Stručni rad
UDK: 621.317.42 : 621.317.32 : 528.06
BIBLID:0350-8528(2010),20.p. 105-119

Merna nesigurnost pri merenju visokofrekventnog elektromagnetnog polja

Aleksandar Pavlović[1], Maja Grbić[1]

[1]Elektrotehnički institut „Nikola Tesla", Koste Glavinića 8 a,
11000 Beograd, Srbija
aleksandar.pavlovic@ieent.org, maja.grbic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je detaljno objašnjen celokupan postupak izračunavanja merne nesigurnosti i navedeni su parametri za koje je uočeno da utiču na ukupnu mernu nesigurnost pri merenju visokofrekventnog elektromagnetnog polja. Na kraju rada je dat primer proračuna merne nesigurnosti u slučaju merenja visokofrekventnog elektromagnetnog polja pomoću širokopojasnog mernog sistema i pomoću sistema sa spektralnim analizatorom i antenom.

Ključne reči: merna nesigurnost, visokofrekventno elektromagnetno polje, širokopojasno merenje, spektralni analizator

1. Uvod

Rezultat svakog realnog merenja sadrži u sebi određenu nesigurnost, što znači da se idealno tačna vrednost merene veličine ne može saznati. Uzroci merne nesigurnosti mogu biti veoma brojni i po pravilu se ne mogu svi uzeti u obzir. Pri određivanju merne nesigurnosti prvo treba identifikovati veličine koje utiču na rezultat merenja. Nakon određivanja veličina koje imaju značajan uticaj na rezultat merenja izračunavaju se pojedinačne komponente merne nesigurnosti i izražavaju kao standardna nesigurnost. Standardna merna nesigurnost je po definiciji jednaka standardnom odstupanju. Statistička sigurnost koja odgovara standardnoj mernoj nesigurnosti zavisi od raspodele koja se pripisuje datom merenju. Kada se izračunaju sve komponente, izražene kao standardna nesigurnost, kombinovana nesigurnost se izračunava kao kvadratni koren sume kvadrata ovih komponenata, pod uslovom da veličine koje utiču na rezultat nisu u korelaciji. Zatim se određuje proširena (ukupna) merna nesigurnost tako što se kombinovana nesigurnost pomnoži faktorom proširenja k, koji ima vrednost od $\sqrt{3}$ do 3, u zavisnosti od vrste raspodele. Kao krajnji rezultat obrade mernih podataka dobija se rezultat merenja, merna nesigurnost i statistička sigurnost sa kojom važe dobijeni podaci.

2. Statistička obrada rezultata merenja

Ukoliko je izvršen veoma veliki broj (teorijski beskonačno velik) od N ponovljenih merenja jedne fizičke veličine, rezultati merenja $x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_N$ se nazivaju populacija. Srednja vrednost populacije μ se izračunava kao aritmetička sredina tako dobijenih vrednosti:

$$\mu = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} x_i \qquad (1)$$

Odstupanja rezultata merenja a_i se definišu kao razlike pojedinih rezultata i tačne vrednosti:

$$a_i = x_i - \mu \qquad (2)$$

Za izražavanje veličine odstupanja koristi se standardno odstupanje populacije σ, koje se definiše kao veličina čiji kvadrat pomnožen sa brojem merenja N ima vrednost jednaku zbiru kvadrata odstupanja:

$$N \cdot \sigma^2 = \sum_{1}^{N} a_i^2 = \sum_{1}^{N} \left(x_i - \mu \right)^2 \qquad (3)$$

tj.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{N} \left(x_i - \mu \right)^2}{N}} \qquad (4)$$

Relativno standardno odstupanje je dato sledećim izrazom:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{\mu} \qquad (5)$$

Veličina koja se takođe dosta koristi je varijansa ili disperzija σ^2 koja predstavlja kvadrat standardnog odstupanja.

