

Postupak merenja sastoji se iz sledećih koraka:

- Vezati uređaje kao na slici 1.
- Definirati nivo signala i frekvencijski opseg na signalgeneratoru.
- Izvršiti kalibraciju sistema *short/open*
- Na test port direkcionog mosta priključiti komponentu čiji se koeficijent refleksije meri.

$$S_{11A} = \frac{\left(\frac{S_{11m} - E_D}{E_{RT}}\right) \left(1 + \frac{S_{22m} - E'_D E'_S}{E_{RT}}\right) - E_L \left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right) \left(\frac{S_{12m} - E'_X}{E_{TT}}\right)}{\left(1 + \frac{S_{11m} - E_D}{E_{RT}} E_S\right) \left(1 + \frac{S_{22m} - E'_D E'_S}{E_{RT}}\right) - E_L E'_L \left(\frac{S_{21m} - E_X}{E_{TT}}\right) \left(\frac{S_{12m} - E'_X}{E_{TT}}\right)} \quad (5)$$

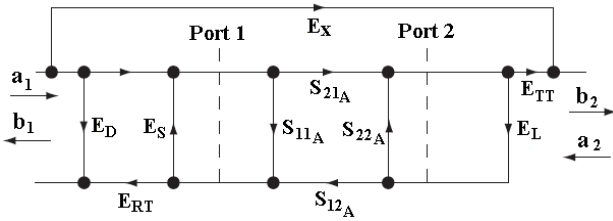
Ukoliko se refleksija meri na uređaju koji ima više od jednog porta, neophodno je preostale portove zatvoriti odgovarajućim završecima, sa što manjim koeficijentom refleksije (HP 909A, Agilent 909D ili sl.). Na ovaj način eliminišemo uticaj refleksije od ovih portova na rezultat merenja.

III. MERNA NESIGURNOST

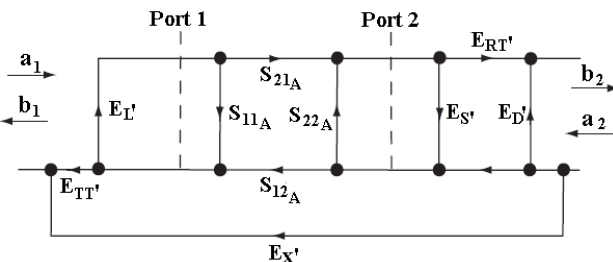
Matematički model proračuna merne nesigurnosti dat je sledećim izrazom:

$$U = U_{sys} + U_{rnd} \quad (4)$$

Sa U_{sys} opisani su sistematski parametri a sa U_{rnd} slučajne veličine koje daju doprinos mernoj nesigurnosti. Prilikom analize merne nesigurnosti merenja usled sistematskih parametara, iskoristili smo model mreže sa dva porta predstavljene svojim S parametrima. Ovakvom mrežom modelujemo sve greške koje se mogu javiti prilikom merenja refleksije. Analizator mreže mora da prebriše (*sweep*) frekvencijski opseg u oba smera (*forward* i *reverse*) kako bi odredio S parametre, shodno tome ćemo mrežu predstaviti u dva modela, direktnom (*forward*) i suprotnom (*reverse*), prikazanim na slikama 2 i 3 respektivno [2].



Sl. 2. Forward model mreže sa četiri porta



Sl. 3. Reverse model mreže sa četiri porta

Rešavanjem ove dve mreže dobijamo odgovarajuće izraze za S parametre. Od interesa za ovaj rad je isključivo vrednost parametra S_{11A} koji opisuje refleksiju (izraz 5). S parametri koji karakterišu prostiranje signala od porta 1 ka portu 2 (transmisija) nisu predmet ovog rada.

Sa S_{11A} , S_{12A} , S_{21A} , S_{22A} označeni su stvarni parametri S mreže, dok su S_{11m} , S_{21m} , S_{12m} , i S_{22m} izmerene vrednosti S parametara posmatrane mreže. Preostale veličine su:

- E_D i E'_D - direktivnost u direktnom i suprotnom smeru
- E_{RT} i E'_{RT} - simetrija kanala prilikom merenja refleksije u direktnom i suprotnom smeru
- E_S i E'_S - prilagođenje izvora u direktnom i suprotnom smeru
- E_L i E'_L - prilagođenje opterećenja u direktnom i suprotnom smeru
- E_{TT} i E'_{TT} - simetrija kanala prilikom merenja transmisije u direktnom i suprotnom smeru
- E_X i E'_X - izolacija u direktnom i suprotnom smeru

