

Strujna sonda za osciloskop na bazi strujnog modula sa Holovim senzorom

Dejan Janjić
Tehnički remontni zavod Čačak
Čačak, Srbija
dzandz@gmail.com

Aleksandar Kovačević
Katedra za opštu elektrotehniku i elektroniku
Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu
Čačak, Srbija
aleksandar.kovacevic@ftn.kg.ac.rs
ORCID 0000-0002-9984-8989

Srdan Divac
Katedra za opštu elektrotehniku i elektroniku
Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu
Čačak, Srbija
srdjan.divac@ftn.kg.ac.rs
ORCID 0000-0002-7093-9529

Branko Koprivica
Katedra za opštu elektrotehniku i elektroniku
Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu
Čačak, Srbija
branko.koprivica@ftn.kg.ac.rs
ORCID 0000-0001-5014-6866

Abstract—Cilj ovog rada je da se prikaže način izrade strujne sonde za osciloskop bazirane na komercijalnom strujnom modulu sa Holovim senzorom. Strujna sonda je namenjena za merenje stalne struje u opsegu do 5 A. Osim detalja vezanih za projektovanje i izradu sonde, u radu su prikazani i rezultati njenog ispitivanja, sprovedenog sa ciljem određivanja njene tačnosti. Očitavanja struje sa sonde su upoređena sa očitavanjem sa referentnog univerzalnog mernog instrumenta i izvršena je odgovarajuća analiza rezultata. Dobijeni rezultati, detalji njihove analize i odgovarajući zaključci su dati u radu.

Ključne reči—strujna sonda, osciloskop, stalna struja, tačnost

I. UVOD

Merenje električne struje pomoću Holovih senzora je široko rasprostranjena metoda koja se može primeniti u značajnom broju primera iz inženjerske prakse u elektrotehnici. Značajnu ulogu u široj rasprostranjenosti njihove primene imala je pojava Holovih senzora u formi integrisanih kola sa malim dimenzijama i odličnim radnim karakteristikama. Takođe, ovi senzori su se pokazali kao robusni i pouzdani u radu, a osim toga pružaju i galvansku odvojenost mernog dela sistema.

Senzori struje zasnovani na Holovom efektu postoje u različitim konfiguracijama i imaju širok spektar primena [1]. Zbog svojih prednosti, kao što su male dimenzije i mali gubici pri povezivanju, Holovi senzori struje koriste se u sistemima poput sistema za upravljanje baterijama i napajanjima [2]. U solarnim i vetroelektranama koriste se u povratnoj sprezi, kako za praćenje maksimalne snage, tako i za sinhronizaciju sa elektro-energetskom mrežom [3]. Zbog sposobnosti merenja struje bez galvanske veze, kao i mogućnosti merenja i stalne i naizmjenične struje, princip Holovog senzora se koristi u električnim alatima poput klešta za merenje struje [4]. Zahvaljujući širokom frekvencijskom opsegu i visokoj tačnosti, koriste se u električnim pogonima u zatvorenoj povratnoj sprezi za potrebe upravljanja i zaštite [5], [6].

U prethodnom istraživanju je izvršeno laboratorijsko ispitivanje strujnog modula sa Holovim senzorom oznake CS10A-02, proizvođača Sentronis [7], sa ciljem ispitivanja njegove tačnosti i mogućnosti primene u merenju vremenskog

