

Unapređenje nesigurnosti etaloniranja apsolutne RF snage

Neda Spasojević
Sektor za metrologiju
Tehnički opitni centar
Beograd, Srbija

nedamilivojcevic@yahoo.com,
<https://orcid.org/0000-0001-8051-982X>

Miša Markuš
Sektor za metrologiju
Tehnički opitni centar
Beograd, Srbija
markus.misa@gmail.com,

Slobodan Subotić
Sektor za metrologiju
Tehnički opitni centar
Beograd, Srbija
slobodansubotic80@gmail.com,
<https://orcid.org/0009-0008-3389-2451>

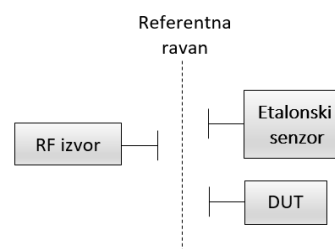
Abstract—U radu je opisan način poboljšanja nesigurnosti etaloniranja apsolutne vrednosti srednje snage primenom transfer etalona RF snage. Predloženi metod podrazumeva alternativnu primenu etalona primarno namenjenog za prenošenje sledivosti RF snage na senzore snage. Unapređenje merne nesigurnosti je inicirano učešćem laboratorije Tehničkog opitnog centra (TOC) u međulaboratorijskom poređenju iz oblasti RF snage, sa ciljem da se postigne što tačnije i pouzdanije merenje. Poređenje je potvrdilo validnost metoda i ukazalo na mogućnost poboljšanja mernih mogućnosti iskazanih u obimu akreditacije laboratorije TOC-a. Primenjenim metodom se merna nesigurnost smanjuje u opsegu snage od 1 mW do 10 mW više od pet puta.

Ključne reči—RF snaga, transfer etalon, etaloniranje, merna nesigurnost, senzor snage

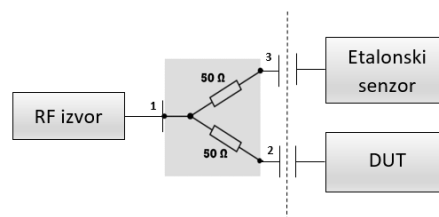
I. UVOD

Ostvarenje što pouzdanijih i tačnijih merenja je imperativ svake laboratorije za etaloniranje, među kojima je i laboratorija za mikrotalasnu tehniku (ML 02) Tehničkog opitnog centra (TOC) Vojske Srbije. ML 02 je 2023. godine uzela učešće u međulaboratorijskom poređenju iz oblasti RF snage, organizovanom od strane češkog nacionalnog metrološkog instituta [1]. Kako je ovim učešćem trebalo dokazati svoju kompetentnost, cilj laboratorije je bio da postigne što tačnije merenje sa minimalnom mernom nesigurnošću. U tu svrhu su preispitane merne mogućnosti laboratorije, te je formiran najtačniji metod merenja shodno njenim kapacitetima. Ovaj metod se bazira na primeni transfer etalona RF snage, koji u ML 02 čini referentni etalon RF snage i služi za prenošenje sledivosti na etalone manje tačnosti [2]. Metod predstavlja prilagođenje postojećeg metoda za određivanje faktora etaloniranja senzora snage u svrhu merenja apsolutne vrednosti RF snage. Ovo podrazumeva modifikaciju matematičkog modela i obrade rezultata merenja, kao i novu upotrebu transfer etalona snage, atipičnu za ovu vrstu merila.

