

# UTJECAJ ELEKTROMAGNETSKIH POLJA NA RADNIKE PRILIKOM RADA POD NAPONOM NA ELEKTRODISTRIBUCIJSKIM POSTROJENJIMA

---

Krha, Igor

Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac  
University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:818530>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied  
Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Odjel Sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Igor Krha

**UTJECAJ ELEKTROMAGNETSKIH POLJA  
NA RADNIKE PRILIKOM RADA POD  
NAPONOM NA  
ELEKTRODISTRIBUCIJSKIM  
POSTROJENJIMA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2021.

Karlovac University of Applied Sciences

Safety and Protection Department

Professional graduate study of Safety and Protection

Igor Krha

**ELECTROMAGNETIC FIELDS IMPACT ON  
WORKERS DURING LIVE WORK IN  
ELECTRIC POWER DISTRIBUTION**

Final paper

Karlovac, 2021.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Odjel Sigurnosti i zaštite

Specijalistički diplomski stručni studij sigurnosti i zaštite

Igor Krha

**UTJECAJ ELEKTROMAGNETSKIH POLJA  
NA RADNIKE PRILIKOM RADA POD  
NAPONOM NA  
ELEKTRODISTRIBUCIJSKIM  
POSTROJENJIMA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor: mr. sc. Boris Ožanić, dipl. ing.

Karlovac, 2021.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J.Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 - 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 - 579



## VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Specijalistički studij: Sigurnosti i zaštite

Usmjerenje : Zaštita na radu

Karlovac, 2021.

## ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: Igor Krha

Matični broj: 0023037596

Naslov: Utjecaj elektromagnetskih polja na radnike prilikom rada pod naponom na elektrodistribucijskim postrojenjima

Opis zadatka:

Cilj završnog rada je utvrditi vrijednosti elektromagnetskih polja kojima mogu biti izloženi radnici prilikom rada pod naponom na elektrodistribucijskim postrojenjima.

Za realizaciju navedenog cilja potrebno je utvrditi granične vrijednosti električnih polja i magnetske indukcije koje su dopuštene prema važećoj zakonskoj regulativi, utvrditi izvore polja koji se mogu pojaviti u elektrodistribucijskim postrojenjima, te programskim proračunom dobiti najveće vrijednosti koje se mogu pojaviti prilikom rada pod naponom metodama koje se trenutačno koriste u HEP-u. Dobivene rezultate je potrebno usporediti s dopuštenim vrijednostima elektromagnetskih polja za navedenu skupinu radnika kako bi se utvrdilo da li metode rada pod naponom zadovoljavaju propisane zakonske vrijednosti.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

07/2021

.....

.....

Mentor:

mr. sc. Boris Ožanić

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## **PREDGOVOR**

Hvala mojoj obitelji na podršci, mentoru mr. sc. Borisu Ožaniću na vođenju i usmjerenju prilikom ovog rada. Također zahvaljujem i svim ostalima koji su mi pomogli prilikom studiranja i stjecanju novih znanja, kolegama s posla i studija, kao i profesorima i djelatnicima Veleučilišta u Karlovcu.

## SAŽETAK

Predmet ovog rada je utvrditi maksimalne vrijednosti elektromagnetskih (EM) polja kojima mogu biti izloženi radnici koji rade pod naponom (RPN) na elektrodistribucijskim postrojenjima. U prvom dijelu rada su navedeni zakoni temeljem kojih su definirane granične vrijednosti polja koje su dozvoljene za navedenu skupinu radnika. Nakon toga su locirani svi izvori EM polja koji se mogu javiti u elektrodistribucijskim postrojenjima.

Kako bi se točno utvrdile vrijednosti EM polja koje se mogu javiti prilikom RPN-a, opisane su trenutačne metode izvođenja radova pod naponom i definirane udaljenosti radnika od izvora EM polja. Za dobivanje vrijednosti na definiranim udaljenostima korišten je programski paket koji omogućuje simulacije EM polja u trodimenzionalnom prostoru.

U završnom dijelu rada uspoređene su dobivene vrijednosti s dopuštenim graničnim vrijednostima kako bi se utvrdilo da li metode rada pod naponom u HEP-u zadovoljavaju propisane zakonske vrijednosti izloženosti radnika EM poljima.

**Ključne riječi:** elektromagnetska polja, granične vrijednosti, elektrodistribucijska postrojenja, rad pod naponom, utjecaj na radnike

## **SUMMARY**

The subject of this paper is to determine the maximum values of electromagnetic (EM) fields to which workers during live work (RPN) in electric power distribution can be exposed. The first part of the paper lists the laws which define values of the fields that are allowed for this group of workers. After that, all sources of EM fields that can occur in electric power distribution are located.

To accurately determine the values of EM fields that can occur during RPN, the current methods of performing live work are described and the distances of workers from EM field sources are defined. To obtain values at defined distances, the software package was used, which enables simulations of EM fields in three-dimensional space.

In the final part of the paper, the obtained values are compared with the permitted limit values in order to determine whether the methods of live working in HEP meet the legal values of workers' exposure to EM fields.

**Key words:** electromagnetic field, limit values, electric power distribution, live work, impact on workers



# SADRŽAJ

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA.....	I
PREDGOVOR.....	II
SAŽETAK .....	III
SADRŽAJ .....	V
1. UVOD.....	1
2. ZAKONSKA REGULATIVA .....	2
2.1. Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja .....	2
2.2. Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja .....	4
3. EM POLJA .....	7
3.1. Električno polje i magnetska indukcija.....	7
3.2. Vrste EM onečišćenja i utjecaj na zdravlje.....	10
4. IZVORI ELEKTROMAGNETSKIH POLJA U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU HEP-A .....	14
4.1. Dalekovodi .....	16
4.1.1. Podzemni dalekovodi .....	17
4.1.2. Nadzemni dalekovodi.....	19
4.1.3. Transformatorske stanice .....	22
5. IZLOŽENOST RADNIKA HEP ODS-a .....	27
5.1. Radni postupci u HEP ODS-u u blizini EM .....	28
5.1.1. Tehnologija rada pod naponom.....	29
5.1.2. Prednosti i mane RPN .....	30
5.1.3. Sigurnost radnika pri RPN .....	32
5.1.4. Vrijednosti EM polja pri RPN.....	35
6. PRORAČUNI EM POLJA ZA POSTROJENJA I METODE RADA RPN .....	37
6.1. Čišćenje trafostanica 10(20)/0,4 kV .....	37
6.2. Elektromontažni radovi na DV 35(30) kV i 10(20) kV.....	41
7. ZAKLJUČAK .....	53
8. LITERATURA .....	55
9. PRILOZI .....	57
9.1. Popis slika.....	57
9.2. Popis tablica .....	58

## 1. UVOD

U Republici Hrvatskoj na snazi su Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja [1] i Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja [2], kojima se propisuju dozvoljeni iznosi električnih i magnetskih polja, koje emitiraju elektroenergetski i drugi električni objekti u okolini.

Prema zahtjevima Pravilnika [2], propisane su granične vrijednosti elektromagnetskih polja, postupci njihovog provjeravanja i uvjeti za dobivanje ovlasti za obavljanje tih postupaka.

Prilikom izgradnje i pogona elektroenergetskih objekata svaki izvor niskofrekvencijskog elektromagnetskog polja nazivnog napona iznad 1 kV treba zadovoljavati odredbe Pravilnika [2] odnosno emitirati polja ispod propisanih razina. Nepokretni izvor elektromagnetskog polja mora imati valjano izvješće o mjerenjima elektromagnetskog polja, kojim se potvrđuje da razine elektromagnetskih polja u okolini izvora zadovoljavaju tražene uvjete.

Za radnike koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja (radnici na energetske postrojenjima), vrijednosti elektromagnetskog polja kojoj mogu biti izloženi su propisane Pravilnikom o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja [3]. Skupina radnika koja je najugroženija od ovih izvora zračenja su djelatnici koji izvode radove na energetske postrojenjima metodom rada pod naponom jer dolaze u neposrednu blizinu izvora. U ovom radu je izvršen proračun vrijednosti elektromagnetskih polja u neposrednoj blizini postrojenja za distribuciju električne energije, s ciljem detekcije izloženosti radnika prilikom izvođenja radova pod naponom.

## **2. ZAKONSKA REGULATIVA**

Izvori elektromagnetskih polja ili uređaji, postrojenja i građevine koji sadrže izvore elektromagnetskih polja smiju se upotrebljavati i stavljati u uporabu samo ako ispunjavaju temeljne zahtjeve sukladno njihovoj namjeni i u uvjetima primjene ne zrače i ne izlažu ljude zračenju iznad graničnih razina propisanih za elektromagnetska polja [1]. Temeljne zahtjeve za izvore, uređaje, postrojenja i građevine koje sadrže izvore elektromagnetskih polja te granične razine tih polja, postupke njihova provjeravanja i uvjete za dobivanje ovlasti za obavljanje tih postupaka propisani su Pravilnikom [2].

U ovom poglavlju date su neke osnovne napomene iz Pravilnika [2], u vezi elektroenergetskih objekata. Potrebno je istaknuti da je u lipnju 2016. godine na snagu stupio Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja [3], a kojim su prestale važiti odredbe iz Pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja [2] vezane uz područje profesionalne izloženosti.

### **2.1. Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja**

Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja [2] razlikuje dva područja izloženosti elektromagnetskim poljima:

- područja povećane osjetljivosti:

Područja povećane osjetljivosti jesu zgrade stambene i poslovne namjene, škole, ustanove predškolskog odgoja, rodilišta, bolnice, domovi za starije i nemoćne, smještajni turistički objekti te dječja igrališta. Pod područjem povećane osjetljivosti podrazumijevaju se i neizgrađene površine namijenjene (prema urbanističkom planu) za gore navedene objekte.

- javna područja:

Sva područja u urbanim i ruralnim sredinama na koja nije ograničen slobodan pristup općoj populaciji, a nisu u području povećane osjetljivosti.

Izvor niskofrekvencijskog elektromagnetskog polja jest svaki objekt elektroenergetskog sustava (kao npr. elektrana, transformatorska stanica,

elektroenergetski vod, rasklopno postrojenje) nazivnog napona većeg od 1 kV, element ili postrojenje električne vuče ili bilo koji drugi uređaj, sustav ili objekt koji svoj rad temelji na stvaranju elektromagnetskog polja frekvencije do uključivo 100 kHz.

Za prosudbu o emisiji električnog i magnetskog polja elektroenergetskih objekata u okolinu bitne su granične vrijednosti polja dopuštene Pravilnikom [2]. Za svako od područja granične vrijednosti dane su u Prilogu 2. Pravilnika [2].

U *tablicama 1 i 2* prikazan je dio graničnih vrijednosti jakosti električnog polja, jakosti magnetskog polja i gustoće magnetskog toka (magnetske indukcije) pri frekvencijama od interesa. Granične razine dane su za efektivne vrijednosti jakosti električnog polja, jakosti magnetskog polja i gustoće magnetskog toka.

*Tablica 1. Granične razine za javna područja [2]*

Frekvencija $f$ (Hz)	Jakost električnog polja $E$ (V/m)	Jakost magnetskog polja $H$ (A/m)	Gustoća magnetskog toka $B$ ( $\mu$ T)
1 – 8	104	$3,2 \cdot 10^4 / f^2$	$4 \cdot 10^4 / f^2$
8 – 25	104	$4 \cdot 10^3 / f$	$5 \cdot 10^3 / f$
25 – 800	$2,5 \cdot 10^5 / f = 5 \text{ kV/m}$ (za 50 Hz)	$4 \cdot 10^3 / f = 80 \text{ A/m}$ (za 50 Hz)	$5 \cdot 10^3 / f = 100 \text{ }\mu\text{T}$ (za 50 Hz)

*Tablica 2. Granične razine za područja povećane osjetljivosti [2]*

Frekvencija $f$ (Hz)	Jakost električnog polja $E$ (V/m)	Jakost magnetskog polja $H$ (A/m)	Gustoća magnetskog toka $B$ ( $\mu$ T)
1 – 8	$4 \cdot 10^3$	$1,28 \cdot 10^4 / f^2$	$1,6 \cdot 10^4 / f^2$
8 – 25	$4 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3 / f$	$2 \cdot 10^3 / f$
25 – 800	$10^5 / f = 2 \text{ kV/m}$ (za 50 Hz)	$1,6 \cdot 10^3 / f = 32 \text{ A/m}$ (za 50 Hz)	$2 \cdot 10^3 / f = 40 \text{ }\mu\text{T}$ (za 50 Hz)

Izvor elektromagnetskog polja smije se upotrebljavati i stavljati u uporabu samo ako razine elektromagnetskog polja u njegovoj okolini zadovoljavaju uvjete propisane člancima 10. - 16. Pravilnika [2], odnosno *tablicama 1 i 2*.

Ukratko, najvažnije je rezimirati granične razine električnog polja i magnetske indukcije za elektrodistribucijska postrojenja (za pogonsku frekvenciju 50 Hz):

- a) javna područja  $E = 5 \text{ kV/m}$ ;  $B = 100 \text{ } \mu\text{T}$ ,
- b) područje povećane osjetljivosti  $E = 2 \text{ kV/m}$ ;  $B = 40 \text{ } \mu\text{T}$ .

## **2.2. Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja**

Područja profesionalne izloženosti određena su isključivo za kretanje i boravak radnika koji su upoznati s mogućim postojanjem povišenih razina elektromagnetskih polja [2]. Ovo područje izdvojeno je 2016. godine u zaseban Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja [3], te je isti u skladu s Direktivom 2013/35/EU.

Poslodavci su obvezni osigurati ograničenu izloženost radnika elektromagnetskim poljima koja nije veća od graničnih razina izloženosti za učinke na zdravlje i graničnih razina izloženosti za učinke na osjetila. Sukladnost s graničnim razinama izloženosti za učinke na zdravlje i graničnim razinama izloženosti za učinke na osjetila mora se utvrditi uporabom odgovarajućih postupaka za procjenu izloženosti. Ako se sukladnost s graničnim vrijednostima izloženosti ne može pouzdano odrediti na temelju već dostupnih informacija, procjena izloženosti izvodi se na temelju mjerenja i proračuna. U tom slučaju, procjena uzima u obzir odstupanja u pogledu mjerenja ili proračuna kao što su numeričke metode, modeliranje izvora, geometrija modela i električna svojstva tkiva i materijala, utvrđena u skladu s dobrom praksom [3].

Poslodavac je obvezan izraditi i provoditi akcijski plan koji uključuje tehničke i/ili organizacijske mjere s ciljem sprečavanja izloženosti iznad graničnih vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje i graničnih vrijednosti izloženosti za učinke na osjetila.

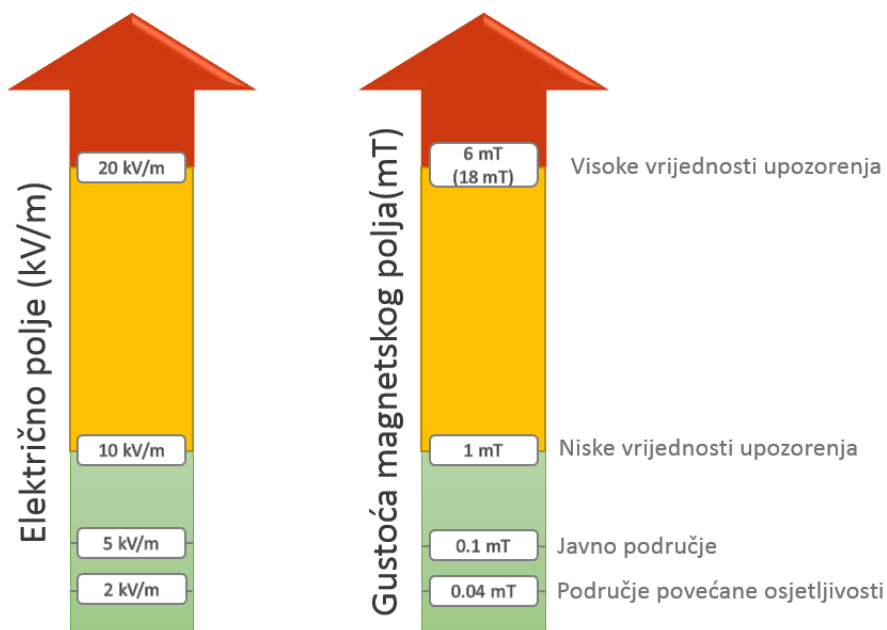
Sljedeće se fizikalne veličine i vrijednosti koriste za utvrđivanje vrijednosti upozorenja, čije se magnitude utvrđuju s ciljem pojednostavnjivanja procesa dokazivanja sukladnosti s odgovarajućim graničnim vrijednostima izloženosti ili poduzimanja odgovarajućih zaštitnih ili preventivnih mjera [3]:

- Za električno polje frekvencije 50 Hz
  - niska vrijednost upozorenja:  $E = 10 \text{ kV/m}$
  - visoka vrijednost upozorenja:  $E = 20 \text{ kV/m}$

Za električna polja „niske vrijednosti upozorenja“ i „visoke vrijednosti upozorenja“ su vrijednosti koje se odnose na posebne zaštitne ili preventivne mjere utvrđene ovim Pravilnikom [3].

- Za magnetsku indukciju frekvencije 50 Hz
  - niska vrijednost upozorenja:  $B = 1000 \mu\text{T}$
  - visoka vrijednost upozorenja:  $B = 6000 \mu\text{T}$

Za magnetska polja „niske vrijednosti upozorenja“ su vrijednosti koje se odnose na granične vrijednosti izloženosti za učinke na osjetila i „visoke vrijednosti upozorenja“ koje se odnose na granične vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje (slika 1) [3].



Slika 1. Granične razine električnog polja i gustoće magnetskih polja [8]

Uzimajući u obzir tehnički napredak i dostupnost mjera za nadzor proizvodnje elektromagnetskih polja na izvoru, poslodavac je obavezan poduzimati potrebne mjere kako bi osigurao da su rizici uzrokovani elektromagnetskim poljima na mjestu rada uklonjeni ili smanjeni na minimum. Smanjenje rizika zbog izloženosti elektromagnetskim poljima temelji se na općim načelima prevencije, sukladno odredbama posebnih propisa o uvođenju mjera za poticanje poboljšanja sigurnosti i zdravlja radnika na radu.

Ako se na temelju procjene rizika prekorače vrijednosti upozorenja, poslodavac je obvezan izraditi i provoditi akcijski plan koji uključuje tehničke i/ili organizacijske mjere s ciljem sprečavanja izloženosti iznad graničnih vrijednosti izloženosti za učinke na zdravlje i graničnih vrijednosti izloženosti za učinke na osjetila, uzimajući u obzir posebno [3]:

- a. druge radne metode čija je posljedica manja izloženost elektromagnetskim poljima;
- b. izbor opreme koja emitira elektromagnetska polja manjeg intenziteta, uzimajući u obzir rad koji treba obaviti;
- c. tehničke mjere za smanjenje zračenja elektromagnetskih polja, uključujući prema potrebi uporabi sigurnosnih sklopki, zaštitne opreme ili sličnih mehanizama za zaštitu zdravlja;
- d. odgovarajuće mjere ograničenja i pristupa kao što su upozorenja (*slika 2*), oznake, oznake na podu, ograde s ciljem ograničenja ili nadzora pristupa;



*Slika 2. Upozorenje za elektromagnetsko polje [10]*

- e. kod izloženosti električnim poljima, mjere i postupke za sprečavanje pražnjenja iskrama i dodirnih struja tehničkim sredstvima i obukom radnika;
- f. odgovarajuće programe održavanja radne opreme, sustave radnih mjesta i radnih postaja;
- g. projektiranje i raspored mjesta rada i radnih postaja;
- h. ograničenje trajanja i intenziteta izloženosti; i
- i. dostupnost odgovarajuće osobne zaštitne opreme.

