

MERENJA JAČINA ELEKTRIČNOG POLJA I MAGNETSKE INDUKCIJE ISPOD NADZEMNIH VODOVA VISOKIH NAPONA

Dejan Hrvić, Momčilo Petrović, Vojin Kostić
Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd

Kratak sadržaj: U radu je dat prikaz izmerenih vrednosti jačina električnog polja i magnetske indukcije u zonama ispod nadzemnih vodova visokih napona (110 kV, 220 kV, 400 kV) sa različitim tipovima dalekovodnih stubova (portal, jela, bure). Merenja i tumačenje dobijenih rezultata izvršena su prema postojećim međunarodnim standardima i preporukama kojima je regulisana bezbednost pri izlaganju ljudi električnom i magnetnom polju niske frekvencije, sa posebnim osvrtom na domaći Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja, koji je usvojen u maju 2009.

Ključne reči: električno polje, magnetno polje, nadzemni vodovi, merenje.

1. UVOD

Elektromagnetska polja svih frekvencija predstavljaju jedan od najprisutnijih i najbrže rastućih uticaja na životnu sredinu, o kojem se neprestano povećava zabrinutost najšire javnosti i šire brojne spekulacije. Elektromagnetsko polje niske frekvencije (kao što je industrijska frekvencija 50 Hz) spada u vremenski sporo promenljivo polje i moguće ga je analizirati kao dva raspregnuta polja: vremenski sporo promenljivo (kvazistatičko) električno polje i vremenski sporo promenljivo (kvazistatičko) magnetsko polje.

Visokonaponski nadzemni elektroenergetski vodovi (dalekovodi), kada su pod naponom, izvori su električnog polja koje je srazmerno naponu, a kada kroz njih protiče struja izvori su magnetskog polja koje je srazmerno struji. Fizička veličina kojom se opisuje električno polje je \vec{E} -vektor jačine električnog polja (jedinica V/m). Fizička veličina kojom se opisuje magnetsko polje je vektor jačine magnetskog polja- \vec{H} (jedinica A/m), mada se u standardima i preporukama uglavnom koristi druga fizička veličina -vektor magnetske indukcije \vec{B} (jedinica T).

Za potrebe analize bezbednosti pri izlaganju živih organizama električnom i magnetskom polju niskih frekvencija ne uzima se u obzir pravac i smer električnog i magnetskog polja. Zbog toga je uobičajeno da se u standardima i preporukama 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.

2. METODE MERENJA

U ovom radu opis metoda merenja je pojednostavljen. Standardi [1], [2] i [3] daju potpuni opis metoda i uputstva za merenja. Pridržavanje zahteva standarda je obavezno

jer obezbeđuje merenja čiji se rezultati mogu porediti sa granicama izlaganja (referentnim nivoima) koje definišu preporuke [4], [7] i [8].

2.1. Metoda merenja jačine električnog polja niske frekvencije

Merenja su sprovedena na visini 1.7 m iznad tla.

Kod svakog nadzemnog voda sprovedeno je više merenja sa mernim mestima raspoređenim duž pravca normalnog na trasu voda (lateralni profil), približno na sredini raspona, odnosno na mestu gde je najveći ugib provodnika i gde su visine faza najniže.

Zbog činjenice da prisustvo bilo kog objekta (pa i senzora za merenje) deformiše električno polje i menja njegove karakteristike, bilo je neophodno obezbediti daljinsko upravljanje sensorom (bez prisustva rukovaoca). Iz istih razloga, gore navedeni pravci su izabrani tako da je prostor duž njih bio slobodan (koliko je to moguće), odnosno bez prisustva drugih nadzemnih vodova, stubova, drveća ili drugih objekata. Takođe je bilo poželjno da površina tla duž izabranih pravaca bude ravna.

2.2. Metoda merenja magnetske indukcije niske frekvencije

Procedura za sprovođenje merenja je u svemu indentična sa procedurom za merenje jačine električnog polja s tim da rastojanje sonde od operatora, kao i prisustvo drugih objekata ne utiču na rezultate merenja.

3. MERNA OPREMA

Standardi [1], [2] i [3] postavljaju zahteve koje moraju da ispune uređaji za merenje jačine električnog polja i magnetske indukcije niske frekvencije. Bitan zahtev standarda koji je neophodno istaći je da sonde za merenja moraju obezbediti merenje u sve tri ose prostora istovremeno.

Uređaj kojim su izvršena merenja je u potpunosti u skladu sa gore navedenim propisima i sastoji se 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.

