Mr Milovan Unković,
dipl. inž.
VP 2342-20 Radovići

AUTOMATSKO BAŽDARENJE MIKROTALASNIH OSLABLJIVAČA

UDC: 621.373.089.6

Rezime:

Mikrotalasni oslabljivači su komponente mnogih složenih radio frekventnih i mikrotalasnih uređaja, a mogu se koristiti i samostalno pri popravkama, podešavanjima ili baždarenjima. Bez obzira na upotrebu oslabljivača, oni se moraju verifikovati u metrološkom smislu, kako bi se pouzdano utvrdilo da li su KST (koeficijent stojećeg talasa) i slabljenje oslabljivača u propisanim granicama. U ovom radu obrađena je metoda automatskog baždarenja mikrotalasnih oslabljivača čije je slabljenje do 70 dB.

Ključne reči: mikrotalasna tehnika, merenje, oslabljivač, koeficijent stojećeg talasa, slabljenje.

AUTOMATIC CALIBRATION OF MICROWAVE ATTENUATORS

Summary:

Microwave attenuators are components of many complex radio frequency and microwave devices but they can be used separately for repair, adjustment or calibration. Disregarding the usage, attenuators ought to be verified in terms of metrology in order to determine with reliability if the standing wave ratios and the attenuation of attenuators are within prescribed limits. This paper treats the method of automatic calibration of microwave attenuators with the attenuation of up to 70 dB.

Key words: microwave technique, measurement, attenuator, standing wave ratios, attenuation.

Uvod

U mikrotalasnoj tehnici najvažnije je tačno izmeriti dve veličine: mikrotalasnu snagu i frekvenciju. Međutim, vrlo je važno tačno izmeriti i odnos dve veličine — mikrotalasno slabljenje. Na nižim frekvencijama slabljenje je odnos izlaznog i ulaznog napona mreže, dok je mikrotalasno slabljenje odnos ulazne i izlazne snage.

Mikrotalasni oslabljivači, kao mreže koje slabe ulaznu snagu, sastavni su delovi mnogih mikrotalasnih uređaja.

S druge strane, pri raznim merenjima mikrotalasne snage, mikrotalasni oslabljivači se koriste kao samostalni (neugrađeni) mikrotalasni elementi.

Bilo da su mikrotalasni oslabljivači deo složenih sistema (generatora, prijemnika i sl.), ili se koriste samostalno, potrebno je što tačnije odrediti njihovo slabljenje i periodično ih baždariti.

U ovom radu obrađena je metoda automatskog baždarenja mikrotalasnih oslabljivača čije je slabljenje do 70 dB, a frekvencijski opseg DC do 18 GHz.

Metoda se može koristiti za baždarenje oslabljivača koji po klasifikaciji pripadaju radnim etalonima, odnosno mer-nim sredstvima koja podležu redovnoj verifikaciji ili pregledu.

Takođe, navedene su osnovne de-finicije i termini koji se koriste pri mi-krotalasnom slabljenju, a koji su us-klađeni sa civilnim [1] i vojnim [2] standardima, a zatim je opisan progra-mski paket za merenje KST oslabljiva-ča. Programski paket je modifikovana verzija paketa opisanog u [4]. Opisan je i program za merenje slabljenja fik-snih i promenljivih stepenastih oslab-ljivača do 30 dB, sa analizama nesigur-nosti merenja, i program za merenje slabljenja oslabljivača u opsegu 30 do 70 dB.

Termini i definicije

Slabljenje je opšti iskaz koji se koristi da označi opadanje amplitude signala od jedne do druge tačke u pre-nosnomvodu a obično nastaje zbog disipativnih ili reflektujućih gubitaka. Slabljenje se, najčešće, izražava u de-cibelima (dB):

$$\begin{aligned} A &= 10 \log \frac{P_{ul}}{P_{izl}} = \\ &= 20 \log \frac{U_{ul}}{U_{izl}} \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (1)$$

gde je:

P_{ul} — ulazna snaga,

P_{izl} — izlazna snaga,

U_{ul} — ulazni napon,

U_{izl} — izlazni napon.

Oslabljivač je pod idealnim uslo-vima linearna dvopriključna mreža ko-ja slabi snagu na izlaznom priključku u odnosu na snagu koja se dovodi na ulazni priključak.

Uneto slabljenje je odnos snage koju apsorbuje opterećenje vezano di-rektno na izvor, i snage koju apsorbu-

je kada je vezan neki uređaj između istog izvora i istog opterećenja.

Karakteristično uneto slabljenje je slabljenje uneseno u prenosni sistem koji je prilagođen i prema izvoru i pre-ma opterećenju (potrošaču).

Karakteristično promenljivo une-to slabljenje je promena karakteris-tičnog unesenog slabljenja promenlji-vog oslabljivača između dve postavlje-ne vrednosti.

Karakteristično preostalo uneto slabljenje je slabljenje promenljivog oslabljivača kada je postavljen na na-značenu minimalnu vrednost slablje-nja.