### 3. EM POLJA

Električna i magnetna polja, poznata kao elektromagnetna polja (EM), sastoje se od električnih i magnetnih valova koji se zajedno gibaju. Ova polja nas uvijek okružuju.

Postoje dva tipa elektromagnetnog zračenja, ionizirajuće i neionizirajuće zračenje. Ionizirajuće zračenje je dovoljno snažno da izbaci elektrone iz omotača atoma. Ovaj proces se zove ionizacija, i može prouzročiti oštećenja stanica tijela. Neionizirajuće zračenje ima dovoljno energije za vibriranje atoma u molekulama, koje uzrokuje zagrijavanje atoma, ali nedovoljno za izbacivanje elektrona iz omotača atoma.

Elektromagnetna polja povezana sa strujom su tipovi niskofrekventnih neionizirajućih zračenja, te mogu nastati prirodno ili nastaju kao produkt tehnologije. Npr. munja izaziva elektromagnetsko zračenje jer stvara struju između neba i zemlje. Drugi primjer je magnetno polje planete Zemlje, uvijek smo u Zemljinom magnetnom polju kojeg stvara jezgra planete.

Zračenje elektroenergetskih objekata nastaje zbog prolaska struje kroz vodiče i energetske opreme. Zbog toga, niskofrekventno elektromagnetno zračenje se može naći u blizini električnih izvora kao što su dalekovodi, trafostanice i sl.

Jakost elektromagnetskog polja je proporcionalna s iznosom struje (A) i naponu (V), te se smanjuje s udaljenošću [5].

#### 3.1. Električno polje i magnetska indukcija

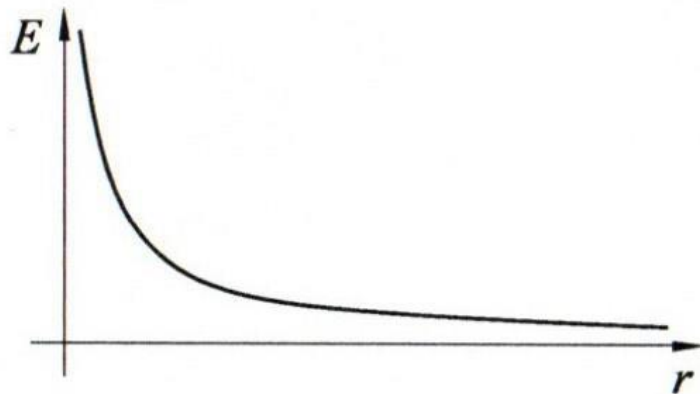
Električno polje  $E^{\rightarrow}$  u određenoj poziciji je jakost i usmjerenje mehaničke sile  $F$  koja djeluje na jedinični naboj  $q$  kada je on izložen tom električnom polju. Standardna definicija električnog polja je: „Električno polje je posebno fizičko stanje u okolini naelektriziranog tijela, odnosno električnog naboja, koje se očituje u mehaničkoj sili  $F$  koja djeluje na pokusni naboj  $Q_0$  unesen u električno polje“ [6]. Prema danoj definiciji zaključeno je da je električno polje vektorska veličina te se računa prema izrazu:

$$E^{\rightarrow} = \frac{F_0^{\rightarrow}}{Q_0}$$



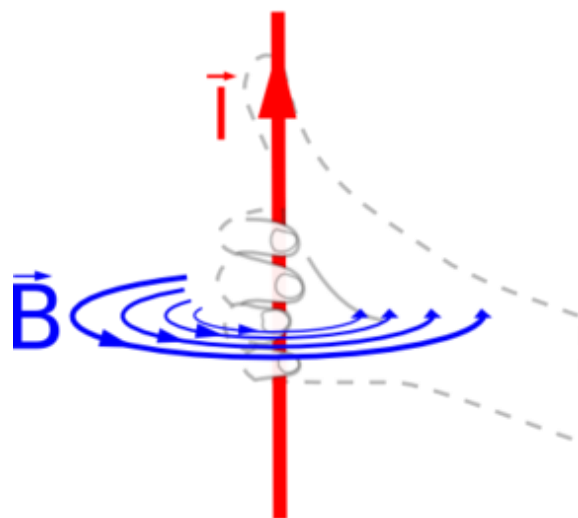
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Iako je prema fizikalnom zapisu mjerna jedinica električnog polja njutn po kulonu [N/C], najčešće upotrebljavana mjerna jedinica je volt po metru [V/m] . Budući da jakost električnom polja ima kvadratnu povezanost s udaljenošću (slika 3), približavanjem točkastom naboju jakost električnog polja se jako povećava [6].



Slika 3. Jakost električnog polja u ovisnosti o udaljenosti [6]

Svaki vodič kroz koji teče struja je ujedno okružen i magnetskim poljem koje može biti prikazano koncentričnim kružnicama oko samog vodiča. Pri tom se koristi "pravilo desne ruke" pri čemu palac pokazuje smjer struje, a zakrivljeni prsti smjer magnetske indukcije (B) (slika 4).



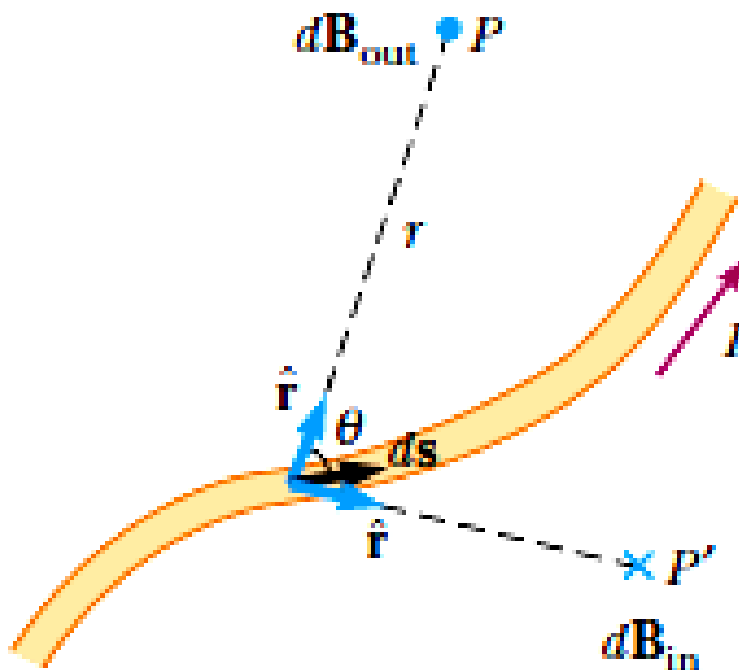
Slika 4. Pravilo desne ruke [7]

Magnetska indukcija  $B$  vodiča kojim teče struja može se odrediti uz pomoć Biot-Savartovog zakona.

Biot i Savart došli su do matematičkog izraza koji prikazuje magnetsko polje u nekoj točki prostora u odnosu na struju koja proizvodi to polje. Izraz se bazira na slijedećem eksperimentalnom opažanju magnetskog polja  $dB$  u točki  $P$  povezanom s elementom duljine  $ds$  žice kroz koju protječe stalna struja (slika 5) [21]:

- Vektor  $dB$  je okomit prema oba vektora,  $ds$  (koji ukazuje na smjer struje) i jediničnom vektoru  $\hat{r}$  usmjerenog od  $ds$  prema  $P$ .
- Veličina  $dB$  je obrnuto proporcionalna s  $r^2$ , gdje je  $r$  udaljenost između  $ds$  i točke  $P$ .
- Veličina  $dB$  je proporcionalna struji  $i$  i veličini  $ds$  elementa dužine  $ds$ .
- Veličina  $dB$  je proporcionalna sa  $\sin \theta$ , gdje je  $\theta$  kut između vektora  $ds$  i  $r$ .

$$d\mathbf{B}^{\rightarrow} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I ds^{\rightarrow} \times r^{\rightarrow}}{r^2}$$



Slika 5. Magnetsko polje  $dB$  u točki  $P$  [21]

Biot–Savartov zakon koristi se za računanje rezultirajućeg magnetskog polja 'B' na položaju 'r' u 3D prostoru generiranom stalnom strujom "I" (na primjer zbog žice).

$$B_r = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \frac{I dl \times r'}{|r'|^3}$$

### 3.2. Vrste EM onečišćenja i utjecaj na zdravlje

Elektromagnetski spektar se dijeli u više područja na temelju različitih fizikalnih svojstava elektromagnetskih polja različitih frekvencija. Različita područja ovisno o frekvenciji predstavljaju npr. statička polja, vremenski promjenjiva elektromagnetska polja niskih frekvencija, radiofrekvencijska polja, mikrovalovi, optičko zračenje (u koje spada infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost i ultraljubičasto zračenje) itd. Kada se govori o zaštiti ljudi od utjecaja elektromagnetskih polja misli se na područje od 0 do 300 GHz (tj. područje ispod frekvencija optičkog zračenja). EM polja mrežne frekvencije spadaju u kategoriju polja vrlo niske frekvencije (ELF – Extremely low frequency) i nalaze se na samom donjem kraju elektromagnetskog spektra. Kod takvih polja se, za razliku od polja visoke frekvencije, električna i magnetska komponenta polja i njihovo djelovanje promatraju odvojeno. Djelovanje električnih i magnetskih polja vrlo niske frekvencije na ljudski organizam svodi se na induciranje struje u tijelu. Zbog toga je i osnovni parametar za ograničenje iznosa polja u svim propisima iz tog područja upravo gustoća inducirane struje. Kod dovoljno visokih iznosa polja inducirane struje u tijelu mogu izazvati efekte na razini stanica i u živčanom sustavu, te izazvati podražaje stanica živaca i mišića. Ti efekti su poznati i akutnog su karaktera, tj. nestaju nakon prestanka izloženosti polju. Postojeći propisi i preporuke za zaštitu ljudi od EM polja imaju za cilj upravo zaštitu od tih, akutnih efekata. Rasprave i istraživanja u vezi mogućih efekata koji bi se javljali ispod tih granica su već dugo u tijeku, ali bez definitivnih rezultata. Pri tome se prvenstveno istražuju mogućnosti pojave dugoročnih štetnih posljedica zbog izloženosti polju.

Utjecaj elektromagnetskih polja na ljudsko zdravlje je bio i još uvijek jest predmet brojnih znanstvenih istraživanja. Unatoč tome na osnovno pitanje, da li elektromagnetska polja kojima su ljudi izloženi izazivaju štetne učinke po ljudsko

zdravlje, još nema definitivnog odgovora. Mnoga provedena istraživanja ne ukazuju na povezanost izloženosti poljima i štetnih posljedica, ali povremeno se u svijetu objave i rezultati studija koje ukazuju na mogućnost da takva veza ipak postoji. Sredinom 2006. godine je znanstveni odbor Europske komisije SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) objavio svoj preliminarni stav u vezi rezultata najnovijih istraživanja o utjecaju EM polja na ljudsko zdravlje [10]. Zadatak SCENIHR-a je bio kontinuirano pratiti nove podatke u vezi procjene opasnosti po ljudsko zdravlje te aktualizirati prethodno izvješće odbora CSTE (Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment) iz 2001. godine s obzirom na rezultate novih istraživanja provedenih u proteklom periodu. Zaključci SCENIHR-a u vezi elektromagnetskih polja vrlo niske frekvencije (ELF – Extremely low frequency) su slijedeći:

- Prijašnji zaključak CSTE-a iz 2001. godine o tome da su ELF polja možda kancerogena a koji se uglavnom osniva na sumnji u određeno povećanje vjerojatnosti oboljenja od leukemije kod djece i dalje vrijedi. Mehanizmi koji bi objasnili mogućnost nastanka takvih posljedica izloženosti elektromagnetskom polju i dalje nisu poznati. Istraživanja na životinjama u tom pogledu također nisu dala rezultate.
- Nova istraživanja su pokazala da nije vjerojatno da postoji veza između izloženosti poljima i raka dojke te bolesti krvožilnog sustava.
- U pogledu moguće povezanosti ELF polja i neurodegenerativnih bolesti i tumora na mozgu i dalje nema zaključaka.
- Provedena istraživanja nisu pokazala postojanje veza između ELF polja i simptoma tzv. električne preosjetljivosti (electrical hypersensitivity) [10].

Vrsta učinka koji elektromagnetska polja imaju na ljude prvenstveno ovisi o frekvenciji i intenzitetu: drugi čimbenici poput valnog oblika također mogu biti važni u nekim situacijama. Neka polja uzrokuju stimulaciju osjetljivih organa, živaca i mišića, dok druga uzrokuju grijanje. Učinci nastali grijanjem nazivaju se toplinskim učincima u Direktivi 2013/35/EU o elektromagnetskim poljima, dok se svi ostali učinci nazivaju netoplinskim učincima.

Važno je da svi ti učinci pokazuju prag ispod kojeg nema rizika i izloženosti ispod tog praga nisu ni na koji način kumulativne. Učinci koji proizlaze iz izloženosti prolazne su

prirode jer su ograničeni na trajanje izloženosti te će prestati ili se smanjiti kad izloženost prestane. To znači da ne postoje daljnji rizici za zdravlje jednom kad je izloženost završila.

Izravni učinci su promjene koje se javljaju kod osobe kao rezultat izlaganja elektromagnetskom polju. Direktiva o elektromagnetskim poljima razmatra samo dobro shvaćene učinke koji se temelje na poznatim mehanizmima. Razlikuje učinke na osjetila i učinke na zdravlje, koji se smatraju ozbiljnijima.

Izravni su učinci:

- vrtoglavica i mučnina zbog statičkih magnetskih polja (obično se povezuju s kretanjem, no mogu se javiti i pri mirovanju);
- učinci na osjetilne organe, živce i mišiće zbog niskofrekventnih polja (do 100 kHz);
- grijanje cijelog tijela ili dijelova zbog visokofrekventnih polja (10 MHz i više); iznad nekoliko GHz grijanje je u sve većoj mjeri ograničeno na površinu tijela;
- učinci na živce, mišiće i grijanje zbog srednjih frekvencija (100 kHz – 10 MHz) [9].

Neizravni su učinci:

- interferencija s medicinskim elektroničkim uređajima i drugim proizvodima;
- interferencija s aktivnim ugrađenim medicinskim proizvodima ili uređajima, kao što su elektronički srčani stimulatori (pejsmejkeri) ili defibrilatori;
- interferencija s medicinskim proizvodima koji se nose na tijelu, kao što su inzulinske pumpe;
- interferencija s pasivnim implantatima (umjetni zglobovi, klinovi, žice ili ploče izrađene od metala);
- učinci na šrapnel, piercing, tetovaže i umjetnost tijela (body art);
- rizik od projektila feromagnetskih predmeta u statičkim magnetskim poljima;
- nenamjerno paljenje detonatora;

- požari ili eksplozije uzrokovani zapaljenjem zapaljivih ili eksplozivnih materijala;
- strujni udari ili opekline koje uzrokuju dodirne struje kada osoba dotakne vodljivi predmet u elektromagnetskom polju i jedno od njih je uzemljeno, a drugo nije [9].

Direktiva o elektromagnetskim poljima ne uključuje dugoročne učinke izloženosti elektromagnetskim poljima jer trenutačno ne postoje dobro utvrđeni znanstveni dokazi o uzročnoj vezi. Međutim, ako se takvi dobro utvrđeni znanstveni dokazi pojave, Europska komisija razmotrit će najprikladniji način za uključivanje takvih učinaka.

## 4. IZVORI ELEKTROMAGNETSKIH POLJA U DISTRIBUCIJSKOM SUSTAVU HEP-A

Hrvatska elektroprivreda (HEP grupa) je nacionalna energetska tvrtka, koja se više od jednog stoljeća bavi proizvodnjom, distribucijom i opskrbom električnom energijom, a u posljednjih nekoliko desetljeća i distribucijom i opskrbom kupaca toplinskom energijom i prirodnim plinom. HEP grupa organizirana je u obliku koncerna kao grupacija povezanih društava (tvrtke kćeri) [11].

Na slici 6 prikazana je shema cijele grupe. HEP Operator distribucijskog sustava (ODS) je najveće društvo unutar grupe.

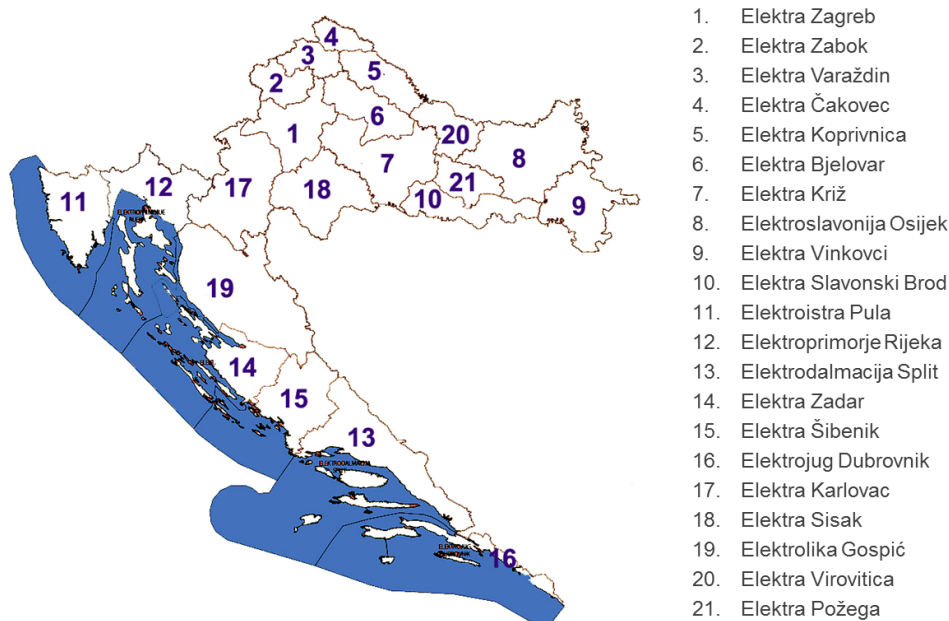


Slika 6. Shema HEP grupe [11]

HEP ODS ima 21 distribucijsko područje (Elektru) na teritoriju cijele Hrvatske (slika 7). Za potrebe korisnika mreže, obavlja uslugu distribucije električne energije koja obuhvaća pristup i korištenje mreže. HEP ODS je odgovoran za kvalitetu isporučene električne energije svim krajnjim kupcima i jamac je sigurne opskrbe električnom energijom. U nadležnosti su vođenje, održavanje, izgradnja i razvoj distribucijske

mreže te osiguravanje dugoročne sposobnosti mreže da zadovolji buduće zahtjeve za pristupom mreži [11].

Distribucijsku mrežu HEP ODS-a čine transformatorske stanice na sučelju s prijenosnom mrežom te mreža i transformatorske stanice srednjeg i niskog napona do obračunskih mjernih mjesta na sučelju s korisnicima distribucijske mreže. Distribucijsku mrežu čini 4.488 km vodova 35(30) kV naponske razine, 37.243 km vodova 10(20) kV razine, 61.586 km vodova 0,4 kV razine te 35.472 km kućnih priključaka. Ukupan broj transformatorskih stanica u distribucijskoj mreži, uključujući i objekte u zajedničkom vlasništvu s korisnicima mreže, iznosi 26.421 s ukupnom instaliranom snagom od 22.658 MVA. Na distribucijsku mrežu HEP ODS-a priključeno je ukupno 1.827 distribuiranih izvora s ukupnom instaliranom snagom 354 MW [11].



