Mr Milovan Unković,
dipl. inž.

GREŠKE PRI MERENJU MIKROTALASNE SNAGE

Uvod

Mikrotalasna snaga je, pored frekvencije, najznačajnija veličina u mikrotalasnoj tehnici. Zbog toga je vrlo važno da se što tačnije izmeri.

U ovom radu su opisane greške koje se javljaju pri merenju mikrotalasne snage. Sve definicije su u skladu sa standardom [1]. Teorijska razmatranja prenosa snage u mikrotalasnim sistemima i uzroka grešaka pri merenjima mikrotalasne snage nalaze se u poglavljima 3 i 4, a pri tome je korišćena literatura [2], [3], [4] i [5]. Konačno, u poglavlju 5 opisani su automatizovani postupci za merenje KST-a i prenos faktora baždarenja glava za mikrotalasne vatmetre: HP 8481A/H, HP 8484A, HP 8478B i HP 478A. U odštampanim rezultatima merenja date su i nesigurnosti sa kojima se za dati postupak određuje KST i vrši prenos faktora baždarenja.

Oznake i definicije:

— *vod* je materijalna struktura koja formira neprekidni put između dve tačke i koristi se za usmeravanje prostiranja glavnog dela elektromagnetne energije duž puta;

— *talasovod* je vod od provodne cevi koja može sadržati dielektrični materijal;

— *karakteristična talasna impendansa* je odnos kompleksne amplitude transferzalnog talasa električnog vektora prema transferzalom magnetnom vektoru u datoj tački za progresivni elektromagnetski talas na datoj frekvenciji, pri čemu je znak izabran tako da realni deo bude pozitivan;

— *karakteristična impendansa* Z_0 voda bez gubitaka za dati tip prostiranja je veličina koja se dobije kada se pomnoži karakteristična talasna impendansa voda odgovarajućim faktorom;

— *konjugovane impendanse* Z i Z^* su dve impendanse koje imaju realne delove iste veličine, a imaginarne delove iste veličine, ali suprotnog znaka tj.
 $Z = X_1 + jY_1$; $Z^* = X_2 + jY_2$; $X_1 = X_2$;
 $Y_1 = -Y_2$, (1)

— *impedansa izvora* je impendansa koja predstavlja izvor snage na ulaznom priključku uređaja na koji se priključuje;

— *koeficijent refleksije voda* Γ je odnos kompleksnog broja koji predstavlja fazu i amplitudu vektora električnog reflektovanog talasa b prema kompleksnom broju koji predstavlja fazu i am-

plitudu vektora električnog incidentnog talasa a u nekoj tački voda

$$\Gamma = \frac{b}{a} = \rho \quad |\Phi, \quad (2)$$

— koeficijent refleksije izvora u sistemu Z_0 je:

$$\Gamma_g = \frac{Z_g - Z_0}{Z_g + Z_0} \quad (3)$$

— koeficijent refleksije opterećenja je:

$$\Gamma_{op} = \frac{Z_{op} - Z_0}{Z_{op} + Z_0} \quad (4)$$

gde su Z_g i Z_{op} ulazne impedanse izvora i opterećenja, respektivno,

— naponski koeficijent stojećeg talasa (KST) je odnos amplituda napona koje odgovaraju maksimumu i minimumu stojećeg talasa. Koeficijent stojećeg talasa u homogenom vodu je:

$$KST = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (5)$$

— slabljenje refleksije na spoju voda i impendanse je odnos, izražen u dB, reflektovanog i incidentnog talasa. Slabljenje refleksije je mera nejednakosti dve impendanse i jednako je modulu recipročne vrednosti koeficijenta refleksije:

$$S.R. = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 - Z_2} \right| \quad (6)$$

gde su Z_1 i Z_2 dve navedene impendanse,

— reflektometar je merni uređaj za merenje odnosa amplitude reflektovanog talasa i odgovarajuće amplitude incidentnog talasa u sredini prostiranja,

— matrica razdvojenih parametara $[S]$ je matrica kompleksnih brojeva koji predstavljaju koeficijente prostiranja i refleksije elemenata voda,

— faktor sprege usmerenog spreznjaka (reflektometarskog mosta) T je

odnos snage dovedene na jedan priključak i raspoložive snage na drugom priključku,

— usmerenost usmerenog spreznjaka (reflektometarskog mosta) D je odnos:

— raspoložive snage na jednom od priključaka, kada se samo progresivni talasi prostiru do drugih priključaka u jednom od smerova;

— prema raspoloživoj snazi na istom priključku kada se obrne smer prostiranja između ista dva priključka.

Raspoloživa snaga izvora, definisana za pozitivnu otpornost izvora P_g je snaga koja se potroši na kompleksno konjugovanom prilagođenom opterećenju.

Izlazna snaga generatora P_{go} je snaga koja se potroši na opterećenju sa karakterističnom impendansom Z_0 .

Očitana snaga $P_{oč}$ je snaga očitana na indikatoru mikrotalasnog vatmetra.

Faktor baždarenja bolometarske glave K_b je odnos supstituisane snage P_{sub} u bolometru prema ukupnoj snazi koja se u sistemu sa karakterističnom impendansom Z_0 dovodi na bolometarsku glavu.

Efektivni koeficijent korisnog dejstva η_e je odnos mikrotalasne snage potrošene u bolometru (osetljivi element) P_{sub} prema ukupnoj mikrotalasnoj snazi potrošenoj u bolometarskoj glavi. Važi relacija:

$$K_b = (1 - |\Gamma_v|^2) * \eta_e \quad (7)$$

gde je Γ_v koeficijent refleksije vatmetra.

Prilagođenost na vod ili talasovod je uslov da je impendansa opterećenja vezanog za vod ili talasovod jednaka karakterističnoj impendansi voda ili talasovoda (Z_0 prilagođenje).