Slabljenje refleksije na spoju vo-da i impedanse je odnos reflektovanog i direktnog talasa izražen u dB. Slab-ljenje refleksije je mera nejednakosti dve impedanse (Z_1 i Z_2) i jednako je modulu recipročne vrednosti koefici-jenta refleksije:

$$S.R. = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 - Z_2} \right| \quad (2)$$

Koeficijent refleksije voda Γ je odnos kompleksnog broja koji pred-stavlja fazu i amplitudu vektora elek-tričnog reflektovanog talasa b prema kompleksnom broju koji predstavlja fazu i amplitudu vektora električnog incidentnog talasa a u nekoj tački vo-da:

$$\Gamma = \frac{b}{a} = \rho \angle \phi \quad (3)$$

Koeficijent refleksije izvora u sis-temu Z_0 je:

$$\Gamma_g = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0} \quad (4)$$

Koeficijent refleksije opterećenja je:

$$\Gamma_{op} = \frac{Z_{op} - Z_0}{Z_{op} + Z_0} \quad (5)$$

gde su:

Z_g i Z_{op} — ulazne impendanse izvora i opterećenja, respektivno.

Naponski koeficijent stojećeg talasa (NKST) jeste odnos amplituda napona koje odgovaraju maksimumu i minimumu stojećeg talasa. Koeficijent stojećeg talasa u homogenom vodu je:

$$NKST = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (6)$$

Reflektometar je merni uređaj koji meri odnos amplitude reflektovanog talasa i odgovarajuće amplitude direktnog talasa u sredini prostiranja.

Prilagođenost na vod ili talasovod je uslov da je impedansa opterećenja vezanog za vod ili talasovod jednaka karakterističnoj impendansi voda ili talasovoda (za prilagođenost).

Neprilagođenost na vod ili talasovod je uslov da impedansa optereće-

nja ne prilagođava impedansu priključka izvora na koji je opterećenje vezano.

Merenje promenljivih i fiksnih oslabljivača

KST jednog kraja fiksnih oslabljivača određuje se uz pomoć programa KSTFIX, dok se koeficijenti refleksije oba kraja promenljivih stepenastih oslabljivača određuju pomoću programa KROSLKOR. KST, odnosno koeficijent refleksije, određuje se reflektometarskom metodom a osnovni etalon koji se koristi pri merenju je reflektometarski most HP 11666A.

Povezivanje mernih instrumenata za automatsko određivanje KST-a, odnosno koeficijenta refleksije, prikazano je na slici 1.

Programi su napisani u tehničkom BASIC-u, izvršavaju se na računaru

M A G I S T R A L A IEEE-488

Sl. 1 — Šema povezivanja mernih instrumenata za automatsko merenje KST

HP 9826, a rezultati se štampaju na štampaču HP 82906.

Na analizatoru prebrisavajuće amplitude HP 8755B aktiviran je prekidač $\text{dB/DIV}=5$, što znači da se na analognom izlazu AUX A displeja HP 182T javlja napon, tako da važi relacija $0,1 \text{ V} = 1 \text{ dB}$ što se koristi u programima. Kanal 2 (CH2) A/D pretvarača HP 59313A podešen je na maksimalnu vrednost 2,5 V ulaza što odgovara broju 1023. Formula za A/D pretvaranje koja se koristi u programu je:

$$U = K \cdot N \quad (7)$$

$$K = \frac{\text{Ulazni puni opseg}}{\text{Izlazni puni opseg}} = \frac{2,5}{1023} \quad (8)$$

gde je:

U — proračunati napon iz digitalnog oblika K izlaza A/D pretvarača.

Programima se prvo očitavaju vrednosti usmerenosti i ekvivalentnog koeficijenta refleksije reflektometarskog mosta koje su prethodno unete u posebne datoteke na disketi. Ove veličine se kasnije koriste za računanje nesigurnosti određivanja koeficijenta refleksije.

Automatizovano merenje se prvo izvodi za otvoren, a zatim kratko spojen TEST terminal reflektometarskog mosta. Nivo izlaznog signala iz signal-

generatora održava se na $+10 \text{ dBm}$, a izabrane frekvencije su 50 MHz, 100 MHz, 500 MHz i 1 do 18 GHz u koracima od po 1 GHz. Nakon ovog kalibracionog merenja vrše se merenja testirajućim oslabljivačima. Prethodno se REFERENCE LEVEL, na kanalu 1 analizatora prebrisavajuće amplitude HP 8755B, postavlja na -20 dBm , što programi uzimaju u obzir. Zatim se upisuje granična frekvencija rada oslabljivača, a KST se određuje do te frekvencije. Nakon izvršenog merenja u programu KSTFIX se iz koeficijenta refleksije računa KST. Koeficijent refleksije se određuje iz gubitaka refleksije. Takođe, računa se i nesigurnost određivanja koeficijenta refleksije. Zbrovi koeficijenta refleksije i nesigurnosti određivanja koeficijenta refleksije upisuju se u datoteke AJ i BE, a ovi podaci se kasnije koriste pri računanju nesigurnosti određivanja slabljenja.

Navedeni postupak se ponavlja a moguće je odrediti KST za 20 oslabljivača, ako je prethodno samo jednom izvršeno kalibraciono merenje (otvoren/kratkospojen TEST terminal reflektometarskog mosta).

Merenje KST je potrebno vršiti za oba kraja oslabljivača. Ako je na TEST terminalu reflektometarskog mosta muški N-konektor, a oba kraja oslabljivača imaju ženske N-konektore (što je uglavnom slučaj sa promenljivim stepenastim oslabljivačima), merenje je jednostavno. Nakon kalibracionog me-

Sl. 2 — Prenosjenje mikrotalasne snage u reflektometarskom sistemu

renja vrši se merenje KST jednog, a odmah zatim drugog kraja oslabljivača. Međutim, ako jedan kraj oslabljivača ima ženski, a drugi muški N-konektor, merenje je složenije. Nakon određivanja KST kraja oslabljivača sa ženskim N-konektorom, potrebno je na TEST terminalu reflektometarskog mosta zameniti konektor: umesto muškog stavlja se ženski N-konektor.

