

Procena uticaja parazitnih impedansi kao posledice konstrukcionih rešenja kod etalona transfera otpornosti SR1010

Stefan Mirković

Katedra za električna merenja
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Republika Srbija
mirkovicst@uns.ac.rs
(orcid.org/0000-0002-3210-5603)

Dragan Pejić

Katedra za električna merenja
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Republika Srbija
pejicdra@uns.ac.rs
(orcid.org/0000-0002-8380-018X)

Bojan Vujičić

Katedra za električna merenja
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Republika Srbija
bojanvuj@uns.ac.rs
(orcid.org/0000-0002-3640-685X)

Marija Ivanković

Katedra za električna merenja
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Republika Srbija
ivankovic.b12.2019@uns.ac.rs
(orcid.org/0009-0009-0127-8235)

Abstract— Ovaj rad se bavi analizom etalona transfera električne otpornosti (tzv. Hamonov etalon) po pitanju ispitivanja njegove frekventijske karakteristike. Merenja su vršena sa analizatorom impedanse i snimana je zavisnost modula i faze etalona pri raznim konfiguracijama i uslovima. Kako je konstrukcija etalona predviđena za primenu u dc režimu, ovim istraživanjima pokušano je da se dođe do nekih zaključaka dosadašnjeg istraživanja primene ovog etalona u ac režimu. Rezultati merenja su pokazali da su pretpostavke o uticaju konstrukcije etalona na njegovu frekventijsku karakteristiku tačne, i da postoje parazitne kapacitivnosti i induktivnosti koje doprinose da se nazivna vrednost etalona menja sa frekvencijom.

Ključne reči—metrologija, impedansa, etalon, električna otpornost, hamon

I. UVOD

Pri merenju električne impedanse može se reći da definicija merene veličine igra suštinsku ulogu. U metrologiji, definicija je skup pravila za identifikaciju merene veličine na jedinstven način: kvantitet, opis stanja fenomena, tela ili supstance koja sadrži merenu veličinu, i sl. Prvi korak u merenju je specificirati merenu veličinu (engl. *measurand*) [5]. Svrha definicije merene veličine je da definiše geometrijski zatvorenu površinu i skup graničnih uslova sa ciljem da se eliminiše svaki neželjeni efekat. Neželjeni efekti mogu poticati od loših kontakata, priključnica, mernog instrumenta, elektromagnetnih karakteristika sredine itd. Često pri odabiru definicije postoji više opcija odnosno modela, pa se biraju oni koji su najpogodniji i koji se čine najrealnijim u tom konkretnom slučaju. Kada se priča o definisanju modela merene impedanse jedna od glavnih podela impedanse je na tzv. *n-terminal* i tzv. *n-terminal-pair* modele [4].

II. MODELOVANJE IMPEDANSE

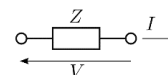
U daljoj analizi biće obrađeno nekoliko načina modelovanja impedanse sa ciljem da se vidi kako konfiguracija mernog kola može da utiče na rezultat merenja.

A. *n-terminalni model*

Kod ovog modela impedansa je definisana između dva odvojena provodnika koji se nazivaju *terminali*. Definicije sa 2,3,4 ili 5-terminalnim modelima se često primenjuju kod merenja električne otpornosti u jednosmernom režimu kao i kod merenja impedanse na mrežnim frekvencijama. Nije retka pojava da se u slučaju ovakvih modela merenja vrše sa neoklopljenim kablovima, kao i da se primenjuju jednostavni granični uslovi elektromagnetnog okruženja. Kako se frekvencija povećava, mnogi uslovi i efekti se menjaju, pa se o tome vodi računa.

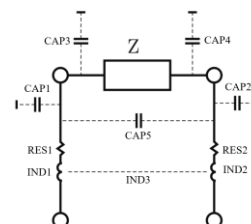
B. 2-terminalni model

2-terminalni model impedanse Z prikazan je na Sl. 1.



Sl. 1. 2-terminalni model

Kod ovog modela smatra se da se zanemaruju svi provodnici koji se nalaze između dva kraja nepoznate impedanse, kao i da ne postoje bilo kakvi elektromagnetni granični uslovi. Drugim rečima, zanemaruju se svi parametri koji imaju uticaj na merenje a koji nastaju između tela impedanse, okoline i provodnika. Ukoliko bi se neki od tih uticaja uzeli u obzir, ovaj model dobija sledeći oblik.