Konjugovana prilagođenost je uslov za maksimalni prenos snage kod kojeg je impendansa opterećenja konjugovana — kompleksna izlaznoj impen-

dansi uređaja na koji se opterećenje priključuje.

Neprilagođenost na vod ili talasovod je uslov kada impendansa opterećenja ne prilagođava impendansu priključka izvora na koji je opterećenje vezano.

Razdešenost na vod ili talasovod (Z_0 razdešenost) je uslov kada impendansa opterećenja vezanog na vod ili talasovod nije jednaka karakterističnoj impendansi voda ili talasovoda.

Ostale oznake koje se koriste u tekstu:

- P_{gop} — snaga koju izvor predaje opterećenju sa proizvoljnom impendansom različitom od Z_0 ,
 P_d — disipirana snaga na opterećenju,
 P_i — incidentna (upadna) snaga na opterećenju,
 P_r — reflektovana snaga od opterećenja,
 P_{sub} — substituisana snaga u glavi vatmetra,
 $\mu_{\pm}$ — gornja, odnosno donja granica nesigurnosti,
 K_b — faktor baždarenja etalonske glave,
 P_{pom} — snaga izmerena pomoćnom glavom pri prenosu faktora baždarenja,
 P_{test} — snaga izmerena testirajućom glavom pri prenosu faktora baždarenja,
 P_{std} — snaga izmerena etalonskom glavom pri prenosu faktora baždarenja,
 μ_{Kb} — nesigurnost određivanja faktora baždarenja,
 W — ukupna greška instrumenta (vatmetra) — apsolutni odnos:

$W=1,0146$ za 8481A

$W=1,02447$ za 8481H

$W=1,02392$ za 8484A

$W=1,01953$ za 8478B,

σ — standardna devijacija

Greške merenja mikrotalasne snage zbog neprilagođenosti

U merenjima mikrotalasne snage najveće greške se javljaju zbog neprilagođenosti. Izvor mikrotalasne snage (mikrotalasni generator) najčešće je od merne tačke odvojen mikrotalasnim komponentama: vodovima, usmerenim sprežnicima, modulatorima, oslabljivačima, mešačima, razdelnicima snage, usmerenim mostovima, itd. Sve ove komponente smatraju se delom generatora, odnosno zajedno sa izvorom snage predstavljaju ekvivalentni generator.

Da bi se analizirali efekti neprilagođenosti na tačnost merenja mikrotalasne snage, mora se dati mikrotalasni opis opterećenja, uključujući glavu vatmetra, ekvivalentnog generatora i prenosa snage između izvora i opterećenja. Karakteristična impendansa Z_0 , koja se koristi za opisivanje mikrotalasnih generatora gotovo je uvek 50Ω , jer se ova otpornost lako simulira preko čitavog željenog frekventnog područja vodom karakteristične impendanse 50Ω sa završetkom bez refleksije.

Kao što u mikrotalasnom opsegu frekvencija napon gubi smisao, tako i impendansa ustupa mesto koeficijentu refleksije. Impedansa se menja duž voda i zavisi od mesta na vodu. Koeficijent refleksije ima konstantnu amplitudu, a fazni ugao ovog fazora je linearna funkcija rastojanja od opterećenja.

Ako su a_{op} i b_{op} vektori reflektovanog i incidentnog talasa na opterećenju, tada je:

$$\left. \begin{aligned} P_i &= |a_{op}|^2 \\ P_r &= |b_{op}|^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

gde su P_i i P_r incidentna, odnosno reflektovana snaga, respektivno.

Snaga koja se disipira na opterećenju je:

$$P_d = P_i - P_r = |a_{op}|^2 - |b_{op}|^2 \quad (9)$$

i kombinujući se sa snagom stvorenom u generatoru daje novi incidentni talas koji dolazi na opterećenje. Ovaj novi upadni talas se ponovo reflektuje od opterećenja i proces se nastavlja.

Kao što Γ_{op} karakteriše mikrotalasno opterećenje, to Γ_g karakteriše mikrotalasni generator. Jednačina koja karakteriše mikrotalasni generator je:

Kombinujući jednačinu iz definicije koeficijenta refleksije (3) sa jednačinom (11), a imajući u vidu da sa sl. 1 proističe $b_{op} = a_g$ i $b_g = a_{op}$, imamo:

$$\begin{aligned} a_{\text{op}} &= \frac{b_s}{1 - \Gamma_g \Gamma_{\text{op}}} \\ b_{\text{op}} &= \frac{b_s \Gamma_{\text{op}}}{1 - \Gamma_{\text{op}} \Gamma_g} \end{aligned} \quad (13)$$

Uvrštavajući ove vrednosti u jednačine (8) dobijamo:

$$\begin{aligned} P_i &= |b_s|^2 \frac{1}{|1 - \Gamma_{op} \Gamma_g|^2} \\ P_r &= |b_s|^2 \frac{1}{|1 - \Gamma_{op} \Gamma_g|^2} \end{aligned} \quad (14)$$

Disipirana snaga na opterećenju je
saglasno (9):

$$P_d = P_{op} = P_i - P_r |b_s|^2 \frac{1 - |\Gamma_{op}|^2}{|1 - \Gamma_{op} \Gamma_g|^2} \quad (15)$$

Uočimo dva karakteristična slučaja gornje jednačine.

