

MEĐULABORATORIJSKO POREĐENJE MERENJA RF SNAGE

Neda Spasojević, Miša Markuš, Dragan Lazić, Slobodan Subotić

Ključne reči: međulaboratorijsko poređenje, RF snaga, merna nesigurnost

KRATAK SADRŽAJ

U radu je prikazano međulaboratorijsko poređenje u oblasti merenja RF snage organizovano od strane PT provajdera češkog nacionalnog metrološkog instituta (CMI). U poređenju je učestvovalo četrnaest laboratorija iz sedam zemalja Evrope i Azije, među kojima je i laboratorija za mikrotalasnu tehniku (ML 02) Tehničkog opitnog centra Vojske Srbije. Ovo je prvo učešće ML 02 u poređenju iz pomenute oblasti, budući da je problem dostupnosti ovakvih međulaboratorijskih poređenja u okviru zemlje prisutan dugi niz godina. Osnovni problem leži u nedostatku odgovarajućih laboratorija sa kojima bi se ML 02 mogla porediti, uzevši u obzir njenu jedinstvenu poziciju u okviru Srbije. U radu su detaljnije prikazani rezultati ML 02, koja je zadovoljila uslove poređenja u svim mernim tačkama i potvrdila svoju tehničku kompetentnost.

INTERLABORATORY COMPARISON OF RF POWER MEASUREMENT

Keywords: interlaboratory comparison, RF power, measurement uncertainty

ABSTRACT

In this paper, an interlaboratory comparison of RF power measurement organized by the PT provider of the Czech National Metrology Institute is presented. Fourteen laboratories from the seven European and Asian countries participated in the comparison, including the Laboratory for Microwave Techniques (ML 02) of the Technical Test Center of the Serbian Armed Forces. This represents the first participation of the ML 02 in the comparison in mentioned field, as the issue of availability of such interlaboratory comparison in the country has persisted for years. The primary problem lies in lack of laboratories appropriate for the comparison with ML 02, considering its unique position within Serbia. Measurement results obtained in ML 02 have met the comparison conditions at all measuring points, which are presented in the paper in more detail. Therefore, the technical competence of this laboratory has been confirmed.

UVOD

Učešće laboratorija u međulaboratorijskom poređenju (ILC, engl. InterLaboratory Comparison) ili u ispitivanju osposobljenosti (PT, engl. Proficiency Testing) predstavlja zahtev standarda ISO/IEC 17025 [1], [2]. Ono ima za cilj proveru performansi jedne laboratorije poređenjem sa rezultatima jedne ili više drugih laboratorija. Pritom se proverava merna oprema uključena u proces poređenja, kao i primenjeni metodi, kompetentnost kadra i sve ono što doprinosi formiranju rezultata merenja

Laboratorija za mikrotalasnu tehniku (ML 02) Tehničkog opitnog centra (TOC) Vojske Srbije učestvuje u ovim aktivnostima kada su one dostupne i odgovarajuće. ML 02 je prema svojim mernim mogućnostima u oblasti mikrotalasne snage, slabljenja i impedanse jedinstvena laboratorija u Srbiji, te su odgovarajuća poređenja u okviru naše zemlje nedostupna. Problem leži u odsustvu odgovarajuće laboratorije sa kojom bi se ML 02 mogla porediti. Naime, laboratorije koje se bave etaloniranjem u pomenutim oblastima su malobrojne i sledivost svojih etalona do BIPM ostvaruju preko ML 02. Takođe, merne mogućnosti (CMC, engl. Calibration and Measurement Capability) Direkcije za mere i dragocene metale ne obuhvataju pomenute veličine.

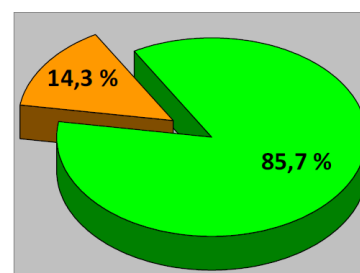
Uprkos redovnom praćenju dostupnosti PT aktivnosti u inostranstvu, do 2022. godine nije bilo raspoloživih odgovarajućih poređenja. Kao rezultat navedenog, do realizacije međulaboratorijskih poređenja, ML 02 je poverenje u kvalitet obezbeđivala uporednim T-testovima, odnosno statističkim metodama pogodnim za specifična etaloniranja.

ML 02 je svoje prvo međulaboratorijsko poređenje iz oblasti RF snage realizovala 2023. godine. Informacija o planiranom poređenju je dobijena tek nakon direktnog obraćanja PT provajderu češkog nacionalnog metrološkog instituta. Ovo je ukazalo na problem pretrage i nedovoljne informisanosti o raspoloživim PT aktivnostima u inostranstvu. Naime, pojedine PT aktivnosti nisu obuhvaćene EPTIS bazom (engl. European Proficiency Testing Information System), zbog čega mogu biti nevidljive za laboratorije.