Pri praktičnom sprovođenju eksperimenata merenja se ponavljaju konačan broj puta (n), a tako dobijen skup rezultata $x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n$ se naziva uzorak. Pošto je u praksi broj ponovljenih merenja ograničen, potrebno je na osnovu uzorka dobiti što bolju aproksimaciju karakteristika populacije, prvenstveno srednje vrednosti μ i standardnog odstupanja σ. Najboljom aproksimacijom srednje vrednosti populacije smatra se srednja vrednost uzorka:

$$x_s = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{6}$$

Odstupanja od srednje vrednosti uzorka su data izrazom:

$$b_i = x_i - x_s \tag{7}$$

Najboljom aproksimacijom standardnog odstupanja populacije smatra se standardno odstupanje uzorka od n članova koje se označava sa s, a dobija se na osnovu izraza:

$$s = \sqrt{\frac{\sum \left(x_i - x_s\right)^2}{n-1}} \tag{8}$$

Standardno odstupanje srednje vrednosti x_s je $\sqrt{n}$ puta manje od standardnog odstupanja pojedinih rezultata s, što se vidi iz narednog izraza:

$$s_{x_s} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum \left(x_i - x_s\right)^2}{n \cdot \left(n-1\right)}} \tag{9}$$

3. Izražavanje merne nesigurnosti

Kao što je napred rečeno, statistička sigurnost koja odgovara standardnoj mernoj nesigurnosti zavisi od funkcije raspodele koja je pripisana datom merenju.

3.1. Najvažnije funkcije raspodele kod merenja

Pri obradi mernih rezultata primenjuje se nekoliko vrsta raspodela, pri čemu su najčešće korišćene Gausova, ravnomerna, trougaona i U-raspodela.

3.1.1. Gausova (normalna) raspodela

Gausova (normalna) raspodela je data sledećim izrazom:

$$p_G(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \tag{10}$$

Parametri Gausove raspodele su srednja vrednost μ i standardno odstupanje σ. Kriva $p_G(x)$ je simetrična oko srednje vrednosti, što odgovara eksperimentalno utvrđenoj činjenici da su pozitivna i negativna odstupanja rezultata oko srednje vrednosti jednako verovatna.

3.1.2. Uniformna (ravnomerna) raspodela

Ravnomerna raspodela je određena srednjom vrednošću μ i poluširinom intervala a. Vrednosti slučajne promenljive x mogu da se nalaze u opsegu $x \in (\mu - a, \mu + a)$, pri čemu je svaka vrednost unutar intervala podjednako verovatna. Ovaj tip raspodele se najčešće primenjuje kada se raspolaže sa malo informacija o nekom instrumentu. Za uniformnu raspodelu važi da je:

$$\begin{gathered} p(x) = \frac{1}{2a}, \quad x_1 < x < x_2 \\ p(x) = 0, \quad \text{za ostale vrednosti promenljive } x \end{gathered} \tag{11}$$

Standardno odstupanje ravnomerne raspodele iznosi $\sigma = \frac{a}{\sqrt{3}}$.

3.1.3. Trougaona raspodela

Osnovna karakteristika trougaone raspodele je skoncentrisanost rezultata oko srednje vrednosti, što znači da su manja odstupanja rezultata od srednje vrednosti verovatnija od većih odstupanja. Standardno odstupanje kod trougaone raspodele iznosi:

$$\sigma = \frac{a}{\sqrt{6}} \tag{12}$$

Trougaona raspodela se primenjuje u slučaju kada je iz iskustva poznato da postoji jasno grupisanje mernih rezultata oko srednje vrednosti.

3.1.4. U - raspodela

Kada se vrše merenja u opsegu radio-frekvencija javlja se komponenta merne nesigurnosti koja je posledica nesavršenog podudaranja između izvora i prijemnika. U ovom frekventnom opsegu neprilagođenost komponenata karakterističnoj impedansi mernog sistema može da bude jedan od najvažnijih izvora greške. To je iz razloga što faze koeficijenata refleksije obično nisu poznate zbog čega se ne može sprovesti korekcija. Nesigurnosti usled ove neusaglašenosti dodeljuje se U – raspodela.

