

## USPOSTAVLJANJE SLEDIVOSTI RF SNAGE U FREKVENCIJSKOM OPSEGU ISPOD 10 MHZ

Neda Spasojević, Ivica Milanović, Predrag Rakonjac, Zoran Mitrović

Ključne reči: senzor snage, termopretvarač, merna nesigurnost, etaloniranje, faktor etaloniranja

### KRATAK SADRŽAJ

Frekvencijski opseg ispod 10 MHz predstavlja kritično područje koje veliki broj RF etalona ne pokriva. Kao rezultat povećane potrebe za etaloniranjem senzora RF snage, čiji frekvencijski opseg počinje od DC, Tehnički opitni centar je realizovao metodu kojom je omogućeno njihovo etaloniranje na frekvencijama ispod 10 MHz, primenom termopretvarača kao etalona AC (RF) napona. Ovom metodom je prevaziđen problem dostupnosti etalona RF snage i proširene su merne mogućnosti laboratorije za mikrotalasnu tehniku Tehničkog opitnog centra u pogledu RF snage do DC.

### ESTABLISHING THE TRACEABILITY OF THE RF POWER BELOW 10 MHZ

Keywords: power sensor, thermal converter, measurement uncertainty, calibration, calibration factor

### ABSTRACT

A frequency band below 10 MHz is a critical area that a large number of RF standards do not cover. As a result of the increased need for the RF power sensors calibration, whose frequency range start from DC, the Technical Test Center has realized a method which enables the power sensors calibration at frequencies below 10 MHz, using a thermal voltage converter as an AC (RF) voltage standard. The problem of RF power standard availability has been overcome by this method, and the measuring capabilities of the laboratory for microwave technics of the Technical Test Center in terms of RF power have been expanded to DC.

## UVOD

Senzori RF snage su među najrasprostranjenijim merilima u RF tehnici. Primenjuju se u merenjima u oblasti telekomunikacija, radarskih sistema, u laboratorijskim ispitivanjima i etaloniranjima itd. Oni se periodično etaloniraju u metrološkim laboratorijama, čime korisnici stižu uvid u njihovu tačnost, dobijajući korekzione faktore neophodne za što tačnije merenje snage ovim merilima. Pritom se proverava faktor etaloniranja senzora (FE), kao njegov najznačajniji parametar, koji predstavlja frekvencijsku karakteristiku senzora.

Frekvencijski opseg starijih tipova senzora snage je počinjao od 100 kHz, a najčešće od 10 MHz. Razvojem tehnologije i pojavom novih zahteva za merenjem RF snage, danas je na tržištu sve više senzora koji mere snagu od nekoliko kHz, pa čak i od DC. Otuda i povećana potreba za etaloniranjem ovakvih senzora.

Etaloniranje senzora snage se u Srbiji vrši jedino u Tehničkom opitnom centru (TOC), u laboratoriji za mikrotalasnu tehniku. Pre sprovedenog istraživanja, ova laboratorija je imala uspostavljenu sledivost RF snage u opsegu od 10 MHz do 26,5 GHz [1]. Zbog povećanog broja zahteva za etaloniranjem senzora RF snage u frekvencijskom opsegu ispod 10 MHz, laboratorija je pokrenula istraživanje u cilju razvoja metode kojom bi se ovo etaloniranje omogućilo.

