

# Određivanje faktora etaloniranja senzora snage na frekvencijama do 10 MHz

Neda Spasojević, Ivica Milanović, Miša Markuš, *Tehnički opitni centar*

**Apstrakt**—U radu je opisana metoda određivanja faktora etaloniranja senzora snage primenom AC/DC termopretvarača i DC kalibratora kao referentnog etalona. Predstavljena metoda se u laboratoriji za etaloniranje Tehničkog opitnog centra (TOC) primenjuje za frekvencije niže od 10 MHz, dok se na višim frekvencijama koristi metoda direktnog poređenja sa transfer etalonom, odnosno referentnim etalonom za mikrotalasnu snagu. U radu je dat i proračun merne nesigurnosti za opisanu metodu.

**Ključne reči** — faktor etaloniranja; senzor snage; RF snaga; termopretvarač; etaloniranje; merna nesigurnost.

## I. UVOD

Jedna od osnovnih karakteristika RF/mikrotalasnih senzora snage jeste faktor etaloniranja senzora  $FE$  (engl. *Calibration Factor*) i neizostavna je provera prilikom njihovog etaloniranja. Ovaj faktor govori koliko tačno senzor meri snagu dovedenu na njegov ulaz na pojedinim frekvencijama. Prilikom merenja, senzori snage apsorbiraju RF/mikrotalasnu snagu, pretvarajući je u jednosmernu (ili niskofrekventnu) snagu, koja se zatim meri pomoću vatmetra.

Faktor etaloniranja senzora se definiše kao odnos supstituisane DC ili niskofrekventne snage na izlazu i incidentne RF/mikrotalasne snage na ulazu senzora (1):

$$FE (\%) = \frac{P_s}{P_{in}} \cdot 100 \quad (1)$$

gde su:  $FE$  faktor etaloniranja senzora (DUT, engl. *Device Under Test*),  $P_s$  supstituisana snaga na izlazu senzora i  $P_{in}$  incidentna snaga na ulazu senzora.

Faktor etaloniranja je neimenovan broj i ima vrednost između 0 i 1, a neretko se izražava u procentima, kao što je slučaj u formuli (1). Poznavanjem  $FE$  na odgovarajućoj frekvenciji, može se vršiti korekcija snage očitane vetmetrom. Naime, kada se snaga izmerena vatmetrom podeli sa  $FE$ , dobija se stvarna vrednost incidentne snage na ulazu senzora. Ovaj faktor se može ručno uneti u vatmetar za odgovarajuću frekvenciju, dok senzori novije

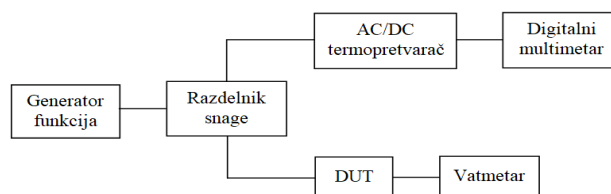
generacije u sebi imaju EEPROM sa upisanim faktorima etaloniranja. Vrednost  $FE$  se menja tokom vremena, te ga je potrebno periodično proveravati u metrološkim laboratorijama. Otuda i potreba za upisom novih faktora etaloniranja u memoriju senzora, naročito ako se oni značajno razlikuju od postojećih. Nažalost, softver za upis novih faktora etaloniranja kod većine proizvođača nije dostupan korisniku, te se korekcija izmerene snage mora vršiti ručno.

$FE$  je frekventni zavisan, a zavisi i od nivoa snage pri kome se određuje. Najčešće ovaj nivo iznosi 1 mW, odnosno 0 dBm.