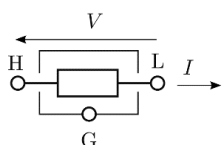


Sl. 2. 2-terminalni model bez zanemarivanja određenih uticaja

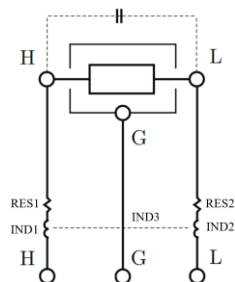
Sl. 2. prikazuje model gde su uzeti u obzir uticaji parazitnih kapacitivnosti između tela impedanse i svakog provodnika u odnosu na referentni potencijal-*ground* (CAP1, CAP2, CAP3 i CAP4), otpornosti provodnika (RES1 i RES2), samoinduktivnost i međuinduktivnost provodnika (IND1, IND2 i IND3), kao i kapacitivnost između provodnika (CAP5). Svi ovi uticaji zavise od položaja mehaničkih elemenata koji ih uzrokuju. U opštem slučaju, teško je izmeriti, pa čak i modelovati sve ove parametre, kao i što je teško reprodukovati postavku za merenje dva puta a da se dobiju isti uticaji. U slučajevima gde postoje čvrste veze na koje operater ne može da utiče ovaj problem ne postoji, dok u slučaju na primer postavke provodnika ka mernom instrumentu ovaj problem je skoro pa nemoguće rešiti po pitanju ponovljivosti.

C. 3-terminalni model

Kada se priča o 3-terminalnom modelu smatra se da se impedansa nalazi unutar provodne površine/oklopa odnosno tzv. *shield*-a ili *guard*-a koji takođe ima svoj terminal.



Sl. 3. 3-terminalni model



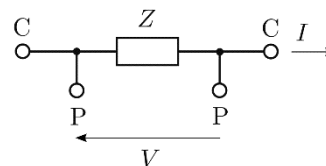
Sl. 4. 3-terminalni model bez zanemarivanja određenih uticaja

Svrha oklopa je da se pokuša da se umanjuje/eliminise, odnosno definiše kapacitivnost između tela impedanse i okoline. Da bi se ovo postiglo, terminali impedanse ne smatraju se više ekvivalentnim nego se obeležavaju najčešće sa *high* (H) i *low* (L), dok je terminal oklopa ovde obeležen sa G. Ovde se primenjuje granični uslov da je potencijal između L i G jednak nuli. Treba napomenuti da to ne znači da će L i G pri merenju biti kratko spojeni, nego da merni instrument pri merenju treba da postavi ove dve tačke na isti potencijal. U tom slučaju će primena oklopa imati smisla, uz napomenu da mora da se koristi merni instrument koji po svojoj konstrukciji omogućava traženi način povezivanja.

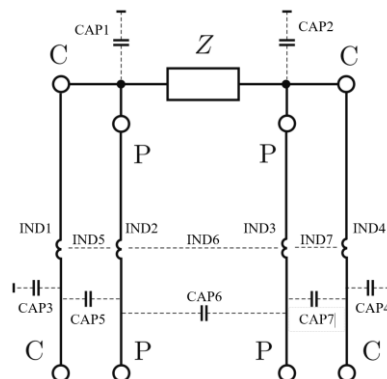
D. 4-terminalni model

Sledeći korak definicije i modelovanja je 4-terminalni model,

čiji je cilj da se umanje ili potpuno izuzmu uticaji serijske otpornosti i induktivnosti provodnika koji vode do tela merene impedanse.



