

ETALONIRANJE OSLABLJIVAČA METODOM SUPSTITUCIJE

Miša Markuš, Neda Spasojević, Aleksandar Atanacković

Ključne reči: etaloniranje, merna nesigurnost, slabljenje, supstitucija

KRATAK SADRŽAJ

Etaloniranje mikrotalasnih oslabljivača, zbog njihove raspostranjene primene, je od izuzetnog značaja. U metrološkoj laboratoriji Tehničkog opitnog centra primenjuje se nekoliko različitih metoda etaloniranja oslabljivača. U radu je predstavljen postupak etaloniranja zasnovan na zameni (supstituciji) oslabljivača koji je predmet etaloniranja, etalonskim oslabljivačem proizvođača Weinschel, tip PA-2. Dat je proračun merne nesigurnosti etaloniranja sa prikazom uticajnih veličina.

CALIBRATION OF ATTENUATORS USING THE SUBSTITUTION METHOD

Keywords: attenuation, calibration, measurement uncertainty, supstitution

ABSTRACT

Microwave attenuators are very common in RF and microwave metrology and their accurate calibration is very important. There are several methods of calibration of attenuators that are used in the calibration laboratory of the Technical test center. This paper describes a calibration method based on substitution that utilizes precision attenuator type PA-2, manufactured by Weinschel. A special section is dedicated to the measurement uncertainty estimation.

UVOD

Termin slabljenja ili atenuacije može se posmatrati kroz gubitak energije, odnosno smanjenje snage signala koji se prostire duž linije za prenos. Budući da su gubici eksponencijalna funkcija rastojanja duž linije za prenos, usvojena je logaritamska jedinica decibel (dB), kao mera slabljenja [1]. Oslabljivači



Slika 1. Fiksni oslabljivač



Slika 2. Promenljivi oslabljivač

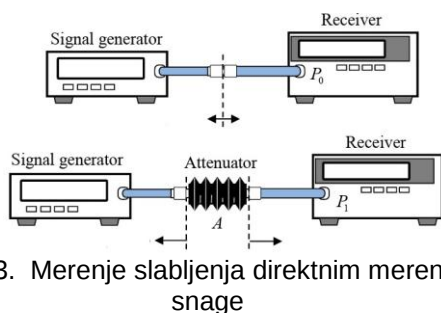
(atenuatori) su komponente koje smanjuju (slabe) snagu signala, a da pri tom ne dovode do značajnijeg izobličenja talasnog oblika signala. RF (*radio frequency*) oslabljivači slabe radio talase koji prolaze kroz njih za željenu vrednost. Koriste se za redukciju amplitude signala, kako bi se omogućilo njegovo jednostavnije merenje, ili kao zaštita za druga merila od prevelikih nivoa signala koji ih mogu oštetiti. Jedna od primena oslabljivača je i za postizanje što boljeg prilagođenja impedanse, kroz smanjivanje resultantnog koeficijenta stojećeg talasa. Izuzetno je značajna njihova upotreba prilikom etaloniranja analizatora spektra, mernih prijemnika, gde se koriste za određivanje linearnosti. Oslabljivači mogu biti fiksni (sa nominalnim vrednostima slabljenja koje su najčešće 3 dB, 6 dB, 10 dB, 20 dB, 30 dB i 40 dB) (slika 1) ili promenljivi, odnosno step attenuatori (slika 2), čije se slabljenje može menjati u određenim koracima (najčešće su to oslabljivači sa korakom 1 dB i 10 dB). Promenljivi oslabljivači, zbog lakše primene u automatizovanim mernim sistemima, mogu biti i programabilni. Takvi oslabljivači dolaze u kombinaciji sa prekidačkom jedinicom, koja je adresabilna i

programabilna i može se podesiti da u različitim segmentima programa izabere odgovarajuće slabljenje oslabljivača. Osim nominalnog slabljenja, bitna karakteristika oslabljivača je i koeficijent stojećeg talasa (odnosno koeficijent refleksije) njegovih portova. Merenje koeficijenta stojećeg talasa nije predmet ovog rada.

METODE ETALONIRANJA OSLABLJIVAČA

U metrološkoj laboratoriji Tehničkog opitnog centra primenjuje se nekoliko različitih metoda etaloniranja oslabljivača: metoda zasnovana na direktnom merenju snage (merenje odnosa dve snage), metoda koja podrazumeva upotrebu analizatora mreže i metoda zamene (supstitucije).