Sada se mora ponoviti kalibraciono merenje, a zatim se određuje KST onog kraja oslabljivača sa muškim N-konektorom.

Da bi se odredila nesigurnost merenja koeficijenta refleksije, razmatra se šematski prikaz bilo kog reflektometra koji je prikazan na slici 2.

Korišćene su sledeće oznake:

- A — snaga koja direktno teče sa ulaza na izlaz sistema preko kojeg se vrši testiranje, nezavisno od uređaja koji se testira,
- T — faktor skaliranja sistema,
- C — prilagođenost izvora odnosno ekvivalentna refleksija posmatrano sa izlaza reflektometra.

Koristeći Masonov zakon [6] sledi da je:

$$\Gamma_m = A + \frac{(1+T) \cdot \Gamma_A}{1 - C \cdot \Gamma_A} \quad (9)$$

U prethodnom izrazu sve veličine su kompleksni brojevi. Ako se zanemari uticaj faze, proračuna maksimalna moguća greška i uprosti izraz (9), kako je to detaljno pokazano u [4], dobija se:

$$\Delta\rho = A + B\rho + C\rho^2; B = (A + C) \quad (10)$$

gde je:

ρ — skalarni ekvivalent koeficijenta refleksije.

Iz izraza (10) drugi sabirak se može brisati, jer je $B=0$ kada se vrši kalibracija reflektometarskog mosta, tako što se referentni nivo određuje kao aritmetička sredina merenja otvorenog i kratkospojenog TEST terminala reflektometra.

Tabela 1

Rezultati merenja KST fiksnog oslabljivača WE AS5, 3 dB

Koeficijent refleksije i KST oslabljivača Serijski broj: AS5-2101		Model AS-5/3 Datum:	
Dozvoljene max. vrednosti KST			
od: 0,00 GHz do: 4,00 GHz KST ≤ 1,1500			
od: 4,00 GHz do: 8,00 GHz KST ≤ 1,2000			
od: 8,00 GHz do: 12,40 GHz KST ≤ 1,2500			
F (GHz)	K _{Ref.}	ΔK _{Ref.}	KST
0,04	0,02502	0,03524	1,05132
0,05	0,02251	0,03404	1,04606
0,10	0,01926	0,03371	1,03927
0,50	0,01945	0,03370	1,03967
1,00	0,01997	0,03382	1,04076
2,00	0,02057	0,03395	1,04201
3,00	0,02081	0,03399	1,04250
4,00	0,02251	0,03447	1,04606
5,00	0,04485	0,03722	1,09391
6,00	0,06907	0,04049	1,14840
7,00	0,08364	0,04297	1,18255
8,00	0,02134	0,03467	1,04361
9,00	0,03678	0,03631	1,07637
10,00	0,04646	0,03742	1,09744
11,00	0,06429	0,03928	1,13742
12,00	0,01891	0,03389	1,03854
12,40	0,02796	0,03518	1,05752

Napomena:

K_{Ref.} — koeficijent refleksije oslabljivača,
ΔK_{Ref.} — nesigurnost određivanja K_{Ref}
oslabljivača,
KST — koeficijent stojećeg talasa oslabljivača

U programima KSTFIX i KROSLKOR postavljeno je $A=Dr/T$, što je ekvivalentna usmerenost reflektometarskog mosta, a $C=\rho_c + |TDi|$ što je ekvivalentni koeficijent refleksije reflektometarskog mosta. Na vrednost $\Delta\rho$ C malo utiče, jer se množi sa ρ^2 .

Rezultati merenja KST fiksnog oslabljivača WE AS5, 3 dB dati su u

tabeli 1. U prvoj koloni se štampa frekvencija u GHz, u drugoj koloni je mereni koeficijent refleksije, u trećoj je proračunata nesigurnost merenja koeficijenta refleksije prema formuli (10), a u četvrtoj KST izračunat iz koeficijenta refleksije. U zaglavlju rezultata merenja date su dozvoljene maksimalne vrednosti KST za dati oslabljivač. U navedenom primeru mereno je KST na kraju oslabljivača sa muškim N konektorom.

Merenje slabljenja za jednosmerni ulazni napon

Slabljenje oslabljivača za jednosmerni ulazni napon meri se uređajima povezanim prema blok-šemi prikazanoj na slici 3.

Slabljenje se računa po formuli:

$$A(\text{dB}) = 20 \log \frac{A_{\text{ul}}}{A_{\text{izl}}} \quad (11)$$

Za promenljivi koračni oslabljivač meri se karakteristično preostalo uneto slabljenje na svakom koraku za ulazni jednosmerni napon.

Merenje slabljenja oslabljivača 0 do 30 dB

Slabljenje oslabljivača 0 do 30 dB u frekvijskom opsegu 50 MHz do gornje granice frekvencije ($f_g \leq 18 \text{ GHz}$) meri se prema blok-šemi prikazanoj na slici 4.

Upravljanje mernim sredstvima prikazanim na slici 4 vrši se pomoću

Sl. 3 — Šema povezivanja mernih instrumenata za merenje slabljenja za jednosmerni ulazni napon

Sl. 4 — Šema povezivanja mernih instrumenata za merenje slabljenja u opsegu 0 do 30 dB

programa SLBFIX i SLBKOR, u zavisnosti od toga da li je oslabljivač koji se verifikuje fiksni ili promenljivi — koračni.