Prvo, slučaj kada je $\Gamma_{op}=0$, odnosno kada je $Z_{op}=Z_0$ tada je:

$$P_{\text{gop}}/Z_{\text{op}}=Z_0=P_{\text{gz0}}=|\mathbf{b}_s|^2 \quad (16)$$

Sa slike 1 lako se uočava efekat neprilagođenosti ili refleksije. Prvo, snaga koja dolazi sa generatora reflektuje se od opterećenja. Ova reflektovana snaga se rereflektuje od generatora

Drugi je slučaj kada je koeficijent refleksije generatora jednak konjugovano-kompleksnoj vrednosti koeficijenta refleksije opterećenja, tj. $\Gamma_g = \Gamma_{op}^*$, odnosno kada je generator konjugovano prilagođen opterećenju. Ako je ovaj uslov zadovoljen, generator daje maksimalnu snagu na opterećenje; ova snaga zove se raspoloživa snaga izvora i iznosi:

$$P_g = \frac{|b_s|^2}{1 - |\Gamma_g|^2} \quad (17)$$

Upoređujući jednačine (16) i (17) vidi se da važi:

$$P_g \geq P_{gzo} \quad (18)$$

Na osnovu prethodnih razmatranja mogu se analizirati greške merenja koje nastupaju zbog neprilagođenosti. Kada se glava mikrotalasnog vatmetra spoji na generator, meri se snaga P_{gop} iz izraza (15). Snaga koja karakteriše generator je ona koja se predaje na opterećenje koje je jednako karakterističnoj impendansi Z_0 . To je snaga P_{gzo} iz izraza (16). Odnos navedenih snaga je:

$$\frac{P_{gzo}}{P_{gop}} = \frac{|1 - \Gamma_g \Gamma_{op}|}{1 - |\Gamma_{op}|^2} \quad (19)$$

ili izraženo u dB:

$$10 \log \frac{P_{gzo}}{P_{gop}} = 10 \log(1 - \Gamma_{op} \Gamma_g) - \\ - 10 \log(1 - |\Gamma_{op}|^2)$$

Gornji odnos u dB zove se slabljenje zbog Z_0 neprilagođenosti. Konjugovana prilagođenost je slučaj Z_0 neprilagođenosti. U slučaju kada je odnos (19) manji od jedinice, generator daje više snage nekom opterećenju nego Z_0 . Takav je slučaj kada su opterećenje i generator konjugovano prilagođeni.

Opšta formula za prenos snage između izvora mikrotalasne snage i opterećenja dobija se iz realnih uslova kada ni Z_g ni Z_{op} nisu jednaki Z_0 . U tom slučaju formula za prenos snage može se predstaviti kao:

$$\frac{(1 - |\Gamma_g|^2)(1 - |\Gamma_{op}|^2)}{|1 - \Gamma_g \Gamma_{op}|^2} \quad (20)$$

U ovoj formuli slabljenja zbog Z_0 neprilagođenosti izvora, odnosno opterećenja su: $(1 - |\Gamma_g|^2)$ i $(1 - |\Gamma_{op}|^2)$, respektivno. Izraz $|1 - \Gamma_g \Gamma_{op}|^2$ predstavlja nesigurnost u prenosu snage, pa, prema tome, i nesigurnost u merenju snage. Granice nesigurnosti dobijaju se iz izraza $(1 \pm |\Gamma_g| |\Gamma_{op}|)^2$. Nesigurnost se često definiše kao »najveće dozvoljeno odstupanje greške«. Iz izraza (20) maksimalne granice nesigurnosti u dB su:

$$M_{u+} = 10 \log_{10}(1 + |\Gamma_g| |\Gamma_{op}|) \quad (21)$$

$$M_{u-} = 10 \log_{10}(1 - |\Gamma_g| |\Gamma_{op}|)$$

Iz izraza (19) i (20) je jasno da je za što tačnija merenja snage važno da koeficijenti refleksije izvora i glave vatmetra budu što manji. Da bi se smanjio koeficijent refleksije generatora, između izvora i vatmetra često se umeće oslabljivač malog koeficijenta refleksije i poznatog slabljenja. Tada govorimo o ekvivalentnom koeficijentu refleksije generatora:

$$\Gamma_{ge} = S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_g}{1 - S_{11} \Gamma_g} \quad (22)$$

gde su S_{22} i S_{11} ulazni i izlazni koeficijenti refleksije oslabljivača, respektivno, a S_{12} i S_{21} slabljenja oslabljivača u oba smera.

U slučaju oslabljivača od 20 dB uticaj koeficijenta refleksije se smanjuje 100 puta i važi $\Gamma_{ge} = S_{22}$.

Ostale greške pri merenju mikrotalasne snage

Greške bolometarske glave

Snaga koja dolazi na bolometarsku glavu je razlika incidentne i reflektovane snage. Međutim, ova snaga se ne disipira na senzorskom elementu glave, jer se jedan deo izrači u prostor, a je-

dan deo prolazi kroz razne elemente uređaja. Meri se samo ona snaga koja se disipira na senzorskom elementu glave.

Da bi se mogla meriti, disipirana mikrotalasna snaga mora se pretvoriti u jednosmerni ili niskofrekventni ekvivalent koji se označava sa P_{sub} .

Efektivni koeficijent korisnog dejstva glave je:

$$\eta_e = \frac{P_{\text{sub}}}{P_{\text{gop}}} \quad (23)$$

Faktor baždarenja glave je najznačajniji parametar, pored KST koji karakteriše bolometarsku glavu.

Ovaj parametar predstavlja kombinaciju efektivnog koeficijenta korisnog dejstva i gubitka zbog neprilagođenosti (što se vidi iz definicije). Važi relacija:

$$K_b = \frac{P_{\text{sub}}}{P_i} = \eta_e \frac{P_{\text{gop}}}{P_i} = \eta_e (1 - |\Gamma_{\text{op}}|^2) \quad (24)$$

Savremeni vatmetri imaju mogućnost korigovanja svog pokazivanja, uzimajući u obzir vrednost K_b za određenu frekvenciju. Vrednosti K_b , naznačene su na svakoj glavi, a ovaj faktor se obavezno utvrđuje pri svakoj kalibraciji (baždarenju) glave.

