

ETALONIRANJE OTPORNIKA VITSTON-TOMSONOVIM MOSTOM KAO USLOV ZA IZVOĐENJE NASTAVNE VEŽBE „MERENJE IMPEDANSE DVOJNIM T MOSTOM“

Marjan Urekar¹, Nemanja Gazivoda², Bojan Vujičić³, Đorđe Novaković⁴, Stefan Mirković⁵,
Ivan Gutai⁶, Jelena Đorđević Kozarov⁷

^{1,2,3,4,5,6}Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

⁷Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet, Niš, Srbija

¹urekarm@uns.ac.rs, ²nemanjagazivoda@uns.ac.rs, ³bojanvuj@uns.ac.rs, ⁴djordjenovakovic@uns.ac.rs,

⁵mirkovicst@uns.ac.rs, ⁶gutai@uns.ac.rs, ⁷kozarov@elfak.ni.ac.rs

Kratak sadržaj: Akreditovana Laboratorija za metrologiju na FTN vrši etaloniranje otpornika Vitston-Tomsonovim mostom, što je jedan od osnova za proces edukacije studenata na predmetima vezanim za Električna merenja, gde je jedna od vežbi i „Merenje impedanse dvojnim T mostom“. Oprema koja se koristi na vežbama mora se etalonirati kao bi imali poverenje u dobijene rezultate merenja. Znanja stečena na ovim vežbama omogućavaju studentima da se uključe u rad Laboratorije prilikom naučnoistraživačkog rada na praktičnim projektima (seminarski, ispitni i diplomski radovi) iz ove oblasti na višim godinama studija, kao priprema za rad u savremenom i realnom industrijskom sektoru. Svi termini i definicije su usklađeni sa standardima SRPS ISO 9001:2015, SRPS ISO/IEC 17025:2017 i BIPM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.

Ključne reči: Etaloniranje, Električna merenja, Impedansa, Mostne metode, Otpornik

CALIBRATION OF RESISTORS USING WHEATSTONE-THOMSON BRIDGE AS A PRECONDITION FOR THE LABORATORY EXERCISE “BRIDGED T CIRCUIT FOR IMPEDANCE MEASUREMENTS“

Abstract: The accredited Laboratory for Metrology at FTN performs resistor calibration with the Wheatstone-Thomson Bridge, which is one of the foundations for the student education process in Electrical Measurements, including laboratory exercise „Bridged T Circuit for Impedance Measurement“. The equipment used in the exercises must be calibrated in order to have confidence in the measurement results obtained. The knowledge gained from these exercises enables students to become involved in the work process of the Laboratory in scientific research work on practical projects (semester, examination and graduate works) in this field in their senior years of study, as preparation for future work in the modern and real industrial sector. All terms and definitions conform to standards ISO 9001, ISO/IEC 17025 and BIPM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.

Key Words: Calibration, Electrical measurements, Impedance, Bridge circuit, Resistor

1. UVOD

Laboratorijska vežba „Merenje impedanse dvojnim T mostom“ se izvodi na vežbama iz predmeta Električna merenja i Merenja u elektronici (na studijskom programu Energetika, elektronika i telekomunikacije), kao i iz predmeta Električna i elektronska merenja u industriji (na studijskom programu Merenje i regulacija), na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu [1]. Mostne metode, poput Vitston-Tomsonovog (VT) naizmeničnog mosta, koriste se u savremenim industrijskim uređajima za merenje otpornosti i impedanse. Ovi instrumenti imaju visoku preciznost i potpuno su automatizovani, međutim, zasnivaju se na metodama merenja opisanim u navedenoj vežbi. Ovo omogućava studentima da shvate teorijsku postavku i suštinu načina rada mostnih metoda za merenje otpornosti. Da bi se omogućila izrada ovih vežbi, oprema koja se koristi mora biti etalonirana u akreditovanoj laboratoriji, kako bi se obezbedilo poverenje u dobijene rezultate, u okviru dozvoljenih granica merne nesigurnosti. Upoznavanje studenata sa metodologijom merenja ovom metodom, obradom rezultata merenja i određivanja greške merenja i merne nesigurnosti, omogućeno im je da se na višim godinama uključe u rad Laboratorije, prilikom izrade praktičnih projekata tokom naučnoistraživačkog rada za seminarske, semestralne, ispitne i diplomske radove. Ovo praktično iskustvo studentima omogućava uvid u savremenu metrologiju i osposobljava ih za direktno uključivanje u praktičan i realan rad, u širokom industrijskom sektoru iz oblasti merenja.