3.2. Vrste merne nesigurnosti

3.2.1. Standardna merna nesigurnost

Standardna merna nesigurnost u (engl. uncertainty - nesigurnost) je po definiciji jednaka standardnom odstupanju s i dobija se kada se vrednost nesigurnosti podeli odgovarajućim koeficijentom. Vrednost ovog koeficijenta kod ravnomerne raspodele iznosi $\sqrt{3}$, kod trougaone $\sqrt{6}$, a kod U raspodele $\sqrt{2}$.

3.2.1.1. Merna nesigurnost – Tip A

Postoje dva osnovna tipa merne nesigurnosti: tip A i tip B, koji se razlikuju po metodama određivanja nesigurnosti.

Merna nesigurnost tip A postoji samo ako se radi o merenju koje je ponovljeno više puta i određuje se isključivo metodom statističke obrade podataka. Ako su rezultati ponovljenih merenja predstavljeni uzorkom $x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n$ pomoću izraza (6) se može izračunati srednja vrednost x_s koja predstavlja krajnji rezultat merenja. Standardno odstupanje pojedinih rezultata dato je izrazom (8), pa je standardna nesigurnost pojedinih elemenata:

$$u_A = s = \sqrt{\frac{\sum_{i}^{n}\left(x_i - x_s\right)^2}{n-1}} \qquad (13)$$

Srednja vrednost koja predstavlja rezultat merenja, ima standardno odstupanje dato izrazom (9), što predstavlja standardnu nesigurnost mernog rezultata tip A:

$$u_{A_{x_s}} = s_{x_S} = \frac{u_A}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - x_s\right)^2}{n\cdot\left(n-1\right)}} \qquad (14)$$

Mernoj nesigurnosti tipa A se po pravilu pridružuje Gausova raspodela (nezavisno od raspodele kojoj pripadaju elementi uzorka).

3.2.1.2. Merna nesigurnost – Tip B

Merna nesigurnost tip B se može odrediti i kod pojedinačnog merenja, kada ne postoji merna nesigurnost tip A. Merna nesigurnost tip B se određuje svim ostalim metodama izuzev statističke analize. Pri tome se koriste svi raspoloživi podaci o korišćenoj mernoj opremi, teorijsko znanje i iskustvo eksperimentatora, podaci o uticaju parametara okruženja na merenje, smetnjama itd. Značajan izvor podataka za određivanje merne nesigurnosti tip B su katalozi koje proizvođači daju uz svoj instrument, gde je merna nesigurnost obično prikazana u zavisnosti od mernog opsega i pri određenim vrednostima parametara okoline, kao što su opseg temperature, relativna vlažnost itd.

Standardna merna nesigurnost tip B, u_B, predstavlja standardno odstupanje dobijeno analizom različitih uticaja na merni rezultat, pri čemu je veoma značajno da funkcija raspodele koja se pridružuje mernoj nesigurnosti bude odgovarajuća. Dok se mernoj nesigurnosti tip A uvek pridružuje Gausova raspodela (ili Studentova raspodela ukoliko se radi o manjim uzorcima), u slučaju merne nesigurnosti tip B se mogu javiti različite raspodele.

Tabela 1. Vrednosti koeficijenta proširenja k i statističke sigurnosti za razmatrane funkcije raspodele

Raspodela	Statistička sigurnost unutar μ±σ	Koeficijent proširenja k
Simetrična ravnomerna	57,1 %	1,73
Simetrična trougaona	65 %	2,45
Gausova	68,3 %	2 pri P=95 %
		2,58 pri P=99 %
		3 pri P=99,7 %

3.3. Kombinovana merna nesigurnost

Kombinovana merna nesigurnost se koristi u sledećim slučajevima:

1) kod ponovljenih merenja kod kojih su određene merne nesigurnosti tip A i tip B
2) kod merenja koja su izvršena jedanput, pri čemu ne postoji merna nesigurnost tip A, ali na krajnji rezultat utiču nesigurnosti bar dve ili više uticajnih veličina.