Imajući u vidu da se današnji senzori snage sve češće prave za frekvencije koje dosežu DC, javlja se potreba za merenjem  $FE$  na vrlo niskim učestanostima. U TOC-u je razvijen sistem za merenje  $FE$  senzora snage pomoću transfer etalona (referentnog etalona za mikrotalasnu snagu) TEGAM F1135A u frekventnom opsegu od 10 MHz do 26,5 GHz. Ovaj etalon ima sledljivost do međunarodnog etalona u METAS. Na frekvencijama nižim od 10 MHz,  $FE$  se određuje pomoću AC/DC termopretvarača i DC izvora (kalibratora) kao referentnog etalona. Suštinski, takav sistem je primenljiv do 100 MHz, ali se zbog sledljivosti upotrebljava u opsegu koji sistem sa transfer etalonom ne obuhvata. AC/DC termopretvarač ovde ima ulogu spone između AC, odnosno RF snage koja se meri senzorom, i DC snage koju generiše referentni etalon.

## II. POSTUPAK ETALONIRANJA

Postupak određivanja  $FE$  na frekvencijama nižim od 10 MHz sastoji se iz dva koraka, prikazana blok šemama 1 i 2. U prvom koraku, RF snaga sa generatora funkcija se istovremeno dovodi na senzor (DUT) i AC/DC termopretvarač.



Sl.1 Blok šema postupka etaloniranja - I korak

Maksimalni efektivni ulazni napon primenjenog termopretvarača HP 11050A je 1 V, pri kome na svom izlazu daje 7 mV jednosmernog napona. Kako bi

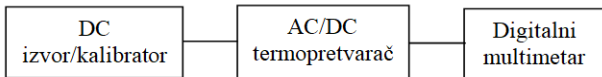
Neda Spasojević – Tehnički opitni centar, Vojvode Stepe 445, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: metrologija@toc.vs.rs, nedamilivojcevic@yahoo.com).

Ivica Milanović – Tehnički opitni centar, Vojvode Stepe 445, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: metrologija@toc.vs.rs, msivica@gmail.com).

Miša Markuš – Tehnički opitni centar, Vojvode Stepe 445, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: metrologija@toc.vs.rs, markus.misa@gmail.com).

termopretvarač radio u što linearnijem delu svoje karakteristike, preporuka je da ulazni AC napon bude oko 0,9 V efektivne vrednosti, što odgovara približno 5,7 mV izlaznog DC napona. Shodno tome, postavljena snaga na ulaz DUT-a i termopretvarača (slika 1) treba da bude oko 12 dBm, odnosno 0,9 V efektivne vrednosti naizmeničnog napona. Budući da razdelnik snage u obe grane slabi signal za 6 dB, na generatoru funkcija je potrebno zadati sinusni signal nivoa 18 dBm. Pritom se na izlazu termopretvarača dobija DC napon ekvivalentan ulaznoj RF snazi, odnosno AC naponu, koji se dalje meri multimetrom. Takođe, senzor pretvara RF u DC snagu koja se očitava vatmetrom. Očitane vrednosti DC napona na digitalnom multimetru i RF snage na vatmetru je potrebno memorisati i preći na drugi korak merenja.

U drugom koraku (slika 2), na DC kalibratoru/izvoru se zadaje napon pri kome digitalni multimetar prikazuje istu vrednost DC napona kao u I koraku. Prilikom ovog merenja je iskorišćena osobina termopretvarača da pri istoj vrednosti ulaznog napona, bilo da je reč o AC ili DC naponu, daje istu vrednost izlaznog napona. Stoga je vrednost DC napona postavljena na kalibratoru vrlo bliska vrednosti AC napona na ulazu DUT-a (u I koraku), sa razlikom što je određena sa većom tačnošću i preciznošću, te se smatra referentnom.



Sl.2 Blok šema postupka etaloniranja - II korak

Nakon izmerenog DC napona etalona i snage DUT-a, faktor etaloniranja senzora se proračunava na osnovu formule:

$$FE = \frac{P_{DUT}}{P_{DC}} \cdot 100 \quad (2)$$

gde su:  $FE$  faktor etaloniranja DUT-a u procentima,  $P_{DUT}$  snaga izmerena senzorom (DUT), a  $P_{DC}$  postavljena (incidentna) snaga određena DC etalomom.

