

# PRIMERJAVA TONSKIH PREDOJAČEVALNIH STOPENJ S POLPREVODNIŠKIMA TRANZISTORJEMA IN ELEKTRONKO

Rudolf Babič, Davorin Osebik

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko računalništvo in informatiko,  
Maribor, Slovenija

**Ključne besede:** ojačevalniki, tonski predojačevalniki, frekvenčni spekter, harmonska popačenja, bipolarni tranzistor, tranzistor na poljski učinek, vakuumaska elektronka

**Izvleček:** V tem članku bomo skušali pojasniti dileme, ki se pri glasbenikih, predvsem kitaristih, pojavljajo v zvezi z izbiro ojačevalnikov oziroma ojačevalnih elementov za tonske predojačevalne stopnje. Predvsem je zanimiva primerjava med aktualnimi polprevodniškimi tranzistorji, bipolarnimi in tranzistorji na poljski učinek ter še vedno prisotno elektronko. Osvečili jo bomo s stališča izmerjenih frekvenčnih spektrov in harmonskih popačenj posameznih ojačevalnih stopenj, da bi s tem nekako potrdili slišne razlike med posameznimi skupinami ojačevalnih elementov. Z merilno opremo, ki smo jo aparaturno sestavili na osnovi osebnega računalnika z zvočno kartico, programsko pa nadgradili s programskim paketom MATLAB, smo potrdili, da se razlike v slišnih lastnostih signala na izhodu posameznih ojačevalnih elementov pokažejo predvsem pri prekrmljenem delovanju ojačevalne stopnje. Od majhnih, vendar že lepo opaznih razlik v obliki izhodnega frekvenčnega spektra, ki smo jih zasledili že pri majhnih vrednostih skupnih harmonskih popačenj, ki so bila glede na uporabljen ojačevalni element različna z vrednostmi od 1 do 5 odstotkov pri istem vhodnem signalu 50 mV, je postala vsebnost višjih harmonskih komponent v izhodnem signalu ojačevalne stopnje pri 20 odstotni vrednosti skupnih harmonskih popačenj pri elektronki bistveno drugačna od tiste pri vezju z bipolarnim oziroma vezju s tranzistorjem na poljski učinek. Vsebinska višjih harmonskih komponent pa skupaj z osnovno harmonsko komponento določa sonorne lastnosti signala in s tem tudi slišne razlike. S tem lahko tudi potrdimo, da je prisotna tesna povezava med električnimi popačenji in zvočno barvitostjo.

## The Comparison of Audio Preamplicifier Circuits with Solid State Transistors and Vacuum Tube

**Key words:** amplifiers, audio preamplifiers, frequency spectrum, harmonic distortions, bipolar junction transistor, field effect transistor, vacuum tube

**Abstract:** In this article the answer for dilemma which appear, especially between musicians, about the questions what amplifying device is appropriate for audio preamplifier circuits is presented. For this purpose the comparison is made between actual solid state transistors, bipolar junction transistor and field effect transistor versus vacuum tube. The tested preamplifier circuits with component specifications are shown on fig. 4. Although solid state technology overwhelmingly dominates today's world of electronics, vacuum tubes are holding out the small but vibrant area in the creation and reproduction of music. The music is played to be heard by human beings, whose nonlinear ear-brain hearing system are far from fully understood. Since no one knows exactly how to model the human auditory system, no one knows exactly what engineering measurements are appropriate to evaluate the performance of audio equipment. We know that some number of people prefer the sound produced by tube equipments which are found in musical instrument amplifiers (mainly guitar amplifiers), some processing devices used in recording studios and in high-fidelity audio equipments.

Some of the differences in the audio qualities between tubes and transistors have to do with the inherent physical properties of the devices and with the circuit topologies and what components are used with each type of the device. We know already that vacuum tubes have lower total harmonic distortions than bipolar transistor or field effect transistors. The clipping characteristic of tubes are softer, but not too much softer than those of transistors. The feedback is one more thing which tends to make square wave form of the output signal. Thus, the heavy feedback in most solid state designs gives them also worse overload performance.

