Tehničko rešenje za smanjenje vrednosti magnetske indukcije u stanu iznad transformatorske stanice 10 kV/0,4 kV Z-325

MILADIN R. TANASKOVIĆ, PD „EPS Distribucija“, d.o.o. Beograd

Stručni rad

BILJANA B. STOJANOVIĆ, PD „EPS Distribucija“, d.o.o. Beograd

UDC: 621.314.2:614.875

DARKO R. MALEŠ, PD „EPS Distribucija“, d.o.o. Beograd

DOI: 10.5937/tehnika1605724T

Značajan broj transformatorskih stanica (TS) 10 kV/0,4 kV smešten je u stambenim i poslovnim objektima u centralnim gradskim zonama u Beogradu prvenstveno zbog urbanističkih zahteva. Nejonizujuća zračenja od TS 10 kV/0,4 kV, u stambenim ili poslovnim prostorima koja su neposredno pored ili iznad TS 10 kV/0,4 kV zavise od snage transformatora u TS 10 kV/0,4 kV i primenjenih dispozicionih rešenja, mogu u pojedinim slučajevima biti iznad dozvoljenih. Cilj ovog rada je da prikaže tehničko rešenje za smanjenje magnetske indukcije kod kvazistacionarnih (slabopromenljivih) polja u stambenoj jedinici iznad TS 10 kV/0,4 kV Z-325 u Beogradu.

Ključne reči: nejonizujuća zračenja, kvazistacionarna polja, magnetska indukcija, mere za smanjenje zračenja

1. UVOD

U ovom radu se razmatra uticaj dela spektra nejonizujućih zračenja koji se odnosi na izlaganje stanovništva vremenski promenljivom električnom i magnetnom polju. Baza ograničenja za trajno izlaganje ljudi vremenski promenljivom električnom i magnetnom polju zasnovana su na zdravstvenim i biološkim efektima i kvantifikovana su referentnim granicama nivoima [1]. Referentni granice nivoi za izlaganje stanovništva vremenski promenljivom polju, pri frekvenciji 50 Hz, iznose:

- 2 kV/m za efektivnu vrednost jačine električnog polja, i
- 40 μ T za efektivnu vrednost magnetske indukcije.

Određbe iz [1] definišu i zone povećane osetljivosti u koje spadaju škole i predškolske ustanove, domovi, bolnice i porodilišta, turistički objekti, dečji igrališta ili parcele predviđene za gradnju pomenutih objekata.

Referentni granice nivoi za zonu povećane osetljivosti su:

- 0,2 kV/m za efektivnu vrednost jačine električnog polja, i
- 4 μ T za efektivnu vrednost magnetske indukcije.

Adresa autora: Miladin Tanasković, PD EPS „Distribucija“ doo, Masarikova 1-3, Beograd

Rad primljen: 11.08.2016.

Rad prihvaćen: 04.10.2016.

U [2] se definišu i izvori nejonizujućih zračenja od posebnog interesa.

2. ELEKTROMAGNETSKA POLJA I JAVNO ZDRAVLJE

Elektromagnetnu preosetljivost (EHS) karakterišu različiti nespecifični simptomi koji se razlikuju od pojedinca do pojedinca [4]. Simptomi su svakako stvarni i mogu u velikoj meri da se razlikuju po svojoj težini. Koji god da je njihov uzrok, EHS može da bude problem koji onemogućava pojedince koji su njime pogođeni. EHS nema jasan dijagnostički kriterijum i ne postoje naučne osnove koje bi povezale EHS simptome sa izloženošću u elektromagnetnom polju (EMF).

Osim toga, EHS nije medicinska dijagnoza, niti je jasno da predstavlja jedan medicinski problem. Takođe, postoje neke indikacije da EHS simptomi mogu da se jave usled toga što postoje psihijatrijska stanja, kao i reakcija na stres koji je rezultat brige za uticaj EMF na zdravlje, pre nego samom izlaganju EMF.