2. ETALONIRANJE OTPORNIKA VITSTON-TOMSONOVIM MOSTOM

Dat je postupak merenja impedanse i srodnih veličina mostom u akreditovanoj Laboratoriji za metrologiju (LZM), Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, [2], [3]. Otpornici i instrumenti za merenje otpornosti koji se

koriste na vežbama, moraju se redovno etalonirati kako bi se obezbedilo poverenje u rezultate merenja dobijene na vežbama.

Prikazane su najbolje mogućnosti merenja, navedena je merna oprema koja se koristi, opisani su postupci merenja koje treba sprovesti, prikazana je obrada dobijenih rezultata i dat je praktičan primer kao ilustracija primene. Opisana metoda, razvijena na bazi višegodišnjeg izvođenja nastave i standardnih referenci kao [4], [5], [6], [7], koristi se i u nastavi za studente viših godina osnovnih, master i doktorskih studija, gde se obrađuju metode zakonskog etaloniranja, obrada rezultata i izračunavanje merne nesigurnosti (predmeti: Standardizacija i kvalitet, Merni sistemi u industriji, Metrologija, Odabrana poglavlja iz metrologije). Savladavanje ovih metoda omogućuje studentima kasniji samostalni rad i istraživanje za potrebe semestralnih, ispitnih i diplomskih radova, kao i neophodno znanje za rad u realnom industrijskom sektoru ili laboratorijama posle završenog fakulteta.

Merna oprema

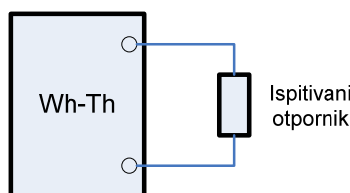
Oprema neophodna za merenje impedanse navedena je u Tabeli 1. Sva oprema neophodna za etaloniranje se nalazi u prostorijama LZM na FTN.

Tabela 1. Spisak merne opreme za merenje impedanse mostom

Oznaka	Naziv	Tip
N	Digitalni multimeter kao strujni indikator	HP 3458A
DVM	Digitalni multimeter kao voltmetar	Fluke 8846 A
R	Dekadna kutija otpornosti	GenRad GR 1433
DDEI	Digitalni dvokanalni etalonski izvor	DvI

Etaloniranje otpornosti otpornika Vitston-Tomsonovim mostom, dvožično ili četvorožično, obavlja se u skladu sa uputstvom za upotrebu datim od strane proizvođača mosta. Na slici 1 predstavljen je opšti način etaloniranja direktnom metodom merenja otpornosti mernim VT mostom, gde se ispitivani otpornik direktno vezuje na priključke VT mosta.

Ovaj pojednostavljeni model služi kao opšte uputstvo za način merenja VT (engleski: *Wheatstone-Thomson*, *Wh-Th*) mostom iz kojeg je moguće odrediti model greške merenja i proceniti mernu nesigurnost [8].



Slika 1. Etaloniranje otpornika direktnim merenjem ispitivane otpornosti mostom

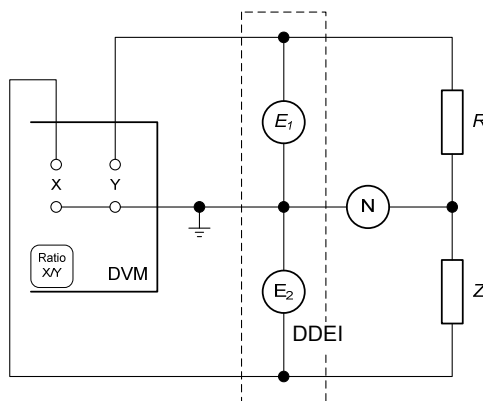
Matematički model greške G rezultata etaloniranja je dat kao:

$$G(R) = R_n - (R_s + k_s)$$

gde su: $G(R)$ - Greška merenja otpornosti; R_n - Nominalna vrednost otpornosti otpornika koji se etalonira; R - otpornost izmerena etalonskim instrumentom; k_s - Korekcija rezultata merenja otpornosti.

Merna nesigurnost u rezultata etaloniranja otpornosti R je data kao:

$$u(R) = u(k_s)$$



Slika 2. Merenje impedanse VT mostom

Merenje otpornosti možemo posmatrati kao specijalan slučaj merenja impedanse, u ovom slučaju modula impedanse. U LZM, moduo impedanse se određuje mostnom metodom sa digitalnim dvokanalnim etalonskim izvorom (DDEI) kojim je moguće nezavisno zadati dva napona E tj. njihove efektivne vrednosti i fazne stavove.