The differences between transistor sound and vacuum tube sound are highlighted thru the frequency spectrum and total harmonic distortion (THD) measurements. We can confirm that differences exist. We made the personal computer based hardware measurement system with MATLAB package for software support. In fig. 1 the block diagram of proposed measurement system is shown. At the input the first block is source of the corresponding input signal, with white noise data base with 1024 samples for calibration and with harmonic signal data base with frequency of 440 Hz. The second block is PC sound card with D/A conversion. The tested amplifier circuit is connected to the measurement system with input and output attenuation circuit. At the output two blocks with PC sound card with A/D data conversion serve as data acquisition structure. The results of frequency spectrum and their graphs are obtained with MATLAB software tool. With our investigations we can confirm, that there is a close parallel here between electronic distortion and musical tone coloration. The frequency of 440 Hz is chosen, because it is typical guitar signal. We observed that the visible differences between both transistors and the tube are present only at severely overloaded signals. At 50 mV typical guitar transducer output signal total harmonic distortion of 1 % for tube amplifier, 1,8% for field effect transistor amplifier and 4,9 % for bipolar transistor amplifier are obtained. The differences of the output frequency spectrum are small but noticeable, these graphs are shown in fig. 5, 6 and 7 and the amplitude values of higher harmonic components are summarized in the table 2. When the higher harmonic distortions, for example THD=20% for crunch sound is applied, the content of higher harmonic components and their amplitudes significantly differ for our preamplifiers. These results are shown in the fig. 9, 10, 11 and are summarized in the table 4. We can see, that the tube has at the same THD the least possible amplitude values of higher harmonic components. This means especially for third harmonic component, which gives to semiconductor preamplifiers a metallic quality of sound. With comparison to all high harmonic components, the main emphasis of tube amplifier is on the second harmonic component. This is also one of the main reasons for sonorous sound of vacuum tube.

## 1 Uvod

Razprave o kvaliteti reprodukcije zvoka so že od nekdaj vroča tema inženirjev, uporabnikov ter kritikov /1/. Ocene uporabnikov temeljijo zgolj na osebnih izkušnjah in so subjektivne narave. Razmere na trgu pa dejansko kažejo, da je priljubljenost in prodaja ojačevalnikov na elektronke, posebej za kitare, velika, saj se s tem ukvarja kar nekaj podjetij. Zakaj torej polprevodniška tehnologija, ki sicer prevladuje v svetu elektronike, na tem segmentu ni izpodrinila elektronke in ali je mogoče med subjektivnimi ocenami uporabnikov in tehničnimi lastnostmi najti soglasje, sta vprašanji na kateri smo skušali poiskati odgovor. Ker se glasba ustvarja in predvaja za poslušalce in ker še vedno ne poznamo do potankosti modela človekovega slušnega sistema, tudi ne vemo natančno, katere inženirske meritve bi omogočale določitev lastnosti takšnih naprav. Vemo pa, da določena skupina poslušalcev raje posluša zvok tonskih naprav z elektronkami, naj gre za glasbene ojačevalnike, najpogosteje so to spet ojačevalniki za kitaro, studijske snemalne naprave ali preprosto kvalitetne splošne tonske naprave. Razlogi so subjektivne in objektivne narave. Nekatere razlike v kvaliteti zvoka so prav gotovo v fizikalnih razlikah med polprevodniškimi tranzistorji in elektronko ter topologijo ojačevalnega vezja. V splošnem vemo, da imajo polprevodniški ojačevalni elementi številne prednosti, zaradi katerih so v preteklosti v kratkem času na večini področjih izpodrinili elektronke. Prednosti so nesporno v manjših dimenzijah, nižjih delovnih napetostih, cenenosti, dolgi življenjski dobi, višji zgornji frekvenčni meji, skoraj neomejenih možnostih integracije in izdelavi mikroelektronskih vezij. Ostajajo pa še vedno nekatere prednosti elektronk, ki so prisotne prav na tistih področjih kjer so znane slabosti tranzistorjev: temperaturna stabilnost, toplotna obremenitev, odpornost na preobremenitve, manjše tolerance električnih karakteristik, večje dinamično področje, doseganje večjih moči, preprostejša vezja in manjša popačenja. Kako se nekatere od teh prednosti odražajo na slušnih lastnostih, bomo skušali v nadaljevanju ugotoviti s podrobnejšo analizo harmonskih popačenj pri ojačevalnem vezju z bipolarnim tranzistorjem, s tranzistorjem na poljski učinek in z elektronko.

## 2 Merilni sistem

Za izvajanje meritev harmonskih popačenj in analize frekvenčnih spektrov, s katerimi bi zasledili razlike med posameznimi ojačevalnimi elementi, smo zasnovali in izdelali računalniško podprti merilni sistem /2/, ki smo ga

nadgradili s programskim paketom MATLAB. Blokovno shemo aparaturnega dela merilnega sistema prikazuje slika 1.

