

# Merenje apsolutne vrednosti snage CW signala nivoa od 100 pW do 1 kW pri etaloniranju u Tehničkom opitnom centru

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

**Apstrakt**—Prilikom etaloniranja uređaja iz RF i oblasti mikrotalasa, javlja se potreba za merenjem apsolutne vrednosti RF/mikrotalasne snage. Postupak merenja ove snage zavisi od njenog nivoa, kao i od tipa uređaja koji se etalonira (DUT). U radu su predstavljena četiri slučaja metode merenja apsolutne vrednosti snage kontinualnog signala u frekventijskom opsegu od 9 kHz do 26,5 GHz, u skladu sa tehničkim mogućnostima TOC-a. Takođe su dati odgovarajući proračuni merne nesigurnosti.

**Ključne reči** — apsolutni nivo snage; etaloniranje; merna nesigurnost.

## I. UVOD

Apsolutna vrednost mikrotalasne snage kontinualnog signala se može meriti različitim uređajima, gde odabir merila zavisi od njihovog frekventijskog i dinamičkog opsega, kao i od merne nesigurnosti koju želimo postići. Na prvom mestu su RF/mikrotalasi senzori snage sa vatmetrom, zatim merni prijemnici, analizatori frekventijskog spektra, analizatori mreže, direkcioni sprežnici itd. Merni prijemnik, kao što je HP 8902A, je naročito pogodan za merenje niskih nivoa, koje senzori snage ne mogu izmeriti (do -120 dBm). Za razliku od njih, merenje apsolutnog nivoa snage analizatorima spektra se ne preporučuje tamo gde je potrebno ostvariti visoku tačnost merenja. Kao kompromisno rešenje između dinamičkog opsega i merne nesigurnosti, sve češće su zastupljeni senzori snage, na čijoj upotrebi je i zasnovan ovaj rad.

S obzirom na mernu opremu kojom raspolaže i njihova ograničenja u pogledu frekvencije i nivoa snage koji mogu meriti ili generisati, u Tehničkom opitnom centru je razvijena metoda merenja apsolutne vrednosti RF/mikrotalasne snage, kod koje se razlikuju četiri slučaja:

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).

A. DUT je generator snage od 100 pW (-70 dBm) do 100 mW (20 dBm)

B. DUT je generator snage od 100 mW do 1 kW

C. DUT je merilo snage od 100 pW do 100 mW

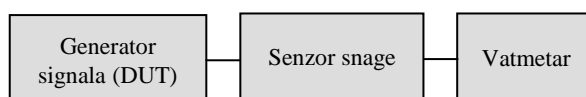
D. DUT je merilo snage od 100 mW do 1 kW

Postupci merenja A i C se odnose na frekventijski opseg od 9 kHz do 26,5 GHz, dok se druga dva primenjuju u opsegu od 9 kHz do 1 GHz.

## II. POSTUPAK MERENJA APSOLUTNE VREDNOSTI MIKROTALASNE SNAGE

A. DUT je generator snage od 100 pW do 100 mW

Većina generatora kontinualnog signala (signal generatora, generatora funkcija) novije generacije, na svom izlazu generišu maksimalno +13 dBm. Ovaj nivo snage kod starijih generatora obično ne prelazi +20 dBm, te se snaga u oba slučaja može meriti direktno, mikrotalasnim senzorom snage i vatmetrom, kao što je to prikazano na slici 1.

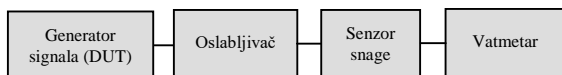


Sl. 1. DUT je generator snage do 100 mW

Dinamički opseg senzora (zavisno od frekventijskog opsega) najčešće je od -60 dBm, odnosno -70 dBm do +20 dBm, što je i ovde slučaj. Pre početka merenja, potrebno je nulovati i kalibrisati senzor na referentni izvor vatmetra, snage 1 mW i frekvencije 50 MHz. Zatim se, radi veće tačnosti merenja, u vatmetar unosi važeći faktor etaloniranja (kalibracioni faktor) senzora za zadatu frekvenciju, nakon čega se očitava izmerena snaga.