U oba slučaja prvo se vrši kalibraciono merenje, odnosno meri se snaga na izlazu signal-generatora HP 8672A + HP 86720A preko pomoćnog oslabljivača 10 dB. Snaga se meri na frekvencijama 10 MHz, 50 MHz, 100 MHz, 500 MHz, 1 GHz, a zatim u koracima od po 1 GHz do 18 GHz. Posebno kalibraciono merenje izvodi se i na frekvenciji 12,4 GHz. Na frekvencijama do 10 GHz programirana je izlazna snaga generatora +13 dBm, a od 50 MHz do 18 GHz izlazna snaga je programirana na +11 dBm, kako bi se izbegla nestabilnost na višim frekvencijama. U procesu kalibracije koristi se termopretvaračka koaksijalna glava 8481A.

Nakon izvršenog kalibracionog merenja vrše se merenja testirajućim oslabljivačem, a daljnji postupak se razlikuje za fiksne i koračne oslabljivače.

Za fiksni test-oslabljivač preko računara se uvodi gornja granična frekvencija. Merenja se obavljaju na frekvencijama i sa nivoima snage kao i kod kalibracionog merenja, s tim što se ide do gornje granične frekvencije, a ne do 18 GHz. S obzirom na to da je izlazna snaga iz signal-generatora preko pomoćnog oslabljivača (10 dB) + 3 dBm, odnosno +1 dBm, za merenje slabljenja fiksnih oslabljivača do 30 dB koristi se glava 8481A. Slabljenje test-oslabljivača dobije se kao razlika merenja snage pri kalibraciji i merenja snage sa test-oslabljivačem. U računar se unose podaci o modelu i serijskom broju oslabljivača, datumu baždarenja i nominalnom slabljenju. Za svaku zadatu frekvenciju računa se apsolutna greška slabljenja oslabljivača, kao razlika nominalnog i izmerenog slabljenja. Takođe računa se nesigurnost određivanja slabljenja, pa je potrebno iz datoteka AJ i BE učitati koeficijente refleksije i neodređenosti merenja koeficijenta refleksije test-oslabljivača. Odštampani rezultati merenja slabljenja sadrže četiri kolone: fre-

kvenciju u GHz, izmereno slabljenje u dB, nesigurnost određivanja slabljenja u dB i grešku slabljenja oslabljivača u dB.

Nakon testiranja prvog test-oslabljivača, meri se drugim, trećim, itd. Za sva ova merenja koristi se samo jedno, početno, kalibraciono merenje.

Rezultati merenja slabljenja fiksnog oslabljivača WE AS5, 3 dB prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2
Rezultati merenja slabljenja fiksnog oslabljivača WE AS5, 3 dB

Određivanje slabljenja oslabljivača Serijski broj: AS5-2101		Model AS-5/3 Datum:	
Dozvoljene maksimalne greške slabljenja od: 0,00 GHz do: 12,40 GHz; Greška slabljenja: ±0,30 dB			
F (GHz)	Slab. (dB)	Nes. Sl. (dB)	Gr. Sl. (dB)
0,05	2,7600	0,1291	−0,2400
0,10	2,7700	0,1169	−0,2300
0,50	2,8100	0,1173	−0,1900
1,00	2,8300	0,1510	−0,1700
2,00	2,8700	0,1153	−0,1300
3,00	2,8500	0,1228	−0,1500
4,00	2,9200	0,1266	−0,0800
5,00	2,9500	0,2096	−0,0500
6,00	2,9600	0,2324	−0,0400
7,00	3,0000	0,2646	0,0000
8,00	3,0500	0,1265	0,0500
9,00	3,0700	0,1741	0,0700
10,00	3,1300	0,1850	0,1300
11,00	3,1200	0,2181	0,1200
12,00	3,1400	0,1184	0,1400
12,40	3,1200	0,0759	0,1200
Napomena: Slab. (dB) — izmereno slabljenje oslabljivača, Nes. Sl. (dB) — nesigurnost određivanja slabljenja, Gr. Sl. (dB) — greška (NOMINALNO slabljenje — IZMERENO slabljenje).			

Merenje slabljenja navedenog oslabljivača izvršeno je i kalibratorom oslabljivača AILT PRD 915B. To je sekundarni etalon za merenje mikrotalasnog slabljenja i njegova greška merenja iznosi 0,03 dB/10 dB do 70 dB na frekvenciji 30 MHz.

Rezultati merenja slabljenja oslabljivača WE AS5, 3 dB kalibratorom oslabljivača AILT PRD 915B dati su u tabeli 3. Upoređujući rezultate merenja iz tabela 2 i 3, vidi se visoka podudarnost rezultata. Najveća razlika merenja slabljenja, koristeći obe metode, iznosi 0,04 dB.

Za stepenaste oslabljivače (program SLBKOR) kalibraciono merenje je isto kao u prethodnom slučaju, a zatim se meri slabljenje za pojedine korake. Prvo se određuje karakteristično preostalo uneto slabljenje koje se izračunava po formuli:

$$A_{kpu}(\text{dB}) = m + n \cdot f \quad (12)$$

gde je f data u GHz. Vrednosti m i n su za razne modele koračnih oslabljivača različite:

- za 8494 A/B/G/H: $m=0,6$; $n=0,09$
- za 8495 A/B/G/H: $m=0,4$; $n=0,07$
- za 8496 A/B/G/H: $m=0,6$; $n=0,09$

Nakon računanja u programu se štampaju rezultati za uneto karakteristično preostalo slabljenje: frekvencija merenja (GHz), preostalo uneto karakteristično slabljenje (dB), nesigurnost određivanja preostalog karakterističnog unetog slabljenja (dB), maksimalno dozvoljeno uneto karakteristično preostalo slabljenje (dB) i greška unetog karakterističnog slabljenja (dB) kao razlika izmerenog i dozvoljenog karakterističnog preostalog slabljenja (dB).