Metoda 1 - Metoda zasnovana na direktnom merenju snage



Slika 3. Merenje slabljenja direktnim merenjem snage

Ovo je osnovna metoda etaloniranja slabljenja i podrazumeva merenje snage kada je generator signala direktno povezan na merilo snage ili merni prijemnik (P_0), i snage, kada je između njih umetnut predmetni oslabljivač (P_1). Dakle, kod ove metode razlikuju se dve situacije:

1. Oslabljivač je povezan u mernom lancu i meri se nivo signala na njegovom izlazu.

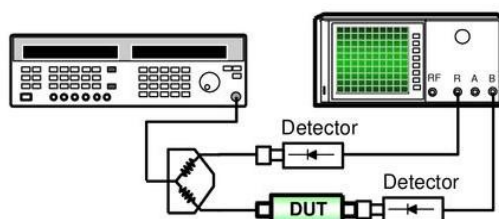
2. Oslabljivač je izuzet iz mernog lanca, i meri se direktno nivo sa generatora signala (slika 3). Vrednost

slabljenja (A) određuje se na osnovu jednačine [2]:

$$A = 20 \cdot \log \left(\frac{P_0}{P_1} \right) \quad (1)$$

Metoda 2 - Metoda zasnovana na primeni analizatora mreže

Upotreba analizatora mreže u postupku etaloniranja oslabljivača, u poslednje vreme postaje sve rasprostranjenija. Analizatori mreže su merila koja mere mrežne parametre električnih mreža. Danas je uobičajeno da oni mere S parametre, a transmisija (parametri S_{21} i S_{12}) i refleksija (S_{11} i S_{22}) su osnovni parametri koji se koriste za opisivanje oslabljivača. Noviji analizatori mreže su vektorskog tipa, i ne zahtevaju, izuzev kablova, nikakvu dodatnu opremu prilikom izvođenja merenja. Njihova prednost ogleda se u tome što se upotrebom vektorskih analizatora mreže može se izvršiti potpuna karakterizacija oslabljivača odnosno, može se odrediti i slabljenje (parametri S_{12} i S_{21}) i koeficijent refleksije (parametri S_{11} i S_{22}), što nije slučaj sa metodom zasnovanom na direktnom merenju snage i metodom supstitucije. Metrološka laboratorija Tehničkog opitnog centra raspolaže skalarnim analizatorom mreže, kojim se mogu meriti amplitudske karakteristike (uneto slabljenje, povratni gubici, koeficijent stojećeg talasa), ali ne i faza. Za realizaciju ove metode, osim skalarnog analizatora mreže, neophodni su i razdelnik snage, eksterni detektori (dva komada) i signal generator (slika 4). Pre samog merenja, neophodno je izvršiti kalibraciju sistema (određivanje unetog slabljenja), izuzimanjem oslabljivača koji je predmet etaloniranja (DUT) iz mernog lanca. Još jedna prednost ovakvog načina određivanja slabljenja jeste mogućnost da se na analizatoru mreže prikaže kriva slabljenja u čitavom frekvencijskom opsegu od interesa.



Slika 4. Merenje slabljenja skalarnim analizatorom mreže

METODA SUPSTITUCIJE (ZAMENE)

Ova metoda podrazumeva primenu preciznog etalonskog oslabljivača, čija se vrednost slabljenja može podešavati. Primer ovakvog etalona je oslabljivač proizvođača Weinschel, model PA-2, koji predstavlja referentni etalon za mikrotalasno slabljenje u metrološkoj laboratoriji Tehničkog opitnog centra (slika 5). Ovaj oslabljivač pripada kategoriji talasovodnih oslabljivača ispod granične frekvencije (*waveguide below-cutoff attenuator*). Često se naziva i piston atenuatorom i zapravo predstavlja sekciju talasovoda koja radi znatno ispod njegove granične frekvencije [3]. Oslabljiivač PA-2 pokriva opseg od 140 dB, i