Radi pojednostavljenja ovog izraza pretpostavljamo da su vrednosti direktivnosti, prilagođenja izvora i opterećenja približno jednaki nuli, dok su simetrije kanala pri merenju refleksije i transmisije bliske jedinici [3]:

$$\begin{aligned} E_D \approx 0; E'_D \approx 0; E_L \approx 0; E'_L \approx 0; \\ E_S \approx 0; E'_S \approx 0; E_{RT} \approx 1; E'_{RT} \approx 1; \\ E_{TT} \approx 1; E'_{TT} \approx 1; \end{aligned} \quad (6)$$

Mernu nesigurnost usled sistematskih parametara možemo pretpostaviti kao funkciju parametara E_D i E'_D , E_{RT} i E'_{RT} , E_S i E'_S , E_L i E'_L , E_{TT} i E'_{TT} , E_X i E'_X . Koeficijenti osetljivosti dobijaju se preko parcijalnih izvoda:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{11}}{\partial E_D} \approx -1 \quad \frac{\partial S_{11}}{\partial E_S} \approx -S_{11m}^2 \\ \frac{\partial S_{11}}{\partial E_{RT}} \approx -S_{11m} \quad \frac{\partial S_{11}}{\partial E_L} \approx -S_{21m} S_{12m} \end{aligned} \quad (7)$$

dok su preostali koeficijenti osetljivosti približno jednaki nuli [3]. Imajući ovo u vidu, izraz za mernu nesigurnost (4) dobija sledeći oblik:

$$U = u(E_D) + |S_{11m}| u(E_{RT}) + |S_{11m}|^2 u(E_S) + \dots + |S_{11m}| u(E_{RT}) + |S_{21m} S_{12m}| u(E_L) + U_{rnd} \quad (8)$$

Uz pretpostavku da je $S_{21m} = S_{12m}$, i uz prihvatanje drugačijeg načina obeležavanja $\{S_{11m} = \rho_m, u(E_D) = U_D,$

$u(E_S)=U_T$, $u(E_L)=U_L$ i $u(E_{RT})=U_{RT}$, } izraz (8) postaje:

$$U = U_D + U_{RT}\rho_m + U_T\rho_m^2 + S_{21m}^2 U_L + U_{rnd} \quad (9)$$

gde je ρ_m izmereni koeficijent refleksije, dok S_{21m} predstavlja slabljenje koje unosi uređaj čiji se koeficijent refleksije meri (*insertion loss*).

U izrazu (9) možemo prepoznati sledeće uticajne veličine:

U_D – direktivnost. Za vrednost ovog parametra uzimamo direktivnost direkcionog mosta HP 85027B. Proizvođač u svojoj dokumentaciji definiše da u frekventijskom opsegu 10 MHz do 20 GHz ona iznosi 40 dB, dok u opsegu 20 GHz do 26,5 GHz iznosi 36 dB [4]. Ovom parametru je pridružena U raspodela.

U_{RT} – simetrija kanala A i R (*reflection tracking*) i linearnost skalarnog mrežnog analizatora (*linearity*) prilikom merenja refleksije. *Reflection tracking* predstavlja razliku u frekventijskim odzivima ova dva kanala i iznosi 0,4 dB (0,25 dB je maksimalna razlika između dva izlaza razdelnika snage plus 0,15 dB razlike u odzivima kanala A i R skalarnog analizatora mreže) [5]. U ovom proračunu iskorišćena je preporuka EURAMET-a cg-12, u kojoj se navodi da je tipična vrednost linearnosti 0,002 dB/dB [6]. Obe veličine imaju Pravougaonu raspodelu.

U_T – prilagođenje test porta direkcionog mosta HP 85027B. U specifikaciji proizvođača navode se sledeći podaci:

| | |
|-------------------------|-------|
| opseg 10 MHz – 8,4 GHz | 23 dB |
| opseg 8,4 GHz – 20 GHz | 15 dB |
| opseg 20 MHz – 26,5 GHz | 11 dB |

Ovom parametru pridružena je U raspodela.

U_L – prilagođenje mikrotalasnog završetka kojim se zatvara drugi port uređaja čiji se koeficijent refleksije meri. U slučaju završetka HP 909A u specifikaciji proizvođača navode se sledeći podaci:

| | |
|-------------------------|-------|
| opseg 0 GHz – 4 GHz | 0,024 |
| opseg 4 GHz – 12,4 GHz | 0,048 |
| opseg 12,4 GHz – 18 GHz | 0,111 |

Veličine U_D i U_T mogu biti međusobno korelisane. Međutim, radi pojednostavljenja matematičkog modela merenja, EURAMET, u svojoj publikaciji cg-12, preporučuje da se za koeficijent korelacije uzima vrednost 1. To znači da se merne nesigurnosti usled ove dve veličine posmatraju kao jedinstven uticaj na ukupnu mernu nesigurnost (član $U_D + U_T$) [6].