Kako se faktor baždarenja koristi za korekciju koeficijenta korisnog dejstva i gubitka zbog neprilagođenosti, to ostaje samo nesigurnost zbog neprilagođenosti. U vezi sa K_b javlja se još jedna neželjena nesigurnost: nesigurnost određivanja K_b u laboratorijama proizvođača ili drugim ovlašćenim laboratorijama.

Greške vatmetara

Neke od grešaka koje se javljaju pri merenju mikrotalasne snage dolaze od elektronike vatmetra. Ove greške uslovljavaju da se javi razlika između P_{oc} i P_{sub}/K_b .

Vatmetri za termopretvaračke i diodne glave poseduju referentni izvor snage (referentni oscilator) frekvencije 50 MHz i snage 1 mW sa nesigurnošću 1,2%, što direktno ulazi u ukupnu grešku merenja.

Merenje snage termistorskom glavom odvija se u zatvorenoj petlji, pa su ovakvi vatmetri oslobođeni navedene greške.

Referentni oscilator ima vlastiti koeficijent refleksije. Ovaj koeficijent refleksije referentnog izvora, zajedno sa koeficijentom refleksije glave, daje vlastitu nesigurnost zbog neprilagođavanja. Zbog niske frekvencije ova nesigurnost je mala i iznosi $\pm 0,01$ dB, odnosno $\pm 0,2\%$.

Greška mernog instrumenta je kombinacija više grešaka i iznosi $\pm 1\%$ za analogne, odnosno $\pm 0,5\% \pm 1$ digit za digitalne instrumente.

Grešku električne nule i automatskog nulovanja nalazimo kod svih tipova vatmetara. Pre merenja snage potrebno je podesiti nulu na najosetljivijem opsegu vatmetra. Ova greška je reda: $\pm 0,2\%$. Šum ili kratkotrajna stabilnost utiče na tačnost merenja snage i potiče iz raznih izvora unutar glave ili instrumenta.

Drift ili dugotrajna stabilnost utiče na promenu indikacije instrumenta u toku dužeg vremena (jednog sata) za stalnu ulaznu snagu, temperaturu i napon napajanja vatmetra.

Važno je napomenuti da su sve navedene greške međusobno nezavisne, pa se može računati srednja kvadratna greška kao koren zbira kvadrata pojedinih grešaka.

Apsolutni odnos, koji se dobije iz ukupne nesigurnosti, iznosi za glavu 8481A — 1,0146, za glavu 8481H — 1,02447, za glavu 8484A — 1,02447 i za glavu 8478B — 1,01953.

Jednačina merenja snage

Razmotrićemo odnos snage $P_{o\check{c}}$ na vatmetru i snage koju generator troši na karakterističnu impendansu Z_0 (ovo je snaga P_{gzo}).

a)

b)

Sl. 2 — a) Povezivanje generatora i opterećenja — b) Povezivanje generatora i mikrotalasnog vatmetra

Veza između snage disipirane na opterećenju Z_0 i snage disipirane na glavi vatmetra glasi:

$$P_{gzo} = \frac{|1 - \Gamma_{op}\Gamma_g|^2}{1 - |\Gamma_{op}|^2} \cdot P_{gop} \quad (25)$$

Ovde glavu vatmetra smatramo opterećenjem. Kada P_{gop} zamenimo iz izraza (4.2), dobijamo:

$$P_{gzo} = |1 - \Gamma_{op}\Gamma_g|^2 \cdot \frac{1}{\eta_e(1 - |\Gamma_{op}|^2)} \cdot P_{sub} \quad (26)$$

Prvi faktor na desnoj strani izraza (4.4) jeste nesigurnost zbog neprilagođenja, a izraz u imeniocu drugog faktora je faktor baždarenja glave vatmetra K_b , pa je:

$$P_{gzo} = M_u \frac{1}{K_b} P_{sub} \quad (27)$$

Snaga očitana na vatmetru $P_{o\check{c}}$ razlikuje se od snage P_{sub} . Postoji više izvora grešaka u elektronici vatmetra koji uslovljavaju netačno pojačanje i prikazivanje snage P_{sub} . Ove greške vatmetra označimo simbolom m , dok postavljanje nule, šum i drift uslovljavaju da, kada je $P_{sub} = 0$ nije i $P_{o\check{c}} = 0$, već postoji neko pokazivanje instrumenta t . Zato je:

$$P_{o\check{c}} = P_{sub} \cdot m + t \quad (28)$$

Usavršavajući (28) i (27) ima se:

$$P_{gzo} = \frac{M_u(P_{o\check{c}} - t)}{K_b \cdot m} \quad (29)$$

U idealnom slučaju je $M_u = 1$, $K_b = 1$, $t = 0$, pa je i $P_{gzo} = P_{o\check{c}}$

Najgori slučaj nesigurnosti

Kada se računa najgori slučaj nesigurnosti, sabiraju se ekstremne vrednosti svih grešaka, tako da se dobije maksimalno moguće odstupanje $P_{o\check{c}}$ od P_{gzo} . Najveća pojedinačna komponenta nesigurnosti u tom slučaju je nesigurnost zbog neprilagođenosti.