Zbog procene uticaja elektromagnetskih polja na stanovništvo koje je stalno izloženo uticaju nejonizujućih zračenja izvršena su merenja magnetske indukcije u pojedinim prostorijama i u okolini nekih uređaja u stanovima. Prema [5], tipične vrednosti su:

- Efektivna vrednost magnetske indukcije u kuhinji 0,03 μ T;
- Efektivna vrednost magnetske indukcije u dnevnoj sobi 0,02 μ T;

- Efektivna vrednost magnetske indukcije na 30 cm od električne peći 0,82 μT ;
- Efektivna vrednost magnetske indukcije na 100 cm od električne peći 0,13 μT ;
- Efektivna vrednost magnetske indukcije na 30 cm od mikrotalasne peći 4,6 μT ;
- Efektivna vrednost magnetske indukcije na 100 cm od mikrotalasne peći 0,71 μT .

3. OPŠTA TEORIJA ELEKTROMAGNETSKOG POLJA

Karakteristika vremenski promenljivih polja je da je svako promenljivo magnetsko polje prouzrokovano promenljivim električnim poljem, i obrnuto, svako promenljivo električno polje prouzrokovano je indukovanim magnetskim poljem.

Vremenski promenljiva magnetska i električna polja definisana su sa četiri Maksvelove jednačine. Promenljive kojima su iskazne odlike elektromagnetskog polja u diferencijalnom obliku uobičajeno se pišu [6]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

gde su:

$\vec{E}$ - vektor električnog polja u (V/m), $\vec{H}$ - vektor magnetskog polja u (A/m), $\vec{D}$ - vektor električne indukcije u (C/m^2), $\vec{B}$ - vektor magnetske indukcije u (T), $\vec{J}$ - vektor gustine električne struje u (A/m^2) i ρ - prostorna gustina električnog opterećenja u (C/m^3).

Višestruko povezane četiri Maksvelove jednačine mogu biti vrlo složene za rešavanje. Zbog toga, jednostavna zamisao za smanjenje matematičke složenosti navodi da veze između vektora polja treba iskazati u obliku talasnih jednačina, koje se izводе iz Maksvelovih jednačina u diferencijalnom obliku [6]:

- talasna jednačina magnetnog polja:

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

- talasna jednačina električnog polja:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \nabla \left(\frac{\rho}{\epsilon} \right) \quad (6)$$

Problem koji je od interesa da se reši u ovom slučaju su nejonizujuća zračenja niskih frekvencija koja po svojoj prirodi spadaju u kvazistacionarna polja. U analizi kvazistacionarnih polja se uzima da umesto druge Maksvelove jednačine važi uopšteni Amperov zakon [6]:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (7)$$

Iz predhodnog sledi da se u linearnoj sredini (vakuum, vazduh) vektor magnetske indukcije može izraziti iz Bio-Savarovog zakona. Magnetska indukcija linijskih provodnika se izražava iz Bio-Savarovog zakona superpozicijom magnetskih indukcija pojedinačnih delova provodnika. Svaki beskonačno mali deo provodnika $d\vec{l}$ doprinosi ukupnoj magnetnoj indukciji provodnika u tački na rastojanju r iznosom:

$$d\vec{B}(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \cdot I(t) \quad (8)$$

gde se vektori $d\vec{B}$ i $\vec{l}$ menjaju sinhrono.

Ako se isti deo provodnika dužine L postavi u početak koordinatnog sistema u smeru ose x (slika 1), njegov doprinos magnetnoj indukciji u tački $P(x, y, z)$ izražava se iz:

$$|\vec{B}_i(t)| = \frac{\mu_0}{4\pi r_i} \cdot I_i(t) \cdot \left[\frac{L_i - x}{\sqrt{(L_i - x)^2 + r_i^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + r_i^2}} \right] \quad (9)$$

sa vektorskim komponentama u smeru pojedinih osa:

$$B_{xi}(t) = 0 \quad (10)$$

$$B_{yi}(t) = -\frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}} \cdot |\vec{B}_i(t)| \quad (11)$$

$$B_{zi}(t) = -\frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}} \cdot |\vec{B}_i(t)| \quad (12)$$

Slika 1 - Magnetska indukcija dela provodnika smeštenog u koordinatni početak

Za proračun magnetske indukcije bilo iz talasne jednačine ili primenom Bio-Savarovog zakona postoje posebni softverski alati.

