

**MERENJE JAČINA ELEKTRIČNOG I MAGNETSKOG POLJA U
TERMoeLEKTRANI "NIKOLA TESLA-B"***Dejan Hrvić, Momčilo Petrović**Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd*

Sadržaj: U radu je dat prikaz izmerenih vrednosti jačina električnog i magnetskog polja na karakterističnim mestima u Termoelektrani "Nikola Tesla-B". 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.

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". Vektorska priroda ovih fizičkih veličina nije bitna za procenu bioloških efekata. Za potrebe analize bezbednosti pri izlaganju živih organizama električnom i magnetskom polju niskih frekvencija ne uzima se u obzir pravac i smer već je dovoljno poznavati vrednosti intenziteta vektora jačine električnog polja i magnetske indukcije

U toku 2006. godine izvršena su merenja jačine električnog polja i magnetske indukcije u više termoelektrana Elektroprivrede Srbije. U radu su dati rezultati merenja u termoelektrani "Nikola Tesla-B".

2. METODE MERENJA

Metode merenja su u ovom radu samo kratko opisane, a u standardima [1,3,5,6,7,8] 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 visoko osetljivog 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 komponentata 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.

Standard [6] zahteva da površina sonde kojom se meri magnetska indukcija iznosi 100 cm² 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 komponenta 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. MERNJA 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.

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 cm². Konstrukcija i karakteristike zadovoljavaju zahteve standarda [6] koji se odnose na opremu za merenje.

Izgled kompleta za merenje prikazan je na slici 1.



Slika 1-Komplet za merenje električnog i magnetskog polja

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

Preporuke [2,4,10] 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 određivanju ove vrednosti uzeta je u obzir, na stranu sigurnosti, promenljivost individualne osetljivosti, uslova sredine, starosnog doba i zdravstvenog stanja.

Referentni nivoi (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 nivoi 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 oštriji 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 zaštitu na radu i za frekvenciju polja 50 Hz.

Tabela 1. Granice izlaganja ljudi vremenski promenljivom električnom i magnetskom polju (javna bezbednost, efektivne vrednosti, frekvencija 50 Hz)

Preporuka	E [kV/m]	B [μ T]
ICNIRP 98	10	500
1999/519/EC, 1999	10	500

5. REZULTATI MERENJA I ANALIZA

Merenje jačine električnog polja i magnetske indukcije u Termoelektrani "Nikola Tesla-B" obavljeno je na sledećim lokacijama:

- na platou transformatora ispred Glavnog pogonskog objekta, oko svih transformatora i ispod pripadajućih vodova (naponski nivoi: 400 kV, 220 kV, 21 kV i 6,6 kV),
- oko zvezdišta i prekidača generatora, kao i oko pripadajućih šinskih veza (naponski nivo 21 kV),
- u prostorima gde prolaze 6 kV-ni vodovi (naponski nivo 6,6 kV),
- u prostorijama u kojima se nalaze transformatori 6/0,4kV i
- u prostoru oko generatora (mašinska hala).

Pošto magnetska indukcija zavisi od opterećenja provodnika, podaci o strujama opterećenja generatora, nadzemnih vodova 400 kV i 220 kV i transformatora zabeleženi su na licu mesta (iz pogonske evidencije) i dati u Tabeli 2 (date su vrednosti koje su relevantne za merna mesta na kojima je obavljeno merenje).

Tabela 2. Struje opterećenja merodavne za merenja

Lokacija	Naponski nivo	Struje u vreme merenja (podaci iz pogona)
Generator B1	21 kV	17kA
Generator B2	21 kV	16kA
Blok transformator 1AT	400 kV	750A
	21 kV	15kA
Transformator 1BT	21 kV	-
	6,6 kV	1350A
	6,6 kV	1700A
Blok transformator 2AT	400 kV	750A
	21 kV	15kA
Transformator 2BT	21 kV	remont
	6,6 kV	
	6,6 kV	
OBT1	220 kV	100A
	6,6 kV	1200A
	6,6 kV	2000A

Lokacija	Naponski nivo	Struje u vreme merenja (podaci iz pogona)
Dalekovod DV 449/1	400 kV	800A
Dalekovod DV 449/2	400 kV	880A
Dalekovod DV 296	220 kV	110A

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, pri čemu je sproveden veliki broj merenja sa malim međusobnim rastojanjem mernih mesta.