RSS nesigurnost

Najgori slučaj nesigurnosti je vrlo konzervativan i krajnje pesimistički prilaz procene nesigurnosti. Mnogo realističniji prilaz računanja ukupne nesigurnosti je nalaženje korena iz sume kvadrata pojedinačnih nesigurnosti (RSS nesigurnosti). Ova metoda se zasniva na činjenici da je većina grešaka koje se javljaju pri merenjima mikrotalasne snage međusobno nezavisna. RSS

nesigurnost za jednačinu merenja snage (29) bila bi:

$$\frac{\Delta P_{gzo}}{P_{gzo}} = \left[\left(\frac{\Delta M_u}{M_u} \right)^2 + \left(\frac{\Delta K_b}{K_b} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{P_{oč}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (30)$$

Svaki od članova u jednačini (30) može se naći, takođe, koristeći RSS metod za njegove komponente, pa važi:

$$\frac{\Delta m}{m} = \left[\left(\frac{\Delta m_1}{m_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m_2}{m_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta m_n}{m_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (31)$$

Programi za merenje KST i prenos faktora baždarenja glava mikrotalasnih vatmetara

Za merenje KST i prenos faktora baždarenja glava za mikrotalasne vatmetre koriste se dve različite konfiguracije mesnih uređaja, pa su zato i urađena dva posebna programa u BASIC-u. Pored toga, za prenos faktora baždarenja glava 8481A/H, 8484A koristi se jedan program, a za prenos faktora baždarenja termistorske glave 8487B koristi se modifikacija ovog programa, jer se donekle razlikuje merna oprema koja se koristi. Pored ova dva osnovna programa koja rade u realnom vremenu, postoji i program pomoću kojeg se formira matrica podataka koji ulaze u proračun maksimalne moguće greške pri određivanju KST i faktora baždarenja. Ovi podaci odnose se na karakteristike standardnih (etalonskih) glava (KST, Kbe) i karakteristike merne opreme i kreirani su kao posebna datoteka »CALPOD« na disketi računara HP9826. Veza između programa za određivanje KST i programa za prenos faktora baždarenja ostvaruje se preko dve datoteke »BE« i »AJ« u koje program za određivanje KST upisuje vrednosti KST i maksimalne moguće greške određivanja KST za glave koje se testiraju.

Program za formiranje matrice ulaznih podataka

Program za formiranje matrice podataka A(21, 17) poziva se naredbom GET »KONSTRUKT«, a pokreće naredbom RUN. Matrica A(21, 17) smeštena je u datoteci podataka »CALPOD«. Matrica ima 21 vrstu, jer se merenja vrše na toliko frekvencija (50 MHz, 100 MHz, 500 MHz, 1—18 GHz). Kolone matrice sadrže sledeće podatke:

Kolona 1	Frekvencija u GHz
Kolona 2	Faktor baždarenja standardne (etalonske) glave 8481A
Kolona 3	Nesigurnost faktora baždarenja std. glave 8481A
Kolona 4	Koeficijent refleksije standardne (etalonske) glave 8481A
Kolona 5	Faktor baždarenja standardne (etalonske) glave 8478B
Kolona 6	Nesigurnost faktora baždarenja standardne (etalonske) glave 8478B
Kolona 7	Koeficijent refleksije standardne (etalonske) glave 8478B
Kolona 8	Koeficijent refleksije reflektometarskog mosta 11666A
Kolona 9	Usmerenost reflektometarskog mosta 11666A
Kolona 10	Dozvoljena granična vrednost KST za glavu 8484A
Kolona 11	Dozvoljena granična vrednost KST za glavu 8481A
Kolona 12	Dozvoljena granična vrednost KST za glavu 8481H
Kolona 13	Dozvoljena granična vrednost KST za glavu 8478B
Kolona 14	Faktor baždarenja standardne (etalonske) glave 8484A
Kolona 15	Nesigurnost faktora baždarenja std. glave 8484A
Kolona 16	Koeficijent refleksije standardne (etalonske) glave 8484A

Kolona 17 Koeficijent refleksije razdelnika snage WE 1870A

Program KONSTRUKT omogućava:

- formiranje nove matrice A(21, 17) ili inicijalno formiranje ove matrice,
- menjanje pojedine kolone matrice A,
- menjanje pojedinog elementa matrice A,
- prikazivanje na displeju sadržaja matrice A,
- štampanje sadržaja matrice A.

Program za određivanje KST glava za mikrotalasne vatmetre

KST glava za mikrotalasne vatmetre određuje se uz pomoć programa »KST GLAVA«. Koristi se reflektometarska metoda merenja koeficijenta re-

fleksije, a zatim se ovaj koeficijent pre- računava u KST.

Povezivanje mernih instrumenata prikazano je na slici 3.

Početno postavljanje mernih instrumenata dato je na sledeći način:

- analizator prebrisavajuće amplitude
HP 8755B
kanal: CHANNEL 1
referentni nivo: REFERENCE
LEVEL — 00 dB
VERNIER — OFF
dB / DIV — 5
DISPLAY — A/R
- Generator signala HP 8672A:
RANGE dBm: — 110
meter mode: — LEVEL
RF OUTPUT: — OFF
OUTPUT LEVEL VERNIER: krajnji levi položaj (min)

Sl. 3 — Šema povezivanja mernih instrumenata za automatsko određivanje KST

ALC — INT
AM — OFF
FM DEVIATION MHz — OFF

- c) jedinica za proširenje frekventnog opsega HP 86720A:
OUTPUT VERNIER — krajnji levi položaj (min)
- d) A/D pretvarač HP 59313A — koristi se kanal 1 (CH1)
- e) displej HP 182T — koristi se analogni izlaz AUX A.
- f) modulator HP 11665B i reflektometrijski most HP 11666A povezani su kao na slici 3.

Kao izlaz sa displeja 182T, odnosno analizatora amplitude 8755B, koristi se izlaz na zadnjoj strani displeja AUX A. Za izabrano 5 dB/div na analizatoru amplitude imamo odnos $0,1 \text{ V} = 1 \text{ dBm}$ i ova relacija se koristi u programu. Kanal 1 (CH1) A/D pretvarača podešen je za maksimalnu vrednost 2,5 V ulaza, što odgovara broju 1023. Formula za A/D pretvaranje, koje se koristi u programu je:

$$U = k \cdot N \quad (32)$$

$$k = \frac{\text{ulazni puni opseg}}{\text{izlazni puni opseg}} = \frac{2,5}{1023} \quad (33)$$

gde je U proračunati napon iz digitalne forme N izlaza iz A/D pretvarača.