Sonda za merenje jačine električnog polja omogućava merenje istovremeno u sve tri ose u prostoru. Sonda je oblika kocke, dimenzija (105x105x105) mm i ima sopstveno napajanje tako da je omogućen njen autonoman rad bez prisustva rukovaoca (u skladu sa standardom [1]). Konstrukcija i karakteristike zadovoljavaju zahteve [1] 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 cm², konstrukcije i karakteristika koje zadovoljavaju zahteve standarda [1] koji se odnose na opremu za merenje.



Sl. 1. - Komplet za merenje električnog i magnetskog polja

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

Osnove za međunarodnu regulativu na području zaštite ljudi od elektromagnetskih polja dala je Međunarodna komisija za zaštitu od nejonizujućih zračenja ICNIRP (nezavisna i neprofitna organizacija čiji su članovi eksperti iz oblasti medicine, epidemiologije, biologije, dozimetrije, fizike, elektrotehnike i ostalih naučnih oblasti koje su u tesnoj vezi sa zaštitom od nejonizujućih zračenja). Najznačajniji dokument koji je 1998. godine objavio ICNIRP je "Preporuka za ograničavanje izlaganja vremenski promenljivim električnim, magnetskim i elektromagnetskim poljima (do 300 GHz)" [4] U njemu se definišu dve kategorije izloženosti ljudi elektromagnetskim poljima. To su izloženost opšte populacije (24 sata/dan) i profesionalna izloženost (do 8 sati/dan). Za svaku od ovih kategorija posebno se određuju granice izlaganja (referentni nivoi), pri čemu su za izloženost opšte populacije preporučene strože granice izlaganja.

Preporukom Saveta Evrope iz 1999 godine [7] granice izlaganja za opštu populaciju, koje je definisao ICNIRP, uzimaju se kao minimalni zahtev za ograničavanje izloženosti stanovništva elektromagnetskim poljima. Zemljama članicama se određuje da granice izlaganja u nacionalnim zakonodavstvima ne smeju biti blaže od granica ICNIRP-a, a dopušta se da nacionalna zakonodavstva (u skladu s principom predostrožnosti) propišu strože granice izlaganja.

Zaštita od uticaja elektromagnetskih polja na zdravlje je tek odnedavno, delimično pravno regulisana u našoj zemlji. Posle višegodišnje pripreme, u Narodnoj Skupštini Srbije, u maju 2009., usvojen je Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja [8]. Ovim Zakonom je konačno započeto pravno regulisanje zaštite zdravlja stanovništva od uticaja elektromagnetskih polja. Zakon (u čl. 6) predviđa da granice izlaganja budu propisane u Pravilniku, koji bi trebalo da bude usvojen naknadno. Nacrt ovog Pravilnika je dat na internet prezentacija Ministarstva zaštite životne sredine i prostornog planiranja RS, i u njemu se predlaže da granice izlaganja za opštu populaciju budu: 2 kV/m i 40 μ T (odnosno predlažu se 2,5 puta niže vrednosti granica izlaganja za obe vrste polja). Pravilnik takođe definiše i izvore koji se smatraju izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa, kao i način njihovog ispitivanja.

U Tabeli I date su granice izlaganja ljudi vremenski promenljivom električnom i magnetskom polju prema preporukama navedenim u [4] i [7] i Nacrtu domaćeg Pravilnika [9], i to one koje se odnose na opštu populaciju i za frekvenciju polja 50 Hz

Tabela 1 Uporedni pregled granica izlaganja prema relevantnim dokumentima, za polja frekvencije 50 Hz

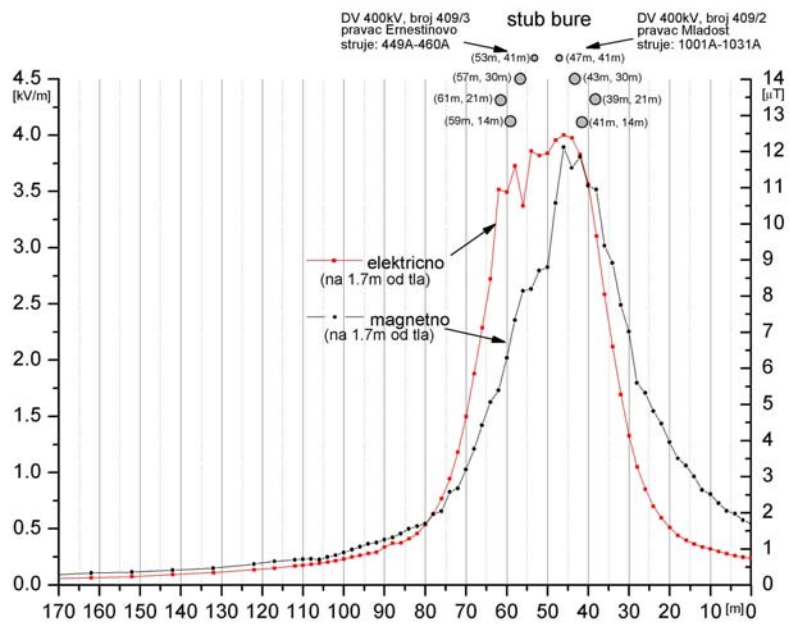
Preporuka	E [kV/m]	B [μ T]
ICNIRP 98	5	100
1999/519/EC, 1999	5	100
Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima NACRT	2	40