Analogni vhodni signal smo z D/A pretvornikom na zvočni kartici osebnega računalnika generirali na osnovi vnaprej pripravljene datoteke vhodnega signala. Na izhodni strani pa smo z A/D pretvornikom na zvočni kartici poskrbeli za zajemanje signala za končno obdelavo s programskim paketom MATLAB. Uporaba zasnovanega sistema je omogočila enostavno računalniško podprto meritev in izračun frekvenčnih spektrov posameznih ojačevalnih vezij. Dosegli smo tudi visoko stopnjo ponovljivosti in primerljivosti rezultatov, saj so bili generirani vzbujevalni signali enaki pri vseh meritvah. Zaradi merjenja frekvenčnih spektrov ojačevalnih vezij z elektronko, tranzistorjem na poljski učinek in bipolarnim tranzistorjem, ki so med seboj zelo različna, smo v merilno progo vključili še dve stabilni vezji  $a_1$  in  $a_2$ , ki služita za prilagoditev posameznega ojačevalnega vezja in za pomenotenje merilnih rezultatov.

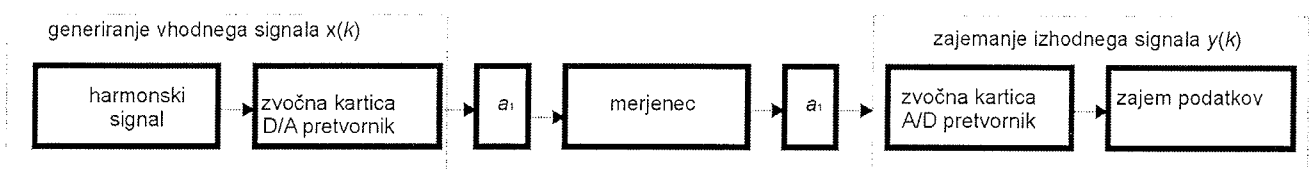
Pred izvedbo meritev ojačevalnih vezij smo merilni sistem umerili z neharmoničnim signalom belega šuma /3/. Signal belega šuma smo generirali na osnovi predhodno pripravljenih vzorcev, ki smo jih izračunali s programskim paketom MATLAB. Beli šum ima konstantno gostoto spektra moči  $P_x$ , ki omogoča enostavno meritev amplitudne in fazne karakteristike vezij s pomočjo hitre Fourierjeve transformacije izhodnega signala. Osnovne statistične podatke belega šuma za 1024 vzorcev v periodi podaja tabela 1.

Tabela 1: Osnovni statistični podatki signala belega šuma s 1024 vzorci

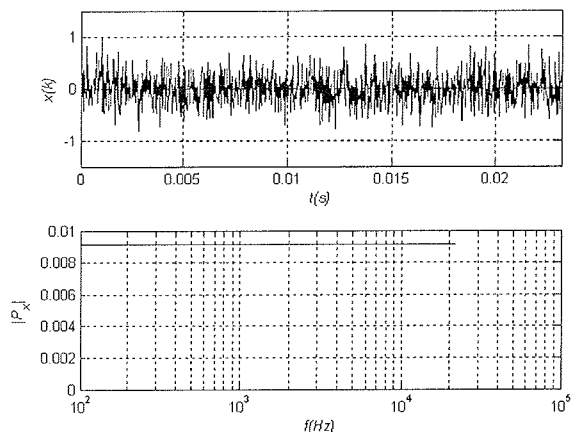
Table 1: Basic statistical data for 1024 samples white noise

Število vzorcev	1024
$\bar{x}$	$6.1096 \cdot 10^{-14}$
$\sigma$	$2.9127 \cdot 10^{-01}$
$x_{\max}$	1.0000
$x_{\min}$	$-8.1697 \cdot 10^{-01}$
$P_x$	$9.099010^{-03}$

Srednja vrednost  $\bar{x}$  belega šuma gre proti vrednosti nič, amplitudne vrednosti pa so enakomerno razporejene med minimalno  $x_{\min}$  in maksimalno  $x_{\max}$  vrednost. Časovni potek  $x(k)$  in spekter moči  $|P_x(j\omega)|$  prikazuje slika 2.



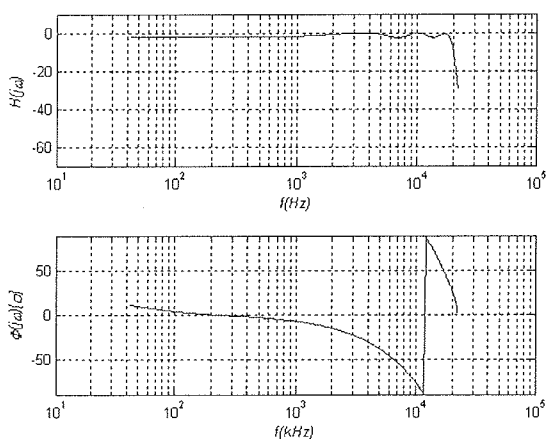
Slika 1: Blokovna shema merilnega sistema za določitev frekvenčnega spektra  
Fig. 1: Block diagram of the frequency spectrum measurement system



Slika 2: Časovni potek signala belega šuma  $x(k)$  in spekter moči  $|P_x(j\omega)|$

