

Merenje karakteristika i modelovanje Hamonovih etalon otpornika u naizmeničnom režimu

Stefan Mirković, Dragan Pejić, Aleksandar Dimitrijević

Apstrakt—Razmatranje primene Hamonovih etalon otpornika u naizmeničnom režimu, kao i ispitivanje njihovih karakteristika su tema ovog rada. U ranijim istraživanjima ustanovljeno je da prenosni odnos ovih etalona ne bi trebao da značajno zavisi od frekvencije. Drugim rečima, moduo transfera se očekuje da će biti blizak kvadratu broja otpornika od kojih se formira transfer, dok će fazni stav transfera biti blizak nuli. Sa dostupnom opremom koja je bila raspoloživa kada je vršeno istraživanje, merenja su obavljena na osnovu dve merne metode, čiji će rezultati biti prikazani u radu.

Ključne reči—Hamonov etalon, transfer, električna otpornost.

I. UVOD

Kao jedan veoma koristan alat kod određivanja odnosa napona, a pogotovo otpornosti su Hamonovi etalon otpornici. 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. Otpornost terminala ovih spojeva uračunata je u otpornost pojedinačnih otpornika. Pojedinačnim merenjem i podešavanjem otpornosti svakog otpornika teži se da se postigne visoka tačnost. Prvenstvena uloga Hamonovih otpornika nije da budu etaloni otpornosti, već etaloni prenosnog odnosa otpornosti (transfer). Prespajanjem serijske u paralelnu vezu postiže se smanjenje otpornosti za približno n^2 puta. Četvorožični spoj se koristi kako bi se potisnuli negativni efekti otpornosti spojeva u cilju povećanja tačnosti Hamonovog etalona. Zahvaljujući dobrim karakteristikama, treba razmisliti o njihovoj primeni u ac režimu sa obzirom na ohrabrujuće rezultate nekih istraživanja [1]. Ovde je osnova tvrdnje da ako se svaki pojedinačni otpornik Hamonovog etalona modeluje kao redna veza otpornosti i reaktanse, moduo transfera će biti blizak broju n^2 . Prvo su ove tvrdnje simulaciono proverene, a zatim su izvršena i merenja čiji su rezultati doveli do zaključka da ove tvrdnje imaju smisla. U cilju ispitivanja frekventnih karakteristika Hamonovog etalona, kao i provere da li je modelovanje pojedinačnih otpornika kao redne veze otpornosti i reaktanse dovoljno dobro, izvršena su merenja i proračuni.

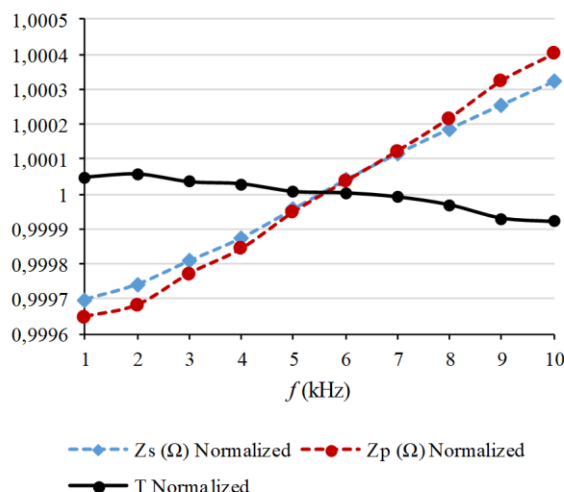
Stefan Mirković – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad, Srbija (e-mail: mirkovicst@uns.ac.rs).

Dragan Pejić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad, Srbija (e-mail: pejicdra@uns.ac.rs).

Aleksandar Dimitrijević – Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" a.d. Beograd, Srbija (e-mail: adimitrijevic22@gmail.com).

II. EKSPERIMENTALNA MERENJA

Merenja su vršena u cilju prvenstveno procene modula transfera. Prva merna metoda se zasnivala na UI metodi, dok je druga metoda bila bazirana na direktnom merenju pomoću instrumenta namenjenog za ispitivanje impedansi. Za prvu metodu korištena je sledeća oprema: izvor stabilisanog napona (Time Electronics 5025), ac voltmetar (Fluke 8846A), ac ampermetar (Fluke 8846A), kao i transfer etalon SR1010 sa deset otpornika (sa transferom $10\text{ k}\Omega : 100\ \Omega$). Otpornost voltmetra i ampermetra su poznate i njihov uticaj na rezultat merenja je korigovan. Kapacitivnost voltmetra je deklarirana kao manja od 100 pF , ali nije poznata njena vrednost. Kako bi uticaj kapacitivnosti voltmetra bio minimalan, korišćene su različite varijante UI metode za merenje serijske i paralelne impedanse. Kod određivanja modula serijske impedanse korišten je strujni spoj, gde je ampermetar povezan redno sa etalomom, a voltmetar paralelno toj vezi. U slučaju paralelne impedanse korišten je naponski spoj kod koga je voltmetar povezan paralelno sa etalomom, a ampermetar redno toj vezi.