5. REZULTATI MERENJA I ANALIZA

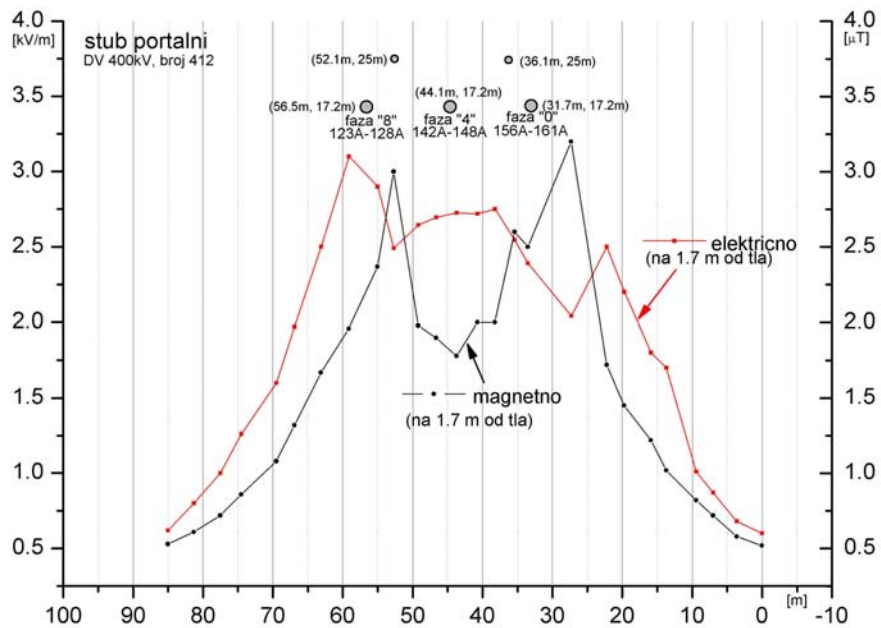
Merenja jačine električnog polja i magnetske indukcije sprovedena su na pravcima ispod četiri nadzemna voda 400 kV, jednog nadzemnog voda 220 kV i četiri nadzemna voda 110 kV. Na svakom mernom mestu merenja su sprovedena na visini 1.7 m od tla uz istovremeno merenje frekvencije polja, pri čemu je na svakom pravcu sprovedeno više merenja sa malim međusobnim rastojanjem mernih mesta. U tabeli 2 su date maksimalne izmerene vrednosti električnog i magnetskog polja na izabranom pravcu ispod svakog od navedenih nadzemnih vodova, zatim visina najnižeg provodnika („faze“) datog nadzemnog voda (merenje je sprovedeno uređajem "Vertex Laser VL400"), kao i njegovo opterećenje u vreme merenja (za dvostruke nadzemne vodove, odnosno stubove tipa „bure“, data su opterećenja oba nadzemna voda). Na slikama 2.-9. grafički su prikazani rezultati merenja jačine električnog polja i magnetske indukcije duž pravca normalnog na trasu svakog od posmatranog nadzemnog voda.