oblika naizmjenične struje primenom virtuelne instrumentacije. Iako je utvrđeno da su odstupanja efektivne vrednosti bila nešto veća od očekivanih, očitavanje vremenskih oblika struje su bila veoma dobra. Primena ovakvih mernih modula za merenja pomoću računara je olakšana jer akviziciona kartica može i da generiše napon potreban za rad modula, a može i da očitava analogni signal sa izlaza. Međutim, primena modula za merenje sa osciloskopom nije tako jednostavna, jer ne postoji mogućnost napajanja modula pomoću osciloskopa. Potreba za praćenjem struje osciloskopom je veoma značajna u toku razvoja nekog sistema, jer se mogu uočiti neželjene brze promene, razne smetnje ili oscilacije. Ovakve brze promene se često ne mogu snimiti akvizicionim karticama, čija je brzina smplovanja često manja od 1 MS/s, dok osciloskopi lako postižu i hiljadu puta veće brzine. Komercijalne sonde za osciloskop imaju značajnu cenu (neretko i nekoliko desetina hiljada €). Dakle, od interesa je projektovati jeftinu sondu za osciloskop, čije su karakteristike uporedive sa strujnim modulima sa Holovim senzorom.

Projektovanje takve sonde zahteva projektovanje dodatne elektronskog kola koja će obezbediti adekvatno napajanje sonde, obradu signala prema određenim tehničkim zahtevima i odgovarajući priključak na osciloskop. U ovom radu će biti prikazana električna šema veza projektovanja dodatnog elektronskog kola za napajanje sonde, elektronskog kola za podešavanje pojačanja i filtriranje signala. Takođe, biće prikazane i odgovarajuće fotografije pojedinih delova sonde.

Dodatno, biće prikazano merno kolo za ispitivanje tačnosti pokazivanja sonde, prilagođeno merenju pomoću računara primenom Arduino Nano modula. S obzirom na to da je sonda namenjena za merenje stalne struje u opsegu do 5 A, u tom opsegu će biti i izvršeno odgovarajuće ispitivanje sonde.

Rezultati ispitivanja, njihova analiza i odgovarajuća diskusija će takođe biti prikazani u radu. Osim toga, biće razmatrane i uočene prednosti i mane izrađene sonde.

II. STRUJNA SONDA I MERNI SISTEM

Sprovedeno istraživanje se sastoji iz dva dela, i to:

1. projektovanja i izrade strujne sonde za osciloskop i
2. ispitivanja tačnosti pokazivanja strujne sonde.

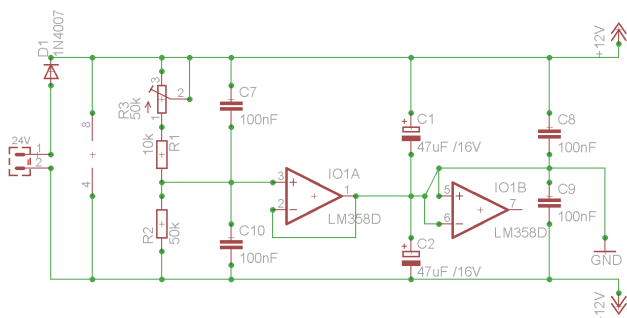
Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-137/2025-03/200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.



Strujna sonda je namenjena za merenje stalne struje do maksimalne vrednosti od 5 A, a ispitivanje tačnosti sonde je izvršeno poređenjem sa referentnim univerzalnim mernim instrumentom.

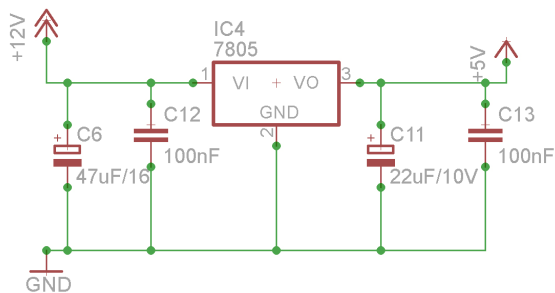
A. Projektovanja i izrade strujne sonde

Strujna sonda je projektovana i izrađena prema elektronskim šemama veza prikazanim na Sl. 1-3. Napajanje sonde se obezbeđuje iz Li-ion baterije od 3,7 V, koja je povezana na podizač pretvarač (boost converter) koji je podešen da na izlazu daje napon od 24 V. Kao podizač napona je korišćen gotov modul oznake MT3608, dostupan na domaćem tržištu elektronskih komponenti. Elektronsko kolo koje pretvara napon od 24 V u simetričan napon od ± 12 V sa virtuelnom masom je prikazano na Sl. 1.