Realizovano poređenje čiji je broj protokola ILC 1400-22, započeto je u junu 2022, a završeno u martu 2023. godine, pri čemu je laboratorija češkog metrološkog instituta bila referentna. U poređenju je učestvovalo četrnaest laboratorija iz sedam zemalja sveta (slika 1). Procenat uspešnosti poređenja prikazan je na slici 2, gde je zelenom bojom označen procenat uspešnih, a narandžastom bojom procenat neuspešnih učesnika [3].

Croatia		Czech Republic	
Greece		Italy	
Israel		Serbia	
Slovakia			

Slika 1. Zemlje laboratorija učesnica



Slika 2. Uspešnost ILC programa

USLOVI POREĐENJA

Cilj poređenja je bio da se proveri sposobnost merenja RF snage laboratorija učesnica u sredini opsega koji pokriva većina laboratorija. Predmet provere bio je vatmetar tipa Hewlett-Packard / Agilent E4419A sa senzorom snage 8481A, prikazani na slici 3. Primenjeni senzor sa konektorom N-tipa i ulaznom impedansom 50 Ω , meri snagu u frekvencijskom opsegu od 10 MHz do 18 GHz. Prilikom merenja, uslovi okoline su održavani unutar definisanih granica, za temperaturu (23 ± 2) °C, a za relativnu vlažnost (45 ± 25)%.

Protokol je podrazumevao merenje apsolutne vrednosti snage navedenim vatmetrom i senzorom na sedam frekvencija: 100 MHz, 1GHz, 2 GHz, 5 GHz, 10 GHz, 15 GHz i 18 GHz i tri nivoa snage: 10 μ W, 1 mW i 8 mW. Zavisno od svojih mernih mogućnosti, laboratorije su uzele učešće u svim ili delu definisanih mernih tačaka. ML 02 je učestvovala u poređenju u svim mernim tačkama. Pritom je vrednost



Slika 3. Predmet etaloniranja: vatmetar HP / Agilent E4419A sa senzorom 8481A

faktora etaloniranja (engl. Calibration Factor), kao i referentnog faktora etaloniranja postavljena na 100%. Merenju je prethodila kalibracija senzora na referentni izvor vatmetra 1 mW / 50 MHz.

Merenje je sprovedeno tako što je za svaku mernu tačku određivana vrednost incidentne RF snage na ulazu senzora, kada vatmetar pokazuje definisanu (nominalnu) vrednost snage. U slučaju kada vatmetar ne pokazuje tačnu vrednost nominalne snage, vršena je korekcija rezultata dobijenih vatmetrom i etalomom tako da vatmetar pokazuje tačnu vrednost nominalne snage. Pritom je pretpostavljeno da se vatmetar ponaša linearno u blizini nominalne vrednosti. Korekcija rezultata merenja

laboratorija učesnica je vršena kako bi bili uporedivi sa referentnim vrednostima provajdera.

U okviru poređenja su sprovedena tri kruga merenja. Predmet etaloniranja (DUT, engl. Device Under Test) je kružio između laboratorija učesnica prema unapred definisanoj vremenskoj šemi. Nakon svakog kruga merenja, predmet etaloniranja je vraćen referentnoj laboratoriji na ponovna merenja.

Stabilnost predmeta etaloniranja je praćena na početku ILC programa, između svakog kruga merenja i po završetku merenja svih učesnika poređenja. Tokom trajanja celokupnog poređenja nije uočena značajnija nestabilnost. Referentne vrednosti za svaku mernu tačku su formirane tako da čine aritmetičku sredinu svih referentnih vrednosti izmerenih tokom ILC programa za tu tačku. Merna nesigurnost referentne laboratorije uključuje i nestabilnost predmeta etaloniranja, uprkos činjenici da se može zanemariti [3], [4].

KRITERIJUMI ZA PROCENU REZULTATA MERENJA

Kriterijum za procenu rezultata merenja je formiran prema zahtevima standarda EN ISO/IEC 17043 korišćenjem E_n broja definisanog formulom:

$$E_n = \frac{x_{lab} - x_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (1)$$

gde su x_{lab} i x_{ref} srednja vrednost merenja laboratorije učesnice, odnosno referentne laboratorije, a U_{lab} i U_{ref} proširena merna nesigurnost laboratorije učesnice, odnosno referentne laboratorije. Rezultati merenja se smatraju prihvatljivim ukoliko je apsolutna vrednost E_n broja manja ili jednaka 1 [5].

