

Boško Milešević
Fakultet elektrotehnike i računarstva
bosko.milesevic@fer.hr

Ivo Uglešić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ivo.uglesic@fer.hr

Viktor Milardić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
viktor.milardic@fer.hr

Božidar Filipović-Grčić
Fakultet elektrotehnike i računarstva
bozidar.filopovic-grcic@fer.hr

TIPIZIRANJE ELEKTROENERGETSKIH OBJEKATA I IZRADA STUDIJE ZNAČAJA KORIŠTENIH TIPSKIH IZVORA ELEKTROMAGNETSKIH POLJA

SAŽETAK

Korisnici izvora elektromagnetskih polja nazivnog napona iznad 1 kV trebaju za svaki od izvora u uporabi imati valjano izvješće o mjerjenjima elektromagnetskih polja. Za korisnike koji posjeduju velik broj jednakih izvora moguće je tipizirati objekte te izraditi jedinstven dokument kojim se potvrđuje da izvor ne emitera polja vrijednosti viših od dozvoljenih. U radu je prikazan zakonodavni okvir i ograničenja na vrijednosti jakosti niskofrekvencijskog električnog polja i magnetske indukcije. Predložen je postupak tipizacije s ključnim parametrima za transformatorske stanice, nadzemne elektroenergetske vodove i podzemne kabele. Prikazan je primjer proračuna jakosti električnog polja i magnetske indukcije jedne transformatorske stanice.

Ključne riječi: elektromagnetska polja, studija značaja, tipizacija, zaštita od zračenja

CLASSIFICATION OF POWER SYSTEM OBJECTS AS SOURCES OF LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS

SUMMARY

Power system objects with nominal voltage above 1 kV can produce significant electric field intensity and magnetic flux density so the users of those sources should have measure report for each source. For the users of a large number of identical sources, it is allowed to classify the sources and create a unique study that verifies all types of sources of electromagnetic fields. The study must provide that the values of fields produced in power system does not exceed limits defined in legislation. The paper presents legislation framework and limitations regarding electric field intensity and magnetic flux density produced in the power system. The procedure of classification with typical parameters of power switchgears, overhead power lines and buried cable has been proposed. An example of electric field intensity and magnetic flux density calculation has been presented.

Key words: EM fields study of EM fields, classification, non-ionizing radiation protection

1. UVOD

Stalno promišljanje o unapređenju uvjeta življenja i stanovanja, a posebno zdravlju ljudi iznjedrili su potrebu za određivanjem ograničenja na vrijednosti jakosti električnog polja i magnetske indukcije električnih uređaja. Elektroenergetski elementi u prijenosnom i distribucijskom sustavu izvor su električnog polja i magnetske indukcije, a mogu se podijeliti na transformatorske stanice, nadzemne vodove i podzemne kabele. Prvi Pravilnik kojim su se ograničavale vrijednosti jakosti električnog polja i magnetske indukcije u Hrvatskoj stupio je na snagu 2003. godine [1]. Od tada je nekoliko puta ispravljan, mijenjan i dopunjavao te je važeći Pravilnik na snazi od 2014. godine [2]. Međutim, neke odredbe aktualnog Pravilnika stavljene su van snage Pravilnikom o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja [3].

Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja predviđa da nepokretni izvor elektromagnetskog polja pri uporabi mora imati valjano izvješće o mjerenjima elektromagnetskog polja, izdano od ovlaštene pravne osobe, kojim se potvrđuje da razine elektromagnetskih polja u okolini izvora, pri njegovu radu, zadovoljavaju propisane uvjete osim nepokretnih zatečenih i novih tipskih niskofrekvencijskih izvora koji su studijom oslobođeni obveze obavljanja mjerenja i proračuna elektromagnetskih polja [2]. Slijedom ovih odredaba, vlasnici nepokretnih izvora mogu birati žele li mjeriti elektromagnetska polja uz svaki izvor ili tipizirati izvore i svaki pojedini tip opisati u studiji značaja. U praksi se korisnici nepokretnih izvora odlučuju na tipizaciju i izradu studije značaja obzirom da ovaj pristup u mnogome štedi resurse i ubrzava proces pribavljanja potrebne dozvole za rad nepokretnog izvora polja.

