

## MERENJE JAČINA ELEKTRIČNOG I MAGNETSKOG POLJA U TS 400 KV/110 kV "SUBOTICA 3"

Mladen Šupić, Momčilo Petrović, Aleksandar Pavlović, Dejan Hrvić  
*Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd*

**Sadržaj:** U radu je dat prikaz izmerenih vrednosti jačina električnog i magnetskog polja na karakterističnim mestima u TS 400/110 kV "Subotica 3". Merenje i tumačenje dobijenih rezultata izvršeno je prema postojećim međunarodnim standardima i preporukama kojima je regulisana bezbednost pri izlaganju ljudi električnom i magnetskom polju niske frekvencije.

**Ključne reči:** električno polje, magnetsko polje, merenje.

### 1. UVOD

Elektromagnetsko polje niske frekvencije spada u vremenski sporo promenljivo polje. U području niskih frekvencija moguće je analizirati elektromagnetsko polje kao dva raspregnuta polja, vremenski sporo promenljivo (kvazistatičko) električno polje i vremenski sporo promenljivo (kvazistatičko) magnetsko polje.

U okolini provodnika kroz koje protiče vremenski promenljiva električna struja javlja se vremenski promenljivo električno polje i vremenski promenljivo magnetsko polje.

Fizička veličina koja opisuje električno polje je  $\vec{E}$  -vektor jačine električnog polja.

U međunarodnom sistemu mernih jedinica (SI) jedinica za jačinu električnog polja je  $\frac{V}{m}$  (volt po metru).

Uobičajeno je korišćenje veće jedinice  $\frac{kV}{m} = 10^3 \frac{V}{m}$  (kilovolt po metru)

Fizička veličina koja opisuje magnetsko polje je vektor jačine magnetskog polja- $\vec{H}$ .

U međunarodnom sistemu mernih jedinica (SI) jedinica za jačinu magnetskog polja je  $\frac{A}{m}$  (amper po metru).

U standardima i preporukama je uobičajeno da se koristi druga fizička veličina koja opisuje magnetsko polje-vektor magnetske indukcije  $\vec{B}$ .

U međunarodnom sistemu mernih jedinica (SI) jedinica za magnetsku indukciju je  $T$  (tesla).

Uobičajeno je korišćenje manje jedinice  $\mu T = 10^{-6} T$  (mikrotesla)

Između ove dve fizičke veličine u vakuumu (i u vazduhu) postoji odnos preko relacije:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \quad (1)$$

gde je:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{H}{m} \right]$  -magnetska permeabilnost vakuuma (vazduha), konstantna veličina.

Vektorske fizičke veličine su definisane svojim intenzitetom, pravcem i smerom.

Pravac i smer određuju položaj vektora u prostoru. Za potrebe analize bezbednosti pri izlaganju živih organizama električnom i magnetskom polju niskih frekvencija se ne uzima u obzir pravac i smer električnog i magnetskog polja.

U standardima i preporukama je uobičajeno da se koriste termini "jačina električnog polja" umesto "intenzitet vektora jačine električnog polja" i "magnetska indukcija" umesto "intenzitet vektora magnetske indukcije" jer vektorska priroda ovih fizičkih veličina nije bitna za procenu bioloških efekata.

Za ocenu biološkog efekta električnog i magnetskog polja niskih frekvencija potrebno je poznavati vrednosti intenziteta vektora jačine električnog polja i magnetske indukcije, kao i njihovu promenu u vremenu.

U toku 2004. godine izvršena su merenja jačine električnog polja i magnetske indukcije u više transformatorskih stanica JP "Elektroistok". U radu su dati rezultati merenja u TS 400/110 kV "Subotica 3".

## 2. METODE MERENJA

Metode merenja su kratko opisane, a standardima su dati zahtevi koje moraju da ispune uređaji za merenje jačine električnog polja i magnetske indukcije, kao i potpuni opis metoda merenja.

