

## ISPITIVANJE ZVUČNIČKIH SKRETNICA REALIZOVANIH POMOĆU KOMPLEMENTARNIH FILTERSKIH PAROVA

Iva Đukić, Institut Mihajlo Pupin, Beograd

**Sadržaj** – Osnovni zadatak audio sistema je vernost reprodukcije audio signala. Jedan od najbitnijih delova audio lanca su zvučnici, a veliku ulogu u akustičkom odzivu zvučnika igraju zvučničke skretnice. U ovom radu ispitivana je realizacija digitalnih zvučničkih skretnica pomoću filterskih parova koji su komplementarni po amplitudi i uticaj ovakvih skretnica na subjektivni doživljaj zvuka. Komplementarni filtri su konstruisani kao otočno spojene kaskadne veze dva filtra svepropusnika, koji mogu biti vrlo niskog reda. Presečna učestanost ovakvog komplementrnog filterskog para može se na jednostavan način menjati. Iz navedenih razloga ovi komplementarni filterski parovi su pogodni za realizaciju zvučničkih skretnica.

### 1. UVOD

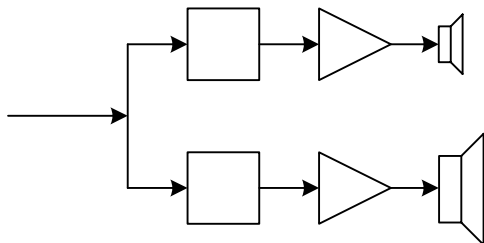
Zvučničke skretnice su filtri u zvučničkim sistemima koji imaju ulogu da podele audio signal na frekvencijske podopsege, tako da se odgovarajući signali dovode na zvučničke jedinice koje su dizajnirane da rade u ograničenom frekvencijkom opsegu. Na taj način se u mnogome smanjuju izobličenja, pa čak i oštećenja, koja bi se javila kada bi se audio signal doveo na jednu zvučničku jedinicu. Zvuk emitovan različitim zvučničkim jedinicama akustički se sabira na mestu slušanja. Da bi se ostvarila idealna reprodukcija zvučnički sistem bi trebalo da ne unosi nikakva izobličenja audio signala. Realno je nemoguće napraviti takav sistem, jer svaka komponenta, a između ostalog i skretnice, unosi izvesna izobličenja, koja bi trebalo minimizovati.

U ovom radu ispitivane su digitalne zvučničke skretnice u dvosistemskim zvučnicima, kao što je prikazano na slici 1. Neka su  $H_{LP}$  i  $H_{HP}$  funkcije prenosa niskopropusnika i visokopropusnika posmatrane skretnice. Za idealan prenos audio signala kroz skretnicu potrebno je da budu ispunjena dva uslova: da je ukupna funkcija prenosa ravne amplitudske karakteristike (*all-pass complementarity*):

$$|H_{LP} + H_{HP}| = 1, \quad (1)$$

i linearne faze:

$$\varphi_{LP} + \varphi_{HP} = k\omega, \quad k < 0. \quad (2)$$



Slika 1. Princip rada dvosistemskog zvučnika sa aktivnom skretnicom

Da bi se ostvario zadovoljavajući odziv svake zvučničke jedinice pokazano je da je uslov (1) potreban, ali ne i dovoljan [1]. Naime, moguće je konstruisati takve filtre čiji zbir funkcija prenosa zadovoljava uslov (1), ali da jedna ili obe funkcije prenosa mogu imati značajne vrednosti u oblasti u kojoj bi trebalo da je njihov nepropusni opseg. Na ovaj način bi se zvučnička jedinica pobuđivala frekvencijama iz opsega za koji nije dizajniran i došlo bi do izobličenja. Zato se uslov (1) proširuje sa jednim od sledeća dva uslova:

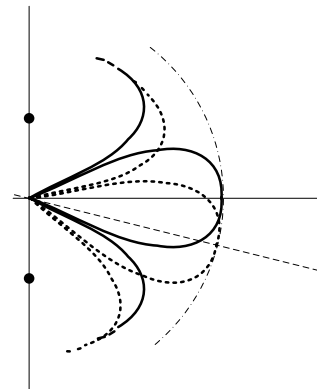
- komplementarnost po snazi (*power complementarity*):

$$|H_{LP}|^2 + |H_{HP}|^2 = 1, \quad (3)$$

- komplementarnost po amplitudi (*amplitude complementarity*):

$$|H_{LP}| + |H_{HP}| = 1. \quad (4)$$

Linkwitz [5] je analizirao zvučničke skretnice sistema koji se sastoji od dva nekoincidentna zvučnika (odnosno, zvučnika koji se nalaze jedan iznad drugog i akustički centri su im razdvojeni) i pokazao je da je za ostvarivanje simetričnog odziva sistema u odnosu na akustičku osu u vertikalnoj ravni u okolini presečne učestanosti potreban i dovoljan uslov da funkcije prenosa  $H_{LP}$  i  $H_{HP}$  imaju istu fazu na svim frekvencijama. Pokazuje se da uz uslov (1) ovaj uslov daje uslov (4), komplementarnost po amplitudi. Na slici 2 prikazani su odzivi zvučničkog sistema sa skretnicama koje zadovoljavaju uslov (4) (puna linija) i zvučničkog sistema sa skretnicama koje zadovoljavaju uslov (3) (isprekidana linija), u vertikalnoj ravni na presečnoj učestanosti. Može se uočiti da kod zvučničkog sistema sa skretnicama koje su komplementarne po snazi dolazi do skretanja maksimuma zračenja sa akustičke ose ka zvučnikoj jedinici čija fazna karakteristika skretnice zaostaje za faznom karakteristikom skretnice druge zvučničke jedinice.



Slika 2. Zračenje dvosistemskih zvučnika u vertikalnoj osi: skretnice komplementarne po amplitudi (puna linija) i skretnice komplementarne po snazi (isprekidana linija)

U literaturi su prikazani IIR amplitudski komplementarni filterski parovi realizovani kao otočno spojene kaskadne veze (*tapped cascaded interconnections*) dva filtra svepropusnika, [2], [3], [4]. Ovi komplementarni filterski parovi su pogodni za realizaciju zvučnih skretnica jer im se presečna učestanost na jednostavan način može pomerati i na taj način prilagođavati odabranim zvučnim jedinicama. Za ostvarivanje tražene amplitudske karakteristike filtri svepropusnici mogu biti vrlo niskog reda, pa se promena presečne učestanosti ostvaruje promenom malog broja koeficijenta. Ipak, pored toga što ispunjavaju uslove (1) i (4), ovi filtri ne ispunjavaju uslov (2), odnosno nemaju linearnu faznu karakteristiku. Postoje radovi ([6], [5]) u kojima se tvrdi da je ljudsko uho više osetljivo na izobličenja amplitudske karakteristike ukupne funkcije prenosa filtra koji čine skretnicu, nego na fazna izobličenja ove funkcije prenosa, ukoliko izobličenja usled različitog grupnog kašnjenja nisu značajna. Sa druge strane, u određenim radovima (na primer [7]) pokazano je da se fazna izobličenja ipak čuju, mada više na veštački generisanim signalima (signal od dva harmonika, povorka impulsa) i zvucima pojedinih instrumenata, a manje na složenim zvucima, naročito ako je utisak reverberacije prostora značajan.

Komplementarni filterski parovi su realizovani u programskom paketu MATLAB. Opis analiziranih komplementarnih filtara dat je u drugom odeljku ovog rada. Filtrirani su mono audio signali kroz svaki od komplementarnih filtara i digitalno su sabrani, da bi se analizirao uticaj faznog izobličenja koje unose ovakvi filterski parovi. Filtrirani mono signali su reprodukovani na kvalitetnim zvučnicima i poređeni sa originalnim signalima. Detaljan opis i rezultati slušnih testova dati su u trećem odeljku ovog rada.