DC snagu postavljenu na kalibratoru je potrebno korigovati za vrednost greške AC/DC termopretvarača prema formuli:

$$P_{DC} = \frac{V_{DC}^2}{Z} \cdot \left(1 - \frac{G_{AC/DC}}{100}\right) \quad (3)$$

gde je  $V_{DC}$  DC napon postavljen na etalonu (kalibratoru),  $Z$  nominalna ulazna impedansa AC/DC termopretvarača od 50  $\Omega$ , a  $G_{AC/DC}$  greška AC/DC termopretvarača u procentima (može biti pozitivna ili negativna).

### III. MERNANESIGURNOST

Proračun merne nesigurnosti rađen je za frekvenciju 500 kHz, pri čemu je korišćena sledeća merna oprema:

- Generator funkcija Agilent 33250A

- Merni prijemnik, R&S FSMR26 sa senzorom snage R&S NRP Z-37 (DUT)
- Digitalni multimetar HP 3457A
- Razdelnik snage HP 11667A
- AC/DC termopretvarač HP 11050A
- DC kalibrator/izvor Krohn-hite 523

U zavisnosti od proizvođača i tipa senzora snage, merni prijemnik se može zameniti vatmetrom koji je kompatibilan sa predmetnim senzorom.

Matematički model određivanja faktora etaloniranja dat je izrazom (4). U opisanoj metodi, tačnost napona zadatog sa generatora funkcija nije od interesa, dok simetričnost razdelnika i te kako ima uticaj na tačnost merenja. Naime, slabljenje pojedinih grana razdelnika odstupa od nominalnih 6 dB, te on nije idealno simetričan, što se proverava i prilikom njegovog etaloniranja u metrološkoj laboratoriji TOC-a. Za proračun MN vrednost korekcije usled simetričnosti razdelnika  $\delta_R$  uzeta je iz njegovog poslednjeg zapisnika o etaloniranju, te za frekvenciju 500 kHz iznosi 0,05 dB. Standardna nesigurnost je  $6,69 \cdot 10^{-3}$ , pri čemu je pretpostavljena pravougaona raspodela.

Merna nesigurnost određivanja simetričnosti razdelnika  $\delta_{Re}$  za  $k=1$  iznosi 0,02 dB, odnosno  $4,6 \cdot 10^{-3}$  i pretpostavljena je Gausova raspodela.

Neprilagođenja između razdelnika i senzora nastaje kao posledica nesavršene uparenosti njihovih impedansi, a računa se na osnovu njihovih koeficijenata refleksije. U slučaju kada je poznat samo moduo koeficijenta refleksije, i pritom je uzeta njegoa maksimalna deklarisanu vrednost, preporuka je da se tada primeni Rejljeva raspodela (engl. *Rayleigh*), a korekcija usled neprilagođenja razdelnika i senzora (DUT-a)  $\delta_{mmR-D}$  se računa prema formuli [2,9]:

$$u(\delta_{mmR-D}) = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot u(\rho_R) \cdot u(\rho_D) = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_R \cdot \sigma_D \quad (5)$$

gde su  $\rho_R$  i  $\rho_D$  moduli koeficijenta refleksije razdelnika, odnosno senzora. Moduli koeficijenta refleksije senzora i razdelnika se dobijaju na osnovu deklariranih vrednosti njihovih koeficijenata stojećeg talasa i oba iznose 1,15.