Najzastupljeniji metodi etaloniranja apsolutne vrednosti srednje snage su metod supstitucije i metod istovremenog poređenja snage prikazani na slici 1 i 2 [3]. Metod supstitucije podrazumeva naizmenično merenje snage etalomom i merilom koje se etalonira (DUT, engl. Device Under Test). Ovakav metod u osnovi ima veliku mernu nesigurnost, koja se delom može smanjiti vezivanjem oslabljivača male vrednosti koeficijenta refleksije na izlaz RF izvora. U metodu prikazanom na slici 2, istovremeno poređenje snage se vrši pomoću razdelnika snage. Radi postizanja bolje merne nesigurnosti neophodno je



Sl. 1 Etaloniranje RF snage metodom supstitucije



Sl. 2 Metod istovremenog poređenja RF snage

poznavati S-parametre razdelnika. Primenom oba metoda postiže se merna nesigurnost veća od 3%. Težeći većoj tačnosti merenja apsolutne snage, ML 02 je modifikovala postojeći metod za etaloniranje senzora snage pomoću primarnog vojnog etalona RF snage.

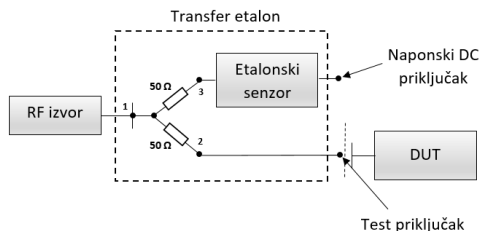
Prilikom etaloniranja senzora snage transfer etalomom, određuje se njegov faktor etaloniranja (K), definisan kao odnos supstituisane DC snage na izlazu senzora (P_s) i incidentne snage dovedene na njegov ulaz (P_{in}) [4], [5], što je dato izrazom:

$$K = \frac{P_s}{P_{in}} \quad (1)$$

Metod predstavljen u ovom radu primenjuje transfer etalon za određivanje tačne vrednosti incidentne snage dovedene na ulaz senzora.

Transfer etaloni RF snage se sastoje od razdelnika snage sa dva otpornika i od temperaturno stabilisanog termistorskog senzora (slika 3). Ovi senzori imaju dobre metrološke karakteristike među kojima su visoka temperaturna stabilnost i dugotrajna stabilnost faktora etaloniranja, kao i visoka linearnost

i tačnost merenja supstituisane DC snage [3], [6]. Transfer etaloni ne mogu samostalno meriti snagu na izlazu svog referentnog senzora, već su deo mernog sistema. Njihov interni razdelnik deli snagu sa svog ulaza tako da je istovremeno isporučuje na senzorski test priključak, tj. ulaz senzora koji se etalonira i na ulaz etalonskog senzora, koji RF snagu pretvara u supstituisanu DC snagu. Etalonski senzor je smešten u izolovano kućište čija se temperatura održava konstantnom. Na ovaj način se smanjuje uticaj promene temperature ambijenta na tačnost merenja snage.



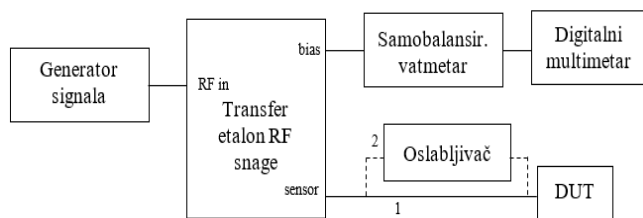
Sl. 3 Etaloniranje senzora transfer etalonom snage

II. METOD ETALONIRANJA

Predloženi metod etaloniranja apsolutne vrednosti srednje snage podrazumeva istovremeno merenje snage etalonskim senzorom u sastavu transfer etalona snage i senzorom koji se etalonira (DUT), što je prikazano na slici 4. Ovaj alternativni metod obezbeđuje tačnije određivanje incidentne snage na ulazu DUT-a, odnosno bolju mernu nesigurnost u odnosu na najčešće primenjene metode pomenute u poglavlju I.

Frekvencijski opseg etalonskog senzora transfer etalona Tegan F1135A je od 10 MHz do 26,5 GHz, dok mu je merni opseg od 10 μ W do 25 mW [6]. DUT je merilo snage, najčešće senzor snage sa vatmetrom ili mernim prijemnikom. Oni u opisanom metodu čine jednu celinu, odnosno merilo čija se tačnost merenja apsolutne snage proverava.

