

## **ISPITIVANJE NIVOVA ELEKTRIČNIH I MAGNETSKIH POLJA NISKIH UČESTANOSTI: JEDAN PRIMER ODREĐIVANJA MERNE NESIGURNOSTI**

B. VULEVIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd, Republika Srbija  
M. GRBIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd, Republika Srbija

### **1 UVOD**

Usled ubrzanog tehnološkog razvoja sve su više prisutni neželjeni nivoi električnih, magnetskih i elektromagnetskih polja u čovekovom okruženju. Iz navedenog razloga, stanovništvo traži informacije o nivoima izlaganja vremenski promenljivim električnim i magnetskim poljima u životnom prostoru. U opsegu niskih učestanosti (0 Hz do 100 kHz), pažnja se usmerava na ispitivanja u neposrednoj okolini sistema za prenos, distribuciju i potrošnju električne energije. U cilju adekvatne ocene izlaganja ljudi električnim i magnetskim poljima niskih učestanosti, procena merne nesigurnosti igra sve važniju ulogu.

Osnovna namena ovoga rada jeste prikaz jednog praktičnog rešenja za procenu merne nesigurnosti u slučaju merenja jačine električnog polja i magnetske indukcije niskih učestanosti u blizini nadzemnih vodova.

### **2 FAKTORI MERNE NESIGURNOSTI**

Najznačajniji faktori koji doprinose ukupnoj nesigurnosti merenja električnog i magnetskog polja niskih frekvencija jesu (1):

- tačnost i stabilnost korišćenog mernog instrumenta, koja se proverava etaloniranjem;
- neuniformnost (nehomogenost) polja u prostoru gde se postavlja sonda u odnosu na njene dimenzije;
- promena merenog polja u vremenu u odnosu na vremensku konstantu mernog uređaja;
- meteorološki uslovi u posmatranoj sredini – temperatura i vlažnost vazduha;
- ponovljivost merenja (isti uslovi merenja).

### **3 OSNOVNE TEHNIČKE KARAKTERISTIKE MERNOG UREĐAJA**

U tabeli 1 prikazane su osnovne tehničke karakteristike korišćenog analizatora elektromagnetskog polja EFA-300, proizvođača *Narda Safety Test Solutions*, koji omogućava merenje jačine električnog polja i magnetske indukcije. Važno je napomenuti da proizvođač opreme garantuje za navedene podatke (2). U posmatranom primeru radi se o podešavanju uređaja na režim rada pod nazivom *Field Strength Mode*, koji pokriva opseg niskih učestanosti od 5 Hz do 2 kHz. Navedeni režim rada podrazumeva automatsko očitavanje efektivnih vrednosti sinusnih signala.

Merna nesigurnost (tip B) koju garantuje proizvođač uključuje linearnost, izotropnost, frekvencijski odziv, kao i promene temperature i vlažnosti vazduha. Prilikom upotrebe mernog instrumenta treba imati u vidu ograničenja za ambijentalnu temperaturu (0–50°C) i vlažnost vazduha (< 95%) koje navodi proizvođač (2).

Tabela 1 – Osnovne karakteristike mernog uređaja EFA-300 – *Field Strength Mode*

	Jačina električnog polja	Magnetska indukcija
<b>Senzorski sistem</b>	Eksterna sonda	Eksterna sonda
<b>Opseg učestanosti (širokopojasni)</b>	5 Hz – 2 kHz	
<b>Merni opseg (nominalno)</b>	10 V/m do 100 kV/m	100 nT do 32 mT
<b>Nivo šuma, efektivna vrednost (tipično)</b>	0,7 V/m	4 nT
<b>Nesigurnost (tipično)</b>	± 3% (≥ 5 V/m)	± 3% (≥ 40 nT)

#### 4 MERNA NESIGURNOST KOD MERENJA JAČINE ELEKTRIČNOG POLJA

Merenje jačine električnog polja zahteva pažnju, jer postoji mnogo faktora koji utiču na rezultat. Najznačajniji među ovim faktorima jesu (3,4):

- tačnost i stabilnost mernog instrumenta,
- blizina ispitivača,
- stalak za pozicioniranje sonde,
- vlažnost vazduha,
- temperatura,
- prisustvo harmonijskih komponenata izvora polja,
- neuniformnost polja i
- korona.