## 2. KOMPLEMENTARNI FILTERSKI PAR

U radovima [2], [3], [4] prikazana je realizacija IIR filterskih parova koji su komplementarni po amplitudi. Naime, ako su  $A_0^{\text{HB}}$  i  $A_1^{\text{HB}}$  filtri svepropusnici oblika

$$A_0^{\text{HB}} = \prod_{i=2,4,\dots}^{(N+1)/2} \frac{\beta_i^{\text{HB}} + z^{-2}}{1 + \beta_i^{\text{HB}} z^{-2}}, \quad (5a)$$

$$A_1^{\text{HB}} = z^{-1} \prod_{i=3,5,\dots}^{(N+1)/2} \frac{\beta_i^{\text{HB}} + z^{-2}}{1 + \beta_i^{\text{HB}} z^{-2}}, \quad (5b)$$

i ako važi da je  $\beta_i^{\text{HB}} < \beta_{i+1}^{\text{HB}}$ , tada se direktnom paralelnom vezom ova dva svepropusnika dobijaju half-band filtri, komplementarni po snazi, slika 3. Pri ovome je  $N$  neparan broj i predstavlja red half-band filtara. Ovi filtri pripadaju grupi eliptičkih filtara minimalnih  $Q$  faktora (*Elliptic Minimal  $Q$ -Factors - EMQF*). Zahvaljujući osobinama EMQF filtara moguće je na jednostavan način pomeriti presečnu učestanost na željenu vrednost i to transformacijom sekcija prvog i drugog reda filtara svepropusnika:

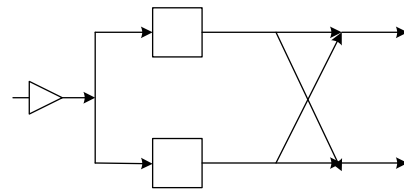
$$A_0 = \prod_{i=2,4,\dots}^{(N+1)/2} \frac{\beta_i + \alpha(1 + \beta_i)z^{-1} + z^{-2}}{1 + \alpha(1 + \beta_i)z^{-1} + \beta_i z^{-2}}, \quad (6a)$$

$$A_1 = \frac{\alpha_1 + z^{-1}}{1 + \alpha_1 z^{-1}} \prod_{i=3,5,\dots}^{(N+1)/2} \frac{\beta_i + \alpha(1 + \beta_i)z^{-1} + z^{-2}}{1 + \alpha(1 + \beta_i)z^{-1} + \beta_i z^{-2}}, \quad (6b)$$

pri čemu je:

$$\alpha_1 = \frac{1 - \text{tg}(\pi f_{co})}{1 + \text{tg}(\pi f_{co})}, \quad \alpha = \frac{1 - (\text{tg}(\pi f_{co}))^2}{1 + (\text{tg}(\pi f_{co}))^2}, \quad \beta_i = \frac{\beta_i^{\text{HB}} + \alpha_1^2}{\beta_i^{\text{HB}} \alpha_1^2 + 1}, \quad (7)$$

a  $f_{co}$  je presečna učestanost, koja se u slučaju filterskih parova komplementarnih po snazi poklapa sa učestanošću na kojoj je slabljenje 3 dB.



Slika 3. IIR filterski par komplementaran po snazi, realizovan kao paralelna veza dva filtra svepropusnika

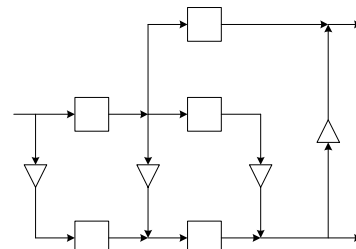
Specijalan slučaj ovih filtara su *Butterworth*-ovi filtri, koji se dobijaju za određene vrednosti koeficijenta  $\beta_i$ . *Butterworth*-ovi filtri predstavljaju graničan slučaj EMQF filtara, koji imaju maksimalno slabljenje u nepropusnom opsegu, ali najmanji nagib u prelaznoj zoni. Sa druge strane, otuda i najmanje fazno i grupno kašnjenje, kao i najmanja dužina značajnih komponenti impulsnog odziva.