Prilikom zadavanja apsolutne vrednosti srednje snage prema slici 4, razlikuju se dva slučaja: bez primene oslabljivača (veza označena sa 1 na slici 4) i sa primenom oslabljivača ispred DUT-a (veza označena sa 2 na slici 4). Oslabljiivač se koristi u slučaju kada je na ulaz DUT-a potrebno zadati snagu manju od 1 mW. Kako transfer etalon ima visoku linearnost u opsegu od 1 mW do 10 mW [6], cilj je iskoristiti najlinearniji deo njegove karakteristike. To se postiže umetanjem oslabljivača ispred DUT-a, pri čemu se ulazni nivo na etalonskom senzoru održava aproksimativno 1 mW. Upotrebom oslabljivača se proširuje merni opseg i ujedno se postiže bolja tačnost zadavanja niskih nivoa RF snage. U ovom radu će se detaljnije razmatrati slučaj



Sl. 4 Metod etaloniranja apsolutne snage transfer etalonom snage

bez primene oslabljivača kada se postiže najmanja merna nesigurnost.

Prilikom etaloniranja apsolutne vrednosti RF snage predloženim metodom, signal odgovarajuće snage se sa generatora dovodi na ulaz transfer etalona. Internim razdelnikom se ova snaga istovremeno vodi na senzor koji se etalonira (povezan na priključak označen kao "sensor" na slici 4) i na termistorski senzor transfer etalona. Snaga koju meri test senzor se očitava kompatibilnim vatmetrom ili mernim prijemnikom. Supstituisana DC snaga na izlazu etalonskog senzora (priključak označen kao "bias" na slici 4) se meri samobalansirajućim dvostrukim vatmetrom i digitalnim multimetrom. Oni mere promenu DC snage (tačnije napona) na termistoru vatmetra u slučaju kada je RF snaga dovedena na termistor i kada na njemu nema snage [3], [7]. Napon na termistoru se očitava digitalnim multimetrom. Promena ove DC snage je ekvivalentna promeni RF snage dovedene na ulaz etalonskog senzora.

Snaga na senzorskom test priključku je jednaka snazi na naponskom DC priključku (P_e) i uz primenu poznate vrednosti faktora etaloniranja transfer etalona (K_e) se izračunava kao:

$$P_e = \frac{V_{off}^2 - V_{on}^2}{K_e R} \quad (2)$$

gde su V_{on} i V_{off} naponi na termistoru samobalansirajućeg vatmetra u slučaju kada je na njega dovedena RF snaga i kada na njemu nema RF snage, dok R predstavlja otpornost termistora koja iznosi 200 Ω [7].

Kako interni razdelnik snage unosi slabljenje od 6 dB, nivo signala postavljen na generatoru treba da bude takav da DUT očitava snagu što bližu nominalnoj. Tačna vrednost snage na ulazu DUT-a odgovara snazi izmerenoj etalonom. Ukoliko se ne može zadati snaga identična nominalnoj, postavljena je izmerena vrednost snage se mogu korigovati do nominalne uz pretpostavku linearnog ponašanja DUT-a u blizini nominalne vrednosti.

Opisani postupak merenja apsolutne vrednosti snage se primenjuje i u slučaju kada je ispred DUT-a vezan oslabljivač. Tada se incidentna snaga izmerena etalonom koriguje za tačnu vrednost njegovog slabljenja na test frekvenciji. Umetanjem oslabljivača se povećava ukupna nesigurnost metoda usled uticaja nesigurnosti određivanja njegovog slabljenja. Stoga se na laboratorijama ostavlja izbor metoda u cilju minimizacije nesigurnosti u opsegu ispod 1 mW. Procena ML 02 je da prikazani metod obezbeđuje bolju nesigurnost od metoda opisanih u poglavlju I pri nivoima snage na ulazu DUT-a u opsegu od -40 dBm do +10 dBm (100 nW do 10 mW).

