signal in je razmerje med izhodnim in vhodnim signalom. Poznamo ojačenje napetosti, toka ali močnostno ojačenje, ki je produkt obeh. Vse tri enačbe lahko vidimo na sliki 1. Omeniti moramo še to, da gre tu za izmenične napetosti, tokove in moči (slika 1).

Ojačenje nima enot, ker gre za razmerja, označujemo pa ga s črko A. Močnostno ojačenje ojačevalnika lahko izrazimo tudi v decibelih (dB).

Bel je logaritemska enota z osnovo 10. Ker je sama enota zelo velika vrednost, jo v praksi podajamo v desetinkah osnovne enote, torej v decibelih. Za izražanje ojačenja ojačevalnika v decibelih moramo uporabiti naslednje enačbe:

$$a_U = 20 \log A_U = \text{Napetostno ojačenje}$$

$$a_I = 20 \log A_I = \text{Tokovno ojačenje}$$

$$a_P = 10 \log A_P = \text{Močnostno ojačenje}$$

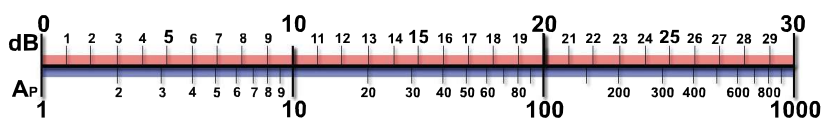
Slika 2: Formule za izračun ojačenja v decibelih.

Pozitivne vrednosti predstavljajo ojačenje, negativne slabljenje ojačevalnika. Tabela 1 prikazuje, kako so razmerja močnostnega ojačanja izražena v decibelih. Če rečemo, da je pri 0 dB ojačenje 1, predstavlja dvakrat večje ojačenje 3 dB in desetkrat večje ojačenje 10 decibelov. Polovica ojačenja pri 0 dB je -3 dB, desetina pa -10 dB.

Faktor moči	Izraženo v decibelih	
1000	+30	OJAČENJE
100	+20	
10	+10	
8	+9	
4	+6	
2	+3	
1	0	SLABLJENJE
1/2	-3	
1/4	-6	
1/8	-9	
1/10	-10	
1/100	-20	
1/1000	-30	

Tabela 1

Če pogledamo še malce naprej in na trak (slika 3), ki prikazuje stopnjo močnostnega ojačenja izraženo v decibelih, pomeni 1000 x večje močnostno ojačenje le 30 dB več! Krivulje odziva človekovega sluha in primerjalne ocene jakosti zvoka v primerjavi z drugo jakostjo si lahko ogledamo na spletu. Krivulje so bile narisane na podlagi statističnih ocen



Slika 3: Trak faktorja ojačenja in ojačenje izraženo v decibelih.

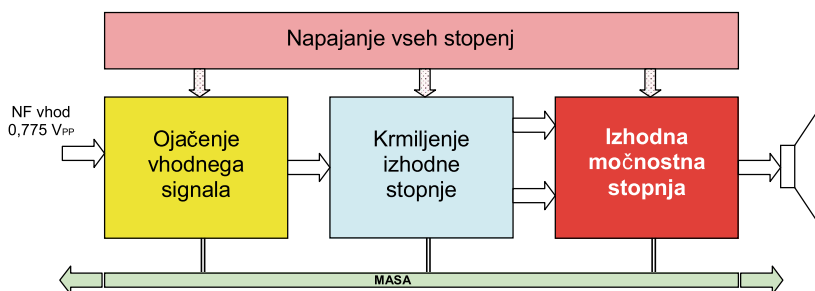
prostovoljcev. Če pustimo hudo teorijo in znanost ob strani, lahko rečemo sledeče: če želimo, da bo zvok slišati dvakrat bolj glasno, moramo povečati močnostno ojačenje za 10 dB. Iz tega sledi, da bomo zvok pri ojačenju 10 W slišali dvakrat močnejše kot pri 1 W in pri ojačenju 100 W dvakrat močnejše kot pri 10 W. Tudi pri ojačenju zvoka s 1000 W občutimo le dvakrat močnejši zvok kot 100 W. Vse to je zelo zanimivo in včasih tudi zapleteno opisano na mnogih internetnih straneh, za vse pa je kriv človeški sluh, ki ima logaritemsko »karakteristiko«. Prav zaradi tega imajo potenciometri za nastavitve glasnosti vedno logaritemsko karakteristiko, ki nam ob spreminjanju daje občutek, da se jakost zvoka spreminja linearno (slika 3).

OJAČEVALNIKI VELIKIH SIGNALOV

Na začetku si vedno želimo idealni močnostni ojačevalnik, ki bi na svojem izhodu lahko dal 100% razpoložljive moči. V principu je ojačevalnik zgrajen tako, kot je prikazano na sliki 4.