Fig. 2: The time response of white noise signal  $x(k)$  and his power spectrum  $|P_x(j\omega)|$

Pri umerjanju smo izhod zvočne kartice osebnega računalnika neposredno povezali z vhodom zvočne kartice in za vhodni signal uporabili vnaprej pripravljeno datoteko 1024 vzorcev belega šuma v eni periodi. Analogno obliko signala belega šuma na vhodu smo najprej generirali z D/A pretvornikom zvočne kartice, potem pa smo ga na izhodu zajemali in vzorčili z A/D pretvornikom iste zvočne kartice, ga pretvorili v digitalno obliko in ga shranili v izhodno datoteko tipa 'wav'. V skriptnem jeziku programskega paketa MATLAB smo s pomočjo hitre Fourierjeve transformacije napisali program za izračun frekvenčnega odziva in s tem za analizo ustreznosti odziva merilnega sistema. Rezultate amplitudnega in faznega frekvenčnega odziva merilne sistema na beli šum prikazuje slika 3.



Slika 3: Amplitudni in fazni frekvenčni odziv merilnega sistema

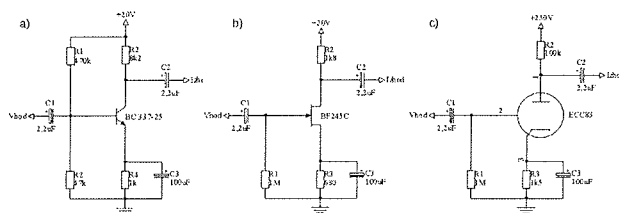
Fig. 3: The amplitude and phase frequency response of measurement system

Iz prikazanega amplitudnega in faznega frekvenčnega odziva merilne proge vidimo, da je amplitudna frekvenčna odvisnost praktično konstantna v področju od 40Hz do 20kHz, zato pa je fazna frekvenčna odvisnost v tem področju precej

nelinearna. Ker pa smo meritve izvajali v frekvenčnem območju od 400 Hz do 3500 Hz, omenjena nelinearnost ni bistveno vplivala na naše merilne rezultate.

### 3 Rezultati

Za analizo popačenj smo izdelali posamezne ojačevalne stopnje, ki so prikazane na sliki 4: predojačevalno vezje z bipolarnim tranzistorjem BC 337 je na sliki 4a, vezje s tranzistorjem na poljski učinek BF 245C na sliki 4b in vezje z elektronko ECC 83 na sliki 4c. Prikazane so tipične konfiguracije vezij z delovanjem ojačevalnega elementa v A razredu, brez negativne povratne vezave in z vrednostmi elementov, ki jih najpogosteje zasledimo pri proizvajalčevih aplikacijah za predojačevalnike. Pri bipolarnem tranzistorju smo uporabili orientacijo s skupnim emitorjem, pri FET tranzistorju orientacijo s skupnim virom in pri predojačevalniku z elektronko orientacijo s skupno katodo. Za gretje triode smo uporabili 12V enosmerno napetost.



Slika 4: Vezja predojačevalnikov: z bipolarnim tranzistorjem (a), s tranzistorjem na poljski učinek (b) in z elektronko (c)

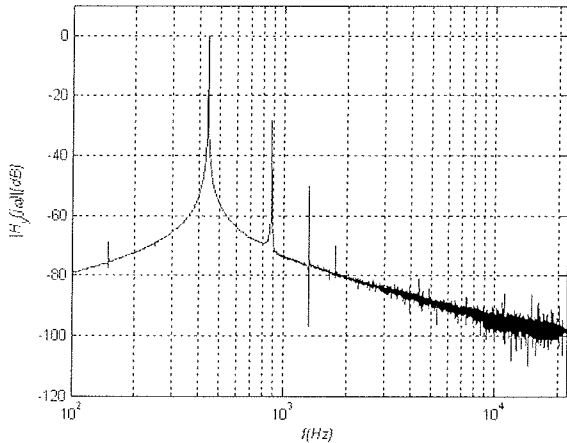
Fig. 4: Preamplifier circuits with: bipolar junction transistor (a), field effect transistor (b) and vacuum tube (c)

Ker so ojačenja posameznih ojačevalnih stopenj med seboj različna, smo za lažjo primerjavo frekvenčnih spektrov s prilagodilno stopnjo  $a_2$  nastavili izhodni nivo signala na 0dB.