Sl. 1. Zavisnost normalizovanih vrednosti modula impedanse redne i paralelne veze i transfera T (UI metoda)

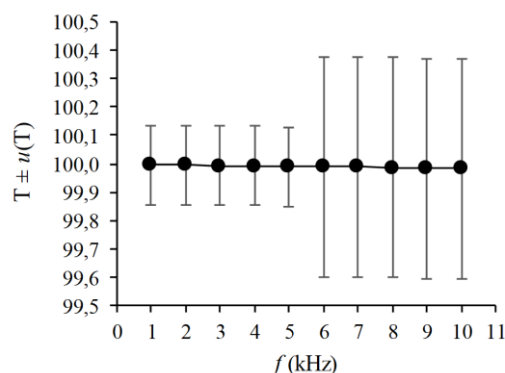
Kako su Hamonovi otpornici izvedeni četvorožično, logično se nameće korišćenje naponskog spoja. Problem je nepoznavanje stvarne kapacitivnosti voltmetra, pri čemu se pokazuje da to više smeta ako bi se koristio naponski spoj prilikom merenja na serijskoj konfiguraciji. Tada bi se, nazivnoj otpornosti od $10\text{ k}\Omega$, paralelno vezivao voltmetar

deklarisane ulazne otpornosti $1\text{ M}\Omega \pm 1\%$ i nepoznata kapacitivnost. Ova činjenica je prevagnula ka korišćenjem strujnog spoja pri merenju modula impedanse serijske konfiguracije. U tom slučaju se gube pozitivni efekti četvorožične izvedbe Hamonovih otpornika, ali se rešava problem nepoznavanja kapacitivnosti voltmetra. Moduo impedanse paralelne konfiguracije je meren primenom naponskog spoja uz korišćenje četvoržične izvedbe otpornika. Pri promeni frekvencije od 1 kHz do 10 kHz, očitavani su napon i struja, određivan je moduo impedanse uz korigovanje uticaja otpornosti instrumenata. Na Sl. 1. su prikazane normalizovane vrednosti rezultata merenja modula impedanse serijske i paralelne veze Hamonovih otpornika, kao i vrednost modula transfera. Postupak normalizacije je sproveden kako bi se pregledno, na jednom grafiku dao prikaz rezultata eksperimenta koji se razlikuju po vrednosti (serijska otpornost je približno $10\text{ k}\Omega$, redna otpornost je približno $100\ \Omega$, moduo transfera je bezdimenziona veličina približno jednaka 100). Sa grafika se vidi da moduo serijske i paralelne veze Hamonovih otpornika raste sa frekvencijom, što opravdava pretpostavku o postojanju reaktivne komponente. Rezultati simulacija predviđaju da su ove dve zavisnosti približno iste, što rezultira pretpostavkom da transfer ne zavisi od frekvencije. S druge strane, merenjem dobijeni profil zavisnosti modula redne i modula paralelne veze nije potpuno isti, pa je dobijeno da i moduo transfera (količnik modula serijske i paralelne veze) takođe zavisi od frekvencije. Promena transfera usled frekvencije je primetno manja (oko pet puta), u poređenju sa promenom modula serijske i paralelne veze. U Tabeli I prikazani su rezultati merenja UI metodom.

TABELA I
REZULTATI UI METODE

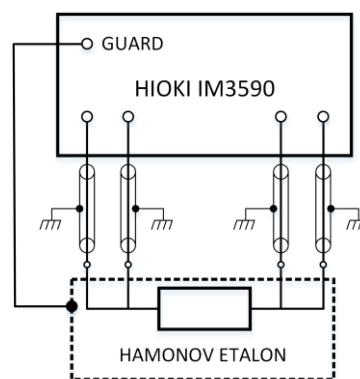
f (kHz)	T	$u(T)$ ($k=1$)
1	99.995	0.14
2	99.996	0.14
3	99.994	0.14
4	99.993	0.14
5	99.991	0.14
6	99.990	0.39
7	99.989	0.39
8	99.987	0.39
9	99.983	0.39
10	99.982	0.39

Postavlja se pitanje u kojoj meri nesavršenosti korištene opreme utiču na zavisnost modula transfera od frekvencije. Da bismo odgovorili na ovo pitanje, sproveden je postupak određivanja merne nesigurnosti. U obzir je uzeta merna nesigurnost usled deklariranih grešaka korišćenog voltmetra i ampermetra, kao merna nesigurnost usled nepoznavanja prave vrednosti otpornosti voltmetra. U tabeli su date vrednosti modula transfera i procenjene merne nesigurnosti pri faktoru obuhvata 1.