Osnovni problem prilikom razvoja metode bio je nedostatak etalona RF snage u frekvencijskom području ispod 10 MHz. Tipični etalonini RF snage su mikrokalorimetri i termistorski senzori snage, koji mogu biti u samostalnoj izvedbi ili u sklopu transfer etalona snage [2]-[4]. Ovi etaloni najčešće pokrivaju frekvencijski opseg od 10 MHz do nekoliko desetina GHz i namenjeni su za primenu u širokom frekvencijskom opsegu. Na tržištu se ređe sreću etaloni RF snage koji pokrivaju niskofrekventno područje. Kako TOC poseduje etalon RF snage u opsegu od 10 MHz do 26,5 GHz, nabavka novog etalona isključivo u svrhu pokrivanja uskog frekvencijskog područja ispod 10 MHz je bila neopravdana i skupa. Iz tog razloga je sprovedeno istraživanje sa idejom da se sagledaju kapaciteti laboratorija TOC-a i mogućnost uspostavljanja sledivosti RF snage ispod 10 MHz. Imajući u vidu da je od interesa frekvencijski opseg koji odgovara opsegu AC napona, a kako laboratorija za osnovne električne veličine TOC-a ima obezbeđenu sledivost AC napona do Direkcije za mere i dragocene metale, sledivost RF snage je uspostavljena preko AC napona. Rezultat istraživanja je razvijena pouzdana metoda, kojom se senzori snage mogu etalonirati primenom postojeće opreme, a sa prihvatljivom mernom nesigurnošću. Metoda je zasnovana na primeni razdelnika RF snage i termopretvarača, koji ima ulogu referentnog etalona AC, odnosno RF napona. Termopretvarači su korišćeni u različitim varijantama komparacije etalona [2], [5]-[8], te je isti princip, uz nešto drugačiji postupak merenja primenjen za određivanje FE senzora metodom predstavljenom u radu.

## METODA MERENJA

### *Teorijske osnove*

Razvijena metoda bazira se na određivanju FE senzora snage u frekvencijskom opsegu ispod 10 MHz. FE (poznat u literaturi i kao kalibracioni faktor) predstavlja frekvencijsku karakteristiku senzora, a uključuje parazitne gubitke i gubitke usled neprilagođenja senzora. Definiše se kao odnos supstituisane DC snage na izlazu senzora  $P_{\text{dut}}$  i incidentne snage dovedene na ulaz senzora  $P_{\text{in}}$  prema izrazu (1) [9], [10]:

$$FE = \frac{P_{\text{dut}}}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

S obzirom da se u metodi koristi termopretvarač kao referentni etalon AC napona / RF snage, osnovni parametar koji definiše ponašanje termopretvarača pri ulaznom DC i AC naponu jeste AC/DC razlika  $\delta_{\text{ac/dc}}$  i data je formulom (2):

$$\delta_{ac/dc} = \frac{V_{ac}-V_{dc}}{V_{dc}} \Big|_{E_{ac}=E_{dc}} \quad (2)$$

gde je  $V_{ac}$  efektivna vrednost napona sinusnog signala, a  $V_{dc}$  vrednost jednosmernog napona na ulazu termopretvarača, za koje termopretvarač daje istu vrednost izlaznog napona ( $E_{ac} = E_{dc}$ ). Veza između ulazne (incidentne) RF snage i odgovarajućeg AC napona na ulazu senzora koji se etalonira, kao i na ulazu etalonskog termopretvarača, ostvaruje se pomoću Omovog zakona prema izrazu (2) [2]:

$$P_{in} = \frac{V_{ac}^2}{Z} = \frac{(V_{dc}(1+\delta_{ac/dc}))^2}{Z} \quad (3)$$

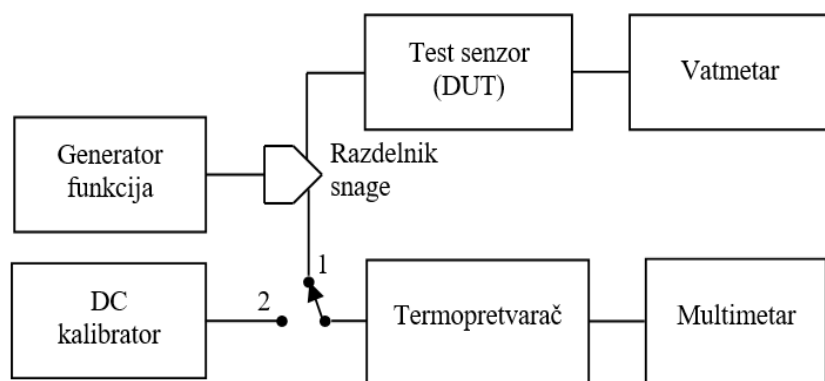
gde je  $Z$  ulazna impedansa termopretvarača koja iznosi  $50 \Omega$ . Na osnovu izraza (1) i (3) dobija se osnovna formula za proračunavanje FE na test frekvenciji  $f$ :

$$FE(f) = \frac{P_{dut}}{(V_{dc}(1+\delta_{ac/dc}))^2/Z} \quad (4)$$

Formula (4) je nešto modifikovana u narednom odeljku, zbog uvođenja odgovarajućih korekcija. AC/DC razlika primenjenog termopretvarača je poznata za svaku merenu frekvenciju i određuje se u laboratoriji za osnovne električne veličine TOC-a.