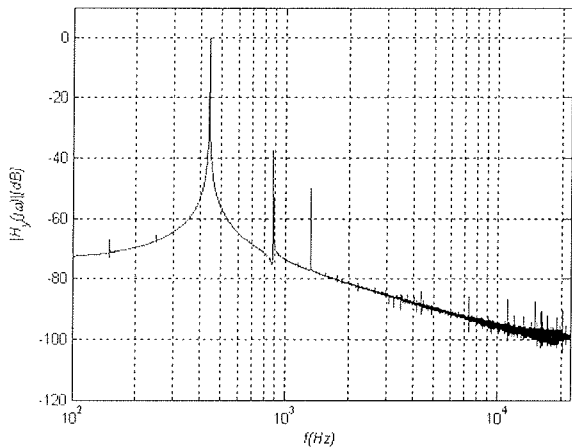
#### 3.1 Meritve v linearnem režimu delovanja

Pri meritvi frekvenčnega spektra izhodnega signala smo za testni signal uporabili harmonski signal s frekvenco 440 Hz. Uporabljena frekvenca predstavlja reprezentativen ton električne kitare. Amplituda vhodnega signala je znašala 50mV, kar ustreza običajni vrednosti enojnega tonskega odjemnika pri električni kitari. S takšnim krmilnim signalom smo predpostavili delovanje ojačevalnih stopenj v linearnem režimu delovanja.

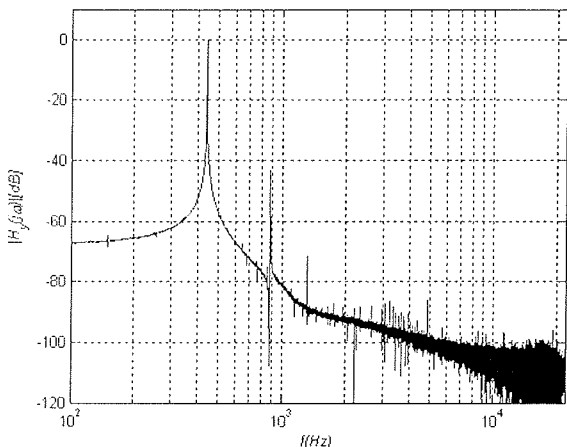
V postopku meritve smo najprej izmerili odzive ojačevalnih stopenj na harmonski vhodni signal in izračunali ter izrisali grafe frekvenčnih spektrov, potem pa še izmerili in izračunali skupna harmonska popačenja. Frekvenčne spektre  $|H_x(j\omega)|$  smo iz zajetih merilnih podatkov izhodnega signala izračunali s pomočjo hitre Fourierjeve transformacije v  $2^{17}$  vzorcih s programskim paketom MATLAB. Dobljeni frekvenčni spektri so prikazani na slikah 5, 6 in 7.



Slika 5: Frekvenčni spekter predojačevalnika z bipolarnim tranzistorjem  
 Fig. 5: Frequency spectrum of bipolar transistor preamplifier



Slika 6: Frekvenčni spekter predojačevalnika s tranzistorjem na poljski učinek  
 Fig. 6: Frequency spectrum of field effect transistor preamplifier



Slika 7: Frekvenčni spekter predojačevalnika z elektronko  
 Fig. 7: Frequency spectrum of vacuum tube preamplifier

S primerjavo posameznih grafov že zasledimo opazne razlike v vsebnosti višjih harmonskih komponent, v njihovem številu in v njihovih amplitudnih vrednostih. Predvsem zasledimo veliko manjši delež tretje harmonske komponente pri elektronki. Z zmanjševanjem vhodnega signala se skupna harmonska popačenja sicer zmanjšujejo, klub temu pa se ohranjajo značilni vzorci frekvenčnih spektrov. Amplitudne vrednosti posameznih višjih harmonskih komponent nam v primerjavi z osnovno harmonsko komponento, ki je postavljena na 0dB, prikazuje tabela 2.

Tabela 2: Amplitudne vrednosti osnovne in višjih harmonskih komponent pri ojačevalnih stopnjah v linearnem področju delovanja

Table 2: The amplitude values for first and higher harmonic components in preamplifiers in linear region

	harmonska komponenta dB				
	$f_n(\text{kHz})$				
ojačevalni element v vezju	1.	2.	3.	4.	5.
	0,440	0,881	1,321	1,760	2,200
BJT	0	-28	-50,	-70	-79
FET	0	-38	-50	-77	-80
elektronka	0	-43	-72	-	-

Skupna harmonska popačenja (THD) smo najprej izmerili s klasičnim merilnikom harmonskih popačenj HM8027 nato pa še izračunali po izvorni definiciji na osnovi izmerjenih višji harmonskih komponent, z izrazom,

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N U_{2k}^2}}{U_1} \cdot 100\%$$

V izrazu za THD je  $N$  število upoštevanih višjih harmonskih komponent v izhodnem signalu  $U_{2n}$  in  $U_1$  osnovna harmonska komponenta. Izvorna definicija je natančnejša pri večjih popačenjih, pri popačenjih do 10 % pa ni večjih razlik glede na meritev, kot je prikazano v tabeli 3.