Filterski par komplementaran po amplitudi može se dobiti pomoću dva filtra svepropusnika:

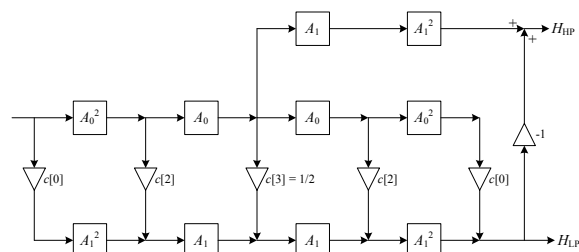
$$H_{\text{LP}}(z) = \sum_{m=0}^M c[m] [A_0(z)]^m [A_1(z)]^{M-m}, \quad (8a)$$

$$H_{\text{HP}}(z) = \sum_{m=0}^M (-1)^{m+1} c[m] [A_0(z)]^m [A_1(z)]^{M-m}, \quad (8b)$$

gde je  $M = 2k$  i  $k$  je neparno, a  $c[m]$  i  $(-1)^m c[m]$  su koeficijenti FIR half-band filtara linearne faze (*tapped coefficients*). Pri tome je  $c[m] = c[M - m]$  i  $c[M/2] = 1/2$ , a svi ostali koeficijenti  $c[m]$  sa neparnim  $m$  jednaki su nuli. Ovakvi filtri mogu se realizovati kao otočno spojene kaskadne veze dva filtra svepropusnika i prikazani su na slikama 4 i 5 za  $M = 2$  i  $M = 6$ , respektivno. Filtri svepropusnici su dati izrazima (5), a presečna učestanost se može pomerati primenom izraza (6) i (7).



Slika 4. IIR filterski par komplementaran po amplitudi,  $M = 2$



Slika 5. IIR filterski par komplementaran po amplitudi,  $M = 6$

Za filtre prikazane na slici 4 može se pokazati da je

$$H_{LP}(z) = \left[ \frac{1}{2} (A_0(z) + A_1(z)) \right]^2, \quad (9a)$$

$$H_{HP}(z) = \left[ \frac{1}{2} (A_0(z) - A_1(z)) \right]^2, \quad (9b)$$

odakle se vidi da su funkcije prenosa ovih filtara jednake kvadratima funkcija prenosa filtara prikazanih na slici 3. Na ovaj način je pokazana efikasnija realizacija od jednostavne kaskadne veze dva filtra prikazana na slici 3.

Sa povećanjem reda svepropusnika  $A_0$  i  $A_1$ , kao i sa povećanjem broja sekcija svepropusnika (odnosno, sa povećanjem broja  $M$ ) u prikazanoj realizaciji filtara komplementarnih po amplitudi povećava se nagib u prelaznoj zoni fitara, a povećavaju se i fazno i grupno kašnjenje, kao i dužina značajnih komponenti impulsnog odziva.

### 3. SLUŠNI TESTOVI

a) *Analizirani komplementarni filterski parovi.* Sa stanovišta zvučnih skretnica sa jedne strane je potrebno obezbediti filtre sa relativno velikim nagibom u prelaznoj zoni, kako bi se širina frekvencijske zone u kojoj rade obe zvučnice jedinice sveo na minimum. Sa druge strane, ako već fazna karakteristika nije linearna, potrebno je da fazno i grupno kašnjenje budu što manji. Kod primenjenih filtara su očigledno ova dva zahteva oprečna, pa se najpre mora utvrditi u kojoj meri se fazna izobličenja mogu tolerisati.

Kada su filtri prikazani na slici 3 tipa *Butterworth* onda su filtri prikazani na slici 4 tipa *Linkwitz-Riley*. *Linkwitz-Riley*-jevi filtri četvrtog i osmog reda se trenutno najviše koriste u zvučničkim sistemima. Na način prikazan u prethodnom odeljku red *Linkwitz-Riley*-jevih filtara koji se mogu realizovati jednak je dvostruko vrednosti neparnog broja (dakle, red filtra može biti šesti, deseti, itd.).

Za potrebe ispitivanja generisani su sledeći komplementarni filterski parovi:

- (i) red IIR prototip filtra sa slike 3 je  $N=3$ , red FIR prototip filtra je  $M=2$ , prema opštoj šemi sa slike 4,
- (ii) red IIR prototip filtra sa slike 3 je  $N=5$ , red FIR prototip filtra je  $M=2$ , prema opštoj šemi sa slike 4,
- (iii) red IIR prototip filtra sa slike 3 je  $N=3$ , red FIR prototip filtra je  $M=6$ , prema opštoj šemi sa slike 5.