Sl. 5. 4-terminalni model

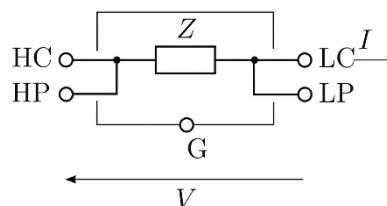


Sl. 6. 4-terminalni model bez zanemarivanja određenih uticaja

Ekvivalentni strujni terminali (C) su predviđeni da budu povezani na strujni izvor mernog instrumenta. Pad napona na merenoj impedansi meri se preko dva ekvivalentna naponska terminala (P). Uslov koji je potreban da bude ispunjen kako bi 4-terminalni model imao smisla je da struja kroz naponske terminale treba da bude jednak nuli. Sa Sl. 6 može se videti da se ovaj model suočava sa sličnim stvarima kao i 2-terminalni model, jer postoji parazitna kapacitivnost tela impedanse ka okolini (CAP1 i CAP2), samoinduktivnost provodnika (IND1, IND2, IND3 i IND4), međuinduktivnost provodnika (IND5, IND6 i IND7), kapacitivnost između provodnika i okoline (CAP3 i CAP4), kao i kapacitivnost između samih provodnika (CAP5, CAP6 i CAP7), itd. Kako bi se neki od ovih efekata potisnuli, pribegava se metodi ugradnje oklopa, kao što je slučaj kod 3-terminalnog modela. Na osnovu ovih zahteva definiše se i 5-terminalni model.

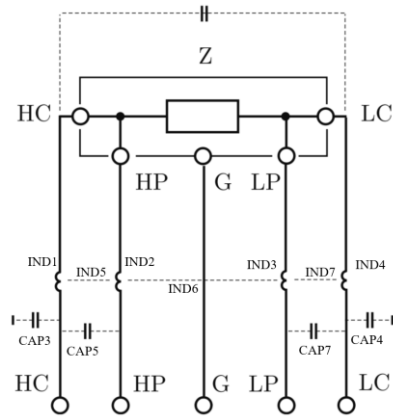
E. 5-terminalni model

Ovde su prisutni i strujni i naponski terminali, ali nisu više ekvivalentni, zbog postojanja oklopa.



Sl. 7. 5-terminalni model

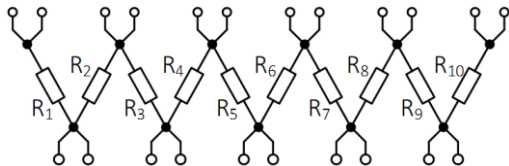
Terminali se ponovo dele na *high* (H) i *low* (L), gde svaka strana ima po jedan naponski (P) i jedan strujni (C). Strujni terminali su obeleženi sa HC i LC, a naponski sa HP i LP. Telo impedanse je oklopljeno, gde je terminal oklopa obeležen sa G. Granični uslov kako bi ovaj model imao svrhu jeste da je potencijal između LP i G jednak nuli.



Sl. 8. 5-terminalni model bez zanemarivanja određenih uticaja

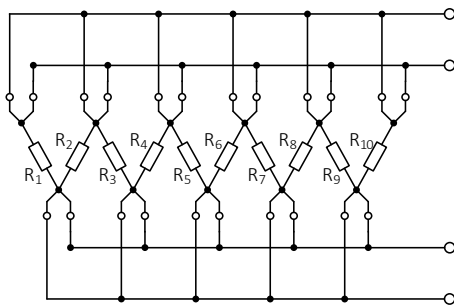
III. ETALON TRANSFERA OTPORNOSTI

U ovom istraživanju merenja su vršena nad etalonom transfera električne otpornosti (tzv. Hamonov etalon) proizvođača “esi” (današnji “*IET Labs*”) model SR1010. U [1], [2], [3] i [7] opisane su različite karakteristike ovih etalona. Ovi etaloni se sastoje od n redno vezanih otpornika iste nazivne vrednosti, gde je povezivanje obavljeno četvorožično tako da je omogućen direktan pristup bilo kojem naponskom i strujnom izvodu svakog otpornika pomoću ugrađenih terminala.



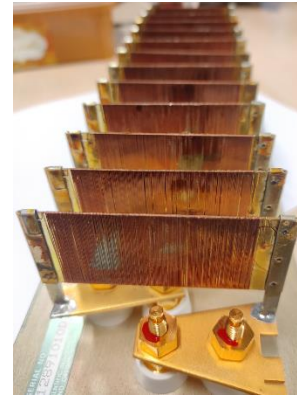
Sl. 9. Hamonov etalon u serijskoj vezi

Hamonova metoda za serijsko povezivanje podrazumeva korišćenje četvorokrajnih spojeva, a za prevezivanje serijske u paralelnu vezu korišćenje kratkospojnih šipki i paralelne kompenzacione šipke.