U radu je opisan proces i ključni parametri za tipizaciju elektroenergetskih objekata u cilju izrade studije značaja korištenih tipskih izvora elektromagnetskog polja. Na primjeru transformatorske stanice 110/35 kV prikazat će se način proračuna jakosti električnog polja i magnetske indukcije te njihove očekivane vrijednosti. Dobiveni rezultati usporedit će se s graničnim vrijednostima prema važećem Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja [2].

2. TEMELJNA OGRANIČENJA

Na razini Europske unije i Hrvatske prva ograničenja na vrijednosti jakosti električnog polja i magnetske indukcije pojavila su se prije dvadesetak godina. Tako je 1999. godine donesen prvi Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja [4], a 2010. godine novi i trenutno važeći Zakon istog naziva [5]. Obe inačice Zakona predviđale su da će se problematika ograničenja vrijednosti jakosti električnog polja i magnetske indukcije pobliže obraditi u Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja. Slijedom toga, Ministarstvo zdravstva donijelo je prvi Pravilnik 2003. godine [1] koji se više puta mijenjao da bi posljednje i važeće inačice Zakona i Pravilnika bile donesene sukladno Direktivi Europske unije o minimalnim zdravstvenim i sigurnosnim zahtjevima u pogledu izloženosti radnika riziku povećanih fizikalnih agenasa [6]. Zakonodavni okvir u Uniji i Hrvatskoj prati preporuke Međunarodnog vijeća za neionizirajuće zračenje [7]. Ovo neovisno tijelo na svjetskoj razini prati razvoj istraživanja o utjecajima elektromagnetskih polja na ljudsko zdravlje te izdaje preporuke za ograničenja i zaštitu od izloženosti elektromagnetskim poljima.

Temeljna ograničenja u vrijednostima jakosti električnog polja i magnetske indukcije kategorizirana su prema osjetljivosti skupina na radnike koji obavljaju profesionalnu djelatnost u prostoru s povećanim razinama polja, opću populaciju i općedostupne prostore te na posebno osjetljive skupine poput djece ili hospitaliziranih osoba.

2.1. Granične vrijednosti jakosti električnog polja i magnetske indukcije u Republici Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj na snazi je Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja koji je na snazi od prosinca 2014. godine [2]. Međutim, dijelovi ovoga pravilnika prestali su važiti stupanjem na snagu Pravilnika o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja koji je na snazi od 1. srpnja 2016. godine. Dijelovi koji su se prestali primjenjivati odnose se na kategoriju „profesionalne izloženosti“. Ipak, obzirom da su ograničenja za ovu skupinu prenesena u drugi pravilnik i ostala na snazi, u ovom radu zadržat će se klasifikacija prema izvornom Pravilniku o zaštiti od elektromagnetskih polja iz prosinca 2014. godine.

U područjima „profesionalne izloženosti“ radnici se smiju zadržavati do 40 sati tjedno (stavljeno van snage), a granične vrijednosti koje ne smiju biti premašene prikazane su u Tablici I. [2]

Tablica I. Granične razine jakosti električnog i magnetskog polja te magnetske indukcije ravnog vala za pojedinačnu frekvenciju u području profesionalne izloženosti

Frekvencija	Jakost električnog polja E (V/m)	Jakost magnetskog polja H (A/m)	Magnetska indukcija B (μ T)
1–8 Hz	$2 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5/f^2$	$2 \cdot 10^5/f^2$
8–25 Hz	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4/f$	$2,5 \cdot 10^4/f$
25 – 300 Hz	$5 \cdot 10^5/f$	800	1000

Granične razine dane su za efektivne vrijednosti jakosti nesmetanog električnog polja i magnetske indukcije, a vrijede za jednoliku izloženost cijelog ljudskog tijela elektromagnetskim poljima.

Za frekvenciju $f=50$ Hz granične vrijednosti jakosti električnog i magnetske indukcije za „profesionalnu izloženost“ su: $E=10$ kV/cm i $B=1000$ μ T ($H=800$ A/m).

Na „javnim područjima“ vrijednosti referentnih veličina ne smiju prelaziti vrijednosti prema Tablici II [2].

Tablica II. Granične razine jakosti električnog i magnetskog polja te magnetske indukcije ekvivalentnog ravnog vala za pojedinačnu frekvenciju u javnim područjima

Frekvencija	Jakost električnog polja E (V/m)	Jakost magnetskog polja H (A/m)	Magnetska indukcija B (μ T)
1–8 Hz	$1 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4/f^2$	$4 \cdot 10^4/f^2$
8–25 Hz	$1 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^3/f$	$5 \cdot 10^3/f$
25 – 300 Hz	$2,5 \cdot 10^5/f$	$4 \cdot 10^3/f$	$5 \cdot 10^3/f$

Za frekvenciju $f=50$ Hz granične vrijednosti jakosti električnog polja i magnetske indukcije za „javna područja“ su: $E=5$ kV/cm i $B=100$ μ T ($H=80$ A/m).