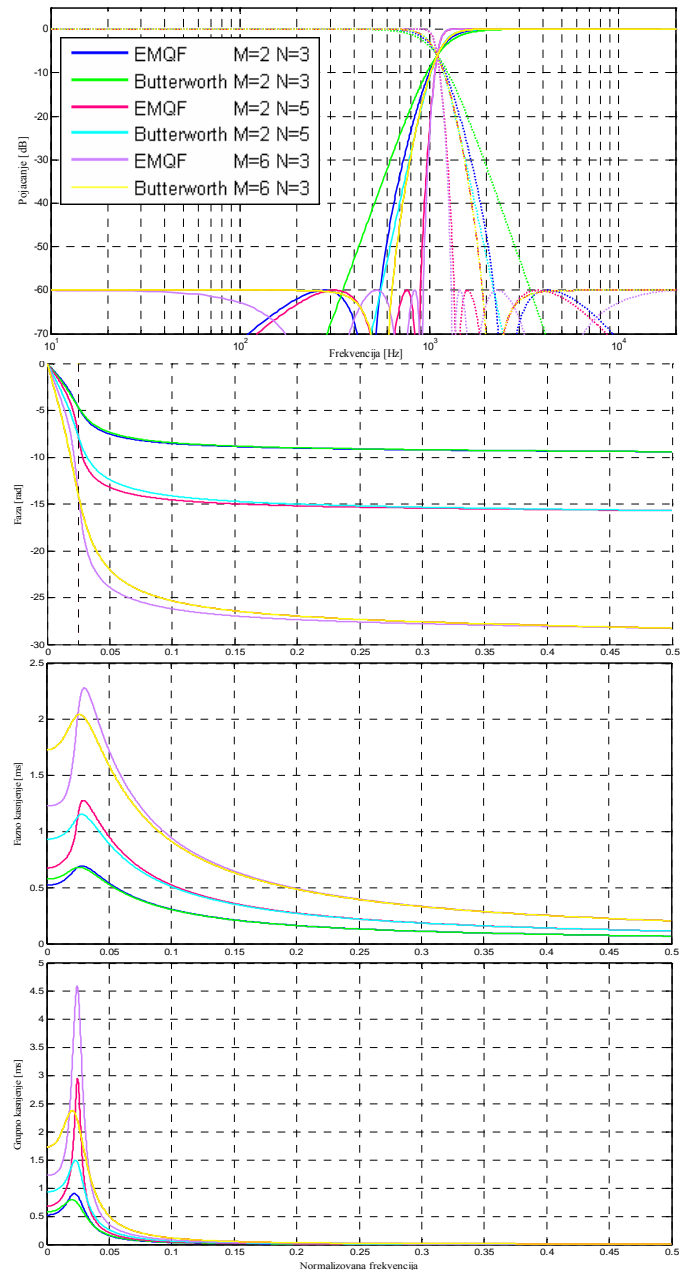
Za svaku od grupa komplementarnih filterskih parova u programskom paketu MATLAB realizovan je komplementarni filterski par prototipa *Butterworth* i prototipa EMQF, sa usvojenim slabljenjem u nepropusnom opsegu od 60 dB. S obzirom da uticaj presečne učestanosti predstavlja posebno pitanje, usvojena je fiksna presečna učestanost  $f_{co} = 1100$  Hz. Na slici 6 prikazane su amplitudske i fazne karakteristike, fazna i grupna kašnjenja, a na slici 7 impulsi odzivi za svaku od 6 grupa komplementarnih filterskih parova.

b) *Analizirani audio materijal* je izabran sa kompakt diska, koji je Evropska unija za emitovanje (*European Broadcasting Union*) pripremila za subjektivne testove, [8]. Izabrani su pojedinačni instrumenti: klavir, kao instrument sa bogatom harmonijskom strukturom, i trijagl, kao perkusioni instrument, na kome bi se najbolje mogle uočiti promene u impulsnom odzivu. Instrumenti izvide pojedine tonove i melodijske fraze.