Maksimalne izmerene vrednosti jačine električnog polja i magnetske indukcije (na svakoj od navedenih lokacija) date su u tabelama 3 i 4, pri čemu su u tabeli 3 date izmerene vrednosti na platou transformatora (na otvorenom prostoru) dok su u tabeli 4 date izmerene vrednosti na lokacijama u unutrašnjosti glavnog pogonskog objekata. Izmerene vrednosti jačine električnog polja u unutrašnjosti glavnog pogonskog objekata zanemarljivo su male i zbog preglednosti nisu prikazane u tabeli 4.

Tabela 3. Maksimalne izmerene vrednosti jačine električnog polja i magnetske indukcije na platou transformatora (po naponskim nivoima)

400 kV		220 kV		21 kV		6,6 kV	
E_{\max} [kV/m]	B_{\max} [μ T]	E_{\max} [kV/m]	B_{\max} [μ T]	E_{\max} [kV/m]	B_{\max} [μ T]	E_{\max} [kV/m]	B_{\max} [μ T]
10,53	56,6	7,13	9,46	0,07	227	0,45	43,68

Tabela 4. Maksimalne izmerene vrednosti magnetske indukcije u unutrašnjosti glavnog pogonskog objekata

šine generatora	6,6 kV-ni vodovi	transformatori 6,6/0,4 kV	oko generatora u mašinskoj hali
B_{\max} [μ T]	B_{\max} [μ T]	B_{\max} [μ T]	B_{\max} [μ T]
2383	187,8	59,5	36,1

Najveće izmerene efektivne vrednosti jačine električnog polja veće su od dozvoljenih (za osmočasovni boravak ljudi - tabela I) samo kod odvodnika prenapona za zaštitu blok transformatora (na mestima gde su faze najniže). Međutim, na ovim mestima ljudi se duže zadržavaju samo u slučaju remonta, kada najbliži fazni provodnici nisu pod naponom. Tada je jačina električnog polja znatno manja. Izmerene vrednosti jačine električnog polja duž transportne staze na platou transformatora su znatno niže od granica izlaganja za oblast zaštite na radu datih u tabeli I. Raspodela jačine električnog polja duž transportne staze na platou transformatora, ispod faza dalekovoda 400 kV i 220 kV, data je na slici 2. Na ovoj slici se može uočiti zavisnost jačine električnog polja od naponskog nivoa ali i od položaja mernog mesta u odnosu na fazne provodnike.

Najveće izmerene vrednosti magnetske indukcije su niže od dozvoljenih (za osmočasovni boravak ljudi - tabela I) na svim mernim mestima na platou transformatora (na otvorenom prostoru). Raspodele magnetske indukcije duž transportne staze na platou transformatora, ispod faza dalekovoda 400 kV i 220 kV, data je na slici 3. Merenjima je potvrđena zavisnost intenziteta vektora magnetske indukcije od opterećenja i udaljenosti mernog mesta od provodnika.

Najveće izmerene vrednosti inteziteta vektora magnetske indukcije višestruko su veće od dozvoljenih (za osmočasovni boravak ljudi - tabela I) na lokacijama neposredno