Tabela 2. Rezultati merenja električnog i magnetskog polja ispod nadzemnih vodova

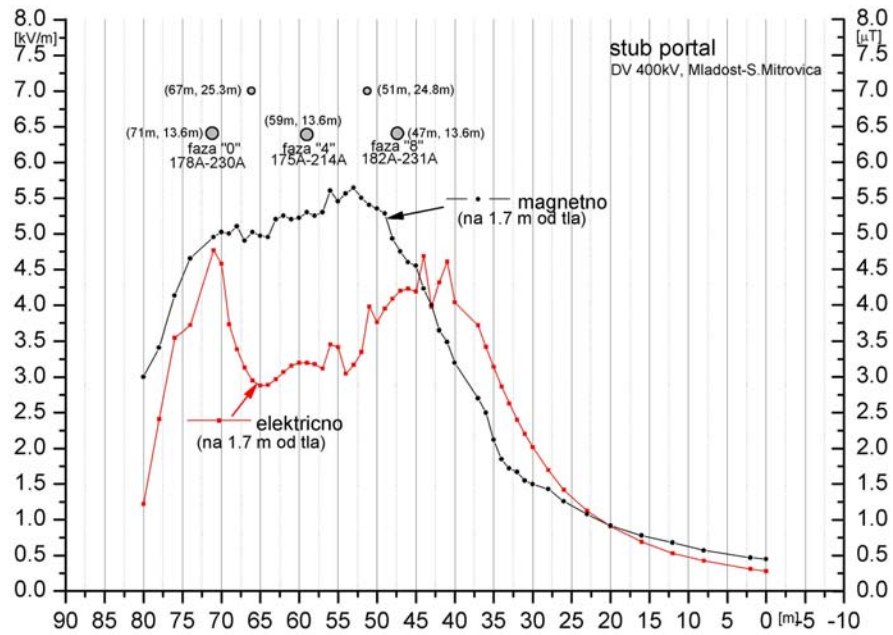
r.br.	Oblik stuba	Nap. nivo (kV)	Visina najnižeg prov. (m)	E (kV/m)	B (μ T)	struja kroz DV (A)		Projek-tovane struje za DV (A)	B (pri projek. strujama) (μ T)
						DV 1	DV 2		
1	bure	400	14,0	4,003	12,12	449-460	1001-	-	-
2	portal	400	17,2	2,750	3,20	123-161	-	2740	71,3
3	portal	400	13,6	4,770	5,64	175-231	-	2740	88,3
4	portal	400	14,2	3,720	8,69	486-520	-	2740	49,0
5	portal	220	18,4	1,000	2,18	139-160	-	1140	17,9
6	bure	110	17,4	0,338	1,23	180	0	880	-
7	bure	110	15,2	0,745	2,20	120	160	880	-
8	portal	110	10,5	1,625	5,43	219-232	-	650	16,1
9	jela	110	8,5	0,923	6,00	220	-	880	24,0



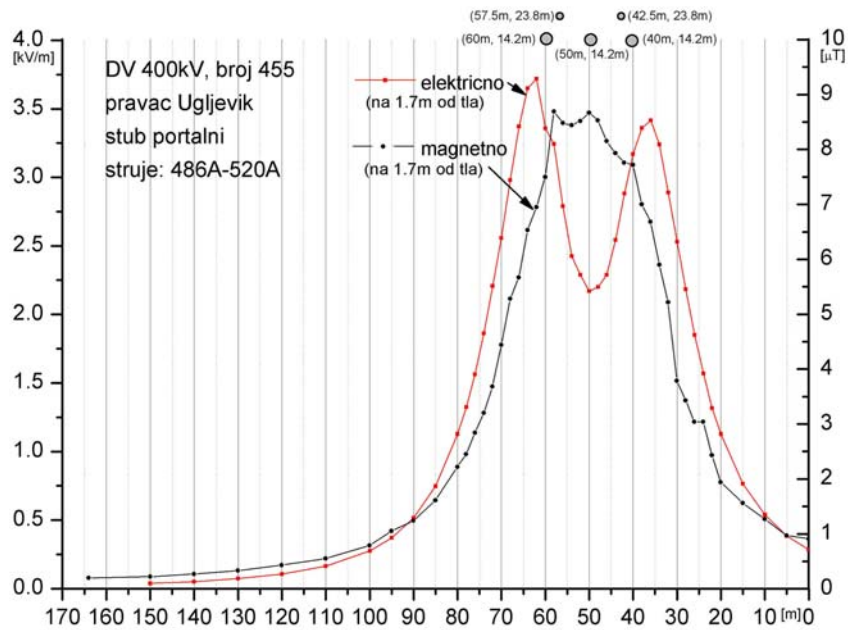
Sl. 2. Rezultati merenja električnog polja i magnetskog indukcije (na visini 1,7 m) duž pravca normalnog na trasu nadzemnog voda pod rednim brojem 1.



