

# Uređaj za merenje impedanse na bazi mikrokontrolera

Boris Milosavljević  
student drugog ciklusa studija  
Visoka škola elektrotehnike i računarstva  
Beograd, Republika Srbija  
borisnrt609@yahoo.com

**Sadržaj**— Predmet ovog rada je realizacija uređaja za merenje impedanse, posebno namenjenog snimanju krive impedanse klasičnog zvučnog drajvera. Baziran je na mikrokontroleru ARM Cortex M3, i integrisanom kolu specijalne namene AD5933. Uređaj omogućava merenje kompleksne impedanse do  $45\Omega$ , prebirsavanjem opsega učestanosti 20Hz – 30kHz, a rezultati se beleže u datoteku na microSD kartici. Prateća aplikacija za PC računar omogućava analizu i grafičko predstavljanje podataka, kao i proračun parametara zvučnika.

**Gljučne reči**- merenje impedanse; zvučnik;

## I. UVOD

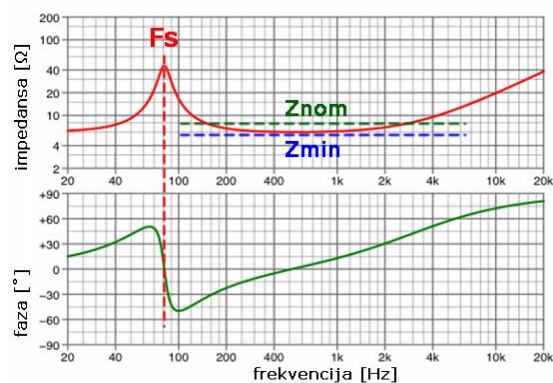
Jedna od najvažnijih informacija o klasičnom zvučnom drajveru sa kretnim kalemom je vrednost kompleksne impedanse u funkciji frekvencije, odnosno impedansna kriva. Analizom impedanse na frekvencijama od interesa dobijaju se ključni parametri za proračun zvučničke kutije, polazni podaci za proračun skretnice, a može se predvideti i akustički odziv. Iako veoma važna, kriva impedanse se retko dobija od proizvođača, a često je neprecizna ili netačna.

Jeftiniji uređaji za merenje impedanse su veoma retki, tako da se osim izuzetno skupim laboratorijskim uređajima impedansa zvučnika može meriti primenom nekog mernog mosta, što je uglavnom vremenski veoma zahtevno. Međutim, mogu se naći specijalizovani čipovi („Impedance Converter“, „IDC“) koji uz mikrokontroler i malo dodatne elektronike mogu obaviti ovaj zadatak.

Ovim radom opisan je princip rada, realizacija i testiranje osnovnog uređaja za snimanje krive impedanse zvučnika baziranog na AD5933. U zaključku su predložena poboljšanja kojima bi se povećala tačnost i proširio merni opseg, čime bi bilo omogućeno kvalitetno merenje impedanse svih postojećih dinamičkih zvučničkih drajvera.

## II. KRIVA IMPEDANSE DINAMIČKOG DRAJVERA

Najčešće korišćeni, dinamički zvučnički drajver, opisan je mnoštvom parametara, od kojih su posebno važni „Thiele – Small“ ( $T_s$ ) parametri, koji se koriste i pri dizajniranju zvučne kutije. Za izračunavanje ovih parametara koriste se podaci dobijeni iz krive impedanse snimljene nad drajverom u slobodnom prostoru (Sl. 1), pobudnim signalom malog intenziteta ( $< 1V_{pp}$ )[1]. Impedansa drajvera uobičajeno se kreće u opsegu  $3\Omega - 50\Omega$ , a izuzetno može biti do  $150\Omega$ .



