

Boško Milešević, dipl.ing.el.
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
bosko.milesevic@fer.hr

Ivan Periša, dipl.ing.el.
HEP – ODS d.o.o., Zagreb
ivan.perisa@hep.hr

Prof.dr.sc. Armin Pavić
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
armin.pavic@fer.hr

Dinko Hrkec, dipl.ing.el.
HEP – ODS d.o.o., Zagreb
dinko.hrkec@hep.hr

POSTROJENJE ZA SEKCIONIRANJE ŽELJEZNIČKE 25 kV, 50 Hz MREŽE KAO IZVOR ELEKTROMAGNETSKIH POLJA

SAŽETAK

Postrojenje za sekcioniranje, kao element elektrovnog sustava koji radi pod naponom 25 kV, 50 Hz, predstavlja stacionarni izvor elektromagnetskih polja za koji zaštitna legislativa propisuje obvezatan nadzor razina polja. Postrojenja za sekcioniranje ima namjenu podijeliti željezničku mrežu u sekcije koje su radialno napajane, svaka iz svoje elektrovnice podstanice.

U radu je opisana zaštitna legislativa koja propisuje granične razine električnog i magnetskog polja u blizini elektroenergetskih objekata. Kako bismo procijenili da li razine elektromagnetskih polja u okolišu postrojenja za sekcioniranje prelaze granice propisane Pravilnikom, potrebno je izračunati vrijednost polja. Za potrebe proračuna u radu je korišten program EFC-400 Release V5.3.

Prezentirane su osnovne izvedbe postrojenja za sekcioniranje s cjelokupnom geometrijom te dobiveni rezultati trodimenzionalnom analizom. Rezultati analize su uspoređeni s propisanim graničnim razinama, kako bi se procijenio utjecaj električnih i magnetskih polja postrojenja za sekcioniranje na okoliš.

Glavne riječi: električna željeznica, sekcioniranje mreže, elektromagnetska polja

RAILWAY NETWORK SECTION SWITCHGEAR 25 kV, 50 HZ AS A SOURCE OF ELECTROMAGNETIC FIELD

SUMMARY

Railway network section switchgear, as an element of railway traction system 25 kV, 50 Hz, is a stationary source of electromagnetic fields for which legislation provides mandatory control of field's level. Function of railway network section switchgears is partition of railway network in sections which are loaded radially from different traction substation.

In this paper, protective legislation is described including marginal levels of electric and magnetic field in vicinity of electro energetic facilities. In order to estimate if the values of fields in the environment exceed the prescribed limits of Regulation, it is necessary to calculate the value of the field. For that purpose software EFC-400 Release V5.3 is used.

Basic design of railway network section switchgear is represented with overall geometry and the results are obtained by three-dimensional analysis. Results of analysis are compared with the values in regulation to assess the impact of electric and magnetic fields to environment.

Key words: electric railway, network section, electromagnetic fields

1. UVOD

Transport ljudi i robe, kroz povijest i danas, je od velike važnosti. Željeznica ima nezamjenjivo mjesto u transportu. Elektrifikacija željeznice predstavlja poseban razvoj i napredak željezničke infrastrukture.

Sustav napajanja električne željeznice je izveden nadzemnim kontaktnim vodovima podijeljenim u sekcije. Razlog sekcioniranja leži u činjenici da naponi pojedinih točaka elektroenergetskog sustava, iz kojih se željeznica napaja, nisu jednaki. Kada željeznička mreža ne bi bila sekcionirana, njome bi tekle struje izjednačenja što je neprihvatljivo. Postrojenja za sekcioniranje ima namjenu podijeliti željezničku mrežu u sekcije koje su radijalno napajane, svaka iz svoje elektrovučne podstanice. U izvanrednim slučajevima preko postrojenja za sekcioniranje mogu biti spojene dvije sekcije.

U blizini velikih željezničkih raskrižja postrojenja za sekcioniranje su nešto složenija nego na otvorenim prugama, no princip rada je podjednak.

U ovom radu će biti opisano postrojenje za sekcioniranje Runjaninova u Zagrebu kao izvor električnog i magnetskog polja. Rezultati će se usporediti sa važećom legislativom koja propisuje granične vrijednosti električnog i magnetskog polja.

2. HRVATSKA LEGISLATIVA IZ PODRUČJA ZAŠTITE OD ELEKTRIČNOG I MAGNETSKOG POLJA

U Republici Hrvatskoj je od 30.12.2003. na snazi Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja [1] koji vrijedi za elektroenergetske objekte.