Ojačevalnike velikih signalov imenujemo tudi močnostni ojačevalniki. Delimo jih na različne razrede, v odvisnosti od tega, kako je izbrana njihova delovna točka:

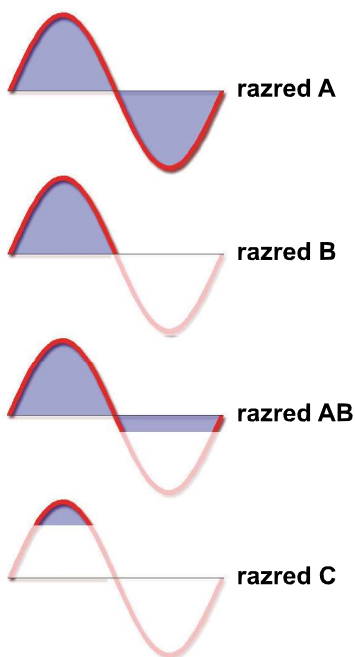
- » **A razred** – izhodni elementi (BJT, FET) prevajajo ves čas, tudi ko ni vhodnega signala. To je najpogostejše uporabljeni ojačevalnik zaradi izredne linearnosti ojačenja. Izkoristek ojačevalnikov v razredu A je pod 40%,
- » **B razred** – izhodni elementi prevajajo le polovico (50%, pol periode) časa, kolikor traja vhodni (izmenični) signal. Kadar ni vhodnega signala, imajo zelo majhno porabo, vendar na žalost tudi velika nelinearna popačenja (popačenja zaradi nelinearne karakteristike polprevodnikov). Izkoristek ojačevalnikov razreda B je okrog 70 %. Če uporabimo Push-Pull izhodno stopnjo, lahko nelinearna popačenja znatno zmanjšamo,
- » **AB razred** – izhodni elementi prevajajo več kot polovico časa (nad 50%), vendar manj kot 100%. Že po imenu vidimo, da so to ojačevalniki, ki so po karakteristikah nekje med razredoma A in B, zato imajo tudi »vmesne« lastnosti: manjšo porabo kot razred A in manjša nelinearna popačenja kot razred B,
- » **C razred** – izhodni elementi prevajajo manj kot polovico časa (pod 50%). Dosežemo lahko izredno visoke izkoristke, vendar je popačenje signala v razredu C ogromno, zaradi tega se uporablja le za ojačenje signalov v radiofrekvenčni tehniki



Slika 4: Blok shema ojačevalnika.

in oddajnikih. V avdio ojačevalnikih se ne uporabljajo,

- » **D razred** – izhodni elementi delujejo v stikalnem načinu, za kar poskrbi kontrolno vezje, ki glede na vhodni signal s pomočjo žagaste napetosti visoke frekvenca (od 300 kHz do 2 MHz!) oblikuje PWM (pulzno-širinsko-moduliran) signal, s katerim vklaplja in izklaplja izhodni komplementarni par. Po filtriranju dobimo signal, ki je po obliki zelo blizu vhodnemu signalu, vendar s popačenji, ki so večja kot pri ojačevalnikih razreda AB. Stopnja izkoristka teh ojačevalnikov je nad 80% , dosežejo pa tudi do 96%! zato so najbolj »varčni« in idealni za prenosne, baterijsko napajane avdio naprave. Visok izkoristek tudi pomeni, da se zelo malo energije porabi za segrevanje, zato pri močeh tja do 10 W praviloma skoraj ne potrebujejo hladilnikov, so zelo majhnih dimenzij in imajo minimalno število dodatnih zunanjih elementov.



Slika 4b: Prevajanje izhodnih tranzistorjev pri različnih razredih ojačevalnikov.

OJAČEVALNIKI RAZREDA A

Ojačevalniki razreda A delujejo v relativno majhnem območju kolektor-

skega toka (pri BJT, pri FET tranzistorjih je to tok drain-source) in skozi nje teče nek konstanten kolektorski tok tudi takrat, ko nanje ni priključen vhodni signal. Njihov izkoristek je v primerjavi z drugimi ojačevalniki slab. Energija, ki se ne pretvori v koristno izmenično napetost (s katero napajamo zvočnike) se bo porabila na tranzistorju in pretvorila v toploto. Vendar pa se ojačevalniki razreda A kljub temu veliko uporabljajo, ker lahko z njimi dosežemo zelo veliko linearnost izhodnega signala glede na vhodni signal. Pri tem celo prednjačijo pred vsemi ostalimi razredi ojačevalnikov in se praviloma uporabljajo povsod tam, kjer je vernost ojačenega signala bolj pomembna, kot energetska učinkovitost ojačevalnika. Najdemo jih najpogosteje v ojačevalnikih majhnih signalov, kjer je linearnost ojačenja bolj pomembna od izkoristka, vendar se zelo pogosto uporabljajo tudi v končnih stopnjah močnostnih ojačevalnikov, kadar potreba po izredno visoki linearnosti ojačenja odtehta toplotne izgube in stroške, povezane s slabim izkoristkom.