Slika 1. Kriva impedanse drajvera u slobodnom prostoru

Deo spektra u kom je impedansa relativno linearna i ispod nominalne impedanse ( $Z_{nom}$ ), jedini je pogodan za kvalitetnu reprodukciju zvuka. Ispod ovog opsega impedansa raste sve do  $Z_{max}$  na rezonantnoj frekvenciji, i ponovo opada ka nižim frekvencijama, a analizom impedanse u ovom opsegu dobijaju se značajni  $T_s$  parametri:  $Q_{ms}$  (predstavlja mehaničko prigušenje, tj gubitke u vešanjima, uglavnom 0.5 – 10, prosečno 3),  $Q_{es}$  (električno prigušenje uzrokovano indukovanom EMS koja se suprostavlja kretanju kalema),  $Q_{ts}$  (ukupno prigušenje, proporcionalno količniku uskladištene i disipirane količine energije, uglavnom 0.2 - 0.8). Proračun parametara se sastoji iz pronalaženja bočnih frekvencija oko  $F_s$ ,  $f_1$  i  $f_2$ , na kojima impedansa opadne za određeni iznos, i zatim izračunavanja Q faktora:

$$\begin{aligned}
 Z_{f_1, f_2} &= R_e * \sqrt{\frac{Z_{max}}{R_e}} \\
 Q_{ms} &= \frac{F_s * \sqrt{\frac{Z_{max}}{R_e}}}{f_2 - f_1} \\
 Q_{es} &= \frac{Q_{ms}}{\sqrt{\frac{Z_{max}}{R_e} - 1}} \\
 Q_{ts} &= \frac{Q_{es} * Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Brojni drugi parametri se mogu dobiti sličnim merenjem, kao što je npr. ekvivalentna zapremina  $V_{as}$ , kada se merenje vrši nad drajverom u zatvorenoj kutiji. Dobijeni parametri se zatim mogu iskoristiti za procenu osobina i kvaliteta drajvera, i za proračun odgovarajuće zvučnice kutije, koji se lako izvodi pomoću neke od brojnih aplikacija. Proračun kutija se radi za niskotonske zvučnike, kod kojih je  $F_s$  ispod par stotina herca, tako da je najniži deo spektra i najvažniji.

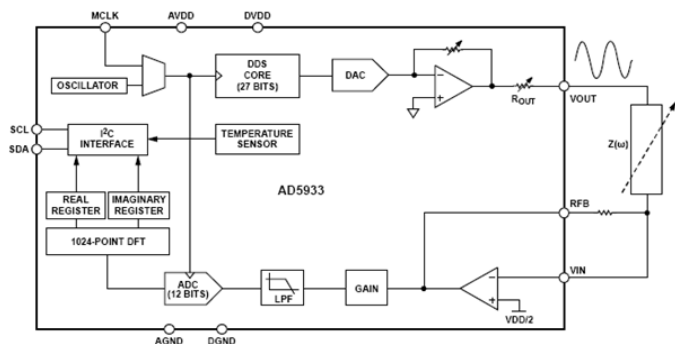
### III. HARDVER UREĐAJA

Uređaj se sastoji od IDC-a AD5933 sa pratećom elektronikom za merenje malih vrednosti impedanse, kojim putem I2C magistrale upravlja ARM Cortex M3 mikrokontroler. Cortex takođe obavlja i sve potrebne kalkulacije, komunikaciju sa PC računarom preko USB porta, obradu komandi sa tastera uređaja, kao i snimanje rezultata merenja u datoteku na MicroSD kartici.

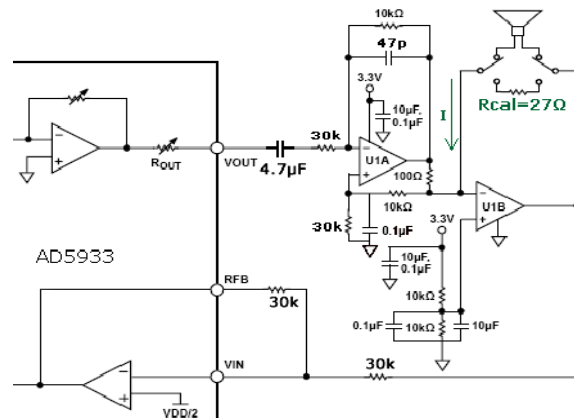
#### A. AD5933 Impedance Converter

AD5933 je specijalizovano kolo namenjeno preciznom merenju kompleksne impedanse, a objedinjuje generator sinusnog signala i na prijemnoj strani 12bit ADC i DSP jezgro koje vrši DFT i vraća podatke o realnom i imaginarnom delu merenog signala u odvojenim registrima (Sl. 2). Merni opseg impedanse je  $1k\Omega - 10M\Omega$ , frekventi  $1kHz - 100kHz$ , a tačnost  $0.5\% - 1\%$  [2].