U ovom slučaju, merena impedansa se, posredstvom mernog mosta za naizmeničnu struju, poredi sa etalonom impedanse. Šema ove merne metode je data na slici 2, gde su: E_1 -Efektivna vrednost napona na izlazu 1. kanala DDEI; E_2 -Efektivna vrednost napona na izlazu 2. kanala DDEI; R -Otpornost postavljena na etalonskoj otporničkoj dekadi; Z - Merena impedansa.

Oдавде je jasno da je ovaj VT most realizovan korišćenjem više posebnih komponenti vezanih u mostni spoj.

Merenje modula impedanse Z se vrši zadavanjem napona na DDEI kojima se VT most dovodi u ravnotežu, pri kojoj struja kroz dijagonalu mosta postaje jednaka nuli, što se očitava indikatorom N (multimetar HP 3458A podešen kao mikroampermetar – indikator struje bliske nultoj vrednosti). Merenjem odnosa napona E_1 i E_2 pomoću digitalnog voltmetra (DVM) u »X/Y ratio« modu, može se odrediti vrednost modula impedanse Z .

Matematički model rezultata merenja modula impedanse Z je dat kao:

$$Z = x \cdot R + \delta Z$$

gde su: x -Rezultat merenja odnosa napona E_1 i E_2 . Merna nesigurnost je izvedena iz granica greške G_x merenja odnosa dva napona DVM-om; R -Otpornost postavljena na etalonskoj dekadnoj kutiji otpornosti; G_R -deklarisanih granica greške postavljene otpornosti iz koje je izvedena Merna nesigurnost; δZ -Merna nesigurnost poređenja impedansi VT mostom. Relativna merna nesigurnost poređenja modula impedansi mostom nije veća od 10^{-4} .

Koeficijenti osetljivosti su dati kao:

$$c_R = \frac{\partial Z}{\partial R} = x \quad ; \quad c_x = \frac{\partial Z}{\partial x} = R \quad ; \quad c_{\delta Z} = \frac{\partial Z}{\partial (\delta Z)} = 1$$

Nesigurnost merenja modula impedanse Z je data kao:

$$u_Z = \sqrt{(c_R \cdot u_R)^2 + (c_x \cdot u_x)^2 + (c_{\delta Z} \cdot u_{\delta Z})^2}$$

Budžet nesigurnosti merenja modula impedanse mostom prikazan je u tabeli 2. Primer analize merne nesigurnosti etaloniranja otpornika direktnim merenjem otpornosti prikazan je u tabeli 3.

Tabela 2. Tabela budžeta nesigurnosti merenja modula impedanse VT mostom

Veličina	Simbol	Ocena veličine	Merna nesigurnost	Tip merne nesigurnosti	Oblik raspodele verovatnoće	Osetljivost c_i	Doprinos mernoj nesigurnosti	Doprinos relativnoj mernoj nesigurnosti
Odnos dva napona	x		$G_x / \sqrt{3}$	B	Pravougaona	R	$R \frac{G_x}{\sqrt{3}}$	$R \frac{G_x}{\sqrt{3}} \frac{1}{Z}$
Otpornost	R		$G_R / \sqrt{3}$	B	Pravougaona	x	$x \frac{G_R}{\sqrt{3}}$	$x \frac{G_R}{\sqrt{3}} \frac{1}{Z}$
Greška merenja mostom	δZ	0	$10^{-4} Z$	B	Pravougaona	1	$10^{-4} Z$	10^{-4}
Impedansa	Z							

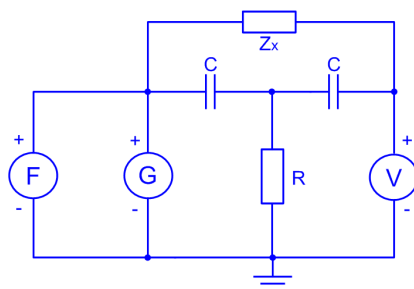
Tabela 3. Analiza merne nesigurnosti rezultata etaloniranja otpornika od 10 kΩ

Naziv veličine	Simbol	Vrednost	Parcijalna nesigurnost	Tip nesigurnosti	Raspodela	Koeficijent osetljivosti	Doprinos nesigurnosti
Nominalna otpornost otpornika	R_n	10 kΩ	-				
Rezultat merenja otpornosti	R	9999,9 Ω	0,5 Ω	A	Normalna	-1	0,5 Ω
Korekcija vrednosti merenja napona	k_S	0	2,9 Ω	B	Pravougona	-1	2,9 Ω
Greška merenja otpornosti	$G(R)$	0,1 Ω					2,9 Ω

Proširena merna nesigurnost, za faktor obuhvata $k=2$, iznosi $k \cdot G(R) = 5,8 \Omega$.