Određivanje standardne kombinovane merne nesigurnosti i proširene kombinovane merne nesigurnosti predstavlja krajnji cilj obrade mernih podataka.

3.3.1. Kombinovana merna nesigurnost u slučaju nekorelisanih veličina

Dve veličine su nekorelisane, tj. statistički nezavisne, kada promene jedne od njih ne izazivaju predvidljive promene druge veličine. Mnoga merenja se vrše indirektnim putem, tako što se pomoću prethodno izmerenih podataka $x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n$ tražena veličina y izračuna pomoću odgovarajuće funkcije:

$$y = f\left(x_1, x_2, ..., x_i, ..., x_n\right) \tag{15}$$

Ako su s_{x_i} standardna odstupanja veličina x_i, postavlja se pitanje koliko iznosi standardno odstupanje indirektno merene veličine s_y. Totalni diferencijal funkcije y glasi:

$$dy = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot dx_i \tag{16}$$

Diferencijalne veličine dy i dx_i se mogu zameniti konačnim promenama Δy i Δx_i pod uslovom da su one relativno male, pa se dobija:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \tag{17}$$

Veličina $\Delta y_{x_i} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i$ je parcijalna promena veličine y prouzrokovana promenom Δx_i. To znači da je promena indirektno merene veličine y jednaka zbiru parcijalnih promena prouzrokovanih promenama pojedinih veličina:

$$\Delta y = \sum_{i=1}^{n} \Delta y_{x_i} \tag{18}$$

Kvadriranjem prethodnog izraza se dobija:

$$\left(\Delta y\right)^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(\Delta y_{x_i}\right)^2 + 2 \cdot \sum_{i=1,\, j=i+1}^{i=n-1,\, j=n} \left(\Delta y_{x_i}\right) \cdot \left(\Delta y_{x_j}\right) \tag{19}$$

Parcijalne promene u drugom članu izraza (19) sa podjednakom verovatnoćom imaju pozitivne i negativne vrednosti. Ako je broj članova sume velik, drugi član u prethodnog izraza ima zanemarljivo malu vrednost, tako da se dobija:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\Delta y_{x_i}\right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 \cdot \left(\Delta x_i\right)^2} \tag{20}$$

Ako se promene Δx_i u prethodnom izrazu zamene odgovarajućim standardnim odstupanjima s_{x_i}, dobijaju se izrazi za standardno i relativno odstupanje indirektno merene veličine:

$$s_y = \sqrt{\sum \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 \cdot s_{x_i}^2\right]} \tag{21}$$

$$s_{r_y} = \frac{s_y}{y} = \frac{1}{y} \cdot \sqrt{\sum \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot s_{x_i}^2 \right]} \tag{22}$$

Kada se u izrazu (21) standardna odstupanja s_{x_i} zamene odgovarajućim nesigurnostima, dobija se standardno odstupanje indirektno merene veličine:

$$u_y = \sqrt{\sum \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_{x_i}^2 \right]} \tag{23}$$

gde je u_{x_i} merna nesigurnost tip B uticajne veličine x_i.
Prethodni izraz se može napisati i na sledeći način:

$$u_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \cdot u_{x_1}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_{x_i}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n} \right)^2 \cdot u_{x_n}^2} \tag{24}$$

$$u_y = \sqrt{c_1^2 \cdot u_{x_1}^2 + \cdots + c_i^2 \cdot u_{x_i}^2 + \cdots + c_n^2 \cdot u_{x_n}^2} \tag{25}$$

Pri tome su $c_1, c_2, ..., c_i, ..., c_n$ koeficijenti osetljivosti.