Na „područjima povećane osjetljivosti“ vrijednosti referentnih veličina ne smiju prelaziti vrijednosti prema Tablici III [2].

Tablica III. Granične razine jakosti električnog i magnetskog polja te magnetske indukcije ekvivalentnog ravnog vala za pojedinačnu frekvenciju u području povećane osjetljivosti

Frekvencija	Jakost električnog polja E (V/m)	Jakost magnetskog polja H (A/m)	Magnetska indukcija B (μ T)
1–8 Hz	$4 \cdot 10^3$	$1,28 \cdot 10^4/f^2$	$1,6 \cdot 10^4/f^2$
8–25 Hz	$4 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3/f$	$2 \cdot 10^3/f$
25 – 300 Hz	$1 \cdot 10^5/f$	$1,6 \cdot 10^3/f$	$2 \cdot 10^3/f$

Za frekvenciju $f=50$ Hz granične vrijednosti jakosti električnog i magnetske indukcije za „područja povećane osjetljivosti“ su: $E=2$ kV/cm i $B=40$ μ T ($H=32$ A/m).

Valja napomenuti kako novi Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja iz lipnja 2016. godine definira dva područja s „niskim vrijednostima upozorenja“ i „visokim vrijednostima upozorenja“ [3]. Za pogonsku frekvenciju, granične vrijednosti jednake su graničnim vrijednostima definiranim za „profesionalnu izloženost“ i iznose 10 kV/m i 1000 μ T. Visoke vrijednosti upozorenja određene su za područja gdje polja ne premašuju 20 kV/m odnosno 6000 μ T. Sukladnost s graničnim vrijednostima izloženosti određuje se na temelju već dostupnih informacija, a ako to nije moguće procjenu izloženosti treba temeljiti na mjerenjima i proračunima polja.

Za postojeće elektroenergetske objekte moraju postojati dokazi iz kojih je jasno vidljivo da emitirano polje ne prelazi vrijednosti određene Pravilnikom o zaštiti od elektromagnetskih polja. Ovo implicira da bi za svaki postojeći objekt trebao postojati proračun ili mjerenje ovlaštenog tijela kojim se dokazuje njegova sukladnost. Kako u pogonu imamo desetke tisuća objekata od kojih su brojni jednaki, predviđeno je da se pojedini objekti mogu tipizirati, a njihov utjecaj na okolinu obraditi u Studiji značaja korištenih tipskih izvora

obzirom na razine elektromagnetskih polja. Način tipizacije i ključni parametri opisani su u nerednom poglavlju.

3. TIPIZIRANJE ELEKTROENERGETSKIH OBJEKATA ZA POTREBE IZRADE STUDIJE

Izvori elektromagnetskih polja mogu se podijeliti prema geometriji i namjeni na podzemne kabele, nadzemne vodove i transformatorske stanice. Svaki od ovih glavnih izvora je specifičan te su tipovi izvora određeni za svaku od geometrija i snaga pojedinog glavnog izvora.

Nadzemni vodovi najčešće se izvode s neizoliranim vodičima, a također i s poluizoliranim vodičima te izoliranim vodičima (tzv. univerzalnim kabelima). Pojedini tip nadzemnog voda u smislu emitiranih razina elektromagnetskih polja određuju: naponska razina, izvedba vodiča, geometrija glave stupa (osim kod univerzalnog kabela), presjek vodiča, materijal vodiča i visina ovjesišta.

Podzemni srednjenaponski kabeli ne uzrokuju pojavu električnog polja na površini obzirom da su oklopljeni, stoga je za njih potrebno obavljati proračun i mjerenje samo magnetske indukcije. Pojedini tip podzemnog kabela u smislu emitiranih razina elektromagnetskih polja određuju: naponska razina podzemnog kabela, presjek vodiča, materijal vodiča, način i dubina polaganja.