### 2.1. Metoda merenja jačine magnetskog polja (magnetske indukcije) niske frekvencije

U području niskih frekvencija magnetsku indukciju je moguće meriti pomoću visokoosetljivog indukcionog kalema koji obezbeđuje frekventno zavisani signal srazmeran efektivnoj vrednosti magnetske indukcije u širokom dinamičkom opsegu. S obzirom da pravac i smer vektora magnetske indukcije nisu unapred poznati neizbežno je izotropsko merenje.

Senzor za merenje magnetske indukcije (merna sonda) koji zadovoljava ove zahteve se sastoji od tri indukciona kalema postavljena međusobno normalno u prostoru čime se obezbeđuje istovremeno merenje komponenata vektora u pravouglom koordinatnom sistemu. Efektivna (srednja geometrijska) vrednost magnetske indukcije je jednaka geometrijskoj sredini svoje tri komponente. Napon koji se indukuje u kalemovima je srazmeran odgovarajućim komponentama vektora magnetske indukcije i površini kalemova.

Izotropnost ovakvog senzora zavisi od preciznosti kojom su kalemovi postavljeni međusobno normalno u prostoru. Senzor mora biti zaštićen od uticaja električnog polja koje normalno postoji istovremeno sa magnetskim poljem (elektromagnetsko polje). Poznato je da se vrednosti prirodne magnetske indukcije kreću u granicama 50 nT÷70 nT a da prema preporukama Svetske zdravstvene organizacije trajno izlaganje magnetskoj indukciji od 5 mT predstavlja visok rizik po zdravlje. Ove vrednosti mogu poslužiti kao orijentacione granice potrebnog mernog opsega senzora za merenje magnetske indukcije.

Standardi [6] i [8] zahtevaju da površina sonde kojom se meri magnetska indukcija iznosi  $100 \text{ cm}^2$  da bi se obezbedila zahtevana preciznost merenja.

## 2.2. Metoda merenja jačine električnog polja niske frekvencije

Merenje jačine električnog polja niske frekvencije je mnogo komplikovanije u odnosu na merenje magnetske indukcije zbog činjenice da prisustvo bilo kog objekta (pa i senzora za merenje) deformiše polje i menja njegove karakteristike. U idealnom slučaju senzor za merenje mora biti izotropski i dovoljno malih dimenzija tako da efekat nehomogenosti polja, usled prisustva senzora, bude zanemarljiv. Eksperimentalno je dokazano da se električno polje deformiše ako je osoba na rastojanju od oko 7 m od mernog mesta tako da je praktično neophodno obezbediti daljinsko upravljanje senzorom, bez prisustva rukovaoca.

Senzor za merenje je moguće konstruisati na kapacitivnom principu detekcije što omogućava merenje kapacitivne struje koja je srazmerna električnom polju. Tri merne kapacitivnosti je potrebno postaviti međusobno normalno u prostoru čime se obezbeđuje istovremeno merenje komponentata vektora polja u pravouglom koordinatnom sistemu. Efektivna (srednja geometrijska) vrednost jačine električnog polja je jednaka geometrijskoj sredini svoje tri komponente. Struja kroz dielektrik mernih kapacitivnosti je srazmerna odgovarajućim komponentama vektora jačine električnog polja.

## 3. MERNA OPREMA

Uređaj sa kojim su izvršena merenja je sistem koji se sastoji od osnovne jedinice i dve eksterne sonde za izotropsko merenje jačine električnog polja i magnetske indukcije.

Izgled kompleta za merenje prikazan je na slici 1



Slika 1-Komplet za merenje električnog i magnetskog polja

Sonda za merenje jačine električnog polja omogućava merenje istovremeno u sve tri ose u prostoru. Sonda je oblika kocke i ima sopstveno napajanje tako da je omogućen njen autonoman rad bez prisustva rukovaoca (zahtev standarda CEI/IEC 61786).

Konstrukcija i karakteristike zadovoljavaju zahteve standarda CEI/IEC 61786 koji se odnose na opremu za merenje.

Sonda za merenje magnetske indukcije omogućava merenje istovremeno u sve tri ose u prostoru. Sonda je sfernog oblika, površine 100 cm<sup>2</sup>. Konstrukcija i karakteristike zadovoljavaju zahteve standarda [6] i [8] koji se odnose na opremu za merenje.