Zatim se vrše merenja na svakom koraku koračnog oslabljivača, u frekvencijskom opsegu 50 MHz do gornje

Tabela 3

Rezultati merenja slabljenja oslabljivača WE AS5, 3 dB kalibratorom AILT PRD 915B

F (MHz)	Ref. slabljenje na PRD (dB)	Slabljenje sa test-oslabljivačem (dB)	Slabljenje test-oslabljivača (dB)	Greška (dB)
0,05	29,42	32,18	2,76	-0,24
0,1	29,62	32,38	2,76	-0,24
0,5	31,33	34,12	2,79	-0,21
1,0	15,74	18,55	2,81	-0,19
2,0	13,86	16,71	2,85	-0,15
3,0	13,75	16,61	2,86	-0,14
4,0	12,95	15,84	2,89	-0,11
5,0	13,38	16,29	2,91	-0,09
6,0	14,49	17,44	2,95	-0,05
7,0	17,60	20,59	2,99	-0,01
8,0	17,14	20,15	3,01	0,01
9,0	18,50	21,55	3,05	0,05
10,0	19,45	22,54	3,09	0,09
11,0	19,73	22,84	3,11	0,11
12,0	18,93	22,07	3,14	0,14
12,4	20,23	23,39	3,16	0,16

granične frekvencije, i upisuju se dozvoljene greške slabljenja. U odštampanom listingu date su frekvencije u GHz, izmereno slabljenje u dB, nesigurnost određivanja slabljenja u dB, zbir nominalnog slabljenja i karakterističnog unetog preostalog slabljenja u dB, kao i greška slabljenja kao razlika izmerenog slabljenja i upravo navedenog zbira slabljenja. Navedena merenja i računanja vrše se za svaki korak ko-račnog oslabljivača.

Greške određivanja slabljenja mikrotalasnih oslabljivača

Tačnost merenja slabljenja oslabljivača određena je preko tri izvora nesigurnosti:

- nesigurnosti merne instrumentacije, odnosno vat-metra 436 A,
- šuma koji se javlja uz signale niskog nivoa, kada se mere velika slabljenja,
- nesigurnosti zbog neprilagođenosti koja je uslovljena re-refleksijom duž mernih komponenata i oslabljivača koji se testira,
- slučajne greške.

Izračunavanje nesigurnosti koje se javljaju u mernom sistemu mogu da se izvrše metodom najgoreg slučaja ili metodom kvadratnog korena iz sume kvadrata.

Metoda najgoreg slučaja nesigurnosti za bilo koji merni sistem predstavlja takav zbir grešaka da daju najveći mogući rezultat. S obzirom na malu verovatnoću da će se maksimalni moduli nesigurnosti u datom momentu poklopiti i po smeru, ovaj metod je izrazito pesimistički.

Metod korena iz zbira kvadrata (RSS) jeste realističniji, jer se zasniva na činjenici da je većina grešaka koje se javljaju pri merenju mikrotalasne snage i slabljenja međusobno nezavisna. S obzirom da su ove greške međusobno nezavisne (mada su sistematske, a ne slučajne), mogu se uvažiti kao slu-

čajne varijable. Ukupna nesigurnost se izračunava tako što se pojedine vrednosti nesigurnosti kvadriraju, zatim se kvadrati sabiraju i vadi kvadratni koren.

Nesigurnost merenja vat-metrom 436A

Nesigurnost merenja vat-metrom pri određivanju slabljenja oslabljivača vrlo je mala, jer on sa glavom 8481A/8484A vrši relativna merenja. To znači da merenje predstavlja odnos dva očitavanja sa istog vat-metra tako da se nesigurnost faktora baždarenja i nesigurnost referentnog oscilatora snage javljaju i u brojiocu i u imeniocu na isti način, pa se učinci ovih nesigurnosti poništavaju.

Nesigurnost zbog postavljanja i prenosa nule, ako se poštuje procedura postavljanja nule, može se u merenjima slabljenja zanemariti.

Instrumentaciona nesigurnost vat-metra podrazumeva greške linearnosti i tačnost prelaska iz opsega u opseg. Tačnost vat-metra 436A za relativna merenja je $\pm 0,02$ dB unutar jednog opsega i $\pm 0,02$ dB za različite opsege. S obzirom na to da se vrše dva merenja (kalibraciono i sa test-oslabljivačem) javljaju se četiri nesigurnosti $\pm 0,02$ dB. Prema tome, najgori slučaj nesigurnosti je $\pm 0,08$ dB, dok je RSS nesigurnost instrumentacije vat-metra $\pm 0,04$ dB.

Postoji još jedan izvor grešaka kod vat-metra a to je vreme odziva analognih kola. Moguće je da pri očitavanju snage vat-metar, zbog tromosti analognih kola, pokaže 99% konačne vrednosti, odnosno za dva merenja (kalibraciono i sa test oslabljivačem) javi se nesigurnost od $\pm 2\%$ ($\pm 0,09$ dB) u najgorem slučaju. U slučaju RSS nesigurnost je $\pm 1,41\%$ ($\pm 0,06364$ dB), što je verovatnija vrednost koja se u programima koristi.