Potreban frekventni opseg ( $20Hz - 30kHz$ ) može se dobiti dovodenjem nižeg takta na AD5933, dok se za proširenje mernog opsega impedanse ( $< 45\Omega$ ) koristi jednostavno kolo, prikazano na Sl. 3, a sastoji se od izvora konstantne struje i I-U konvertora [3]. Izlazni signal  $V_{out}$  dovodi se na ulaz modif. Holandovog strujnog izvora sastavljenog od  $U1A$  i pratećih otpornika, koji generiše struju proporcionalnu ulazu, a nezavisnu od impedanse potrošača. Struja dalje teče kroz merenu impedansu i pravi pad napona koji se dovodi na ulaz  $V_{in}$  AD5933. Putem CMOS preklopnika bira se put pobudne struje kroz kalibracioni otpornik  $R_{ca}$ , ili kroz priključenu merenu impedansu, što je potrbno za kasnije opisanu kalibraciju. Pored pomenutih komponenti na štampanoj pločici malih dimenzija ( $3cm * 5cm$ , Sl. 4) nalaze se i stabilizatori napona, filterski kondenzatori i ostali prateći elementi, kao i kontakti kojima se povezuje sa periferijama mikrokontrolera (I2C, ulaz za takt AD5933, pin za izbor  $R_{cal}$  i kontakti za dovodjenje napajanja ( $+5V/20mA$ )) izvedeni na dva 8-pinska IDC header-a.



Slika 2. Funkcionalni blok dijagram IDC-a AD5933



Slika 3. Dodatno el. kolo omogućava merenje malih vred. impedanse

Upravljanje merenjem obavlja se upotrebom nekoliko komandi koje se šalju sa mikrokontrolera, koji vrši i sve kalkulacije rezultata. Pri merenju se koristi kalibracija u svakoj frekventnoj tački, čime se merenje izvodi u dva koraka i značajno doprinosi tačnosti. U prvom koraku meri se kalibracioni otpornik, i na osnovu rezultata iz registara ( $Re$ ,  $Im$ ) dobija  $Gain Factor$  i fazni pomeraj sistema:

$$GainFactor = \frac{R_{CAL}}{\sqrt{Re^2 + Im^2}} \quad (2)$$

$$\varphi_{SYSTEM} = \arctg\left(\frac{Im}{Re}\right)$$

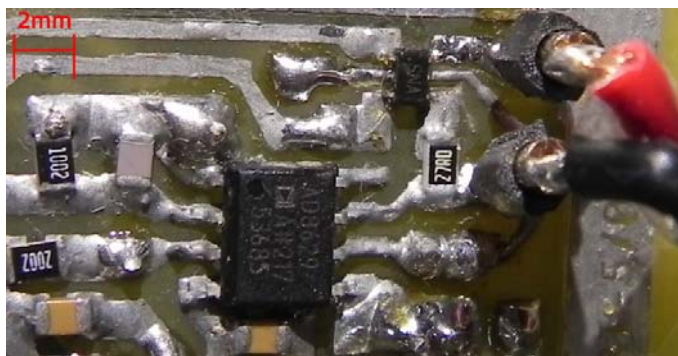
U drugom koraku signal se propušta kroz nepoznatu impedansu, i na osnovu novih merenih rezultata dobija se moduo i faza impedanse merenog zvučnika:

$$|Z_{ZV}| = GainFactor * \sqrt{Re^2 + Im^2} \quad (3)$$

$$\varphi_{ZV} = \arctg\left(\frac{Im}{Re}\right) - \varphi_{SYSTEM}$$

Ovim je merenje u jednoj frekventnoj tački završeno, i MCU izdaje komandu IDC-u da pređe na sledeću ili da završi merenje. Pri višim frekvencijama ukupno trajanje merenja u jednoj tački je oko 10ms. Međutim na najnižim frekvencijama, oko 20Hz, je i do 3s, čemu najviše doprinosi veliko trajanje periode signala, ali i veoma nizak takt AD5933.

