

Određivanje jačine električnog polja visokih učestanosti primenom širokopojasnih merenja

BRANISLAV D. VULEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd

Stručni rad
UDC: 614.875

DOI: 10.5937/tehnika1705701V

Izlaganje ljudi elektromagnetskim poljima visokih učestanosti (iznad 100 kHz), tj. radiofrekvencijskom zračenju koje potiče od savremenih sistema za bežični prenos informacija, predstavlja neminovnost današnjeg doba. Cilj ovog rada je da ukaže na značaj širokopojasnih merenja jačine električnog polja visokih učestanosti za brzu i pouzdanu procenu izlaganja ljudi. U radu je navedena i jedna operativna metoda merenja jačine električnog polja na licu mesta (in situ) koja je vezana za opseg frekvencija od 3 MHz do 18 GHz.

Ključne reči: izlaganje ljudi, jačina električnog polja, visoke učestanosti, merna nesigurnost, prostorno usrednjavanje

1. UVOD

Rezultati dosadašnjih istraživanja koja se sprovode od strane naučnika širom sveta još uvek ne daju jasan odgovor na pitanje rizika po zdravlje ljudi usled hroničnog izlaganja elektromagnetskim poljima radiofrekvencijskog (RF) opsega. Razvijene države, pod pritiskom zabrinutog stanovništva, i dalje finansiraju razne programe, od bioloških efekata do zakonskih propisa. Posebna pažnja se posvećuje epidemiološkim istraživanjima.

U cilju procene izloženosti stanovništva, poznavanje nivoa RF zračenja na terenu je od izuzetne važnosti. Merenja predstavljaju osnovu kako za verifikaciju rezultata dobijenih korišćenjem numeričkih modela tako i za procenu nivoa elektromagnetskih polja na terenu kada je svaka vrsta proračuna i simulacija otežana prisustvom većeg broja izvora, radnim uslovima a samim tim i kompleksnom raspodelom polja [1].

Zahvaljujući ubrzanom razvoju novih tehnologija, mernih uređaja i njihovog povezivanja u merne sisteme, prvih petnaest godina XXI veka karakteriše pojava različitih pristupa merenjima u oblasti RF zračenja. Ovo posebno implicira potrebu za usaglašava-

njem mernih metoda. Zbog toga se velika važnost poklanja standardizaciji i harmonizaciji mernih metoda.

Osnovni evropski standard koji definiše procedure (skup uputstava i smernica) za merenja i proračun elektromagnetskih polja (0Hz – 300 GHz) jeste standard CENELEC EN 50413 [2]. Isti služi kao usmerenje prema standardima namenjenim za opis merne metode. U ovom radu, za opis merne metode koristimo standard CENELEC EN 50492 [3], koji se bavi problematikom ispitivanja elektromagnetskih polja visokih učestanosti u cilju procene izlaganja ljudi u blizini baznih stanica. Treba napomenuti da se pod pojmom bazna stanica, u duhu navedenog standarda, podrazumeva radio-stanica i odgovarajući antenski sistem.

Svrha ovog rada je da ukaže na značaj širokopojasnih merenja jačine električnog polja visokih učestanosti u cilju brze i pouzdane procene izlaganja ljudi, što će biti od sve većeg značaja u budućnosti.

2. IZBOR METODE MERENJA

Standard EN 50492 najpre definiše izbor metode merenja, merne opreme i postprocessa merenja koji treba da se koriste u cilju procene izlaganja ljudi elektromagnetskim poljima visokih učestanosti (od 100 kHz do 300 GHz).

Prema navedenom standardu, u zavisnosti od postavljenog cilja merenja, postoji podela na slučaj A (širokopojasna metoda merenja) i slučaj B (frekvencijski selektivna metoda merenja). Širokopojasna

Adresa autora: Branislav Vulević, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet „Nikola Tesla“, Beograd, Koste Glavinica 8a

e-mail: banevule@gmail.com

Rad primljen: 08.06.2017.