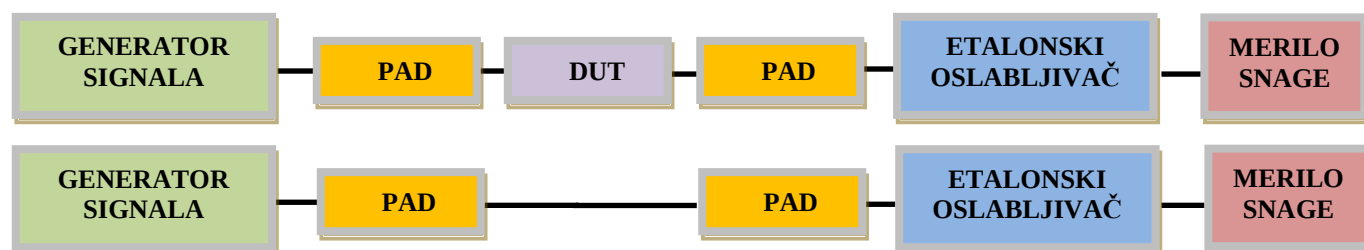
Slika 5. Etalonski oslabljivač PA-2

sastoji se od precizno izbrušene cevi od nerđajućeg čelika, sa stacionarnim prijemnim kalemom, pokretnim predajnim kalemom (sa kojeg se emituje elektromagnetni talas) i potiskivačima neželjenih talasovodnih modova. Cev podržava mod TE_{11} , ispod granične frekvencije. Elektromagnetni talas eksponencijalno slabi duž linije između pokretnog predajnog i stacionarnog prijemnog kalema na suprotnoj strani. Kada talasovod radi na frekvencijama ispod granične frekvencije, svako postavljeno elektromagnetno polje opada (odnosno slabi) konstantnom brzinom. Na fiksnoj frekvenciji ovo slabljenje (u decibelima) je konstantno, određeno prečnikom

talasovoda, i može se izuzetno tačno izračunati. Oba kalema su podešena na rezonantnu frekvenciju 30 MHz, a prečnik cevi odabran je tako da na toj frekvenciji daje slabljenje od tačno 40 dB po inču [4]. Prilikom izvođenja merenja, stvarno slabljenje određeno je veoma tačnim merenjem rastojanja između dva položaja pokretnog kalema. Ovo merenje se izvodi pomoću optičkog mikrometra (koji je kalibrisan u decibelima). Rastojanje između kalemova (a samim tim i slabljenje oslabljivača), podešava se pomoću potencijometara *Coarse* (grubo podešavanje) i *Fine* (fino podešavanje). Optički uređaj očitava kretanje kalema sa tačnošću od 0,0001 inč.

Zbog svoje jednostavnosti, i činjenice da se promena slabljenja može direktno dovesti u vezu sa merenjem fizičkog rastojanja, ovakav oslabljivač predstavlja izuzetno koristan i tačan etalon. Etaloniranje ovog etalona slabljenja izvedeno je u nacionalnom metrološkom institutu Francuske – LNE.

Na slici 6. prikazana je blok šema prema kojoj se izvodi etaloniranje oslabljivača metodom zamene.



Slika 6. Merenje slabljenja metodom supstitucije

Merenje se izvodi u dva koraka. U prvom, oslabljivač koji je predmet etaloniranja (DUT) povezan je u merni lanac. Kako bi se smanjio uticaj neprilagođenja, predmetni oslabljivač vezuje se između dva oslabljivača identičnih karakteristika, slabljenja 6 dB (PAD). Na generatoru signala postavlja se frekvencija 30 MHz i nivo signala, koji se kreće između 0 dBm i 10 dBm, u zavisnosti od slabljenja test oslabljivača (DUT). Veći nivo zadaje se u slučaju velikog ukupnog slabljenja, kako bi se obezbedio dovoljan nivo signala za stabilno merenje merilom snage. Treba imati u vidu da pored test oslabljivača, dodatno slabljenje unosi i sam etalon Weinschel PA-2 (približno 12 dB, pri postavljenom slabljenju 0 dB), kao i dva oslabljivača od 6 dB (PAD). Etalonski oslabljivač podešen je na vrednost 0 dB. Merilo snage se podešava da meri relativnu vrednost, pri čemu se kao referenca uzima trenutno mereni nivo signala (na ekranu merila snage treba da stoji trenutna merena relativna vrednost 0 dB). U narednom

koraku, oslabljivač koji se etalonira se izuzima iz mernog lanca. To za posledicu ima promenu vrednosti na merilu snage, koja više nije jednaka 0 dB. Podešavanjem etalonskog oslabljivača, najpre potencijometrom *Coarse* za grubo, a zatim i potencijometrom *Fine* za fino podešavanje, treba postići da ekran merila snage prikaže vrednost koja je bila podešena u prvom koraku (0 dB). Nakon ovoga, očitava se vrednost etalonskog oslabljivača i vrši se njena korekcija saglasno poslednjem uverenju o etaloniranju. Očitana korigovana vrednost, predstavlja slabljenje predmetnog oslabljivača.