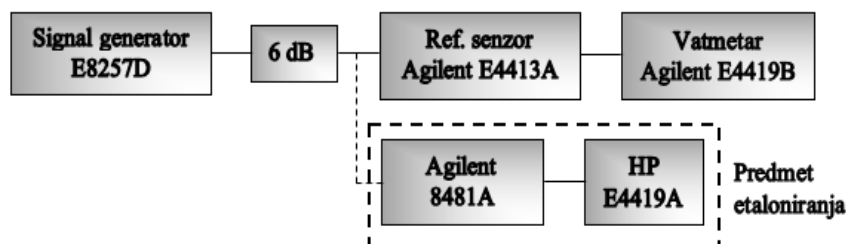
Prilikom izveštavanja o rezultatima merenja očuvana je anonimnost laboratorija učesnica dodeljivanjem identifikacionog koda. Laboratorijama je poznat isključivo sopstveni kod i on je naznačen u pojedinačnom izveštaju izdatom od PT provajdera za svaku laboratoriju učesnicu.

METOD MERENJA PRIMENJEN U TEHNIČKOM OPITNOM CENTRU

Svaka od laboratorija učesnica je merenja sprovedla primenom svojih metoda nad zajedničkim predmetom etaloniranja. U TOC je primenjen metod supstitucije [6], [7] i metod direktnog poređenja predmeta etaloniranja sa etalomom za mikrotalasnu snagu [8], [9]. Za nivo snage 10 μ W kao referentni etalon je odabran diodni senzor snage sa vatmetrom. Radi smanjenja uticaja refleksije, u metodu je korišćen oslabljivač nominalnog slabljenja 6 dB, postavljen na izlaz signal generatora kao na slici 4. Snaga u

referentnoj tački (na izlazu oslabljivača) se prvobitno meri predmetom etaloniranja. Nivo generatora se podešava tako da obezbedi snagu izmerenu DUT vatmetrom blisku nominalnoj, koja se potom beleži. Zadržavajući istu postavku na generatoru signala, predmet etaloniranja se zamenjuje referentnim senzorom sa vatmetrom. Za određivanje tačne vrednosti snage u referentnoj tački se primenjuje odgovarajući faktor etaloniranja referentnog senzora za merenu frekvenciju. Ovakav postupak merenja je omogućen visokom stabilnošću nivoa signala na izlazu generatora.

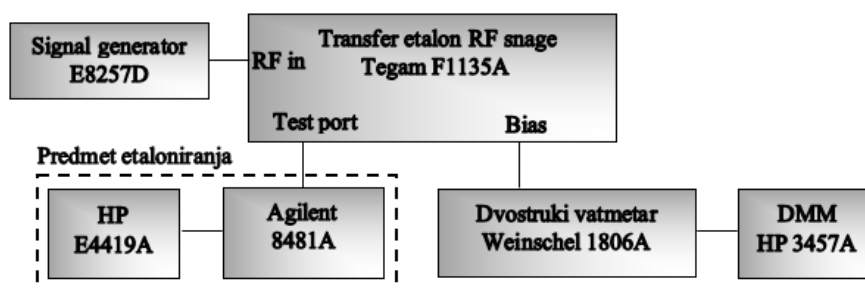
Opisani postupak je ponovljen za svaku test frekvenciju. Za svaku mernu tačku merenje je ponovljeno tri puta, a rezultat merenja predstavlja njihovu srednju vrednost. U slučajevima kada očitavanje vatmetra odstupa od nominalne vrednosti, rezultat dobijen etalomom je korigovan za razliku tog odstupanja.



Slika 4. Blok šema merenja apsolutne snage 10 μ W

Prilikom merenja snage vrednosti 1 mW i 8 mW je korišćen transfer etalon snage kao referentni. On predstavlja primarni Vojni etalon mikrotalasne snage. U ovom metodu se preko internog razdelnika transfer etalona snaga istovremeno isporučuje na test priključak na koji se vezuje predmet etaloniranja i na referentni termistorski senzor smešten unutar etalona (slika 5). Snaga na izlazu referentnog senzora se određuje na osnovu promene DC napona na termistoru dvostrukog samobalansirajućeg vatmetra, kada je na senzor dovedena RF snaga i u njenom odsustvu. Ova promena napona se meri digitalnim multimetrom (DMM). Detaljan opis metoda dat je u [8], [10].