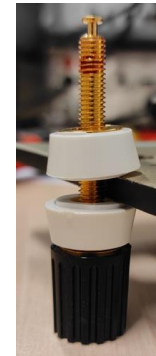
Sl. 10. Hamonov etalon u paralelnoj vezi

Unutar etalona nalazi se 12 otpornika nazivne vrednosti 1 k Ω . Na Sl. 11. nalazi se prikaz ovih žičanih otpornika koji su međusobno spojeni četvorožičnim terminalom.



Sl. 11. Otpornici unutar Hamonovog etalona

Otpornici su preko četvorožičnih terminala povezani sa dva vijka, koji prolaze kroz metalni poklopac na koji su pričvršćeni. Vijci sa druge svoje strane su zapravo konektori na koje se povezuju provodnici koji vode ka mernom instrumentu/kolu.



Sl. 12. Primer konektora etalona (provodnik se kači na crnom delu)

Svi elementi koji sačinjavaju ovaj etalon postavljeni su unutar metalnog kućišta. Metalno kućište i metalni poklopac su kratko spojeni na poseban konektor za *guard* pri merenju.

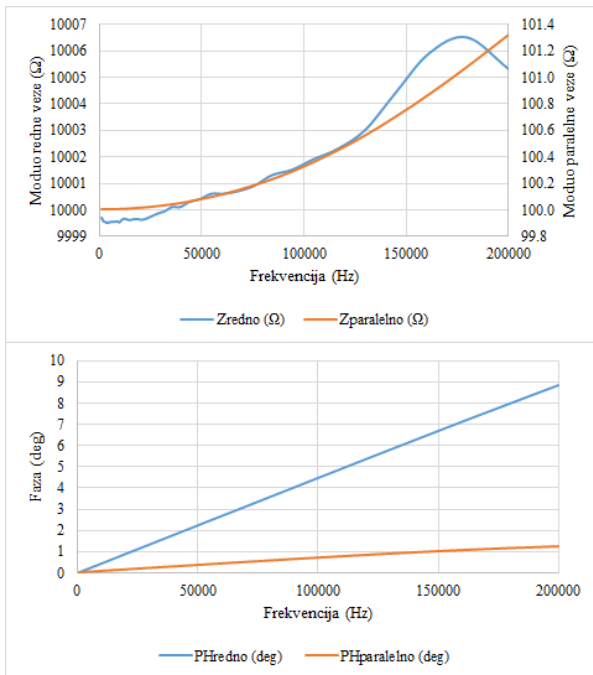


Sl. 13. Kućište etalona

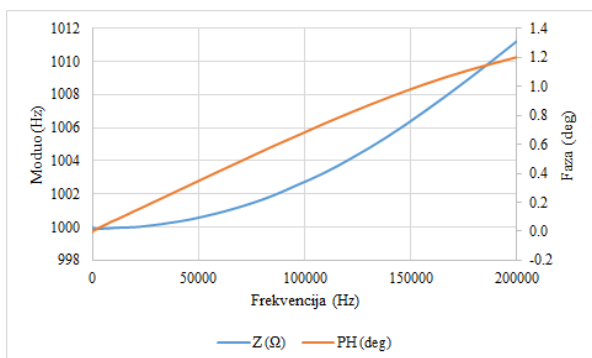
Cilj ovog istraživanja je bio da se procene frekvencijske karakteristike ovog etalona, odnosno njegovih delova, za opseg od 1 Hz do 200 kHz. Ovaj opseg frekvencija uzet je jer je ranijim opservacijama ustanovljeno da na ovom opsegu se već mogu primetiti uticaju parazaitnih efekata.

IV. REZULTATI MERENJA

Prvi deo merenja obuhvatao je snimanje frekvencijske karakteristike etalona u slučaju kada je konfigurisan u rednu i u paralelnu vezu.