Sl. 1 Pretvarač napona od 24 u napon od ± 12 V sa virtuelnom masom.

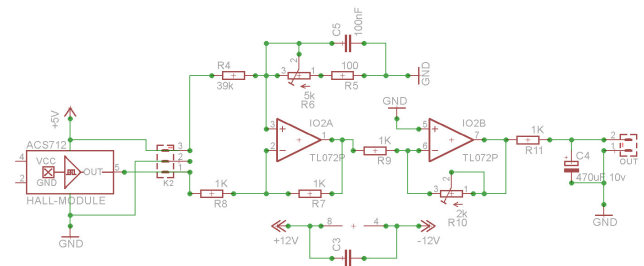
Za napajanje strujnog modula sa Holovim senzorom, oznake ACS712 [8], potreban je napon od 5 V, pa je bilo potrebno realizovati i stabilizator napona za 5 V. Elektronsko kolo stabilizatora sa odgovarajućim filterskim kondenzatorima je prikazano na Sl. 2.



Sl. 2 Stabilizator napona od 5 V.

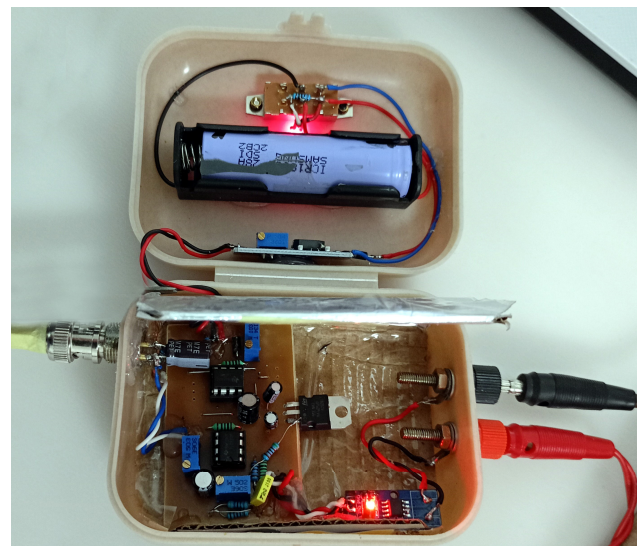
S obzirom na to da strujni modul ACS712 generiše takozvani „quiescent voltage“ od 2,5 V na izlazu kada nema ulazne struje (0 A na ulazu), bilo je potrebno eliminisati taj napon, tako da se dobije 0 V kada je struja 0 A. To je realizovano pomoću prvog operacionog kola tipa TL072 (označeno sa IO2A), kako je to prikazano na Sl. 3.

Drugo operaciono kolo (označeno sa IO2B) vrši pojačanje napona do 2 puta, kako bi njegova vrednost bila bolje prilagođena ostatku mernog kola. Na šemi se može uočiti i odgovarajući filter izlaznog napona koji smanjuje oscilacije izlaznog napona i povremene brze impulse koje nastaju usled spoljašnjih smetnji.



Sl. 3 Stabilizator napona od 5 V.

Fotografija realizovane strujne sonde za osciloskop je prikazana na Sl. 4. Sve komponente su smeštene u plastično kućište. Sa jedne strane kućišta se nalaze ubodni priključci, preko kojih se sonda povezuje u električno kolo u kojem se struja meri. Sa druge strane se nalazi priključak za direktno povezivanje sa osciloskopom preko standardnog kabla sa BNC konektorom na oba kraja. Na kućištu je sa spoljašnje strane dostupan prekidač za uključivanje i isključivanje sonde.