Pobudna struja uvek teče u istom smeru kroz merenu impedansu, maksimalne trenutne jačine  $7.5mA$ , i za zadati opseg ( $4\Omega - 45\Omega$ ) rezultuje padom napona  $30mV - 337mV$  koji se dovodi na  $V_{in}$ , pojačava se 5 puta unutar AD5933 i na ulazu ADC-a iznosi  $150mV - 1.67V$  što je u okviru predviđenog opsega [2]. Struja nikada ne pada ispod  $0.8mA$ , a promena proporcionalna pobudnom signalu iznosi  $6.7mApp$ , tako da kroz zvučnik uvek teče mala struja polarizacije čime se dobija ujednačenije merenje, a eventualne unete greške se poništavaju kalibracijom u svakoj tački [3].



Slika 4. Detalj štampane pločice sa AD5933 i pratećom elektronikom

### B. Razvojna kartica “EasyMx Pro” sa ARM Cortex M3

Razvojna kartica proizvođača MIKROELEKTRONIKA namenjena TEXAS INSTRUMENTS-ovim *Stellaris*® ARM Cortex M3 i M4 mikrokontrolerima opremljena je JTAG programatorom i debagerom, tasterima i LEDiodama na svim GPIO portovima, dva USB-UART porta, USB HOST i DEVICE, Ethernet i CAN portovima, Audio kodekom, MicroSD karticom, kolor TFT ekranom rezolucije 320\*240 piksela sa TouchScreen-om, par Flash memorija i mnoštvom konektora. Mala rezolucija i dimenzije ekrana su nedovoljne za grafički prikaz krive impedanse, što je i osnovni razlog za realizaciju zasebne PC aplikacije za ovu namenu.

Od mnoštva perifera na razvojnoj kartici, koriste se samo USB-UART A, MicroSD kartica, i par tastera i LEDioda. Pločica sa AD5933 ubacuje se u “mikroBUS” utičnicu razvojne kartice koja ostvaruje veze sa najkorišćenijim periferijama i napajanjem.

Mikrokontroler na kartici je LM3S9B95, sa procesorskim jezgrom ARM Cortex M3 (Harvard arhitektura, baziran na ARMv7), sa taktom 50MHz (max. 80MHz), 256kB programske (Flash) i 96kB memorije za podatke (SRAM), Thumb-2 setom instrukcija, a odlikuje se i izuzetno niskom potrošnjom. Pored NVIC kontrolera prekida sa prioritizovanom obradom izuzetaka i automatskim čuvanjem i povraćanjem stanja procesora sa steka pri obradi ISR-a, poseduje i mehanizam za selektivan pristup memoriji (MPU) za potrebe OS-a. Mnogobrojne periferije su integrisane:

- USB 2.0 (OTG, Host, Device)
- Ethernet 10/100Mbps
- tri UART-a
- I2C, SPI, CAN kontrolere
- 65 GPIO portova
- osam PWM-ova
- pet 16-bitnih tajmera, RTC i WatchDog tajmer
- dva 10-bitna ADC, brojni analogni i digitalni komparatori

Iako je visoko-performanski, spada u jeftinije mikrokontrolere, i nema hardver za metematiku u pokretnom zarezu (FPU), ali ima hardver za množenje i deljenje čime se ove operacije nad 32-bitnim podatkom izvršavaju u jednom,

odnosno dva takta. *Stellaris*® robna marka označava da sadrži i ROM napunjen korisničkim bibliotekama napisanim na jeziku C, kao i BootLoader-om koji se koristi za inicijalno punjenje programa u Flash memoriju kada je prazna.

Za potrebe uređaja su iskorišćene sledeće periferije, dok su ostale deaktivirane zarad što manje potrošnje: UART\_0, I2C\_0, SSI\_0, PWM\_3 i nekoliko GPIO portova.