Tabela 3: Skupna harmonska popačenja posameznih predojačevalnih vezij

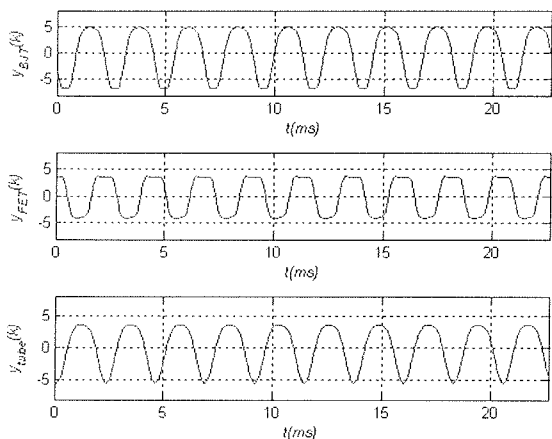
Table 3: Total harmonic distortion for preamplifier circuits

ojačevalni element v vezju	meritev	Izračun
BJT	4,90%	4,99%
FET	1,85%	1,78%
elektronka	1%	0,90%

Zlahka lahko ugotovimo, da so pri bipolarnem tranzistorju prisotna največja skupna harmonska popačenja. Pogojena so z različnimi ojačenji, nelinearnostjo karakteristik, različnim dinamičnim območjem delovanja in posledično z različno vsebnostjo višjih harmonskih komponent.

### 3.2 Meritve v prekrmiljenem režimu delovanja

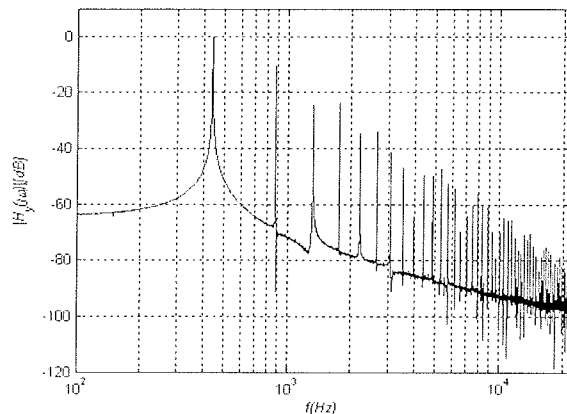
Pri meritvah v prekrmiljenih razmerah smo na vhod posameznih predojačevalnih vezij ponovno pripeljali harmonski signal frekvence 440Hz. S prilagodilno stopnjo  $a_1$  smo na vходу nastavili nivo signala na takšno vrednost, da je znašala izmerjena vrednost skupnih harmonskih popačenj 20%. To je izkustvena vrednost skupnih harmonskih popačenj /2/ za hreščece zvočni učinek. Spet smo za poenoten prikaz dobljenih grafov frekvenčnih spektrov s pomočjo prilagodilne stopnje  $a_2$  nastavili nivo izhodnega signala tako, da je znašala amplituda prve harmonske komponente 0dB. Slika 8 prikazuje časovne poteke izhodnih signalov vseh treh predojačevalnikov v prekrmiljenem stanju pri istih skupnih harmonskih popačenjih.



Slika 8: Časovni poteki izhodnih signalov predojačevalnikov z bipolarnim tranzistorjem,  $y_{BJT}$ , tranzistorjem na poljski učinek,  $y_{FET}$  in elektronko,  $y_{tube}$

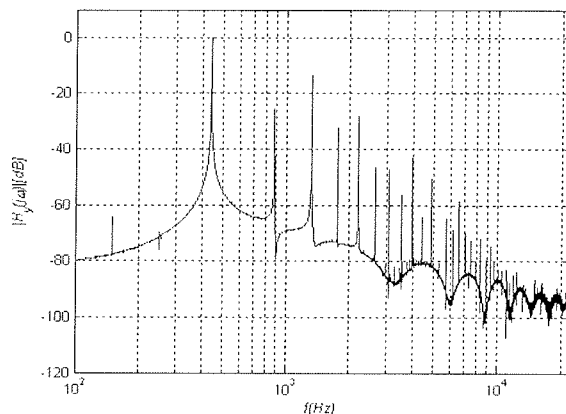
Fig. 8: The output waveforms for preamplifiers with BJT,  $y_{BJT}$ , FET,  $y_{FET}$  and tube,  $y_{tube}$

S slike 8 vidimo, da se časovni poteki izhodnih signalov predojačevalnikov pri isti stopnji prekrmiljenja (THD=0,2) med seboj precej razlikujejo. Do razlik pride zaradi različnih vsebnosti višjih harmonskih komponent. To je prikazano na slikah 9, 10 in 11, kjer podajamo frekvenčne spektre vseh treh vezij.