Rad prihvaćen: 28.08.2017.

metoda merenja daje jednu informaciju u posmatranoj mernoj tački ("izmerenu vrednost") o ukupnoj emisiji u okviru opsega učestanosti koji je pokriven korišćenim mernim instrumentom. Pri ovakvom merenju ne postoji mogućnost izdvajanja udela prisutnih izvora u posmatranom okruženju u odnosu na ukupnu vrednost. To je u suštini najveći nedostatak širokopoljnih merenja, koji može da se nadomesti korišćenjem frekvencijski selektivnih metoda. Sa druge strane, lako rukovanje mernom opremom i pokretljivost tokom procesa merenja čini širokopoljne metode veoma praktičnim za operativni rad na terenu.

Na osnovu višegodišnjeg iskustva autora ovoga rada [4], velika prednost širokopoljnih metoda vezana je za preliminarna ispitivanja i tzv. „brzi pregled“ kod merenja na licu mesta (tzv. "in-situ" merenja).

Neophodno je naglasiti da će navedena prednost širokopoljnih merenja biti značajna za određivanje mernih mesta kod uspostavljanja permanentnog monitoringa elektromagnetskih polja u životnoj sredini. Prednost permanentnog (celodnevnog) monitoringa u odnosu na konvencionalna merenja i proračune jeste daljinsko praćenje i objektivno informisanje javnosti o nivou elektromagnetskih polja u okruženju [5].

3. ŠIROKOPOJASNA MERNA OPREMA

Širokopoljna merna oprema sastoji se iz dva dela:

a) širokopoljne izotropne sonde za merenje električnog ili magnetskog polja koja pokriva određeni opseg učestanosti i

b) mernog instrumenta.

Rezultat ispitivanja predstavljaju izmerene efektivne vrednosti električnog ili magnetskog polja u opsegu učestanosti koji pokriva korišćena sonda. Osnovni uslovi koje treba da zadovolji širokopoljna merna oprema definisani su u standardu CENELEC EN 50492 [3] i obuhvataju tehničke karakteristike vezane za frekvencijski odziv, izotropnost, linearnost, donju granicu detekcije i dinamički opseg. Ukratko, navedeni standard posebno izdvaja uslove koje treba da ispuni širokopoljna merna oprema za opseg frekvencija od 900 MHz do 3 GHz (primena u javnoj mobilnoj telefoniji) i zahteva karakteristike opisane u tabeli 1.

Tabela 1. Osnovni uslovi za mernu opremu

Opseg frekvencija: 900 MHz – 3 GHz	
Frekvencijski odziv	$\pm 1,5$ dB
Izotropnost	≤ 2 dB za ceo merni sistem
Linearnost	$\pm 1,5$ dB
Donja granica detekcije	≤ 2 mW/m ² tj. 1 V/m
Dinamički opseg	≥ 40 dB

Za potrebe ovoga rada korišćen je širokopoljni merni instrument Narda Broadband Field Meter NBM-550 sa izotropnom sondom EF1891 (3 MHz do 18 GHz) za merenje jačine električnog polja. Detaljne tehničke karakteristike navedene merne opreme mogu se naći u literaturi [6] i [7]. U tabeli 2 prikazane su osnovne karakteristike navedene merne opreme.

Tabela 2. Karakteristike korišćene merne opreme

Ukupni opseg frekvencija od 3 MHz do 18 GHz	
Karakteristike za opseg frekvencija od 900 MHz do 3 GHz	
Frekvencijski odziv	± 1 dB
Izotropnost	± 1 dB
Linearnost	$\pm 1,5$ dB
Donja granica detekcije	0,6 V/m
Dinamički opseg	64 dB

Upoređivanjem podataka iz navedene dve tabele jasno je da korišćena merna oprema u potpunosti zadovoljava zahteve standarda CENELEC EN 50492 [3].

4. OPIS OPERATIVNE METODE

Sledi opis jedne operativne metode merenja jačine električnog polja visokih učestanosti na odabranom mernom mestu koje je određeno nakon preliminarnog pregleda posmatrane lokacije koji podrazumeva i:

- utvrđivanje eventualnog prisustva drugih izvora EMF i/ili drugih značajnih karakteristika koje mogu uticati na rezultate merenja;
- utvrđivanje eventualnog prisustva predmeta ili objekata koji utiču na dostupnost potencijalnim mernim mestima;
- prikupljanja ostalih podataka o prostoru u kome se vrši ispitivanje, relevantnih za sam postupak merenja i reprezentativnost rezultata prema važećim preporukama a na osnovu relevantne stručne literature.