Da bi vhodni signal lahko ojačili s čim manj popačenja, je potrebno pri ojačevalnikih v razredu »A« pravilno izbrati delovno točko, ki mora biti blizu sredine delovne premice. Tranzistorji v ojačevalnikih so nelinearni elementi in nepravilna izbira enosmerne delovne točke lahko povzroči nelinearna popačenja izhodnega signala. Popačenja nastanejo tudi ob prevelikem vhodnem signalu, ki ga izhodna stopnja prekomerno ojači, tako da so vrhovi signala odrezani, kar spada med amplitudna popačenja.

Mi se bomo lotili izdelave ojačevalnika v razredu A z MOSFET tranzistorjem. Znanje, ki smo si ga nabrali do sedaj nam bo koristilo pri razumevanju osnovnega principa delovanja ojačevalnikov. Naredili bomo ojačevalnik, na katerem bomo z meritvami lahko dokazali, da posamezne elektronske komponente res delujejo tako, kot smo razložili v teoretičnem delu članka. Ojačevalnik bo kljub svoji enostavnosti odlično deloval, kar smo tudi praktično preizkusili med pisanjem tega prispevka.

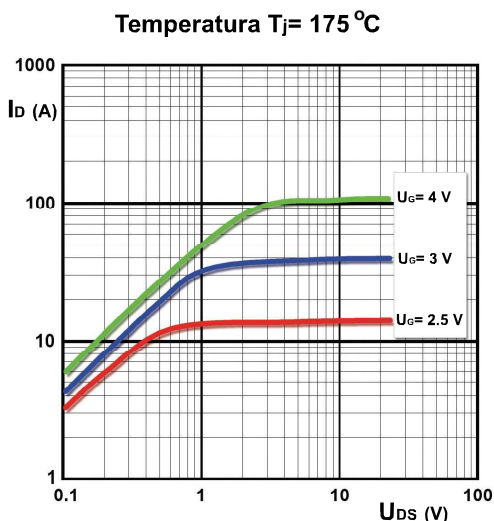
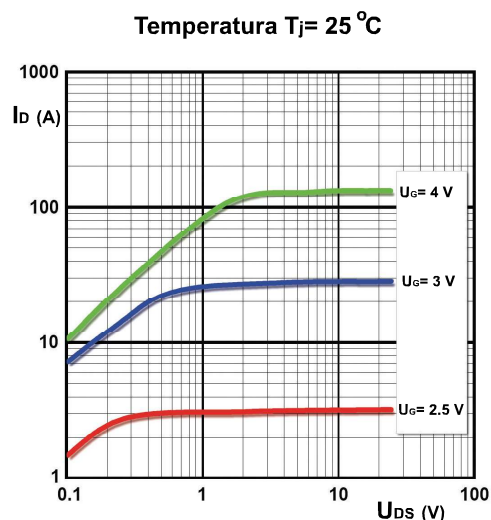
OPIS NALOGE VAJA 1

Osnovna ideja vaje je, da naredimo ojačevalnik v razredu A, ki bo brez popačenja ojačil sinusno napetost na vходу frekvenc od 20 Hz do 20 kHz, če ne bo višja od 0,775 volta od vrha do vrha (0,775 Vpp, peak to peak). Napajanje bo enosmerna napetost 12 V iz akumulatorja. Na izhod bomo priključili zvočnik 8 Ohmov, moči 10 W.

To so bile vhodne zahteve, mi pa smo se odločili, da bomo kot izhodno močnostno komponento uporabili MOSFET tranzistor, kateremu bomo krmilno napetost vrat pripravili z operacijskim ojačevalnikom TL071. Glede na vhodno napetost se bomo odločili za stopnjo ojačenja A, ki ne sme biti prevelika. Če na vходу priključimo sinusen signal velikosti 0,775 Vpp, moramo na izhodu dobiti čim večji nepopačen izhodni signal, s katerim bomo napajali zvočnike. Če napetost razpolovimo, nam ostane po 6 V za posamezen polval signala, ki pa ga žal ne moremo izkoristiti v celoti zaradi nelinearne karakteristike polprevodnikov in padca napetosti na tranzistorju, spet zaradi lastnosti polprevodnikov, da prevajajo, kadar je potencialna razlika na P-N spoju večja od 0,7 V. Krmilna napetost na vratih MOSFET tranzistorja bo enosmerno določena na polovico napajalne napetosti. Te napetosti bomo »prištevali« pozitivne polperiode ojačenega izmeničnega sinusnega signala in »odštevali« negativni del. S tem bomo vplivali na tok skozi upor, na katerem se bo zaradi tega spreminjal tudi padec napetosti, ki bo prek izhodnega kondenzatorja poganjal (izmenični) tok skozi zvočnik. Tako lahko z gotovostjo trdimo, da bo v končni stopnji nepopačeno ojačen le takšen sinusni signal, čigar amplituda ne bo presegala 4,5 V v plus in enako v minus. To je skupaj 9,0 Vpp. Zdaj uporabimo še enačbo ojačenja A, ki smo jo spoznali že pri operacijskih ojačevalnikih.

$$A = \frac{U_{izh}}{U_{vh}} = \frac{9V}{0,775V} = 11,6$$

Formula 1: Izračun potrebnega ojačenja.