Merne nesigurnosti tip A i B se u slučaju ponovljenih merenja dobijaju različitim metodama, tako da su ove dve vrste nesigurnosti uvek nekorelisane slučajne veličine. Kada je $y = x_1 + x_2 + \cdots + x_i + \cdots + x_n = \sum x_i$ važi:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = 1 \tag{26}$$

Sada izraz (23) postaje $u_y = \sqrt{\sum u_{x_i}^2}$. Kombinovana nesigurnost u slučaju kada postoje nesigurnosti u_A i u_B iznosi:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \tag{27}$$

3.4. Proširena merna nesigurnost

Proširena merna nesigurnost U predstavlja proizvod standardne merne nesigurnosti i koeficijenta proširenja k:

$$U = k \cdot u \tag{28}$$

Koeficijent k može imati vrednost u intervalu od $\sqrt{3}$ do 3, zavisno od usvojene raspodele. Proširenoj mernoj nesigurnosti odgovara visoka vrednost statističke sigurnosti, reda veličine 99 %, što znači da se merena veličina sa velikom sigurnošću nalazi u intervalu $x_s \pm U$.

4. Izračunavanje merne nesigurnosti pri merenju visokofrekventnih elektromagnetnih polja

Prilikom merenja elektromagnetnog polja visoke frekvencije prvo se vrši širokopojasno merenje u cilju određivanja tačke u kojoj je nivo polja najveći. Zatim se u toj tački sprovodi spektralna analiza, kako bi se odredilo učešće komponenata pojedinih frekvencija. Veličina koja se meri je snaga zračenja izražena u jedinici dBm. Ukoliko je poznata frekvencija predajnika, na osnovu izmerene snage zračenja se može izračunati gustina snage koja se izražava u jedinici W/m^2. Na osnovu podatka o gustini snage zračenja se zatim izračunavaju jačina električnog i magnetnog polja.

U ovom poglavlju su navedene komponente za koje je uočeno da utiču na mernu nesigurnost pri merenju snage visokofrekventnih elektromagnetnih polja pomoću širokopojasnog mernog sistema i sistema sa antenom i spektralnim analizatorom i prikazan je primer proračuna ukupne merne nesigurnosti za ova dva slučaja.

4.1. Izračunavanje merne nesigurnosti pri merenju VF elektromagnetnih polja korišćenjem širokopojasnog mernog sistema

Komponente koje utiču na mernu nesigurnost u slučaju merenja širokopojasnim mernim sistemom i njihove usvojene vrednosti date su u tabeli 2.

Kombinovana standardna nesigurnost se može odrediti ako se u izraz (25) uvrste vrednosti pojedinih komponenata nesigurnosti iz tabele 2:

$$u_{c_1} = \sqrt{c_1^2 \cdot u_{x_1}^2 + c_2^2 \cdot u_{x_2}^2 + \cdots + c_8^2 \cdot u_{x_8}^2} \tag{29}$$

$$u_{c_1} = \sqrt{\left(\frac{15}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{14}{2}\right)^2 + \left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{2,5}{2}\right)^2 + \left(\frac{12,2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{3,5}{\sqrt{3}}\right)^2 + 15^2}$$

$$u_{c_1} = 20,38\,\% \tag{30}$$

Tabela 2. Komponente koje utiču na mernu nesigurnost pri merenju visokofrekventnih elektromagnetnih polja korišćenjem širokopojasnog mernog sistema

Faktor uticaja	Nesigurnost [%]	Raspodela	Delilac	Standardna nesigurnost [%]
Frekvencijski odziv	15	Pravougaona	$\sqrt{3}$	8,66
Nesigurnost frekvencijskog odziva	14	Normalna (k=2)	2	7
Linearna devijacija	3	Pravougaona	$\sqrt{3}$	1,73
Nesigurnost linearne devijacije	2,5	Normalna (k=2)	2	1,25
Izotropna devijacija	12,2	Pravougaona	$\sqrt{3}$	7,04
Modulacioni odziv	5	Pravougaona	$\sqrt{3}$	2,89
Temperaturni odziv	3,5	Pravougaona	$\sqrt{3}$	2,02
Ponovljivost	15	Normalna (k=1)	1	15

Proširena merna nesigurnost izračunata na osnovu izraza (28) iznosi:

$$U_1 = k \cdot u_{c_1} = 1,96 \cdot 20,38 = 39,94\,\% \tag{31}$$

Pri tome je usvojena vrednost koeficijenta proširenja $k = 1,96$, što odgovara nivou poverenja od $95\,\%$.