Merno mesto treba da se nalazi u oblasti dalekog polja (tzv. "zona zračenja") gde se predpostavlja da je odnos intenziteta vektora jačine električnog i magnetskog polja E/H u bilo kojoj tački i u bilo kom trenutku jednak je impedansi sredine (Z) kroz koju se talas prostire ($E/H = Z \cong 377 \Omega$ - za vakuum). Jačina električnog polja E [V/m], jačina magnetskog polja H [A/m] i površinska gustine snage S [W/m²] teorijski su povezani jednostavnim relacijama

$$S = E^2 / 377 = 377 H^2 \quad (1)$$

Električna polja visokih učestanosti u okolini antenskog sistema mogu biti opisana višestrukim varijacijama u prostoru i vremenu u zavisnosti od rastojanja

od antena, ekranizacije i višestrukog prostornog slabljenja manjih razmera (engl. „small-scale spatial fading“).

Kod merenja u zonama povećane osetljivosti kao što su kuće, stanovi, vrtići, škole itd., merenja na određenom mernom mestu, posebno kada u okolini postoji više izvora, treba da budu vršena na bar tri visine u okviru istog mernog mesta, kao što je prikazano na slici 1. Prostorno usrednjavanje dobijenih vrednosti jačine električnog polja vrši se prema izrazu

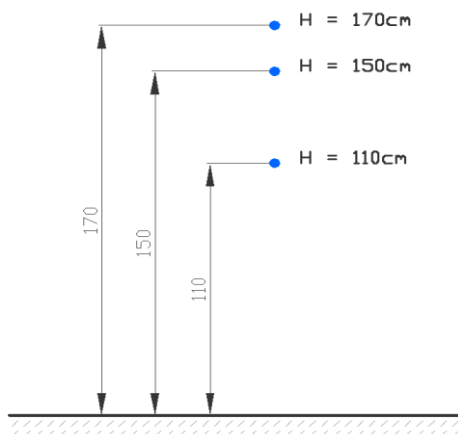
$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N E_i^2}{N}} \quad (2)$$

gde su:

E_i - srednja vrednost očitanih efektivnih vrednosti jačine električnog polja na svakoj tački i u prostoru i izračunava se prema izrazu (3) tj.

$$E_i = (E_{xi}^2 + E_{yi}^2 + E_{zi}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

N – broj merних тачака (за слику 1, $N = 3$).



Slika 1 – Visine mernih tačaka [3]

Merni instrument *NBM-550* sa izotropnom sondom *EF1891* podešava se tako da u svakoj tački u prostoru merenje traje po 6 minuta i da se na svakih 10 sekundi memoriše po jedna minimalna, srednja i maksimalna efektivna vrednost jačine električnog polja. Vreme merenja po jednom mernom mestu je 18 minuta.

Dakle, po svakoj tački imamo 3 x 36 „izmerenih vrednosti“ (minimum, srednja i maksimalna efektivna vrednost jačine električnog polja).

Za svaku tačku određuje se standardna devijacija i srednja vrednost od 36 dobijenih srednjih efektivnih vrednosti jačine električnog polja.

Odnos između ove dve navedene vrednosti definiše tzv. „ponovljivost merenja“ koja predstavlja jedan od najvažnijih promenljivih faktora tokom merenja (isti uslovi merenja, isti instrument, isti izvršilac merenja) u cilju određivanja merne nesigurnosti (videti tabelu 3).

4. MERNA NESIGURNOST

U radu navedenom u literaturi [4] prikazana je procena merne nesigurnosti za slučaj prostornog usrednjavanja kod širokopoljnih merenja.

Tabela 3 predstavlja tipičan primer budžeta merne nesigurnosti za mernu opremu koju koristimo u ovom radu.