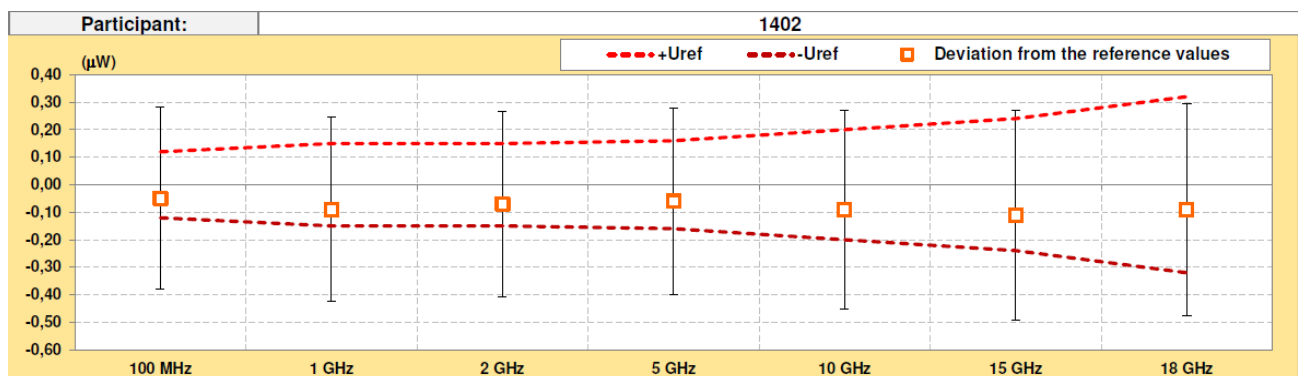
Opisani metod sa transfer etalomom snage je prvenstveno namenjen za etaloniranje senzora snage. Kako bi se primenio za merenje apsolutne vrednosti snage, za potrebe poređenja je modifikovan. Pritom je zadržan merni lanac i princip merenja, uz drugačiju obradu rezultata i izmenu matematičkog modela metoda.



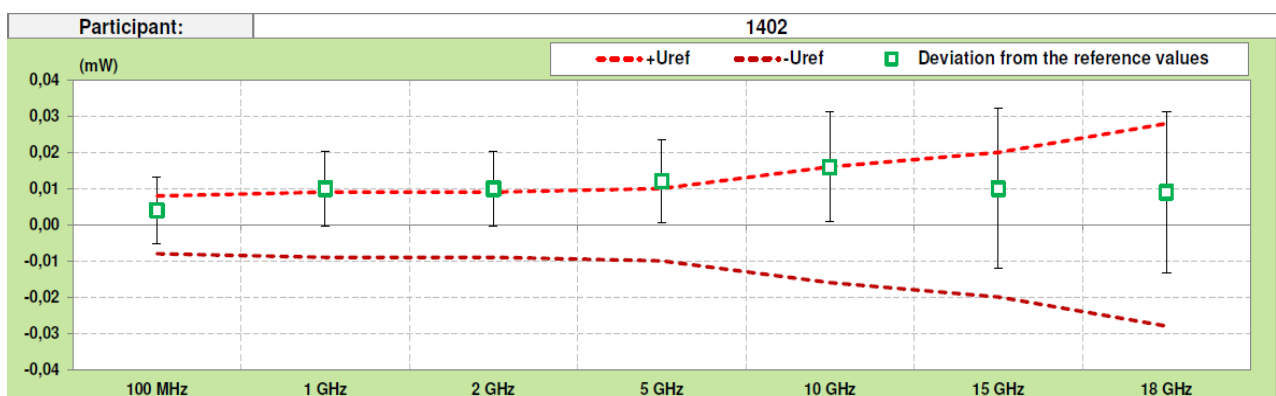
Slika 5. Blok šema merenja apsolutne snage 1 mW i 8 mW