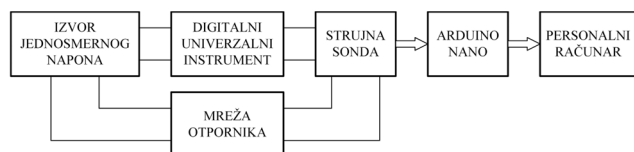
Sl. 4 Fotografija realizovane strujne sonde za osciloskop.

B. Ispitivanja strujne sonde

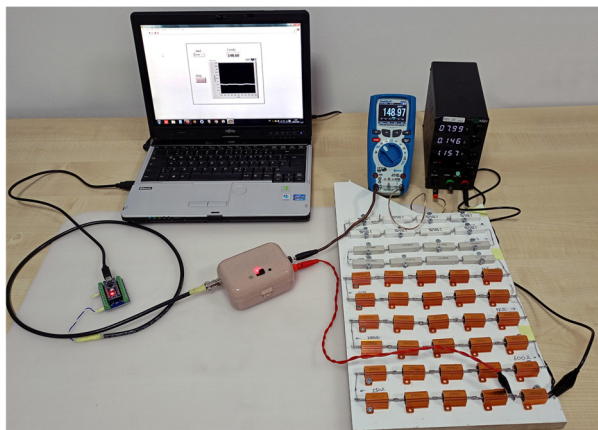
Upotrebljeni ACS712 modul je predviđen za merenje maksimalne jednosmerne i naizmenične struje vrednosti do 5 A. Naznačena osetljivost modula je 185 mV/A, pa izlazni napon može imati vrednosti u opsegu od 1,575 V do 3,425 V. Pojačanje operacionog kola IO2B je podešeno tako da se postigne osetljivost od 1 V/A. S obzirom na to da je za merenje napona u opsegu od 0 do 5 V pogodno koristiti gotove mikrokontrolerske module proizvođača Arduino, ispitivanje strujne sonde je sprovedeno primenom Arduino Nano modula, koji je bio povezan na personalni računar sa LabVIEW programom.

Merno kolo za ispitivanje strujne sonde pri merenju stalne struje u opsegu od 5 A je uključivalo stabilni izvor stalnog napona (60 V, 5 A) sa mogućnošću limitiranja struje, tablu sa otpornicima, referentni univerzalni merni instrument za merenje struje sa poboljšanom tačnošću i preciznošću PeakTech 3440, Arduino Nano mikrokontrolerski modul, personalni računar i

strujnu sondu. Blok šema veza mernog kola za ispitivanje je prikazana na Sl. 5, a fotografija korišćene opreme na Sl. 6.

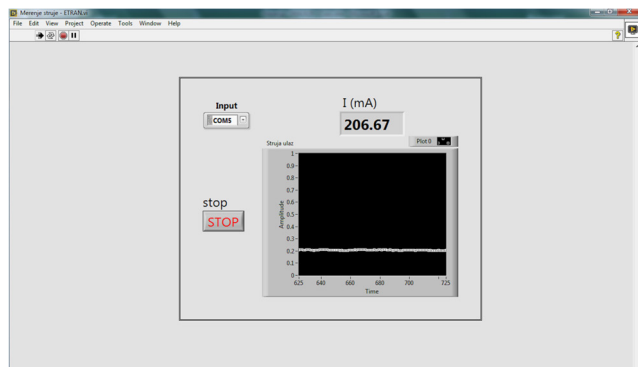


Sl. 5 Blok šema mernog kola za ispitivanje strujne sonde.



Sl. 6 Fotografija opreme za ispitivanje strujne sonde.

Fotografija ekrana računara u toku merenja je prikazana na Sl. 7. Na računaru se može očitati vrednost struje u mA sa preciznošću od 2 decimale. Takođe, može se grafički pratiti promena struje u vremenu, kako bi se uočile eventualne neželjene oscilacije izlaznog napona sonde.