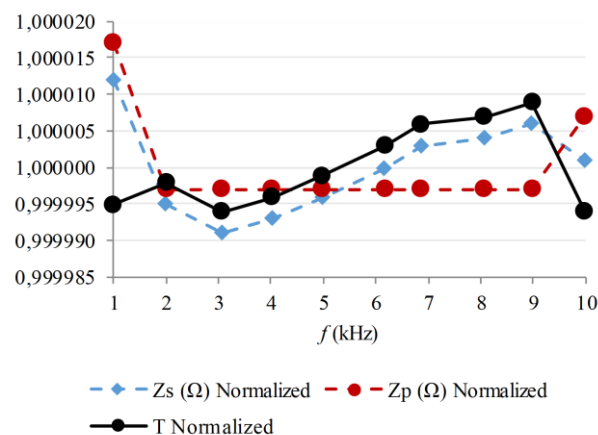
Sl. 2. Zavisnost modula transfera od frekvencije uz prikaz merne nesigurnosti za faktor obuhvata 1 (UI metoda)

Druga merna metoda je bazirana na određivanju impedanse serijski (Z_S) i paralelno (Z_P) konfigurisanog etalona, kao i faznih stavova (φ_s i φ_p) direktnim očitavanjem korištenjem instrumenta HIOKI IM3590, čija je glavna uloga analizator impedansi.



Sl. 3. Šema povezivanja pri merenju direktnom mernom metodom

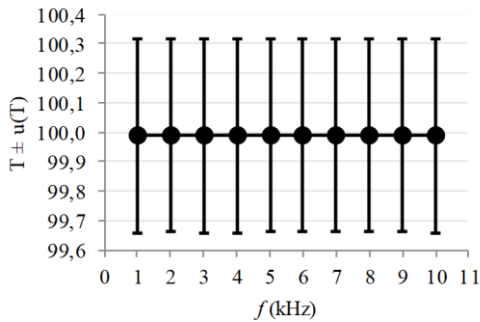
Na početku je izvršena korekcija prilikom kratkog spoja i korekcija prilikom otvorene veze. Na ovaj način bi trebalo u najvećoj meri da su eliminisane parazitne induktivnosti i kapacitivnosti samih vodova korišćenih za četvorožično povezivanje merene impedanse.



Sl. 4. Zavisnost normalizovanih vrednosti modula impedanse redne i paralelne veze i transfera (direktna metoda)

TABELA II
REZULTATI DIREKTNE METODE (MODUO TRANSFERA)

f (kHz)	T	$u(T)$ ($k=1$)
1,0000	99,989	0.33
2,0052	99,989	0.33
2,9165	99,989	0.33
4,0208	99,989	0.33
4,9806	99,989	0.33
5,8480	99,990	0.33
6,8665	99,990	0.33
8,0624	99,990	0.33
8,9733	99,990	0.33
9,9871	99,989	0.33

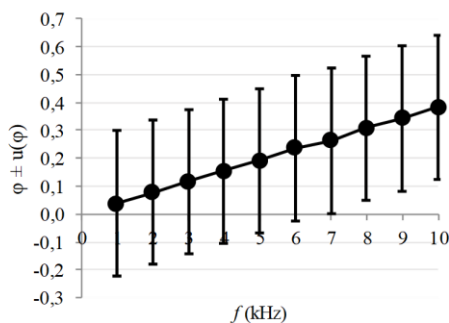


Sl. 5. Zavisnost modula transfera od frekvencije uz prikaz merne nesigurnosti za faktor obuhvata 1 (direktna metoda)

Ovde je očitavana vrednost izmerenog modula i faznog stava etalona za različite frekvencije. Na osnovu ovih rezultata može se videti da je relativna promena modula i faznog stava etalona pri različitim frekvencijama značajno manja od deklarisanе greške instrumenata.