#### 4. OGRANIČENJA ZA IZLAGANJE LJUDI VREMENSKI PROMENLJIVOM ELEKTRIČNOM I MAGNETSKOM POLJU

Preporuke [2,3,4,5,6] definišu osnovna ograničenja (*basic restrictions*) i referentne nivoe (*reference levels*) za potrebe ograničenja izlaganja ljudi vremenski promenljivom električnom i magnetskom polju.

Osnovna ograničenja (*basic restrictions*) za izlaganje ljudi vremenski promenljivom električnom i magnetskom polju su zasnovana direktno na zdravstvenim i biološkim efektima. U području niskih frekvencija (4 Hz÷1 kHz) fizička veličina koja se koristi za određivanje osnovnih ograničenja je gustina električne struje (*J*) čija je vrednost određena tako da se spreče negativni efekti na funkcionisanje nervnog sistema. Pri određenju ove vrednosti uzeta je u obzir, na stranu sigurnosti, promenljivost individualne osetljivosti, uslova sredine, starosnog doba i zdravstvenog stanja.

Referentni nivoui (*reference levels*) za potrebe ograničenja izlaganja ljudi vremenski promenljivom električnom i magnetskom polju su uspostavljeni da odrede da li postoji mogućnost prekoračenja osnovnih ograničenja. U području niskih frekvencija (25 Hz÷800 Hz) fizičke veličine koje se koriste za određivanje referentnih nivoa su jačina električnog polja (*E*) i magnetska indukcija (*B*). Vrednosti referentnih nivoa su računski izvedene iz osnovnih ograničenja. Referentni nivoui su uspostavljeni sa svrhom upoređivanja sa vrednostima veličina koje se mogu meriti i predstavljaju granične vrednosti za izlaganje ljudi promenljivom električnom i magnetskom polju-**granice izlaganja**.

Poštovanje preporučenih referentnih nivoa obezbeđuje poštovanje osnovnih ograničenja. U slučaju da vrednosti merenih veličina prevazilaze referentne nivoe to ne mora obavezno značiti da osnovna ograničenja nisu zadovoljena.

Granice izlaganja se posebno definišu za javnu bezbednost i za zaštitu na radu. Za javnu bezbednost su ove vrednosti niže tj. zahtevi preporuka su oštiji jer je vreme izlaganja elektromagnetskom polju neograničeno (24 h dnevno). Vrednosti koje se preporučuju iz oblasti zaštite na radu su više, tj. zahtevi preporuka su liberalniji jer se smatra da je izlaganje elektromagnetskom polju ograničeno (8 h u toku radnog dana) ili je izlaganje kratkotrajno.

Vrednosti koje su navedene odnose se na izlaganje čitavog tela dok su vrednosti višestruko veće ako se izlažu samo pojedini delovi tela.

U Tabeli 1 date su granice izlaganja ljudi vremenski promenljivom električnom i magnetskom polju prema preporukama navedenim u [2], i to one koje se odnose na javnu bezbednost i za frekvenciju polja 50 Hz.

Tabela 1 Granice izlaganja ljudi vremenski promenljivom električnom i magnetskom polju

Preporuka	Javna bezbednost		Zaštita na radu	
	<i>E</i> [kV/m]	<i>B</i> [μT]	<i>E</i> [kV/m]	<i>B</i> [μT]
ICNIRP 98	5	100	10	500
1999/519/EC, 1999	5	100	10	500

## 5. REZULTATI MERENJA I ANALIZA

Podaci o strujama opterećenja nadzemnih vodova u vreme merenja na dan 12.05.2004., zabeleženi su na licu mesta iz pogonske evidencije i dati su u Tabeli 2.

*Tabela 2-Struje opterećenja nadzemnih vodova*

vod	T1'	T1''	T2'	T2''	444	160/3	135/2
I [A]	143	497	164	569	316	246	24
vod	1101	1102	135/1	1003	1004	1155	133/3
I [A]	143	8	105	87	19	300	157

Merenje jačine električnog polja i magnetske indukcije u unutrašnjosti TS 400/110 kV "Subotica 3" obavljeno je duž transportnih staza, kao i na nekim karakterističnim mernim mestima. Na svakom mernom mestu sprovedeno je merenje efektivnih vrednosti jačine električnog polja i magnetske indukcije na visini 1.7 m od tla uz istovremeno merenje frekvencije polja. U RP 400 kV i RP 110 kV je sproveden veliki broj merenja sa malim međusobnim rastojanjem mernih mesta. Merenja su sprovedena i u komandnoj zgradi.