Prema Pravilniku razlikuju se dva područja:

- a) područja profesionalne izloženosti
 - područja radnih mjesta koja nisu u području povećane osjetljivosti i na kojima se pojedinci mogu zadržavati do 8 sati dnevno, pri čemu je kontrolirana njihova izloženosti elektromagnetskim poljima;
- b) područja povećane osjetljivosti
 - područja stambenih zona u kojima se osobe mogu zadržavati i 24 sata, škole, ustanove predškolskog odgoja, rodilišta, bolnice i sl.

2.1. Temeljna ograničenja

Na području profesionalne izloženosti vrijednosti referentnih veličina ne smiju prelaziti vrijednosti prema Tablici I [1].

Tablica I. Granične razine električnog i magnetskog polja, gustoće magnetskog toka i gustoće snage ekvivalentnog ravnog vala za pojedinačnu frekvenciju

Frekvencija f	Jakost električnog polja E (V/m)	Jakost magnetskog polja H (A/m)	Gustoća magnetskog toka B (μ T)	Gustoća snage (ekvivalentnog ravnog vala) S_{ekv} (W/m^2)	Vrijeme uprosječenja t (minute)
< 1 Hz	14 000	32 000	40 000		✓
1–8 Hz	10 000	$32\,000/f^2$	$40\,000/f^2$		✓
8–25 Hz	10 000	$4000/f$	$5000/f$		✓
0,025–0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$		✓

Granične razine dane su za efektivne vrijednosti jakosti nesmetanog polja i gustoće magnetskog toka, a vrijede za jednoliku izloženost cijelog ljudskog tijela elektromagnetskim poljima.

Za frekvenciju $f=50$ Hz granične vrijednosti električnog i magnetskog polja za profesionalnu izloženost su: $E=5$ kV/cm, $H=80$ A/m te $B=100$ μ T.

Na području povećane osjetljivosti vrijednosti referentnih veličina ne smiju prelaziti vrijednosti prema Tablici II [1].

Tablica II. Granične razine električnog i magnetskog polja, gustoće magnetskog toka i gustoće snage ekvivalentnog ravnog vala za pojedinačnu frekvenciju

Frekvencija f	Jakost električnog polja E (V/m)	Jakost magnetskog polja H (A/m)	Gustoća magnetskog toka B (μ T)	Gustoća snage (ekvivalentnog ravnog vala) S_{ekv} (W/m^2)	Vrijeme uprosječenja t (minute)
< 1 Hz	5 600	12 800	16 000		*
1–8 Hz	4 000	$12\,800/f^2$	$16\,000/f^2$		*
8–25 Hz	4 000	$1\,600/f$	$2\,000/f$		*
0,025–0,8 kHz	$100/f$	$1,6/f$	$2/f$		*

Granične razine dane su za efektivne vrijednosti jakosti magnetskog polja i gustoće magnetskog toka, a vrijede za jednoliku izloženost cijelog ljudskog tijela elektromagnetskim poljima

Za frekvenciju $f=50$ Hz granične vrijednosti električnog i magnetskog polja za područja pojačane izloženost su: $E=2$ kV/cm, $H=32$ A/m te $B=40$ μ T.

Ukoliko neki od postojećih izvora elektromagnetskog polja ne zadovoljava gore propisane vrijednosti, mora se rekonstruirati.

3. POSTROJENJE ZA SEKSIONIRANJE ŽELJEZNIČKE KONTAKTNE MREŽE

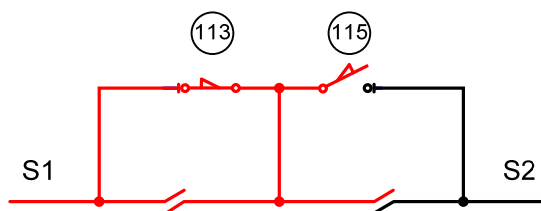
Kontaktna mreža električne željeznice se izvodi u izoliranim sekcijama. Razlog tome su struje izjednačenja koje bi se pojavile u kontaktnoj mreži koja bi bila istodobno spojena u dvije točke elektroenergetskog sustava (EES-a). Poznato je da u rasklopnim postrojenjima EES-a vladaju različiti naponi. Upravo bi ta razlika napona imala za posljedicu protjecanje struje izjednačenja.