Da bi merenje slabljenja bilo što tačnije, potrebno je precizno određivanje pozicije, odnosno slabljenja etalonskog oslabljivača. Spoljni obruč staklenog panela



Slika 7. Ekran etalonskog oslabljivača PA-2

jedinice za očitavanje, može se rotirati za 360 stepeni. Okretanje ovog oboda, istovremeno pokreće i dvostruku liniju, Arhimedovu spiralu, na staklenom ekranu. Okretanje oboda vrši se sve dok dvostruka linija ne zagradi liniju postavljenu direktno ispod vrednosti u gornjem, desnom delu osvetljenog prozora. Ova vrednost dodaje se vrednosti sa skale u donjem prozoru. Ova suma predstavlja ukupno slabljenje u decibelima (slika 7).

MERNA NESIGURNOST

Proračun merne nesigurnosti dat je za slučaj kada je predmet etaloniranja fiksni oslabljivač 20 dB, proizvođača Rohde & Schwarz model 1169.5050.00.

Proračun i izražavanje merne nesigurnosti, u saglasnosti je sa preporukama "Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement"[5] i "Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration-EA-4/02 M:2022" [6]. Matematički model slabljenja određenog opisanom metodom supstitucije, dat je sledećim izrazom:

$$U = a_1 - a_2 + \delta U_{r1} - \delta U_{r2} - \delta U_{r_e} - \delta U_{e_e} - \delta U_{k_{d1}} - \delta U_{k_{d2}} + \delta U_{k_a} - \delta U_{m_a} + \delta U_{m_{d1}} + \delta U_{m_{d2}} + \delta U_A \quad (2)$$

Gde cy a_1 i a_2 slabljenja sa umetnutim DUT oslabljivačem i bez njega respektivno, δU_A nesigurnost tipa A usled više ponovljenih merenja, dok su ostali uticaji nesigurnost B tipa. Analizirajući mernu nesigurnost tipa B, prepoznati su sledeći uticajni faktori:

$\delta U_{r1}, \delta U_{r2}$ – korekcija usled rezolucije mernog prijemnika pri umetnutom predmetnom oslabljivaču i bez njega. U specifikaciji proizvođača se navodi da rezolucija iznosi 0,001 dB. Korekcija usled rezolucije predstavlja polovinu ove vrednosti odnosno 0,0005 dB.

δU_{r_e} – korekcija usled rezolucije etalonskog oslabljivača Weinschel PA-2. Deklarisana vrednost rezolucije je 0,002 dB te je vrednost ovog uticaja 0,001 dB.

δU_{e_e} – korekcija usled etaloniranja etalonskog oslabljivača Weinschel PA-2. Prema uverenju o etaloniranju, ustanovljeno odstupanje stvarne vrednosti slabljenja od nominalnih 20 dB iznosi -0,35 dB. Prilikom upotrebe Weinschel PA-2, ovaj podatak se koristi kako bi se korigovalo izmereno slabljenje DUT oslabljivača. Nesigurnost sa kojom je dobijena vrednost za nominalnih 20 dB, u uverenju francuskog metrološkog instituta LNE, iznosi 0,008 dB za faktor obuhvata $k=2$, te je procena ove vrednosti 0,004 dB za 1σ .

$\delta U_{k_{d1}}, \delta U_{k_{d2}}$ – korekcija usled spajanja i raspajanja konektora između dva oslabljivača na spoju DUT-a sa oba oslabljivača od 6 dB. Zbog različite sile pritezanja prilikom spajanja i raspajanja konektora, kao i usled njihove zaprljanosti, na spoju dva konektora može se pojaviti slabljenje različito od 0 dB. Procenjena vrednost ovog slabljenja iznosi 0,005 dB.

δU_{k_a} – korekcija usled spajanja i raspajanja konektora u drugom koraku, na spoju dva oslabljivača 6 dB. Procenjena vrednost ovog parametra iznosi 0,005 dB.