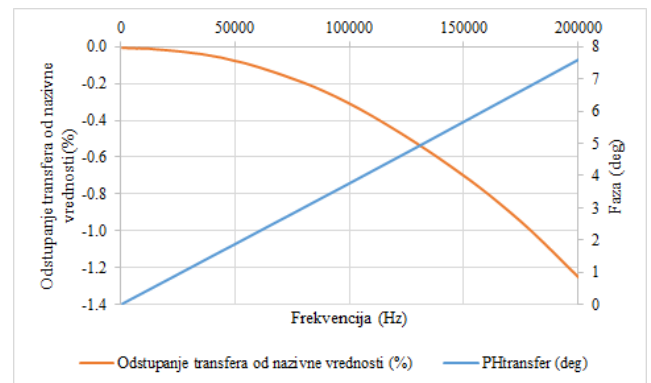
Sl. 14. Rezultati merenja impedanse pri serijskoj i paralelnoj konfiguraciji etalona za $n=10$ (n -broj otpornika)



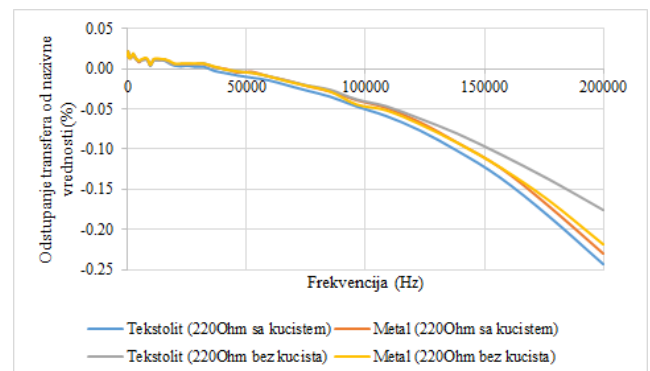
Sl. 15. Rezultati merenja impedanse $1\text{ k}\Omega$ otpornika iz etalona

Može se zaključiti da zbog porasta modula impedanse sa frekvencijom u ovoj slučaju je dominantnija induktivnost unutar etalona nego kapacitivnost. Međutim ovo ne znači da se kapacitivnost zanemari malo. Pošto ovaj etalon predstavlja jedan složen model parazitnih induktivnosti i kapacitivnosti, pokušano je da se ovaj model razloži na nekoliko manjih celina. Ovo je postignuto tako što je etalon rastavljen, pa je pokušano prvo da se odredi karakteristika samo jednog od 12 otpornika i da se to merenje obavi izolovano u odnosu na etalon. Ono što je i očekivano u odnosu na konstrukciju otpornika, i kao što se može videti na Sl. 15. kod ovog otpornika dominira induktivnost u ovom opsegu frekvencija. Kako bi se pokušao izvesti zaključak o uticaju kućišta, kontakata, poklopca i ostalih elemenata na merenje impedanse etalona pri serijskoj i paralelnoj konfiguraciji primenjeno je sledeće: umesto

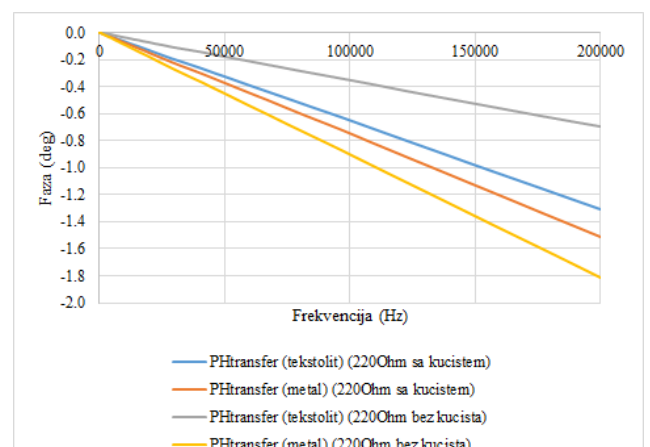
originalnih otpornika od $1\text{ k}\Omega$ postavljeni su metal-film otpornici nazivne vrednosti $220\ \Omega$. Kod ovih otpornika manje je izražena zavisnost njihove impedanse od frekvencije. Kako je pretpostavka da na impedansu utiče kućište i poklopac, merenja su izvršena u slučaju kada je postavljen originalni metalni poklopac, kao i u situaciji gde je poklopac bio izrađen od tekstolita. Pored toga merenja su za ove dve situacije obavljena u slučaju kada se etalon nalazio u svom kućištu i za situaciju bez kućišta. Sl. 16. predstavlja proračunato odstupanje modula transfera od nazivne vrednosti (n^2) na osnovu rezultata merenja prikazanih na Sl. 14.