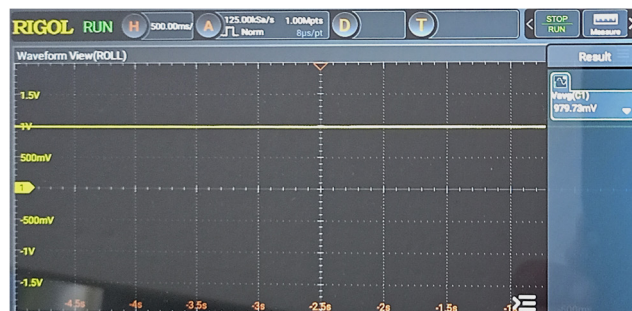


Sl. 7 Fotografija ekrana personalnog računara u toku merenja.

Na Sl. 8a je prikazana fotografija osciloskopa tokom merenja struje pomoću realizovane strujne sonde. Osim osciloskopa, na istoj fotografiji su prikazani i izvor jednosmernog napona i referentni univerzalni merni instrument. Na Sl. 8b je prikazana fotografija ekrana osciloskopa na čijoj desnoj strani se može očitati vrednost merenog napona od 979,73 mV, što odgovara struji od 979,73 mA. Pri tome, na Sl. 8a može se uočiti da je struja na referentnom univerzalnom mernom instrumentu istovremeno iznosila 1,001 A. Osim vrednosti struje, na fotografijama se uočava stabilan izlazni napon sonde (prikazan horizontalnom žutom linijom). U signalu se ne uočavaju brze promene ili prisustvo šuma, što dodatno potvrđuje kvalitet izrađene sonde.



a)



b)

Sl. 8 Fotografija a) osciloskopa, referentnog univerzalnog mernog instrumenta i izvora jednosmernog napona, b) ekrana osciloskopa.

III. REZULTATI ISPITIVANJA STRUJNE SONDE

Ispitivanje strujne sonde je sprovedeno na celom mernom opsegu, podešavanjem vrednosti struje na izvoru jednosmernog napona korišćenjem opcije strujnog ograničenja. Na izvoru su redom podešavane vrednosti maksimuma struje I_M od 50 mA do 4500 mA, kako je to prikazano u Tabeli I. Vrednost ove struje je očitavana na displeju koji se nalazi na prednjoj ploči.

Merenje stvarne vrednosti struje I_{RI} je vršeno digitalnim univerzalnim instrumentom PeakTech 3440 koji na opsegu od 500 mA ima grešku $\pm(0,3\%+8 \text{ dgt})$, pri čemu vrednost dgt iznosi 0,01 mA, a na opsegu od 10 A grešku $\pm(0,5\%+8 \text{ dgt})$, kada dgt iznosi 0,001 A. S obzirom na to da je sonda projektovana od komercijalnih komponenti čije su karakteristike srednjeg nivoa kvaliteta, projektovano je da strujna sonda ne pravi grešku veću od 1,5% (od mernog opsega - 5000 mA). Upotrebljeni referentni merni instrument ima grešku koja je znatno manja od 1,5%, pa je bilo opravdano upotrebiti ga za ispitivanje tačnosti sonde.

Merenje struje pomoću strujne sonde, I_S , je realizovano pomoću Arduino Nano mikrokontrolera povezanog na personalni računar sa LabVIEW programom. Napisan je odgovarajući programski kod za mikrokontroler i kreiran je virtuelni instrument koji će prikazivati vrednost struje na svom prednjem panelu. Mikrokontroler meri izlazni napon sonde, koji se zatim prosleđuje računaru preko USB porta, a virtuelni instrument preračunava vrednost napona u vrednost struje prema podešenoj osetljivosti strujne sonde.

Podešavanje osetljivosti strujne sonde pomoću promenljivog otpornika koji je u sprezi sa operacionim kolom IO2B, na vrednost od 1 V/A, izvršeno je pri merenju struje od 100 mA, a inicijalno provereno pri merenju struja vrednosti od 500 mA i od 1 A. Kako su pri tome ostvarena zadovoljavajuća očitavanja na

prednjem panelu virtuelnog instrumenta, prešlo se na dalje ispitivanje tačnosti pokazivanja sonde na celom mernog opsegu.