Uticaj šuma na tačnost merenja slabljenja

Uticaj šuma na merenja slabljenja ispod 50 dB je zanemarljiv, uticaj šuma na tačnost merenja slabljenja 50 dB do 60 dB je mali, a uticaj šuma na merenja slabljenja većih od 60 dB značajan. Zbog toga je u programima za merenje slabljenja do 30 dB zanemaren uticaj šuma.

Nesigurnost zbog neprilagođenosti

Najznačajnija nesigurnost pri merenju slabljenja nastaje zbog neprila-

gođenosti. Ova nesigurnost nastaje jer re-refleksije menjaju incidentne talase, tako da su oni različiti od onih kakvi bi trebalo da budu za nereflektujuće («nula» reflektujuće) oslabljivače, generatore i glave za vat-metre.

Najgori slučaj nesigurnosti zbog neprilagođenosti pri merenju slabljenja biće izveden uz pomoć slike 5 gde je:

ρ_s i ρ_g — koeficijent refleksije generatora i glave, respektivno,

ρ_1 i ρ_2 — ulazni i izlazni koeficijent refleksije test-oslabljivača,

τ_1 i τ_2 — koeficijenti prenosa (slabljenja) test-oslabljivača u oba smera.

a)

b)

Sl. 5 — Prenošnje mikrotalasne snage od izvora do merne glave preko oslabljivača

Koristeći Masonov zakon [6] nesigurnost zbog neprilagođenja pri merenju koeficijenta prenosa τ_1 (smer napred) je:

$$M_u = \frac{1 \pm \rho_s \rho_g}{(1 \pm \rho_s \rho_1)(1 \pm \rho_2 \rho_g) + (\rho_s \tau_1 \tau_2 \rho_g)} \quad (13)$$

U slučaju kada je $\tau_1 \tau_2 > 10$ dB, izraz $(\rho_s \tau_1 \tau_2 \rho_g)$ može se zanemariti. Relacija (13), ukoliko se nesigurnost izražava u (dB), može se napisati kao:

$$M_u = 20 \log \frac{1 \pm \rho_s \rho_g}{(1 \pm \rho_s \rho_1)(1 \pm \rho_2 \rho_g) \pm (\rho_s \tau_1 \tau_2 \rho_g)} \quad (14)$$

U računanjima je najčešće $\tau_1 = \tau_2$ i $\rho_1 = \rho_2$. RSS nesigurnost zbog neprilagođenja računa se na sledeći način:

$$M_{RSS} = 20 \log [1 + \sqrt{\rho_g^2 \rho_s^2 + \rho_g^2 \rho_2^2 + \rho_s^2 \rho_1^2 + \rho_g^2 \rho_s^2 \tau_1^2 \tau_2^2}] \quad (15)$$

Da bi se smanjio koeficijent refleksije generatora ρ_g između generatora i glave (pri kalibracionom merenju), odnosno generatora i oslabljivača koji se testira, umeće se pomoćni oslabljivač. Ekvivalentni koeficijent refleksije generatora se bitno smanjuje i iznosi:

$$\rho_{s..} = \rho_{1p} + \frac{\tau_{1p} \cdot \tau_{2p} \cdot \rho_s}{1 - \rho_{2p} \cdot \rho_s} \quad (16)$$

gde je:

ρ_{1p}, ρ_{2p} — ulazni i izlazni koeficijent refleksije pomoćnog oslabljivača,

τ_{1p}, τ_{2p} — slabljenje pomoćnog oslabljivača u oba smera,

ρ_s — koeficijent refleksije generatora.

Ukoliko se koristi oslabljivač od 20 dB, uticaj koeficijenta refleksije izvora smanjuje se za 100 puta. U merenjima se koristio pomoćni oslabljivač 10 dB, WE 23-10. Maksimalni dozvolje-

ni koeficijenti refleksije, za oba kraja ovog oslabljivača, jesu:

DC do 4 GHz; $\rho_{1p} = \rho_{2p} = 0,0698$

4,0 do 8,0 GHz; $\rho_{1p} = \rho_{2p} = 0,09091$

8,0 do 12,4 GHz; $\rho_{1p} = \rho_{2p} = 0,1111$

12,4 do 18 GHz; $\rho_{1p} = \rho_{2p} = 0,1667$ (17)

Maksimalni dozvoljeni koeficijent refleksije generatora HP 8672A je $\rho_s = 0,432$. Koristeći izraz (10) dobijaju se sledeće vrednosti za ekvivalentni koeficijent refleksije generatora HP 8672A:

DC do 4 GHz; $\rho_{se} = 0,11424$

4,0 do 8,0 GHz; $\rho_{se} = 0,23308$

8,0 do 12,4 GHz; $\rho_{se} = 0,2544$ (18)

12,4 do 18 GHz; $\rho_{se} = 0,3139$

Realno ove vrednosti su još manje, jer su stvarne vrednosti koeficijenta refleksije oslabljivača i generatora gotovo uvek manje od maksimalno dozvoljenih. Ove vrednosti programski su unete u jednačinu (15) na mesto ρ_s , dok je izraz $\rho_g^2 \rho_s^2 \tau_1^2 \tau_2^2$ u slučajevima $\tau_1 \times \tau_2 > 10$ dB, zanemaren.

Proširenje mernog opsega do 70 dB

Opisana tehnika omogućava merenje slabljenja do 30 dB. Koristeći visoku osetljivost diodne glave HP 8484A, napisan je programski paket SLB70 kojim se upravlja automatskim merenjem slabljenja do 70 dB. Povezivanje mernih sredstava prikazano je na slici 6.