δU_{m_a} – korekcija usled neprilagođenja dva oslabljivača od 6 dB. Kao što je već napomenuto, ovi oslabljivači imaju ulogu da smanje uticaj neprilagođenja DUT-a sa generatorom signala i etalomom Weinchel PA-2, koja nastaje usled neuparenosti njihovih impedansi. Međutim, ne može se izbeći ni neprilagođenje na spoju ova dva oslabljivača, ali je upotrebom istovetnih oslabljivača ono svedeno na najmanju meru. Moduli koeficijenata refleksije oslabljivača (ρ), računaju se prema formuli:

$$\rho = \frac{KST-1}{KST+1} \quad (3)$$

gde je KST koeficijent stojećeg talasa oslabljivača, definisan u specifikaciji proizvođača, i u konkretnom slučaju iznosi 1,1. Uz pretpostavku da se oba koeficijenta refleksije ponašaju po Rejljevoj (*Rayleigh*) raspodeli [7], standardna nesigurnost neprilagođenja je u tom slučaju određena sledećim izrazom:

$$\delta U_{m_a} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot u(\rho_{a1}) \cdot u(\rho_{a2}) = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma_{a1} \cdot \sigma_{a1} \quad (4)$$

gde su ρ_{a1} i ρ_{a2} moduli koeficijenata refleksije jednog i drugog oslabljivača. Rejljeva raspodela se pretpostavlja kada nije poznata faza koeficijenta refleksije, a moduo se uzima iz specifikacije

proizvođača, smatrajući se maksimalnom vrednošću. proizvođač je u specifikaciji za KST deklarirao njegovu maksimalnu vrednost, što znači da stvarni KST neće premašiti datu vrednost sa verovatnoćom 99,73%. Da bismo ovu vrednost sveli na 1σ , potrebno ju je podeliti sa faktorom 3,439. Na osnovu svega navedenog, standardna nesigurnost neprilagođenja se računa prema formuli:

$$\delta U_{m_a} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{\rho_{a1}}{3,439} \cdot \frac{\rho_{a2}}{3,439} \quad (5)$$

$\delta U_{m_{d1}}$, $\delta U_{m_{d2}}$ – korekcija usled neprilagođenja oslabljivača 6 dB i oslabljivača koji je predmet etaloniranja. Vrednost ove korekcije određuje se prema (5), s tim što u njoj figurišu koeficijent refleksije oslabljivača 6 dB i DUT-a. Specificirani KST DUT-a na frekvenciji 30 MHz iznosi 1,01. Ova korekcija se primenjuje za svaki od primenjenih oslabljivača od 6 dB.

δU_A je nesigurnost tipa A i potiče od više ponovljenih merenja. Nesigurnost tipa A računa se kao standardna devijacija n ponovljenih merenja (u posmatranom slučaju n=3) i iznosi 0,0025 dB.

Budžet merne nesigurnosti prikazan je tabelom 1.

Tabela 1. Tabela budžeta merne nesigurnosti

Uticajna ulazna veličina	Procena	Standardna nesigurnost	Raspodela	Koeficijent osetljivosti	Doprinos standardnoj nesigurnosti
δU_{r1}	0 dB	0,000289 dB	pravougaona	1	0,000289 dB
δU_{r2}	0 dB	0,000289 dB	pravougaona	-1	-0,000289 dB
δU_{r_e}	0 dB	0,000577 dB	pravougaona	-1	-0,000577 dB
δU_{e_e}	-0,35 dB	0,004 dB	Gausova	-1	-0,004 dB
$\delta U_{k_{d1}}$	0 dB	0,002887 dB	pravougaona	-1	-0,002887 dB
$\delta U_{k_{d2}}$	0 dB	0,002887 dB	pravougaona	-1	-0,002887 dB
δU_{k_a}	0 dB	0,002887 dB	pravougaona	1	0,002887 dB
δU_{m_a}	0 dB	0,004709 dB	Rejljeva	-1	-0,004709 dB
$\delta U_{m_{d1}}$	0 dB	0,000492 dB	Rejljeva	1	0,000492 dB
$\delta U_{m_{d2}}$	0 dB	0,000492 dB	Rejljeva	1	0,000492 dB
δU_A	20,063 dB	0,0025	Gausova	1	0,0025
U_c	Kombinovana standardna nesigurnost				0,0084
U_{uk}	Proširena merena nesigurnost (k = 2)				0,017

ZAKLJUČAK

Veliki broj različitih metoda raspoloživ je za određivanje slabljenja u postupku etaloniranja oslabljivača. Metode koje su zasnovane na korišćenju etalonskih oslabljivača, poput metode supstitucije koja je opisana u ovom radu, izuzetno su pogodne za ovu namenu. Talasovodni oslabljivači, slični modelu PA-2, predstavljaju odličan izbor za realizaciju ovakve metode merenja slabljenja. Budući da je karakteristika slabljenja ovih oslabljivača izvedena iz osnovnih fizičkih veličina (dimenzije talasovodne cevi, odnosno njene dužine), oni se mogu smatrati primarnim etalonima mikrotalasnog slabljenja.