Rezultati ispitivanja tačnosti su prikazani u Tabeli I, pri čemu su prikazana očitavanja struje I_M podešene na izvoru napona, stvarne struje I_{RI} očitane na referentnom mernom instrumentu i merene struje I_S očitane sa prednjeg panela virtuelnog instrumenta.

TABELA I. REZULTATI ISPITIVANJA STRUJNE SONDE

I_M [mA]	I_{RI} [mA]	I_S [mA]	ΔI [mA]	δI [%]
50	54.92	53.98	-0.94	-1.71
100	103,32	101,72	-1,60	-1,55
150	153.27	150.75	-2.52	-1.64
200	204.55	201.29	-3.26	-1.59
250	252,03	249,46	-2,57	-1,02
300	301,09	297,20	-3,89	-1,29
350	352,72	348,60	-4,12	-1,17
400	402,34	398,71	-3,63	-0,90
450	452,37	446,67	-5,70	-1,26
490	495.89	490.54	-5.35	-1.08
I_M [mA]	I_{RI} [A]	I_S [mA]	ΔI [mA]	δI [%]
510	0,513	508,31	-4,69	-0,91
1000	1,002	995,11	-6,89	-0,69
1500	1,501	1487,78	-13,22	-0,88
2000	2,002	1987,29	-14,71	-0,73
2500	2,502	2478,01	-23,99	-0,96
3000	3,004	2981,43	-22,57	-0,75
3500	3,503	3474,10	-28,90	-0,83
4000	4,004	3988,27	-15,73	-0,39
4500	4,505	4490,71	-14,29	-0,32

Osim očitanih struja, u tabeli su prikazane i vrednosti greške ΔI i relativne greške δI izračunate primenom (1) i (2), respektivno:

$$\Delta I = I_S - I_{RI}, \quad (1)$$

$$\delta I [\%] = 100 \frac{I_S - I_{RI}}{I_{RI}}. \quad (2)$$

IV. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabeli I može se uočiti da vrednost relativne greške prelazi zadatu granicu od 1,5% samo u 4 slučaja (vrednosti su od -1,55 do -1,79, označene su podebljanim brojevima). Ovi rezultati su dobijeni pri merenju manjih struja, do 200 mA. Takođe, uočava se da je vrednost relativne greške manja od 1% u svim merenjima preko 500 mA. Na osnovu ovih rezultata, može se zaključiti da izrađena strujna sonda za osciloskop zadovoljava projektovanu tačnost na celom mernom opsegu sa usvojenom klasom tačnosti 1.

Tokom merenja je utvrđeno da postoje određene oscilacije u izlaznom naponu sonde, čije vrednosti dostižu $\pm 2,5$ mV. Naime, prilikom izrade sonde su vršene promene na izlaznom filteru kako bi se ove oscilacije smanjile, ali njihovo smanjenje ispod navedenog nivoa ipak nije postignuto. Pretpostavka je da bi se one mogle dodatno smanjiti korišćenjem kvalitetnijih komponenti, pre svega podizача napona, strujnog modula sa Holovim senzorom i mikrokontrolera.

Smanjenje oscilacija je delimično postignuto usrednjavanjem 5 uzastopnih merenja tokom ispitivanja sonde (što je i uobičajeni broj ponavljanja merenja), koje je realizovano u LabVIEW programu. Dodatnim povećanjem broja usrednjavanja nije se postiglo smanjenje oscilacija, a značajno se produžilo vreme između dva očitavanja.

Poboljšanje bi se moglo postići i korišćenjem bolje naponske reference u eliminaciji napona od 2.5 V (koji se dobija u odsustvu merene struje), koja ima veću stabilnost i manji šum od stabilizatora 7805, Sl. 2. Tako bi se mogli ostvariti bolji mereni rezultati, pogotovo pri malim vrednostima struje. Ovakvo rešenje će biti primenjeno u poboljšanoj verziji sonde koja će naknadno biti projektovana i izrađena.