### C. Program za mikrokontroler

S obzirom da je uređaj namenjen prvenstveno snimanju krive impedanse zvučnika, podrazumevano je merenje u celom opsegu (20Hz–30kHz), a definisana su i dva dodatna opsega namenjena pre svega testiranju uređaja: visoki(3kHz–30kHz), i prošireni (10Hz–30kHz).

Ceo frekventni opseg je podeljen na 11 manjih, i definisano je 1100 mernih tačaka, od kojih je 700 u nižem delu opsega do 1kHz, čime se dobija visoka rezolucija (bolja od 1%), što je naročito značajno pri proračunu *TS* parametara niskotonskih zvučnika. Za merenje u potrebnom frekv. opsegu AD5933 zahteva spolja dovedeni takt, za čije se generisanje koristi PWM\_3 periferija, a kreće se u rasponu 20kHz - 6.25MHz.

Merenje je potpuno automatizovano, pokreće se pritiskom odgovarajućeg tastera, i po završetku podaci se snimaju u datoteku na MicroSD kartici. Podržani su uobičajeni FAT formati, a podaci o jednom merenju u celom opsegu zauzimaju svega 12kB. Trajanje merenja u celom opsegu je oko 25 minuta, dok je u visokom opsegu svega 2 minuta.

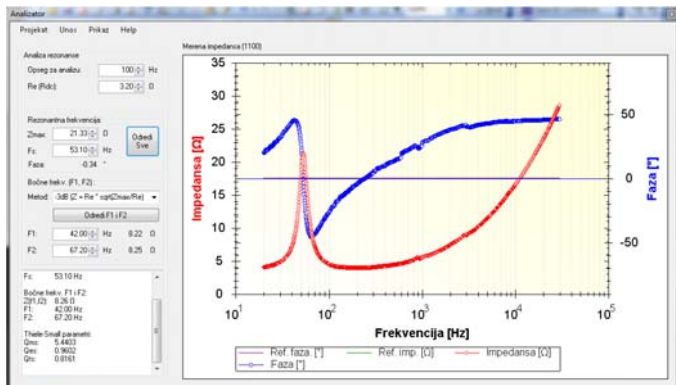
Radi lakšeg ispitivanja i analize rada uređaja, omogućena je komunikacija putem UART-a sa PC računarom. Putem terminala moguće je poslati posebne komande uređaju, kao što je zadavanje poizvoljnog frekventnog opsega i broja mernih tačaka, a u toku merenja uređaj na UART šalje mnoštvo bitnih podataka.

Za pisanje programa na jeziku C korišćeno je “Keil” razvojno okruženje kompanije ARM, uz oslanjanje na *Stellaris*® biblioteku funkcija u ROM-u. Upotrebom biblioteke smanjuje se veličina prevedenog koda, a programer se oslobađa direktnog pristupanja registrima. Program je potpuno portabilan među *Stellaris*® Cortex-ima, a uz manje izmene i na druge ARM mikrokontrolere, dok je veličina prevedenog koda oko 29kB.

Funkcija za izvršavanje jednog merenja prebrisavanjem zadatog opsega koristi kalibraciju u svakoj tački, i vrši po tri uzastopna merenja radi usrednjavanja rezultata, a koriste se izrazi (2) i (3). Broj merenja za usrednjavanje se može menjati, ali se pri testiranju pokazalo da povećanje ove vrednosti nema veliki uticaj na tačnost merenja, dok značajano povećava trajanje merenja.

### IV. PC APLIKIACIJA ZA ANALIZU REZULTATA

Uređaj može snimiti veliki broj rezultata merenja u datoteku na MicroSD kartici, koji se zatim grafički prikazuju i analiziraju na PC računaru. Aplikacija je napisana koristeći razvojno okruženje “Visual Studio 10”, programski jezik “C#” i “.NET 2.0” tehnologiju, tako da je vezana za Windows operativni sistem, ali se može rekompajlirati i za Linux.