Sliki 5 in 6: Odvisnost toka ponora (drain) od temperature T_j (junction, kristal polprevodnika) pri enaki napetosti na vratih

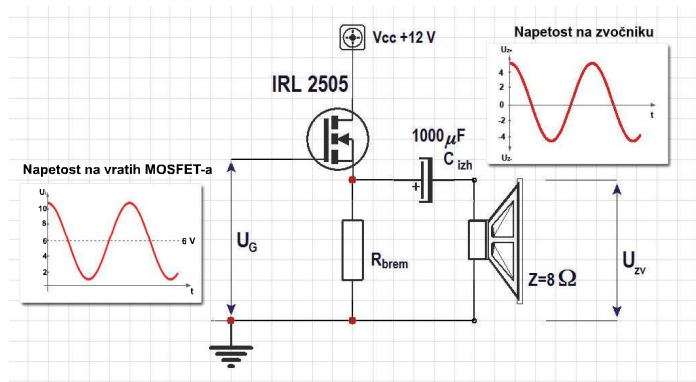
Izračunali smo, da mora biti ojačenje pred-stopnje 11,6. Dovolj je tudi že 11, saj bomo z 11-kratnim ojačenjem vhodnega signala na izhodu dobili napetost 8,50 Vpp. No, razmerje upornosti med povratnim in vhodnim uporom pri operacijskem ojačevalniku bo torej 11:1.

Povedati moramo, da nismo upoštevali nobenih temperaturnih premikov karakteristik MOSFET-a, do katerih prav gotovo prihaja, vendar jih mi pri našem osnovnem spoznavanju elektronike ne bomo upoštevali. Kako na naš MOSFET tranzistor vpliva temperatura, si lah-

ko pogledamo na spodnjih dveh karakteristikah:

Lepo je vidno, da tok od ponora do izvora pri različnih temperaturah tranzistorja nikakor ni enak, ampak nekajkrat naraste. Iz teh karakteristik lahko tudi razberemo, kako pomembno je, da polprevodnike pritrdimo na ustrezno hladilno telo, s katerim mu vzdržujemo neko konstantno delovno temperaturo. V razredu A, kjer so izkoristki resnično slabi, moramo pri 100 W glasbene moči računati še za »ogrevanje« do 700 W in to ne glede na velikost vhodnega signala! Zelo dobro in hitro moramo odvajati tolikšno količino toplotne energije, da tranzistorjem ves čas zagotavljamo neko konstantno tempera-

turo delovanja! Primere izračunov za hladilna telesa lahko najdete na spletu. Z njimi izračunamo potrebno velikost hladilnika glede na količino toplotne energije, ki jo je potrebno odvesti z ohišja polprevodnika. Mimogrede – tudi naš izhodni tranzistor bi bilo dobro pritrditi na kakšno hladilno telo, saj se med delovanjem kar precej segreje! Pri izbiri hladilnika za naš ojačevalnik ne bomo piko洛夫ski in razpredali celotne teorije, ampak bomo uporabili takšen hladilnik, ki ga imamo trenutno pri roki. Karkoli je bolje kot nič, uporabimo pa lahko karkoli aluminijastega, kotnike, ravne profile, pločevino ali celo stare karnise!



Slika 7: Končna stopnja našega ojačevalnika z izrisanim vhodnim in izhodnim signalom.

Elektronikov domišljija ne omejuje! Prav gotovo boste lahko tudi med odsluženo računalniško »ropotijo« našli kaj primerne (napajalnik!).

Da bo delovanje ojačevalnika še malo bolj jasno, bomo to poskusili grafično ilustrirati na sliki 7. V tem primeru bomo obravnavali le končno stopnjo ojačevalnika.

Kadar ni vhodnega signala, je na vratih tranzistorja polovico napajalne napetosti, $V_{CC}/2$ ali 6 V v našem primeru. Ta napetost povzroči nek stalen tok skozi tranzistor, ki je omejen z uporom R_{brem} , na katerem zaradi tega toka nastane padec napetosti, ki je tudi nekje blizu polovice napajalne napetosti. Ker na vходу ni izmeničnega signala, tudi ni izmenične komponente napetosti in skozi serijsko vezan kondenzator in zvočnik ne steče nikakršen tok, s katerim bi ga krmilili.