III. ANALIZA MERNE NESIGURNOSTI

Matematički model etaloniranja apsolutne vrednosti RF snage pomoću transfer etalona snage je dat izrazom:

$$P_{in}(f) = \frac{P_{TE}(1+\delta P_{TE}+\delta P_w+\delta_l+\delta_e)(1+\delta M_{TE-d})}{K_{TE}(1+\delta K_{TE}+\delta_{CF})} + \sigma_p \quad (3)$$

Prikazani model se odnosi na slučaj kada se ne primenjuje oslabljivač (veza označena sa 1 na slici 4). Vrednosti pojedinih parametara prikazanih u (3), kao i primenjene raspodele verovatnoće su date u tabeli budžeta merne nesigurnosati (tabela I).

TABELA I. BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI ETALONIRANJA APSOLUTNE VREDNOSTI SNAGE NIVOA 1 mW I FREKVENCIJE 10 MHz

Uticajna veličina	Procena vrednosti	Standardna nesigurnost	Raspodela / Tip	Koeficijent osetljivosti	Doprinos nesigurnosti (mW)
Korekcija usled faktora etaloniranja transfer etalona, δK_{TE}	0,9698	0,0022	Gausova / B	-1,06 mW	$2,32 \cdot 10^{-3}$
Korekcija usled merenja snage na test priključku transfer etalona, δP_{TE}	0	0,00133	Pravougaona / B	1,03 mW	$1,36 \cdot 10^{-3}$
Korekcija usled rezolucije vatmetra (DUT-a), δP_w	0	0,00029	Pravougaon / B	1,03 mW	$2,97 \cdot 10^{-4}$
Korekc. usled promene faktora etaloniranja transfer etal. od poslednjeg	0,3%	0,00173	Pravougaona / B	-1,06 mW	$1,83 \cdot 10^{-3}$
Korekc. usled linearnosti transfer etalona, δ_i	0	$5,77 \cdot 10^{-4}$	Pravougaona / B	1,03 mW	$6,09 \cdot 10^{-4}$
Korekcija usled temperaturnog drifta transfer etalona, δ_t	0	0,00029	Pravougaona / B	1,03 mW	$3,05 \cdot 10^{-4}$
Korekcija usled neprilagođenja transfer etalona i DUT-a, δM_{TE-D}	0	0,00016	Rejli-U / B	1,03 mW	$1,64 \cdot 10^{-4}$
Korekc. usled više ponovljenih merenja, σ_p	0,0005 mW	$2,91 \cdot 10^{-4}$ mW	Normalna / A	1	$2,91 \cdot 10^{-4}$
Kombinovana nesigurnost u_c (k=1)					$3,38 \cdot 10^{-3}$
Proširena nesigurnost (k=2)					$6,75 \cdot 10^{-3}$ (0,68%)

Budžet se odnosi na slučaj merenja snage nominalne vrednosti 1 mW i frekvencije 10 MHz. Kao predmet etaloniranja uzet je diodni senzor snage tipa Agilent E4413A sa vatmetrom Agilent E4419B.

Faktor etaloniranja transfer etalona (K_{TE}) opisuje ponašanje njegovog internog razdelnika i senzora u celosti, te objedinjuje sve uticaje kojima ovi elementi etalona doprinose mernoj nesigurnosti. On definiše nivo RF snage koja se isporučuje na senzorski test priključak. Faktori etaloniranja primenjenog transfer etalona su određeni u nacionalnom mertološkom institutu Švajcarske. Njihove vrednosti u frekvijskom opsegu od 10 MHz do 26,5 GHz se nalaze u intervalu od 99,28% do 73,7%, a određeni su sa proširenom mernom nesigurnošću ($k=2$) od 0,44% do 1,4%. Faktor etaloniranja za frekvenciju 10 MHz iznosi 96,98%, a određen je sa mernom nesigurnošću 0,44% ($k=2$). Korekcija usled određivanja ovog faktora δK_{TE} je u tabeli I data za interval 1σ .