Transformatorske stanice imaju najveći broj različitih izvedaba od svih izvora elektromagnetskih polja u elektroenergetskom sustavu. Ipak, za njihovo tipiziranje dovoljno je poznavati osnovne podatke kojima je određena vrijednost magnetske indukcije, obzirom da su svi dijelovi pod naponom oklopljeni te izvan kućišta uređaja i ekrana kabela u pravilu nema električnog polja. Pojedini tip transformatorske stanice u smislu emitiranih razina elektromagnetskih polja određuju: prijenosni omjer transformatora, snaga i broj transformatora te izvedba (geometrija) transformatorske stanice.

3.1. Tipizacija nadzemnih vodova kao izvora elektromagnetskih polja

Nadzemni vodovi polažu se na stupove iznad tla, a vrijednosti polja ovise o:

- Naponskoj razini,
- Obliku glave stupa kojim je određen razmještaj vodiča,
- Strujnom opterećenju voda određenom za pojedini materijal i presjek vodiča,
- Visini vodiča iznad tla.

Proračuni se provode za visinu na sredini raspona gdje su vodiči najbliži zemlji. Prema Pravilniku o tehničkim normativima za izgradnju elektroenergetskih vodova napona od 1 kV do 400 kV [8] članku 103. određeno je kako se nadzemni vodovi mogu voditi preko zgrada ukoliko je sigurnosna udaljenost bilo kojeg od vodiča barem 3 m od nepristupačnih dijelova zgrade (krov, dimnjak, ...) odnosno barem 4 m od stalno pristupačnih dijelova (terasa, građevinska skela, ...). U skladu s tim, treba promatrati udaljenost od vodiča na kojoj jakost električnog polja i magnetske indukcije padnu na graničnu vrijednost, a proračun na sredini raspona obaviti za visinu vodiča od 6 m. Ova visina predstavlja minimalnu sigurnosnu visinu za srednjenaponske nadzemne vodove za dostupna mjesta, prema članku 102. Pravilnika [8] i s aspekta emitiranih razina elektromagnetskog polja predstavlja najnepovoljniji slučaj.

S aspekta određivanja magnetske indukcije u okolini nadzemnog voda potrebno je poznavati veličinu nazivne struje pri proračunu odnosno trenutne struje pri mjerenju. Vrsta materijala iz kojeg je izrađen vodič i njegov presjek od odlučnog su značaja za vrijednost nazivne struje. Općenito vrijedi, veći presjek vodiča dozvoljava veću nazivnu struju kroz vodič. Iz ove činjenice proizlazi da se najviše vrijednosti struja mogu očekivati pri najvećim presjecima vodiča nadzemnih vodova. Kako je vrijednost magnetske indukcije izravno ovisna o veličini struje, proizlazi da će i magnetska indukcija biti najveća u okolini vodiča s najvećim presjekom.

Jakost električnog polja izravno ovisi o naponu vodiča u čijoj se okolini određuje polje. Veći napon znači i veću razinu električnog polja. Ova činjenica znači da se veće vrijednosti jakosti električnog polja mogu očekivati u blizini vodova s višim nazivnim naponima. Univerzalni kabeli su oklopljeni te se u njihovu okolinu ne emitira električno polje.

Obzirom na izneseno, može se zaključiti da su za određivanje tipa nadzemnog voda kao izvora elektromagnetskog polja važni, uz oblik glave stupa i visinu ovjesišta vodiča iznad tla, i sljedeći podaci:

- Naponska razina,
- Vrsta vodiča,
- Materijal vodiča,
- Presjek vodiča.

3.2. Tipizacija podzemnih kabela kao izvora elektromagnetskih polja

Srednjenaponski kabelski vodovi polažu se u tlo, a razlikuju se sljedeći slučajevi:

- Polaganje trožilnih kabela,
- Polaganje jednožilnih kabela u ravninu,
- Polaganje jednožilnih kabela u trokut.

Kabeli se polažu na dubinu od 0,8 m do 1,0 m, a za potrebe proračuna uzima se nepovoljniji slučaj s aspekta razina elektromagnetskog polja – dubina polaganja 0,8 m.

Materijal vodiča kabela je bakar ili aluminij, različitih presjeka i načina izvedbe.

Za podzemne kabele je karakteristično da je zbog uzemljenog vodljivog ekrana kabela električno polje u njihovoj okolini beznačajno, zbog čega ga nije potrebno niti razmatrati prilikom proračuna i izrade Studije.