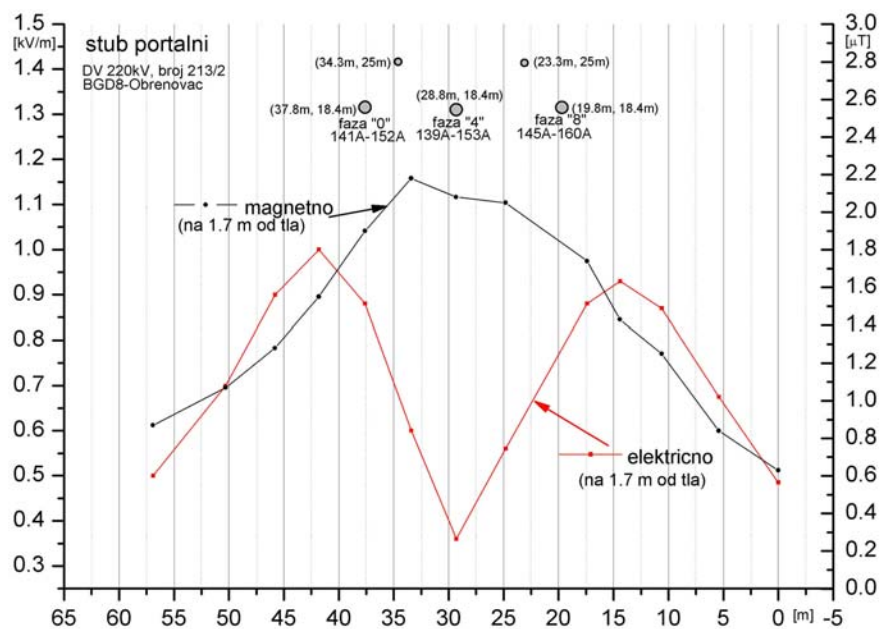
Sl. 3. Rezultati merenja električnog polja i magnetskog indukcije (na visini 1,7 m) duž pravca normalnog na trasu nadzemnog voda pod rednim brojem 2.



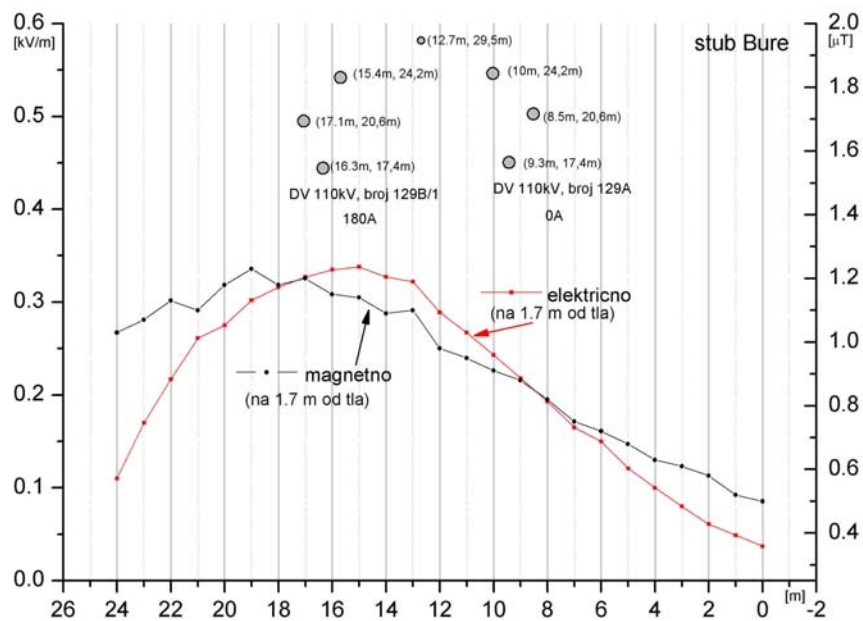
Sl. 4. Rezultati merenja električnog polja i magnetskog indukcije (na visini 1,7 m) duž pravca normalnog na trasu nadzemnog voda pod rednim brojem 3.