Ta bi pojava bila višestruko štetna za kontaktnu mrežu, ali i za poduzeće koje gospodari tom mrežom. Naime, tokovi snaga koji prati struju izjednačenja uzrokuje dodatno zagrijavanje kontaktne mreže. Poduzeće koje gospodari kontaktnom mrežom dužno je elektroprivredi platiti energiju koju preuzme iz EES-a pa tako i gubitke koji prate struju izjednačenja.

Sekcioniranje se izvodi u postrojenjima za sekcioniranje pomoću učinskih ili ručnih rastavljača.

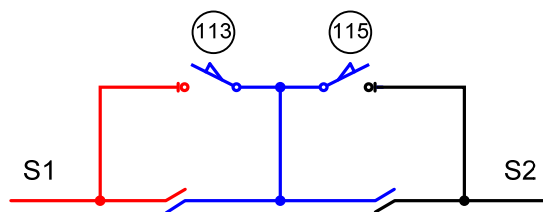
Sekcioniranje se provodi i uz elektrovučne podstanice (EVP) te na kraju radijalno napajanih kontaktnih vodova. Ukoliko je napon na bliskim točkama različitih sekcija jednak, primjerice kod sekcioniranja uz EVP, nije potrebno postavljati neutralnu sekciju. Naprotiv, ako se sekcioniraju radijalni vodovi koji rade na različitim fazama ili su im naponi iz bilo kojeg drugog razloga različiti, potrebno je postaviti neutralnu sekciju preko koje lokomotiva prelazi pomoću zaleta.

Na Slici 1. prikazana je principijelna shema sekcioniranja ispred EVP-a u redovnom pogonu.



Slika 1. Primjer rješenja sekcioniranja ispred EVP-a (redovni pogon)

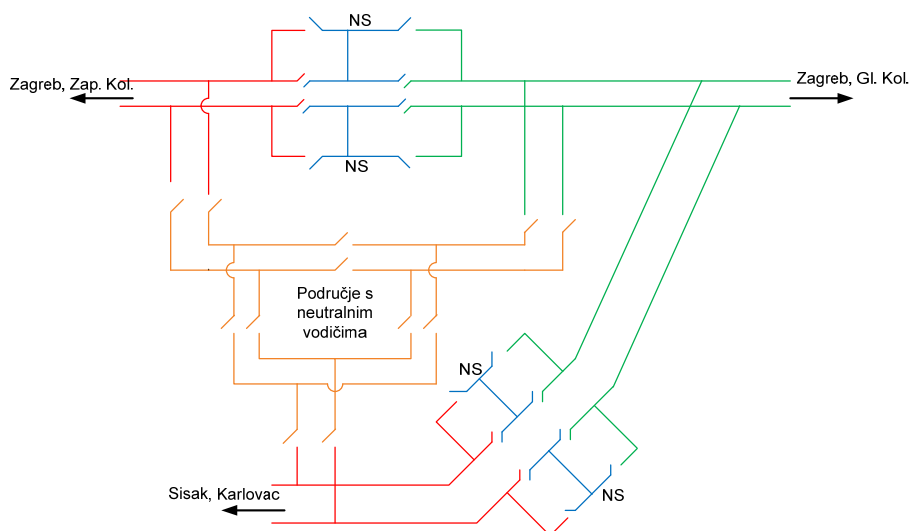
Ako je sekcije S1 i S2 potrebno razdvojiti na veću udaljenost, kako bi se postigla dovoljna dielektrična čvrstoća, primijenit će se rješenje na Slici 2. Sada između dviju sekcija postoji i neutralni dio koji nije pod pogonskim naponom.



Slika 2. Primjer rješenja sekcioniranja ispred EVP-a (izvanredni pogon)

U Hrvatskoj se električna željeznica napaja uvijek s dvije iste faze te se primjenjuju prethodne dvije izvedbe sekcioniranja.

U ovom radu će se detaljnije obraditi postrojenje za sekcioniranje s neutralnom sekcijom Runjaninova u blizini stanice Zagreb Gl. Kol. Principijelna shema sekcioniranja je prikazana Slikom 3.



Slika 3. Principijelna shema postrojenja za sekcioniranje Runjaninova
NS – neutralna sekcija

U redovnom pogonu postoje tri sekcije koje se napajaju iz različitih EVP-a. To su sekcije prema istoku (Zagreb, Gl. Kol.), prema zapadu (Zagreb, Zap. Kol.) te prema jugu (Sisak, Karlovac). U slučaju prekida napajanja na nekoj od sekcija odnosno u izvanrednom pogonu moguće je sekciju koja je ostala bez napajanja, preko postrojenja za sekcioniranje, napajati sa zdrave sekcije.