Slika 7. Distribucijska područja HEP ODS-a [11]

Temeljem Pravilnika [2], elektroenergetski vod jest nadzemni vod ili podzemni kabel za prijenos ili distribuciju električne energije napona većeg od 1 kV odnosno vod nižeg napona ako njime protječe struja od najmanje 1500A. Elektroenergetski vod je veza između dva postrojenja iste naponske razine. Pojedini izvod iz napojne trafostanice cijelom duljinom, sve do kraja svoje naponske razine uključivši sve priključene odcjepe razmatra se kao jedinstveni izvor elektromagnetskog polja. Elektroenergetski vodovi



manji od 1 kV i struja opterećenja ispod 1500A, tj. niskonaponske mreže se ne smatraju izvorima elektromagnetskih polja.

Sukladno gore navedenom, izvor elektromagnetskih polja u distribucijskom sustavu HEP-a su nadzemni i podzemni vodovi naponske razine 35(30) kV i 10(20) kV (dalekovodi), te trafostanice 35(30)/10(20) kV i 10(20)/0,4 kV. Izvor može biti i niskonaponska mreža ako njome protječe struja od najmanje 1500A, što u praksi nije slučaj. Eventualne veće struje na niskom naponu (ispod 1 kV) se mogu pojaviti unutar trafostanica koje su već definirane kao izvor.

#### **4.1. Dalekovodi**

Dalekovod je elektroenergetski vod (podzemni ili nadzemni vod) izmjenične ili istosmjerne struje visokog električnog napona koji služi za prijenos električne energije, bilo velikih snaga, bilo na velike udaljenosti, ili oboje. Dalekovodima se električna energija prenosi od velikih elektrana do transformatorskih stanica za sniženje električnog napona u graničnim dijelovima područja s koncentriranom potrošnjom električne energije (gradovi, velika industrijska postrojenja i tako dalje). Električne snage koje se prenose pojedinim dalekovodima iznose između nekoliko desetaka do više tisuća MW.



*Slika 8. Nadzemni 10(20) kV dalekovod [12]*

Naponska razina dalekovoda u HEP ODS-u iznosi 10(20) kV i 35(30) kV. Dalekovodi mogu biti izvedeni kao zračni odnosno nadzemni vodovi na stupovima (*slika 8*), ili kao podzemni vodovi tj. kabelski zakopani u tlu (*slika 9*).

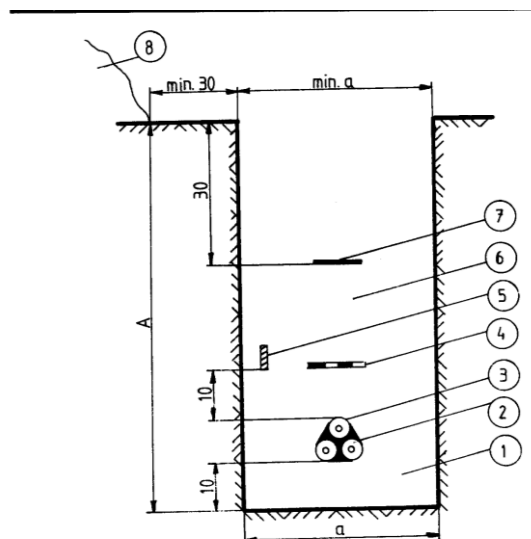
#### 4.1.1. Podzemni dalekovodi

Podzemni dalekovodi su srednjenaponski kabelski vodovi nazivnog napona 35(30) kV, 20 kV i 10 kV koji se polažu u tlo, a razlikuju se sljedeći slučajevi [13]:

- 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.

Polaganje jednožilnih kabela je obično u formaciju trokuta ili u ravninu. Dokazano je da nepovoljniji slučaju s aspekta razina elektromagnetskog polja je polaganju jednožilnih kabela u ravninu [14].



*Slika 9. Kabelski kanal, polaganje kabela u trokut [13]*

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 (u skladu s točkom 6.2. norme HRN EN 62110), već se određuje magnetska indukcija u okolini srednjenaponskih podzemnih kabela.

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.

HEP ODS trenutno koristi ukupno 37 tipova podzemnih kabela. Svi tipovi pobrojani su u *tablici 3.*

*Tablica 3. Tipovi srednjenaponskih podzemnih kabela [11]*

R. br.	Tip	Vrsta	Nazivni napon (kV)	Materijal vodiča	Presjek vodiča (mm <sup>2</sup> )	Način polaganja
1.	KB 3x10 Cu	trožilni	35(30) 20 10	Cu	10	-
2.	KB 3x16 Cu				16	
3.	KB 3x25 Cu				25	
4.	KB 3x35 Cu				35	
5.	KB 3x50 Cu				50	
6.	KB 3x70 Cu				70	
7.	KB 3x95 Cu				95	
8.	KB 3x120 Cu				120	
9.	KB 3x150 Cu				150	
10.	KB 3x185 Cu				185	

11.	KB 3x240 Cu				240	
12.	KB 3x25 Al	trožilni		Al	25	-
13.	KB 3x35 Al				35	
14.	KB 3x50 Al				50	
15.	KB 3x70 Al				70	
16.	KB 3x95 Al				95	
17.	KB 3x120 Al				120	
18.	KB 3x150 Al				150	
19.	KB 3x185 Al				185	
20.	KB 3x240 Al				240	
21.	KB 1x25 Cu				jednožilni	
22.	KB 1x35 Cu	35				
23.	KB 1x50 Cu	50				
24.	KB 1x70 Cu	70				
25.	KB 1x95 Cu	95				
26.	KB 1x120 Cu	120				
27.	KB 1x150 Cu	150				
28.	KB 1x185 Cu	185				
29.	KB 1x240 Cu	240				
30.	KB 1x50 Al	jednožilni		Al		50
31.	KB 1x70 Al				70	
32.	KB 1x95 Al				95	
33.	KB 1x120 Al				120	
34.	KB 1x150 Al				150	
35.	KB 1x185 Al				185	
36.	KB 1x240 Al				240	
37.	KB 1x300 Al				300	

#### 4.1.2. Nadzemni dalekovodi

Nadzemni dalekovodi su sredjenaponski nadzemni vodovi nazivnog napona 35(30) kV, 20 kV i 10 kV koji se polažu na stupove iznad tla, a vrijednosti polja u okolini ovisi o [14]:

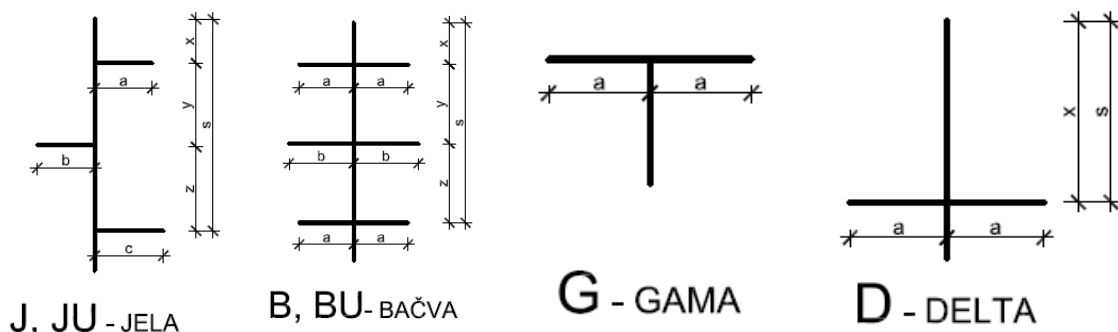
- Naponskoj razini,
- Obliku glave stupa kojim je određen razmještaj vodiča (osim kod univerzalnog kabela),
- Strujnom opterećenju voda određenom za pojedini materijal i presjek vodiča,

Prema Pravilniku o tehničkim normativima za izgradnju elektroenergetskih vodova napona od 1 kV do 400 kV [4] 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 i sl.) odnosno barem 4 m od stalno pristupačnih dijelova (terasa, građevinska skela i sl.). Visinu vodiča od 6 m predstavlja minimalnu sigurnosnu visinu za sredjenaponske nadzemne vodove za dostupna mjesta, prema članku 102. Pravilnika [4].

Materijali vodiča nadzemnih vodova su Al/Če, bakar ili aluminij, različitih presjeka i načina izvedbe.

Na naponskoj razini 35(30) kV koriste se oblici glave stupa jela i bačva, a rijetko se može susresti i delta raspored vodiča. Materijal vodiča je bakar ili aluminij s čeličnim vodičem u snopu (Al/Če), a vodiči su neizolirani. Stupovi su čelično-rešetkasti i betonski i u pravilu na vrhu stupa postoji i čelično zaštitno uže (presjeka 16 mm<sup>2</sup>, 25 mm<sup>2</sup>, 35 mm<sup>2</sup> ili 50 mm<sup>2</sup>) ili zaštitno-signalno uže (OPGW uže).

Na naponskim razinama 20 kV i 10 kV koriste se oblici glave stupa jela, bačva, gama i delta (*slika 10*). Materijal vodiča je neizolirani bakar ili aluminij s čeličnim vodičem u snopu (Al/Če), poluizolirani aluminij, a koristi se i univerzalni kabel. Za univerzalni kabel nije relevantan podatak o obliku glave stupa [14].



Slika 10. Oblici glava stupova [15]

Stupovi koji se koriste na 20 kV i 10 kV naponskoj razini su čelično-rešetkasti, betonski i drveni.

Dokazano je da najnepovoljnijem slučaj s aspekta razina elektromagnetskog polja je obliku glave stupa bačva [14].

S aspekta određivanja magnetskog polja 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.

Električno polje izravno ovisi o naponu vodiča u čijoj se okolini određuje polje. Veći napon znači i veću razinu električnog polja. Ova činjenica znači da se najviše vrijednosti električnog polja mogu očekivati u blizini 35 kV vodova, a nešto manje vrijednosti za 20 kV odnosno 10 kV vodove. 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 sljedeći podaci:

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

HEP ODS trenutno koristi ukupno 26 tipova nadzemnih dalekovoda. Svi tipovi pobrojani su u *tablici 4*.

*Tablica 4. Tipovi sredjenaponskih nadzemnih vodova [11]*

R.br.	Tip	Nazivni napon (kV)	Vrsta vodiča	Materijal vodiča	Presjek vodiča (mm <sup>2</sup> )	Oblik glave stupa
1.	DV 16/2,5 AL-Fe	10(20)	neizolirani vodič	Al-Fe	16/2,5	gama
2.	DV 25/4 AL-Fe				25/4	delta

3.	DV 35/6 AL-Fe				35/6	bačva jela	
4.	DV 50/8 AL-Fe				50/8		
5.	DV 70/12 AL-Fe				70/12		
6.	DV 95/15 AL-Fe				95/15		
7.	DV 120/20 AL-Fe				120/20		
8.	DV 16 Cu			Cu	16		
9.	DV 25 Cu				25		
10.	DV 35 Cu				35		
11.	DV 50 Cu				50		
12.	DV 70 Cu				70		
13.	DV 35 Al PIV	10(20)	poluizolirani vodič	Al	35		gama delta bačva jela
14.	DV 35 Al PIV				50		
15.	DV 35 Al PIV				70		
16.	DV 10 Cu UK	10(20)	univerzalni kabel	Cu	10	-	
17.	DV 16 Cu UK				16		
18.	DV 70 Al UK	10(20)	univerzalni kabel	Al	70	-	
19.	DV 95 Al UK				95		
20.	3DV 35 Cu	35(30)	neizolirani vodič	Cu	35	jela bačva delta	
21.	3DV 50 Cu				50		
22.	3DV 70 Cu				70		
23.	3DV 70/12 Al-Fe	35(30)	neizolirani vodič	Al	70/12	jela bačva delta	
24.	3DV 95/15 Al-Fe				95/15		
25.	3DV 120/20 Al-Fe				120/20		
26.	3DV 150/25 Al-Fe				150/25		

#### 4.1.3. Transformatorske stanice

Transformatorske stanice su slobodnostojeće srednjenaponske transformatorske stanice nazivnog napona 35(30)/10(20) kV i transformatorske stanice nazivnog napona 10(20)/0,4 kV, koje se izvode kao slobodnostojeće i u zgradama.

Za slobodnostojeće TS 35(30)/10(20) kV, kao relevantni nazivni prijenosni omjer uzima se 35/10(20) kV, obzirom da ovaj prijenosni omjer prevladava u većini

transformatorskih stanica HEP - Operatora distribucijskog sustava. Za sve transformatorske stanice 30/10(20) kV smatra se da pripadaju u kategoriju 35/10(20) kV.

Za određivanje tipa slobodnostojeće transformatorske stanice nazivnog napona 35(30)/10(20) kV kao izvora elektromagnetskog polja važan je podatak o broju transformatora i ukupnoj instaliranoj snazi transformatora [14].

Prevladava ukupno 5 tipova slobodnostojećih transformatorskih stanica TS 35(30)/10(20) kV u HEP ODS-u, koji su pobrojani u *tablici 5*.

*Tablica 5. Tipovi slobodnostojećih transformatorskih stanica TS 35(30)/10(20) kV [11]*

R.br.	Tip	Prijenosni omjer (kV/kV)	Instalirana snaga (MVA)	Izvedba
1.	3TS 2x16	35(30)/10(20)	2x16	slobodnostojeća
2.	3TS 3x8	35(30)/10(20)	3x8	slobodnostojeća
3.	3TS 2x8	35(30)/10(20)	2x8	slobodnostojeća
4.	3TS 2x4	35(30)/10(20)	2x4	slobodnostojeća
5.	3TS 2x2,5	35(30)/10(20)	2x2,5	slobodnostojeća

Za određivanje tipa slobodnostojeće transformatorske stanice nazivnog napona 10(20)/0,4 kV kao izvora elektromagnetskog polja važan je podatak o broju transformatora i ukupnoj instaliranoj snazi transformatora te podatak o izvedbi transformatorske stanice. Izvedba slobodnostojećih transformatorskih stanica može biti [14]:

- kabela s unutarnjim posluživanjem (zidana i tvornički dogotovljena),
- kabela s vanjskim posluživanjem (jednostavne i standardne izvedbe),
- tornjić (jednostavne i proširene izvedbe),
- stupna (na čelično-rešetkastom, betonskom i drvenom stupu).

Ukupno 28 tipova slobodnostojećih transformatorskih stanica TS 10(20)/0,4 kV je u upotrebi u HEP ODS-u, koji su pobrojani u *tablici 6*.

*Tablica 6. Tipovi slobodnostojećih transformatorskih stanica TS 10(20)/0,4 kV [11]*

R. br.	Tip	Prijenosni omjer (kV/kV)	Instalirana snaga (kVA)	Izvedba
1.	KTS 3x1000	10(20)/0,4	3x1000	slobodnostojeća kabela s unutarnjim posluživanjem



2.	KTS 3x630	10(20)/0,4	3x630	slobodnostojeća kabelska s unutarnjim posluživanjem
3.	KTS 2x1000	10(20)/0,4	2x1000	slobodnostojeća kabelska s unutarnjim posluživanjem
4.	KTS 2x630	10(20)/0,4	2x630	slobodnostojeća kabelska s unutarnjim posluživanjem
5.	KTS 2x400	10(20)/0,4	2x400	slobodnostojeća kabelska s unutarnjim posluživanjem
6.	KTS 2000	10(20)/0,4	1x2000	slobodnostojeća kabelska s unutarnjim posluživanjem
7.	KTS 1600	10(20)/0,4	1x1600	slobodnostojeća kabelska s unutarnjim posluživanjem
8.	KTS 1000	10(20)/0,4	1x1000	slobodnostojeća kabelska s unutarnjim posluživanjem
9.	KTS 630	10(20)/0,4	1x630	slobodnostojeća kabelska s unutarnjim posluživanjem
10.	KTS 400	10(20)/0,4	1x400	slobodnostojeća kabelska s unutarnjim posluživanjem
11.	KTS 250	10(20)/0,4	1x250	slobodnostojeća kabelska s unutarnjim posluživanjem
12.	TTS 630	10(20)/0,4	1x630	slobodnostojeća, tornjić
13.	TTS 400	10(20)/0,4	1x400	slobodnostojeća, tornjić
14.	TTS 250	10(20)/0,4	1x250	slobodnostojeća, tornjić
15.	TTS 160	10(20)/0,4	1x160	slobodnostojeća, tornjić
16.	TTS 100	10(20)/0,4	1x100	slobodnostojeća, tornjić
17.	TTS 50	10(20)/0,4	1x50	slobodnostojeća, tornjić
18.	VTS 630	10(20)/0,4	1x630	slobodnostojeća, kabelska s vanjskim posluživanjem
19.	VTS 400	10(20)/0,4	1x400	slobodnostojeća, kabelska s vanjskim posluživanjem
20.	VTS 250	10(20)/0,4	1x250	slobodnostojeća, kabelska s vanjskim posluživanjem
21.	VTS 160	10(20)/0,4	1x160	slobodnostojeća, kabelska s vanjskim posluživanjem
22.	VTS 100	10(20)/0,4	1x100	slobodnostojeća, kabelska s vanjskim posluživanjem
23.	STS 250	10(20)/0,4	1x250	slobodnostojeća, stupna
24.	STS 160	10(20)/0,4	1x160	slobodnostojeća, stupna
25.	STS 100	10(20)/0,4	1x100	slobodnostojeća, stupna
26.	STS 50	10(20)/0,4	1x50	slobodnostojeća, stupna

27.	STS 30	10(20)/0,4	1x30	slobodnostojeća, stupna
28.	STS 16	10(20)/0,4	1x16	slobodnostojeća, stupna

Za određivanje tipa transformatorske stanice nazivnog napona 10(20)/0,4 kV, smještene u zgradi (ili uz zgradu gdje stanica barem jednim zidom dodiruje zid zgrade), kao izvora elektromagnetskog polja, važan je podatak o broju transformatora i ukupnoj instaliranoj snazi transformatora [14]. Ukupno je 14 tipova transformatorskih stanica TS 10(20)/0,4 kV smještenih u zgradama, koji su pobrojani u *tablici 7*.

*Tablica 7. Tipovi transformatorskih stanica TS 10(20)/0,4 kV smještenih u zgradama [11]*

R. br.	Tip	Prijenosni omjer (kV/kV)	Instalirana snaga (kVA)	Izvedba
1.	ZTS 3x2000	10(20)/0,4	3x2000	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
2.	ZTS 3x1000	10(20)/0,4	3x1000	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
3.	ZTS 3x630	10(20)/0,4	3x630	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
4.	ZTS 2x2000	10(20)/0,4	2x2000	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
5.	ZTS 2x1600	10(20)/0,4	2x1600	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
6.	ZTS 2000	10(20)/0,4	1x2000	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
7.	ZTS 1600	10(20)/0,4	1x1600	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
8.	ZTS 2x1000	10(20)/0,4	2x1000	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
9.	ZTS 1000	10(20)/0,4	1x1000	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
10.	ZTS 2x630	10(20)/0,4	2x630	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu

11.	ZTS 2x400	10(20)/0,4	2x400	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
12.	ZTS 630	10(20)/0,4	1x630	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
13.	ZTS 400	10(20)/0,4	1x400	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu
14.	ZTS 250	10(20)/0,4	1x250	u zgradi, naslonjena zidom na zgradu

S aspekta određivanja magnetske indukcije u okolini stanice potrebno je poznavati veličinu nazivne struje pri proračunu odnosno trenutne struje pri mjerenju. Snaga instaliranog transformatora i njegov prijenosni omjer od odlučnog su značaja za vrijednost nazivne struje. 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.

Ukupno je 47 tipova transformatorskih stanica od kojih 28 tipova slobodnostojećih TS 10(20)/0,4, 14 tipova TS 10(20)/0,4 kV smještenih u zgradama i 5 tipova TS 35(30)/10(20) kV. Transformatorske stanice su tipizirane po prijenosnom omjeru, nazivnoj snazi i broju transformatora te izvedbi.