REZULTATI MERENJA

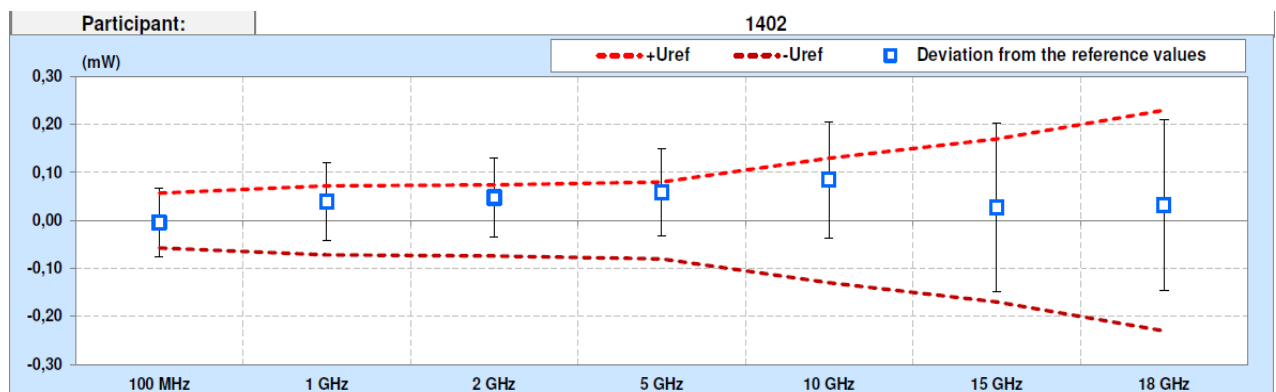
U radu je akcenat stavljen na rezultate koje je ML 02 ostvarila u pomenutom poređenju, te su oni detaljnije prikazani i analizirani. Na kraju je dat i uporedni prikaz laboratorija učesnica prema njihovom E_n broju. Na slikama od 6 do 8 je prikazana devijacija vrednosti izmerenih u ML 02 od referentnih vrednosti zajedno sa pridruženim mernim nesigurnostima, unutar opsega referentne laboratorije. Ovaj opseg je označen isprekidanim crvenim linijama i definisan je na osnovu izmerenih vrednosti i njima pridruženih



Slika 6. Devijacija vrednosti izmerenih u ML 02 od referentnih vrednosti za nivo snage 10 μ W



Slika 7. Devijacija vrednosti izmerenih u ML 02 od referentnih vrednosti za nivo snage 1 mW



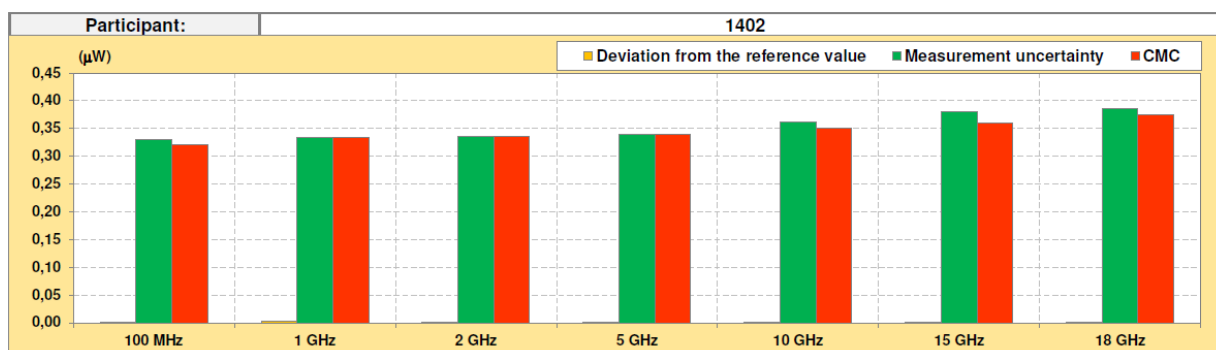
Slika 8. Devijacija vrednosti izmerenih u ML 02 od referentnih vrednosti za nivo snage 8 mW

nesigurnosti referentne laboratorije. Devijacija izmerenih vrednosti je data za sva tri nivoa snage i definisane frekvencije.

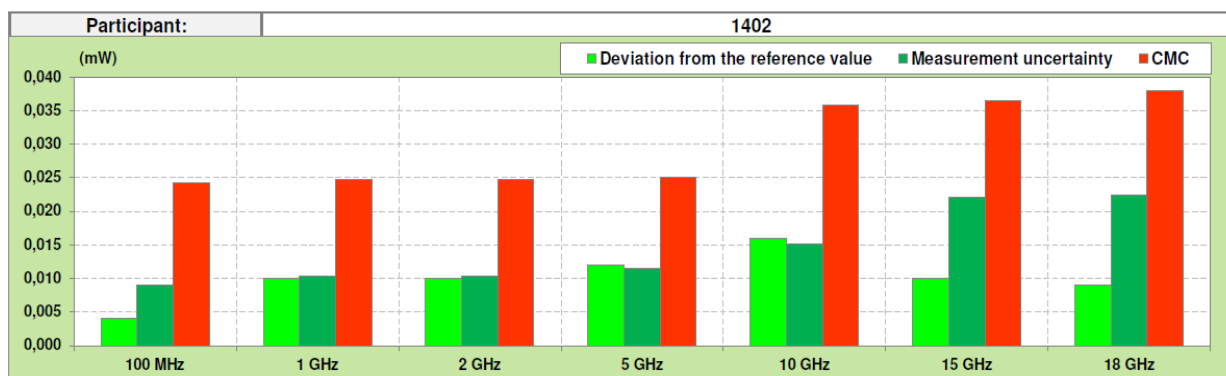
Svaka pojedinačna vrednost izmerena u ML 02 sa svojom mernom nesigurnošću se nalazi unutar definisanog referentnog opsega. Za nivo snage 1 mW se uočava nekoliko vrednosti koje su na granici referentnog opsega. Kako njihove pridružene nesigurnosti pokrivaju odstupanja od referentnih vrednosti, rezultati merenja su unutar referentnih okvira.