Merna nesigurnost usled slučajnih procesa, U_{rnd} , obuhvata sledeće uticaje:

U_{sr} – ponovljivost sistema. Određuje se eksperimentalno, merenjem standardne devijacije nekoliko uzastopnih merenja, bez raspajanja uređaja koji se etalonira koristeći iste kalibracione podatke. Postupak se sprovodi za nekoliko vrednosti koeficijenata refleksije, na različitim frekvencijama. Istu proceduru treba sprovesti i u slučaju ponavljanja kalibracije. Tipične vrednosti koje se očekuju su u intervalu 0,001 do 0,01. U ovom proračunu biće uzeta najkritičnija vrednost 0,01. Raspodela je Gausova.

U_{cr} – ponovljivost konektora. Jedan od načina da se izračuna ovaj parametar jeste putem serije merenja na

tipičnom uređaju, raspajanjem i ponovnim spajanjem istog, bez ponavljanja kalibracije ali sa rotacijom u koracima od 120° [6]. Za kvalitetne konektore koji se koriste u metrološkoj laboratoriji Tehničkog opitnog centra, ova vrednost ne prevazilazi 0,01 dB. Raspodela je Gausova.

U_{cf} – fleksibilnost kablova. Posledica je promene položaja kablova nakon izvršene kalibracije. Određuje se eksperimentalno, uzastopnim merenjima sa promenom položaja kabla za definisani ugao (npr. savijanjem kabla za ugao od 90° ali isključivo za fleksibilne tipove kablova). Tipična vrednost je 0,004, raspodela je Gausova [6].

U_t – ambijentalni uslovi. Iako se merenja izvode u kontrolisanim ambijentalnim uslovima, ovaj parametar može imati određeni uticaj usled razlika u temperaturama prilikom kalibracije i prilikom samog merenja. U proračunu biće upotrebljena vrednost 0,002, iz preporuke EURAMET cg-12 [6]. U pitanju je Pravougaona raspodela.

A. Merna nesigurnost merenja refleksije na oslabljivaču

U ovom primeru proračunata je merna nesigurnost prilikom merenja refleksije na promenljivom oslabljivaču HP 355B. Koeficijent stojećeg talasa izmeren na frekvenciji 500 MHz iznosi 1,12 što prema izrazu (2) odgovara koeficijentu refleksije od 0,06. Uneto slabljenje na posmatranoj frekvenciji iznosi 1,29 dB. Proširena merna nesigurnost predstavljena je tabelom 1. Na osnovu analize merne nesigurnosti, možemo zaključiti da ona u velikoj meri zavisi od prilagođenja mikrotalasnog završetka kojim se zatvara oslabljivač prilikom merenja.

B. Merna nesigurnost merenja refleksije na mikrotalasnom završetku

U ovom primeru proračunata je merna nesigurnost merenja refleksije na mikrotalasnom završetku HP 909A, na frekvenciji 18 GHz. U tom slučaju, izraz za mernu nesigurnost (9) se pojednostavljuje:

$$U = U_D + U_{RT}\rho_m + U_T\rho_m^2 + U_{rnd} \quad (10)$$

Budući da završetak predstavlja mrežu sa jednim portom, izraz $S_{21m}^2 U_L$ jednak je nuli i može se izostaviti iz relacije (8). Koeficijent stojećeg talasa izmeren na frekvenciji 18 GHz iznosi 1,15 što odgovara koeficijentu refleksije od 0,07. Budžet merne nesigurnosti dat je tabelom 2. Na osnovu ove tabele zaključujemo da dominantan uticaj na mernu nesigurnost imaju direktivnost mosta i ponovljivost konektora.

IV. ZAKLJUČAK

Merna nesigurnost dobijena opisanom metodom, omogućava etaloniranje etalona i merila visokih zahteva u pogledu koeficijenta refleksije odnosno koeficijenta stojećeg talasa. Provere ovih parametara su neizostavne prilikom etaloniranja velikog broja merne opreme, bilo da se radi o pasivnim komponentama (oslabljivači, završeci...) ili su u pitanju aktivni merni uređaji. U Tehničkom opitnom centru moguće je meriti koeficijent stojećeg talasa u frekventijskom opsegu 10 MHz