### Procedura merenja

Realizovana metoda se u osnovi zasniva na primeni dve opšteprihvaćene metode: metodi direktne komparacije snaga upotrebom razdelnika snage i metodi komparacije AC napona upotrebom termopretvarača. Prva koristi razdelnik snage za istovremeno merenje RF snage na ulazu senzora koji se etalonira (DUT, engl. Device Under Test) i snage na ulazu etalona (termopretvarača) [9]-[11]. Iz druge metode je prihvaćen princip kojim se termopretvarač kao referentni etalon AC napona koristi u komparaciji sa drugim etalonima za AC napon [2], [7],[8] te je u slučaju realizovane metode analogija primenjena na RF snagu.



Slika 1. Određivanje FE ispod 10 MHz

Blok šema merenja FE u opsegu ispod 10 MHz data je na slici 1. Generator funkcija generiše stabilan sinusni signal, sa niskim sadržajem harmonika. Kako je maksimalni ulazni napon korišćenog termopretvarača 0,45 V, merenje se vrši na 0,4 V efektivne vrednosti napona, da bi se omogućilo merenje u što linearnijem delu njegove karakteristike. Ovaj napon odgovara vrednosti RF snage od približno +5 dBm. Za metodu je bitno

stabilno očitavanje poslednje značajne cifre multimetra, te se koristi multimeter rezolucije  $6\frac{1}{2}$  cifara.

Procedura merenja se sastoji iz dva koraka. U prvom koraku (povezivanje označeno sa 1 na slici 1) se na ulaze senzora i termopretvarača istovremeno dovodi RF snaga. Supstituisana DC snaga na izlazu senzora  $P_{dut}$  se očitava odgovarajućim vatmetrom, a DC napon na izlazu termopretvarača multimetrom.

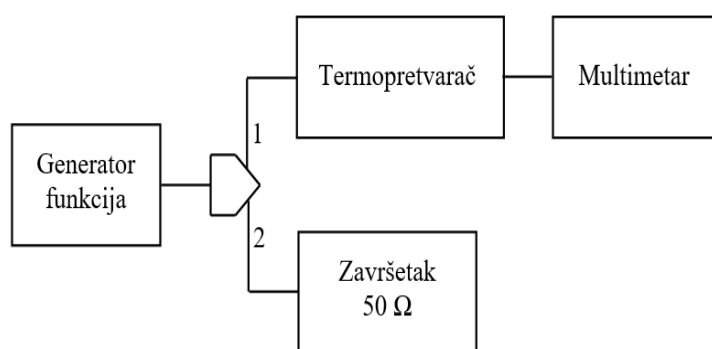
U drugom koraku (povezivanje označeno sa 2 na slici 1) se određuje tačna vrednost RF snage, odnosno AC napona dovedena na ulaz termopretvarača u prvom koraku. Pritom se na ulaz termopretvarača dovodi napon sa DC kalibratora takav da termopretvarač daje istu vrednost izlaznog napona, odnosno isto očitavanje multimetra kao u prvom koraku. Kada se ovo postigne, vrednost AC napona na ulazu termopretvarača se izračunava pomoću poznate vrednosti AC/DC razlike termopretvarača  $\delta_{ac/dc}$  određenoj u laboratoriji TOC-a i vrednosti DC napona postavljenog na kalibratoru  $V_{dc}$  prema formuli (2). Primenom  $P_{in}$  dobijenom pomoću (3) i izmerene vrednosti  $P_{dut}$ , dobija se vrednost FE na test frekvenciji definisana izrazom (4).