Korekcija usled neprilagođenja razdelnika i AC/DC termopretvarača  $\delta_{mmR-T}$  se takođe računa prema obrascu (5), uz odgovarajuće module koeficijenta refleksije. Za termopretvarač nije specificirana maksimalna vrednost koeficijenta refleksije, odnosno stojećeg talasa. S obzirom da TOC nema mogućnost merenja ove veličine na frekvencijama nižim od 10 MHz, ona je izračunata na osnovu impedanse (6), gde je  $\rho_T$  moduo koeficijenta

$$\rho_T = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (6)$$

refleksije termopretvarača,  $Z$  ulaza impedansa, odnosno otpornost termopretvarača, dok je  $Z_0$  karakteristična impedansa voda 50  $\Omega$ .  $Z$  se dobija na osnovu maksimalnog deklarisanog odstupanja otpornosti termopretvarača 0,15  $\Omega$  od nominalne vrednosti 50  $\Omega$  i iznosi 50,15  $\Omega$ .

$$FE = \frac{P_{DUT} \cdot (1 + \delta_{r_{MP}} + \delta_{MP} + \delta_G) \cdot (1 + \delta_{mmR-D} + \delta_{mmR-T}) \cdot (1 + 0,5 \cdot \delta_R + \delta_{Re}) \cdot (1 - \delta_{AC/DC} + \delta_{AC/DC_e}) + \frac{\delta_{IDMM}^2 + \delta_{IDMM}^2}{Z}}{\frac{V_{DC}^2 + \delta_{DC}^2 + \delta_{DC_i}^2 + \delta_{DC_1}^2 + \delta_{DC_r}^2 + \delta_{DC_n}^2}{Z} \cdot (1 - \delta_{AC/DC} + \delta_{AC/DC_e}) + \frac{\delta_{IDMM}^2 + \delta_{IDMM}^2}{Z}} \cdot 100 \quad (4)$$

Moduo koeficijenta refleksije termopretvarača dobijen prema formuli (6) i iznosi 0,0015.

Korekcija usled ograničene rezolucije mernog prijemnika  $\delta_{r_{MP}}$  iznosi polovinu vrednosti rezolucije navedene u specifikaciji, odnosno 0,0005 dB. Pretpostavljena je pravougaona raspodela.

Merni prijemnik nema referentni izlaz 1 mW/50 MHz, te kalibracija senzora pre merenja nije potrebna. Merni prijemnik pored rezolucije, utiče preko nesigurnosti postavljanja nule i nesigurnosti usled šuma, deklariranih od proizvođača. Ovi uticaji su objedinjeni korekcijom usled očitavanja snage mernim prijemnikom  $\delta_{MP}$ , čija standardna devijacija iznosi  $11,08 \cdot 10^{-6}$  i za nju je pretpostavljena pravougaona raspodela.

Vrednost AC/DC razlike termopretvarača  $\delta_{AC/DC}$  je uzeta iz njegovog poslednjeg zapisnika o etaloniranju vršenog u TOC-u. Ona iznosi -0,072 % i sa njom se koriguje vrednost incidentne snage u formuli (3). S obzirom da je uvrštena u rezultat merenja, u tabelu budžeta MN ulazi samo merna nesigurnost kojom je ona određena. Merna nesigurnost određivanja AC/DC razlike  $\delta_{AC/DCe}$  za  $k=1$  iznosi 0,05 % od ulaznog AC napona i za nju je pretpostavljena Gausova raspodela.

DC kalibrator doprinosi ukupnoj MN preko nekoliko uticajnih veličina. Jedna od njih je tačnost generisanja DC kalibratora. Postavljena vrednost DC napona na izlazu kalibratora je u ovom slučaju 0,8944 V, generisana na opsegu 1,111119 V. Kalibrator generiše jednosmerni električni napon na tom opsegu sa apsolutnom tačnošću  $\pm(10 \cdot 10^{-6}$  izlaza + 3  $\mu$ V) za godinu dana. Prema tome, korekcija usled tačnosti generisanja DC kalibratora  $\delta_{DC}$  iznosi  $\pm 11,9$   $\mu$ V. Pretpostavljena je pravougaona raspodela. Vrednosti uticajnih veličina koje se tiču DC kalibratora razmatrane su za period od godinu dana i pretpostavljeno je da se temperatura okoline tokom merenja neće promeniti više od  $\pm 1$  °C u odnosu na temperaturu na kojoj je izvršeno podešavanje kalibratora.