Sl. 16. Odstupanje modula transfera od nazivne vrednosti i faza transfera etalona sa originalnim otpornicima za $n=10$



Sl. 17. Odstupanje modula transfera od nazivne vrednosti sa otpornicima nazivne vrednosti $220\ \Omega$ za $n=12$

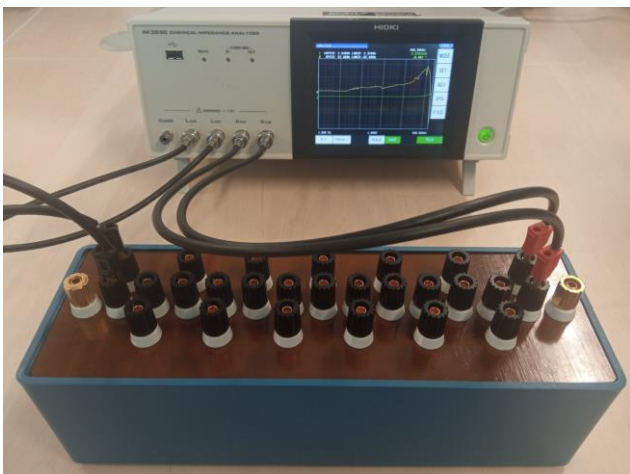


Sl. 18. Faze transfera otpornicima nazivne vrednosti $220\ \Omega$ za $n=12$

Na Sl. 17. i 18. prikazano je proračunato odstupanje modula transfera od nazivne vrednosti kao i faza transfera za situacije sa otpornicima od 220Ω sa i bez kućišta, kao i za situacije kada je korišten originalni metalni poklopac i kada je korišten poklopac od tekstolita. Kod merenja sa originalnim otpornicima broj povezanih otpornika u kolo bio je 10, dok kod 220Ω metal-film otpornika taj je broj bio 12. Očekuje se da će veći broj korištenih otpornika više uticati na odstupanje modula transfera. Može se videti da iako metal-film otpornika ima više, transfer realizovan koristeći iste ima i dalje manje odstupanje od svoje nazivne vrednosti u odnosu na situaciju sa originalnim otpornicima.



Sl. 19. Merenje impedanse etalona u originalnom kućištu



Sl. 20. Merenje impedanse etalona u originalnom kućištu sa poklopcem od tekstolita

Za merenje modula impedanse i faze korišten je analizator impedansi HIOKI 3590. Merna nesigurnost ovog analizatora se određuje na osnovu njegove deklarirane tačnosti i uzimanjem u obzir korekcija poput korekcije usled brzine odabiranja, ambijentalne temperature, DC *bias*-a i sl. Bazična talnost ovog analizatora iznosi $\pm 0.05\%$ očitane vrednosti modula i $\pm 0.03^\circ$ kod merenja faze. Proračunata merna nesigurnost ovih rezultata nije uopšte zanemariva u odnosu na tačnost etalona koji je bio predmet ispitivanja. U [2] prikazani su rezultati slični

rezultatima u ovom radu uz pridruženu mernu nesigurnost gde se jasno vidi da ta nesigurnost nije zanemariva. Kao posledica nedovoljne tačnosti ovog analizatora jasno je da rezultati merenja modula i faze ne mogu da se sa velikom sigurnošću definišu u dovoljno malom opsegu, ali isto tako ti rezultati pokazuju da pretpostavke o parazitnim impedansama unutar etalona mogu biti predmet daljem istraživanja u ovom pravcu. U svim postavkama, merenje je vršeno četvorožično bez korištenja *guard*-a kućišta, odnosno 4-terminalni model.

V. ZAKLJUČAK

Kao jedan od prvih zaključaka je da na frekvencijsku karakteristiku etalona, odnosno na odstupanje njegovog transfera od nazivne vrednosti utiču dve grupe faktora: izvedba otpornika unutar etalona kao i konstrukcija samog etalona. Ove hipoteze su prethodnim rezultatima merenja i potvrđene. U eksperimentu su korišteni metal-film (axial) TH otpornici i pokazalo se da imaju manju frekvencijsku zavisnosti od originalnih otpornika iz etalona.