S aspekta određivanja magnetske indukcije u okolini kabela potrebno je poznavati veličinu nazivne struje pri proračunu odnosno trenutne struje pri mjerenju. Vrsta materijala iz kojeg je izrađen vodič i njegov presjek od odlučnog su značaja za vrijednost nazivne struje. Općenito vrijedi, veći presjek vodiča dozvoljava veću nazivu struju kroz vodič. Iz ove činjenice proizlazi da se najviše vrijednosti struja mogu očekivati pri najvećim presjecima vodiča kabela. Kako je vrijednost magnetske indukcije izravno ovisna o veličini struje, proizlazi da će i magnetska indukcija biti najveća u okolini vodiča s najvećim presjekom.

Obzirom na izneseno može se zaključiti da su za određivanje tipa kabela kao izvora magnetske indukcije, uz način polaganja kabela i dubine koji su unaprijed određeni, važni sljedeći podaci:

- Vrsta kabela (jednožilni/trožilni),
- Materijal vodiča,
- Presjek vodiča.

3.3. Tipizacija transformatorskih stanica kao izvora elektromagnetskih polja

Transformatorske stanice najsloženiji su izvori elektromagnetskih polja. Njihova se izvedba bitno razlikuje ovisno o prijenosnom omjeru i nazivnoj snazi transformatora. Za sve stanice nužno je poznavati geometriju i smještaj transformatora, vodnih i transformatorskih polja, sabirnice i sklopnih elemenata. Za srednjenaponske stanice potrebno je poznavati i modelirati način kabelskog posluživanja (unutarnje, vanjsko).

Općenito vrijedi, veća instalirana snaga transformatora dozvoljava veću nazivnu struju kroz namote. Iz ove činjenice proizlazi da se najviše vrijednosti struja mogu očekivati pri najvećim snagama transformatora. Kako je vrijednost magnetske indukcije izravno ovisna o veličini struje, proizlazi da će i magnetska indukcija biti najveća u okolini transformatorskih stanica s najvećom instaliranom snagom transformatora. Obzirom na složenost transformatorskih stanica, ne modeliraju se svi elementi, već samo oni dijelovi koji su značajni za emitiranje električnog polja i magnetske indukcije.

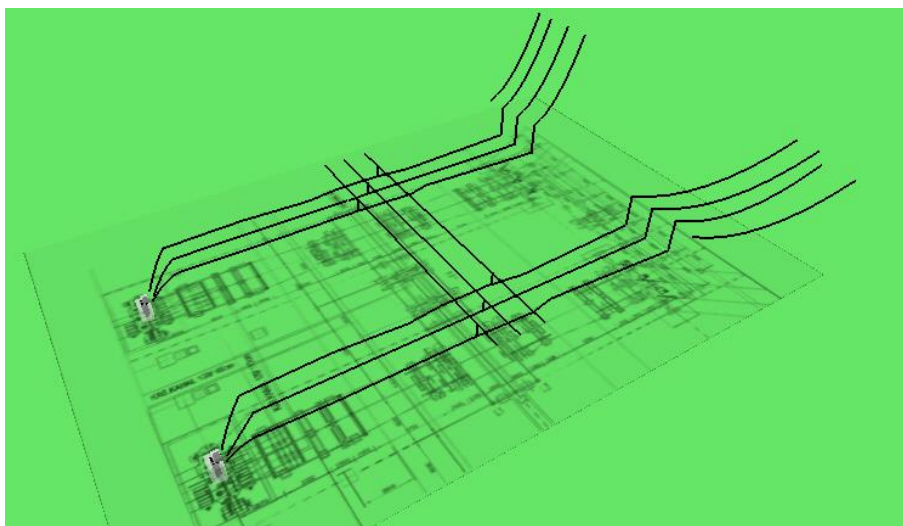
U nastavku ovoga rada prikazat će se način proračuna i mjerenja jakosti električnog polja i magnetske indukcije u jednoj 110/10(20) kV transformatorskoj stanici.

4. PRORAČUN JAKOSTI ELEKTRIČNOG POLJA I MAGNETSKE INDUKCIJE

Kako bismo se uvjerali da vrijednosti električnog polja na promatranom prostoru ne prelaze granice propisane Pravilnikom, potrebno je izračunati vrijednost polja. Za potrebe proračuna u ovom radu korišten je program EFC-400 V5.03 [9]. Fizikalne osnove i način proračuna dobro su poznate i opisane u literaturi. [10] - [16] Prije samog proračuna jakosti električnog i magnetskog polja, bit će iznesena geometrija slučaja.