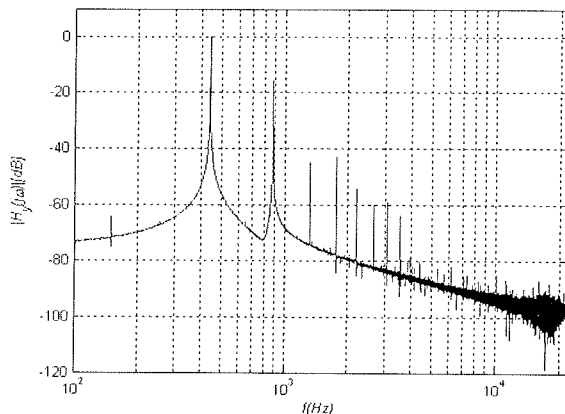
Slika 9: Frekvenčni spekter predojačevalnika z bipolarnim tranzistorjem pri 20% harmonskih popačenjih

Fig. 9: The frequency spectrum of preamplifier with bipolar junction transistor at 20% total harmonic distortion



Slika 10: Frekvenčni spekter predojačevalnika s tranzistorjem na poljski učinek pri 20% skupnih harmonskih popačenjih

Fig. 10: The frequency spectrum of preamplifier with field effect transistor at 20% total harmonic distortion



Slika 11: Frekvenčni spekter predojačevalnika z elektronko pri 20% harmonskih popačenjih

Fig. 11: The frequency spectrum of preamplifier with vacuum tube at 20% harmonic distortions

Amplitudne vrednosti posameznih višjih harmonskih komponent frekvenčnih spektrov posameznih predojačevalnikov nam v primerjavi z osnovno harmonsko komponento, ki je postavljena na 0dB, prikazuje tabela 4.

Tabela 4: Amplitudne vrednosti osnovne in višjih harmonskih komponent pri ojačevalnih stopnjah pri 20% skupnih harmonskih popačenjih

Table 4: The amplitude values for first and higher harmonic components at preamplifiers at THD= 20%

ojačevalni element v vezju	harmonska komponenta dB							
	$f_n(\text{kHz})$							
	1. 0,440	2. 0,881	3. 1,321	4. 1,760	5. 2,200	6. 2,640	7. 3,080	8. 3,520
BJT	0	-10	-24	-24	-35	-34	-41	-47
FET	0	-26	-14	-32	-28	-47	-47	-43
elektronka	0	-16	-45	-43	-54	-60	-59	-64

Šele pri prekrmljenem delovanju posameznih ojačevalnih stopenj pridejo do izraza razlike med bipolarnim tranzistorjem, tranzistorjem na poljski učinek in posebej elektronko. Na zaznavanje zvoka pri človeku v največji meri vpliva uho. Karakteristiko ušesa podaja Fletcher-Munson-ov graf /4/ ki pa kaže le frekvenčno odvisnost ušesa od nivoja glasnosti. Dobljen je na osnovi zaznavanja glasnosti čistih tonov. Povsem drugače je pri signalih, ki so popačeni in polni višjih harmonskih komponent. Med harmonskimi popačenji signala, gledano iz tehničnega vidika in barvitostjo tona, gledano iz glasbenega vidika, lahko po mnenju nekaterih avtorjev potegnemo nekakšne paralele /5/. Osnovna barvna karakteristika tona se skriva v moči višjih harmonskih komponent. Vsaka harmonska komponenta daje svoj karakteristični učinek, če je dominantna. V primeru, da je harmonska komponenta izrazita, spreminja vpliv ostalih komponent. Primer takšnega vpliva je t.i. učinek čebelice, ko zaradi karakteristike ušesa postane neka višja harmonska komponenta zaznavnejša od osnovne in se s tem karakteristični pomen posameznih harmonskih komponent spremeni. S tem se spremeni tudi obarvanost tona.

Višje harmonske komponente lahko razdelimo v dve skupini /5, 6/. Lihe harmonske komponente (tretja in peta), dajeta zamašen in zaprt zvok, medtem ko sode komponente (druga, četrta in šesta) dajejo zborovski in pojoč zvok. Višje harmonske komponente (nad sedmo) dajejo zvoku ostrino. Z glasbenega stališča sode harmonske komponente predstavljajo oktavo, ki jo je težje razločiti od osnovnega tona, vendar pa daje zvoku polnejši karakter. Tretja harmonska komponenta predstavlja kvinto in daje kovinski prizvok, če je njena amplituda dovolj velika. Harmonske komponente, ki dajejo ostrino so z glasbenega vidika nesorodne z osnovnim tonom in kadar so preveč izrazite vnašajo razglašen prizvok.