Snaga P_{TE} koja se isporučuje na test priključak transfer etalona meri se samobalansirajućim dvostrukim vatmetrom i digitalnim multimetrom. Deklarisana nesigurnost merenja ove snage iznosi $\pm 0,03\%$ očitane vrednosti $+2 \mu W$ [7]. Korekcija usled merenja snage (δP_{TE}) nivoa 1 mW iznosi $\pm 0,23\%$, pri čemu je obuhvaćena nesigurnost digitalnog multimetra i samobalansirajućeg vatmetra. Sa smanjenjem nivoa snage uticaj ove korekcije postaje dominantan, čak i neprihvatljivo veliki pri vrednostima bliskim donjoj granici mernog opsega etalona. Stoga je cilj metoda održati nivo snage viši ili jednak 1 mW na etalonu.

Promena vrednosti faktora etaloniranja transfer etalona (δ_{CF}) prema specifikaciji proizvođača iznosi maksimalno $\pm 0,5\%$ godišnje. Na osnovu dugogodišnjeg praćenja stabilnosti etalona procenjeno je da se njegov faktor etaloniranja neće promeniti više od 0,1% po godini u celom frekvijskom opsegu. Kako je sledivost etalona ostvarena pre 3 godine, prilikom procene δ_{CF} je uzeta vrednost od 0,3%.

Linearnost transfer etalona (δ_i) u opsegu od 1 mW do 10 mW, prema specifikaciji proizvođača iznosi $\pm 0,1\%$. U ovom opsegu

se ostvaruje najbolja tačnost merenja referentne vrednosti snage etalomom i pratećom opremom.

Temperaturni drift etalona (δ_t), prema specifikaciji proizvođača za definisani radni opseg od $+12 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ iznosi maksimalno $\pm 0,05\%$. Etaloniranje se izvodi u kontrolisanim mikroklimatskim uslovima u kojima se temperatura okoline održava u opsegu $(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$.

Pojedine karakteristike predmeta provere utiču na nesigurnost etaloniranja, te su prepoznati sledeći izvori nesigurnosti: rezolucija vatmetra, tj. merila snage (δP_w), neprilagođenje između transfer etalona i DUT senzora (δM_{TE-d}) i ponovljivost etaloniranja (σ_p).

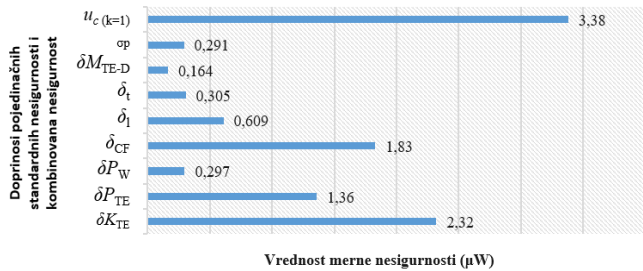
Rezolucija vatmetra sa prikazom četiri cifre iznosi $1 \mu W$ [8], te je vrednost nesigurnosti jednaka polovini rezolucije, odnosno $0,5 \mu W$, što iznosi $0,05\%$ za očitani nivo snage 1 mW. Korekcija usled neprilagođenja transfer etalona i DUT senzora δM_{TE-d} se dobija na osnovu specificirane vrednosti modula koeficijenata refleksije senzora ($\rho_d = 0,095$) i poznate vrednosti modula koeficijenata refleksije test izlaza transfer etalona ($\rho_{TE} = 0,0027$), određene prilikom njegovog etaloniranja sa mernom nesigurnošću $u(\rho_{TE}) = 0,0018$ za $k=2$. Standardna nesigurnost neprilagođenja se dobija na osnovu izraza [9]:

$$u(\delta M_{TE-d}) = 2\sqrt{2} \frac{\rho_d}{3,439} \frac{\sqrt{\rho_{TE}^2 + u^2(\rho_{TE})}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Ova nesigurnost se može smanjiti merenjem stvarne vrednosti koeficijenta refleksije DUT-a, umesto upotrebe njegove specificirane vrednosti, koja može biti značajna na višim frekvencijama reda GHz.