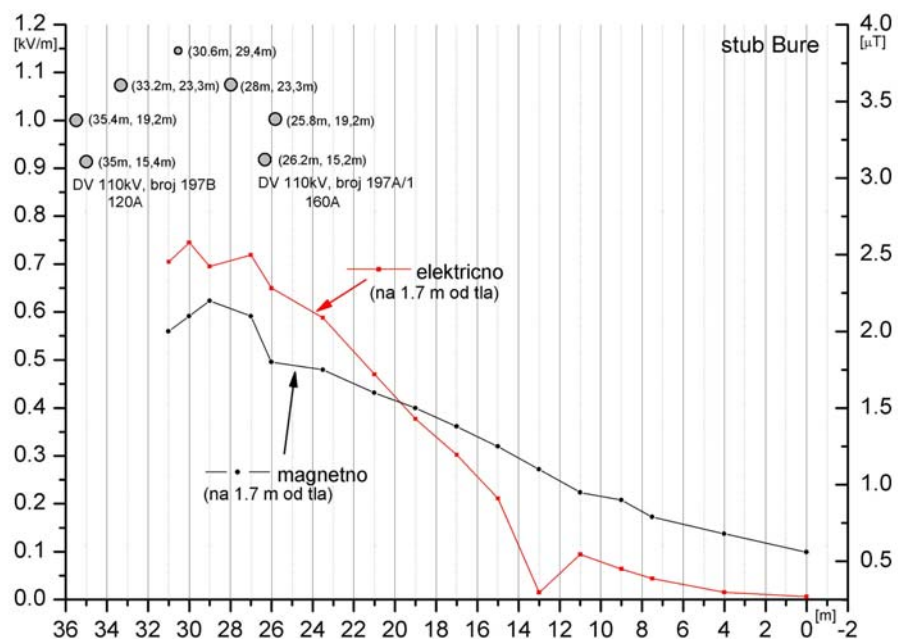
Sl. 5. Rezultati merenja električnog polja i magnetskog indukcije (na visini 1,7 m) duž pravca normalnog na trasu nadzemnog voda pod rednim brojem 4.



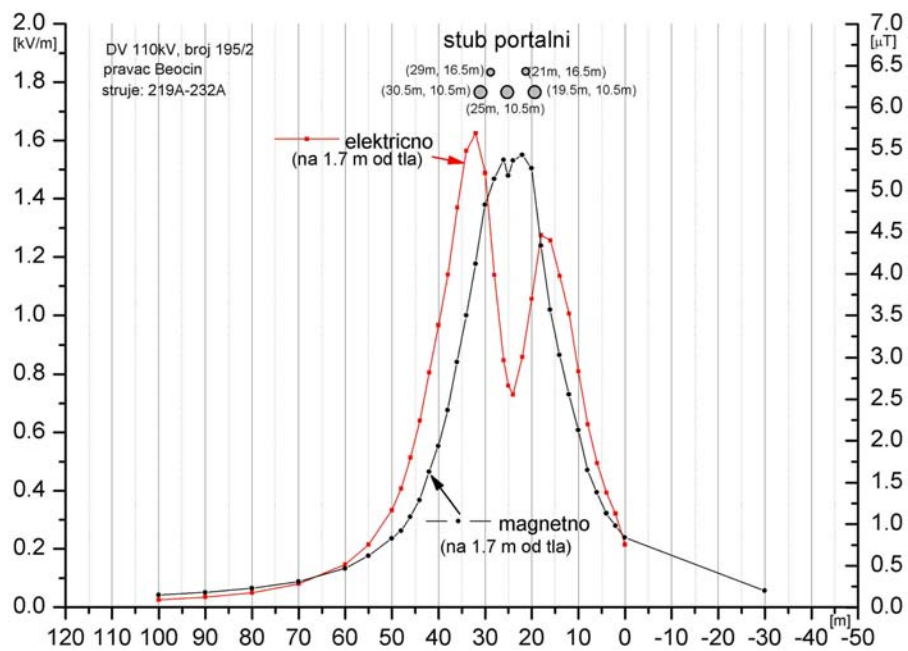
Sl. 6. Rezultati merenja električnog polja i magnetskog indukcije (na visini 1,7 m) duž pravca normalnog na trasu nadzemnog voda pod rednim brojem 5.