Na slikama 9, 10 i 11 je prikazana procenjena nesigurnost izvršenih merenja, kao i definisane merne mogućnosti laboratorije u odnosu na devijaciju od referentnih vrednosti. Ovakav prikaz omogućava bolje sagledavanje iskazanih nesigurnosti i potrebe za njihovom eventualnom korekcijom. Izmerena devijacija je za većinu mernih tačaka daleko manja od iskazane merne nesigurnosti, što ukazuje na činjenicu da su procenjene nesigurnosti veće od realnih, te da nije došlo do grešaka u tumačenju rezultata merenja. Štaviše,

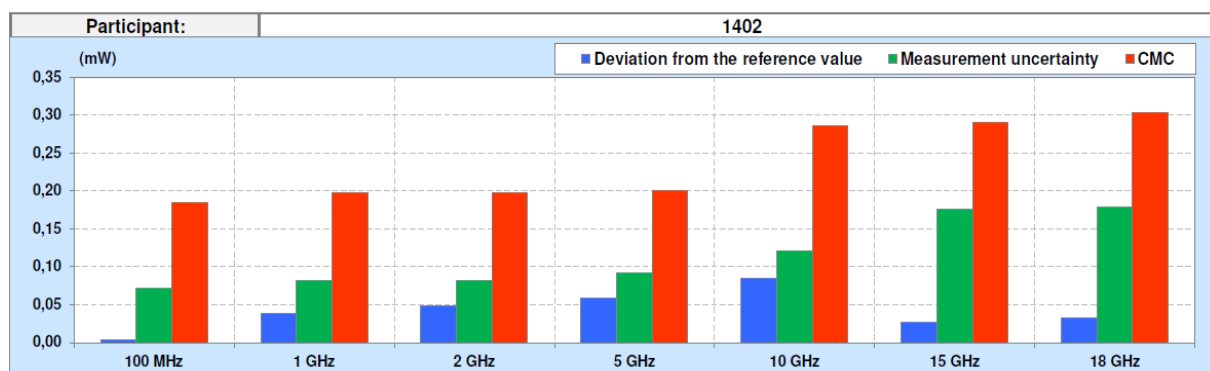
procenjene merne nesigurnosti laboratorije ML 02 za nivo snage $10\ \mu\text{W}$ su značajno veće od izmerene devijacije, što ukazuje na mogućnost korekcije u vidu njihovog poboljšanja.



Slika 9. Procenjena merna nesigurnost i definisane merne mogućnosti laboratorije u odnosu na devijaciju od referentnih vrednosti za nivo snage $10\ \mu\text{W}$



Slika 10. Procenjena merna nesigurnost i definisane merne mogućnosti laboratorije u odnosu na devijaciju od referentnih vrednosti za nivo snage $1\ \text{mW}$