4. PRIMER TEHNIČKOG REŠENJA ZA SMANJENJE MAGNETSKE INDUKCIJE U STANU IZNAD TS 10 KV/0,4 KV

Uticaj nejonizujućeg zračenja na stanovništvo, kao i tehničko rešenje za smanjenje magnetske indukcije bile su razmatrane za stan broj 7 u ulici Narodnih heroja br. 44, lociran iznad TS 10 kV/0,4 kV Z-325. Energetski transformator u posmatranoj TS je naznačene snage 1000 kVA (naznačene sekundarne struje 1443,4 A) i povezan je na razvodno postrojenje (RP) 10 kV sa tri jednožilna kabla, a na RP 0,4 kV sa četiri krute bakarne sabirnice. Vrednosti magnetske indukcije u spavaćoj sobi br. 3 u karakterističnim tačkama, za slučaj pre i posle realizacije tehničkog rešenja za smanjenje magnetske indukcije, dobijene su merenjem [7, 8]. Za ispitivanje nivoa nejonizujućeg zračenja u opsegu niskih u estanosti korišćen je uređaj EFA-300, proizvođača Narda Safety Test Solutions i sonda za merenje magnetske indukcije u skladu sa zahtevima standarda IEC 61786, [7, 8]. Najveća moguća proširena merna nesigurnost metode ispitivanja iznosi 3,5 %.

4.1 Vrednosti magnetske indukcije pre primene mera za smanjenje magnetske indukcije

Raspored mernih tačaka u spavaćoj sobi 3 u stanu prikazan je na slici 2. Merne tačke su označene brojevima. Merne tačke 73 - 80 raspoređene su na visini 1

m od poda na međusobnom rastojanju od 0,6 m na pravcu udaljenom 0,6 m od spoljašnjeg zida prostorije. Merne tačke 88 - 92 raspoređene su na 0,2 m od poda na krugu i u centru kruga koji je na poziciji (1,3 x 1,7) m od desnog spoljašnjeg ugla sobe. Merne tačke 93 - 97 raspoređene su po visini od 0 - 2 m, 0 na poziciji (1,3 x 1,7) m od desnog spoljašnjeg ugla sobe.

Merne tačke 98 - 102 raspoređene su na visini 0,2 m od poda na kružnici i u centru kruga koji je na poziciji (3,2 x 0,7) m od desnog spoljašnjeg ugla sobe. Merne tačke 103 - 107 raspoređene su po visini od 0 - 2 m na poziciji (3,2 x 0,7) m od desnog spoljašnjeg ugla sobe.

Rezultati merenja magnetske indukcije u spavaćoj sobi br. 3 za karakteristične tačke pre primene mera za smanjenje magnetske indukcije dati su u tabeli 1 [7]. Maksimalna vrednost magnetske indukcije izmerena je u tački 93 na koti poda prostorije i iznosi 2,569 μT pri struji od 21 % od naznačene sekundarne struje. Nakon izvršene ekstrapolacije vrednosti struje na vrednost naznačene sekundarne struje vrednost magnetske indukcije u istoj tački 93 bila bi 14 μT .

Takođe, u merenoj tački 95 na visini 1 m od poda pri opterećenju od 22 % od naznačene vrednosti sekundarne struje izmerena je vrednost magnetske indukcije od 1,126 μT , što bi posle izvršene ekstrapolacije na naznačenu sekundarnu struju bila vrednost od 6,1 μT .

Obe navedene vrednosti za magnetsku indukciju su veće od dozvoljene vrednosti od 4 μT koja je deklarirana kao referentna.