Predstavljena metoda u svom osnovnom obliku je zahtevala određeno poboljšanje, budući da je merna nesigurnost (MN) bila prevelika za potrebe laboratorije TOC-a. Detaljnom analizom merne nesigurnosti, ustanovljeno je da razdelnik snage, odnosno simetrija njegovih grana najviše doprinosi mernoj nesigurnosti. Značajno smanjenje merne nesigurnosti (više od šest puta) je ostvareno eksperimentalnim određivanjem simetrije razdelnika, primenom alternativne metode bazirane na upotrebi termopretvarača.

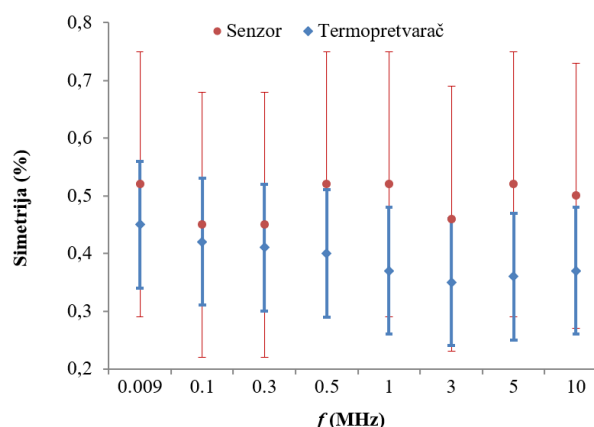
### Unapređenje metode

Uprkos tome što se u metodi koristi simetričan razdelnik snage, njegova simetrija u praksi nije idealna, te se ona mora uzeti u obzir prilikom procene merne nesigurnosti. Vrednost njegove simetrije specificirana od strane proizvođača iznosi 3,5 % [12], što značajno degradira mernu nesigurnost opisane metode. Iz tog razloga je odlučeno da se simetrija razdelnika meri, a da se vrednost FE koriguje dobijenom vrednošću simetrije za odgovarajuću frekvenciju.

Simetrija razdelnika se tipično određuje analizatorom mreže [12]-[14]. Kako mnogi RF uređaji, pa i analizator mreže koji laboratorija poseduje ne pokrivaju opseg ispod 10 MHz, bilo je neophodno iznaći metodu koja bi omogućila merenja simetrije razdelnika primenom postojeće opreme, a uz najbolju moguću mernu nesigurnost. Rešenje je iznađeno u vidu metode koja kao alternativu analizatoru mreže koristi termopretvarač. Blok šema merenja simetrije razdelnika je prikazana na slici 2.



Slika 2. Merenje simetrije razdelnika snage



Slika 3. Validacija metode merenja simetrije razdelnika snage

Kako se prilikom merenja simetrije razdelnika upoređuju snage ili naponi na njegovim izlazima i određuje njihova relativna razlika, simetrija se u ovoj metodi meri poređenjem napona na izlazu termopretvarača, kada je on postavljen u jednoj, a zatim i u drugoj grani razdelnika (naponi  $V_1$  i  $V_2$  na izlazima obeleženim sa 1 i 2 na slici 2). Istovremeno se slobodna grana razdelnika zatvara mikrotalasnim završetkom (opterećenjem) nominalne impedanse  $50 \Omega$  i niskog koeficijenta refleksije. Simetrija se u ovom slučaju dobija kao relativna razlika ovih napona  $\delta_s = (V_1 - V_2) / V_2$ . Dobijene vrednosti simetrije maksimalno iznose 0,52 % za korišćeni razdelnik, što je značajno manje od specificirane vrednosti 3,5 %. Sa druge strane, ove vrednosti se ne mogu zanemariti, te se koriste za korekciju dobijenih vrednosti FE prema formuli (5).

$$FE_{kor}(f) = \frac{P_{dut}(1+\delta_s)}{(V_{dc}(1+\delta_{ac/dc}))^2/Z} \quad (5)$$