Kod tačnosti etalona transfera nije od velike važnosti tačnost pojedinačnih otpornika već njihova međusobna ujednačenost. Korišteni metal-film otpornici daleko su manje međusobno ujednačeni u odnosu na originalne otpornike iz etalona, ali smo koristeći metal-film otpornike dobili manju frekvencijsku zavisnost i manje odstupanje transfera od nazivne vrednosti za pomenute opsege frekvencija. Vidimo da je dstupanje modula transfera od nazivne vrednosti etalona sa originalnim otpornicima ($n=10$) iznosilo oko -1% , dok je u slučaju sa metal-film otpornicima ($n=12$) iznosilo oko -0.25% . Osim odstupanja u modulu transfera, primećena je i manja faza transfera u slučaju metal-film otpornika. Parazitni efekti otpornika prema okruženju, montažnoj ploči, kućištu i sl. mogu se pokušati ukloniti ili potisnuti konstrukcionim izmenama. Ono što je neočekivano bilo je da uticaj kućišta nije zanemariv u odnosu na uticaj poklopca, nego je čak i veći. Pretpostavka je bila da su uticaji poklopca veći, ali su merenja pokazala drugačije. Ovaj zaključak bi bilo korisno simulaciono [6] proveriti i pokušati naći odgovor. Akcenat na ovom istraživanju je prilagođavanje etalona transfera opornosti namenog za dc režim za korištenje u ac režimu. Razne varijacije konstrukcionih izmena su pokazale o kojim bi efektima trebalo razmisliti i kako ih potisnuti.

VI. ZAHVALNICA

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija (br. ugovora: 451-03-65/2024-03/200156) i Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu kroz projekat "Naučnoistraživački i umetničkoistraživački rad istraživača u nastavnim i saradničkim zvanjima Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu" (br: 01-3394/1).

REFERENCE/LITERATURA

- [1] S. Mirković, D. Pejić, M. Subotin, N. Gazivoda, Z. Gotovac, "Mogućnost primene Hamonovih presloživih otpornika u naizmeničnom režimu,"

- ETTRAN - Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, Bijeljina, 2021.
- [2] S. Mirković, D. Pejić, A. Dimitrijević "Merenje karakteristika i modelovanje Hamonovih etalon otpornika u naizmeničnom režimu," ETRAN - Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, Novi Pazar, 2022.
- [3] S. Mirković, T. Grbić, N. Gazivoda, Đ. Novaković, Z. Gotovac, D. Pejić "Određivanje merne nesigurnosti transfera Hamonovih otpornika," ETRAN - Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, Istočno Sarajevo, 2023.
- [4] L. Callegaro, *Electrical impedance principles, measurement and applications*, ISBN:978-1-4398-4911-8, CRC Press, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742, USA, 2013.
- [5] "Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement", JCGM 100:2008
- [6] "Evaluation of measurement data-Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement-Propagation of distributions using a Monte Carlo method", JCGM 101:2008
- [7] "SR-1010 Series Resistance Transfer Standards User and Service Manual," *IET LABS, INC.*, 534 Main Street, Westbury, NY 11590, November, 2008.
- [8] Dean G. J. "Evaluation of Guarded High-Resistance Hamon Transfer Standards," *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 48, No 2., April 1999.
- [9] P. P. Capra, F. Galliana. "Hamon-Guarded 10 x 100 MΩ Network to Increase the Accuracy of the Transfer of the Resistance Unit up to 1 GΩ at INRIM," *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 48, No 2., April 1999.

ABSTRACT

This paper deals with the analysis of the electric resistance transfer standard (the so-called Hamon standard) in terms of testing its frequency characteristics. Measurements were implemented with an impedance analyzer and the modulus and phase dependence of the etalon was recorded under various configurations and conditions. As the design of the standard is intended for application in dc mode, these studies have attempted to reach some conclusions of the previous research on the application of this standard in ac mode. The results of the measurements showed that the assumptions about the influence of the design of the standard on its frequency characteristic are correct, and that there are parasitic capacitances and inductances that contribute to the nominal value of the etalon changing with frequency.

ESTIMATION OF THE IMPACT OF PARASITIC IMPEDANCES AS A CONSEQUENCE OF DESIGN SOLUTIONS ON SR1010 RESISTANCE TRANSFER STANDARD

Stefan Mirković, Dragan Pejić, Bojan Vujičić, Marija Ivanković