Korekcija usled promene napona na izlazu kalibratora zbog promene temperature  $\delta_{DCI}$  na pomenutom opsegu se izračunava na osnovu temperaturnog koeficijenta i za temperaturu okoline od 18 °C do 28 °C iznosi  $\pm(1 \cdot 10^{-6}$  izlaza + 0,5  $\mu$ V)/°C. Promena temperature okoline je najviše 1 °C, te će se i izlazni napon maksimalno promeniti za 1,4  $\mu$ V. Pretpostavljena raspodela je trougaona.

Korekcija usled promene napona na izlazu DC kalibratora zbog linearnosti pri maksimalnoj promeni temperature od 1 °C  $\delta_{DCI}$  iznosi  $\pm(1 \cdot 10^{-6}$  izlaza + 1  $\mu$ V)/°C, odnosno 1,89  $\mu$ V. Pretpostavljena je pravougaona raspodela.

Korekcija usled ograničene rezolucije DC kalibratora  $\delta_{DCr}$  iznosi polovinu vrednosti rezolucije navedene u specifikaciji. S obzirom da kalibrator ima displej od 7 1/2 digita, ova korekcija iznosi 0,05  $\mu$ V. Za ovu uticajnu veličinu je takođe pretpostavljena pravougaona raspodela.

Korekcija usled šuma DC kalibratora  $\delta_{DCn}$  iznosi 7  $\mu$ V

efektivno u frekvenzijskom opsegu od 10 Hz do 100 kHz. Vrednost je uzeta iz specifikacije proizvođača i za nju je pretpostavljena normalna raspodela.

Digitalni multimetar na celokupno merenje utiče preko svoje rezolucije i temperaturnog koeficijenta, dok sama tačnost nije od interesa, budući da u oba koraka merenja multimetar pokazuje istu vrednost, koja u konkretnom slučaju iznosi 5,732 mV. Prema tome, korekcija usled temperaturnog koeficijenta digitalnog multimetra  $\delta_{IDMM}$  za opseg 30 mV iznosi (0,0005 % od očitane vrednosti + 0,000030 mV)/°C, odnosno 0,059  $\mu$ V. Pretpostavljena je trougaona raspodela.

Korekcija usled ograničene rezolucije digitalnog multimetra  $\delta_{rDMM}$  koji ima displej od 6 1/2 digita, za vrednost očitane DC napona reda nekoliko mV iznosi 0,5  $\mu$ V, što predstavlja polovinu vrednosti njegove rezolucije. Pretpostavljena raspodela je pravougaona.

Stabilnost postavljenog napona na generatoru funkcija sa vremenom nije definisana od strane proizvođača, ali je prepoznata kao uticajna veličina. Imajući u vidu specifikacije ostalih generatora funkcija, može se pretpostaviti da je korekcija usled promene postavljenog napona na generatoru funkcija sa vremenom  $\delta_G$  zanemarljivo mala.

Nakon zamene vrednosti pojedinih uticajnih veličina u matematičkom modelu datom formulom (4), zaključeno je da se pojedine veličine mogu zanemariti, te se matematički model može pojednostaviti svođenjem na izraz (7). U izrazu (7),  $Z$  označava impedansu voda od 50  $\Omega$  i koristi se za konverziju napona u snagu. Na osnovu modela (7) je proračunat budžet merne nesigurnosti (tabela I) za frekvenciju 500 kHz. Nenormalizovani faktor etaloniranja vrednosti 98,08 %, izmeren je sa nesigurnošću 0,84 %. Merna nesigurnost je izražena u procentima kao mernoj jedinici faktora etaloniranja, te ne predstavlja procenat od izmerene vrednosti.