Ko na vhod priključimo izmenični signal ustrezne amplitude, bo velikost toka skozi upor odvisna od napetosti na vratih. Manjša napetost bo povzročila manjši tok. Manjši tok bo povzročil manjši padec napetosti na upor in večji padec napetosti bo ostal na tranzistorju med priključkoma D in S, ki deluje kot spremenljiv upor (transfer-resistor). Ker napetost za krmiljenje zvočnikov jemljemo iz upora R_{brem} , je za nas ta padec napetosti seveda pomemben. Izmenična komponenta napetosti na tem uporu prek izhodnega kondenzatorja požene tok skozi tuljavico zvočnika, kjer se pretvori v nihanje

membrane zvočnika. Če bi zvočnik povezali brez kondenzatorja, bi skozi tuljavico membrane ves čas tekla nek enosmerni tok (odvisno od impedanace zvočnika - porabnika, njegove ohmske upornosti) ki bi povzročil, da bi bila membrana ves čas izven svojega ravnovesja. Ob dodatnem vzbujanju s tokom iste smeri bi se »hotela« odkloniti še bolj, vendar bi prišlo do fizične omejitve gibanja (ker bi bila že skoraj v skrajni legi), zato bi bil zvok popačen. Impedanca zvočnika bi kot breme za enosmerni tok nastopala le s svojo ohmsko upornostjo, ki je znatno nižja od nazivne impedanace zvočnika. To bi povzročilo velik tok skozi tuljavico membrane, ki bi se zaradi tega začela prekomerno segrevati in bi se po določenem času tudi trajno mehansko deformirala. Vrednost izhodnega kondenzatorja je odvisna od impedanace priključenega zvočnika in želene mejne frekvence, ki jo izračunamo po formuli:

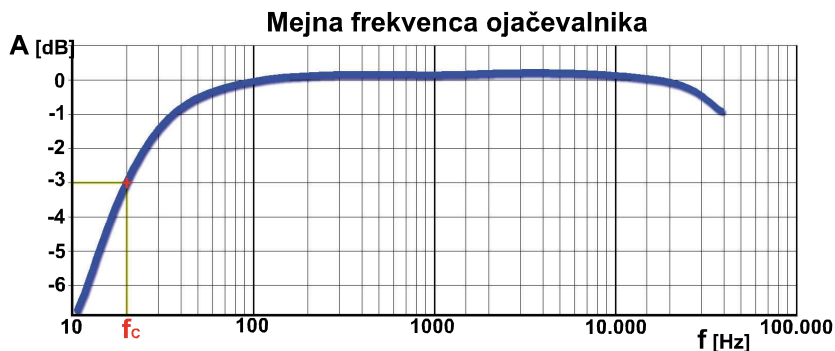
$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times C_{OUT} \times R_{LOAD}} ;$$

$$C_{OUT} = \frac{1}{2 \times \pi \times f_c \times R_{LOAD}}$$

Formula 2: Izračun mejne frekvence in izhodnega kondenzatorja.

Če vstavimo za kapacitivnost $C_{OUT} = 1000 \mu\text{F}$ in upornost $R_{LOAD} = 8 \text{ ohm}$, bo mejna frekvenca (corner frequency) 19,90 Hz, kar je zelo dobro tudi kar se tiče najnižjih frekvenc. Pri $R_{LOAD} = 4 \text{ ohm}$ bo izračunana frekvenca 39,80 Hz, kar je dosti slabše in bi morali za enake rezultate vzeti kondenzator vrednosti 2000 μF .

V tej enačbi je f_c mejna frekvenca (cut-off), kjer na nizkih frekvencah signal pade (oslabi, slabljenje) na -3 dB, kar je polovica tistega pri 0 dB. R_{LOAD} je impedanca priključenega zvočnika, C_{OUT} pa kapacitivnost izhodnega kondenzatorja. Dovolj nizko postavljena mejna frekvenca je zelo pomembna za verno ojačenje vhodnega signala predvsem na nizkih frekvencah (basih), saj smo se že na začetku seznanili z dejstvom, da je slabljenje -3 dB pravzaprav polovico



Slika 8: Krivulja slabljenja signala zaradi izhodnega kondenzatorja na 8 ohmskem zvočniku.

manjše močnostno ojačenje kot pri 0 dB.

Tipična karakteristika ojačenja ojačevalnika v celotnem (slišnem, audio) frekvenčnem območju je prikazana na sliki 8.

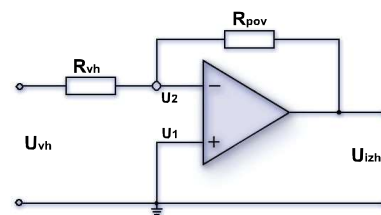
Ojačevalniki razreda A so znani po neprijetnem pojavu ob vklopu napajanja, ko se mora kondenzator v trenutku napolniti na polovično napajalno napetost. To povzroči neprijeten pok, ki pri večjih izhodnih močeh istočasno predstavlja tudi nevarnost za sluh in okvaro priključenih zvočnikov, zato se poskušamo pri konstrukciji temu izogniti na različne načine, na primer tudi z zakasnjениm vklopom zvočnikov.