## 5. IZLOŽENOST RADNIKA HEP ODS-a

Zaposlenici u HEP-u za vrijeme rada i boravka u elektroenergetskim objektima mogu doći u blizinu izvora električnih i magnetskih polja mrežne frekvencije te u takvim slučajevima biti izloženi višim iznosima polja nego što je to uobičajeno na većini drugih radnih mjesta, koja nisu povezana s elektroenergetskom djelatnosti. Zbog toga je potrebno procijeniti izloženost zaposlenih i osigurati ispunjavanje zahtjeva hrvatskih zakona i propisa na tom području.

Iznosi polja kojima su zaposlenici izloženi pri radu na elektroenergetskim objektima prvenstveno

ovise o:

- naponskoj razini (za električno polje),
- iznosu struje koja teče kroz vodiče (za magnetsko polje),
- udaljenosti od dijelova pod naponom (u pravilu povezano s naponskom razinom),
- geometriji izvora polja (npr. razmak između faza).

Osim toga, iznos polja ovisi i o nekim drugim faktorima, kao što je eventualna prisutnost prepreka koje se nalaze između izvora polja i čovjeka (npr. metalne stjenke ormara s SN opremom). Zbog velikog broja različitih utjecajnih faktora, raznovrsnosti elektroenergetskih objekata i okolnosti u kojima zaposleni mogu biti izloženi električnom i magnetskom polju, istraživanja izloženosti su složena. Dodatna poteškoća je u tome što su postojeći propisi relativno općeniti i ne daju precizne upute o načinima provedbe proračuna i mjerenja.

Tipovi objekata bitni za izloženost zaposlenih razlikuju se od tipova koji su primarni kada se radi o ocjeni izloženosti stanovništva. Općenito, na izloženost stanovništva najviše utječu polja u okolini elektroenergetskih vodova i distribucijskih trafostanica. U slučaju zaposlenika HEP-a objekti koje treba promatrati su prvenstveno visokonaponska rasklopna postrojenja na otvorenom i rasklopna postrojenja u zgradama (srednjenaponska postrojenja visokog napona). U elektranama su to prostori oko generatora, sustava uzbude te sabirnica između generatora i blok-transformatora. Osim toga, u trafostanicama i elektranama su to još i kabelski prostori

odnosno općenito prostorije u kojima zaposleni mogu doći u blizinu energetskih kabela.

## **5.1. Radni postupci u HEP ODS-u u blizini EM**

Dio organizacijske strukture HEP ODS-a predstavljaju terenske jedinice koje izvode glavninu operativnih poslova na terenu; obavljaju poslove održavanja elektroenergetskih objekata, pogonskih manevara vođenja i pogonskih mjerenja, izgradnje priključaka i elektroenergetskih objekata, poslove mjernih uređaja i pružanja usluga korisnicima mreže i na tržištu i slično. Djelatnici u terenskim jedinicama (TJ) su najizloženiji sigurnosnim rizicima i ozljedama, a ukupno ih je na dan 31.12.2018. godine bilo zaposleno 3.158.

Svakodnevni radni zadaci terenskih jedinica predstavljaju poslove s posebnim uvjetima rada - poslovi pri čijem obavljanju radnik koji radi na tim poslovima mora, osim općih uvjeta za zasnivanje radnog odnosa, ispunjavati propisane posebne uvjete koji se odnose na dob, stručnu osposobljenost, zdravstveno stanje, odnosno psihičku sposobnost.

Tehnologija koje se uglavnom primjenjuje u radnim zadacima je rad u beznaponskom stanju. Otprije je poznato da tu tehnologiju pouzdanom i sigurnom za izvođenje čine takozvanih 5 pravila sigurnosti, sljedećim redoslijedom:

1. Isključiti i vidljivo odvojiti od napona (pomoću prekidača i rastavljača),
2. Spriječiti ponovno uključanje (blokadom sredstava za ponovno uključanje),
3. Utvrditi beznaponsko stanje (indikatorima napona ili mjernim instrumentima),
4. Uzemljiti i kratko spojiti (prikladnim uzemljivačkim sustavom),
5. Ograditi mjesto rada od dijelova pod naponom (pomoću upozoravajuće trake ili ograde).

Tehnologija rada u beznaponskom stanju savršeno funkcionira sve dok se izvođenje obavlja držeći se svih pravila, no pri zanemarivanju pravila sigurnosti i nepravilnom izvođenju može doći do katastrofalnih posljedica. Kako električna energija ima opasne učinke za sigurnost i zdravlje, nepravilno izvođenje prilikom kojeg se ti učinci mogu realizirati te sve veći zahtjevi potrošača za rad bez prekida opskrbe električnom energijom doveli su do razvijanja nove tehnologije rada pod naponom (RPN).

### 5.1.1. Tehnologija rada pod naponom

Održavanje mreža i transformatorskih stanica se može obavljati na dva načina. Prvi način je da nakon što smo isključili i uzemlili dijelove na kojima želimo raditi, možemo pristupiti mjestu rada i izvesti potrebne radne zadatke na elektroenergetskom postrojenju.

Drugi način je da zadržimo kontinuitet napajanja koristeći odgovarajuće alate i postupke (tehnologiju rada pod naponom). Ovaj drugi način rada pri kojem se instalacije ostavljaju pod naponom, umjesto bez napona, zove se „rad pod naponom“ (RPN). Sam postupak rada osigurava prije svega zaštitu samih radnika od opasnosti zbog prisutnosti napona, kao i dovoljnu izolacijsku razinu između dijelova pod različitim naponima kako bi se izbjegao rizik kratkog spoja.

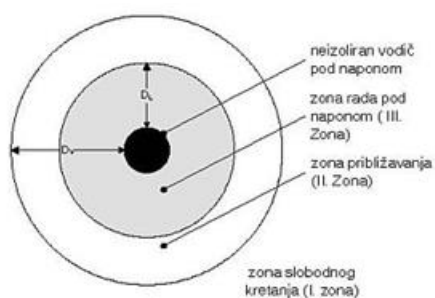
Rad pod naponom, koji je do prije nekoliko godina još bio iznimka (naročito na srednjem, visokom i vrlo visokom naponu) postaje sve više i više uobičajeni način rada.

U mnogim zemljama se smatra da RPN pridonosi poboljšanju kvalitete isporučene električne energije u istoj mjeri kao i modernizacija postrojenja ili nove investicije.

U nekim zemljama postojeći propisi koče ili onemogućuju RPN, dok se s nadolazećom liberalizacijom propisa RPN smatra jednako vrijednim radnim postupkom kao i radovi u beznaponskom stanju odnosno radovi u blizini napona, uz zadovoljenje uvjeta koji su definirani za pojedini način rada na elektroenergetskim postrojenjima.

Prema stupnju opasnosti od električne energije, a u cilju postizanja sigurnog pristupa, kretanja i rada u električnim postrojenjima, utvrđene su tri zone (*slika 11*) i to:

- zona rada pod naponom (III. zona),
- zona približavanja (II. zona) i
- zona slobodnog kretanja (I. zona)



*Slika 11. Zone električnih postrojenja [16]*

Prilikom radova tehnologijom RPN, radnicu obavljaju radne zadatke u III. i II. zoni, što se u pravilu prije izbjegavalo osiguravanjem dovoljne udaljenosti od postrojenja pod naponom i korištenjem pregrada kako bi se onemogućio nenamjeran ulazak u zonu pod naponom, ili najčešće isključenjem dijela postrojenja gdje se radovi izvode.

U *tablici 8* su prikazane vrijednosti graničnih udaljenosti pojedinih zona.

*Tablica 8. Granične udaljenosti zone rada pod naponom [16]*

Nazivni napon mreže Un (kV)	Granični razmak zone rada pod naponom DL (mm)	Granični razmak zone približavanja DV (mm)	Minimalna udaljenost približavanja za rad pod naponom (MUP)
<1	Bez kontakta	300	300
10	120	1.150	400
20	220	1.220	400
30	320	1.320	600
35	380	1.380	600

Radni procesi koji se trenutačno izvode tehnologijom RPN u HEP ODS-u su uglavnom radovi na niskonaponskoj mreži (0,4 kV) i u manjem dijelu neki radni zadaci na dalekovodnoj naponskoj razini 10(20) kV (npr. čišćenje transformatora, postavljanje izolacijske zaštite za ptice na dalekovodima).

### 5.1.2. Prednosti i mane RPN

Pokazatelji pouzdanosti pojedinačnih potrošača i potrošačkih čvorišta su od iznimne važnosti za same potrošače, te o njima ovise i troškovi prekida opskrbe tih potrošača, a u uvjetima tržišta električnom energijom služe kao jedan o ključnih kriterija kojima se vrednuje kvaliteta usluge opskrbe električnom energijom koju pružaju distributivna poduzeća svakom pojedinačnom potrošaču. Isto tako, prilikom vrednovanja kvalitete usluge opskrbe, a osobito prilikom planiranja ulaganja u pouzdanost distributivnih mreža, kako bi se na što efikasniji način osigurala zadovoljavajuća ukupna pouzdanost opskrbe sustava (najčešće definirana od strane regulatora), a koja se odnosi na sve, potrebno je poznavati i pokazatelje pouzdanosti promatrane distributivne mreže ili njenog dijela koji se obično nazivaju pokazatelji pouzdanosti

sustava. Za distributivna poduzeća, osobito u tržišnim uvjetima rada, možda je i najvažniji kriterij profit od usluge opskrbe, koji su uz minimiziranje gubitaka osobito povezani s iznosom neisporučene električne energije potrošačima.

Neisporučena električna energija, tj. prekidi u opskrbi su posljedica planiranih radova na održavanju i hitnih intervencija (neplanirani radovi) zbog kvara. Procjenjuje se da se čak 50% planiranih radova na poslovima redovnih održavanja može izvesti tehnologijom RPN, te time značajno doprinijeti kvaliteti opskrbe.

Također, priprema za RPN traje manje od klasičnih radova u beznaponskom stanju jer nije potrebno zatražiti dopuštenje za radove zbog prekida napajanja i obavijestiti korisnike mreže o prekidu opskrbe.

Osim obuke radnika za RPN, tvrtke moraju osigurati zaštitna sredstva i potrebni alat za izvođenje radova (*slika 12*). Razlika je u tome da se alat i oprema za RPN izrađuje i ispituje puno detaljnije i sigurnije nego pri radu u beznaponskom stanju. Norme su puno strože te ako alat i oprema ne zadovolji jedan od mnoštva ispitivanja automatski se mora isključiti iz uporabe u radu pod naponom. Alat i oprema koji više ne zadovoljavaju RPN i dalje se smije koristiti u beznaponskom stanju, ali ne i obrnuto.



*Slika 12. Alat i oprema za RPN [17]*

Bitne razlike između radova u beznaponskom stanju i RPN su sljedeće:

- Potrebna je dodatna obuka za radnike koji će raditi RPN, ali i „stroži“ su uvjeti za radnike (traženo iskustvo i stručna sprema),
- Potrebno je osigurati bolja zaštitna sredstva i alat,



- Efektivno trajanje radnih procesa (zadataka) tehnologijom RPN traje vremenski duže na terenu zbog osiguranja radnog mjesta, ali je sama priprema dokumentacije jednostavnija,
- RPN za 50% smanjuje trajanje planiranih prekida u opskrbi na poslovima održavanja.

U dosadašnjem tekstu rada nije spomenut utjecaj tehnologije RPN na sigurnost radnika, što je obrađeno u sljedećem poglavlju.

### **5.1.3. Sigurnost radnika pri RPN**

Sigurnost radnika najveći je prioritet svake odgovorne tvrtke, a u Hrvatskoj elektroprivredi ustrojen je poseban Sektor zaštite na radu. Stručnjaci i ovlaštenici redovito prate stanje ozljeda na radu, posebno onih sa smrtnim ishodom i vezanih uz mjesto rada, te nastoje preventivnim djelovanjem i edukacijom na svim razinama utjecati na smanjenje ovih negativnih pojava. Svaki rad u sebi krije mogućnost da se tijekom radnog procesa radnik u poslu ili neke druge osobe mogu na neki način ozlijediti, pa je stoga nastojanje da se takvi neželjeni događaji izbjegnu, jedno od uvijek prisutnih nastojanja kod svakog posla. Invalidnost je česta posljedica ozljeda na radu ili neke od bolesti, a koja može biti i profesionalna. Kad u nekoj sredini dođe do ozljede radnika na radu, mnogi su skloni tvrditi da je do toga došlo „slučajno“. Ovakva su shvaćanja o nastanku ozljeda netočna i predstavljaju ozbiljnu smetnju za organizirano provođenje i unaprjeđivanje zaštite na radu. Ozljede na radu ne nastaju slučajno, nego su uzrokovane nizom predvidivih okolnosti, koje se mogu spriječiti, te ih na taj način spustiti na vrlo mali broj slučajeva.

Krajem 2018. godine u HEP-Operatoru distribucijskog sustava d.o.o. bilo je zaposleno 6.475 radnika, na radu ih je ozlijeđeno 32, od čega je 6 težih ozljeda, a ukupni broj ozljeda vezan uz djelovanje električne energije bio je 4. Izravno na mjestu rada je ozlijeđeno 23 radnika. Zbog ozljeda radnika na radu izgubljeno je 2.103 radnih dana (ili u prosjeku 65 radnih dana po jednoj ozljedi). U 2018. godini nije se dogodila niti jedna smrtna ozljeda radnika na radu i nisu zabilježena profesionalna oboljenja.

Tehnologija rada pod naponom polazi od temeljne činjenice kako radnik namjerno, planirano dolazi u kontakt s dijelovima postrojenja koji su pod naponom, te obavezno koristi osobnu zaštitnu opremu kao i kolektivna zaštitna sredstva. Pri tome eliminira rizike nastanka kratkog spoja izoliranjem, odnosno udaljavanjem različitih fiksnih

potencijala (istovremena dostupnost samo jednog fiksnog potencijala), te se izolira od potencijalnih strujnih krugova zbog kojih bi mogao nastati električni udar i koristi specijalne (izolacijske i izolirane) alate. Zbog svega navedenog sigurnost radnika koji rade pod naponom daleko je veća od radnika koji rade u beznaponskom stanju.

Od 2005. godine, kada je u HEP ODS-u uveden rad pod naponom na niskom naponu, nije zabilježen nijedan incident na radu ili ozljeda nijednog od radnika HEP ODS-a koji rade pod naponom. Tome pozitivnom učinku će u budućnosti doprinijeti i učestalije ispitivanje alata i opreme, kao i kontinuirano praćenje profesionalne kvalificiranosti radnika.

Trenutačno se u HEP ODS-u realizira oko 3.000 radnih naloga (zadataka) godišnje tehnologijom RPN. U 14 godina primjene navedene tehnologije nije bilo ozljeda na radu povezanih s istom. Iako RPN predstavlja radove s većom opasnosti nego beznaponski radovi, isti doprinose smanjenju broja ozljeda radnika.

Navedeno bi se moglo objasniti s sljedećim činjenicama:

- RPN izvode bolje osposobljeni i iskusniji radnici
- Korišteni alati i zaštitna oprema je kvalitetnija
- Radnici očekuju opasnosti, te su od istih dobro zaštićeni opremom, povećana koncentracija je osigurana za vrijeme trajanja cijelog radnog procesa
- Prilikom izvođenja radova u beznaponskom stanju i u blizini napona, radnici ne očekuju opasnosti pa svaki propust ili manjak koncentracije može rezultirati ozljedama i opasnostima (slučajni dodir postrojenja pod naponom) od kojih nisu zaštićeni.

Na sljedećim *slikama 13, 14 i 15* su prikazani neki primjeri korištenja tehnologije RPN.



*Slika 13. Popravak vodiča na NN mreži pod naponom [17]*



*Slika 14. Čišćenje SN/NN kablanske trafostanice pod naponom industrijskim usisivačem [17]*



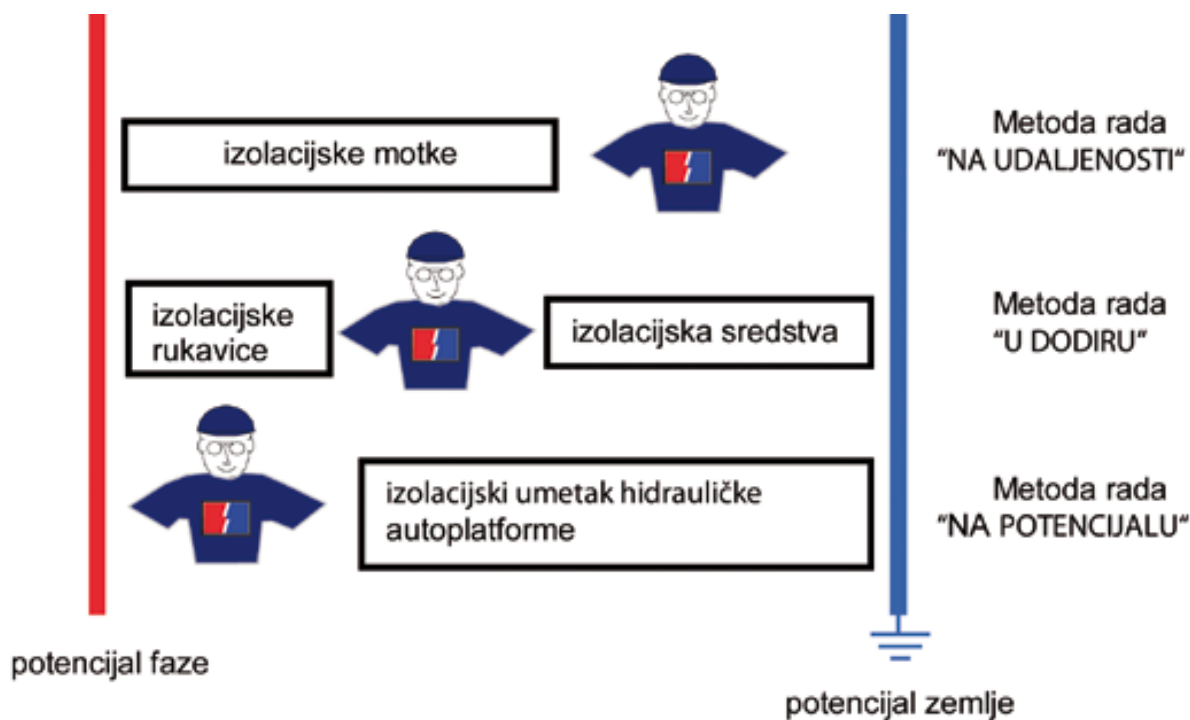
*Slika 15. Postavljanje zaštite od ptica na SN vod [17]*

#### 5.1.4. Vrijednosti EM polja pri RPN

Sukladno Pravilniku [2], izvor elektromagnetskih polja u distribucijskom sustavu HEP-a su nadzemni i podzemni dalekovodi naponske razine 35(30) kV i 10(20) kV, te trafostanice 35(30)/10(20) kV i 10(20)/0,4 kV, tj. svi izvori na srednjem naponu od 10 kV do 35 kV.

U 2016. godini je u HEP ODS-u napravljena Studija značaja tipskih elektroenergetskih postrojenja distribucijske mreže, nazivnog napona iznad 1kV, obzirom na razine emitiranih elektromagnetskih polja [14], te je istom potvrđeno da sva energetska postrojenja u HEP ODS-u zadovoljavaju propisane vrijednosti. Međutim, predmetna ispitivanja su se odnosila na javna područja i područja povećane osjetljivosti, nisu razmatrane udaljenosti i vrijednosti za slučajeve HEP-ovih radnika prilikom RPN-a.

Rad na mreži pod naponom (RPN), naponskih razina od 10 kV do 35 kV izmjeničnog nazivnog napona, moguć je primjenom metode rada "na udaljenosti" (izolacijske motke), metode rada "u dodiru" (izolacijske gumene rukavice) ili metode rada "na potencijalu" ("golim" rukama), primjenjujući ove metode pojedinačno ili kombinacije tih metoda (*slika 16*) [18].