4. PRORAČUN ELEKTRIČNOG I MAGNETSKOG POLJA

Kako bismo se uvjerali da vrijednosti električnog polja na promatranom prostoru ne prelaze granice propisane Pravilnikom, potrebno je izračunati vrijednost polja. Za potrebe proračuna o ovom radu korišten je program EFC-400 Release V5.3. Prije samog proračuna električnog i magnetskog polja, bit će iznesena geometrija slučaja.

4.1. Teorijska osnova proračuna

Magnetsko polje konfiguracije vodiča kojima protječe električna struja se računa prema Biot-Savart-ovom zakonu kao superpozicija doprinosa svih dijelova na koje su podijeljeni promatrani vodiči. Svaki infinitezimalni dio doprinosi polju prema jednadžbi:

$$d\vec{B}(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} I(t) \quad (1)$$

gdje je $I(t)$ struja koja prolazi segmentom vodiča,

$d\vec{l}$ vektor duljine dijela vodiča te

r udaljenost točke u kojoj se računa polje od vodiča.

Pretpostavimo li da dio i duljine L_i ima usmjerenje kao apscisa, njegov doprinos polju u točki $P(x_p, y_p, z_p)$ je:

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

s komponentama:

$$\begin{aligned} B_{xi}(t) &= 0 \\ B_{yi}(t) &= -\frac{z_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} \left| \vec{B}_i(t) \right| \\ B_{zi}(t) &= \frac{y_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} \left| \vec{B}_i(t) \right| \end{aligned} \quad (3)$$

Električno se polje računa kao negativni gradijent skalarnog potencijala $\varphi(x, y, z)$ kao:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\vec{\nabla}\varphi(\vec{r}) \quad (4)$$

gdje je

$$\vec{\nabla} = \begin{pmatrix} \partial / \partial x \\ \partial / \partial y \\ \partial / \partial z \end{pmatrix} \quad (5)$$

Za linijski naboj usmjeren po apscisi potencijal u točki $P(x_p, y_p, z_p)$ može se odrediti kao:

$$\varphi(x_p, y_p, z_p, t) = \frac{Q_i}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{x_p + \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p^2}}{(x_p - L_i) + \sqrt{(x_p - L_i)^2 + y_p^2 + z_p^2}} \quad (6)$$

gdje je Q_i ukupan naboj dijela vodiča, a

L_i njegova duljina.

Iz dobivenog potencijala u svim točkama prostora, lako se odredi električno polje kao omjer razlike potencijala dviju točaka i njihove udaljenosti.

4.2. Geometrijska svojstva postrojenja za sekcioniranje

Na Slici 4 a). prikazana je fotografija PSN Runjaninova.

Prema fotografiji je vidljivo da u postrojenje ulazi šest vodova. Svi vodovi su pod naponom 25 kV.

Dvodimenzionalni (xy) te trodimenzionalni prikaz u programu EFC-400 su dani na slici 4 b) i c).

Ulazni podatci za proračun su koordinate početaka i završetaka spojnih vodova, pogonski napon i struja koja teče spojnim vodovima.

Koordinate početaka i završetaka spojnih vodova su dane u Tablici III.

Tablica III. Položaj spojnih vodova (koordinate – [m])

vod	x_p	y_p	z_p	x_k	y_k	z_k
1	-10	4.5	7	-3	4.5	6
2	-10	3.5	7	-3	3.7	6
3	-10	2.5	7	-3	1.3	6
4	-10	0.5	7	-3	0.5	6
5	3	4.5	6	10	4.5	7
6	3	3.7	6	10	3.5	7

Električno polje je određeno naponom na kojem se nalaze spojni vodovi. U ovom slučaju to je napon 25 kV, 50 Hz.

Magnetsko polje je određeno strujom koja protječe spojnim vodovima. U redovnom pogonu spojnim vodovima ne teče struja pa nema magnetskog polja, no u izvanrednim slučajevima pogona, kada postrojenje za sekcioniranje služi kako poveznica dviju sekcija, spojnim vodovima teče struja.