Proširena merna nesigurnost izražena u decibelima je:

$$u_{c_1}\left[dB\right]=20\cdot\log\left(\frac{u_{c_1}(\%)}{100}+1\right)=2,92\ dB \qquad (32)$$

4.2. Izračunavanje merne nesigurnosti pri merenju VF elektromagnetnih polja korišćenjem sistema sa spektralnim analizatorom i antenom

Komponente koje utiču na ukupnu mernu nesigurnost pri merenju sistemom sa spektralnim analizatorom i antenom date su u tabeli 3.

Iz tabele 3 se vidi da u slučaju kada su spektralni analizator i antena povezani kablom generalno postoji 13 komponenata koje utiču na ukupnu mernu nesigurnost. Naravno, uticaj i učešće ovih komponenata u ukupnoj nesigurnosti zavisi od konkretnog slučaja.

Kombinovana standardna nesigurnost za slučaj dat u tabeli 3 je:

$$u_{c_2}\left[dB\right]=\sqrt{c_1^2\cdot u_{x_1}^2+c_2^2\cdot u_{x_2}^2+\cdots+c_{13}^2\cdot u_{x_{13}}^2}=1,57\ dB \qquad (33)$$

Proširena merna nesigurnost izražena u decibelima uz usvojenu vrednost koeficijenta proširenja od 1,96 iznosi:

$$U_2=k\cdot u_{c_2}=1,96\cdot 1,57=3,08\ dB \qquad (34)$$

Proširena merna nesigurnost izražena u procentima je:

$$U_2\left[\%\right]=\left(10^{\frac{U_2[dB]}{20}}-1\right)\cdot 100=42,5\ \% \qquad (35)$$

Tabela 3. Komponente koje utiču na mernu nesigurnost pri merenju visokofrekventnih elektromagnetnih polja korišćenjem sistema sa antenom i spektralnim analizatorom.

Komponenta	**Faktor uticaja**	**Nesigurnost [dB]**	**Raspodela**	**Delilac**	**Standardna nesigurnost [dB]**
Spektralni analizator	Frekvencijski odziv	0,5	Normalna (k=2)	2	0,25
Spektralni analizator	Ulazno slabljenje	0,1	Normalna (k=2)	2	0,05
Spektralni analizator	Rezolucija propusnih opsega	0,05	Normalna (k=2)	2	0,03
Spektralni analizator	IF–pojačavač	0,5	Normalna (k=2)	2	0,25
Spektralni analizator	Temperaturni odziv	1	Uniformna	1,73	0,58
Spektralni analizator	Modulacioni odziv	0,5	Uniformna	1,73	0,29
Spektralni analizator	Nesigurnost očitavanja sa displeja	0,05	Uniformna	1,73	0,03
Kabl za antenu	Nesigurnost etaloniranja	0,2	Normalna (k=2)	2	0,10
Kabl za antenu	Frekvencijska interpolacija slabljenja kabla	0,1	Uniformna	1,73	0,06
Antena	Nesigurnost etaloniranja	1	Normalna (k=2)	2	0,50
Antena	Frekvencijska interpolacija faktora antene	0,1	Uniformna	1,73	0,06
Nesigurnost usled neusaglašenosti	Nesigurnost usled refleksija	0,8	U raspodela	1,41	0,57
Ponovljivost	Ograničena ponovljivost	2,3	Normalna (k=2)	2	1,15

U slučaju kada su spektralni analizator i antena direktno povezani generalno postoji 11 komponenata merne nesigurnosti (ne postoje dve komponente merne nesigurnosti koje se odnose na uticaj kabla), tako da kombinovana merna nesigurnost iznosi:

$$u_{c_3}\left[dB\right] = \sqrt{c_1^2 \cdot u_{x_1}^2 + c_2^2 \cdot u_{x_2}^2 + \cdots + c_{11}^2 \cdot u_{x_{11}}^2} = 1,56\ dB \qquad (36)$$

Proširena merna nesigurnost je:

$$U_3 = k \cdot u_{c_3} = 3,06\ dB \tag{37}$$

Proširena merna nesigurnost je približno jednaka proširenoj nesigurnosti dobijenoj u prethodnom slučaju, jer komponente nesigurnosti koje se odnose na uticaj kabla imaju malu vrednost.