TABELA III
REZULTATI DIREKTNE METODE (ARGUMENT TRANSFERA)

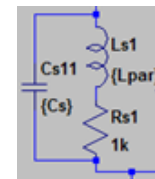
f (kHz)	φ	$u(\varphi)$ ($k=1$)
1,0000	0.038	0.26
2,0052	0.077	0.26
2,9165	0.117	0.26
4,0208	0.154	0.26
4,9806	0.191	0.26
5,8480	0.236	0.26
6,8665	0.263	0.26
8,0624	0.309	0.26
8,9733	0.343	0.26
9,9871	0.383	0.26



Sl. 6. Zavisnost argumenta transfera od frekvencije uz prikaz merne nesigurnosti za faktor obuhvata 1 (direktna metoda)

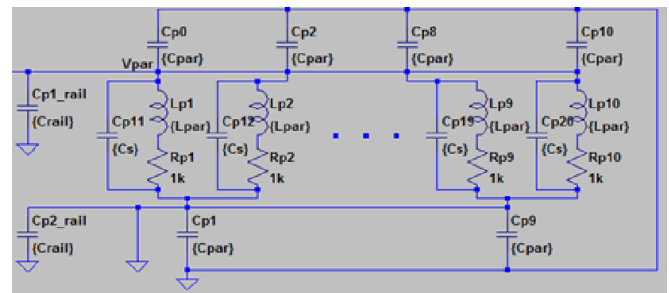
Kao posledica toga, ne može se zaključiti sa velikom sigurnošću kako se zaista ponaša moduo i fazni stav.

Kako bi se simulaciono analizirao uticaj parazitnih induktivnosti i kapacitivnosti na transfer, realizovana je LTSpice simulacija, gde je svaka pojedinačna impedansa Hamonovog etalona modelovana kao otpornost nazivne vrednosti 1 k Ω kojoj je redno vezana parazitna induktivnost L_{Par} a svemu tome paralelno vezana parazitna kapacitivnost C_s . Sada pretpostavljamo da su sve vrednosti jednake kako bismo mogli proveriti/proceniti uticaj dodatnih parazitnih efekata na transfer. Ako se variraju vrednosti parazitnih induktivnosti i kapacitivnosti dobija se da je transfer nepromenljiv po frekvenciji, dok je faza transfera vrlo mala.



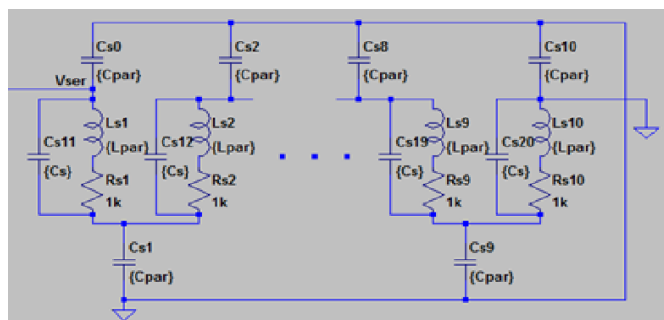
Sl. 7. Model pojedinačne impedanse Hamonog etalona u LTSpice simulaciji

Pored ovih parazitnih efekata, dodate su i kapacitivnosti svakog kontakta Hamonog etalona prema kućištu vrednosti C_{Par} . Kod paralelne konfiguracije, uticaj parazitnih kapacitivnosti ka kućištu utiče na jednostavniji način na sam transfer nego u slučaju serijske veze.



Sl. 8. Modelovan paralelno vezan Hamonov etalon u LTSpice okruženju

Kod paralelne veze, ove kapacitivnosti se usled kratkospojnika vezuju paralelno, ali podeljene u dve grupe (za jednu i drugu stranu priključaka). Kapacitivnosti jedne od ove dve grupe su ustvari kratkospojeni, jer je jedan kratkospojnik vezan na uzemljenje isto kao i kućište. Kod serijske konfiguracije pojedinačne impedanse i kapacitivnosti kao kućištu čine višestepeni filter, gde je logično da će se pri ovoj konfiguraciji dobiti veći fazni pomeraj. Dodatno je modelovano i da kratkospojnici imaju neku svoju kapacitivnost prema kućištu. Ovde se takođe dobija da je jedna kapacitivnost kratkospojena jer je samo kratkospojnik uzemljen, pa prema kućištu koje je takođe uzemljeno nema naponske razlike. Primećeno je da kapacitivnost kratkospojnika i pri značajnim vrednostima ne utiče značajano na transfer.



Sl. 8. Modelovan serijski vezan Hamonov etalon u LTSpice okruženju

Ako se pretpostave redna induktivnost i paralelna kapacitivnost za svaki element u Hamonovoj kutiji, i da su im vrednosti za svaki element jednake, dobija se da transfer ne zavisi od frekvencije. Ako se pretpostavi parazitna kapacitivnost kontakata Hamonovih elemenata prema kućištu onda se dobija da moduo i fazni stav transfera zavise od frekvencije. Rezultati simulacija pokazuju šta od parazitnih elemenata utiče i u kojoj meri.