Komponenta merne nesigurnosti koja je posledica tačnosti i stabilnosti mernog instrumenta u konkretnom primeru iznosi ± 3% (tabela 1). Dakle, to je vrednost za koju garantuje proizvođač opreme, a verifikuje se etaloniranjem. Ova vrednost obuhvata i promene temperature i vlažnosti vazduha u definisanim granicama.

Od suštinskog značaja za smanjenje ukupne merne nesigurnosti je smanjenje uticaja ispitivača na mernu sondu. Prema tehničkom vodiču radne grupe C4.203 Međunarodnog saveta CIGRE (5), kvantitativni rezultati uticaja ispitivača na rezultate merenja pokazuju da je pri merenju na visini od 1 m greška u merenju jačine električnog polja manja od 5% kada je ispitivač udaljen od merne sonde 1,5 m. U slučaju rastojanja od 3 m između ispitivača i sonde, greška merenja je manja od 1%, dok je za rastojanja veća od 4 m ovaj uticaj potpuno zanemarljiv.

Na merenje električnog polja takođe utiču materijal i oblik stalka. Činjenica da je stalak napravljen od izolacionog materijala nije dovoljna da garantuje korektne merne rezultate, tako da treba obratiti pažnju da permitivnost ovog materijala bude približna permitivnosti vazduha. Što se tiče oblika stalka, pokazalo se da stalak u vidu tronošca unosi manju grešku od drugih vrsta stalaka. U našem slučaju, prilikom merenja jačine električnog polja korišćen je drveni stalak u obliku tronošca. Isti stalak je korišćen i prilikom etaloniranja, pri čemu se pokazalo da je ukupna merna nesigurnost sistema za merenje jačine električnog polja manja od ± 3%. Na osnovu toga se može zaključiti da korišćeni stalak ne unosi dodatnu mernu nesigurnost.

Kada je potrebno proceniti harmonijski sastav polja, neophodno je koristiti merni instrument koji ima mogućnost merenja harmonika. Proizvođač merne opreme najčešće daje podatak za koji stepen učešća harmonika važi deklarirana tačnost. Prilikom svih merenja jačine električnog polja u blizini dalekovoda dominantna frekvencija je 50 Hz, tako da se prisustvo harmonijskih komponenata prilikom merenja može zanemariti.

Pošto je merni instrument etaloniran u homogenom (uniformnom) polju, greška se može javiti kada se vrši merenje polja koje nije uniformno. Relativna devijacija između izmerenog i stvarnog polja u centru sonde može se smatrati zanemarljivom ako je rastojanje od objekta koji stvara poremećaj bar pet puta veće od dijagonale merne sonde. Kako bi procena bila na strani sigurnosti, za komponentu merne nesigurnosti usled uticaja neuniformnosti usvojena je vrednost od 10% na osnovu dosadašnjeg iskustva.

Korona stvara lokalnu oblast jonizovanog vazduha u blizini provodnika pod visokim naponom. Zbog toga se ekvivalentni prečnik provodnika povećava a lokalno električno polje smanjuje. Kao posledica toga, električno polje na nivou zemlje se neznatno povećava sa povećanjem intenziteta korone. Kao što je poznato, pojava korone je najizraženija pri kišovitom vremenu i u uslovima velike vlažnosti vazduha. Uobičajeno je da se merenja jačine električnog polja ne vrše u navedenim uslovima, tako da se u ovom primeru uticaj korone može zanemariti.

Prema analizama iz literature (1), faktor koji takođe znatno doprinosi mernoj nesigurnosti jeste kratkoročna ponovljivost merenja (nesigurnost tipa A). Ponovljivost rezultata merenja je varijabilnost rezultata merenja dobijena od strane istog ispitivača na istom mernom mestu i pri nepromenjenim uslovima. Ponovljivost merenja se izražava kao procenat koji se dobija na osnovu odnosa standardne devijacije i srednje vrednosti rezultata merenja. Na osnovu dosadašnjeg iskustva iz prakse, vrednost ponovljivosti merenja za slučaj električnih i magnetskih polja niskih učestanosti u blizini nadzemnih vodova manja je od 10%.

Uzimajući u obzir sve prethodno navedeno, u tabeli 2 prikazana je procena budžeta merne nesigurnosti za slučaj merenja jačine električnog polja niskih učestanosti u blizini nadzemnih vodova mernim uređajem EFA-300.