Na sliki 9a je za boljše razumevanje delovanja celotnega ojačevalnika prikazan zvočnik v prerezu, s katerim bomo poenostavljeno razložili njegovo delovanje.

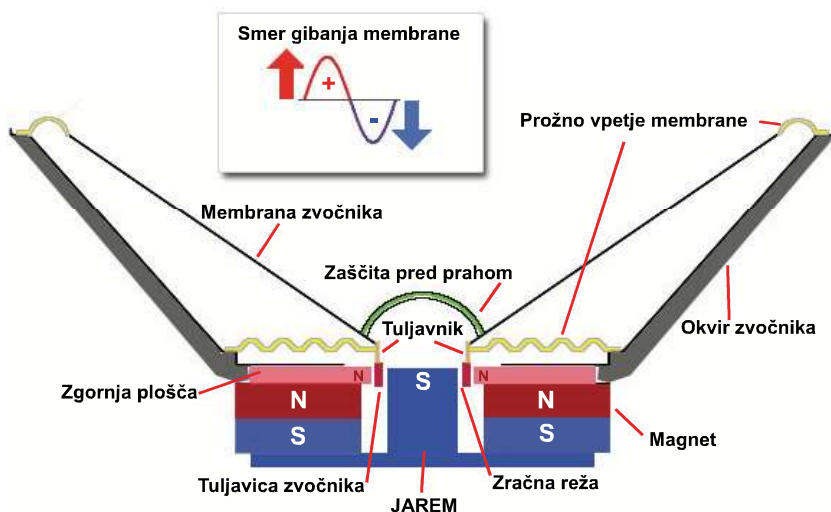
Membrana zvočnika je prožno vpeta na okvir s čimer je omejeno tudi njeno gibanje le v smereh naprej in nazaj. Na vrhu stožca membrane je pritrjen tuljavnik, na katerega je navita tuljavica zvočnika. Ta sega v močno magnetno polje z zgoščenimi silnicami, ki se zaradi trajnega magnetna vzpostavi med zgornjo ploščo in jarmom trajnega magnetna. Kadar skozi navitje ne teče tok, je tuljavica v ravnovesni legi vseh sil prožnega vpetja. Te sile so določene s konstrukcijo in izbiro materiala. Fizično naj bi to pomenilo, da je navitje tuljavice točno na sredini zračne reže v smeri gibanja in enako oddaljena od

jarma in zgornje plošče. V odvisnosti od tega, kakšne smeri je tok skozi tuljavico, se bo tuljavica »želela izmakniti« močnemu magnetnemu polju v zračni reži, ki seka njeno lastno magnetno polje (ki se ustvari okrog žice vsakega posameznega ovoja tuljavice) proti zunanosti ali notranosti. Ko se pri tem »izmiknanju« toliko umakne, da se obe polji (lastno magnetno polje in magnetno polje v zračni reži) izenačita, se gibanje tuljavice ustavi. Ker je zvočnik krmiljen z izmeničnim tokom, se ta proces dogaja ves čas in v obe smeri. Z večjim tokom vzbujamo tuljavico, večji bodo odkloni tuljavice iz ravnovesne lege in večja bo amplituda gibanja membrane, na katerega je tuljavica pritrjena. Tega, da bo zvočnik tudi močnejše »tulil«, sploh ne bom omenjal!

No, doslej smo govorili bolj o končni močnostni stopnji in o porabniku, oziroma »pretvorniku« električne energije v magnetno, magnetne v kinetično in kinetične energije v zvok. Zdi se mi, da smo se s teorijo prebili tako daleč, da lahko vsemu skupaj dodamo le še invertirajoči ojačevalnik z ojačenjem 11, pa smo končali!



Slika 9: Neinvertirajoči ojačevalnik.

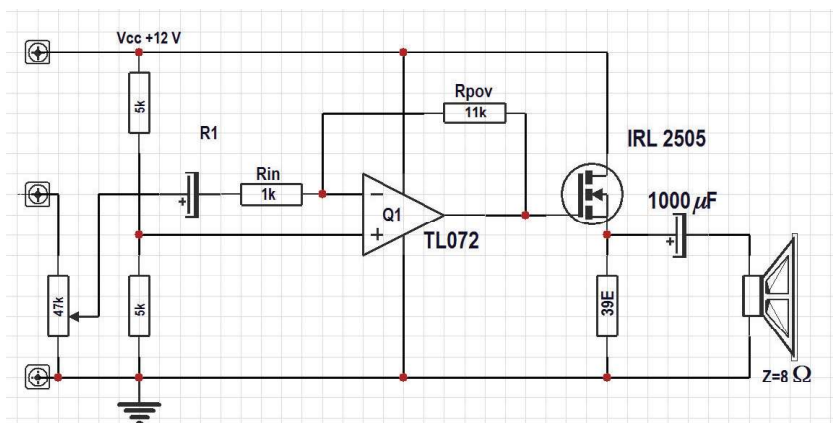


Slika 9a: Prerez in delovanje zvočnika.