Slika 2 - Raspored mernih tačaka u spavaćoj sobi 3 predmetnog stana u ulici Narodnih heroja br. 44 (merenja pre primene mera za smanjenje magnetske indukcije)

Tabela 1. Rezultati merenja magnetske indukcije pre primene mera za smanjenje magnetske indukcije

Merna tačka	Magnetska indukcija [μT]	Struja I_A [A]	Struja I_B [A]	Struja I_C [A]	Visina h [m]
73	0,625	265,2	325,5	286,6	1,0
74	0,736	272,7	332,5	274,5	1,0
75	0,847	272,9	332,0	280,4	1,0
76	0,943	273,2	323,7	279,5	1,0
77	1,009	280,9	326,5	279,8	1,0
78	0,986	291,0	349,4	286,4	1,0
79	0,911	288,8	325,6	292,3	1,0
80	0,787	288,6	325,9	305,7	1,0
88	2,092	250,3	302,5	271,1	0,2
89	2,031	248,8	307,5	265,5	0,2
90	1,754	245,3	328,4	313,1	0,2
91	1,646	247,4	324,1	290,7	0,2
92	2,117	267,5	318,5	306,0	0,2
93	2,569	310,8	329,5	320,0	0,0
94	1,525	303,1	320,5	310,0	0,5
95	1,126	308,7	323,7	317,0	1,0
96	0,669	295,5	321,4	329,8	1,5
97	0,505	298,1	303,0	329,2	2,0
98	2,294	281,0	328,9	301,5	0,2
99	2,114	268,4	332,2	303,6	0,2
100	1,864	268,8	361,9	299,5	0,2
101	1,666	262,0	363,6	335,7	0,2
102	2,255	266,7	366,9	323,0	0,2
103	2,066	260,8	347,1	291,9	0,0
104	1,260	264,5	348,7	286,7	0,5
105	0,927	273,3	341,7	301,6	1,0
106	0,666	272,9	343,6	311,1	1,5
107	0,503	263,3	335,3	315,8	2,0

4.2 Opis tehničkog rešenja za smanjenje vrednosti magnetske indukcije

Tehničko rešenje koje treba da obezbedi smanjenje magnetske indukcije u stanu iznad TS 10 kV/0,4 kV Z-325 na vrednost ispod $4 \mu\text{T}$ preuzeto je iz [9] i realizovano je primenom sledećih mera:

- Na celom plafonu prostorije sa transformatorom postaviti gvozdene limove debljine 2 mm i 4 mm jedan preko drugog. Zaštitni faktor [9] (faktor umanjenja magnetske indukcije) iznosi 4,95. Rešenje je prikazano na slikama 3 i 4.
- Na delu plafona prostorije sa RP 10 kV i 0,4 kV iznad niskonaponskog razvoda postaviti gvozdene limove debljine 2 mm i 4 mm jedan preko drugog. Zaštitni faktor [9] (faktor umanjenja magnetske

indukcije) iznosi 4,95]. Rešenje je prikazano na slikama 5 i 6.

Slika 3 - Ram od elinog profila u transformatorskom boksu

Slika 4 - Gvozdeni limovi u transformatorskom boksu

Slika 5 - Sekundarne veze transformatora i ram od elinog profila u RP 10 kV i 0,4 kV

Slika 6 - Ram od elinog profila u RP 10 kV i 0,4 kV

4.3 Vrednosti magnetske indukcije posle primene mera za smanjenje magnetske indukcije

Raspored mernih tačaka u spavaćoj sobi 3. posle primene mera za smanjenje magnetske indukcije prikazan je na slici 7.

Slika 7 - Raspored mernih tačaka u spavaćoj sobi 3 predmetnog stana u ulici Narodnih heroja br. 44 (merenja posle primene mera za smanjenje magnetske indukcije)

Merne tačke 88 - 92 raspoređene su na 0,2 m od poda na kružnici i u centru kruga koji je na poziciji (1,3x1,7) m od desnog spoljašnjeg ugla sobe.