Na transportnoj stazi u RP 110 kV izmerene su vrednosti jačine električnog polja koje ne prelaze 3.15 kV/m, dok magnetska indukcija nije veća od 12.4  $\mu$ T.

Na transportnoj stazi u RP 400 kV izmerene su vrednosti jačine električnog polja koje ne prelaze 5.5 kV/m, dok magnetska indukcija nije veća od 3  $\mu$ T.

U komandnoj zgradi merene su zanemarljivo male vrednosti električnog polja i magnetske indukcije.

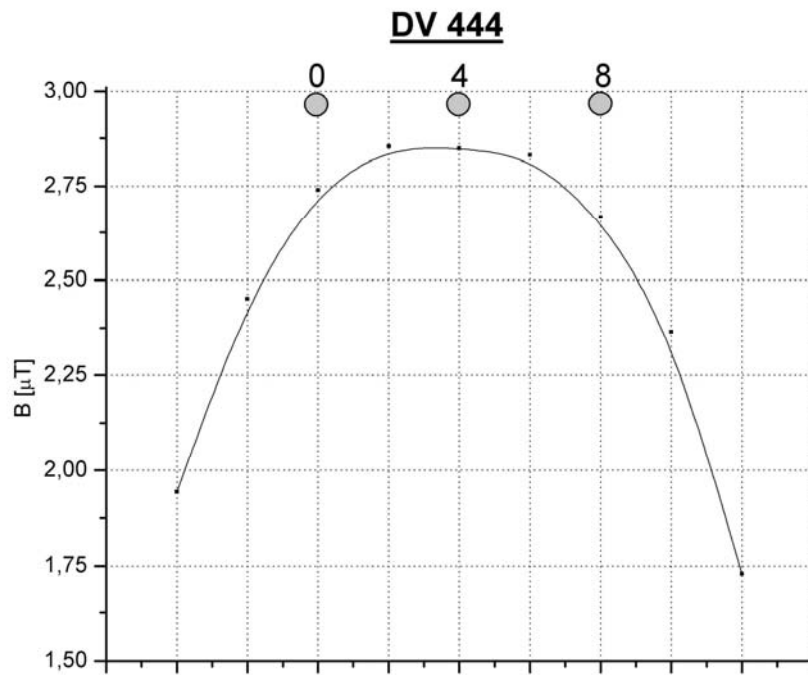
Izmerene efektivne vrednosti jačine električnog polja i magnetske indukcije na mernim mestima ispod izabranih provodnika vodova čija su opterećenja data u tabeli 2. su grafički predstavljene na slikama 2,3,4 i 5.

Na graficima se jasno vidi zavisnost magnetskog polja od opterećenja provodnika. Jačina električnog polja naravno zavisi od naponskog nivoa, ali i od položaja mernog mesta u odnosu na fazne provodnike.