Srednja vrednost izmerenih snaga dobijena je na osnovu tri ponovljena merenja za DUT iznosi 1,001 mW, a za etalon 1,008 mW. Standardna devijacija razlike odgovarajućih snaga iznosi 0,0005 mW, a standardna nesigurnost usled tri ponovljena merenja $2,91 \cdot 10^{-4}$ mW.

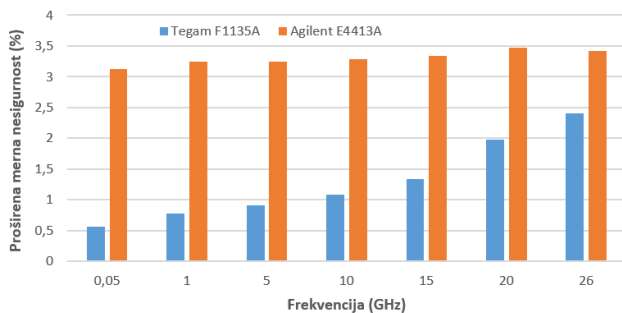
Grafički prikaz pojedinačnih doprinosa standardnih nesigurnosti u odnosu na kombinovanu mernu nesigurnost je dat



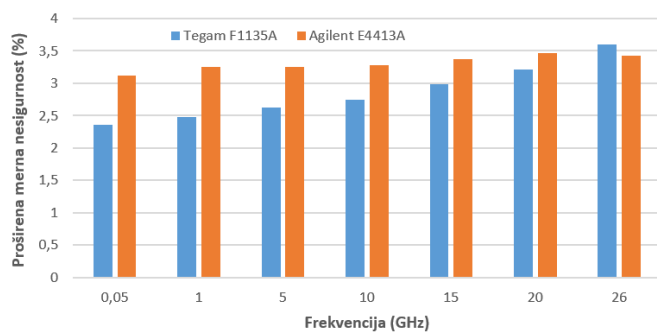
Sl. 5 Uporedni prikaz pojedinačnih doprinosa merne nesigurnosti u odnosu na kombinovanu nesigurnost

na slici 5. Na osnovu tabele I i slike 5 se zaključuje da je uticaj nesigurnosti kojom je određen faktor etaloniranja etalona najdominantniji. Pored njega su značajni i uticaj usled promene ovog faktora od poslednjeg etaloniranja i uticaj merenja snage na test priključku transfer etalona dvostrukim vatmetrom i digitalnim multimetrom.

Predloženim metodom se ostvaruje višestruko smanjenje nesigurnosti etaloniranja apsolutne snage u opsegu od 1 mW do 10 mW. Pri frekvenciji 50 MHz merna nesigurnost je smanjena više od pet puta u odnosu na metod prikazan na slici 1, unapređen umetanjem oslabljivača na izlazu RF izvora, radi smanjenja uticaja neprilagođenja impedansi. Uporedni prikaz mernih nesigurnosti ova dva metoda za nivo snage 1 mW je dat na slici 6. Pritom je za referentni senzor (slika 1) uzet Agilent E4413A i oslabljivač Agilent 8483C. Poboljšanje merne nesigurnosti je značajnije na nižim frekvencijama, budući da



Sl. 6 Smanjenje merne nesigurnost ostvareno za 1 mW metodom sa transfer etalonom TEGAM F1135A u odnosu na unapređeni metodom sa senzorom snage Agilent E4413A



Sl. 7 Smanjenje merne nesigurnost ostvareno za 100 nW metodom sa transfer etalonom TEGAM F1135A u odnosu na unapređeni metodom sa senzorom snage Agilent E4413A

nesigurnost kojom je određen faktor etaloniranja transfer etalona raste sa frekvencijom.