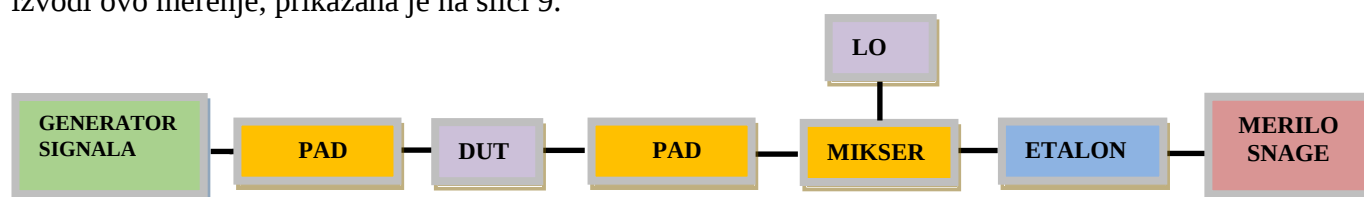
Prilikom merenja slabljenja metodom zamene, parametri merila snage i senzora (odnosno detektora) nisu od presudnog značaja, budući da se snaga na njima održava konstantnom.

Prednost metode supstitucije ogleda se i u mernoj nesigurnosti koja je značajno smanjena, u poređenju sa preostale dve metode koje su pomenute u ovom radu, što se može videti iz uporednog prikaza koji je dat u nastavku (tabela 2).

Tabela 2. Uporedni prikaz mernih nesigurnosti različitih metoda etaloniranja oslabljivača.

Metoda 1	Metoda 2	Metoda supstitucije
0,06 dB	0,18 dB	0,02 dB

Očigledni nedostatak ovakve metode ogleda se u činjenici da ona omogućava merenje slabljenja isključivo na radnoj frekvenciji etalonskog oslabljivača (30 MHz). Imajući u vidu da se u Tehničkom opitnom centru etaloniranje oslabljivača izvodi u frekvenzijskom opsegu do 26,5 GHz, ovo predstavlja veliki ograničavajući faktor. Postoje težnje da se opisana metoda proširi na frekvenzijski opseg izvan 30 MHz, korišćenjem mešača (miksera ili konvertera frekvencije) koji spušta ulaznu RF frekvenciju na međufrekvenciju koja odgovara radnoj frekvenciji etalonskog oslabljivača. Blok šema prema kojoj se izvodi ovo merenje, prikazana je na slici 9.



Slika 9. Metoda zamene – proširenje frekvenzijskog opsega

Na generatoru signala, zadaje se frekvencija na kojoj se vrši etaloniranje oslabljivača. Korišćenjem mešača i dodatnog izvora signala, koji ima funkciju lokalnog oscilatora (LO), frekvencija se konvertuje na međufrekvenciju 30 MHz, koja predstavlja radnu frekvenciju etalonskog oslabljivača. Ovakva metoda nosi naziv Metoda IF zamene, gde je IF skraćenica od *intermediate frequency* – međufrekvencija i očekuje se njeno skoro uvođenje i korišćenje prilikom etaloniranja oslabljivača u Tehničkom opitnom centru.

LITERATURA

- [1] Herbert Edward Davies, *A primary standard of attenuation for calibrating microwave components*, United States Postgraduate Naval School Annapolis Maryland, 1950.
- [2] Katsumi Fujii, Kojiro Sakai, Tsutomu Sugiyama, Kouichi Sebata, and Iwao Nishiyama–*Calibration of RF Attenuators*, Journal of the National Institute of Information and Communications Technology Vol. 63 No. 1 (2016)
- [3] Robert W. Beatty *Microwave Attenuation Measurements and Standards*, National Bureau of Standards Monograph 97, April 2 1967.
- [4] Model PA-2 30 MHz, Model PA-3 60 MHz, Precision I.F. Attenuators, Instruction manual, Weinschel Engineering, Gaithersburg, Maryland
- [5] BIPM, IEC, ISO, *Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, first edition*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, September 2008.
- [6] European co-operation for Accreditation, *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration-EA-4/02 M:2022*, 4th April 2022, rev_03.
- [7] *Revisiting mismatch uncertainty with the Rayleigh distribution*, Agilent technologies, 2011