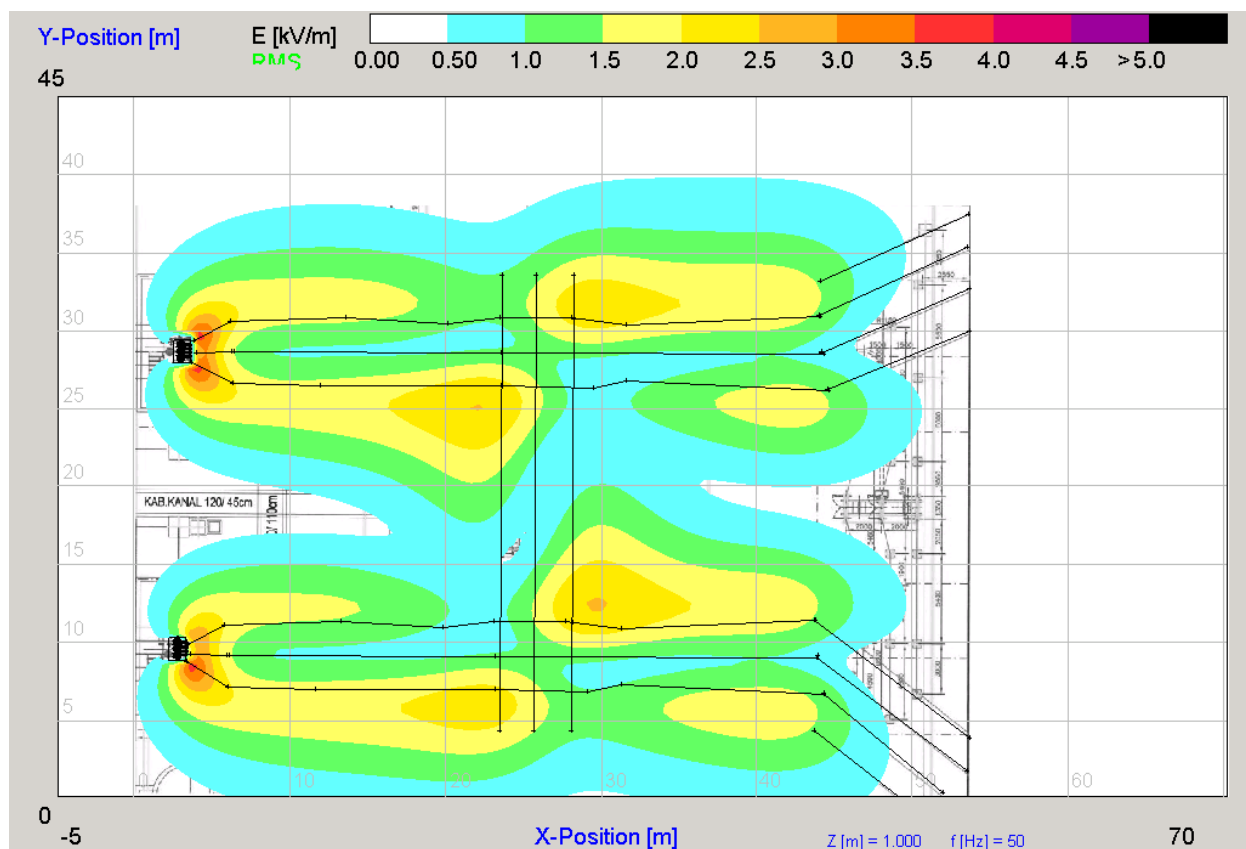
Za primjer proračuna odabrana je jedna 110/10(20) kV kao spoj prijenosne i distribucije mreže. Radi se o relativno jednostavnoj stanici s dva transformatora snage 20 MVA. Visina sabornica je 5,2 m. U transformatorsku stanicu uvedena su dva nadzemna dalekovoda po principu ulaz-izlaz te je maksimalna struja na sabirnicama definirana presjekom vodiča. Spojni vodovi u vodnim poljima su uzeti s presjekom 240/40 mm² AlČ što omogućuje tok struje vrijednosti 605 A po fazi.

U nastavku su prikazani rezultati proračuna jakosti električnog polja i magnetske indukcije u programu EFC400. Trodimenzionalni model stanice prikazan je na Slici I. svi proračuni napravljeni su za visinu 1 m iznad tla, a najviše vrijednosti jakosti električnog polja i magnetske indukcije očekuju se na mjestima gdje su vodiči najbliži tlu tj. u blizini transformatora.