Merne tačke 93 - 97 raspoređene su po visini od 0 - 2 m na poziciji (1,3x1,7) m od desnog spoljašnjeg ugla sobe. Merne tačke 98 - 102 raspoređene su na visini 0,2 m od poda na kružnici i u centru kruga koji je na poziciji (3,2x0,7) m od desnog spoljašnjeg ugla sobe. Merne tačke 103 - 107 raspoređene su po visini od 0 - 2 m na poziciji (3,2x0,7) m od desnog spoljašnjeg ugla sobe. Merne tačke 108 - 112 raspoređene su po visini od 0 - 2 m na poziciji (2,7x0,1) m od desnog spoljašnjeg ugla sobe.

Rezultati merenja magnetske indukcije u spavaćoj sobi 3 posle primene mera za smanjenje magnetske indukcije, za karakteristične tačke, dati su u tabeli 2 [8].

Maksimalna vrednost magnetske indukcije izmerena je u tački 108 na koti poda prostorije i iznosi 1,444 μT pri struji od 22% od vrednosti naznačene sekundarne struje.

Nakon izvršene ekstrapolacije vrednosti strujena naznačenu vrednost sekundarne struje vrednost magnetske indukcije u tački 108 bila bi 6,71 μT .

Navedena vrednosti za magnetsku indukciju je veća od dozvoljene vrednosti od 4 μT koja je prema [1] deklarirana kao referentna.

Tabela 2. Rezultati merenja magnetske indukcije posle primene mera za smanjenje magnetske indukcije

Merna tačka	Magnetska indukcija [μT]	Struja I_A [A]	Struja I_B [A]	Struja I_C [A]	Visina h [m]
88	0,703	322,6	343,5	321,5	0,2
89	0,653	303,9	321,5	321,9	0,2
90	0,744	316,0	318,1	312,5	0,2
91	0,556	311,2	330,8	316,0	0,2
92	0,853	327,9	346,9	309,4	0,2
93	0,667	310,6	351,3	307,0	0,2
94	0,582	299,5	343,1	298,9	0,5
95	0,441	291,6	345,0	303,8	1,0
96	0,352	304,4	347,7	309,1	1,5
97	0,293	321,5	347,3	301,5	2,0
98	1,125	348,4	370,6	308,9	0,2
99	1,065	349,4	361,7	308,6	0,2
100	1,197	351,8	366,7	310,0	0,2
101	1,013	333,1	356,7	289,5	0,2
102	1,087	332,8	358,1	294,6	0,2
103	1,182	323,4	349,4	304,4	0,2
104	0,781	328,3	354,5	298,2	0,5
105	0,511	324,9	355,2	304,7	1,0
106	0,388	314,0	363,7	308,2	1,5
107	0,338	311,7	371,0	309,9	2,0
108	1,444	274,6	369,2	306,6	0,2
109	0,794	275,3	371,0	298,9	0,5
110	0,533	268,1	373,2	297,4	1,0
111	0,380	268,1	373,2	297,4	1,5
112	0,343	269,3	371,5	304,0	2,0

Tabela 3. Uporedni prikaz rezultata merenja magnetne indukcije na mestima A i B pre i posle primene mera zaštite

n	B_{max1} (μT)	B_{max2} (μT)	Faktor smanjenja	H (m)	Lokacija
1	11,60	3,41	3,4	0,2	A
2	5,15	1,43	3,6	1	
3	9,96	5,69	1,75	0,2	B
4	4,39	2,33	1,88	1	

5. ZAKLJUČAK

Primenjeno rešenje za smanjenje vrednosti nejonizujućih zračenja dovelo je do smanjenja vrednosti magnetske indukcije u najvišem broju merenih tačaka (tabela 2).

Usporedne vrednosti magnetne indukcije pre i posle primene mera zaštite date su u tabeli 3 iz kojih se vidi da je primenjenim merama zaštite postignut faktor smanjenja od 1,75 - 3,6 u zavisnosti od mesta merenja u sobi iznad prostorije sa energetskim transformatorom.