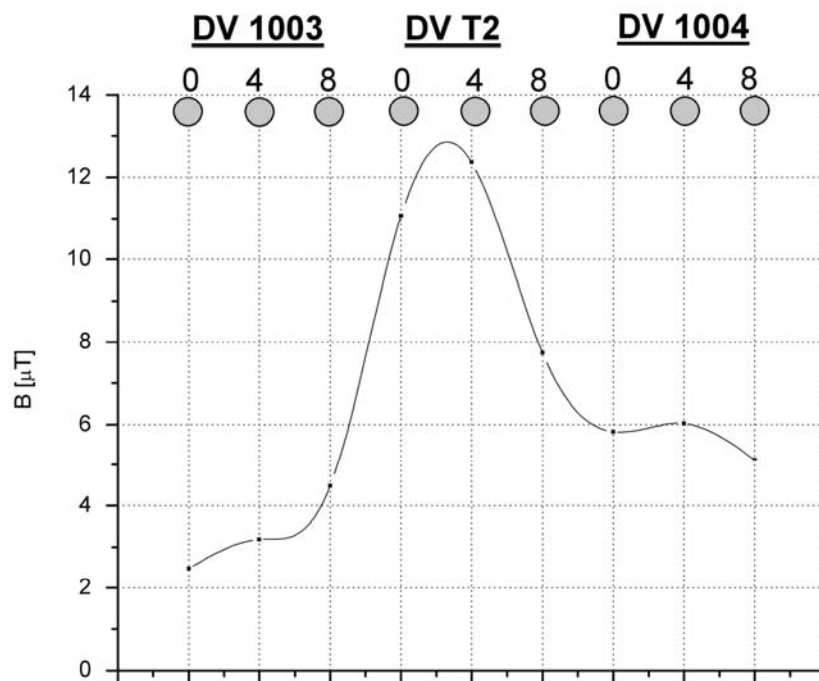
Visoke vrednosti jačine električnog polja izmerene su na mernim mestima koja se nalaze u RP 400 kV neposredno ispod faznih provodnika, na mestima gde je visina faza iznad tla najmanja u blizini prekidača, rastavljača, mernih transformatora i potpornih izolatora. Najveća izmerena vrednost jačine električnog polja iznosi 12 kV/m (oko 20% više u odnosu na granicu izlaganja od 10 kV/m iz Tabele 1, prema [6]).

Na ovim mestima u normalnom pogonu se osoblje ne zadržava u dužem vremenskom periodu. Sve izmerene vrednosti jačine električnog polja na transportnim stazama su znatno niže i ispod granice izlaganja od 10 kV/m.

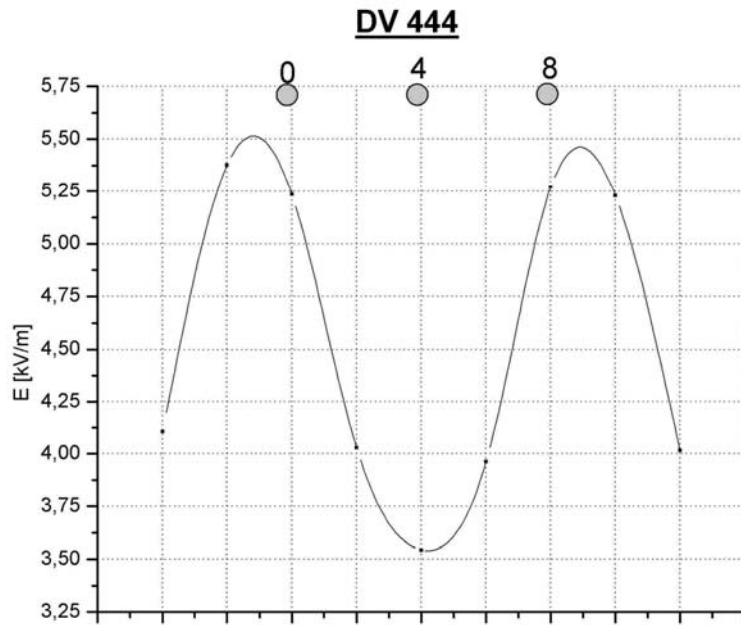
Najveća vrednost magnetske indukcije izmerena je u blizini transformatora 400/110 kV i iznosi oko 14  $\mu$ T (2.86% u odnosu na granicu izlaganja od 500  $\mu$ T iz Tabele 1, prema [6]).