TABELA I
TABELA BUDŽETA MERNE NESIGURNOSTI U SLUČAJU MERENJA REFLEKSIJE NA OSLABLJIVAČU

| Uticajna ulazna veličina X_i | Procena x_i | Standardna nesigurnost $u(x_i)$ | Funkcija raspodele verovatnoće | Koeficijent osetljivosti c_i | Doprinos standardnoj nesigurnosti $U_i(y)= c_i u(x_i)$ |
|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|
| U_D | 40 dB | 0,0071 | U | 1 | 0,0071 |
| U_T | 23 dB | 0,05 | U | 0,0032 | 0,0002 |
| $U_D + U_T$ | - | - | - | - | 0,0073 |
| U_{RT} | 0,4 dB | 0,0064 | Pravougaona | 0,0566 | 0,0015 |
| U_{LIN} | 0,002 dB/dB | 0,0033 | Pravougaona | 0,0566 | 0,0002 |
| U_L | 0,024 | 0,017 | U | 0,743 | 0,0127 |
| U_{sr} | 0,01 | 0,005 | Gausova | 0,0032 | 0,00002 |
| U_{cf} | 0,04 | 0,002 | Gausova | 0,0032 | 0,00001 |
| U_{cr} | 0,01 | 0,005 | Gausova | 1 | 0,005 |
| U_t | 0,002 | 0,0012 | Pravougaona | 0,0032 | 0,000004 |
| U_c | Kombinovana standardna nesigurnost | | | | 0,014 |
| U_{uk} | Proširena merna nesigurnost (k = 2) | | | | 0,03 |
| Rezultat | 0,06 ± 0,03 | | | | |

TABELA II
TABELA BUDŽETA MERNE NESIGURNOSTI U SLUČAJU MERENJA REFLEKSIJE NA MIKROTALASNOM ZAVRŠETKU

| Uticajna ulazna veličina X_i | Procena x_i | Standardna nesigurnost $u(x_i)$ | Funkcija raspodele verovatnoće | Koeficijent osetljivosti c_i | Doprinos standardnoj nesigurnosti $U_i(y)= c_i u(x_i)$ |
|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|
| U_D | 40 dB | 0,0071 | U | 1 | 0,0071 |
| U_T | 15 dB | 0,1261 | U | 0,0049 | 0,0006 |
| $U_D + U_T$ | - | - | - | - | 0,0077 |
| U_{RT} | 0,4 dB | 0,0064 | Pravougaona | 0,0698 | 0,0018 |
| U_{LIN} | 0,002 dB/dB | 0,0031 | Pravougaona | 0,0698 | 0,0002 |
| U_{sr} | 0,01 | 0,005 | Gausova | 0,0698 | 0,0004 |
| U_{cf} | 0,04 | 0,002 | Gausova | 0,0698 | 0,0001 |
| U_{cr} | 0,01 | 0,005 | Gausova | 1 | 0,005 |
| U_t | 0,002 | 0,0012 | Pravougaona | 0,0698 | 0,00008 |
| U_c | Kombinovana standardna nesigurnost | | | | 0,009 |
| U_{uk} | Proširena merna nesigurnost (k = 2) | | | | 0,02 |
| Rezultat | 0,07 ± 0,02 | | | | |

do 26,5 GHz što je više nego dovoljno u pogledu potreba koje imaju ustanove Ministarstva odbrane i jedinice Vojske Srbije ali i preduzeća iz privrede.

Skalarni i vektorski mrežni analizatori postali su, zahvaljujući svojoj praktičnosti i jednostavnosti upotrebe, nezaobilazni deo merne opreme u svim metrološkim laboratorijama. Pored merenja refleksije, skalarni analizatori mreže mogu se koristiti i za merenje drugih S parametara, a od velike koristi je njihova primena prilikom merenja koeficijenta transmisije i slabljenja.

LITERATURA

- [1] "Agilent technologies 8757D Scalar Network Analyzer", User's manual, november 2000.
- [2] "Applying error correction to network analyzer measurements", Application note, Keysight technologies, july 2014.
- [3] "VNA error models:Comments on Euramet cg-12/v.01", B.D.Hall, Measurement standard laboratory of New Zeland, 16 june 2010.

- [4] "Agilent 85027A/B/C Directional bridge Operating and Service manual", Agilent technologies, july 1985.
- [5] "Agilent 85037A/B precision detectors Operating and Service manual", Agilent technologies, october 2002.
- [6] "Guidelines on the evaluation of vector network analyzers Euramet cg-12", Volume 30, version 2.0, 03/2011.

ABSTRACT

This paper describes reflection measurement with scalar network analyzer and gives detailed calculation of measurement uncertainty. This measurement method is regularly used at Technical test center's laboratory as a part of calibration procedure of different types of measuring equipment.

Scalar Network analyzer reflection measurement uncertainty

Miša Markuš, Ivica Milanović, Neda Spasojević