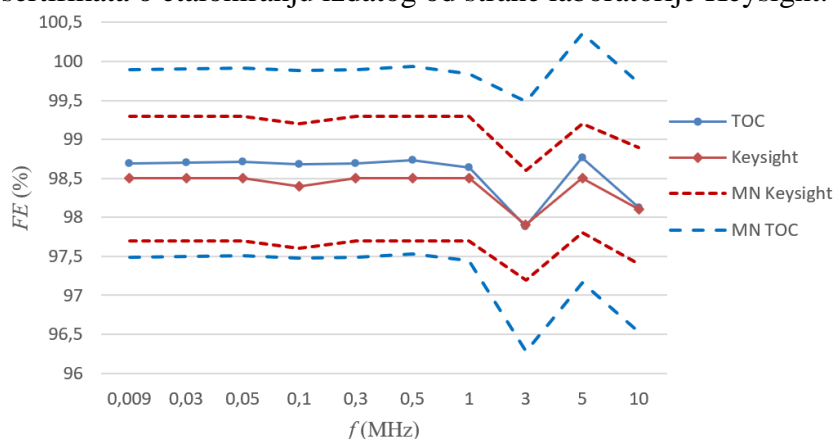
Korekcija  $\delta_s$  može imati pozitivan ili negativan znak, u zavisnosti od toga u kojoj grani razdelnika se nalazi DUT.

Validacija metode merenja simetrije razdelnika je izvršena poređenjem dobijenih vrednosti simetrije sa odgovarajućim vrednostima određenim pomoću metode u kojoj je umesto termopretvarača sa multimetrom na slici 2, korišćen senzor snage sa vatmetrom. Validacijom je potvrđeno dobro poklapanje

odgovarajućih vrednosti simetrije dobijenih sa obe metode, sa maksimalnim apsolutnim odstupanjem 0,16 % u celom frekvencijskom opsegu od DC do 10 MHz, što je unutar granica mernih nesigurnosti. Uporedni prikaz vrednosti simetrije razdelnika snage dobijenih metodom sa senzorom snage i metodom sa termopretvaračem, sa pridruženim mernim nesigurnostima je dat na slici 3.

## REZULTATI

Za validaciju metode merenja FE senzora u opsegu ispod 10 MHz kao DUT je korišćen diodni senzor snage tipa E9304A proizvođača Keysight, frekvencijskog opsega od 9 kHz do 6 GHz. Validacija je izvršena poređenjem dobijenih vrednosti FE senzora sa odgovarajućim vrednostima iz pripadajućeg sertifikata o etaloniranju izdatog od strane laboratorije Keysight.



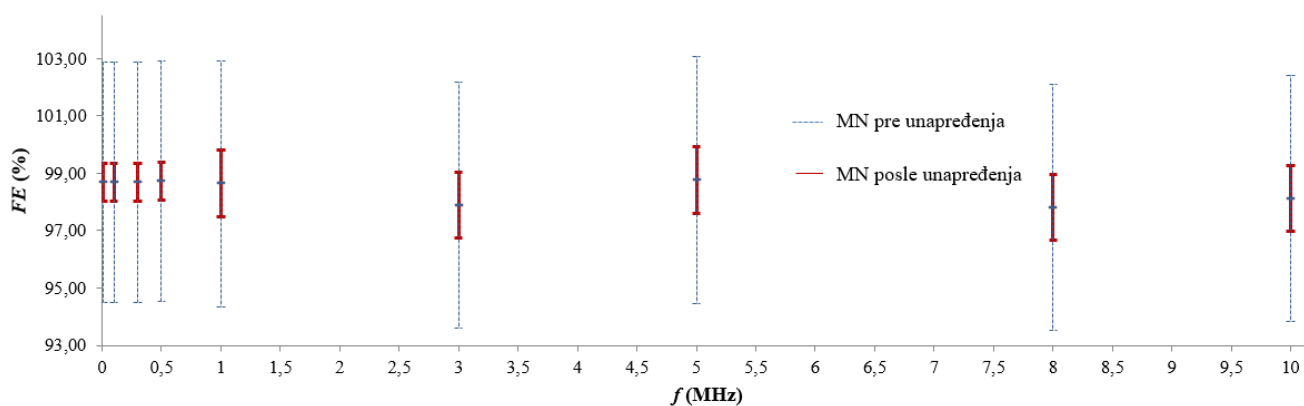
Slika 4. Validacija metode određivanja FE ispod 10 MHz