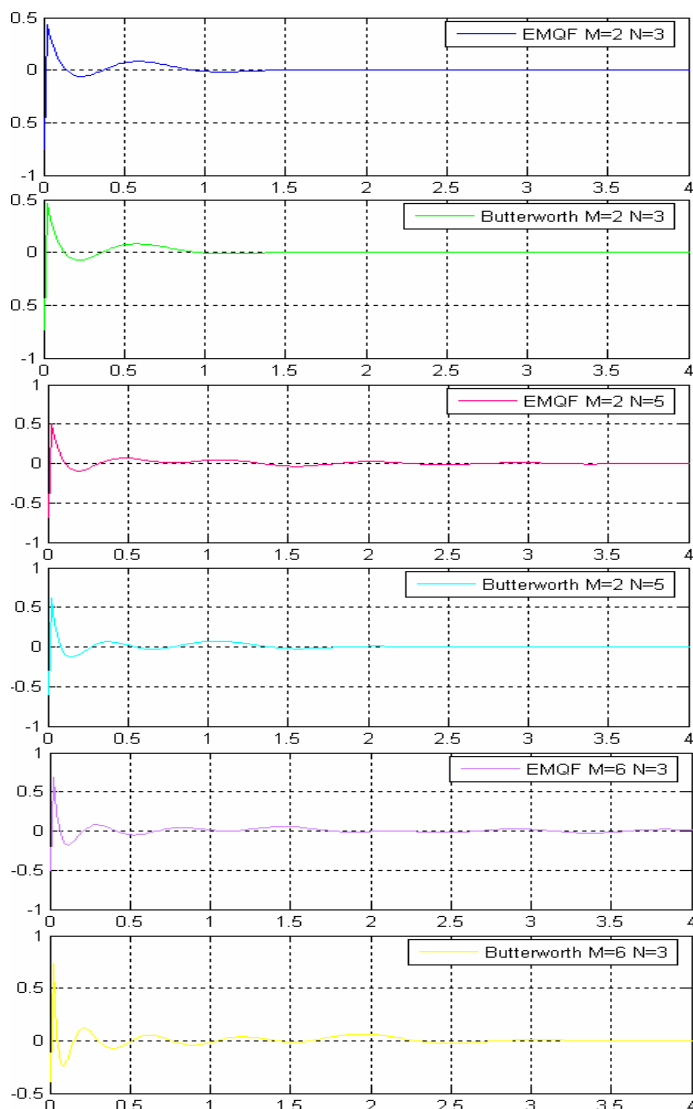
Izabran je vokal tenor. Signali su snimljeni u studiju zapremine  $1000 \text{ m}^3$ , vremena reverberacije 1,6 s, sa dva omnidirekciona mikrofona, tipa Bruel and Kjaer 4006, razdvojena 0.35 mm, koja su se nalazila na rastojanju od 1 do 2 m od izvora zvuka. Kako svaki od stereo kanala predstavlja optimalni mono signal, preporučeno je da se za mono analizu koristi jedan od stereo kanala, a ne zbir stereo kanala, [8]. Za analizu složenog signala izabrana je orkestarska deonica Strauss-ovog dela *Also sprach Zarathustra*, u trajanju od 1 minuta i 52 sekunde. Ovaj mono signal je dobijen sabiranjem kanala stereo signala.

c) *Ispitivani subjekti* su bili profesionalni ton-majstori.

d) *Uslovi slušanja.* Slušanje je izvedeno u optimalnim akustičkim uslovima. Zapremina prostorije je  $30 \text{ m}^3$ , a vreme reverberacije je 0,3 s.



Slika 6. a) Amplitudska karakteristika, b) fazna karakteristika, c) fazno kašnjenje, d) grupno kašnjenje komplementarnih filterskih parova



Slika 7. Impulzni odzivi komplementarnih filterskih parova

e) *Rezultati slušnih testova.* Svaki od analiziranih filtera unosi izvesno subjektivno izobličenje slušanog materijala. Iako se spektralni sastav celokupnog signala ne menja, zbog grupnog kašnjenja koje nije konstantno, dolazi do značajnih izobličenja signala u vremenskom domenu, što se može uočiti poređenjem talasnih oblika originalnog i filtriranog signala, a za posledicu ima subjektivnu promenu boje zvuka, različito opadanje tranzijenata, pa čak i slabljenje određenih delova spektra. Ove pojave mogu se jednim delom objasniti fiziološki na osnovu konstante integracije ljudskog uha, koja iznosi oko 50 ms (što odgovara najnižoj frekvenciji koju u proseku ljudsko uho može da čuje, a to je oko 20 Hz). Naime, iako spektar celokupnog signala nije promenjen, jer analizirani komplementarni filteri ispunjavaju uslove (1) i (4), na spektrima izdvojenih signala od po 50 ms uočena je razlika, koju ljudsko uho detektuje.