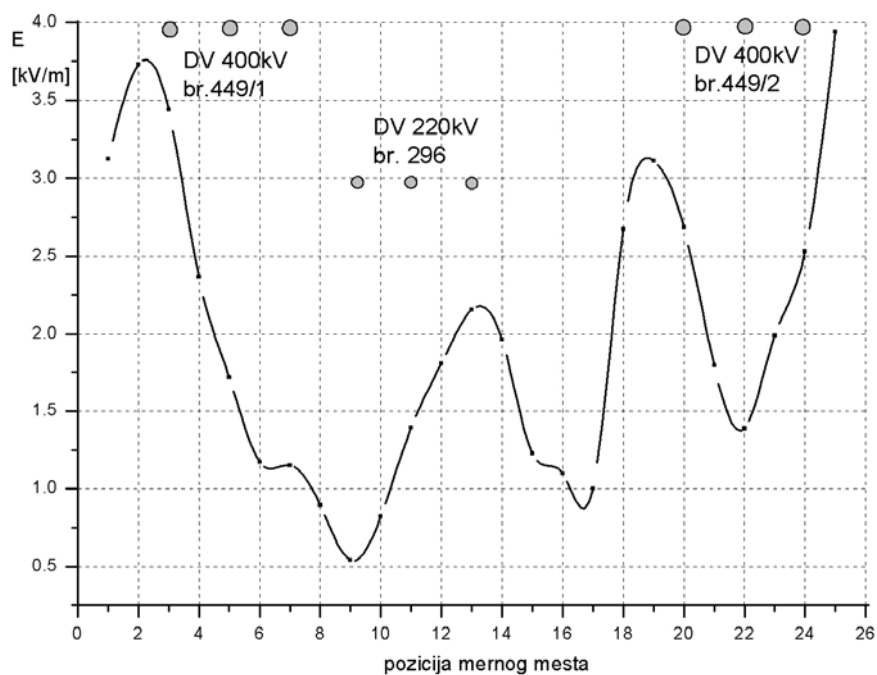
uz generatorske šine. Generalno, u prostorima oko šina, zvezdišta i prekidača generatora, izmerene vrednosti inteziteta vektora magnetske indukcije su veće od dozvoljenih, pa stoga u ovim prostorima se ne preporučuje duži boravak. Međutim, izmerene efektivne vrednosti magnetske indukcije na mernim mestima ispod šina generatora (naponski nivo 21 kV) su niže od dozvoljenih (za osmočasovni boravak ljudi - tabela I) na svim mernim mestima na transportnoj stazi koja se nalazi ispod šina generatora. Raspodela magnetske indukcije duž ove transportne staze prikazana je na slici 4.

6. ZAKLJUČAK

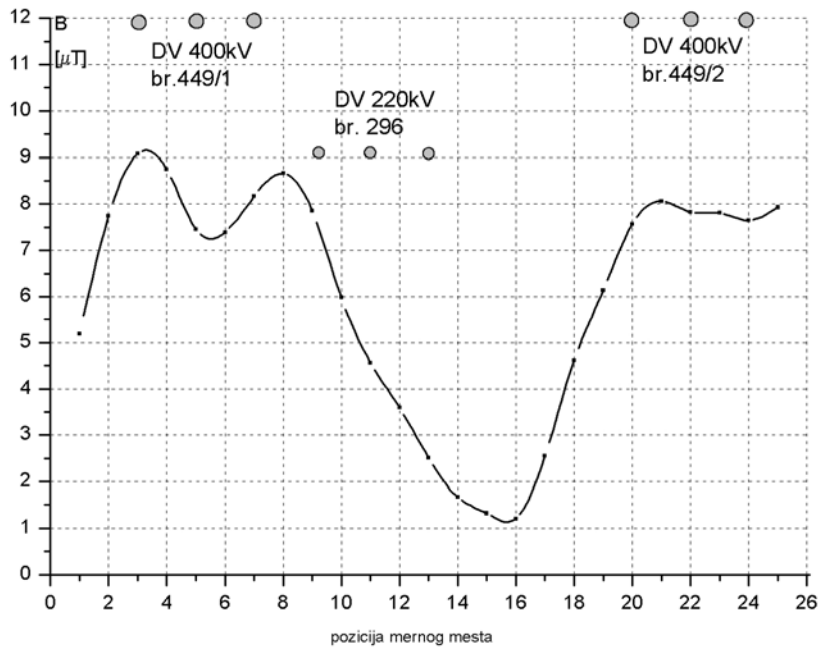
U nedostatku domaćih propisa i preporuka kojima se reguliše bezbednost pri izlaganju ljudi električnom i magnetskom polju niske frekvencije, za tumačenje rezultata merenja korišćeni su međunarodni standardi i preporuke.