## 4 Zaključek

Analiza popačenj ojačevalnih vezij z bipolarnim tranzistorjem, tranzistorjem na poljski učinek in vakuumsko elektronko potrjuje nekatere ugotovitve glasbenikov in njihovih somišljenikov, da so pri posameznih ojačevalnih elementih prisotne slišne razlike.

Z meritvami frekvenčnih spektrov in skupnih harmonskih komponent pri ojačevalnih stopnjah z različnimi ojačevalnimi elementi in s tem tudi sonorne razlike v izhodnem signalu posameznih ojačevalnikov. Zlahka lahko ugotovimo, da so pri bipolarnem tranzistorju prisotna največja skupna harmonska popačenja v primerjavi s tranzistorjem na poljski učinek in posebej v primerjavi z elektronko. Pogojena so z različnimi ojačenji ojačevalnih elementov, nelinearnostjo karakteristik, različnim dinamičnim območjem in posledično z različno vsebnostjo višjih harmonskih komponent, v njihovem številu in v njihovih amplitudnih vrednostih. Predvsem zasledimo veliko manjši delež tretje harmonske komponente pri elektronki.

Razlike med posameznimi ojačevalnimi elementi pridejo do izraza šele pri prekrmljenem delovanju ojačevalnih stopenj. Pri 20 odstotni vrednosti skupnih harmonskih popačenj je postala vsebnost višjih harmonskih komponent v izhodnem signalu elektronke bistveno drugačna od tiste pri bipolarnem oziroma tiste pri tranzistorju na poljski učinek. Z glasbenega stališča dajejo sode harmonske komponente polni karakter. Tretja harmonska komponenta daje kovinski prizvok, če je njena amplituda dovolj velika. Harmonske komponente, ki dajejo ostrino so z glasbenega vidika nesorodne z osnovnim tonom in v primeru izrazitih amplitud vnašajo prizvok razglašenosti. Glede na vsebnost višjih harmonskih komponent ima elektronka najbolj poudarjeno drugo harmonsko komponento. Ker ima vse ostale, posebej velja to za tretjo harmonsko komponento, tudi do sto krat manjše, ima z glasbenega vidika najprijetnejši zvok.

Predstavljene in opisane meritve in merilni rezultati običajnemu poslušalcu ne povedo veliko, za strokovnjaka s tehničnega področja pa so praktično edina povratna informacija o tem, kaj se dejansko dogaja v ojačevalniku. Klasični merilnik harmonskih popačenj nam daje le oceno prisotnosti popačenj, ne pa nudi vpogleda v strukturo signala. Z relativno preprostim merilnim sistemom pa nam je uspelo dobiti poleg skupnih harmonskih popačenj tudi vpogled v frekvenčni spekter signala, v vsebnost višjih harmonskih komponent in s tem v razširjeno sliko o signalu, iz katere lahko poiščemo sonorne lastnosti signala. Kako dolgo bo elektronka še uspela zadržati svoje mesto na področju ojačevalnikov za kitaro in profesionalne tonske opreme, je vprašanje časa. Hiter napredek vseh vrst signalnih procesorjev, tudi takšnih posebnih za simulacijo zvočnih lastnosti elektronk, jih bo v bližnji prihodnosti zanesljivo nadomestil in izpodrinil.

## 5 Literatura

- /1/ E. Barbour, The cool sound of tubes, IEEE Spectrum, aug 1998, 35 (8), page 24-35.
- /2/ F: Širovnik, Predojačevalnik za električno kitaro na elektronke z načrtom oglaševanja preko interneta, Diplomsko delo, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 2003, 133 strani.
- /3/ Osebik, R. Babič, Adaptivna digitalna sita v strukturi porazdeljene aritmetike, inf MIDEM, sep. 2001, letnik 31, št 3, str. 160-168.
- /4/ Tony Moscal, Sound Check, Hal Leonard, Aug 1, 1994.
- /5/ W. Fearn, Douglas. Why Tubes ? Pro Audio Review, Jan/Feb 1996.
- /6/ Russell O. Hamm, Tubes vs transistors: Is there an audible difference, Journal of the Audio Engineering Society, May 1973.

*izr. prof. dr. Rudolf Babič, tel.: (02) 220-7230, e-mail: rudolf.babic@uni-mb.si*

*dr. Davorin Osebik, tel (02) 220-7238, e-mail: davorin.osebik@uni-mb.si*

*Univerza v Mariboru*

*Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova 17, 2000 Maribor*

*Tel.: (02) 220 7000, Fax (02) 220 7272*

*Prispelo (Arrived): 20. 12. 2005; Sprejeto (Accepted): 08. 09. 2006*