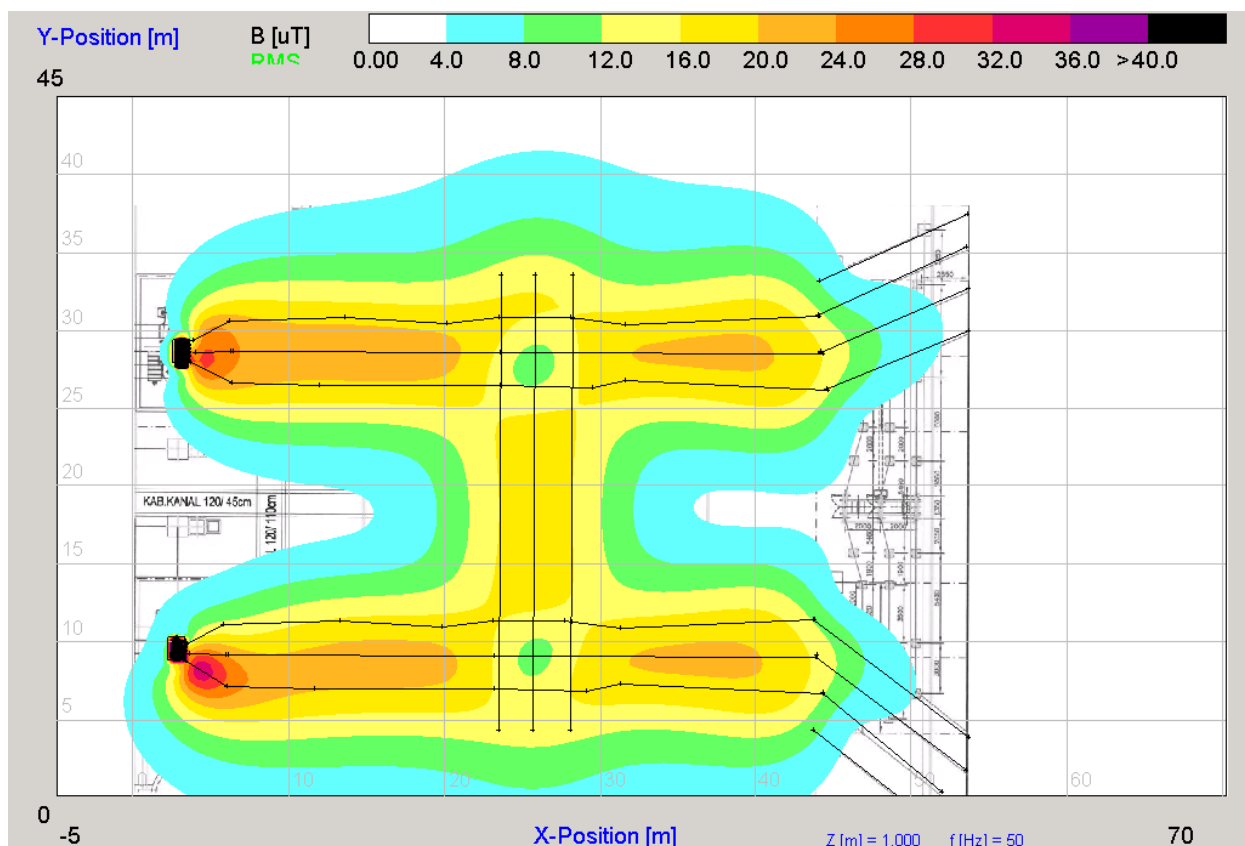
Slika I. Trodimenzionalni model transformatorske stanice

Na Slici II. prikazana je raspodjela jakosti električnog polja na visini 1 m iznad tla. Jakost električnog polja doseže vrijednost 3,6 kV/m ispod spojeva na transformatore.



Slika II. Raspodjela jakosti električnog polja u transformatorskoj stanici

Magnetska indukcija također je određena na području transformatorske stanice, a rezultat proračuna prikazan je Slikom III. Vrijednost magnetske indukcije doseže 34,5 μ T.



Slika III. Raspodjela magnetske indukcije u transformatorskoj stanici

Vrijednosti jakosti električnog polja i magnetske indukcije u ovom primjeru ne premašuju granične vrijednosti niti i javno području, a kamoli u području profesionalne izloženosti. Jakost električnog polja i magnetske indukcije brzo padaju s udaljenošću te su njihove vrijednosti na ogradi postrojenja manje od graničnih vrijednosti za javna područja (5 kV/m i 100 μ T).