Slika 16. Metode RPN-a na srednjem naponu [18]

Temeljem Općih uvjeta HEP ODS-a, Bilten 505 [18], Rad pod naponom na srednjem naponu na kabelskoj mreži je zabranjen.

Trenutačno se izvode ili planiraju sljedeći radovi metodom RPN-a u HEP ODS-u na srednjem naponu:

- a) Čišćenje postrojenja, trafostanice 10(20) kV [19]
- b) Elektromontažni radovi na nadzemnim dalekovodima (10(20) kV i 35 kV)

Obzirom na navedeno, utjecaj EM polja je potrebno razmatrati na sljedećim objektima:

1. Trafostanice 10(20)/0,4 kV
2. Nadzemni dalekovod 10(20) kV
3. Nadzemni dalekovod 35(30) kV

Za dokazivanje sukladnosti s odredbama Pravilnika o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja [3] HEP ODS koristi rezultate ocjene izloženosti elektromagnetskim poljima u EDF (Electricité de France) električnim postrojenjima. Budući da je HEP preuzeo tehnologiju rada pod naponom na električnim postrojenjima niskog i srednjeg napona francuske elektroprivrede (EDF), u svojim dokumentima koristi jednake zaključke proizašle iz provedenih mjerenja i studija EDF-a.

Zaključak studije je da u električnim postrojenjima SN izloženost radnika električnim poljima nikad ne prelazi 10 kV/m, a izloženost magnetskim poljima nikad ne prelazi 500  $\mu$ T.

## 6. PRORAČUNI EM POLJA ZA POSTROJENJA I METODE RADA RPN

Proračuni magnetske indukcije i električnog polja za energetska postrojenja pri izvođenju radova metodom RPN će se provesti programskim paketom EFC-400 [20], na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, zavod za visoki napon i energetiku u Zagrebu, koji omogućuje simulacije EM polja u trodimenzionalnom prostoru.

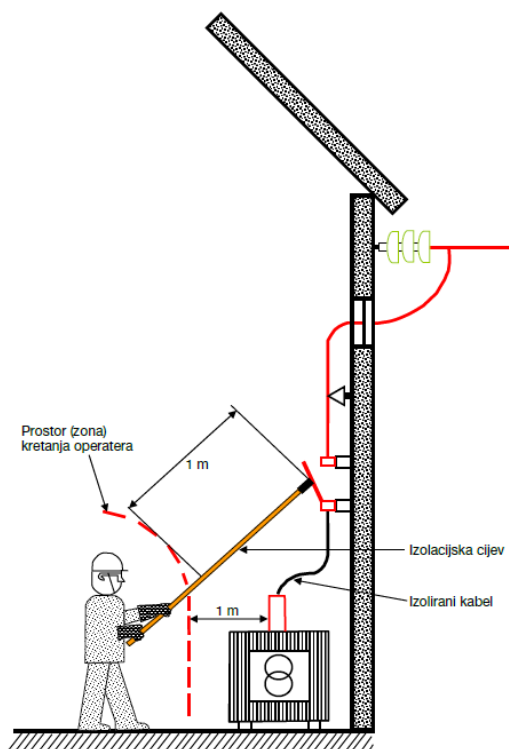
### 6.1. Čišćenje trafostanica 10(20)/0,4 kV

Metoda rada čišćenje postrojenja pod naponom se koristi za trafostanice prijenosnog omjera 10(20)/0,4 kV. Vrijednosti EM polja koje treba provjeriti se odnose za napon 10(20) kV, tj. za srednjenaponsku razinu postrojenja.

Dopuštena metoda rada je samo „NA UDALJENOST“. Tijekom rada i kretanja operater mora u sve krugove između vlastitog prostora (zone) kretanja i dijelova na različitim fiksnim potencijalima umetnuti sljedeće:

- minimalni zračni razmak ili minimalnu duljinu izolacijske cijevi, što iznosi 1 m.

Sukladno navedenom, tijelo radnika uvijek mora biti udaljeno od izvora EM polja minimalno 1 m (slika 17).



Slika 17. Primjer čišćenja trafostanice metodom RPN [19]

S aspekta određivanja magnetske indukcije u okolini stanice potrebno je poznavati veličinu nazivne struje pri proračunu odnosno trenutne struje pri mjerenju. Snaga instaliranog transformatora i njegov prijenosni omjer od odlučnog su značaja za vrijednost nazivne struje. 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.

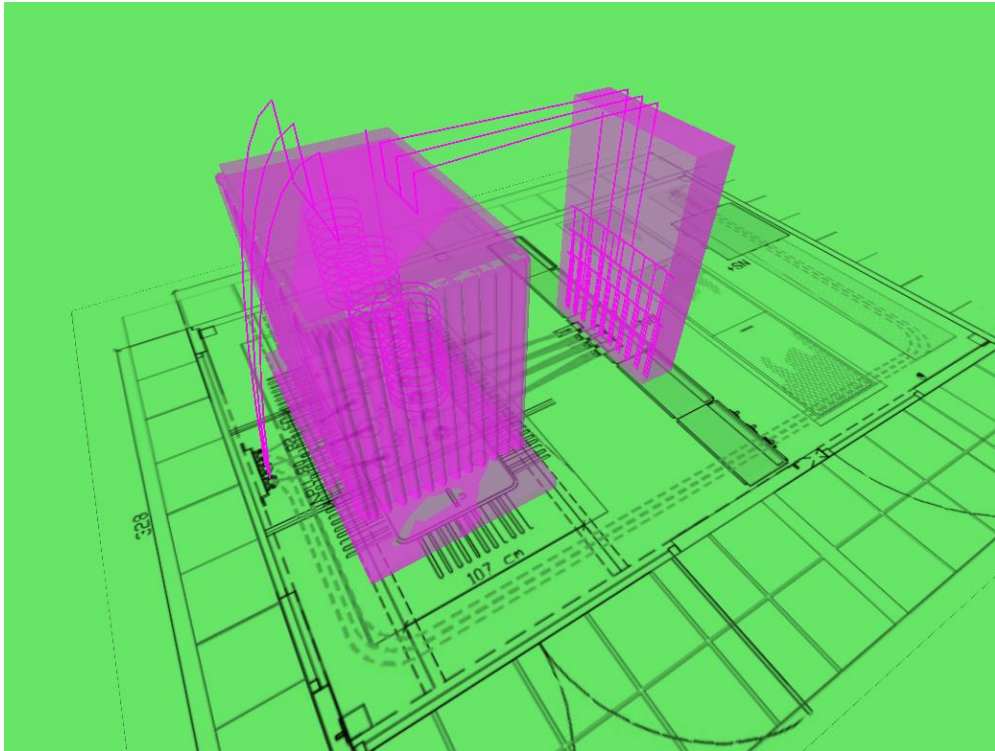
Električno polje ovisi o nazivnom naponu, međutim za trafostanice vrijedi da je vrijednost električnog polja zanemariva, jer su sklopni moduli (transformator, ormari) i kabelske veze, oklopljeni i uzemljeni.

### **KTS 10(20)/0,4 kV, 2000 kVA**

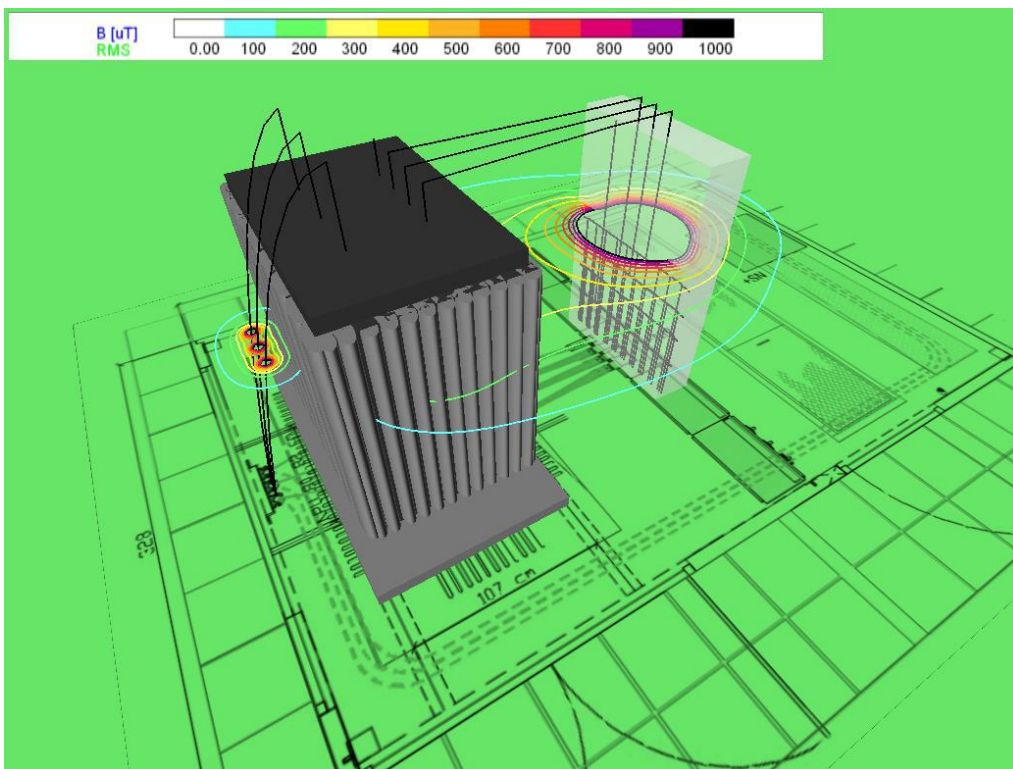
Najveća instalirana snaga transformatora 10(20)/0,4 kV koja se koristi u HEP ODS-u iznosi 2000 kVA. Kako je to najnepovoljniji slučaj za EM polja, isti je korišten za proračun.

Model za proračune magnetske indukcije je prikazan je *slici 18*. Modeliran je energetska transformator 10(20)/0,4 kV, 2000 kVA, kabeli na 10(20) kV strani, kabeli na 0,4 kV strani te NN razvod. Svi proračuni magnetske indukcije su provedeni za visinu 1,0 m iznad tla. Za strujno opterećenje usvojena je slijedeća pretpostavka: energetska transformator 10(20)/0,4 kV opterećen je snagom 2000 kVA odnosno strujom 115,5 A. Opterećenje dolaznih 10(20) kV kabela je sukladno Kirchhoff-ovom zakonu 115,5 A. NN razvod je opterećen strujom transformatora na 0,4 kV koja iznosi 2888 A. Pretpostavljena raspodjela struje po NN odvodnima je simetrična. Svaki od 10 NN odvoda opterećen je s 288,8 A. Strujno opterećenje sabirnica NN bloka je u skladu s Kirchhoff-ovim zakonom.

Sa *slike 19* je vidljivo da u TS 10(20)/0,4 kV snage 2000 kVA, na visini 1 m magnetska indukcija dostiže graničnu vrijednost 1000  $\mu$ T samo u neposrednoj blizini SN kabela te unutar transformatora. Najveća vrijednost magnetske indukcije od 100  $\mu$ T i 40  $\mu$ T je prikazana na *slikama 20 i 21*.

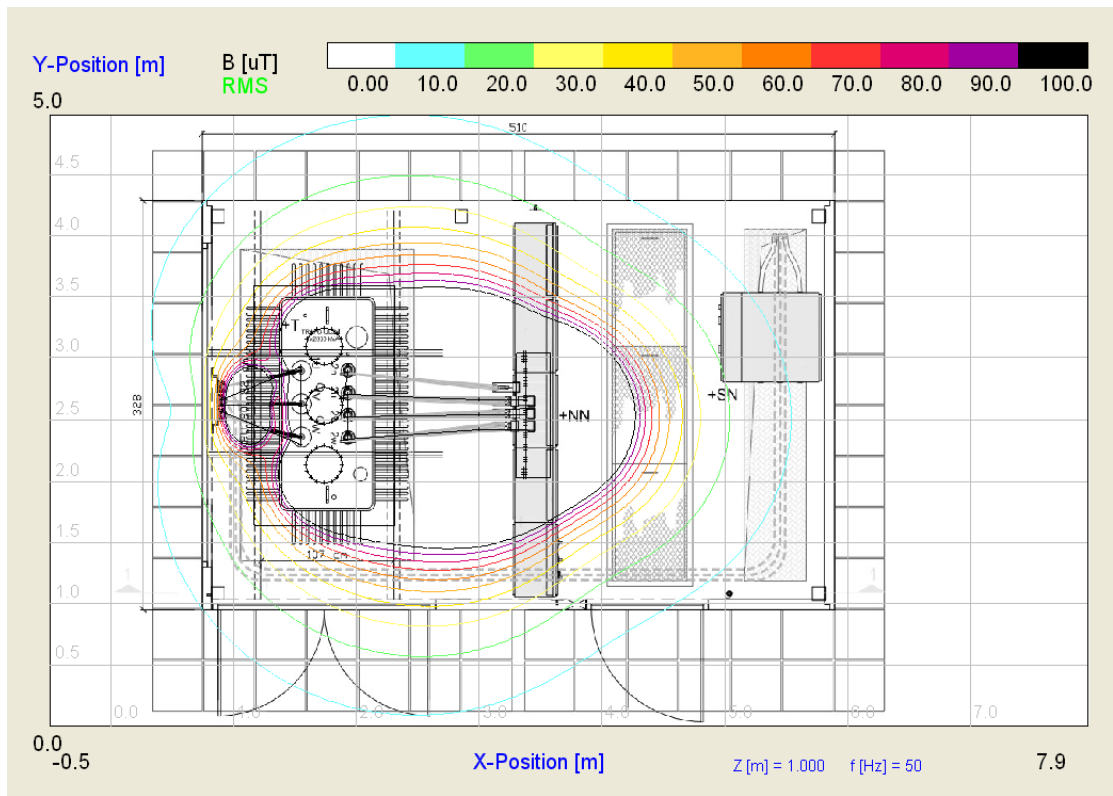


Slika 18. Model trafostanice za proračune [14]

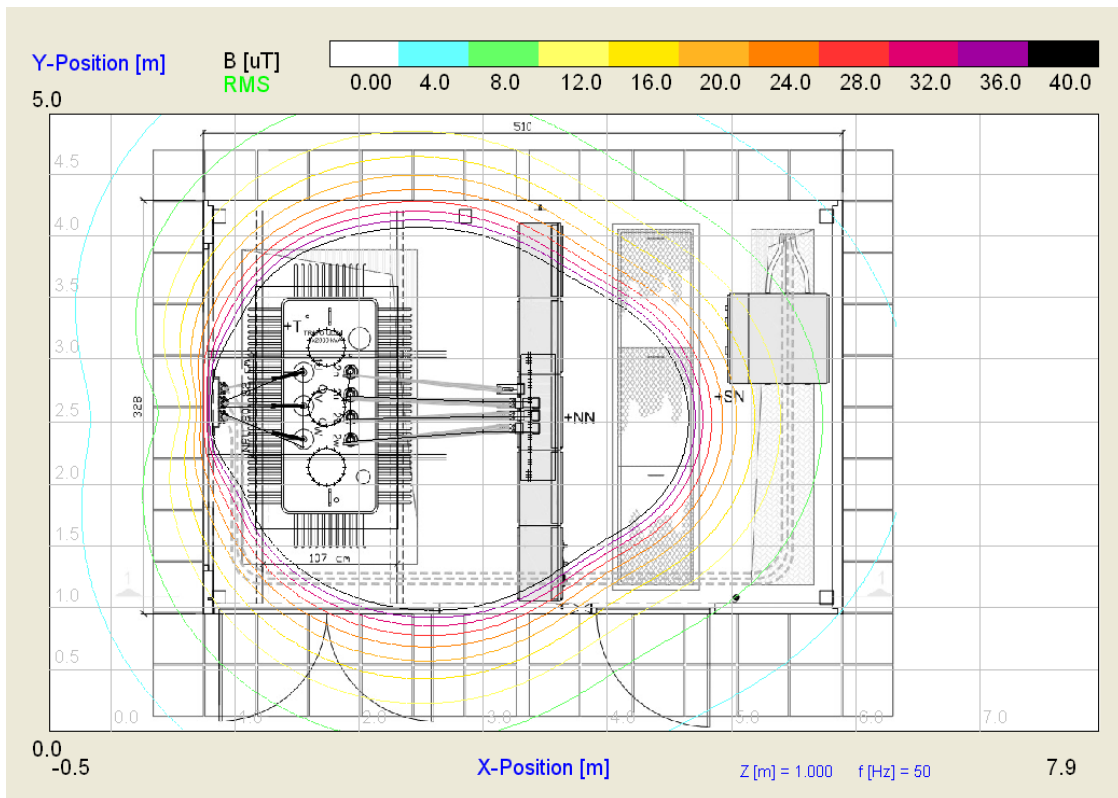


Slika 19. Magnetska indukcija, granica do  $1000 \mu\text{T}$  [20]





Slika 20. Magnetska indukcija do 100 µT [20]



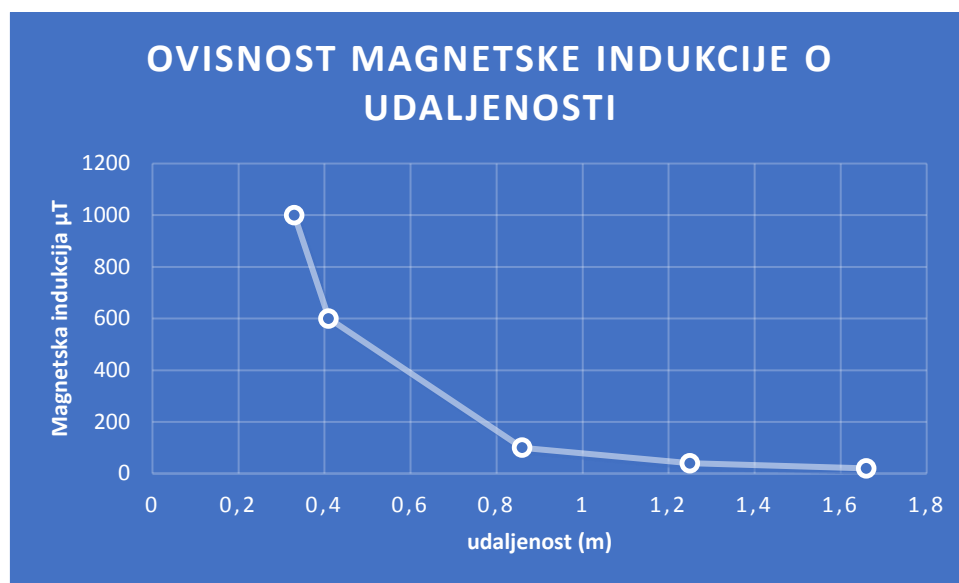
Slika 21. Magnetska indukcija do 40 µT [20]

Temeljem dobivenih proračuna, mogu se očitati vrijednosti magnetske indukcije u ovisnosti od udaljenosti od izvora (*tablica 9*).

*Tablica 9. Vrijednosti magnetske indukcije na udaljenostima od izvora*

B ( $\mu\text{T}$ )	1000	600	100	40	20
R (m)	0,33	0,41	0,86	1,25	1,66

Iz dobivenih rezultata, na *slici 22* je prikazan graf iz kojeg je vidljivo da vrijednosti eksponencijalno opadaju u ovisnosti od udaljenosti izvora EM polja.