Najveći doprinos ukupnoj mernoj nesigurnosti daju simetričnost razdelnika i korekcija usled merenja simetričnosti, ali i neprilagođenje između razdelnika i senzora. Neprilagođenje između razdelnika i termopretvarača je gotovo zanemarljivo zbog male vrednosti modula koeficijenta refleksije termopretvarača. Dobijena merna nesigurnost se ne menja značajno sa promenom frekvencije i tipa senzora, budući da senzor na MN utiče preko svog koeficijenta refleksije, čije su deklarirane vrednosti na frekvencijama od interesa pretežno vrlo niske (najčešće od 0,048 do 0,09). Za izmerenu vrednost  $FE$  u intervalu od 70 % do 100 %, pri istim mernim uslovima opisanim u radu, merna nesigurnost se nalazi u opsegu od 0,60 % do 0,86 %.

Dobijena MN je zadovoljavajuća za potrebe ML 02 i njenih korisnika. Jedan od mogućih načina smanjenja ove MN je izbeći upotrebu razdelnika snage, imajući u vidu njegov dominantan uticaj na MN. Međutim, to se ipak ne preporučuje, jer razdelnik pored toga šro pojednostavljuje

$$FE = \frac{P_{dut} \cdot (1 + \delta_{r_{MP}}) \cdot (1 + \delta_{mm_{R-D}} + \delta_{mm_{R-T}}) \cdot (1 + 0,5 \cdot \delta_R + \delta_{R_e}) \cdot (1 - \delta_{AC/DC} + \delta_{AC/DCe})}{\frac{V_{DC}^2}{Z} \cdot (1 - \delta_{AC/DC} + \delta_{AC/DCe})} \cdot 100 \quad (7)$$

TABELA I BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI ZA FREKVENCIJU 500 KHZ

Ulazna veličina	Vrednost nesigurnosti	Standardna nesigurnost	Funkcija raspodele verovatnoće	Koeficijent osetljivosti	Doprinos standardnoj nesigurnosti (%)
Korekcija usled simetričnosti razdelnika $\delta_R$	0,05 dB	$6,69 \cdot 10^{-3}$	Gausova	49,57	0,331
Korekcija usled određivanja simetričnosti $\delta_{Re}$	0,02 dB	$4,62 \cdot 10^{-3}$	Gausova	49,57	0,229
Korekcija usled neprilagođenja $\delta_{mmR-D}$	$9,735 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	Rejljeva	99,19	0,1155
Korekcija usled neprilagođenja $\delta_{mmR-t}$	$2,090 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$	Rejljeva	99,19	0,0025
Kor. usled rezolucije mernog prijemnika $\delta_{rmp}$	0,0005 dB	$6,64 \cdot 10^{-5}$	Pravougaona	100,16	0,0067
Kor. usled određivanja AC/DC razlike $\delta_{AC/DCe}$	0,05 %	$5 \cdot 10^{-4}$	Gausova	-0,758	-0,00038
Korekcija usled AC/DC razlike $\delta_{AC/DC}$	-0,072 %				
Snaga izmerena senzorom $P_{dut}$	15,7 mW				
Zadati napon na DC kalibratoru $V_{DC}$	0,8944 V				
Izmerena vrednost faktora etaloniranja FE	98,08 %				
Kombinovana merna nesigurnost					0,419
Proširena merna nesigurnost (k=2, verovatnoća 95 %)					<b>0,838</b>
<b>Konačni rezultat</b>	<b>98,08 % ± 0,84 %</b>				

merenje, ima zadatak da smanji navedena neprilagođenja, koja bi u ovom slučaju bila još uticajnije. Takođe, tada bi se javili novi uticaji merne nesigurnosti, kao što je nesigurnost usled spajanja i raspajanja konektora. Drugi način smanjenja MN je upotreba izmerenih vrednosti koeficijenta efleksije razdelnika i DUT-a, budući da su one uvek znatno niže od deklariranih vrednosti. No, to bi dalo bitniju razliku samo ukoliko je deklarirana vrednost DUT-a značajno viša od realne.