Obzirom da se pri proračunima vrijednosti napona i struja uzimaju s nominalnim vrijednostima, vrijednosti magnetske indukcije u pravilu su veće pri proračunima nego pri mjerenjima [17]. Električno polje značajno je manje podložno promjenama jer se vrijednost napona visokonaponskih elemenata održava oko nominalne vrijednosti.

6. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan pregled regulative kojom su određena ograničenja na vrijednosti jakosti električnog polja i magnetske indukcije u prostoru. Poblježe je opisana važeća regulativa uključujući i vrijednosti ograničenja. Korisnici elektroenergetskih objekata nazivnog napona većeg od 1 kV trebaju za svaki pojedini izvor imati dokaz da taj izvor ne emitira elektromagnetsko polja iznad graničnih vrijednosti. Kako bi se smanjio obim posla, preporuča se tipizacija objekata i izrada Studije značaja.

Za tipizaciju su najznačajniji parametri nazivna struja, nazivni napon i geometrija objekta. Za nadzemne vodove i kabele potrebno je poznavati nazivni napon, presjek i materijal vodljivog materijala te visinu odnosno dubinu postavljanja vodiča. Za transformatorske stanice geometrija uključuje položaj transformatora u odnosu na ogradu postrojenja, raspored transformatora, vodnih i transformatorskih polja te sklopnih elemenata.

Proračuni i mjerenja jakosti električnog polja i magnetske indukcije najsloženiji su za transformatorske stanice. U radu je prikazan primjer proračuna stanice nazivnog napona 110/10(20) kV. Vrijednosti električnog polja i magnetske indukcije izražene su u apsolutnim vrijednostima i uspoređene s graničnim vrijednostima. U navedenom primjeru granične vrijednosti nisu nadmašene.

7. LITERATURA

- [1] Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja, Narodne novine 204/2003, prosinac 2003.
- [2] Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja, Narodne novine 146/2014, prosinac 2014.
- [3] Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima elektromagnetskog zračenja, Narodne novine 59/2016, lipanj 2016.
- [4] Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja, Narodne novine 105/1999, listopad 1999.
- [5] Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja, Narodne novine 91/2010, srpanj 2010.
- [6] Directive 2013/35/EU of the European parliament and the Council on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (20th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC) and repealing Directive 2004/40/EC, June 2013.
- [7] ICNIRP Guidelines for limiting exposure on time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), International commission on non-ionizing radiation protection, 1998.
- [8] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV, Službeni list SFRJ 65/88, 18/92, Narodne novine 53/91, 24/97, 1997.
- [9] EFC-400 – Magnetic and Electric Field Calculation, Telecommunication, Power Lines and Stations, User Manual, Berlin, 2013.
- [10] S. Vujević, D. Lovrić, P. Sarajčev, "Comparison of 2D algorithms for the computation of power line electric and magnetic fields", European Transactions on Electrical Power, Vol. 21, No.1, pp. 505–521, 2011.
- [11] T. Modrić, S. Vujević, "Computation of the electric field in the vicinity of overhead power line towers", Electric Power Systems Research, Vol. 135, pp. 68–76, 2016.
- [12] T. Modrić, S. Vujević, I. Paladin, "3D computation of the overhead power lines electric field", Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 53, pp. 17–28, 2017.
- [13] T. Modrić, S. Vujević, I. Paladin, "3D computation of the overhead power lines electric field", Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 53, pp. 17–28, 2017.
- [14] Modrić, Tonći; Vujević, Slavko; Lovrić, Dino. A surface charge simulation method based on advanced numerical integration. Advances in engineering software. 86 (2015); 20-28
- [15] Modrić, Tonći; Vujević, Slavko; Lovrić, Dino. 3D Computation of the Power Lines Magnetic Field. // Progress in Electromagnetics Research M (PIER M). 41 (2015); 1-9
- [16] Modrić, Tonći; Vujević, Slavko; Majić, Tomislav. Geometrical Approximation of the Overhead Power Line Conductors. // International Review on Modelling and Simulations (IREMOS). 7 (2014), 1; 76-82
- [17] CIGRE Working Group C4.203, Technical Guide for Measurement of Low Frequency Electric and Magnetic Fields Near Overhead Power Lines, CIGRE, 2009

Zahvala: Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom 9299 „Razvoj naprednih visokonaponskih sustava primjenom novih informacijskih i komunikacijskih tehnologija“.