Z operacijskim ojačevalnikom bi bil ta ojačevalnik približno takšen, kot kaže slika 9.

Napetost na »+« neinvertirajočem vhodu bomo z delilnikom nastavili na polovico napajalne napetosti, kar bo za operacijski ojačevalnik »masa«. Vse napetosti nad in pod to vrednostjo bodo (invertirano) ojačene s faktorjem ojačenja A. Ob amplitudi vhodnega signala +/- 0,387 V ali 0,775 Vpp bomo dobili ravno dovolj velik nepopačen signal za krmiljenje izhodnega MOSFET tranzistorja. Vezni elektrolitski kondenzatorji 10 uF med stopnjami poskrbijo za to, da se na naslednjo stopnjo prenese le izmenični signal, brez enosmerne prednapetosti.

Na takšen ojačevalnik lahko priključimo MP3 predvajalnik, mobilni telefon z izhodom za slušalke (ki ima prav gotovo vgrajen tudi MP3 predvajalnik) izhod za slušalke iz računalnika, izhod CD predvajalnika na računalniku in tako naprej. Vsekakor potrebujemo kar precejšen vhodni signal, da lahko uživamo v delovanju svojega prvega ojačevalnika! Mikrofon sam po sebi ne more proizvesti tako visokega signala (največ 1-2 mVpp), zato bomo za priključitev mikrofona izdelali še predojačevalnik z vhodnim potenciometrom. Z njim bomo lahko spreminjali razmerje med nivojem vhodnega signala in tistim, ki ga bomo res (brez popačenja) ojačili. To bomo lahko izkoristili tudi kot preprost rokerski kitarski efekt (distor-



Shema 1: Ojačevalnik z operacijskim ojačevalnikom in MOSFET tranzistorjem v razredu A.

sion), ki bo vhodni signal s kitare zaradi prevelikega vhodnega signala že v predojačevalniku tako močno popačil, da nam bo to morda celo všeč! To pa je že druga skrajnost »dobrega« zvoka: doseči visoko kvaliteto kontroliranega frekvenčnega, amplitudnega ali faznega popačenja vhodnega signala z namenom doseči posebne, za uho ugodne zvočne učinke! Glej shemo 2.

Predojačevalnik je neinvertirajoč, z vhodno impedanco 23,5 k. Skupno ojačenje te vrste ojačevalnika je določeno z razmerjem med uporoma R2 in R1 po formuli 3.

$$A_U = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) + 1 = \left(\frac{22k}{1k}\right) + 1 = 23$$

Formula 3: Izračun napetostnega ojačenja.

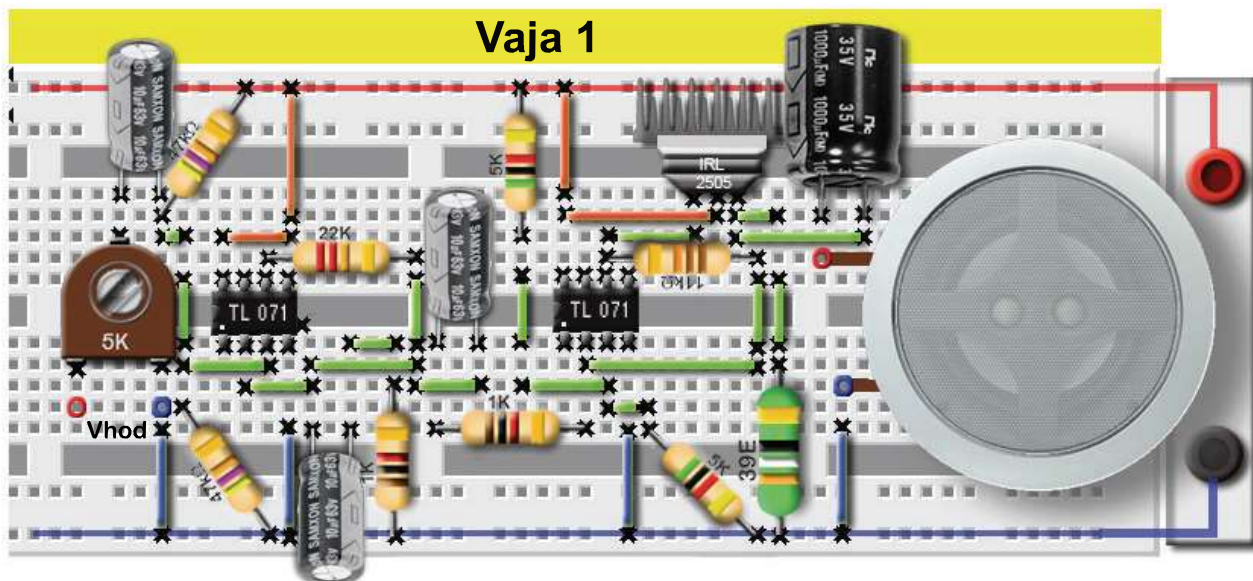
Če uporabimo v shemi narisane vrednosti uporov R2 in R1, bo napetostno ojačenje našega mikrofonskega predojačevalnika okrog 23. Ob amplitudi vhodnega signala z mikrofona od 2 do 5 mVPP bomo dobili na izhodu predojačevalnika nekeje od 50 do 120 mVPP. To je zelo majhen signal glede na to, kako smo dimenzionirali vhod krmiljenja končne stopnje (0,775 VPP), zato morda govora prek mikrofona ne bo slišati dovolj glasno. Če smo v članku spoznali osnovni princip delovanja ojačevalnika, nam bo preprosto dodati še eno vmesno stopnjo z ojačenjem od 5 do 10. S tem bomo dvignili nivo signala z mikrofona na najvišjo dovoljeno amplitudo, ki se še lahko ojači brez popačenja. Z izbiro primernega mikrofona si ne delajte prevelikih skrbi! V uredništvu smo na prototipu ojačevalnika uporabili kar mikrofon, ki ga običajno skupaj s slušalkami uporabljamo na računalniku (multimedija).