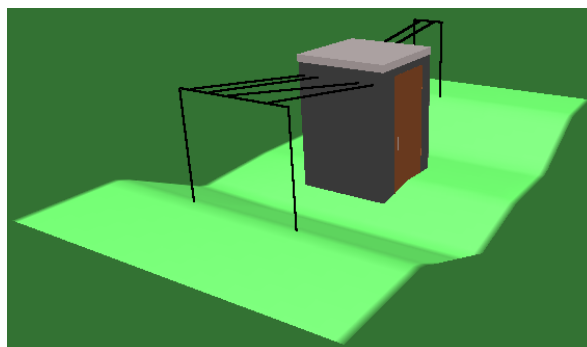
Stvaranje 3D modela reljefa oko izvora magnetskoga polja te preuzimanje podataka iz arhive se radi jedanput za sva izvršenja proračuna.

Jedan od najvažnijih aspekata za ispravan rad proračuna je pravilno sekcioniranje površine zemlje. Sekcioniranje površine zemlje je definirano kao konačan skup točaka koje pripadaju 3D površini definiranoj 3D modelom reljefa. Svaka sekcija predstavlja profil površine zemlje u vertikalnoj ravnini. [2]

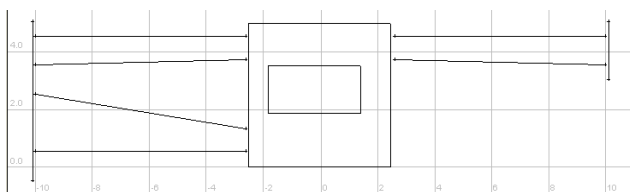
Najmanja širina sekcije zemlje je povezana s najmanjom vrijednošću magnetskoga polja koje želimo razlikovati, dok je minimalan poprečni razmak određen dostupnom rezolucijom korištene karte.



a)



b)



c)

Slika 4. PSN Runjaninova: a) fotografija, b) 3D prikaz, c) 2D prikaz vodova spojenih na PSN Runjaninova

4.3. Rezultati proračuna

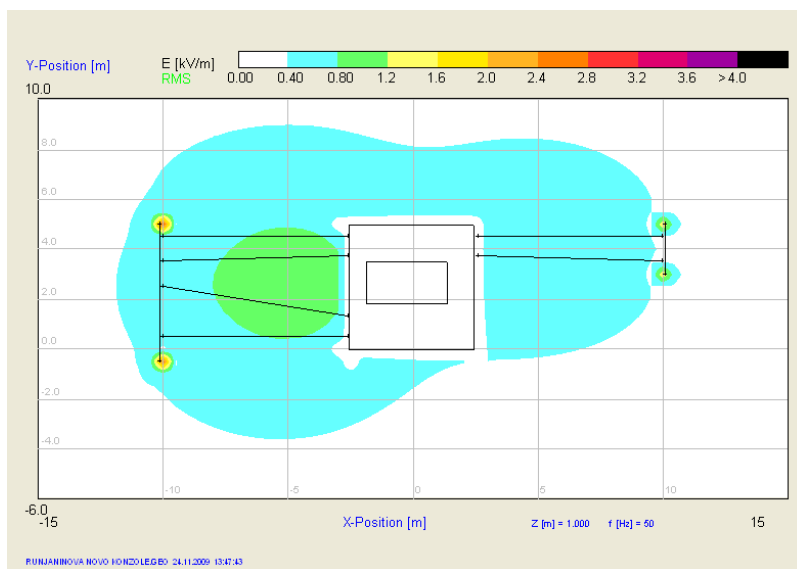
U ovom poglavlju prikazani su rezultati proračuna te su vrijednosti uspoređene s graničnim vrijednostima danima u [1].

4.3.1. Proračun električnog polja

Električno polje će biti proračunato na visini od 1 m iznad tla te na visini 2 m iznad tla. Prva je visina odabrana kao standarda za proračune ovoga tipa, dok je druga visina odabrana kako pretpostavka najveće visine gdje bi mogli boraviti ljudi.