U procesu kalibracije izlazna snaga signal-generatora postavljena je na -16 dBm. Pošto je uneto slabljenje razdelnika snage WE 1870A-6 dB, na glave HP 8484A i HP 8481A dolazi snaga -22 dBm. Programski se menja frekvencija na signal-generatoru (50 MHz, 100 MHz, 500 MHz, 1 GHz, a zatim sa korakom od 1 GHz do granične

frekvencije oslabljivača). Za svaku radnu frekvenciju meri se snaga koja dolazi na glave HP 8484A i HP 8481A sa razdelnika snage. Snage očitane sa vat-metara označavaju se sa P_1 i P_2 , saglasno obeležavanju vat-metara na slici 5.

Vrednosti snaga skladište se u posebne matrice rezervisane u memoriji računara.

Nakon toga između razdelnika snage i diodne glave HP 8484A, umeće se oslabljivač koji se baždari, a čije je slabljenje u dijapazonu od 30 dB do 70 dB. Izlazna snaga signal-generatora postavlja se na +10 dBm. Ukoliko je nominalna vrednost slabljenja testiranog oslabljivača 30 dB, uzimajući u obzir slabljenje razdelnika snage, na diodnu glavu dolazi snaga od -26 dBm. Ako testirajući oslabljivač ima slabljenje 70 dB, na diodnu glavu dolazi snaga od -66 dBm. Programski se na signal-generatoru postavljaju iste frekvencije kao i u procesu kalibracije. U po-

sebnim matricama u memoriji računara registruju se izmerene snage na vat-metru sa diodnom glavom HP 8484A i na vat-metru sa termopretvaračkom glavom HP 8481A kao P_1' i P_2' , respektivno.

Treba istaći da promena veličina izlazne snage signal-generatora pri kalibracionom i test-merenju nema uticaja na tačnost merenja, jer obe grane razdelnika snage »vide« istu piomenu snage.

Slabljenje baždarenog oslabljivača računa se po formuli:

$$A = (P_1 - P_2) - (P_1' - P_2') \quad (19)$$

Za oslabljivač koji radi u frekven-
cijskom opsegu DC do 18 GHz slablje-
nje se meri u 21. tački.

U merenju se ne koristi pomoćni oslabljivač za smanjenje koeficijenta refleksije izvora (signal-generatora), ali zato korišćenje dvootporničkog razdel-

Sl. 6 — Sema povezivanja mernih instrumenata za merenje slabljenja u opsegu 30 do 70 dB

nika snage WE 1870A bitno smanjuje KST izvora, pa je tipična tačnost merenja slabljenja bolja od $\pm 0,2$ dB.

Razdelnik snage WE 1870A prikazan je na slici 7.

Sl. 7 — Grafički prikaz razdelnika snage WE 1870 A

Kada se koristi ovaj razdelnik snage efektivni koeficijent refleksije (od-

nosno efektivno prilagođenje na izvor) jednak je za obe izlazne grane razdelnika i iznosi:

$$\Gamma_s = S_{22} - S_{21} \cdot \frac{S_{32}}{S_{31}} = S_{33} - S_{31} \cdot \frac{S_{23}}{S_{21}} \quad (20)$$

gde je:

S_{22}, S_{33} — koeficijenti refleksije izlaznih grana razdelnika,

S_{21}, S_{31} — sprege ulaz-izlaz razdelnika,

S_{23}, S_{32} — izolovanost (»preslušavanje«) izlaznih grana,

S_{23}/S_{21} , — usmerenost (analogija sa usmerenim sprežnjakom).

Pomoću slike 8 proračunavaju se S-parametri razdelnika.

Sl. 8 — Proračun S-parametara razdelnika snage

Prema slici 8a) sledi da je ($S_{33} = S_{22}$):

$$R = 50 + \frac{50 \cdot 100}{50 + 100} = 83,33 \, \Omega \quad (21)$$

$$S_{22} = S_{33} = \frac{R - Z_0}{R + Z_0} = \frac{33,33}{133,33} = 0,25 \quad (22)$$

Sa slike 8b) je:

$$S_{21} = S_{31} = 0,5 \quad (23)$$

Sa slike 8c) je:

$$S_{23} = S_{32} = 0,25 \quad (24)$$

Zamenjujući dobijene vrednosti S-parametara u formulu (20) dobija se:

$$\Gamma_s = 0,25 - 0,5 \cdot \frac{0,25}{0,5} = 0 \quad (25)$$

U idealnom slučaju dobija se da je ekvivalentni koeficijent refleksije izvora, posmatrajući sa izlaznih grana

razdelnika snage, jednak nuli. To je i jasno ako se uzme u obzir da su svi elementi razdelnika otpornosti, i da su fazni uglovi koeficijenta refleksije jednaki nuli.

U realnim uslovima ekvivalentni KST izvora, posmatrano sa izlaznih grana razdelnika, je (zbog neidealnosti konektora):

$$\begin{aligned} &< 1,20 \text{ do } 8 \text{ GHz} \\ &< 1,33 \text{ do } 18 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (26)$$

Ovo kratko razmatranje ukazalo je na koji način korišćenje dvootporničkog razdelnika snage doprinosi poboljšanju tačnosti merenja slabljenja.

Treba istaći da se ova metoda merenja mikrotalasnog slabljenja može koristiti i u opsegu 0 do 30 dB. U tom slučaju potrebno je zameniti diodnu glavu HP 8484A na vat-metru 1 termopretvaračkom glavom HP 8481A.

Najveći doprinos ukupnoj nesigurnosti merenja slabljenja daje nesigurnost zbog neprilagođenja.