Na osnovu izmerenih vrednosti jačine električnog polja može se utvrditi da su u Termoelektrani "Nikola Tesla-B" na svim navedenim lokacijama izmerene vrednosti jačine vremenski promenljivog električnog polja manje od granične vrednosti za izlaganje ljudi promenljivom električnom polju za oblast zaštite na radu koje preporučuje Međunarodna komisija za zaštitu od nejonizujućih zračenja [10], osim na malom broju mernih mesta (na manje od 1% od ukupnog broja) koja se nalaze kod blok transformatora i koja su van transportnih staza i izuzetno blizu visokonaponske opreme 400 kV (gde su najniže visine delova pod naponom). Kako na tim mestima nema zadržavanja ljudi u dužim vremenskim periodima, ove vrednosti nisu zabrinjavajuće.

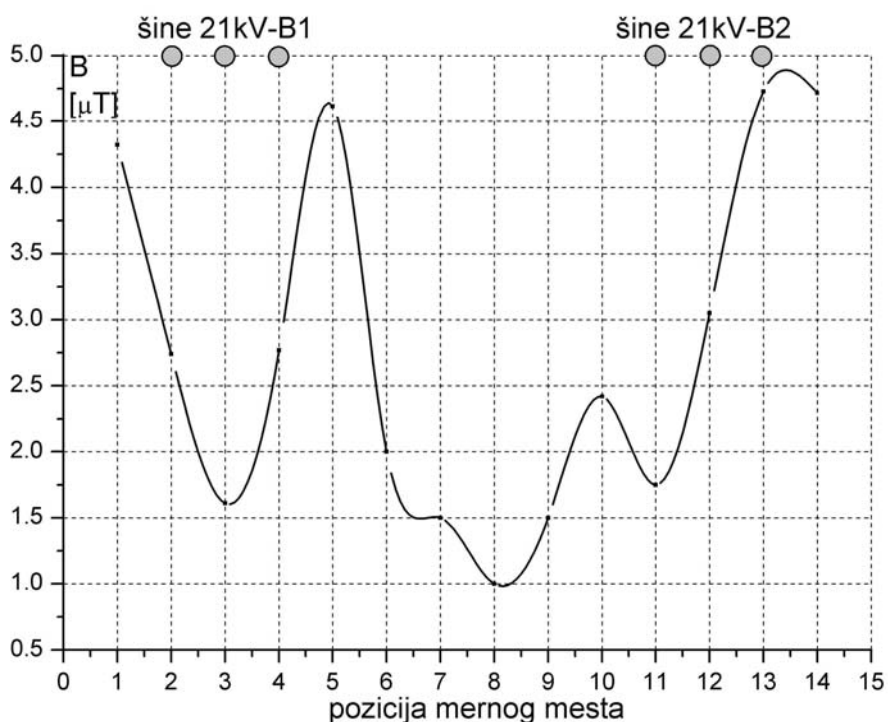
Na osnovu izmerenih vrednosti magnetske indukcije može se utvrditi da su na svim navedenim lokacijama izmerene vrednosti magnetske indukcije manje od granične vrednosti za izlaganje ljudi promenljivom magnetskom polju za oblast zaštite na radu koje preporučuje Međunarodna komisija za zaštitu od nejonizujućih zračenja [10], osim u prostorima oko šina, zvezdišta i prekidača generatora, pa stoga u ovim prostorima nije poželjan duži boravak.



Slika 2.- Jačina električnog polja na transportnoj stazi kod platoa transformatora



Slika 3. -Magnetska indukcija na transportnoj stazi kod platoa transformatora



Slika 4.- Magnetska indukcija na transportnoj stazi ispod šina generatora (21kV)

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] Magnetska polja-vodič za zdravlje i zaštitu. Program Ujedinjenih nacija za životnu sredinu, Međunarodno udruženje za zaštitu od zračenja, Svetska zdravstvena organizacija, Maj 1995;
- [10] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). ICNIRP Guidelines, 1998;
- [11] 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 results of electric and magnetic field strength measurements in the power plant "Nikola Tesla B", performed by The Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla", Belgrade. Measurement results are reviewed according to a few international standards.

Key words: *magnetic field strength, electric field strength*

ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD STRENGTH MEASUREMENTS IN THE POWER PLANT "NIKOLA TESLA B"

Dejan Hrvic, Momcilo Petrovic