Program prvo očitava matricu A (21/17) iz datoteke »CALPOD«. Zatim se meri refleksija pri otvorenom, odnosno kratko spojenom TEST terminalu reflektometrijskog mosta. Generator signala HP 8672A i njegova jedinica za proširenje frekvencije HP 86720A su programirani, tako da sa navedenom 21 frekvencijom daju izlazni nivo od +10 dBm za glave 8481A/H i 8478B a — 7 dBm za glavu 8484A. Ovaj signal biva oslabljen, jer modulator ima svoje u-nešeno slabljenje, a nominalno slabljenje reflektometrijskog mosta na TEST terminalu je 9 dB.

Nakon registrovanja vrednosti refleksije za kratkospojen i otvoren TEST terminal reflektometrijskog mosta, na vatmetar se spoji glava čiji se KST traži. Nakon temperaturne stabilizacije glave, ona se priključuje na TEST terminal reflektometrijskog mosta. »REFERENCE LEVEL« na kanalu 1 analizatora amplitude 8755B postavi se na — 20 dBm, a program ovaj fakat uzima u obzir pri merenjima. Programom se dalje upravlja određivanjem slabljenja refleksije, a odatle se računa koeficijent refleksije i KST. Rezultati merenja i obrade rezultata merenja štampaju se u 5 kolona: frekvencija — F (GHz), koeficijent refleksije — K.REF., maksimalna moguća greška nalaženja koeficijenta refleksije — DELT.Kref., koeficijent stojećeg talasa — KST i dozvoljeni maksimalni koeficijent talasa za datu glavu — dozv.KST (tabela 1).

Nakon štampanja rezultata K.REF. i DELT.Kref. se upisuju u matrice B(21,20) i E(21,20). Ove matrice sadrže do 20 podataka o koeficijentima refleksije i greškama koeficijenta refleksije raznih glava čiji se KST traži i upisuju se u datoteke »BE«, »AJ« na disketi. Ovi podaci se koriste za određivanje nesigurnosti faktora baždarenja u programu »FB GLAVA«, odnosno »FB 8478B«.

Maksimalna moguća greška merenja koeficijenta refleksije za reflektometrijske metode određuje se na sledeći način:

Šematski prikaz bilo kog reflektometra prikazan je na slici 4.

Ovde je:

- 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 gledajući sa izlaza reflektometra.

Tabela 1

Koeficijent refleksije i KST		Model HP 8484A		
Serijski broj: 1635A00861		Datum: 26. 11. 1993.		
F (GHz)	K. Ref	DELTA. KRef	KST	Dozv. KST
0,05	0,06112	0,03782	1,13020	1,15000
0,10	0,04907	0,03656	1,10320	1,15000
0,50	0,04901	0,03648	1,10310	1,15000
1,00	0,04942	0,03671	1,10400	1,15000
2,00	0,04805	0,03675	1,10100	1,15000
3,00	0,05593	0,03762	1,11850	1,15000
4,00	0,05586	0,03839	1,11830	1,20000
5,00	0,06018	0,03911	1,12810	1,20000
6,00	0,06438	0,03989	1,13760	1,20000
7,00	0,06260	0,04007	1,13360	1,20000
8,00	0,06754	0,04091	1,14490	1,20000
9,00	0,06557	0,03991	1,14030	1,20000
10,00	0,06304	0,03947	1,13460	1,30000
11,00	0,06898	0,03985	1,14820	1,30000
12,00	0,06484	0,03887	1,13870	1,30000
13,00	0,06539	0,04177	1,13990	1,30000
14,00	0,06475	0,04213	1,13850	1,30000
15,00	0,06859	0,04295	1,14730	1,30000
16,00	0,07580	0,04467	1,16400	1,30000
17,00	0,07917	0,04558	1,17200	1,30000
18,00	0,08201	0,04558	1,17870	1,30000
Napomene Kref — Koeficijent refleksije DELTA.Kref — Greška koeficijenta refleksije KST — Koeficijent stojećeg talasa Dozv.KST — Maksimalni dozvoljeni KST				

Preko Masonovog [4] zakona dobija se:

$$\Gamma_m = A + \frac{(1+T) \cdot \Gamma_A}{1 - C\Gamma_A} \quad (34)$$

Sve veličine u gornjoj jednačini su kompleksni brojevi. Zanimajući uticaj faze proračunaćemo maksimalnu moguću grešku kao slučaj sabiranja najgorih mogućnosti grešaka za navedene veličine:

$$E = \Gamma_M - \Gamma_A = A + \frac{1+T}{1 - C\Gamma_A} - \Gamma_A \quad (35)$$

Nakon uprošćavanja dobija se:

$$E \approx A + T \cdot \Gamma_A + C \cdot \Gamma_A^2 \quad (36)$$

S obzirom na to da je T nepoznato, meri se otvorenim reflektometrom, a zatim jedinicom koja se testira, pa se dobije:

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{otvoreno}} &= \Gamma_A + (A + T \cdot \Gamma_A + C \cdot \Gamma_A^2); \\ \Gamma_A &= -1 \end{aligned} \quad (37)$$

$$\Gamma_{\text{test}} = \Gamma_T = \Gamma_A + (A + T \cdot \Gamma_A + C \cdot \Gamma_A^2) \quad (38)$$

Iz (37) je:

$$\Gamma_{\text{otvoreno}} = \Gamma_o = -1 + (A - T + C) \quad (39)$$

Merenje se obavlja nalaženjem odnosa Γ_T i Γ_o pa je:

$$\Gamma_{\text{displej}} = \Gamma_d = \frac{\Gamma_T}{\Gamma_o} = \frac{\Gamma_A + A + T \cdot \Gamma_A + C \cdot \Gamma_A^2}{1 - (A - T + C)} \quad (40)$$