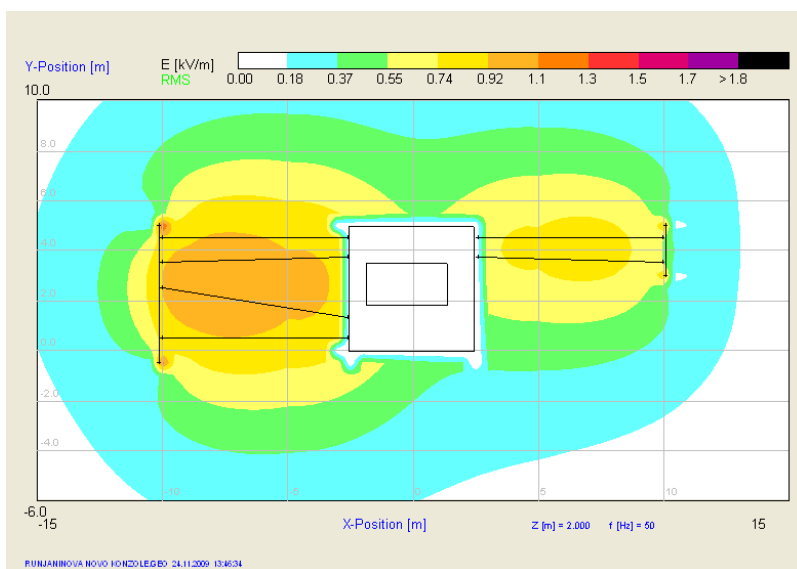
U proračun je uzet i utjecaj zgrade postrojenja za sekcioniranje. Kako je ona obložena metalom to u njoj neće biti djelovanja električnog polja.

Rezultati su dani na Slikama 5. i 6.



Slika 5. Jakost električnog polja na visini 1 m iznad tla

Napon na kojem se nalaze spojni vodovi je približno iste vrijednosti i kreće se od 20 kV do 27 kV ovisno o prisutnosti lokomotiva na sekciji. Jakost električnog polja 1 m iznad tla ne prelazi 2 kV/m, točnije najviša vrijednost električnog polja je oko 0.9 kV/m. Na slici 5. se može uočiti i područje s nešto izraženijim poljem na krajevima konzole odnosno oko nosača konzole. Ono je rezultat međudjelovanja metalnih masa i silnica polja, no ono je prostorno veoma ograničeno i nalazi se uz same šine koje ovdje nisu modelirane pa se njegova vrijednost ne može posve točno utvrditi. Jakost električnog polja 2 m iznad tla doseže 1.2 kV/m i javlja se na uskom prostoru oko nosivog stupa preko čijih konzola su kontakti vodovi povezani s postrojenjem za sekcioniranje. Jakost električnog polja u promatranom sustavu je u granicama dozvoljenih vrijednosti jer su manje od 2 kV/m.