Slika 5. Glavna forma aplikacije za analizu rezultata merenja

Pri unosu rezultata merenja u aplikaciju moguć je izbor jednog, ili više merenja radi usrednjavanja vrednosti. Proces analize rezonanse i proračuna  $TS$  parametara je automatizovan, podržava dve metode analize [4], a omogućeno je i korisničko korigovanje svih parametara merenog drajvera, dok se za proračun koriste izrazi (1). Korekcijom parametara omogućeno je otklanjanje eventualnih grešaka nastalih pri merenju i analizi, ali i simulacija proizvoljnog drajvera (Sl. 5).

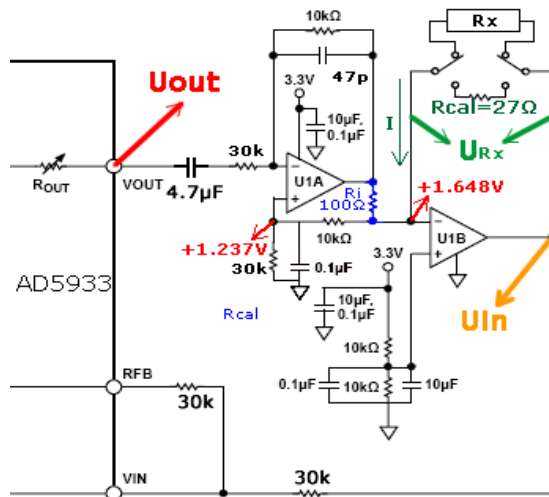
Aplikacija omogućava i kreiranje jednog virtuelnog, prostog, rednog ili paralelnog RLC kola sa idealnim komponentama. Impedansa virtuelnog kola prikazana je na grafiku uporedo sa rezultatima merenja, a njihova međusobna odstupanja u svakoj mernoj tački se izračunavaju i prikazuju u izveštaju. Virtuelno kolo je prvenstveno namenjeno testiranju uređaja, ali može biti veoma korisno pri izradi pasivne zvučnice skretnice za merenje RL i RC kola.

Opcija za unos spoljne kalibracije služi za unos podataka merenja referentnog otpornika, i njegove poznate vrednosti. Razlikom ovih vrednosti moguće je korigovati podatke o nepoznatoj merenoj impedansi, i smanji uticaj greške merenja.

## V. REZULTATI TESTIRANJA

Testiranje uređaja započeto je ispitivanjem rada dodatnog elektronskog kola za merenje malih impedansi, uz priključen merni otpornik  $R_x$  poznate vrednosti, a merenjem izlaznog, ulaznog i pada napona na otporniku (Sl.6). Uticaj parazitne kapacitivnosti i induktivnosti, koja se kod običnih metalfilm i SMD otpornika kreću oko desetina nH i pF, je potpuno zanemariv usled male otpornosti i relativno niskih učestanosti, i za detekciju bi trebali imati vrednosti reda desetina  $\mu\text{H}$  i nF.

Uslov kod AD5933 je da dovedeni napon na  $V_{in}$  bude sa biasom na polovini napona napajanja [2], zbog čega je neinvertujući ulaz  $U_{IB}$  vezan na razdelnik napona. Time je i invertujući ulaz  $U_{IA}$  na istom naponu i predstavlja virtuelnu masu, tako da kroz otpornike  $10\text{k}\Omega$  i  $30\text{k}\Omega$  teče struja ka masi i postavlja neinv. ulaz  $U_{IA}$  na  $1.237\text{V}$ . Isti napon je i na inv. ulazu  $U_{IA}$ , a bias od  $1.273\text{V}$  je dovoljan za punu amplitudu  $V_{out}$  od  $2\text{V}_{pp}$ .



Slika 6. Ispitivanje dodatnog elektronskog kola

Vrednosti otpornika u Holandovom strujnom izvoru izabrane su tako da izlazna struja bude  $I = U_{out} * 3.33\text{mA}$  (Sl. 6). U idealnom slučaju struja ne zavisi od impedanse potrošača, ali i minimalna odstupanja među otpornicima rezultuju velikim pogoršanjem rada strujnog izvora. Otpornici bi trebali imati odstupanje manje od 0.1%, što u trenutku realizacije uređaja nije bilo izvodljivo u potpunosti.