Merna nesigurnost opisanog metoda u čitavom mernom i frekvencijskom opsegu se nalazi u intervalu od 0,55% do 3,6%. Treba naglasiti da se pri nivoima snage manjim od 1 mW na ulazu DUT-a postiže manje poboljšanje merne nesigurnosti, ali je umetanjem oslabljivača omogućeno zadavanje nivoa snage koji su van opsega rada transfer etalona. Na slici 7 je prikazano smanjenje merne nesigurnosti za nivo snage 100 nW (-40 dBm), kada se u predloženom metodu koristi oslabljivač.

IV. ZAKLJUČAK

Ovaj rad prikazuje način na koji je višestruko smanjena nesigurnost etaloniranja merila RF snage, odnosno merenja apsolutne vrednosti snage. Unapređenje je ostvareno alternativnom primenom transfer etalona snage kao reference, pri čemu je izvršena modifikacija postojećeg metoda za određivanje faktora etaloniranja senzora snage. Merni opseg u kome se postiže smanjenje merne nesigurnosti primenom predloženog metoda se može razlikovati u zavisnosti od laboratorije. ML 02 ostvaruje poboljšanje nesigurnosti u opsegu od 100 nW do 10 mW, a najbolja merna nesigurnost se postiže u opsegu snage od 1 mW do 10 mW.

Predstavljeni metod je validovan učešćem laboratorije Tehničkog opitnog centra u međulaboratorijskom poređenju iz oblasti RF snage pod organizacijom češkog metrološkog instituta. Metod je omogućio poboljšanje mernih mogućnosti laboratorije TOC-a iskazanih obimom akreditacije kod Akreditacionog tela Srbije i obimom oblašćenja kod Ministarstva odbrane. Ovo unapređenje korisnicima obezbeđuje manju nesigurnost merenja apsolutne vrednosti RF snage.

LITERATURA

- [1] S. Klenovska, "Report on interlaboratory comparison - Measurement of RF power, ILC 41-1400-22", Czech metrology Institute, ILC Department, April 2023.
- [2] P. Rakonjac, B. Milovanovic, and N. Doncov, "Automated power sensor calibration up to 26.5 GHz", *Microwave Review*, vol. 14, no. 2, pp. 20–27, 2008.
- [3] N. Spasojević, "Metod za proširenje frekvencijskog opsega etaloniranja senzora RF snage," Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija, 2023.
- [4] A. Fantom, *Radio Frequency and Microwave Power Measurement*, Stevenage, U.K.: Peter Peregrinus Ltd., 1990.
- [5] *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements*, Application Note 64-1C, Agilent Technologies, USA, 2001.
- [6] *Coaxial RF Power Transfer Standards Models F1125, F1130, F1135, M1125, M1130, M1135, Instruction Manual (PN# IM300)*, TEGAM, 2007.
- [7] *Operation & Installation Manual System IIA Automatic Power Meter Calibration System (IM198-CD Rev. B)*, TEGAM, 2005.
- [8] *Keysight Technologies E4418B/E4419B Power Meters, Service Guide*, 2015.
- [9] *Revisiting Mismatch Uncertainty With the Rayleigh Distribution*, Keysight Technologies, White Paper, NCSL International Workshop and Symposium, 2011

ABSTRACT

The paper presents an improvement in the uncertainty of absolute average RF power calibration using a transfer RF power standard. The proposed method involves an alternative use of the standard primarily intended for RF power traceability transfer to power sensors. Measurement

uncertainty improvement was initiated by the participation of the Technical Test Center's laboratory (TTC) in an interlaboratory comparison in the field of RF power, aiming to achieve more accurate and reliable measurements. The validity of the method was confirmed by the comparison, indicating the potential for improving measurement capabilities within the TTC's laboratory scope of accreditation. Measurement

uncertainty is reduced more than five times through the applied method in the power range from 1 mW to 10 mW.

**UNCERTAINTY IMPROVEMENT OF THE ABSOLUTE
RF POWER CALIBRATION**

Neda Spasojević, Miša Markuš, Slobodan Subotić