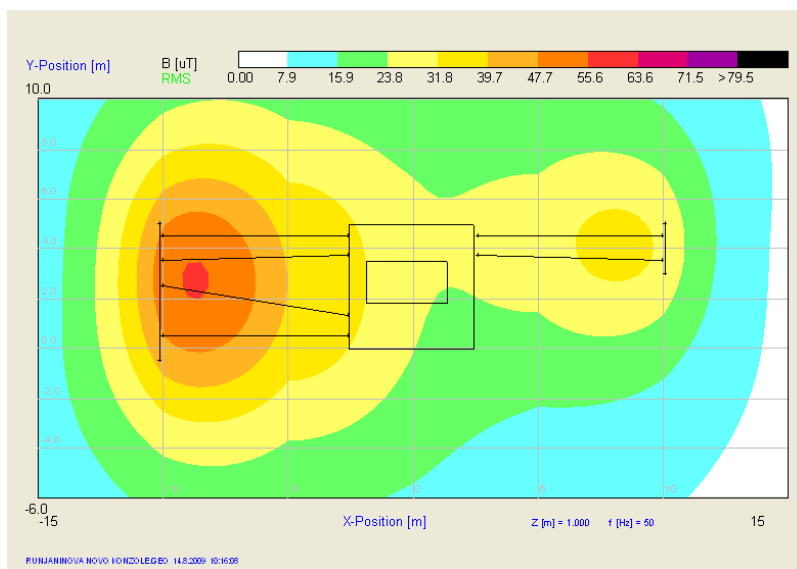


Slika 6. Jakost električnog polja na visini 2 m iznad tla

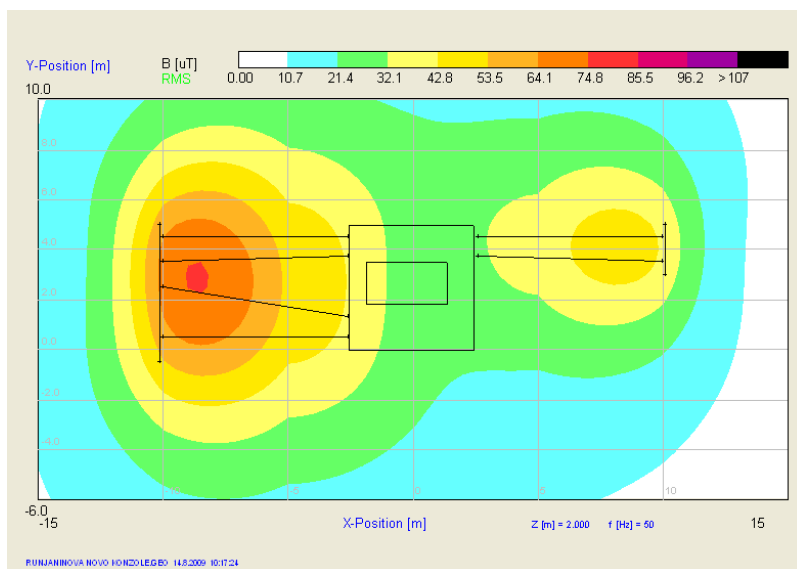
4.3.2. Proračun magnetskog polja

U redovnom pogonu spojnim vodovima ne teče struja pa nema niti magnetskog polja. Ipak, u izvanrednim slučajevima spojnim vodovima može teći struja. Računato je sa strujom 600 A kao nazivnom vrijednošću za vodiče kontaktne mreže presjeka 100 mm². Za naznačene okolnosti pri visinama iznad tla od 1 m i 2 m, prikazana je raspodjela vrijednosti magnetskog polja.

Iz dobivenih vrijednosti, prema Slikama 7. i 8. razvidno je da jakost magnetskog polja ne prelazi dozvoljene vrijednosti za područja profesionalne izloženosti, no za zadanu struju prelazi ograničenja za područja povećane osjetljivosti. Ova činjenica ne predstavlja problem jer je područje u kojem je magnetsko polje veće od 40 µT ograničeno i u njemu ne borave ljudi. Uz to, radi se o izvanrednom pogonu koji nastupa izuzetno rijetko.



Slika 7. Jakost magnetskog polja na visini 1 m iznad tla



Slika 8. Jakost magnetskog polja na visini 2 m iznad tla

Kritična vrijednost od 100 µT na 2 m iznad tla se doseže za struje od 800 A u svim spojnim vodovima. Ovako velika struja se u pravilu ne pojavljuje u željezničkoj mreži, a posebno ne u svim vodičima. Možemo stoga zaključiti da je rad postrojenja siguran za osobe koje se kreću u njegovoj blizini.

5. ZAKLJUČAK

Spojni vodovi na postrojenja za sekcioniranje željezničke električne mreže su izvor električnog i magnetskog polja. Dok je električno polje stalno prisutno jer su vodovi priključeni na napon, magnetsko polje će se javiti tek u izvanrednim pogonskim stanjima kada su preko postrojenja za sekcioniranje povezane dvije sekcije željezničke električne mreže.

Postrojenje za sekcioniranje Runjaninova se nalazi u neposrednoj blizini Kolodvora Zagreb-Gl. kol. Na postrojenje je spojeno šest vodova.

Pomoću programa EFC-400 proveden je proračun jakosti električnog i magnetskog polja, uzrokovanog električnim prilikama na spojnim vodovima, u blizini postrojenja za sekcioniranje. Iz dobivenih rezultata se može zaključiti da dobivene vrijednosti ne prelaze dozvoljene vrijednosti za područja profesionalne izloženosti. Magnetsko polje na visini 2 m iznad tla prelazi ograničenja za područja povećane osjetljivosti, no na vrlo malom prostoru u izvanrednom pogonskom stanju.

Postrojenje za sekcioniranje električne željezničke mreže Runjaninova zadovoljava uvjete iz Pravilnika [1].

LITERATURA

- [1] Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja, Narodne novine 41/08
- [2] D. Andreuccetti, N. Zoppetti: Magnetic fields dispersed by high-voltage power lines: an advanced evaluation method based on 3-D models of electrical lines and territory, Radiation Protection Dosimetry Vol.111 No.4, Oxford University Press, 2004.
- [3] EFC-400, Upute za korištenje
- [4] Uglešić I., "Izabrana poglavlja tehnike visokog napona", Zavodska skripta ZVNE, <http://www.fer.hr/predmet/iptvn> , 11. siječnja 2010.