U odsustvu pobudnog signala  $U_{out}$  konstantna struja je zadata razlikom napona biasa  $U_{IA}$  i  $U_{IB}$  preslikanom na otpornik  $R_i$ , i iznosi  $4.144\text{mA}$  u idealnom slučaju. Dovođenjem signala  $2\text{V}_{pp}$  na  $U_{out}$  strujni izvor generiše promenljivu struju  $6.8\text{mApp}$ , čime se postže da kroz  $R_x$  struja teče uvek u istom smeru, promenljive jačine  $0.74\text{mA} - 7.54\text{mA}$ . Pad napona na  $R_x$  preko  $U_{IB}$  daje  $U_{in} = 1.648\text{V} + (R_x * I)$  i dovodi se na ulaz AD5933. Tabela I. prikazuje rezultate merenja napona u kolu, za nekoliko različitih  $R_x$ , bez signala i sa  $V_{out} = 2\text{V}_{pp}$  na  $1\text{kHz}$ . Po vrednostima u koloni  $I_{rx}$  se može videti da pobudna struja bez signala nije konstantna za sve vrednosti potrošača, i da varira svega oko 1%, dok se u koloni  $\Delta I_{rx}$  može videti da promeljiva struja značajno varira, što svakako unosi veliku grešku u merenje. Jedina povoljnost je što jačina struje  $I$  prvenstveno zavisi od rezistanse, dok reaktivni deo merene impedanse skoro da nema uticaj na izvor konst. struje, što se može iskoristiti za korekciju rezultata. Pobudni signal  $U_{out}$  i ulazni  $U_{in}$  su pri svim merenjima pokazali potpuno pravilne sinusoide očekivanih učestanosti.

TABELA I. REZULTATI ISPITIVANJA DODATNOG EL. KOLA

$R_x$ [ $\Omega$ ]	Bez pobudnog signala ( $U_{out} = 0\text{V}$ )			$U_{out} = 2\text{V}_{pp}$	
	$U_{rx}$ [mV]	$I_{rx}$ [mA]	$U_{in}$ [V]	$\Delta U_{in}$ [mVpp]	$\Delta I_{rx}$ [mApp]
2.88	11.9	4.13	1.662	22	7.64
4.45	18.4	4.13	1.669	32	7.19
8.05	33.3	4.14	1.684	57	7.08
13.55	56.2	4.14	1.706	93	6.86
26.95	111.6	4.14	1.762	184	6.83
27.05	112.0	4.14	1.762	184	6.80
31.50	130.3	4.13	1.780	214	6.79
35.10	145.3	4.14	1.796	238	6.78
40.60	168.2	4.14	1.818	274	6.75

Zatim su uređajem obavljena merenja u celom frekv. opsegu nad istim setom ref. otpornika, a podaci analizirani PC aplikacijom. U tabeli II. dati su rezultati ovog merenja, i to referentna vrednost  $R_x$ , srednja vrednost merene impedanse u celom opsegu  $Z_{sr}$ , i apsolutna vrednost greške  $|Z_{sr}-R_x|$ . Može se uočiti da je greška merenja minimalna pri merenju otpornika vrednosti bliske kalibracionom otporniku  $R_{cal}=27\Omega$ , i udaljavanjem raste. Apsolutna vrednost greške pri merenju otpornika  $13.5\Omega - 35\Omega$  iznosi manje od  $0.25\Omega$ , a za ceo opseg do  $45\Omega$  iznosi manje od  $0.5\Omega$ , što je pri merenju malih otpornosti predstavlja značajnu grešku.

Dalje ispitivanje uređaja obavljeno je merenjem različitih, prvenstveno paralelnih RC, ali i drugih kola, a svi rezultati pokazuju sličnu grešku merenja kao i kod merenja otpornika, a ustanovljeno je i ograničenje merenja faznog pomeraja na  $\pm 50^\circ$ . Ukoliko je faza impedanse na pobudnoj frekv. van ovog opsega, merena vrednost faze ima veliku grešku. Pri merenju zvučnika od interesa je prvenstveno kretanje faze oko nule na rezonantnoj frekvenciji, tako da ograničen opseg merenja faznog pomeraja nije naročito važan za ovu primenu.