B. DUT je generator snage od 100 mW do 1 kW

Ukoliko generisana snaga premašuje dinamički opseg senzora, tj. veća je od +20 dBm (100 mW), u merni sistem se uvodi oslabljivač dovoljnog slabljenja, kao na slici 2. Ukoliko se ne raspolaže adekvatnim oslabljivačem, moguće je vezati više oslabljivača na red,



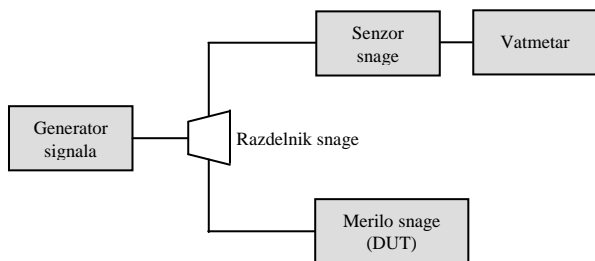
Sl. 2 DUT je generator snage do 1 kW

no treba imati u vidu da se time povećava nesigurnost merenja. Pri ovakvom merenju je neophodan podatak o tačnom slabljenju oslabljivača na željenoj frekvenciji, kako bi se odredila vrednost generisane snage.

Maksimalna frekvencija na kojoj se može meriti snaga do 1 kW je ograničena frekvencijskim opsegom oslabljivača i iznosi 1 GHz, dok je minimalna frekvencija od 9 kHz diktirana sensorom snage.

#### C. DUT je merilo snage od 100 pW do 100 mW

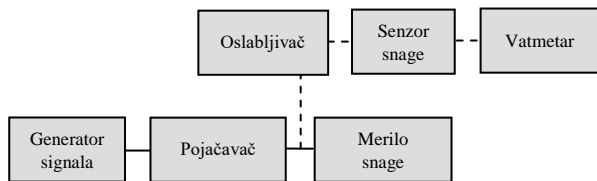
Kada je DUT merilo snage, potrebno je znati tačnu vrednost snage dovedenu na njegov ulaz. Ovo omogućava razdelnik snage, na čijem se jednom kraju generisana snaga kontroliše pomoću senzora i vatmetra, a sa drugog, ista snaga dovodi na DUT. Razdelnik unosi dodatno slabljenje u sistem, koje najčešće iznosi 6 dB i prisutno je u obe njegove grane, te nije od interesa. Naime, očitana snaga na vatmetru odgovara snazi na ulazu DUT-a. Šema veze ovakvog merenja prikazana je na slici 3.



Sl. 3. DUT je merilo snage do 100 mW

#### D. DUT je merilo snage od 100 mW do 1 kW

Imajući u vidu merne mogućnosti TOC-a, u svrhu generisanja snage veće od +20 dBm, uz signal generator se koristi i pojačavač. Ovaj slučaj predstavlja kombinaciju već opisanih postupaka merenja, što se može videti na slici 4.



Sl. 4. DUT je merilo snage do 1 kW

Pri tom, generator i pojačavač možemo posmatrati kao jednu celinu, tj. kao generator velike snage. S obzirom da TOC ne poseduje razdelnik snage do 1 kW, ovaj postupak se sastoji iz dva merenja. U prvom se kontroliše, odnosno podešava zadata snaga, a u drugom se ona primenjuje na DUT. Budući da se i sistem za kontrolu generisane snage i DUT vezuju posle pojačavača, njegovo tačno pojačanje nije od interesa. Na očitane vrednosti vatmetra potrebno je dodati tačno

slabljenje oslabljivača (na posmatranoj frekvenciji), kako bi se dobila snaga na izlazu pojačavača. Pri tom je neophodno zapamtiti snagu zadatu na generatoru, kako bi se ona u drugom merenju primenila na DUT.