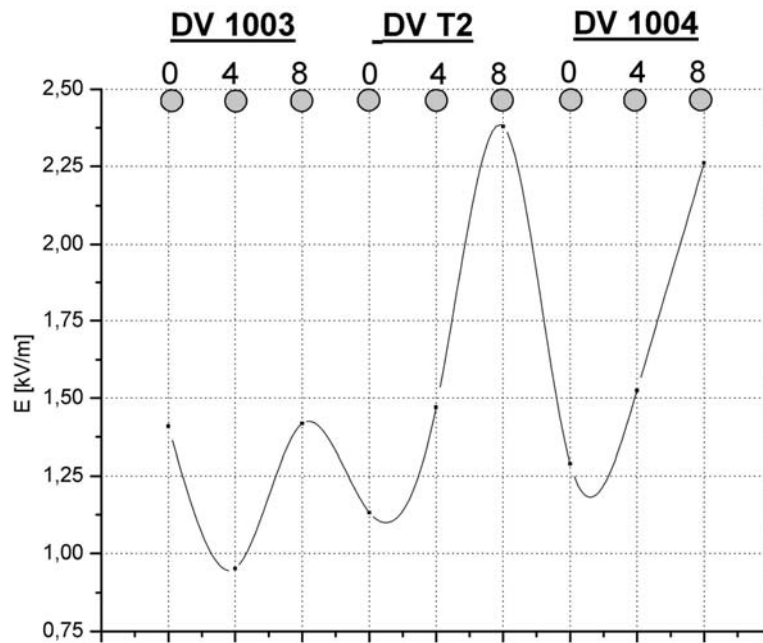
Slika 2.-Magnetska indukcija na transparentnoj stazi ispod voda 400 kV br.444



Slika 3. -Magnetska indukcija duž transportne staze ispod vodova 110 kV



Slika 4.- Jačina električnog polja duž transportne staze ispod voda 400 kV br.444



Slika 5.-Jačina električnog polja duž transportne staze ispod vodova 110 kV

## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu izmerenih vrednosti jačine električnog polja i magnetske indukcije može se utvrditi da su u TS 400/110 kV "Subotica 3" na svim mernim mestima izmerene vrednosti jačine vremenski promenljivog električnog polja manje od granične vrednosti za izlaganje ljudi promenljivom električnom polju za oblast javne bezbednosti koje preporučuje Međunarodna komisija za zaštitu od zračenja [6], osim na mernim mestima koja su van transportnih staza u blizini faznih provodnika. Kako na tim mestima nema zadržavanja ljudi u dužim vremenskim periodima, ove vrednosti nisu zabrinjavajuće.

Na svim mernim mestima izmerene vrednosti magnetske indukcije su znatno manje od granične vrednosti za izlaganje ljudi promenljivom magnetskom polju za oblast javne bezbednosti koje preporučuje Međunarodna komisija za zaštitu od nejonizujućih zračenja [6].

### LITERATURA

- [1] ANSI/IEEE Std 644-1987 (Revision of IEEE Std. 644-1979);
- [2] "Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields", *International Non-ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association* (January 1990.);
- [3] *Human exposure to electromagnetic fields Low frequency (0 Hz to 10 kHz), European prestandard*, ENV 50166-1, January 1995., European Committee for Electrotechnical Standardization;
- [4] *Limits for human exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields in the frequency range up to 300 GHz*, World Health Organization, November 2001;
- [5] Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 Hz), 1999/519/EC, 1999;
- [6] *Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings*-Special requirements for instruments and guidance for measurements, CEI/IEC 61786:1998;
- [7] *Measurement of power frequency electric fields*, CEI/IEC 833:1987;
- [8] *Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern-Definitionen, Meß- und Berechnungsverfahren*, DIN VDE 0848-1, 2000;
- [9] IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines, ANSI/IEEE Std 644-1987;
- [10] *Magnetska polja-vodič za zdravlje i zaštitu*, Program Ujedinjenih nacija za životnu sredinu, Međunarodno udruženje za zaštitu od zračenja, Svetska zdravstvena organizacija, Maj 1995;
- [11] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), ICNIRP Guidelines, 1998;
- [12] Mladen Šupić, Momčilo Petrović, Aleksandar Pavlović, "Merenje jačine magnetskog polja u HE "Đerdap 1", *Zbornik radova Elektrotehničkog instituta "Nikola Tesla"*, Beograd, 2003.



**Abstract:** The paper presents some measurement results of electric and magnetic field strength at The Transformer Station “Subotica 3”, performed by The Electrical Engineering Institute “Nikola Tesla”, Belgrade. Measurement results are reviewed concerning a few international standards.

#### **MEASUREMENT OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD STRENGTH**

Mladen Šupić, Momčilo Petrović, Aleksandar Pavlović, Dejan Hrvic