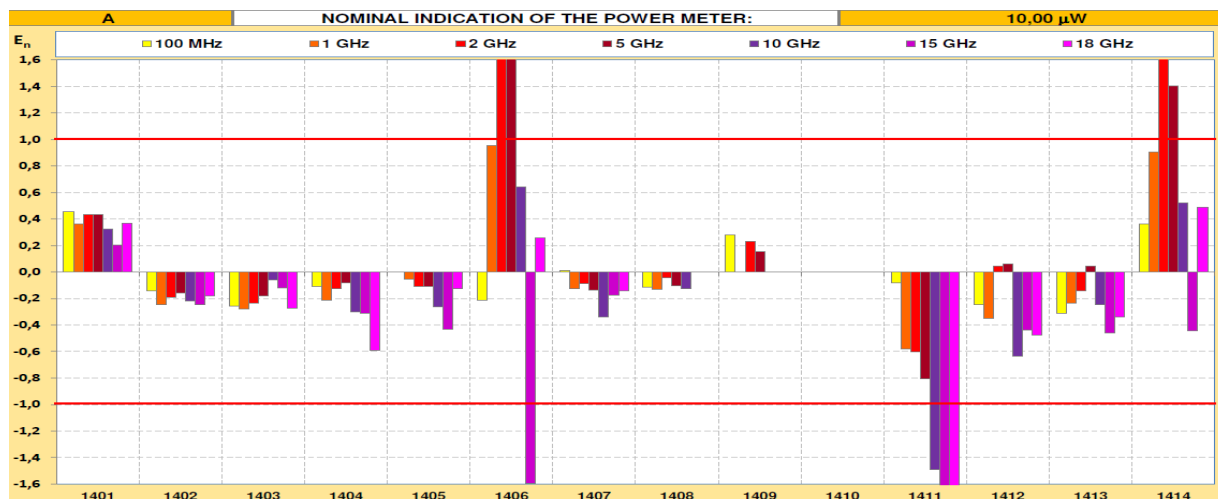


Slika 11. Procenjena merna nesigurnost i definisane merne mogućnosti laboratorije u odnosu na devijaciju od referentnih vrednosti za nivo snage $8\ \text{mW}$

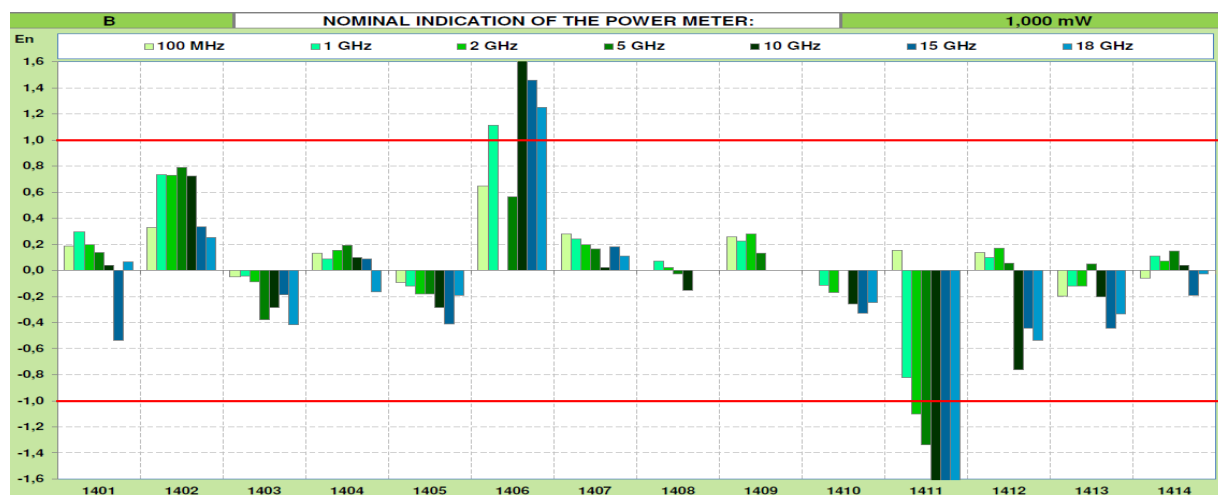
Pregled laboratorija učesnica prema E_n broju za svaku mernu tačku je prikazan na slikama 12, 13 i 14. Svakoj laboratoriji je dodeljen jedinstveni identifikacioni kod u opsegu od 1401 do 1414. Laboratoriji ML 02 je dodeljen kod 1402. Apsolutna vrednost E_n broja koji je ML 02 ostvarila u ovom poređenju se nalazi u opsegu od 0,04 do 0,79 u zavisnosti od merne tačke, čime je u potpunosti zadovoljila uslove poređenja.

Najveće iznenađenje predstavljaju vrednosti dobijene za nivo snage $1\ \text{mW}$, gde je dobijen maksimalan E_n broj od 0,79. Najpouzdaniji rezultati su očekivani za ovaj nivo snage, budući da su pri njemu određeni korekcionni (kalibracioni) faktori senzora transfer etalona u švajcarskom metrološkom institutu METAS. Imajući u vidu da krive na slikama 7 i 8 imaju sličan trend i da su dobijene primenom istog metoda,