*Slika 22. Graf magnetske indukcije u trafostanici*

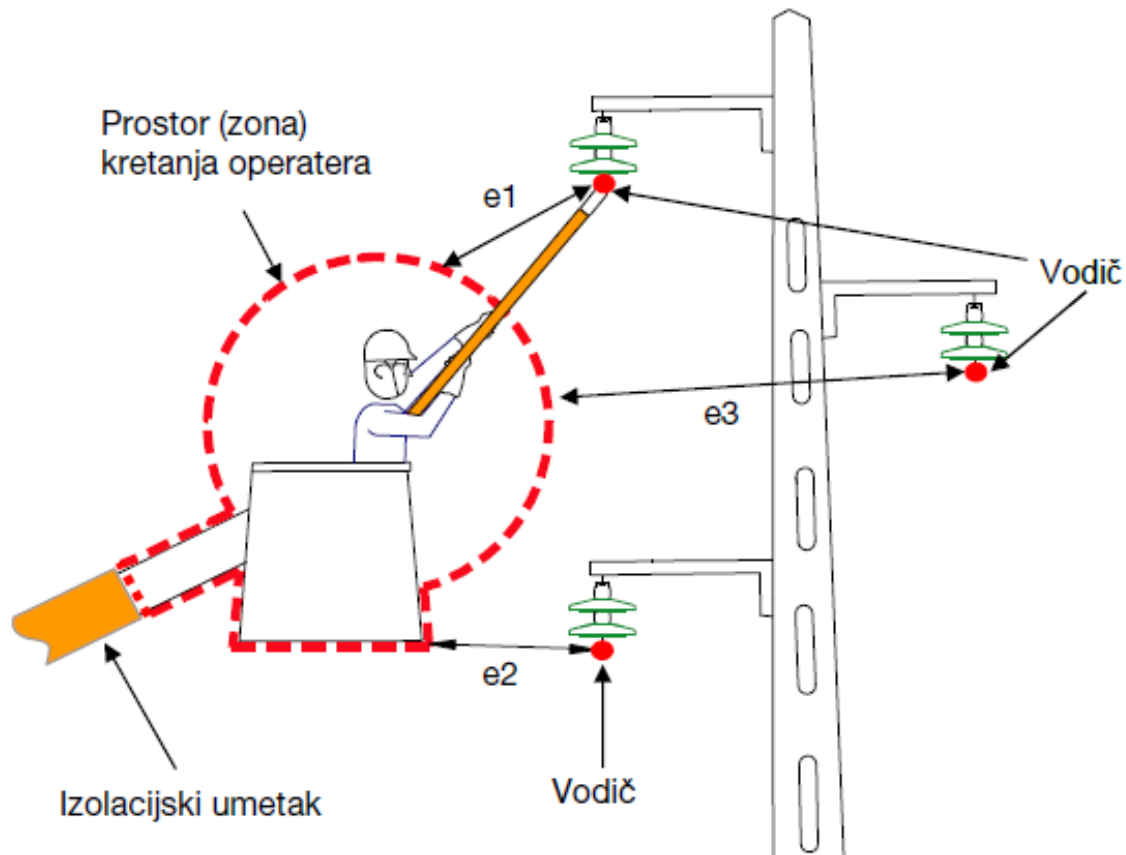
Kako je za ovaj proračun uzet najnepovoljniji slučaj za radnike, tj. objekt u kojem se pojavljuju najveće vrijednosti EM polja, maksimalne vrijednosti kojima mogu biti izloženi radnici u skladu s uputama za čišćenje postrojenja pod naponom iznosi  $70 \mu\text{T}$  na udaljenosti od 1 m.

## 6.2. Elektromontažni radovi na DV 35(30) kV i 10(20) kV

Za elektromontažne radove dopuštene su sve tri metode rada RPN, „na udaljenosti“, „u dodiru“ ili „na potencijalu“. Međutim, trenutačno se u HEP ODS-u izvode radovi jedino metodom „na udaljenost“. Prilikom rada „na udaljenosti“ djelatnici moraju

poštovati sigurnosnu udaljenost bilo kojeg dijela tijela od vodiča pod naponom. Ona iznosi:

- a) Za 10(20) kV, 0.4 m
- b) Za 35(30) kV, 0.6 m



Slika 23. Rad „na udaljenosti“ iz autoplatforne na SN vodu [18]

Druge dvije metode RPN su u planu za korištenje u narednom periodu (2023. godina), te se iste neće razmatrati u ovom radu.

Magnetska indukcija najveća u okolini vodova s najvećim presjekom vodiča dok električno polje raste s nazivnim naponom. Usporede li se vrijednosti električnog polja i magnetske indukcije dobivene proračunom za jedan tip nadzemnog voda izveden s mogućim oblicima glave stupa, dokazano je da sa stajališta električnog polja i magnetske indukcije najnepovoljniji oblik glave stupa bačva [14].

Temeljem navedenog, model koji je najnepovoljniji će se koristiti za proračune:

- DV 35(30) kV, tip stupa bačva, presjeka Al/Če 6x150/25 mm<sup>2</sup>
- DV 10(20) kV, tip stupa bačva, presjeka Al/Če 6x120/20 mm<sup>2</sup>

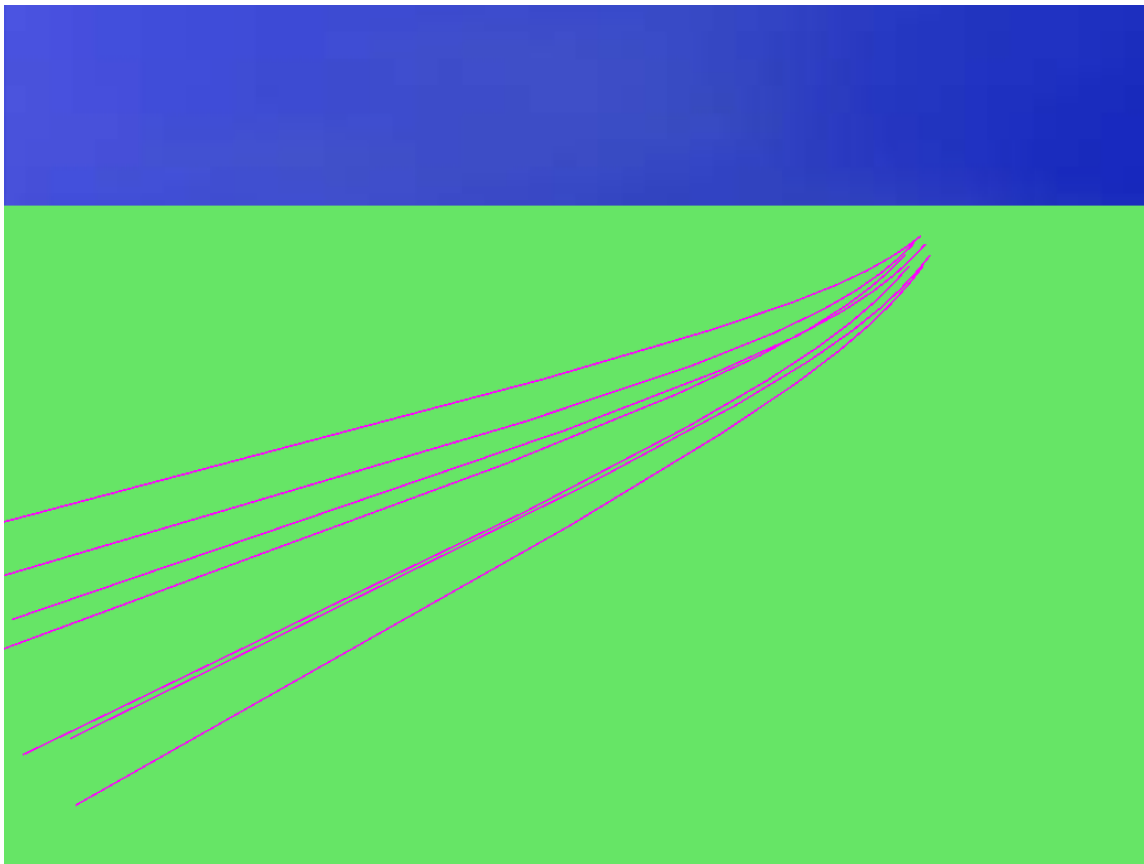
## DV 35(30) kV, tip stupa bačva, presjeka Al/Če 6x150/25 mm<sup>2</sup>

Model za proračune magnetske indukcije i električnog polja DV 35(30) kV Al/Če 6x150/25 mm<sup>2</sup> je na slici 24. Modeliran je jedan raspon dalekovoda u duljini 240 m [20]. Za strujno opterećenja je usvojena pretpostavka opterećenja 80 % od dozvoljenog strujnog opterećenja (80 % od 442 A = 354 A). Za napon je usvojeno 35 kV što proračun električnog polja vodi na stranu sigurnosti u odnosu na napon 30 kV. Rezultati proračuna su dani u nastavku.

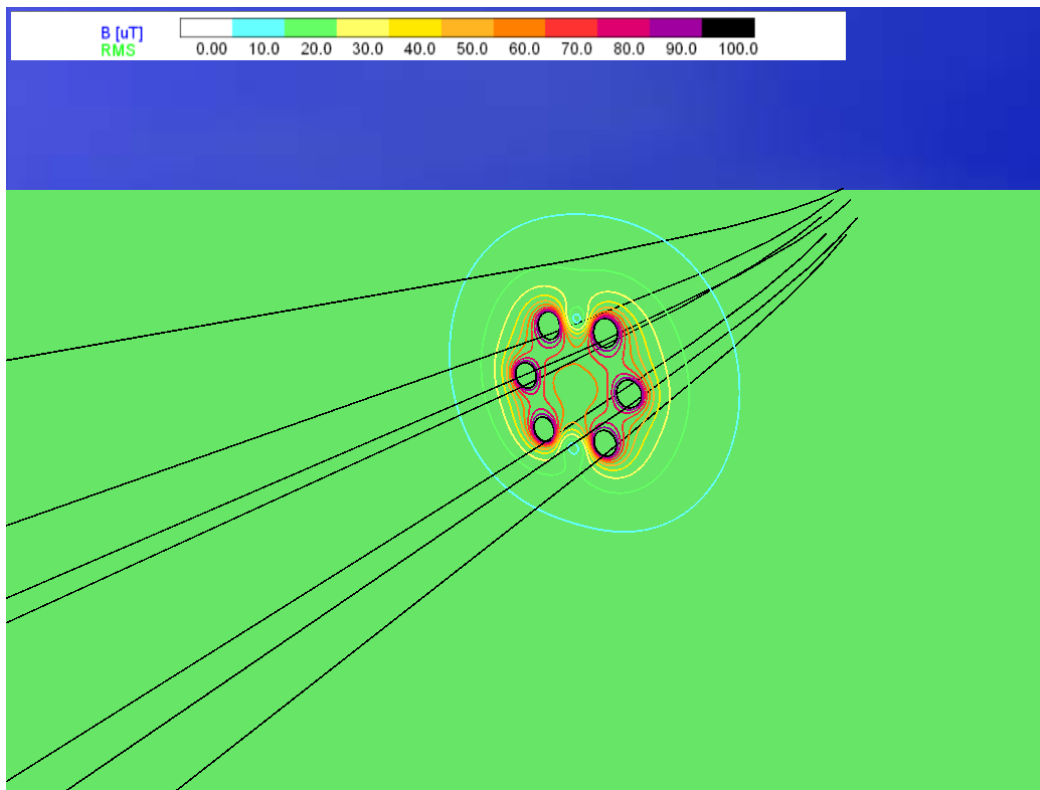
Sa slikom 25 i 26 je vidljivo, udaljavanjem od osi dalekovoda magnetska indukcija se smanjuje. Magnetska indukcija je manja od 40  $\mu$ T na udaljenosti 2,0 m od vodiča.

Sa slikom 27 je vidljivo, na udaljenosti 8,2 cm od središta vodiča razina magnetske indukcije je 1000  $\mu$ T.

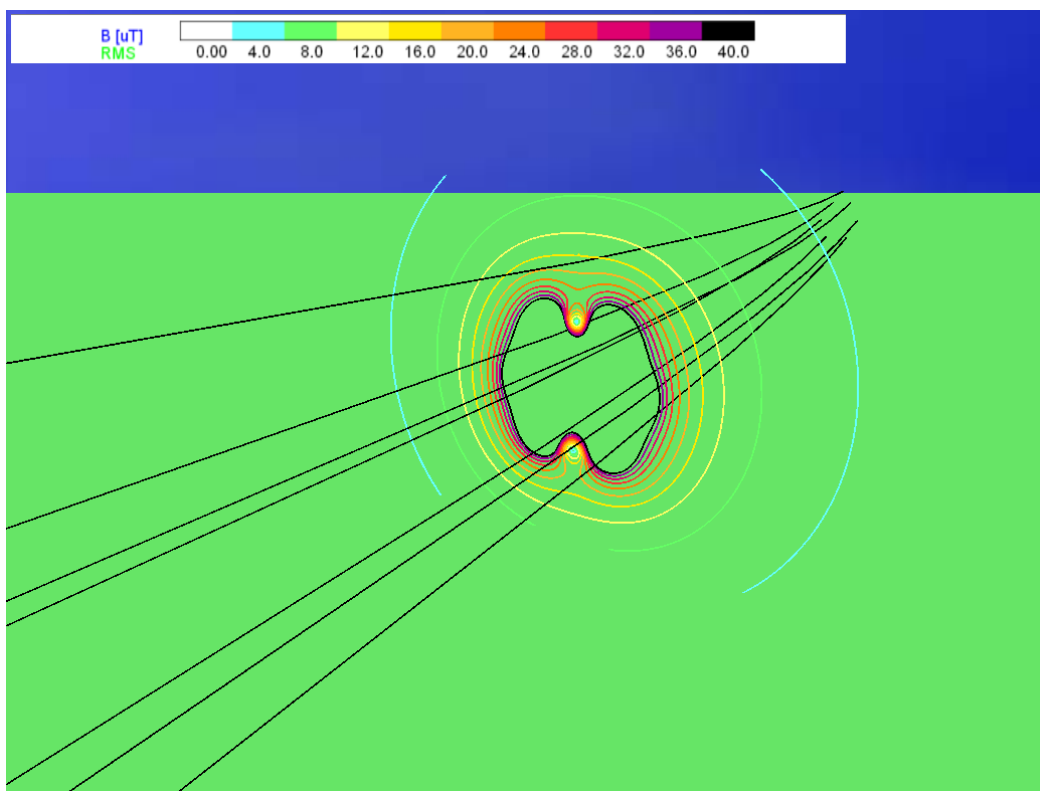
Električno polje je manje od 2 kV/m na udaljenosti 1,6 m od vodiča. Sa slikom 28 i 29 je vidljivo, na udaljenosti 16,3 cm od središta vodiča razina električnog polja je 20 kV/m.



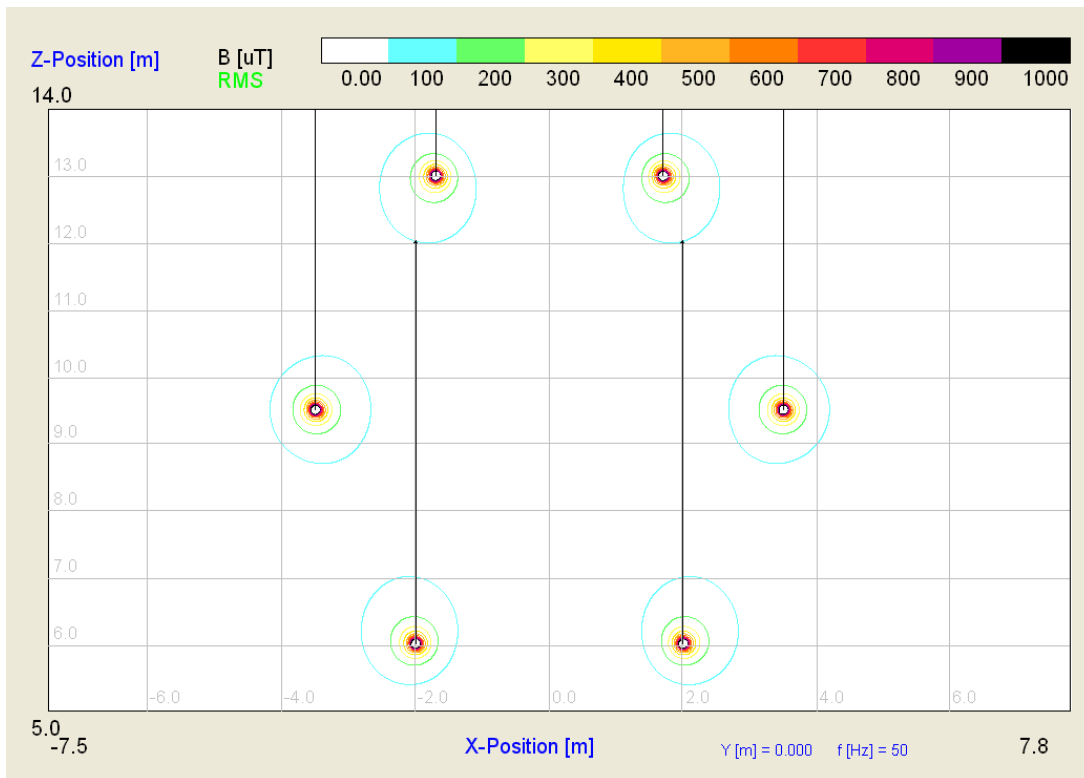
Slika 24. Model za proračun DV 35 kV, tip bačva [14]



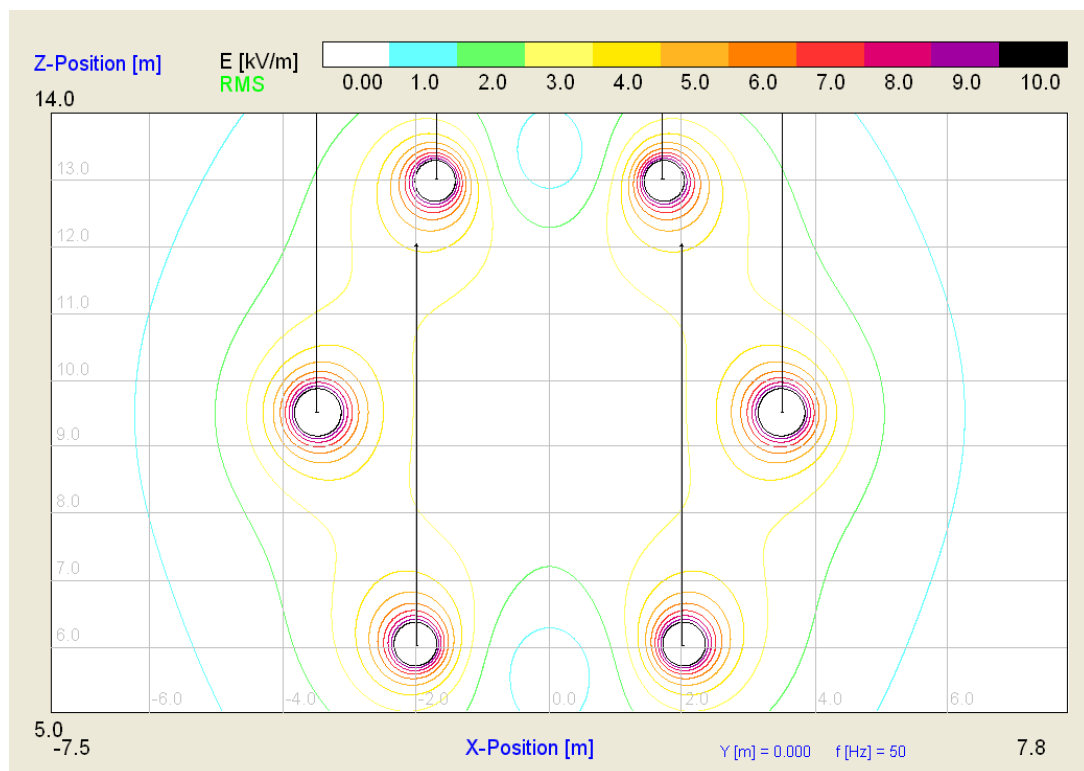
Slika 25. Magnetska indukcija vrijednosti do 100  $\mu\text{T}$  [20]