Uočeno je i da je vrednost greške ΔI srazmernog reda veličini rezolucije mikrokontrolera, koja iznosi 10 bita (1024 nivoa), odnosno 1,1 mV za merenja do 1 A i 4,9 mV za merenja od 1 A do 5 A. Za potrebe postizanja bolje rezolucije merenja mogao bi se upotrebiti dodatni A/D konvertor, na primer ADS1115 sa rezolucijom od 16 bita (65 536 nivoa) ili ADS1220 sa rezolucijom od 24 bita (16 777 216 nivoa).

Greška merenja se može iskazati i na drugi način, preko dve komponente, primenom (3) i (4):

$$\Delta I = \pm (M\% I_S + N\% I_{OPS}), \quad (3)$$

$$\Delta I = \pm (M\% I_S + ND), \quad (4)$$

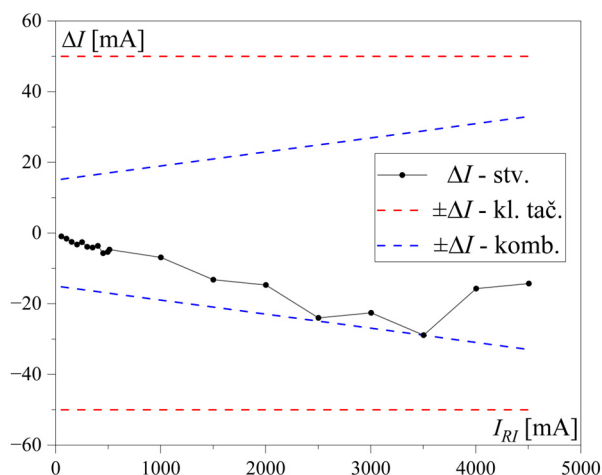
gde je $M\%$ procenat dela greške koja zavisi od očitane struje I_S , $N\%$ je procenat dela greške koja zavisi od opsega merenja I_{OPS} , N je broj digita, D je vrednost digita pri očitavanju struje I_S .

Uzimajući u obzir rezultate merenja prikazane u Tabeli I, za iskazivanje kombinovane (složene) greške primenom (3) i (4) dobijene su sledeće vrednosti: $\Delta I = \pm (0,4\% I_S + 0,3\% I_{OPS})$ i $\Delta I = \pm (0,4\% I_S + 15D)$, respektivno, kada D iznosi 1 mA. Oba izraza daju iste vrednosti greške, odnosno međusobno su ekvivalentni.

Ovako određena greška bolje opisuje raspodelu greške u poređenju sa greškom usled klase tačnosti. Grafička ilustracija raspodele greške je prikazana na Sl. 9. Upoređena je greška usled klase tačnosti 1, kombinovana greška data sa (3) ili (4) i stvarna greška dobijena u sprovedenim merenjima (Tabela I).

Uočava se da greška usled klase tačnosti ima stalnu vrednost na celom opsegu merenja, konkretno 50 mA, i znatno je veća od stvarne greške. Usvajanjem prve manje vrednosti klase tačnosti od 0,5 greška bi se smanjila na 25 mA, i približila vrednosti stvarne greške. Ali, za jedan slučaj merenja bi bila manja od stvarne greške, što nije prihvatljivo. Kombinovana greška bolje prati vrednosti stvarne greške, pri čemu se uočavaju dva slučaja

kada one imaju skoro jednake vrednosti (za vrednosti struje 2500 mA i 3500 mA, respektivno).



Sl. 9 Poređenje stvarne greške, greške usled klase tačnosti i kombinovane greške.

V. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana realizacija jeftine strujne sonde za osciloskop, zasnovane na modulu sa Holovim senzorom ACS712. Predloženo rešenje omogućava merenje stalne struje u opsegu do 5 A uz zadovoljavajuću tačnost za većinu praktičnih primena.