Ako $u_c = u_c(E_i)$ iz tabele 3 predstavlja kombinovanu standardnu nesigurnost E_i za svaku prostornu tačku i , tada se u skladu sa centralnom graničnom teoremom, može pretpostaviti da se radi o normalnoj raspodeli verovatnoće. Merna nesigurnost kod prostorno usrednjenih vrednosti može se proceniti na sledeći način:

- Izračunati srednju vrednost jačine električnog polja E_i za svaku prostornu tačku i ;
- Proceniti kombinovanu standardnu nesigurnost $u_c(E_i)$ za jačinu električnog polja u svakoj tački prostora, kao što je prikazano u tabeli 3;
- Izračunati prostorno usrednjenu vrednost jačine električnog polja u skladu sa izrazom (2);
- Izračunati koeficijent osetljivosti za E u odnosu na E_i kao

$$c_i = \frac{\partial E}{\partial E_i} = \frac{E_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N E_i^2}} = \frac{E_i}{NE} \quad (4)$$

- Izračunati kombinovanu standardnu nesigurnost za prostorno usrednjavanje prema izrazu (5):

$$u_c(E) = \left[\sum_{i=1}^N c_i^2 u_c^2(E_i) \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{NE} \left[\sum_{i=1}^N E_i^2 u_c^2(E_i) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Pod uslovom da se radi o normalnoj raspodeli verovatnoće [4], koristi se faktor proširenja $k = 1,96$ za nivo pouzdanosti od 95%.

Proširena merna nesigurnost dobija se kao

$$U(E) = \pm 1,96 u_c(E) \quad (6)$$

Tabela 3. Primer budžeta merne nesigurnosti za širokopojasni merni uređaj NBM-550 sa sondom EF1891

Uticajni faktor	Referenca	Specifična nesigurnost [%]	Raspodela	Delilac	Standardna nesigurnost $u(E_i)$ [%]
Frekvencijski odziv	Uverenje o etaloniranju	11,6	Pravougaona	1,73	6,7
Nesigurnost-frekvencijski odziv	Uverenje o etaloniranju	20	Normalna (k=2)	2	10
Linearna devijacija	Uverenje o etaloniranju	3	Pravougaona	1,73	1,7
Nesigurnost linearnosti	Uverenje o etaloniranju	15	Normalna (k=2)	2	7,5
Izotropska devijacija	Specifikacija proizvođača	12,2	Pravougaona	1,73	7,1
Modulacioni odziv	Specifikacija proizvođača	-	Pravougaona	1,73	-
Temperaturni odziv	Specifikacija proizvođača	2,3	Pravougaona	1,73	1,3
Ponovljivost	Serijska merenja	Odnos standardne devijacije i srednje efektivne vrednosti	Normalna (k=1)	1	Odnos standardne devijacije i srednje efektivne vrednosti
Kombinovana standardna nesigurnost, u_c [%]					$(\sum_{i=1}^n u^2(E_i))^{1/2}$
Faktor proširenja, k					1,96
Proširena merna nesigurnost, U [%]					1,96 u_c [%]

Napomena: Specifična nesigurnost = koeficijent raspodele (delilac) x standardna nesigurnost
Prethodno navedena procedura rezimirana je u tabeli 4.

Tabela 4. Procena merne nesigurnosti kod prostornog usrednjavanja

i	H [m]	Srednja efektivna vrednost E_i [V/m]	Prostorno usrednjena vrednost E [V/m]	Raspodela	Delilac	Koeficijent osetljivosti c_i	$u_c(E_i)$ [%]
1	1,1	-	Izraz 2	Normalna	1	Izraz 4	-
2	1,5	-		Normalna	1	Izraz 4	-
3	1,7	-		Normalna	1	Izraz 4	-
Kombinovana standardna nesigurnost, $u_c(E)$ [%]							Izraz 5
Faktor proširenja, (k)							1,96
Proširena merna nesigurnost U(E) [%]							1,96 u_c [%]

5. JEDAN PRIMER MERENJA SA TERENA

Sledi prikaz rezultata merenja na licu mesta (in situ) vezan za jedno merno mesto na krovnoj terasi stambenog objekta na kome se nalaze sektorske antene javne mobilne telefonije.

Preliminarnim ispitivanjem na krovnoj terasi određuje se merno mesto na kome će se vršiti merenje na tri naznačene visine. Pod preliminarnim ispitivanjem podrazumeva se obilazak prostora (otvorenog ili zatvorenog) pri čemu se širokopojasnom mernom sondom vrši „skeniranje prostora“ na visini 1,5 m. Izvršilac merenja se kreće lagano u prostoru (1 korak u sekundi), pri čemu merna sonda treba da bude udaljena najmanje 1 m od tela izvršioca.