III. ZAKLJUČAK

Ono što se za sad može videti je da rezultati nisu opovrgnuli dosadašnje pretpostavke za ponašanje modula i faznog stava, ali ih i ne potvrđuju sa velikom sigurnošću. Rezultati sa kojima se trenutno raspolaze su dobijeni korištenjem najbolje raspoložive merne opreme. Pored ovog nedostatka usled velike greške instrumenata, postavlja se pitanje da li je model kada se etalon posmatra kao impedansa ispravan. Pored induktivnih i kapacitivnih efekata koji se javljaju na samim pojedinačnim otpornicima unutar etalona, postoje i drugi efekti. Kapacitivnost prema kućištu etalona, kapacitivnost kratkospojnika kojima se etalon konfigurise iz serijsku u paralelnu vezu, kao i ulazna kapacitivnost instrumenata su samo jedna od stvari o kojima treba razmišljati. Različitim pristupima ovom problemu dobijeni su već neke procenjene vrednosti spomenutih parazitnih efekata, koje treba još detaljno ispitati. Procena je vršena pomoću raznih simulacijskih metoda i matematičkih modela. Ukoliko se ispostavi da ovi efekti značajno doprinose grešci etalona, moraće se trenutni modela komplikovati dok se ne dođe do zadovoljavajućih rezultata. Osnovni problem je nazivna greška instrumenata. Kako je Hamonov etalon etalon visoke tačnosti, potrebno je koristiti isto tako i instrumente visoke tačnosti kako bi se moglo sa velikom pouzdanošću proceniti njegovo ponašanje u zavisnosti od frekvencije. U prethodnim istraživanjima primenjena je Monte Carlo simulacija u cilju procene modula i faznog stava transfera, ali pri jednostavnijem modelu nego što je ovde opisan. Tamo je pojedinačni otpornik posmatran kao redna veza otpornosti i reaktanse. Hipoteza da

se moduo i fazni stav transfera neznatno menjaju sa promenom frekvencije nije potvrđena, ali isto tako nije ni opovrgnuta. Potrebna je merna oprema sa manjom mernom nesigurnošću. Jedan način rada jeste merenje na višim frekvencijama gde uticaj parazitnih efekata više dolazi do izražaja. Problem je što je i oprema kojom raspolazemo takva da sa porastom frekvencije dolazi do degradacije granica greške.

LITERATURA

- [1] S. Mirković, D. Pejić, M. Subotin, N. Gazivoda, Z. Gotovac, "Mogućnost primene Hamonovih presloživih otpornika u naizmeničnom režimu," ETRAN - Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, Bijeljina, 2021.
- [2] "SR-1010 Series Resistance Transfer Standards User and Service Manual," IET LABS, INC., 534 Main Street, Westbury, NY 11590, November, 2008.
- [3] R. Radetić, *Električna otpornost: pojava i merenja: sa originalnim rešenjima autora*, Agencija Eho, Niš, 2015.
- [4] D. G. Jarrett, "Evaluation of Guarded High-Resistance Hamon Transfer Standards," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 48, no. 2, April, 1999.
- [5] B. V. Hamon, "A 1-100 Ω build-up resistor for the calibration of standard resistors", *Jour. Sci. Instr.*, vol. 31, pp. 450-453, 1954.
- [6] J. Bohacek, "Evaluation of frequency performance of resistance standards", IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002.
- [7] J. C. Riley, "The Accuracy of Series and Parallel Connections of Four-Terminal Resistors", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 16, 1967.
- [8] White, D.R., Jones, K., Williams, J.M., Ramsey, I.E., "A simple resistance network for calibrating resistance bridges", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, 1997.
- [9] L. Cimeanu, M. Simionescu, "Metrological characterization of reference standard resistors group of 100 Ω by means of Hamon resistor," 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Romania, 25-27 October, 2012.

ABSTRACT

Consideration of the application of Hamon standard resistors in alternating mode, as well as examination of their characteristics are the topic of this paper. Previous research has found that the transmission ratio of these standards should not significantly depend on frequency. In other words, the transfer moduo is expected to be close to the square of the number of resistors from which the transfer is formed, while the phase position of the transfer will be close to zero. With the available equipment that was available when the research was conducted, the measurements were performed on the basis of two measurement methods, the results of which will be presented in the paper.

Measurement of characteristics and modeling of Hamon standard resistors in alternating mode

Stefan Mirković, Dragan Pejić, Aleksandar Dimitrijević