Realizovano je elektronsko kolo za stabilno napajanje ACS712 modula, uklanjanje neželjenog napona pri nultoj struji i pojačanje izlaznog napona za bolju prilagođenost merenjima sa osciloskopom, ili nekim drugim mernim instrumentom. Ispitivanjem je potvrđeno da projektovana sonda ima relativnu grešku manju od 1,5% (zadata granica) u relativno širokom opsegu (od 250 mA do 5 A), pri čemu je vrednost relativne greške manja od 1% u svim merenjima preko 500 mA. Pri tome, povećana greška (iznad 1,5%) je konstatovana samo u 4 slučaja kod nižih vrednosti struja, za 200 mA i manje. **Određena je klasa tačnosti sonde, koja iznosi 1.**

Greška je izražena i u kombinovanoj formi, sa dve komponente, prve koja je relativnog oblika (u odnosu na merenu vrednost) i druge koja se odnosi na rezoluciju ili opseg merenja. Na ovaj način je dobijena bolja deklaracija greške, koja bolje iskazuje kvalitet realizovane strujne sonde.

Dodatno smanjenje greške se verovatno može ostvariti upotrebom kvalitetnijih komponenti, kao i korišćenjem bolje naponske reference. Dalja istraživanja bi mogla biti usmerena na primenu modula boljeg kvaliteta i rezolucije mikrokontrolera, čime bi se dodatno unapredila preciznost i pouzdanost ovakve sonde i u laboratorijskim i u industrijskim merenjima.

LITERATURA

- [1] S. Ziegler, R.C. Woodward, H.H.C. Iu, and L.J. Borle, "Current Sensing Techniques: A Review." IEEE Sensors Journal, Vol. 9, No. 4, pp. 354-376, April 2009.
- [2] Allegro MicroSystems, LLC. Hall effect Current Sensing in Electric and Hybrid Vehicles, 2013.
- [3] Allegro MicroSystems, LLC. New Approaches to High-Efficiency Current Sensing: Integrated Hall Sensor ICs Save Power and Space, 2013.
- [4] Fluke Corporation. FLUKE, February 2018.

<http://en-us.fluke.com/products/clamp-meters/fluke-376-fc-true-rms-acdc-clamp-meter-with-iflex.html>, pristupljeno u aprilu 2025. godine.

- [5] Allegro MicroSystems, LLC. Advanced Hall-effect Linear Current Sensor IC Enables High BW Sensing in Hybrid Electric Vehicles and other High Current Sensing Applications, 2015.
- [6] Allegro MicroSystems, LLC. Voltage Isolation in Variable Frequency Drives, 2016.
- [7] M. Luković, B. Koprivica, A. Milovanović, "Educational Laboratory Setup for Electric Current Measurement using Hall Effect Current Sensors," 7th International Scientific Conference Technics and Informatics in Education – TIE 2018, 25-27 May 2018, Čačak, Serbia, pp. 340-346.
- [8] ACS712 strujni senzor na bazi Holovog efekta, Uputstvo proizvođača, Allegro MicroSystems, USA, February 2024. <https://www.allegromicro.com/-/media/files/datasheets/acs712-datasheet.pdf>, pristupljeno u aprilu 2025. godine.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present the method of constructing a current probe for an oscilloscope, based on a commercial current module with a Hall sensor. The current probe is intended for the measurement of direct current in the range up to 5 A. In addition to the details related to the design and construction of the probe, the paper also presents the results of its testing, performed to determine its accuracy. The current readings from the probe were compared with the readings from the reference universal measuring instrument, and an appropriate analysis of the results was performed. The obtained results, details of their analysis, and corresponding conclusions are presented in the paper.

CURRENT PROBE FOR OSCILLOSCOPE BASED ON CURRENT MODULE WITH HALL SENSOR

Dejan Janjić, Srđan Divac, Aleksandar Kovačević,
Branko Koprivica