#### IV. ZAKLJUČAK

Primena AC/DC termopretvarača u procesu etaloniranja AC kalibratora, kao i AC napona voltmetra je opšte poznata. AC/DC termopretvarač ima osobinu da pri istom ulaznom naponu (snazi), bio on DC ili AC prirode, daje jednu istu vrednost izlaznog napona. Zahvaljujući tome, moguće je uspešno porediti jednosmernu i visokofrekventnu, odnosno RF snagu, što je u radu i opisano. Dobijena merna nesigurnost od 0,84 % je nešto bolja od MN određivanja faktora etaloniranja na frekvencijama višim od 10 MHz, koja iznosi od 1,1 % do 3 % za koaksijalne senzore snage. Jasno je da sama metoda zasnovana na prenošenju sledljivosti sa DC etalona doprinosi nižoj mernoj nesigurnosti. Budući da se FE senzora na frekvencijama iznad 10 MHz određuje transfer etalonom, odnosno referentnim etalonom za mikrotalasnu snagu [3], uticaj ovog etalona na ukupnu MN je znatno veći u odnosu na DC etalon, čiji su uticaji zanemarljivi. Međutim, samo merilo snage (vatmetar ili merni prijemnik) ima veliki uticaj na MN. Primera radi, veliki broj senzora proizvođača Keysight (nekadašnji Agilent i Hewlett Packard) je kompatibilan sa vatmetrom Agilent E4419B. Uzevši u obzir sve njegove uticaje, MN bi bila 1,28 %, za iste merne uslove. U tom smislu, vsta senzora, odnosno merila koje ide uz senzor, može značajno promeniti MN.

Opisana metoda, pored određivanja faktora etaloniranja, ima veliki značaj i prilikom prenošenja sledljivosti komparacijom referentnog etalona za mikrotalasnu snagu i AC napon. Naime, kada je sledljivost nekog od ova dva etalona dovodena u pitanje

(usled onemogućenog etaloniranja u inostranim laboratorijama i Institutima), primenom referentnog AC/DC termopretvarača TOC-a u komparaciji, sledljivost se sa jednog etalona na drugi može preneti u frekvencijskom opsegu od 10 MHz do 1 GHz.

#### LITERATURA

- [1] "Expression of Uncertainty of Measurement in Calibration-E4/02", *European co-operation for Accreditation*, December 1999.
- [2] Neda Spasojević, "Merenje apsolutne vrednosti snage CW signala nivoa od 100 pW do 1 kW pri etaloniranju u Tehničkom opitnom centru", ETRAN 2017.
- [3] Predrag Rakonjac, Magistarski rad: "Merni sistem za automatizovano etaloniranje senzora mikrotalasne snage u frekvencijskom opsegu od 50 MHz do 26,5 GHz", Niš 2010.
- [4] "Operation Manual", Precision DC Source/Calibrator Model 523, Krohn-Hite Corporation 2014.
- [5] "Service Manual", Multimeter 3457A, Hewlett Packard 1988.
- [6] "Operating and Service Manual", Thermal Converters Model 11049A, 11050A, 11051A, Hewlett Packard 1967.
- [7] "Function/Arbitrary Waveform Generator 33250A" Data Sheet, Keysight, 2015.
- [8] "Service Manual", Measurement receiver FSMR26, Rohde&Schwarz
- [9] "Revisiting mismatch uncertainty with the Rayleigh distribution", Agilent 2011.
- [10] "Radno uputstvo za etaloniranje AC napona voltmetra" TOC C.41.035, Oktobar 2018.

#### ABSTRACT

This paper describes a method for determining the power sensor calibration factors using an AC/DC thermal converter and a DC calibrator as a reference standard. The presented method is applied in the calibration laboratory of the Technical Test Center for frequencies up to 10 MHz, while in frequency range above 10 MHz, the method of direct comparison with the reference microwave power transfer standard is used. The paper also gives a calculation of the measurement uncertainty for described method.

#### Determination of power sensor calibration factor at frequencies up to 10 MHz

Neda Spasojević, Ivica Milanović, Miša Markuš