Sl. 4 — Prenošenje mikrotalasne snage u reflektometarskom sistemu

Nakon uprošćavanja dobija se:

$$\Gamma_d = \Gamma_A + [A - (A + C) \cdot \Gamma_A + C \cdot \Gamma_A^2] \quad (41)$$

Nesigurnost računanja koeficijenta refleksije je:

$$\Delta\Gamma = \Gamma_d - \Gamma_A = A + (A + C) \Gamma_A + C \Gamma_A^2 = A + B \Gamma_A + C \Gamma_A^2 \quad (42)$$

gde je $B = A + C$ greška kalibracije. Gornja formula se može napisati i kao:

$$\Delta\rho = A + B\rho + C\rho^2 \quad (43)$$

jer je ρ skalarni ekvivalent koeficijenta refleksije. Iz gornjeg izraza drugi sabirak se može ukinuti, jer je B jednako nuli kada se vrši kalibracija reflektometarskog sistema tako što se referentni nivo određuje kao aritmetička sredina merenja otvorenog i kratkospojenog reflektometra. To je urađeno u našem programu i postupku merenja.

U našem konkretnom slučaju $A = D_r/T$, što je ekvivalentna usmerenost reflektometarskog mosta, a $C = \rho_c + |TD_i|$ je ekvivalentni koeficijent refleksije reflektometarskog mosta. Inače, C malo utiče na vrednost $\Delta\rho$ jer se množi sa ρ^2 .

*Program za prenos faktora
baždarenja glava 8481A/H
i 8484A*

Merna oprema za određivanje faktora baždarenja glava 8481A/H i 8484A

povezana je kao što je prikazano na slici 5.

Postupak merenja, upravljanog programom »FB GLAVA« je:

— kalibrisanje svih glava (pomoćne, standardne, testirajuće) vrši se na referentnom oscilatoru vatmetra sa adresom 713;

— pomoćna glava HP 8484A se na razdelnik snage povezuje preko oslabljivača 30 dB;

— testirajuća glava 8484A se na razdelnik snage priključuje preko oslabljivača 30 dB, glava 8481A preko oslabljivača 6 dB, a glava 8481H preko oslabljivača 3 dB;

— na razdelnik snage se prvo vežu standardna i pomoćna glava. Vršiti se očitavanje vatmetra na zadatim frekvencijama i nalazi se odnos:

$$P_1 = \frac{P_{\text{pom}}}{P_{\text{std}}} \quad (44)$$

Navedeno merenje se obavlja 10 puta i uzima se aritmetička sredina da bi se smanjio uticaj slučajne greške.

— Standardna glava zamenjuje se testirajućom i opet se obavljaju ista merenja, a registruje se odnos:

$$P_2 = \frac{P_{\text{pom}}}{P_{\text{test}}} \quad (45)$$

- 1 - Razdelnik snage
- 2 - Oslabljiivač 30dB
- 3 - Oslabljiivač

Sl. 5 — Šema povezivanja mernih instrumenata za automatsko prenošenje faktora baždarenja

Tabela 2

Faktor baždarenja glave Model HP 8484H
 Serijski broj: 2645A7773 Datum: 27. 12. 93
 Kao etalon korištena glava: HP 8484A
 Serijski broj: 2046A06332
 Atest standardne glave: 259 od: 10. 1993.
 izdat od ML-02

F (GHz)	Fak. B. STD.	Fak. B. Test	Nes. F. B. (%)
0,05	1,0000	1,0000	0,00
0,10	0,9876	0,9859	5,99
0,50	0,9534	0,9532	5,69
1,00	0,9481	0,9362	5,19
2,00	0,9347	0,9324	5,14
3,00	0,9279	0,9217	4,81
4,00	0,9285	0,9198	5,00
5,00	0,9361	0,9288	5,20
6,00	0,9453	0,9325	5,42
7,00	0,9507	0,9304	5,06
8,00	0,9538	0,9225	5,34
9,00	0,9555	0,9116	5,20
10,00	0,9603	0,9361	5,61
11,00	0,9615	0,9243	5,57
12,00	0,9707	0,9463	5,60
13,00	0,9348	0,9083	6,17
14,00	0,9592	0,9285	6,95
15,00	0,9641	0,9217	6,99
16,00	0,9547	0,9100	6,94
17,00	0,9234	0,8597	7,29
18,00	0,8437	0,7942	7,24

NAPOMENE

Fak. B. STD — Faktor bažd. standardne glave

Fak. B. Test — Faktor bažd. testirajuće glave

Nes. F. B. — Nesigurnost faktora baždarenja u (%)

Da bi se smanjile greške prenosa faktora baždarenja, nađen je kompromis između potrebne snage izvora i smanjenja KST izvora umetanjem oslabljivača između izvora i glava. U toku merenja standardnom i testirajućom glavom pet puta se postavlja nula na vatmetrima (na 50 MHz, 1, 6, 9, 14 GHz). Kalibrisanje glava na istom referentnom oscilatoru smanjuje ukupne greške merenja.

Rezultati merenja štampaju se u četiri kolone: frekvencija »F(GHz)«, faktor baždarenja etalonske glave — »Fak. B.STD.«, faktor baždarenja testirajuće glave — »Fak.B.test« i nesigurnost faktora baždarenja »Nes.F.B.[%]« (tabela 2). Za korisnika se, po potrebi, može štampati i još jedna kopija rezultata.