Kako su vrednosti FE iz sertifikata date za nivo signala -1 dBm na ulazu senzora, a metoda realizovana u TOC primenjuje ulazni nivo od približno +5 dBm, bilo je neophodno svesti ove nivoe na istu vrednost, radi pravilnog poređenja rezultata. U tu svrhu je korišćen precizni oslabljivač nominalnog slabljenja 6 dB, postavljen u grani razdelnika ispred DUT-a. Slabljenje oslabljivača je određeno za svaku frekvenciju od interesa. Kako je DUT diodni senzor snage, za ovaj tip senzora se specificira i određuje FE

normalizovan u odnosu na vrednost FE dobijen na referentnoj frekvenciji 50 MHz [15]-[17]. FE na referentnoj frekvenciji se u TOC-u određuje postojećim automatizovanim sistemom, primenom transfer etalona snage.

Rezultati FE pokazuju dobro slaganje sa sertifikatom proizvođača, što se vidi na slici 4. Merna nesigurnost ostvarena prilikom validacije je nešto veća od nesigurnosti metode prikazane na slici 1 zbog upotrebe oslabljivača, odnosno usled nesigurnosti kojom je određeno njegovo slabljenje i iznosi od 1,2 % do 1,6 %.

Merna nesigurnost određivanja normalizovanog FE ostvarena u TOC-u unapređenom metodom je u intervalu (0,7- 1,2) %, dok je nesigurnost određivanja FE u laboratoriji Keysight u intervalu (0,7- 0,8) %. Za procenu merne nesigurnosti korišćene su evropska dokumenta i preporuke [18]-[21]. Meranjem simetrije razdelnika je merna nesigurnost metode unapređena više od 6 puta, što si vidi na slici 5. Ovo unapređenje je značajno kako za laboratoriju TOC-a, tako i za njene korisnike. S obzirom da korisnici etaloniranjem senzora dobijaju FE kojima mogu vršiti korekciju svojih rezultata merenja, bolja



nesigurnost određivanja ovog faktora, korisnicima obezbeđuje bolju nesigurnost merenja snage pomoću senzora.

## ZAKLJUČAK

U radu je prikazana unapređena metoda određivanja FE senzora snage u frekvencijskom opsegu ispod 10 MHz, realizovana u TOC-u. Ovom metodom je uspostavljena sledivost RF snage u pomenutom frekvencijskom području, čime su proširene merne mogućnosti laboratorije za mikrotalasnu tehniku TOC-a. Realizovanom metodom je prevaziđen problem dostupnosti RF etalona u niskofrekventnom području. Za korisnike senzora snage ovo znači ostvarivanje sledivosti u čitavom opsegu rada senzora i postizanje bolje nesigurnosti prilikom merenja RF snage sensorima.

Unapređenje metode se odnosi na postizanje bolje merne nesigurnosti i njeno dovođenje na vrednost prihvatljivu za laboratoriju i njene korisnike.

Metoda može biti od koristi i drugim laboratorijama iz oblasti radio i mikrotalasnih frekvencija da ostvare sledivost RF snage u niskofrekventnom opsegu primenom postojeće opreme, a sa prihvatljivom mernom nesigurnošću.