Tabela 2 – Budžet merne nesigurnosti – jačina električnog polja niskih učestanosti u blizini nadzemnih vodova

Faktor uticaja	Procena	Nesigurnost [%]	Raspodela (delilac)	Standardna nesigurnost $u(x_i)$ [%]
<b>Tačnost i stabilnost mernog instrumenta</b>	Tehnički podaci proizvođača	3	Pravougaona (1,73)	1,73
<b>Efekat blizine ispitivača</b>	CIGRE (5)	5	Pravougaona (1,73)	2,89
<b>Neuniformnost polja</b>	Procena ispitivača	10	Pravougaona (1,73)	5,77
<b>Ponovljivost</b>	Serijski rezultati merenja	10 (najgori slučaj)	Normalna (1)	10
Kombinovana standardna nesigurnost $u_C$ [%]				12
Faktor proširenja $k$				1,96
<b>Proširena merna nesigurnost <math>U</math> [%]</b>				<b>23,5</b>

## 5 MERNI NESIGURNOST KOD MERENJA MAGNETSKE INDUKCIJE

Na mernu nesigurnost u slučaju merenja magnetske indukcije niskih učestanosti mogu uticati sledeći faktori, koji su detaljnije opisani u literaturi (3,4):

- tačnost i stabilnost mernog instrumenta,
- pokretanje senzora,
- vremenska konstanta mernog instrumenta,
- neuniformnost raspodele magnetskog polja,
- preslušavanje, neortogonalnost i relativni položaj kalemova sonde,
- ambijentalno magnetsko polje,
- temperatura i vlažnost vazduha i
- prisustvo harmonijskih komponenata izvora polja.

Kao što se može primetiti, neki faktori koji utiču na merenje jačine električnog polja nisu značajni kada se radi o merenjima magnetske indukcije (npr. stalak ili blizina ispitivača). Metalni objekti, posebno feromagnetski materijali, mogu uticati na raspodelu magnetskog polja pa bi trebalo izbegavati merenja u njihovoj blizini.

Kao i kod električnog polja, komponenta merne nesigurnosti koja je posledica tačnosti i stabilnosti mernog instrumenta iznosi  $\pm 3\%$ , prema podacima garantovanim od strane proizvođača. Ova vrednost takođe obuhvata promene temperature i vlažnosti vazduha u definisanim granicama.

Sonde za merenje magnetskog polja su osetljive na brze pokrete, kao i promene u Zemljinom statičkom magnetskom polju. U cilju dobijanja tačnih rezultata, preporučuje se držanje mernog instrumenta u statičnoj poziciji nekoliko sekundi kako bi se ovaj uticaj sveo na minimum. Kako bi proračun bio na strani sigurnosti usvaja se vrednost od 2% za komponentu merne nesigurnosti koja je posledica pokretanja senzora (procena ispitivača).

Iznenadne promene merenog polja mogu da dovedu do grešaka pri merenju zbog vremenske konstante mernog instrumenta. Do pogrešnog očitavanja može doći ako je pokazivanje mernog instrumenta očitano odmah nakon postavljanja sonde u jako polje ili ako je pokazivanje mernog instrumenta zabeleženo odmah nakon pomeranja sonde. Greške u merenju se takođe mogu javiti u slučaju promene polja usled brzih fluktuacija opterećenja u odnosu na brzinu odziva mernog instrumenta. U svakom slučaju, vremenska konstanta mernog instrumenta treba da bude naznačena od strane proizvođača opreme (5). Kako bi proračun bio na strani sigurnosti, usvaja se vrednost od 2% za ovu komponentu merne nesigurnosti (procena ispitivača).

Kao što je poznato, prisustvo provodnih i feromagnetskih objekata utiče na raspodelu magnetskog polja, što unosi dodatnu grešku u merenje. Iz navedenog razloga, ove objekte treba udaljiti od merne sonde tokom sprovođenja merenja kada je god to moguće. U suprotnom, ovaj uticaj treba uvažiti kao dodatnu komponentu merne nesigurnosti. Ako je sonda dovoljno daleko od objekta (bar 1 m), može se smatrati da je ova komponenta zanemarljiva (5).