Ukoliko se radi o zatvorenom prostoru, treba voditi računa da merna sonda bude bar 1 m udaljena od zidova i ostalih objekata u prostoriji i da tokom merenja nema aktivnih lokalnih izvora elektromagnetskih polja visokih učestanosti (mobilni telefoni, bežični internet, itd.).

Na slici 2, prikazano je jedno merno mesto na krovnoj terasi na kome je preliminarnim ispitivanjem utvrđena najveća vrednost jačine električnog polja za opseg frekvencija koji pokriva merna sonda.

U tabeli 5 prikazani su rezultati merenja sa izabranog mernog mesta. Navedene brojne vrednosti u posmatranoj tabeli dobijene su na osnovu izraza na koje se poziva tabela 4.



Slika 2 – Izabrano merno mesto

Tabela 5. Prikaz rezultata merenja na posmatranom mernom mestu

i	H [m]	Srednja efektivna vrednost E_i [V/m]	Prostorno usrednjena vrednost E [V/m]	Raspodela	Delilac	Koeficijent osetljivosti c_i	$u_c(E_i)$ [%]
1	1,1	6,78	7,35	Normalna	1	0,3075	16,13
2	1,5	8,83		Normalna	1	0,4004	16,77
3	1,7	6,19		Normalna	1	0,2807	16,04
Kombinovana standardna nesigurnost, $u_c(E)$ [%]							9,51
Faktor proširenja, (k)							1,96
Proširena merna nesigurnost $U(E)$ [%]							18,64 ($\pm 1,37$ V/m)

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazana je operativna metoda određivanja jačine električnog polja visokih učestanosti primenom širokopojasnih merenja, koja ima svoju prednost kada se zahteva brza i pouzdana procena izlaganja ljudi elektromagnetskim poljima u životnoj sredini. Ovaj rad može da posluži kao polazni okvir za buduća razmatranja i poboljšanja mernih metoda

usmerenih prema permanentnom (celodnevnom) praćenju nivoa elektromagnetskih polja u cilju proučavanja uticaja na zdravlje ljudi.

7. ZAHVALNICA

Ovaj rad urađen je u okviru projekta br. III-43009 koji je finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Vulević D. B. Osmokrović JP. Evaluation of Uncertainty in the Measurement of Environmental Electromagnetic Fields. *Radiation Protection. Dosimetry*, Vol. 141, No.2, p.p.173–177, 2010.
- [2] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0Hz – 300 GHz), *CENELEC EN 50413*, 2008.
- [3] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Basic standard for in-situ measurement of electromagnetic fields strength related to human exposure in vicinity of base stations. *CENELEC EN 50492*, 2008.
- [4] Vulević B, Grbić M, Pavlović A. Nivoi električnih polja visokih učestanosti: jedan primer određivanja merne nesigurnosti kod širokopoljnih merenja, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“*, Vol.26, p.p. 141–150, 2016.
- [5] Vulević B, Grbić M, Pavlović A, Monitoring elektromagnetskih polja u životnoj sredini, *ECOLOGICA*, Vol. 23, No 84, p.p. 877–881, 2016.
- [6] NBM-550 Narda Broadband Field Meter, Operating Manual, NARDA Safety Test solutions, Order no: 2401/98.21, 2009.
- [7] E-FIELD PROBE EF1891. Manufacturer data sheet: Measuring electric fields from 3 MHz to 18 GHz. Dostupno na: <http://www.narda-sts.de>

SUMMARY

DETERMINING OF THE ELECTRIC FIELD STRENGTH USING HIGH FREQUENCY BROADBAND MEASUREMENTS

Exposure of humans to electromagnetic fields of high frequency (above 100 kHz), i.e. radiofrequency radiation from the modern wireless systems, today inevitable is. The purpose of this paper is to highlight the importance of broadband measurements of the electric field of high frequency in order to fast and reliable assessment of human exposure. A practical method of "in situ" measurement the electric field intensity which is related to the frequency range of 3 MHz to 18 GHz, is provided.

Key words: *human exposure, electric field strength, high frequency, measurement uncertainty, spatial averaging*