ZAVIHAJMO ROKAVE



Na prototipni ploščici bomo najprej sestavili predojačevalnik, potem pa mu dodali še

ojačevalnik s končno stopnjo. Izhodni vezni kondenzator mikrofonskega



Slika 10: Ojačevalnik na prototipni plošči.

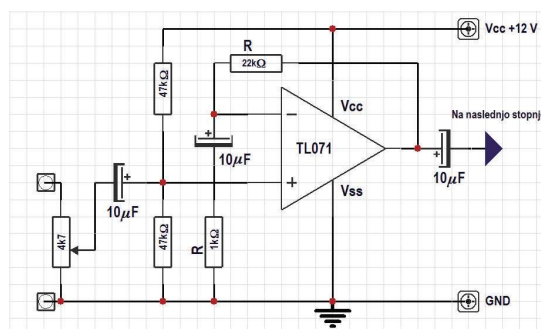
predojačevalnika je obenem tudi vhodni naslednje stopnje (ojačevalnika), zato ga tam ne bomo uporabili. Paziti moramo na polariteto elektrolitskih kondenzatorjev! Če nismo prepričani, kako ga obrniti, izmerimo polariteto z enosmernim voltmetrom: kjer je na priključkih kondenzatorja bolj pozitiven potencial, mora biti »+« priključek. Opozorjam, da gre včasih lahko za zelo majhne razlike v napetostnih potencialih in se zato raje dvakrat prepričajmo!

Končno stopnjo smo »naštudirali v nulo«, zato pri tem ne bi smelo biti težav. Opozorjam, da je poraba ojačevalnika dokaj velika in da bo akumulator ob neprekinjeni uporabi kmalu prazen. Poskusite lahko uporabiti različne izhodne kondenzatorje in opazili boste razliko pri ojačenju nizkih tonov - basov. Namesto 5k uporov lahko za ustvarjanje »mase« uporabite trimerpotenciometer 10k. Oba končna

priključka povežete na napajanje, srednji odcep pa priključite na »+« vhod TL071 (nogica 3). Z vrtenjem trimerja bomo spreminjali razmerje uporov, proti VCC in proti GND. S trimerjem bomo lahko »premikali« maso med 0 in 12 V in poskusili »na uho« oceniti, kdaj je signal na zvočniku najmanj popačen. Če bomo izmerili, na kakšnem napetostnem potencialu je v tistem trenutku »+« vhod TL071, bo to gotovo v okolici 6,00 V!

ZAKLJUČEK

V članku smo vam predstavili čisto resni močnostni ojačevalnik, ki je enostaven za izdelavo, pa vendarle zelo spodobno krmili zvočnike (in zaradi svoje glas-



Shema 2: Mikrofonski predojačevalnik.

nosti kravžlja živce staršem). Predstavili smo tudi ustrezen predojačevalnik. Kombinacija obeh je osnova vsakega ojačevalnika - instrumentalnega ali tistega, ki je namenjen ojačenju signala iz različnih predvajalnikov, od gramofona (kaj je že to?) do magnetofona(?), predvajalnika CD plošč ali predvajalnika MP3 datotek.