Dobijene vrednosti faktora smanjenja se razlikuju od vrednosti datih u [9] zbog različitih uslova i dispozicije opreme i prostorije u kojoj je vršeno merenje. Bolje smanjenje magnetske indukcije može se prema [9] ostvariti sa:

- dva gvozdена lima debljine 4 mm postavljena jedan preko drugog na celom plafonu prostorije za smeštaj energetskog transformatora;
- jednim transformatorskim limom pravilno orijentisanim u odnosu na vektor magnetske indukcije na celom plafonu prostorije za smeštaj energetskog transformatora. Zaštitni faktor [9] (faktor umanjenja magnetske indukcije) za ovaj slučaj je 8,89;
- zamenom bakarnih sabirnica za vezu između energetskog transformatora i niskonaponske table kablovima XP 00 3x(7x150 mm²)+3x150 mm² 0,6/1 kV koji bi bili postavljeni po podu TS.

Zbog različitih dispozicija koje mogu imati stambene jedinice u odnosu na TS 10 kV/0,4 kV neophodno je da se mera zaštite sa gvoždenim limovima sprovede na celom plafonu prostorije za razvodna postrojenja 10 kV i 0,4 kV, a ne samo na delu plafona iznad niskonaponske table.

LITERATURA

- [1] Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima, Sl. glasnik RS, broj 104/2009.
- [2] Pravilnik o izvorima nejonizujućih zračenja od posebnog interesa, vrstama izvora, načinu i periodu njihovog ispitivanja, Sl. glasnik RS, broj 104/2009.
- [3] DIRECTIVE 2004/40 of the European Parliament and of the Council.
- [4] WHO, Electromagnetic fields and public health, December 2005. Dostupno na: <http://www.who.int/peh-emf/publications>
- [5] Wellington-Dufferin-Guelph Public Health (2013). Health Hazard Investigation of a Transformer Station - Report. Dostupno na: <https://www.wdgpublishing.ca>
- [6] A. R. Đorđević, *Elektromagnetika*, Akademski misao, Beograd, 2008.
- [7] Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla“, Laboratorija za ispitivanje i etaloniranje, Beograd, Izveštaj br. 3414108-L: Merenje magnetske indukcije u stanu na adresi Narodnih heroja br. 44/7, Novi Beograd, jul 2014.
- [8] Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla“, Laboratorija za ispitivanje i etaloniranje, Beograd, Izveštaj br. 316045-L: Merenje magnetske indukcije u stanu na adresi Narodnih heroja br. 44/7, Novi Beograd, nakon primene mera za smanjenje magnetske indukcije, mart 2014.
- [9] J. Nahman, D. Salamon, M. Grbić: *Eksperimentalna istraživanja efekata različitih ekrana na smanjenje magnetske indukcije industrijske u stanosti*, Zbornik radova, br. 22, str. 173-184, Elektrotehnički Institut „Nikola Tesla“, 2012.

SUMMARY

TECHNICAL SOLUTION FOR REDUCING VALUES OF ELECTROMAGNETIC INDUCTION IN THE APARTMENT ABOVE THE TRANSFORMER SUBSTATION TS 10 KV/0,4 KV Z-325

Due to urban demands a considerable number of transformer substations (TS) 10 kV/0,4 kV is placed within residential and commercial buildings in central city zones of Belgrade. Non-ionizing radiation from TS 10 kV/0,4 kV, in residential or commercial areas that are placed right next to or above TS 10 kV/0,4 kV depending on the power of the transformer in TS 10 kV/0,4 kV and applied disposition solutions, may exceed the accepted levels in particular cases. The aim of this paper is to present a technical solution for reducing of electromagnetic induction in quasi stationary (low variable) fields in the apartment above TS 10 kV/0,4 kV Z-325 in Belgrade.

Key words: non-ionizing radiation, quasi-stationary fields, magnetic induction, measures to reduce radiation