Bez korekcije rezultata uređaj može meriti impedansu u opsegu  $15\Omega - 35\Omega$ , faze  $\pm 50^\circ$ , sa apsolutnom greškom do  $0.15\Omega$  i  $4^\circ$ . Veći opseg vrednosti uz zadržavanje solidne tačnosti može se postići naknadnom korekcijom rezultata za vrednost odstupanja merene i stvarne vrednosti referentnog otpornika približnog rezistansi merene impedanse, čime se ublažava uticaj razdešenosti strujnog izvora. Čisto kapacitivna ili induktivna kola nije moguće meriti ovim uređajem.

Kriva impedanse, dobijena opisanim uređajem, snimljena u celom frekventnom opsegu (20Hz-30kHz), zvučnog drajvera "EI-Akustika AZ770/72/B4", prikazana je na Sl. 5. Podaci dobijeni automatizovaniom analizom rezonanse u aplikaciji veoma su približni kataloškim podacima o merenom drajveru, sa razlikama do nekoliko procenata. Mereni drajver ima veoma pogodan opseg impedanse za merenje ovim uređajem, što u praksi neće uvek biti slučaj.

TABELA II. REZULTATI I GREŠKE MERENJA UREĐAJEM

ref. $R_x$ [ $\Omega$ ]	mereno $Z_{sr}$ [ $\Omega$ ]	$ Z_{sr}-R_x $ [ $\Omega$ ]
2.88	3.32	0.44
4.45	4.85	0.40
8.05	8.39	0.34
13.55	13.80	0.25
26.95	26.95	0.00
27.05	27.05	0.00
31.50	31.40	0.10
35.10	34.95	0.15
40.60	40.40	0.20
43.50	43.01	0.49
45.05	44.55	0.50

## VI. ZAKLJUČAK

Opisani princip merenja impedanse primenom mikrokontrolera i specijalizovanog čipa AD5933 je veoma pogodan za snimanje krive impedanse zvučnika, ali bi hardver uređaja trebalo dalje unaprediti u cilju povećanja tačnosti i proširenja mernog opsega  $2\Omega - 200\Omega$ , čime bi bilo moguće meriti sve postojeće dinamičke drajvere.

Stabilniji strujni izvor, i zamena postojećeg U-I konvertora preciznim senzorom pada napona sa instrumentalnim op. pojačavačem bi mogla rešiti mnoge uočene izvore grešaka. Takođe, potrebno je postaviti veći broj preciznih kalibracionih otpornika i implementirati funkciju za izbor automatskog opsega merenja, čime bi se značajno mogao proširiti opseg uz zadržavanje najbolje tačnosti.

## ZAHVALNICA

Projekat je realizovan kao diplomski rad u okviru osnovnih studija, iz predmeta Mikroprocesorski softver, pod mentorstvom profesora dr. Milana Mijalkovića, kome autor posebnu zahvalnost duguje za obezbeđenu razvojnu karticu, pored korisnih sugestija.

## LITERATURA

- [1] Rod Elliott – "Measuring loudspeaker parameters" - <http://sound.westhost.com/tsp.htm>
- [2] Analog Devices – "AD5933 Data Sheet", Rev. D, 2011.
- [3] Analog Devices – "AN-843: Measuring a loudspeaker impedance profile using AD5933", Rev. A, 2007.
- [4] Claus Futtrup – "Driver Parameter Calculator Manual" - <http://home1.stofanet.dk/cfuttrup/dpc/dpc.htm>
- [5] Robert A. Pease – "A comprehensive study of the Howland current pump", Analog Devices, *Application Note 1515*, 2008.

## ABSTRACT

Subject of this work is the realization of an impedance measurement device, especially designed for loudspeaker impedance curve measurement. It is based on microcontroller *ARM Cotrex M3*, and a special-purpose chip *AD5933*. Device allows for measurement of the complex impedance up to  $45\Omega$ , sweeping frequency range 20Hz - 30kHz, and saving data to MicroSD card. Supporting PC application is used for analysis and graphical representation of data, and speaker parameters calculation.

## IMPEDANCE MEASUREMENT DEVICE BASED ON MCU

Boris Milosavljević