### III. MERNÁ NESIGURNOST

Budući da je merenje snage u slučaju A osnovni oblik, na koji se oslanjaju gore opisani postupci merenja, za njega je merna nesigurnost detaljno opisana, dok su za ostale slučajeve istaknute razlike u uticajnim veličinama. U slučaju A, za proračun MN [1] uzeti su senzor Agilent E4413A [2] i vatmetar Agilent E4419B [3], dok je DUT signalgenerator Agilent E8257D [4]. Pri tom su prepoznati sledeći uticajni faktori:

- $N_{fe}$  nesigurnost usled određivanja faktora etaloniranja senzora,
- $N_n$  nesigurnost usled prisustva šuma,
- $N_l$  nesigurnost usled nelinearnosti senzora,
- $P_w$  tačnost očitavanja snage vatmetrom,
- $P_{wc}$  tačnost očitavanja snage vatmetrom pri kalibraciji na referentni izvor,
- $P_{wcal}$  tačnost referentnog izvora 1 mW/50 MHz,
- $M_{DS}$  nesigurnost usled neprilagođenja generatora (DUT-a) i senzora,
- $M_{Sco}$  nesigurnost usled neprilagođenja senzora i referentnog izvora pri kalibraciji,
- $N_z$  nesigurnost postavljanja nule i
- $N_d$  nesigurnost usled drift-a.

Faktor etaloniranja (kalibracioni faktor) senzora  $N_{fe}$  predstavlja odnos DC snage na izlazu senzora i mikrotalasne snage dovedene na njegov ulaz. Njegova vrednost za merenu frekvenciju se uzima iz poslednjeg uverenja o etaloniranju senzora. Prilikom merenja snage, ovaj faktor se ručno unosi u vatmetar za odgovarajuću frekvenciju. Sensori novije generacije u sebi imaju EEPROM sa upisanim faktorima etaloniranja. Ovi faktori se vremenom menjaju, te se javlja potreba za upisom novih faktora etaloniranja u memoriju senzora. Jedini proizvođač na našem tržištu, koji dostavlja software za upis faktora etaloniranja jeste Boonton, dok kod većine proizvođača, među kojima su Keysight i Rohde&Schwarz, odgovarajući software nije dostupan korisniku. Ovo predstavlja problem pri upotrebi senzora u automatizovanom merenju, gde se faktori etaloniranja čitaju direktno iz njegove memorije.

Nesigurnost usled prisustva šuma  $N_n$  se definiše kao promena pokazivanja vatmetra u kratkom vremenskom intervalu, pri konstantnoj snazi, temperaturi i naponu napajanja.

Linearnost senzora  $N_l$  jeste mera koliko prenosna karakteristika senzora odstupa od idealne (linearne) zavisnosti.

Na tačnost očitavanja snage vatmetrom  $P_w$ , utiču nesavršenosti elektronskih sklopova. Rezolucija vatmetra nije posmatrana kao posebna uticajna veličina, jer je obuhvaćena tačnošću  $P_w$ .

Nesigurnost postavljanja nule  $N_z$ , postoji zbog činjenice da vatmetar pokazuje vrednost različitu od nule kada na njegov ulaz nije dovedena snaga.

Nesigurnost usled drift-a  $N_d$  se definiše kao promena pokazivanja vatmetra u dužem vremenskom intervalu, pri konstantnoj snazi, temperaturi i naponu napajanja.

Vrednosti gore navedenih uticajnih veličina, izuzev faktora etaloniranja, su definisane od strane proizvođača.

Nesigurnost usled neprilagođenja generatora (DUT) i senzora  $M_{DS}$  nastaje usled njihovog različitog koeficijenta refleksije, zbog čega se senzoru ne isporučuje celokupna snaga sa izlaza generatora. Moduli koeficijenta refleksije senzora i generatora ( $\rho$ ) se računaju prema formuli (1):

$$\rho = \frac{KST - 1}{KST + 1} \quad (1)$$

gde je KST koeficijent stojećeg talasa senzora, odnosno generatora, definisan u specifikaciji proizvođača. Uz pretpostavku da se oba koeficijenta refleksije ponašaju po Rejljevoj (engl. *Rayleigh*) raspodeli [5], standardna nesigurnost neprilagođenja je u tom slučaju određena izrazom (2):