U [6] je objašnjeno da vrednosti jačine polja izmerene sa nesigurnošću koja je manja ili jednaka 3 dB mogu direktno da se porede sa referentnim graničnim vrednostima koje propisuje pravilnik. Pri tome se smatra da je granična vrednost ispoštovana ukoliko je izmerena vrednost polja manja od referentne granične vrednosti. Vrednosti jačine polja izmerene instrumentima čija je proširena merna nesigurnost veća od 3 dB smatraju se informativnim, ali se mogu uzeti u obzir ako je izmerena vrednost polja manja od referentne granične vrednosti za iznos proširene merne nesigurnosti. To praktično znači da u ovom slučaju proširenu mernu nesigurnost treba dodati izmerenoj vrednosti jačine polja i tako dobijenu vrednost porediti sa referentnom vrednošću. Ukoliko je tako dobijena vrednost manja od referentne granične vrednosti, postoji velika verovatnoća da je nivo elektromagnetnog polja u dozvoljenim granicama. Ukoliko izmerena vrednost jačine polja i proširena merna nesigurnost u zbiru daju vrednost veću od referentne, potrebno je ponoviti merenje sa uređajem koji obezbeđuje veću tačnost.

5. Zaključak

Na osnovu proračuna datog u prethodnom poglavlju vidi se da je u slučaju merenja visokofrekventnog elektromagnetnog polja širokopojasnim mernim sistemom dobijena vrednost proširene merne nesigurnosti 2,92 dB. Kod merenja koje je zasnovano na primeni spektralnog analizatora i antene proširena merna nesigurnost je približno jednaka 3 dB u oba slučaja (kada su spektralni analizator i antena povezani kablom i kada su direktno povezani). S obzirom da dobijene vrednosti proširene merne nesigurnosti zadovoljavaju napred navedeni uslov, može se zaključiti da je u ovim slučajevima moguće direktno poređenje vrednosti jačine elektromagnetnog polja sa referentnim graničnim vrednostima.

Literatura

[1] Dragan Stanković, Predrag Osmokrović: „Praktikum laboratorijskih vežbi iz fizike”, Beograd, 2004.

[2] „Guidance on the Evaluation and Expression of Measurement Uncertainty for Electrical Testing Field”, 2002.

[3] BS EN 50413: „Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz)”, 2009.

[4] Branislav Vulević, Predrag Osmokrović: „Evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields”, 2010.

[5] Branislav Vulević: „Procena merne nesigurnosti kod određivanja nivoa elektromagnetskih polja u životnoj sredini”, Doktorska disertacija, Beograd, 2010.

[6] M. Borsero, G. Crotti, L. Anglesio, G. d' Amore: „Calibration and evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields”, 2001.

[7] Narda Safety Test Solution: „Uncertainty in the measurement of electromagnetic field with isotropic broadband sensor and selective E&H field analyzer”

[8] United Kingdom Accreditation Service: „The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement”, January, 2007.

[9] European co-operation for Accreditation: „Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration”, December, 1999.

Abstract: In this paper the entire procedure of evaluating uncertainty in measurement is explained. Parameters affecting expanded uncertainty in measurement of high frequency electromagnetic fields are also represented. At the end of the paper an example of evaluation of uncertainty in the case of measurement of high frequency electromagnetic field using broadband measurement system and system with antenna and spectrum analyzer is given.

Key words: uncertainty in measurement, high frequency electromagnetic field, broadband measurement, spectrum analyzer

Uncertainty in Measurement of High Frequency Electromagnetic Field

Rad primljen u uredništvo 26.11.2010. godine
Rad prihvaćen 30.11.2010. godine