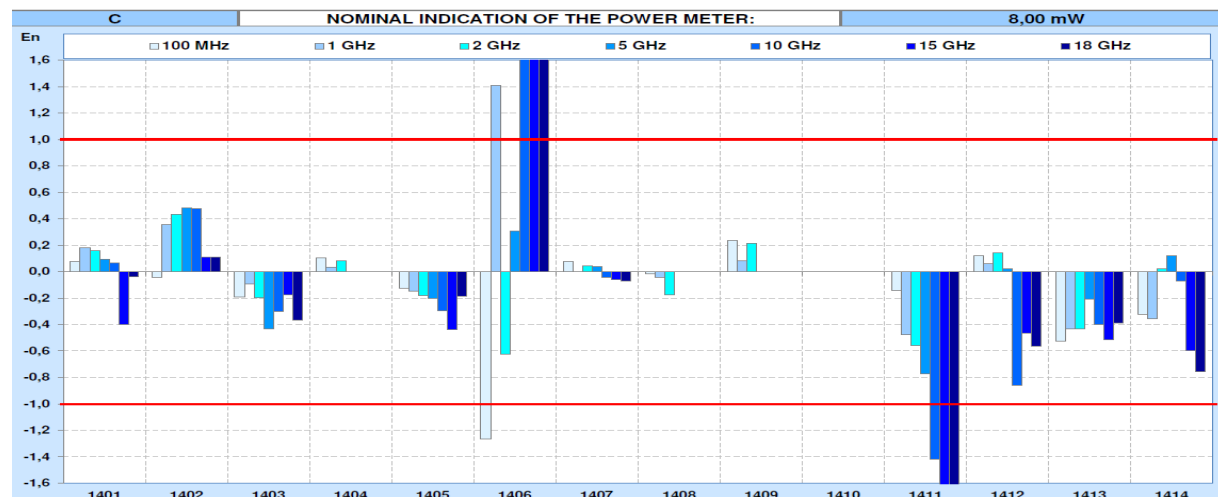
potencijalni uzrok ovakvog odstupanja može biti promena faktora etaloniranja transfer etalona od poslednjeg etaloniranja na pojedinim frekvencijama. Istinitost takve pretpostavke se može utvrditi tek nakon etaloniranja transfer etalona u inostranoj laboratoriji. Pored toga, uzročnik može biti značajnije neprilagođenje etalona i test senzora na frekvencijama od 1 GHz do 10 GHz.



Slika 12. Pregled učesnika prema E_n broju za nivo snage 10 μ W



Slika 13. Pregled učesnika prema E_n broju za nivo snage 1 mW



Slika 14. Pregled učesnika prema E_n broju za nivo snage 8 mW

ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati međulaboratorijskog poređenja iz oblasti RF snage u kome je učestvovala laboratorija za mikrotalasnu tehniku ML 02 Tehničkog opitnog centra. S obzirom na problem dostupnosti ovakvih poređenja u zemlji, kao i u Evropi, ovo poređenje predstavlja veliki pomak u polju PT aktivnosti pomenute laboratorije. Rad sadrži opis korišćenih metoda, uslove poređenja, kao i ostvarene rezultate i njihovu analizu. Rezultati poređenja su potvrdili tehničku kompetentnost ML 02, ali su ukazali i na moguća poboljšanja. Ona se pre svega odnose na mogućnost smanjenja merne nesigurnosti i korekcije obima akreditacije, odnosno mernih mogućnosti laboratorije. U svrhu poređenja je modifikovan postojeći metod za etaloniranje senzora snage koji je adaptiran za potrebe etaloniranja apsolutne snage. Uspešnim poređenjem metod je validovan, te je uvršten u obima akreditacije laboratorije.

LITERATURA

- [1] ISS, *Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje*, SRPS ISO/IEC 17025, Institut za standardizaciju Srbije, 2017.
- [2] ATS, *Pravila o učešću u programima za ispitivanje osposobljenosti i međulaboratorijskim poređenjima*, ATS-PA02, Akredizaciono telo Srbije, 2021.
- [3] CMI, *Report on interlaboratory comparison: Measurement of RF power*, ILC 41-1400-22, Czech Metrology Institute, ILC Department, 2023.
- [4] CMI, *Graphical annexes to the report on interlaboratory comparison: Measurement of RF power*, ILC 41-1400-22, Czech Metrology Institute, ILC Department, 2023.
- [5] ISO, *Conformity assessment – General requirements for proficiency* EN ISO/IEC 17043, 2010
- [6] A. Fantom, *Radio frequency and microwave power measurement*, London, UK: Peter Peregrinus, 1990
- [7] TOC, *C.42.052 Uputstvo za merenje mikrotalasne snage*, Tehnički opitni centar, Ministarstvo odbrane, 2020.
- [8] P. Rakonjac, *Merni sistem za automatizovano etaloniranje senzora mikrotalasne snage u frekventijskom opsegu od 50 MHz do 26,5 GHz*, Magistarska teza, Elektronski fakultet, Niš, 2010.
- [9] TEGAM. *Coaxial RF Power Transfer Standards Models F1125, F1130, F1135, M1125, M1130, M1135*, Instruction Manual (PN# IM300), 2007
- [10] TOC, *MN 4.2-29 Proračun nesigurnosti etaloniranja apsolutne snage pomoću transfer etalona snage u frekventijskom opsegu od 10 MHz do 26,5 GHz*, Tehnički opitni centar, Ministarstvo odbrane, 2024.