Neortogonalnost tri kalema koji čine sondu, preslušavanje i razlike u osjetljivosti između njih mogu da dovedu do dodatne nepreciznosti, što se može utvrditi prilikom etaloniranja. Ukoliko se merenje magnetske indukcije vrši ispod dalekovoda, instrument treba držati tako da pri svim merenjima ima istu orijentaciju u odnosu na nadzemni vod, čime se postiže da ova greška ima konstantnu vrednost u toku merenja. Prilikom etaloniranja proverava se ortogonalnost tri kalema, i u slučaju da je potvrđena, ovaj uticaj se može smatrati zanemarljivim.

Vrednost ambijentalnog magnetskog polja se može odrediti merenjem kada izvor polja nije opterećen, ukoliko je to ikako moguće. Ovaj uticaj se može uvažiti primenom korekcionog faktora za koji se usvaja pravougaona raspodela verovatnoće. Kada su nadzemni vodovi u pitanju, merenje ambijentalnog magnetskog polja u najvećem broju slučajeva nije moguće, pošto su dalekovodi u pogonu. Kako bi proračun bio na strani sigurnosti, usvaja se vrednost od 5% za ovu komponentu merne nesigurnosti (procena ispitivača).

Tokom merenja u blizini nadzemnih vodova, dominantna frekvencija iznosi 50 Hz, tako da se prisustvo harmonika može zanemariti.

Uzimajući u obzir sve gore navedeno, u tabeli 3 prikazana je procena budžeta merne nesigurnosti za slučaj merenja magnetske indukcije niskih učestanosti u blizini nadzemnih vodova mernim uređajem EFA-300.

Tabela 3 – Budžet merne nesigurnosti – magnetska indukcija niskih učestanosti u blizini nadzemnih vodova

Faktor uticaja	Procena	Nesigurnost [%]	Raspodela (delilac)	Standardna nesigurnost $u(x_i)$ [%]
<b>Tačnost i stabilnost mernog instrumenta</b>	Tehnički podaci proizvođača	3	Pravougaona (1,73)	1,73
<b>Pokretanje senzora</b>	Procena ispitivača	2	Pravougaona (1,73)	1,15
<b>Vremenska konstanta mernog instrumenta</b>	Procena ispitivača	2	Pravougaona (1,73)	1,15
<b>Ambijentalno magnetsko polje</b>	Procena ispitivača	5	Pravougaona (1,73)	2,89
<b>Ponovljivost</b>	Serijski rezultati merenja	10 (najgori slučaj)	Normalna (1)	10
Kombinovana standardna nesigurnost $u_c$ [%]				10,7
Faktor proširenja $k$				1,96
<b>Proširena merna nesigurnost <math>U</math> [%]</b>				<b>21</b>

## 6 ZAKLJUČAK

Dobijene vrednosti proširene merne nesigurnosti u posmatranom primeru, prikazane u tabelama 2 i 3, veće su u odnosu na odgovarajuće vrednosti iz literature (5). To predstavlja potvrdu da je prikazani proračun na strani sigurnosti, što je sa stanovišta zaštite od nejonizujućih zračenja od izuzetne važnosti. Međutim, striktno insistiranje na većem broju faktora koji utiču na mernu nesigurnost može da usloži proces određivanja nivoa električnih i magnetskih polja na licu mesta, što je sa praktičnog stanovišta merenja nedopustivo. Generalno, svi navedeni faktori koji utiču na mernu nesigurnost treba da budu identifikovani i, kada je to moguće, njihov efekat treba drastično umanjiti.

## LITERATURA

- (1) Vulević B, Osmokrović P, 2010, "Evaluation of Uncertainty in the Measurement of Environmental Electromagnetic Fields", *Radiation Protection Dosimetry*, 141(2), 173–177.
- (2) EFA-200/-300EM Field Analyzer, 2006, Operating Manual, NARDA Safety Test Solutions.
- (3) Vulević B, Grbić M, Osmokrović P, 2014, "Survey of ELF Electric and Magnetic Field Levels – One Example for Determining of the Measurement Uncertainty", *Journal of Radioprotection Research*, 2(2), 10–14.
- (4) Grbić, M, 2012, „Merenje i proračun električnog i magnetskog polja nadzemnih vodova u cilju procene izloženosti ljudi ovim poljima”, master rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu.
- (5) CIGRE, 2009, "Technical guide for measurement of Low Frequency Electric and Magnetic Fields near Overhead Power Lines", Working Group C4.203.