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitivana je primena komplementarnih filterskih parova u digitalnim zvučnim skretnicama. Iako ovi komplementarni filterski parovi zadovoljavaju uslov komplementarnosti po amplitudi, oni ne zadovoljavaju uslov linearnosti faze ukupne funkcije prenosa pa unose izvesna fazna izobličenja. Ispitivan je subjektivni doživljaj ovih izobličenja. Utvrđeno je da postoje razlike u subjektivnom doživljaju signala (pre svega u boji signala, načinu opadanja

tranzijenata) u zavisnosti od upotrebljenih filterskih parova, odnosno u zavisnosti od dužine njihovog impulsnog odziva, faznog i grupnog kašnjenja, koje zavise od nagiba u prelaznoj zoni. Razlike između originalnog i filtriranog signala postoje čak i kod skretnica tipa *Linwitz-Riley*, koje se komercijalno najviše koriste i trenutno važe za najbolju vrstu zvučnih skretnica. Uočene razlike se objašnjavaju periodom integracije ljudskog uha, koje iznosi 50 ms.

S obzirom da su za potrebe ispitivanja uticaja faznih izobličenja sva ispitivanja sprovedena na audio signalima koji su digitalno sabrani i pušteni kroz postojeći sistem, dalja istraživanja će biti sprovedena u realnoj primeni ovih komplementarnih filterskih parova na posebno konstruisanom zvučnom paru. Uticaj položaja presečne učestanosti predstavlja posebno pitanje i jednu od smernica daljeg istraživanja.

U radu je prikazana i jednostavna realizacija *Linwitz-Riley* skretnica, koja može imati prednost u odnosu na do sad korišćenu realizaciju kaskadnom vezom dva *Butterworth*-ova filtera. Neki od prikazanih komplementarnih filterskih parova će sigurno naći svoju primenu u zvučnim sistemima, a o širini te primene konačni zaključci će biti izvedeni tokom opsežnog istraživanja, čiji je ovo samo početak.

#### LITERATURA

- [1] P. A. Regalia, S. K. Mitra, "A Class of Magnitude Complementary Loudspeaker Crossovers", *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. ASSP-35, No.11, November 1987
- [2] Lj. Milić, T. Saramaki, "Complementary IIR Filter Pairs with an Adjustable Crossover Frequency", *NORSIG 2002*
- [3] Lj. Milić, T. Saramaki, "Tree Classes of IIR Complementary Filter Pairs with an Adjustable Crossover Frequency", *ISCAS 2003*
- [4] H. Johansson, T. Saramaki, "A Class of Complementary IIR Filters", pp. 298-302, *ISCAS 1999*
- [5] S. H. Linkwitz, "Active Crossover Networks for Noncoincident drivers", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 24, pp. 2-8, Jan./Feb. 1976
- [6] J. R. Ashley, L. M. Henne, "Operational Amplifier Implementation of Ideal Electronic Crossover Networks", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 19, pp. 7-11, Jan. 1971
- [7] S. P. Lipshitz, M. Pocock, J. Vanderkooy, "On the Audibility of Midrange Phase Distortion in Audio systems", *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 30, pp. 580-595, Sep. 1982
- [8] "Users' Handbook for the EBU-SQUAM Compact Disc", *Sound quality assessment material, European Broadcasting Union*, Apr 1988

**Abstract** – The main task of a good audio system is to provide fidelity of the reproduction. One of the most important parts of an audio chain are loudspeakers, and an important role in the loudspeaker response is played by the audio crossovers. In this paper is investigated a realization of digital loudspeaker crossover by using a magnitude complementary filter pair and influence that this type of crossover has on the subjective experience of the reproduced sound. Amplitude complementary filter pair is constructed as a tapped cascaded interconnection of two all-pass filters. The all-pass subfilters can be of very low order so that changing of the crossover frequency is very simple. This property makes these filters particularly suitable for realization of the loudspeaker crossovers.

#### INVESTIGATION OF THE MAGNITUDE COMPLEMENTARY LOUSPEAKER CROSSOVER

Iva Djukic