## LITERATURA

- [1] 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, Dec. 2008.
- [2] L. Brunetti, L. Oberto, and M. Sellone, “RF-power standard from AC-DC thermal converter”, in *Proc. 18th Symp. (IMEKO, TC4)*, Natal, Brazil, Sept. 2011, pp. 86–90.
- [3] T.-W. Kang, J.-Y. Kwon, J.-I. Park, and N.-W. Kang, “RF and microwave power standards from 10 MHz to 40 GHz over decades”, *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol.18, no. 2, pp. 88–93, Apr. 2018, doi: 10.26866/jees.2018.18.2.88.
- [4] Tegam. *6 kHz to 18 GHz Coaxial RF Power Transfer Standards, Model 1505A/2505A datasheet*. [Online]. Available at: <https://www.tegam.com/wp-content/uploads/2016/06/1505A-2505A-DS-RevC.pdf>
- [5] Y. Shan, Y. S. Meng, and P. S. Filipiski “Evaluation of a calorimetric thermal voltage converter for RF–DC difference up to 1 GHz”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 2, pp. 467–472, Feb. 2014, doi: 10.1109/TIM.2013.2278597.
- [6] J. Sims, T. Lipe, J. Kinard, and Y.-H. Tang, “Improvements in the NIST calibration service for thermal transfer standards”, *NCSLI Measure*, vol. 2, no. 1, pp. 70–74, Mar. 2007, doi: 10.1080/19315775.2007.11721360
- [7] T.-W. Kang, J.-I. Park, C. Cho, and N.-W. Kang, “Measurement of the effective efficiency of thermoelectric power sensors using a thermal voltage converter from 1 kHz to 1 MHz”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, no. 3, pp. 232–237, Feb. 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3055810.
- [8] S. Ahmad, B. Pal, P. S. Negi, and A. K. Bandyopadhyay, “Realization of Low Frequency Power Standard at NPLI”, *MAPAN*, vol. 29, no. 4, pp. 285–288, Dec. 2014, doi: 10.1007/s12647-014-0111-3
- [9] A. Fantom, “Basic Techniques for Calibrating Power Meters”, in *Radio Frequency and Microwave Power Measurement*, Stevenage, U.K.: Peter Peregrinus Ltd., 1990, pp. 172–174.
- [10] *Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements*, Application Note 64-1C, Agilent Technologies, USA, 2001, pp. 23–68.
- [11] S. S. Devi, S. Ahmad, K. Patel, P. S. Negi and V. N. Ojha, “Effective source mismatch uncertainty evaluation using resistive power splitter up to 18 GHz”, *Int. Journ. Metrol.*

- Qual. Eng.*, vol. 6, no. 3, 306(2015), Aug. 2015, doi: <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2015019>.
- [12] Agilent Technologies 11667A DC to 18 GHz Power Splitter User's and Service Guide, Agilent Technologies, Santa Rosa, USA, Nov. 2007, pp. 1–18.
- [13] S. S. Devi, S. Ahmad, K. Patel, P. S. Negi and V. N. Ojha, "Effective source mismatch uncertainty evaluation using resistive power splitter up to 18 GHz", *Int. Journ. Metrol. Qual. Eng.*, vol. 6, no. 3, 306(2015), Aug. 2015, doi: <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2015019>.
- [14] T.-W. Kang, J.-H. Kim, N.-W. Kang and H.-K. Lee, "RF voltage difference between two outputs of a tee in the calibration of TVCs to 1 MHz", in *Proc. IEEE Asia-Pacific Microw. Conf. (APMC)*, Singapore, Dec. 2019. pp. 1876–1878.
- [15] T. P. Crowley, J. Miall, et al, "CCEM.RF-S1.CL (GTRF/02-03) RF Power Measurements with 2.4 mm Connectors Final Report". *Metrologia*, vol. 43, no. 1A, p. 01007, Oct. 2005, doi:10.1088/0026-1394/43/1A/01007
- [16] L. Brunetti, "Accuracy Assessment In HF Power Meter Calibration", in *Proc. 11th Symp. (IMEKO, TC4)*, Lisbon, Portugal, Sept. 2001, pp. 233–237.
- [17] L. Brunetti, L. Oberto, and E. Vremera, "Calibration Concept of Modern Power Meters", in *Proc. 18th Symp.(IMEKO, TC4)*, Rio de Janeiro, Brazil, Sept. 2006.
- [18] EA-4/02 M:2021, Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, EA – European Accreditation, Nov. 2021.
- [19] GUM 1995 with minor corrections, Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM 100:2008, Sept. 2008.
- [20] M3003: The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement, 4. ed., United Kingdom Accreditation Service UKAS, Oct. 2019.
- [21] NCSL International Workshop and Symposium.(2011) *Revisiting Mismatch Uncertainty With the Rayleigh Distribution, White Paper, Keysight Technologies*.