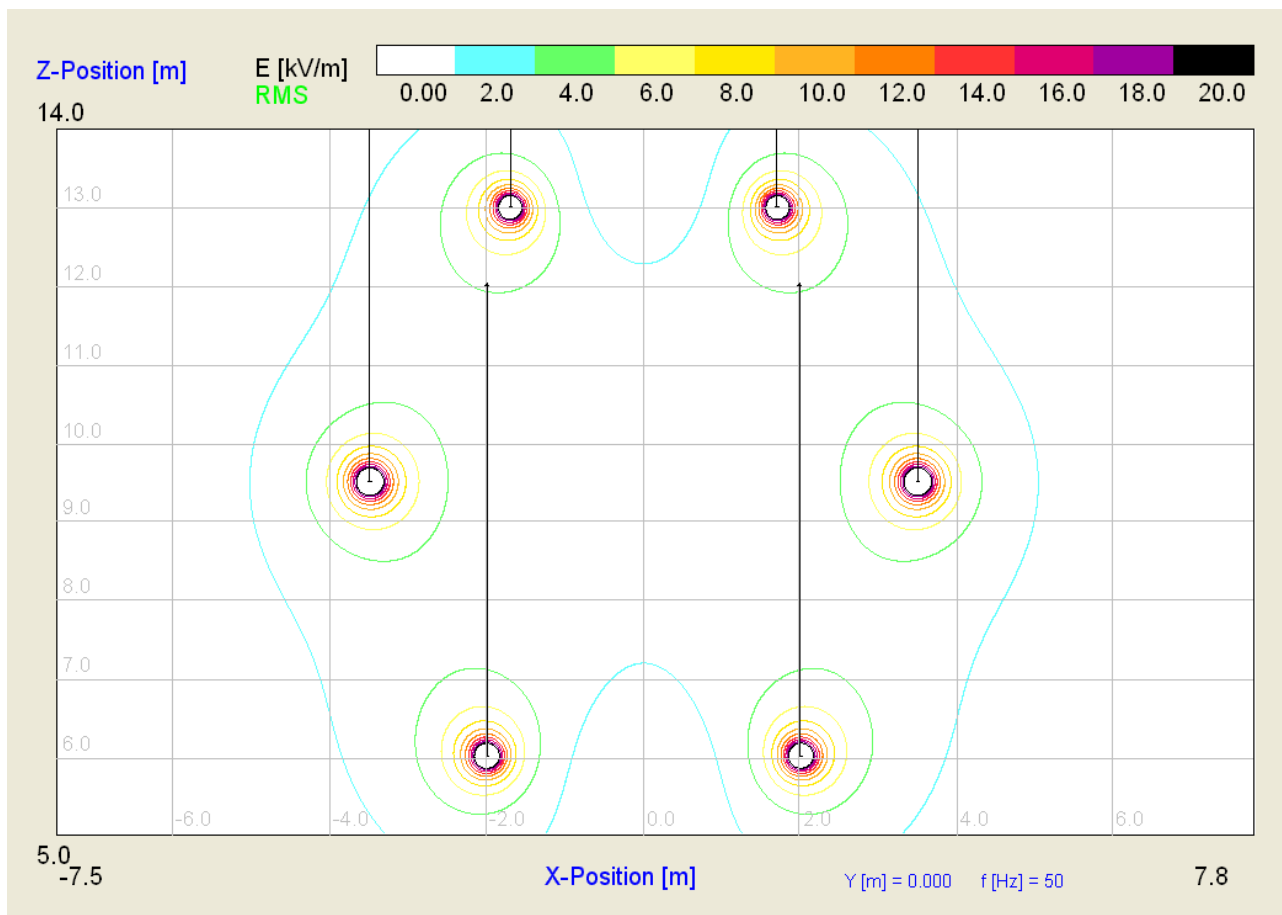
Slika 26. Magnetska indukcija vrijednosti do 40  $\mu\text{T}$  [20]



Slika 27. Magnetska indukcija do  $1000 \mu\text{T}$  [20]



Slika 28. Električno polje do  $10 \text{ kV/m}$  [20]



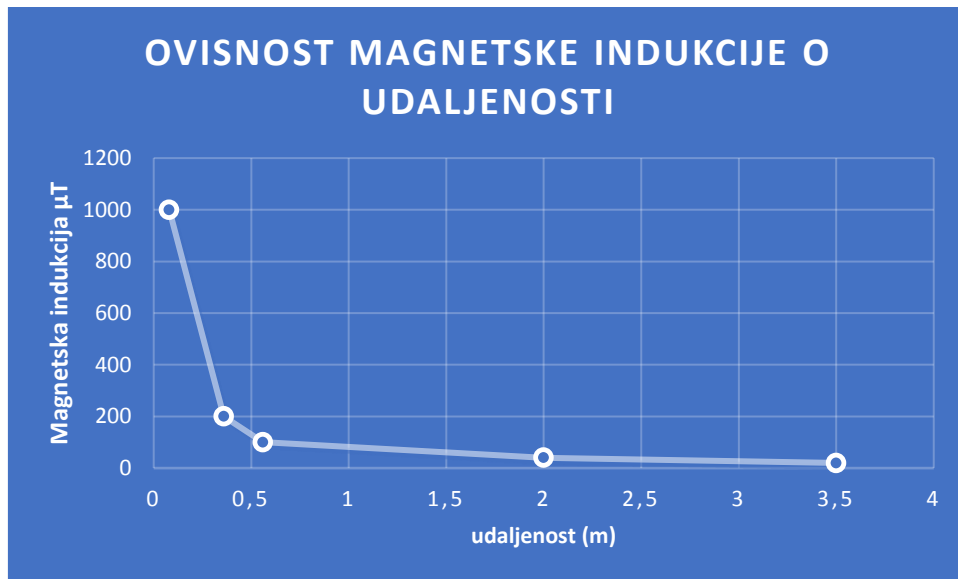
Slika 29. Električno polje do 20 kV/m [20]

Temeljem dobivenih proračuna, mogu se očitati vrijednosti magnetske indukcije i električnog polja u ovisnosti od udaljenosti od izvora (tablice 10 i 11).

Tablica 10. Vrijednosti magnetske indukcije na udaljenostima od izvora

B ( $\mu\text{T}$ )	1000	200	100	40	20
R (m)	0,08	0,36	0,56	2	3,5

Iz dobivenih rezultata, na slici 30 je prikazan graf iz kojeg je vidljivo da vrijednost magnetske indukcije eksponencijalno opada u ovisnosti od udaljenosti izvora EM polja.

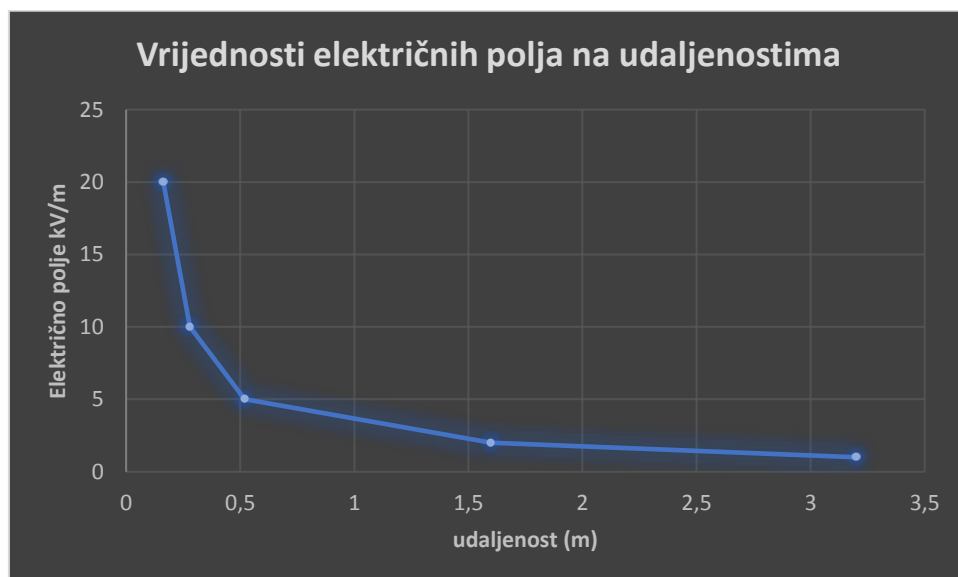


Slika 30. Graf magnetske indukcije u neposrednoj blizini dalekovoda

Tablica 11. Vrijednosti električnih polja na udaljenostima od izvora

E (kV/m)	20	10	5	2	1
R (m)	0,163	0,28	0,52	1,6	3,2

Iz dobivenih rezultata, na slici 31 je prikazan graf iz kojeg je vidljivo da vrijednosti električnih polja eksponencijalno opadaju u ovisnosti od odaljenosti izvora EM polja.



Slika 31. Graf električnih polja u neposrednoj blizini dalekovoda



Kako je za ovaj proračun uzet najnepovoljniji slučaj za radnike, tj. objekt u kojem se pojavljuju najveće vrijednosti EM polja, maksimalne vrijednosti kojima mogu biti izloženi radnici u skladu s uputama za rad „na udaljenosti“ na 35 kV dalekovodu pod naponom iznosi 90  $\mu\text{T}$  i 4 kV/m na udaljenosti 0,6 m od vodiča.

### **DV 10(20) kV, tip stupa bačva, presjeka Al/Če 6x120/20 mm<sup>2</sup>**

Model za proračune magnetske indukcije i električnog polja DV 10(20) kV Al/Če 6x120/20 mm<sup>2</sup> je na *slici 32*. Modeliran je jedan raspon dalekovoda u duljini 130 m [20]. Za strujno opterećenja je usvojena pretpostavka opterećenja 80 % od dozvoljenog strujnog opterećenja (80 % od 385 A = 308 A). Za napon je usvojeno 20 kV što proračun električnog polja vodi na stranu sigurnosti u odnosu na napon 10 kV. Rezultati proračuna su dani u nastavku.

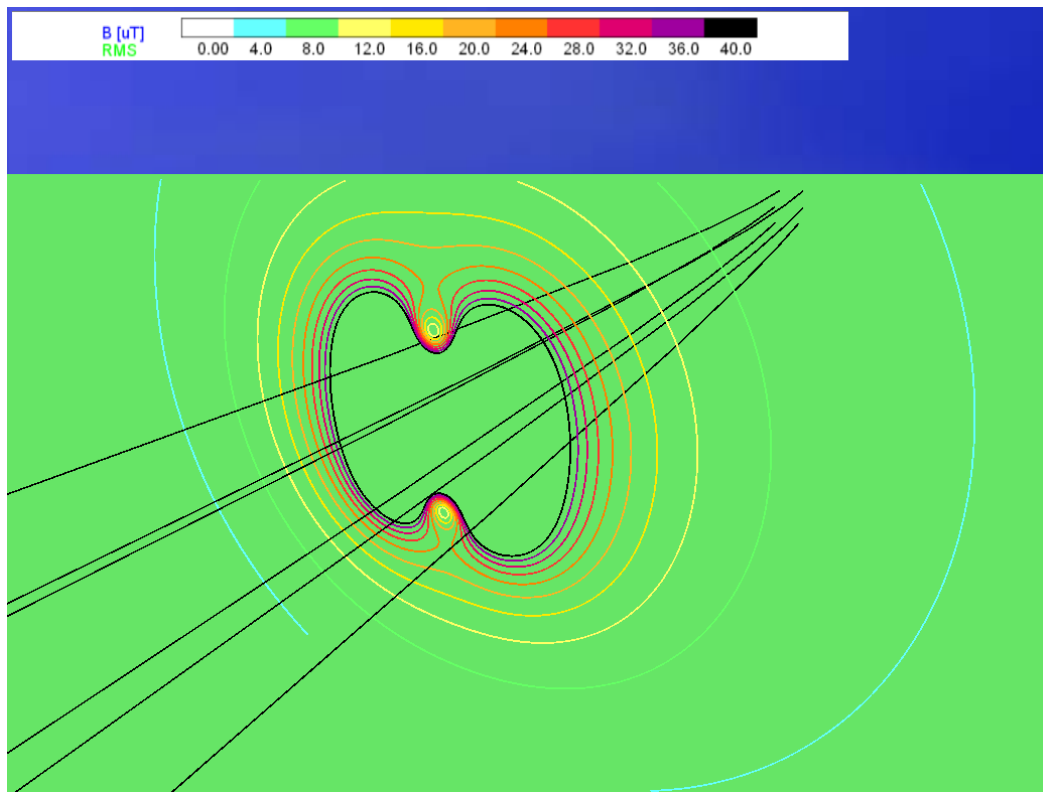
Sa *slika 33* i *34* je vidljivo da udaljavanjem od osi dalekovoda magnetska indukcija se smanjuje. Magnetska indukcija je manja od 40  $\mu\text{T}$  na udaljenosti 1,65 m od vodiča.

Na udaljenosti 6,5 cm od središta vodiča razina magnetske indukcije je 1000  $\mu\text{T}$ .

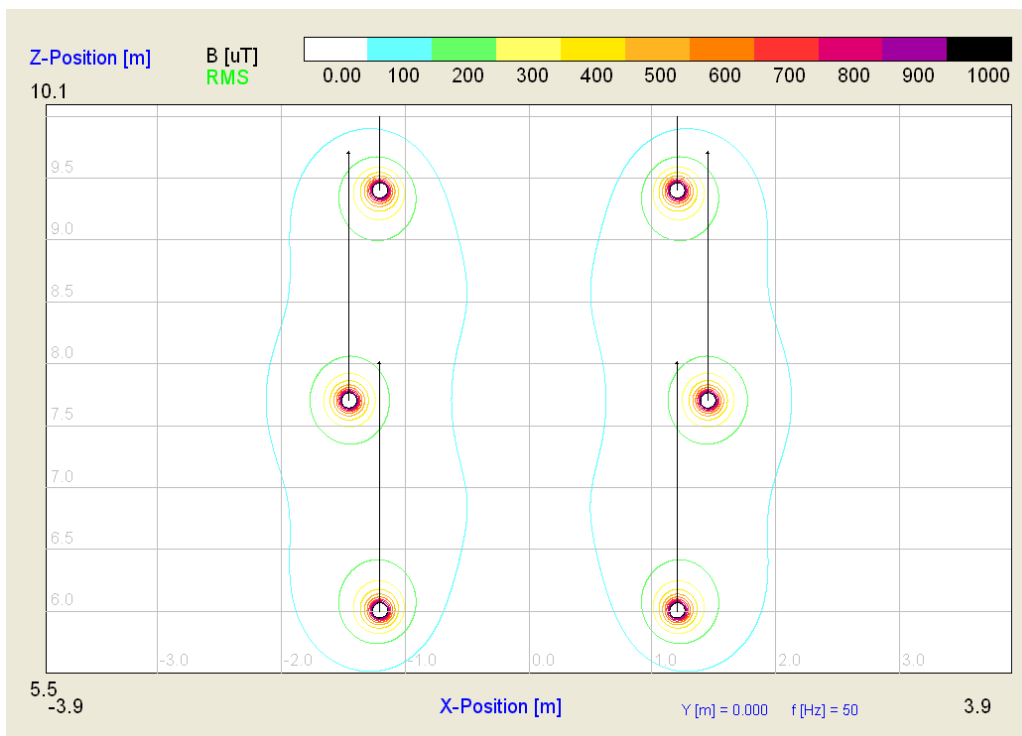
Sa *slika 35* i *36* je vidljivo, na udaljenosti 10 cm od središta vodiča razina električnog polja je 20 kV/m. Udaljavanjem od osi dalekovoda električno polje se smanjuje. Električno polje je manja od 2 kV/m na udaljenosti 1,05 m od vodiča.



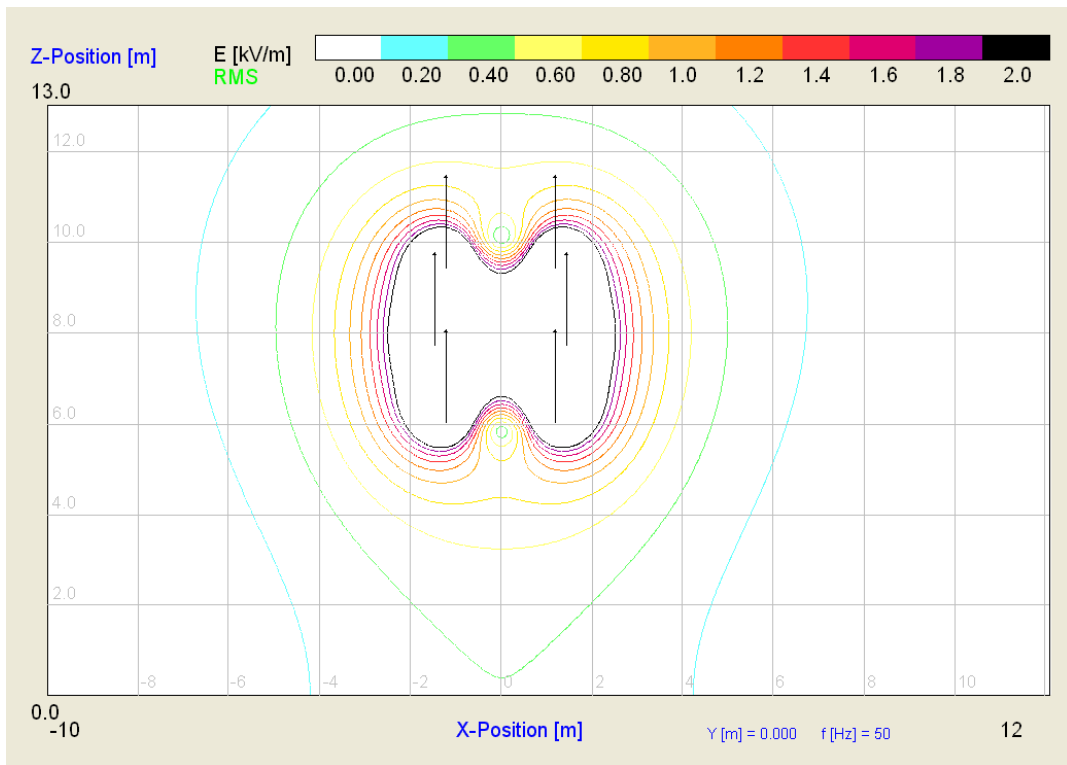
*Slika 32. Model Model za proračun DV 10(20) kV, tip bačva [14]*