Tabela 4

KST _{se}	KST _g	KST _{osl}	Slb(dB)	Nesigurnost zbog neprilagođenja (dB)	
				Najgori slučaj	RSS
1,1	1,1	1,15	3	-0,08713 do +0,0676	±0,0473
1,18	1,2	1,3	3	-0,2928 do +0,2292	±0,15897
1,33	1,28	1,4	3	-0,6032 do +0,4580	±0,3224
1,1	1,1	1,15	50	-0,0773 do +0,0774	±0,0452
1,2	1,18	1,3	50	-0,2609 do +0,2626	±0,1523
1,33	1,28	1,4	50	-0,5310 do +0,5369	±0,3051
1,1	1,1	1,3	10	-0,1292 do +0,1259	±0,0787
1,33	1,28	1,3	10	-0,46401 do +0,4363	±0,026101
1,1	1,1	1,3	70	-0,1273 do +0,1279	±0,07844
1,33	1,28	1,3	70	-0,4494 do +0,4519	±0,2568
Napomena: KST _{se} — ekvivalentni KST signal-generatora, KST _g — KST glave HP 8481A ili HP 8484A, KST _{osl} — KST test-oslabljivača (pretpostavka da su KST oba kraja isti), Slb(dB) — nominalno slabljenje test-oslabljivača.					

U analizi nesigurnosti merenja slabljenja zbog neprilagođenja, koriste se metoda najgoreg slučaja određivanja nesigurnosti i RSS metoda. Vršena su proračunavanja za razne vrednosti ekvivalentnog KST izvora, KST glave mikrotalasnog vat-metra, KST test-oslabljivača i slabljenja oslabljivača. Urađen je poseban program na računaru u kojem su korištene formule (14) i (15). Rezultati ovih razmatranja dati su u tabeli 4.

Iz tabele 4 vidi se da za neke tipične vrednosti ($KST_{se}=1,1$; $KST_g=1,1$; $KST_{osl}=1,3$) ni u slučaju analize nesigurnosti zbog neprilagođenja metodom najgoreg slučaja greška nije veća od $\pm 0,15$ dB. U slučaju analize nesigurnosti određivanja slabljenja zbog neprilagođenosti metodom RSS, čak u slučaju kada su zadane vrednosti na granici tehničkih uslova proizvođača ($KST_{se}=1,33$; $KST_g=1,28$; $KST_{osl}=1,4$), greška ne prelazi $\pm 0,31$ dB.

Pri proceni ukupne nesigurnosti određivanja mikrotalasnog slabljenja, osim navedene nesigurnosti zbog neprilagođenja, moraju se uzeti u obzir nesigurnost merenja vat-metrom i uticaj šuma na tačnost merenja slabljenja koja su veća od 50 dB.

U slučaju da se traži »kontinualno« merenje slabljenja od 0 do 70 dB (na primer, pri testiranju filtera), u već navedenu šemu merenja ubacuje se mikrotalasni koaksijalni prekidač HP 8761B koji se upravlja programabilnim

izvorom napajanja. U tom slučaju potrebno je uvesti još jedan vat-metar HP 436A sa termopretvaračkom glavom HP 8481A. Znači, u šemi merenja tri vat-metra HP 436A sa dve termopretvaračke i jednom diodnom glavom.

Osnovni nedostatak ove metode merenja je dodatna nesigurnost zbog neprilagođenja koja nastaju ubacivanjem koaksijalnog prekidača [7].

Zaključak

Navedenom metodom automatskog baždarenja fiksnih i promenljivih oslabljivača mogu se baždariti radni etaloni mikrotalasnog slabljenja i oslabljivači koji podležu redovnoj verifikaciji ili redovnom pregledu u mernom opsegu 0 do 70 dB, odnosno frekvencijskom opsegu DC do 18 GHz.

Pokazano je da tipična nesigurnost merenja izloženom metodom ne prelazi $\pm 0,2$ dB ukoliko se koristi razdelnik snage. Prednost ovakvog merenja slabljenja je potpuna automatizacija merenja i obrada rezultata. Tabelarno se prikazuju rezultati merenja KST ili koeficijenta refleksije sa proračunatom nesigurnošću merenja, kao izmereno slabljenje sa nesigurnošću određivanja slabljenja.

Osnovna prednost ove metode je u korišćenju relativno jednostavne merne opreme, a nedostatak u ograničenom dinamičkom mernom opsegu.

Literatura:

- [1] JUS L.G7.101: Mikrotalasni instrumenti — Termini i definicije, Beograd, 1980.
- [2] SNO 6797: Iskaz za kvalitet rada i metode merenja nepromenljivih i promenljivih oslabljivača, DC do 40 GHz — Termini i definicije, Beograd, 1988.
- [3] Beatty W. R.: Insertation Loss Concepts, Proceedings of the IEEE, June 1964.
- [4] Unković, M.: Greške merenja mikrotalasne snage, Vojnotehnički glasnik br. 6, Beograd, 1994. god.
- [5] Hewlett Packard Application Note 64-2: Extended Application of Automatic Power Meters, Palo Alto, CA, September 1978.
- [6] Hewlett Packard Application Note 183: High Frequency Swept Measurement, Palo Alto, CA, December 1978.
- [7] Hewlett Packard Application Note 196: Automated Measurement Using the 436A Power Meter, Palo Alto, CA, March 1976.
- [8] Power Meter 436A, Operating and service Manual, Palo Alto, USA, CA, October 1995.
- [9] Synthesized Signal Generator 8672A, Operating and Service Manual, Palo Alto, CA, February 1977.