Najgori slučaj nesigurnosti faktora baždarenja, izražen u procentima, računa se kao:

$$M'_{ukb} = \frac{K_{bmax} - K_b}{K_b} \cdot 100 = \left(\frac{K_{bmax}}{K_b} - 1 \right) \cdot 100\% \quad (47)$$

K_{bmax} je najveća moguća vrednost za K_b i računa se kao:

$$K_{bmax} = K_{bemax} \cdot M_u \cdot W \quad (48)$$

gde je:

K_{bemax} — najveća moguća vrednost koeficijenta baždarenja etalonske glave,

M_u — nesigurnost zbog neprilagođenja,

W — maksimalna moguća greška vatmetra.

Iz (47) i (48) dobijamo:

$$M'_{ukb} = \left[\left(\frac{M_{ue}}{100} + 1 \right) M_u \cdot W - 1 \right] \cdot 100\% \quad (49)$$

gde je:

M_{ue} — nesigurnost određenja faktora baždarenja etalonske glave.

Ovo merenje se, zbog već navedenih razloga, ponavlja 10 puta i nalazi se srednja vrednost P_2 .

— Prenos faktora baždarenja vrši se po formuli:

$$K_b = K_{bo} \cdot \frac{P_2}{P_1} \quad (46)$$

Nesigurnost zbog neprilagođenosti se računa kao:

$$M_u = (1 + |\Gamma_g| \cdot |\Gamma_e|)(1 + |\Gamma_t| \cdot |\Gamma_e|) \quad (50)$$

gde je:

Γ_g — ekvivalentni koeficijent refleksije generatora;

Γ_e — koeficijent refleksije etalonske glave;

Γ_t — koeficijent refleksije testirajuće glave, ali kada se na njega doda i nesigurnost određivanja koeficijenta refleksije.

U izrazu (49) figuriše nesigurnost određivanja faktora baždarenja kao funkcija svih sistematskih grešaka koje se javljaju tokom merenja. U ovaj izraz nisu uvrštene slučajne greške merenja.

Da bi se uticaj slučajnih grešaka merenja sveo na što manje vrednosti, merenja standardnom i testirajućom glavom izvode se po 10 puta uzastopno, a aritmetička sredina se uzima kao rezultat merenja. Ocenu navedenih rezultata merenja vršimo preko standardne devijacije, i to kao:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \pm \sqrt{\frac{\sum_j (P_{1j} - \bar{P}_1)^2}{n-1}} = \\ &= \pm 1/3 \sqrt{\sum_j (P_{1j} - \bar{P}_1)^2} \end{aligned} \quad (51)$$

gde je:

$$\bar{P}_1 = \frac{1}{10} \sum_j P_{1j}$$

odnosno:

$$\begin{aligned} \sigma_2 &= \pm \sqrt{\frac{\sum_j (P_{2j} - \bar{P}_2)^2}{n-1}} = \\ &= \pm 1/3 \sqrt{\sum_j (P_{2j} - \bar{P}_2)^2} \end{aligned} \quad (52)$$

gde je:

$$\bar{P}_2 = \frac{1}{10} \sum_j P_{2j}$$

Ukupna standardna devijacija je:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (53)$$

Uzimajući u obzir relacije (49) i (53) imamo ukupnu nesigurnost merenja:

$$M_{ukb} = M'_{ukb} + n\sigma \quad (54)$$

gde je $n=2$ za verovatnoću 95% (što se i koristi u programu), a $n=3$ za verovatnoću 99%.

Ukoliko se u izrazu (47), javi neka vrednost $K_b > 1$ (ili $> 100\%$), vrši se normalizacija, što je u programu predviđeno i izvedeno.

Program za prenos faktora baždarenja glava 8478B

S obzirom na to da vatmetar HP 432A uz koji se koriste termistorske glave HP 8478B i HP 478A ne poseduje HP-IB interfejs, to se povezivanje instrumenata za prenos faktora baždarenja navedenih glava nešto razlikuje od konfiguracije date na sl. 5. Naime, izlaz RECORD (na zadnjoj ploči instrumenta) vatmetra HP 432A povezan je na A/D pretvarač HP 59313. Na vatmetar HP 432A povezuje se prvo etalonska (standardna), a zatim glava koja se testira. Kanal A/D pretvarača na koji se dovodi signal RECORD podešen je na maksimalni ulaz 5V, što odgovara maksimalnom digitalnom izlazu 1023.

Zaključak

Da bi se nesigurnost merenja mikrotalasne snage svela na najmanju meru, potrebno je vršiti baždarenje glava za mikrotalasne vatmetre. KST glava mora biti u propisanim granicama, a faktor baždarenja mora se što tačnije odrediti. Uobičajeno je da se glave baždare jednom godišnje.

Automatsko baždarenje glava, kako je to pokazano u ovom radu, znatno

ubrzava proces merenja KST i prenos faktora baždarenja. Osim toga, nesigurnost ručnog (korak po korak) određivanja faktora baždarenja iznosi oko

$\pm 10\%$, dok se iz priloženih tabela vidi da je ta nesigurnost kod opisane metode automatskog prenošenja faktora baždarenja ispod 7% .

Literatura:

- [1] JUS L.G7.101: Mikrotalasni instrumenti — Termini i definicije, Savezni zavod za standardizaciju, BEOGRAD, 1980.
- [2] HP Application Note 64-1: Fundamentals of RF and Microwave Power Measurement, 1978.
- [3] HP Application Note 64-2: Extended Application of Automatic Power Meters, 1978.
- [4] HP Application Note 183: High Frequency Swept Measurement, 1978.
- [5] Ely C. P.: Swept — Frequency Techniques, Proceedings of the IEEE, Vol 55, No 6, 1967, str. 991—1001.
- [6] M. Unković: Greške merenja mikrotalasne snage i programi za merenje KST-a i prenos faktora baždarenja glava za mikrotalasne vatmetre HP8481A/H, HP8484A, HP8478B, HP478A; Interno uputstvo, ML36, Tivat, 1994.