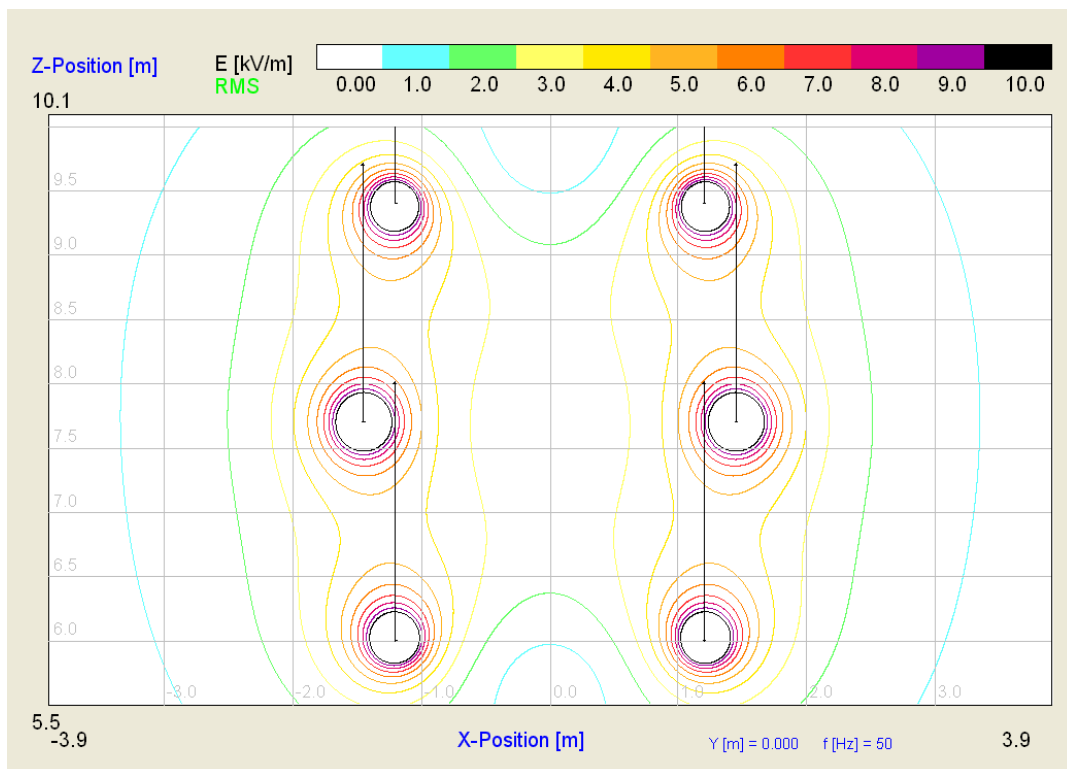
Slika 33. Magnetska indukcija vrijednosti do 40  $\mu\text{T}$  [20]



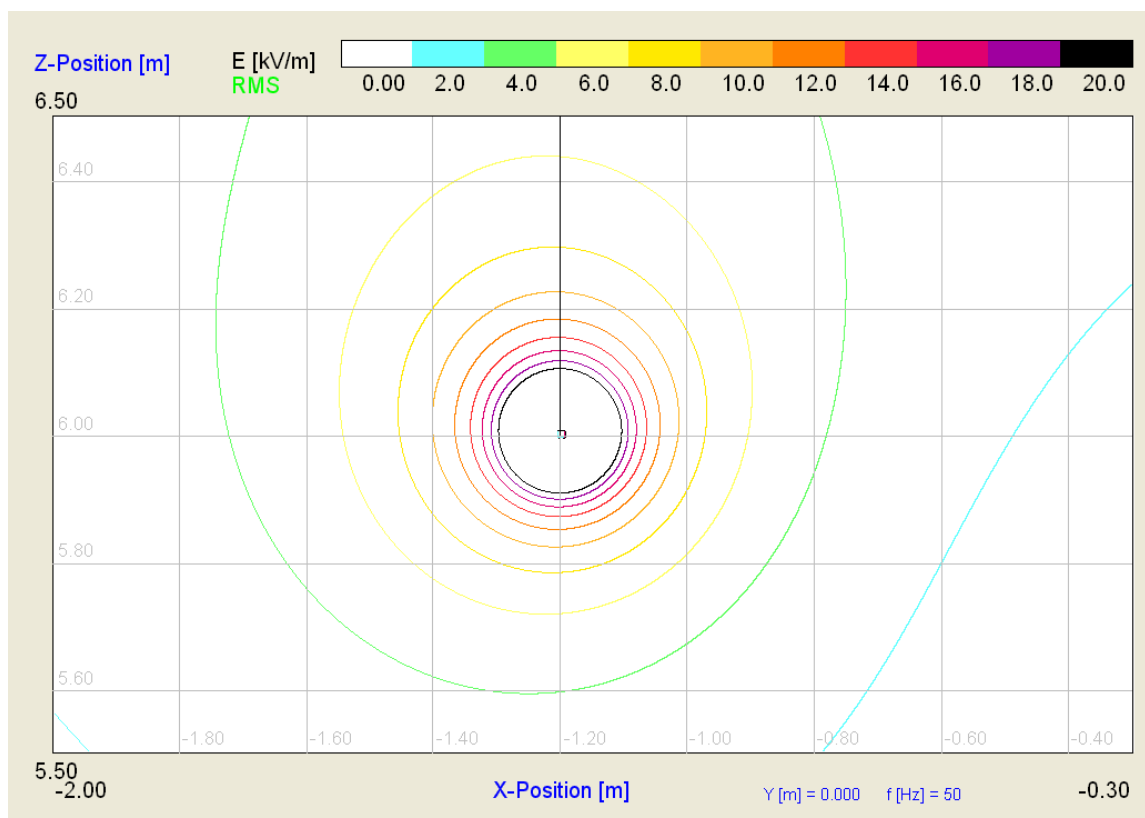
Slika 34. Magnetska indukcija do 1000  $\mu\text{T}$  [20]



Slika 35. Električno polje do 2 kV/m [20]



Slika 36. Električno polje do 10 kV/m [20]



Slika 37. Električno polje do 20 kV/m [20]

Temeljem dobivenih proračuna, mogu se očitati vrijednosti magnetske indukcije i električnog polja u ovisnosti od udaljenosti od izvora (tablice 12 i 13).

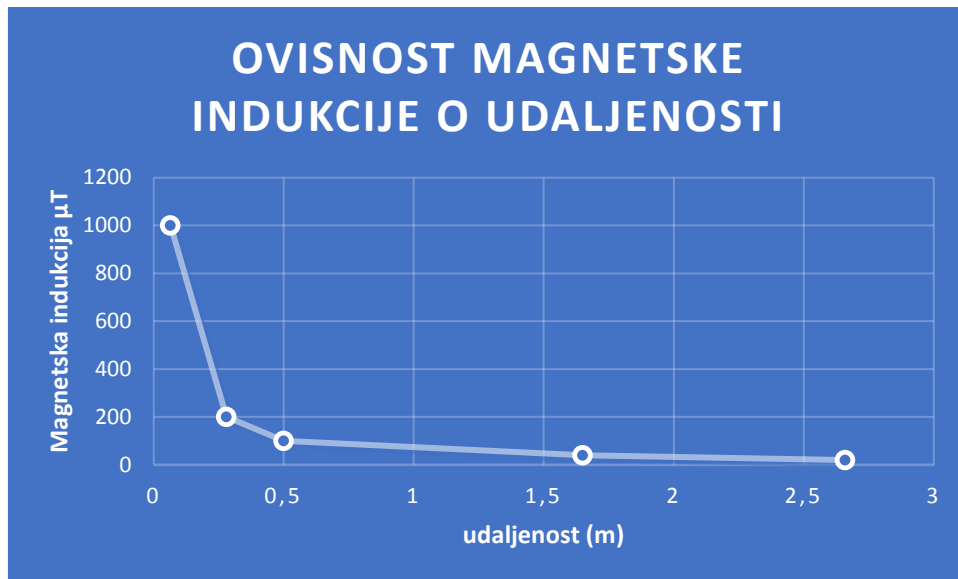
Tablica 12. Vrijednosti magnetske indukcije na udaljenostima od izvora

B ( $\mu\text{T}$ )	1000	200	100	40	20
R (m)	0,065	0,28	0,5	1,65	2,66

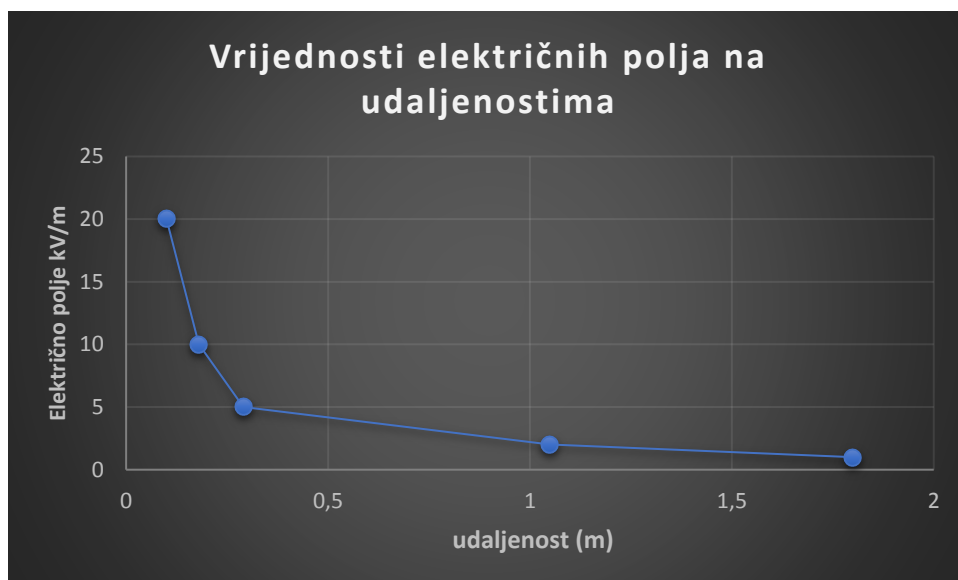
Tablica 13. Vrijednosti električnih polja na udaljenostima od izvora

E (kV/m)	20	10	5	2	1
R (m)	0,1	0,18	0,29	1,05	1,8

Iz dobivenih rezultata, na slikama 38 i 39 su prikazani grafovi iz kojih je vidljivo da vrijednosti eksponencijalno opadaju u ovisnosti od udaljenosti izvora EM polja.



Slika 38. Graf magnetske indukcije u neposrednoj blizini dalekovoda



Slika 39. Graf električnih polja u neposrednoj blizini dalekovoda

Kako je za ovaj proračun uzet najnepovoljniji slučaj za radnike, tj. objekt u kojem se pojavljuju najveće vrijednosti EM polja, maksimalne vrijednosti kojima mogu biti izloženi radnici u skladu s uputama za rad „na udaljenosti“ na 10(20) kV dalekovodu pod naponom iznosi 150  $\mu\text{T}$  i 4  $\text{kV/m}$  na udaljenosti 0,4 m od vodiča.

## 7. ZAKLJUČAK

U 2016. godini je u HEP ODS-u napravljena Studija značaja tipskih elektroenergetskih postrojenja distribucijske mreže, nazivnog napona iznad 1kV, obzirom na razine emitiranih elektromagnetskih polja [14], te je istom potvrđeno da sva energetska postrojenja u HEP ODS-u zadovoljavaju propisane vrijednosti. Međutim, predmetna ispitivanja su se odnosila na javna područja i područja povećane osjetljivosti, tj. za opću populaciju, nisu razmatrane udaljenosti i vrijednosti za slučajeve HEP-ovih radnika prilikom RPN-a i neposrednom približavanju izvorima EM polja.

Za dokazivanje sukladnosti s odredbama Pravilnika o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja [3] HEP ODS koristi rezultate ocjene izloženosti elektromagnetskim poljima u EDF (Electricité de France) električnim postrojenjima. Budući da je HEP preuzeo tehnologiju rada pod naponom na električnim postrojenjima niskog i srednjeg napona francuske elektroprivrede (EDF), u svojim dokumentima koristi jednake zaključke proizašle iz provedenih mjerenja i studija EDF-a. Zaključak studije je da u električnim postrojenjima SN izloženost radnika električnim poljima nikad ne prelazi 10 kV/m, a izloženost magnetskim poljima nikad ne prelazi 500  $\mu$ T.

U ovom radu je izvršen proračun emitiranih razina elektromagnetskih polja na radnike HEP ODS-a prilikom korištenja trenutačnih metoda rada pod naponom „na udaljenost“ za srednjenaponska postrojenja.

Kako su korišteni najnepovoljniji slučajevi za radnike, trafostanica i nadzemni dalekovodi s teoretskim maksimalnim vrijednostima EM polja, rezultati i zaključak rada se može primijeniti za sve izvore EM polja na elektrodistribucijskim postrojenjima prilikom RPN-a trenutačnim metodama „na udaljenost“.

Maksimalni utjecaj EM polja na radnike HEP ODS-a iznosi 150  $\mu$ T za magnetsku indukciju i 4 kV/m za električno polje. U praksi, vrijednosti će biti značajno manje od dobivenog proračuna, jer opterećenost postrojenja rijetko doseže maksimalne iznose. Temeljem navedenog, dokazana je sukladnost s odredbama Pravilnik [3] za radnike HEP ODS-a.

U narednom periodu, prije uvođenja metoda RPN-a na srednjem naponu „u dodiru“ ili „na potencijalu“, poželjno je za iste provesti proračune EM polja jer su radnici u

neposrednom dodiru sa vodičima te postoji mogućnost prisustva vrijednosti upozorenja, pogotovo za električno polje.

## 8. LITERATURA

- [1] Zakon o zaštiti od neionizirajućeg zračenja, Narodne novine br. 91/10, 114/18, 01.04.2019. godine.
- [2] Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja, Narodne novine br. 146/14, 31/19, 27.03.2019. godine.
- [3] Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja, Narodne novine br. 59/16, 16.06.2016. godine.
- [4] Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju elektro-energetskih vodova napona od 1 kV do 400 kV, Službeni list SFRJ br. 65/88, Narodne novine br. 53/91 i Narodne novine br. 24/97.
- [5] <https://www.epa.gov/radtown/electric-and-magnetic-fields-power-lines>, pristupljeno 02.09.2021. god.
- [6] Lovas A., Analiza električnih i magnetskih polja u visokonaponskom elektroenergetskom postrojenju, diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, 2020. god.
- [7] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Biot%E2%80%93Savartov\\_zakon](https://hr.wikipedia.org/wiki/Biot%E2%80%93Savartov_zakon), pristupljeno 02.09.2021. god.
- [8] Čurin M., Levačić G., Mihalić D., Gašparović D., Procjena izloženosti elektromagnetskim poljima nazivne frekvencije 50 Hz u skladu s preporukama ENTSO-e, CIGRE, 2017. god.
- [9] Europska komisija, Neobvezujući vodič o dobroj praksi za provedbu Direktive 2013/35/EU, Svezak 1. Praktični vodič, 2020. god.
- [10] Profesionalna izloženost zaposlenika niskofrekvencijskim električnim i magnetskim poljima pri radu u elektroenergetskim objektima, Institut za elektroprivrednu i energetiku d.d., Zagreb, 2007. god.
- [11] Podaci tvrtke HEP ODS
- [12] Vlastite slike



- [13] Tehnički uvjeti za izbor i polaganje elektroenergetskih kabela nazivnog napona 1 kV do 35 kV, Bilten HEP ODS-a, 2011. god.
- [14] Studija značaja tipskih elektroenergetskih postrojenja distribucijske mreže, nazivnog napona iznad 1kV, obzirom na razine emitiranih elektromagnetskih polja, Sveučilište u Zagrebu, FER, 2016. god.
- [15] Čelično rešetkasti stupovi za dalekovode 10, 20 i 35 kV, Dalekovod projekt, 2010. god.
- [16] Pravila i mjere sigurnosti pri radu na električnim postrojenjima, Bilten HEP ODS-a, 2020. god.
- [17] Čaha V., Tehnologija rada pod naponom, HEP ODS, Zagreb, 2012. god.
- [18] Opći uvjeti za izvođenje radova pod naponom na srednjem naponu i metode rada, Bilten HEP ODS-a, 2021. god.
- [19] Uvjeti za izvođenje radova pod naponom – čišćenje na srednjem naponu, Bilten HEP ODS-a, 2021. god.
- [20] Programski paket EFC-400, Fakultet elektrotehnike i računarstva, laboratoriji zavoda za visoki napon i energetiku, Zagreb, 2021. god.
- [21] Ivanišević M., Magnetsko polje ravnog vodiča, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, 2011. god.

## 9. PRILOZI

### 9.1. Popis slika

Slika 1. Granične razine električnog polja i gustoće magnetskih polja [8].....	5
Slika 2. Upozorenje za elektromagnetsko polje [10].....	6
Slika 3. Jakost električnog polja u ovisnosti o udaljenosti [6].....	8
Slika 4. Pravilo desne ruke [7].....	8
Slika 5. Magnetsko polje dB u točki P [21].....	9
Slika 6. Shema HEP grupe [11].....	14
Slika 7. Distribucijska područja HEP ODS-a [11].....	15
Slika 8. Nadzemni 10(20) kV dalekovod [12].....	16
Slika 9. Kabelski kanal, polaganje kabela u trokut [13].....	17
Slika 10. Oblici glava stupova [15].....	20
Slika 11. Zone električnih postrojenja [16].....	29
Slika 12. Alat i oprema za RPN [17].....	31
Slika 13. Popravak vodiča na NN mreži pod naponom [17].....	33
Slika 14. Čišćenje SN/NN kabelske trafostanice pod naponom industrijskim usisivačem [17] .....	34
Slika 15. Postavljanje zaštite od ptica na SN vod [17].....	34
Slika 16. Metode RPN-a na srednjem naponu [18].....	35
Slika 17. Primjer čišćenja trafostanice metodom RPN [19].....	37
Slika 18. Model trafostanice za proračune [14].....	39
Slika 19. Magnetska indukcija, granica do 1000 $\mu$ T [20].....	39
Slika 20. Magnetska indukcija do 100 $\mu$ T [20].....	40
Slika 21. Magnetska indukcija do 40 $\mu$ T [20].....	40
Slika 22. Graf magnetske indukcije u trafostanici.....	41
Slika 23. Rad „na udaljenosti“ iz autoplatforme na SN vodu [18].....	42
Slika 24. Model za proračun DV 35 kV, tip bačva [14].....	43
Slika 25. Magnetska indukcija vrijednosti do 100 $\mu$ T [20].....	44
Slika 26. Magnetska indukcija vrijednosti do 40 $\mu$ T [20].....	44
Slika 27. Magnetska indukcija do 1000 $\mu$ T [20].....	45
Slika 28. Električno polje do 10 kV/m [20].....	45
Slika 29. Električno polje do 20 kV/m [20].....	46
Slika 30. Graf magnetske indukcije u neposrednoj blizini dalekovoda.....	47
Slika 31. Graf električnih polja u neposrednoj blizini dalekovoda.....	47
Slika 32. Model Model za proračun DV 10(20) kV, tip bačva [14].....	48
Slika 33. Magnetska indukcija vrijednosti do 40 $\mu$ T [20].....	49
Slika 34. Magnetska indukcija do 1000 $\mu$ T [20].....	49
Slika 35. Električno polje do 2 kV/m [20].....	50
Slika 36. Električno polje do 10 kV/m [20].....	50
Slika 37. Električno polje do 20 kV/m [20].....	51
Slika 38. Graf magnetske indukcije u neposrednoj blizini dalekovoda.....	52
Slika 39. Graf električnih polja u neposrednoj blizini dalekovoda.....	52

## 9.2. Popis tablica

Tablica 1. Granične razine za javna područja [2] .....	3
Tablica 2. Granične razine za područja povećane osjetljivosti [2] .....	3
Tablica 3. Tipovi srednjenaponskih podzemnih kabela [11] .....	18
Tablica 4. Tipovi srednjenaponskih nadzemnih vodova [11] .....	21
Tablica 5. Tipovi slobodnostojećih transformatorskih stanica TS 35(30)/10(20) kV [11] .....	23
Tablica 6. Tipovi slobodnostojećih transformatorskih stanica TS 10(20)/0,4 kV [11] .....	23
Tablica 7. Tipovi transformatorskih stanica TS 10(20)/0,4 kV smještenih u zgradama [11] ..	25
Tablica 8. Granične udaljenosti zone rada pod naponom [16] .....	30
Tablica 9. Vrijednosti magnetske indukcije na udaljenostima od izvora .....	41
Tablica 10. Vrijednosti magnetske indukcije na udaljenostima od izvora .....	46
Tablica 11. Vrijednosti električnih polja na udaljenostima od izvora .....	47
Tablica 12. Vrijednosti magnetske indukcije na udaljenostima od izvora .....	51
Tablica 13. Vrijednosti električnih polja na udaljenostima od izvora .....	51