$$u(M_{DS}) = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot u(\rho_D) \cdot u(\rho_S) = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_D \cdot \sigma_S \quad (2)$$

gde su  $\rho_D$  i  $\rho_S$  moduli koeficijenta refleksije generatora, odnosno senzora. Ovu raspodelu Agilent pretpostavlja u svojim proračunima neprilagođenja, a neretko se u istu svrhu sreće i u drugoj literaturi. Proizvođač je u specifikaciji za KST deklarirao njegovu maksimalnu vrednost, što znači da stvarni KST neće premašiti datu vrednost sa verovatnoćom od 99,73 % [5]. Da bi se ova vrednost svela na  $1\sigma$ , potrebno je podeliti je faktorom 3,439 [5], te se standardna nesigurnost neprilagođenja računa prema formuli (3):

$$u(M_{DS}) = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\rho_D}{3,439} \cdot \frac{\rho_S}{3,439} \quad (3)$$

Nesigurnost usled neprilagođenja senzora i referentnog izvora 1 mW/50 MHz,  $M_{Sco}$  se takođe

računa prema izrazu (3), uz odgovarajuće koeficijente stojećeg talasa.

Proširena merna nesigurnost ovakvog merenja, za generisanu snagu 0 dBm i frekvenciju 6 GHz, data je u budžet tabeli I. Najdominantnija uticajna veličina jeste linearnost senzora i kao takva, javlja se u sva četiri slučaja merenja. Uz nju su i faktor etaloniranja senzora i nesigurnost usled neprilagođenja generatora i senzora. Nasuprot njima, nesigurnost postavljanja nule, nesigurnost usled šuma i drift-a se mogu zanemariti.

U slučaju B, pored već opisanih uticajnih faktora, postoje nesigurnosti usled određivanja slabljenja oslabljivača, usled neprilagođenja DUT-a i oslabljivača, kao i neprilagođenja oslabljivača i senzora. Slabljenje oslabljivača je uzeto iz njegovog poslednjeg uverenja o etaloniranju. Merna nesigurnost sa kojom je određeno ovo slabljenje je dobijena ranijim proračunima [6] i iznosi 0,2 dB, i ona značajno doprinosi ukupnoj mernoj nesigurnosti.

Kod merenja u slučaju C, javljaju se neprilagođenja senzora i razdelnika, DUT-a i razdelnika, kao i simetričnost razdelnika i korekcija usled merenja simetrije. Simetričnost razdelnika se meri pri njegovom etaloniranju sa nesigurnošću 0,4 dB, te se korekcija usled merenja simetrije  $N_{Ksim}$ , izražena u procentima, računa prema formuli (4):

$$N_{Ksim}(\%) = N_{sim}(\%) \cdot (10^{\frac{u(dB)}{10}} - 1) \quad (4)$$

gde je  $N_{sim}$  izmerena simetričnost razdelnika, a  $u(dB)$  nesigurnost merenja simetrije izražena u decibelima. Simetričnost razdelnika je među najuticajnijim veličinama, dok se korekcija usled merenja simetrije gotovo može zanemariti.

U slučaju D, sve navedene uticajne veličine su opisane u prethodnim primerima. Nesigurnosti neprilagođenja takođe se dobijaju već opisanim postupkom.

U tabeli II su date proširene merne nesigurnosti ostalih postupaka merenja, za frekvenciju 500 MHz i nivo signala na ulazu senzora 0 dBm. Vrednosti ovih