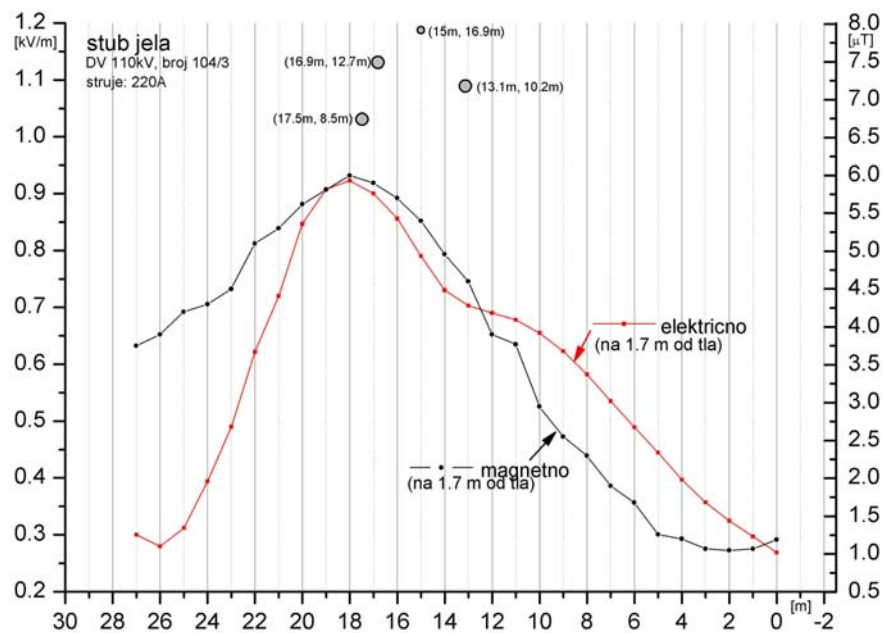
Sl. 7. Rezultati merenja električnog polja i magnetskog indukcije (na visini 1,7 m) duž pravca normalnog na trasu nadzemnog voda pod rednim brojem 6.



Sl. 8. Rezultati merenja električnog polja i magnetskog indukcije (na visini 1,7 m) duž pravca normalnog na trasu nadzemnog voda pod rednim brojem 7.



Sl. 9. Rezultati merenja električnog polja i magnetskog indukcije (na visini 1,7 m) duž pravca normalnog na trasu nadzemnog voda pod rednim brojem 8.



Sl. 10. Rezultati merenja električnog polja i magnetskog indukcije (na visini 1,7 m) duž pravca normalnog na trasu nadzemnog voda pod rednim brojem 9.

5.1. Analiza rezultata merenja jačine električnog polja

Na osnovu rezultata merenja (koji su navedeni u tabeli 2) može se konstatovati da ni kod jednog od posmatranih nadzemnih vodova maksimalna izmerena vrednost jačine električnog polja ne prelazi granicu izlaganja za oblast javne bezbednosti od 5 kV/m, koja je definisana međunarodnim preporukama [4] i [7]. Takođe se može konstatovati da izmerene vrednosti jačine električnog polja kod nadzemnih vodova 110 kV i 220 kV ne prelaze strožu granicu izlaganja za oblast javne bezbednosti od 2 kV/m, koja je predložena domaćim Pravilnikom [9]. Međutim, kod nadzemnih vodova 400 kV, na mnogim mernim mestima izmerene vrednosti jačine električnog polja prelaze ovu granicu izlaganja. Na slikama 2 do 5 može se videti da se vrednosti veće od predložene granice izlaganja javljaju samo neposredno ispod faza nadzemnih vodova 400 kV, odnosno da već na rastojanju većem od 25 m od ose nadzemnog voda (i na jednu i na drugu stranu), vrednosti jačine električnog polja padnu ispod 2 kV/m.

5.2. Analiza rezultata merenja magnetske indukcije

Prilikom merenja magnetske indukcije praćene su vrednosti opterećenja nadzemnih vodova. Na osnovu rezultata merenja (koji su navedeni u tabeli 2) može se konstatovati da ni kod jednog od posmatranih nadzemnih vodova, pri datim opterećenjima, maksimalna izmerena vrednost magnetske indukcije ne prelazi granicu izlaganja za oblast javne bezbednosti od 100 µT, koja je definisana međunarodnim preporukama [4] i [7], kao ni strožu granicu izlaganja za oblast javne bezbednosti od 40 µT, koja je predložena domaćim Pravilnikom [9]. U tabeli 2 su, za svaki tip nadzemnog voda, data i projektovana opterećenja, kao i preračunate vrednosti maksimalne magnetske indukcije

za slučaj kada bi kroz posmatrani nadzemni vod tekla projektovana struja. Može se konstatovati da su i ovako preračunate vrednosti maksimalne magnetske indukcije, kod svih posmatranih nadzemnih vodova, niže od granice izlaganja za oblast javne bezbednosti ($100 \mu\text{T}$), koja je definisana međunarodnim preporukama. Takođe se može konstatovati da preračunate vrednosti magnetske indukcije kod nadzemnih vodova 110 kV i 220 kV ne prelaze ni granicu izlaganja za oblast javne bezbednosti od $40 \mu\text{T}$, koja je predložena domaćim Pravilnikom [9]. Veće vrednosti magnetske indukcije od strože granice izlaganja bi mogle da se očekuju kod nadzemnih vodova 400 kV, ali treba imati u vidu da su proračuni moguće magnetske indukcije rađeni prema projektovanim strujama opterećenja (za posmatrani tip nadzemnog voda), a ne prema realnim strujama opterećenja posmatranog nadzemnog voda (uobičajenim ili maksimalnim za dati nadzemni vod).