3. VEŽBA »MERENJE IMPEDANSE DVOJNIM T MOSTOM«

Na slici 3 je data šema kola koje se koristi na ovoj vežbi, razvijena na bazi klasičnih referenci kao [9], [10], [11], kao i sopstvenih iskustava [12], [13]. Data je pojednostavljena verzija VT mosta sačinjenog od dva blok kondenzatora C poznatih kapacitivnosti, dekadne kutije otpornosti R i voltmetra V kojim se meri napon u dijagonali mosta. Most se napaja prostoperiodičnim naponom iz generatora G, čija frekvencija se meri frekvencometrom F. Pošto na vežbama nije moguće koristiti laboratorijski DDEI, koristi se modifikacija kola kao na slici 3. Podešavanjem dva nezavisna parametra – frekvencije izvora f_G i otpornosti R, naizmenični most je moguće podesiti u ravnotežu koja se indikuje nulnim naponom izmerenim milivoltmetrom V, čime se određuje moduo impedanse Z_X , tj. nepoznata otpornost. Sve komponente i merni instrumenti su etalonirani u LZM, konkretno za R i Z_X , metodom opisanom u prethodnom poglavlju.



Slika 3. Šema električnog kola za vežbu „Merenje impedanse dvojnim T mostom“

Svi termini i definicije su usklađeni sa standardima SRPS ISO 9001:2015 (implementiran na FTN), SRPS ISO/IEC 17025:2017 (u fazi uvođenja u LZM) i dokumentom *BIPM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (implementiran u LZM).

4. ZAKLJUČAK

Laboratorija za metrologiju čini sastavni deo sistema podrške izvođenju nastave laboratorijskih vežbi iz predmeta srodnih oblasti Električnih merenja. Metoda etaloniranja otpornosti i impedanse u LZM obezbeđuje poverenje u rezultate merenja na laboratorijskim vežbama, pa je stoga neophodno u redovnim vremenskim intervalima, a najmanje jednom godišnje, izvršiti etaloniranje otpornosti, impedansi i mernih instrumenata za merenje otpornosti koji se koriste na laboratorijskim vežbama na drugoj godini osnovnih studija. Ovo daje osnovu za dalje obrazovanje studenata na višim godinama iz oblasti metrologije, te za samostalno istraživanje i izradu praktičnih projekata iz ove oblasti. Na ovaj način, studenti se osposobljavaju za kasniji rad u realnom sektoru privrede u kojima se primenjuju merenja električnih veličina, sa velikim uspehom.

5. LITERATURA

- [1] M. Urekar, D. Pejić: *Laboratorijski praktikum iz predmeta Električna merenja*, Merenja u elektronici i Električna i elektronska merenja u industriji, skripta, FTN, Novi Sad, 2019.
- [2] Q3.JIM.03 *Merenje impedanse mostom* – radno uputstvo Laboratorije za metrologiju, FTN, 2013.
- [3] Q3.JIM.07 *Etaloniranje otpornika* – radno uputstvo Laboratorije za metrologiju, FTN, 2013.
- [4] *Low Level Measurements Handbook*, 7th ed., Keithley, 2014.
- [5] *Calibration: Philosophy in Practice*, 2nd ed., Fluke Corp., 1994.
- [6] A.S. Morris, *Measurement and Instrumentation Principles*, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [7] D. Placko ed., *Fundamentals of Instrumentation and Measurement*, ISTE USA, 2007.
- [8] JCGM 100:2008 *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM, BIPM, 2010.
- [9] V. Bego, *Mjerenja u elektrotehnici*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1975.
- [10] P. Horowitz, W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed., Cambridge University Press, 2015.
- [11] S. Tumanski, *Principles of Electrical Measurement*, CRC Press, 2006.
- [12] M. Urekar, M. Bulat, B. Vujičić, D. Pejić, *Composite Resistor Standard for Calibration of Measuring Transducers in Laboratory Conditions*, SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 13, No. 1, Feb 2016.
- [13] M. Urekar, N. Gazivoda, *The Transfer Voltage Standard for Calibration Outside of a Laboratory*, SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 14, No. 1, Feb 2017.