TABELA I BUDŽET TABELA KADA JE DUT GENERATOR SNAGE DO 20 DBM

Ulazna veličina $X_i$	Procena $x_i$ (%)	Standardna nesigurnost $u(x_i)$ (%)	Funkcija raspodele verovatnoće	Koeficijent osetljivosti $c_i$	Doprinos standardnoj nesigurnosti $u_i(y) = c_i u(x_i)$ (%)
$N_{fe}$	1,20	0,60	Gausova	1	0,60
$N_n$	0	0	Gausova	1	0
$N_i$	3,0	1,5	Gausova	1	1,5
$P_w$	0,5	0,25	Gausova	1	0,25
$P_{we}$	0,5	0,25	Gausova	1	0,25
$P_{wcal}$	0,5	0,25	Gausova	1	0,25
$M_{DS}$	4,004	0,48	Rejljeva	1	0,48
$M_{Sco}$	0,503	0,06	Rejljeva	1	0,06
$N_z$	0	0	Gausova	1	0
$N_d$	0	0	Gausova	1	0
$u_c$					1,74
$U_{uk}$			(k=2)		<b>3,48</b>

nesigurnosti u najvećoj meri zavise od merene frekvencije, dok je nivo signala na ulazu senzora kontrolisan pojačavačem, odnosno odgovarajućim oslabljivačem i najčešće je približno 0 dBm, bez obzira na generisani nivo snage. U tabeli II se uočava da su merne nesigurnosti u slučajevima merenja B i D znatno veće zbog prisustva oslabljivača u mernom sistemu.

TABELA II MERNE NESIGURNOSTI OSTALIH POSTUPAKA MERENJA ZA FREKVENCIJU 500 MHz I NIVO 0 dBm NA ULAZU SENZORA

<i>B</i> (%)	<i>C</i> (%)	<i>D</i> (%)
4,31	3,63	4,34

#### IV. ZAKLJUČAK

Postupak merenja apsolutnog nivoa snage senzorom i vatmetrom je jednostavan i brz način merenja kojim se obuhvata širok frekvencijski opseg. Problem dinamičkog opsega senzora se prevazilazi upotrebom odgovarajućih oslabljivača, odnosno pojačavača, pri čemu se, razumljivo, u znatnoj meri povećava merna nesigurnost. Prikazana metoda je na upotrebi u metrološkoj laboratoriji ML 02, Sektora za metrologiju Tehničkog opitnog centra, i u dosadašnjem radu zadovoljava sve zahteve za etaloniranjem merne opreme koja se trenutno koristi u Srbiji.

Prilikom razvijanja ovakve metode merenja, treba obratiti posebnu pažnju na karakteristike korišćenog senzora, pre svega na linearnost i nesigurnost usled određivanja faktora etaloniranja, bilo da se on meri ili uzima iz specifikacije proizvođača. Ukoliko se koristi oslabljivač, nesigurnost određivanja njegovog slabljenja u najvećoj meri utiče na tačnost merenja, dok je kod razdelnika snage najuticajnija njegova simetričnost.

Treba napomenuti da se generisanje i merenje velikih snaga može izvesti i na druge načine, ukoliko se raspo-

laže odgovarajućom mernom opremom (generatorom, odnosno senzorom većih snaga, protočnim vatmetrom, isl.).

#### LITERATURA

- [1] "Expression of Uncertainty of Measurement in Calibration-E4/02", *European co-operation for Accreditation*, December 1999.
- [2] "Operation and Service Guide", Agilent E4412A and E4413A Power Sensors, June 1999.
- [3] "Service Guide", E4418B/E4419B Power Meters, Agilent Technologies, January 16, 2012.
- [4] "Operating and Service Manual", Agilent E8257D PSG Microwave Analog Signal Generator.
- [5] "Revisiting mismatch uncertainty with the Rayleigh distribution", Agilent Technologies, 2011.
- [6] "Proračun merne nesigurnosti etaloniranja mikrotalasnih oslabljivača u frekvencijskom opsegu 1,3 GHz do 18 GHz", TOC 4.2/R.26-6, Jun 2004.

#### ABSTRACT

Absolute power level measurement is one of the most significant measurements in the field of the RF and microwave devices calibration. A measurement method is defined according to device under test type and the power level values. In this paper are presented four different cases of the absolute power level measurement method in the frequency range from 9 kHz to 26,5 GHz, which is using in the Technical Test Center's calibration laboratory. Estimation of measurement uncertainty is given, too.

#### **Absolute power level measurement of CW signal from 100 pW to 1 kW in the Calibration Laboratory of the Technical Test Center**

Neda Spasojević, Ivica Milanović, Miša Markuš