6. ZAKLJUČAK

Dostignuti nivo naučnih saznanja u prethodnih nekoliko decenija omogućio je izradu međunarodnih preporuka za zaštitu stanovništva od nejonizujućih zračenja [4] i [7], čija je najvažnija zajednička karakteristika da su zasnovane na trenutnim (kratkotrajnim) biološkim efektima elektromagnetskog polja na ljudski organizam.

Preporuka Saveta Evropske Unije [7] je sugerisala potrebu usvajanja harmonizovane pravne regulative u državama članicama i kandidatima za pridruživanje Evropskoj Uniji. Usvajanjem Zakona o zaštiti od nejonizujućih zračenja [8], započet je proces pravnog regulisanja zaštite od nejonizujućih zračenja u našoj zemlji. Bez pratećih pravilnika [9], čije se usvajanje planira u narednom periodu i zbog nedostatka domaćih tehničkih standarda, zaštita od nejonizujućih zračenja je, u ovom trenutku, još uvek nedovoljno regulisana.

Za procenu uticaja nejonizujućih zračenja na životnu sredinu u okolini nadzemnih vodova su najvažniji nivoi električnog i magnetskog polja industrijske učestanosti koji se mogu pojaviti pri normalnom radu.

Na osnovu analize rezultata merenja električnog polja može se zaključiti da ispod nadzemnih vodova 110 kV, 220 kV i 400 kV električno polje ne prelazi granicu izlaganja od 5 kV/m (definisanu međunarodnim preporukama [4] i [7]), kao i da se jedino ispod nadzemnih vodova 400 kV može pojaviti električno polje koje prevazilazi granicu izlaganja od 2 kV/m (predloženu u nacrtu domaćeg Pravilnika [9]), ali samo na prostoru neposredno ispod faznih provodnika, odnosno na prostoru do 25 m od ose nadzemnog voda (i na jednu i na drugu stranu).

Na osnovu analize rezultata merenja magnetskog polja može se zaključiti da ispod nadzemnih vodova 110 kV, 220 kV i 400 kV magnetsko polje ne prelazi granicu izlaganja od $100 \mu\text{T}$ (definisanu međunarodnim preporukama [4] i [7]). Magnetska indukcija ispod nadzemnih vodova može da pređe granicu izlaganja od $40 \mu\text{T}$ (predloženu u nacrtu domaćeg Pravilnika [9]), ali samo za vodove 400 kV i to samo za njihove projektovane struje. Za postojeća (realna) opterećenja analiziranih vodova, magnetska indukcija ne prelazi $40 \mu\text{T}$.

LITERATURA

- [1] 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;
- [2] Measurement of power frequency electric fields, CEI/IEC 833:1987;
- [3] IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines, ANSI/IEEE Std 644-1987;
- [4] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), ICNIRP Guidelines, 1998;
- [5] Human exposure to electromagnetic fields Low frequency (0 Hz to 10 kHz), European prestandard, ENV 50166-1, January 1995., European Committee for Electrotechnical Standardization;
- [6] 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;
- [7] 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;
- [8] Zakon o zaštiti od nejonizujućih zračenja (Sl. glasnik RS br. 36/09 od 15.05.2009.);
- [9] Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima - NACRT, izvor: Internet prezentacija Ministarstva zaštite životne sredine i prostornog planiranja RS.
- [10] STUDIJA „Uticaj električnog i magnetskog polja industrijske učestanosti objekata JP EPS na životnu sredinu, elektrodistribucije“, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, 2009.

Abstract: The paper presents measurement results of low-frequency magnetic and electric fields in the zones beneath the high voltage overhead power lines (110 kV, 220 kV, 400 kV) with various types of power line shafts. Measurements and interpretation of the results have been done according to actual international standards and recommendations with regard to exposure of human beings, with special retrospective view on domestic Low of non ionization discharge which is accepted on may 2009.

Key words: *electric field, magnetic field, overhead lines, measurement*

MEASUREMENT OF MAGNETIC AND ELECTRIC FIELDS BENEATH THE HIGH VOLTAGE OVERHEAD POWER LINES

Dejan Hrvic, Momcilo Petrovic, Vojin Kostic
Electrical Engineering Institute “Nikola Tesla”, Belgrade