

## IZBOR STUBOVA U ELEKTRODISTRIBUTIVNIM MREŽAMA SA EKOLOŠKOG ASPEKTA

A. MITROVIĆ, Schneider Electric DMS NS, Novi Sad, R. Srbija  
K. KASAŠ-LAŽETIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, R. Srbija  
N. ĐURIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, R. Srbija  
D. KLJAJIĆ, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, R. Srbija  
M. PRŠA, Novi Sad, R. Srbija

### UVOD

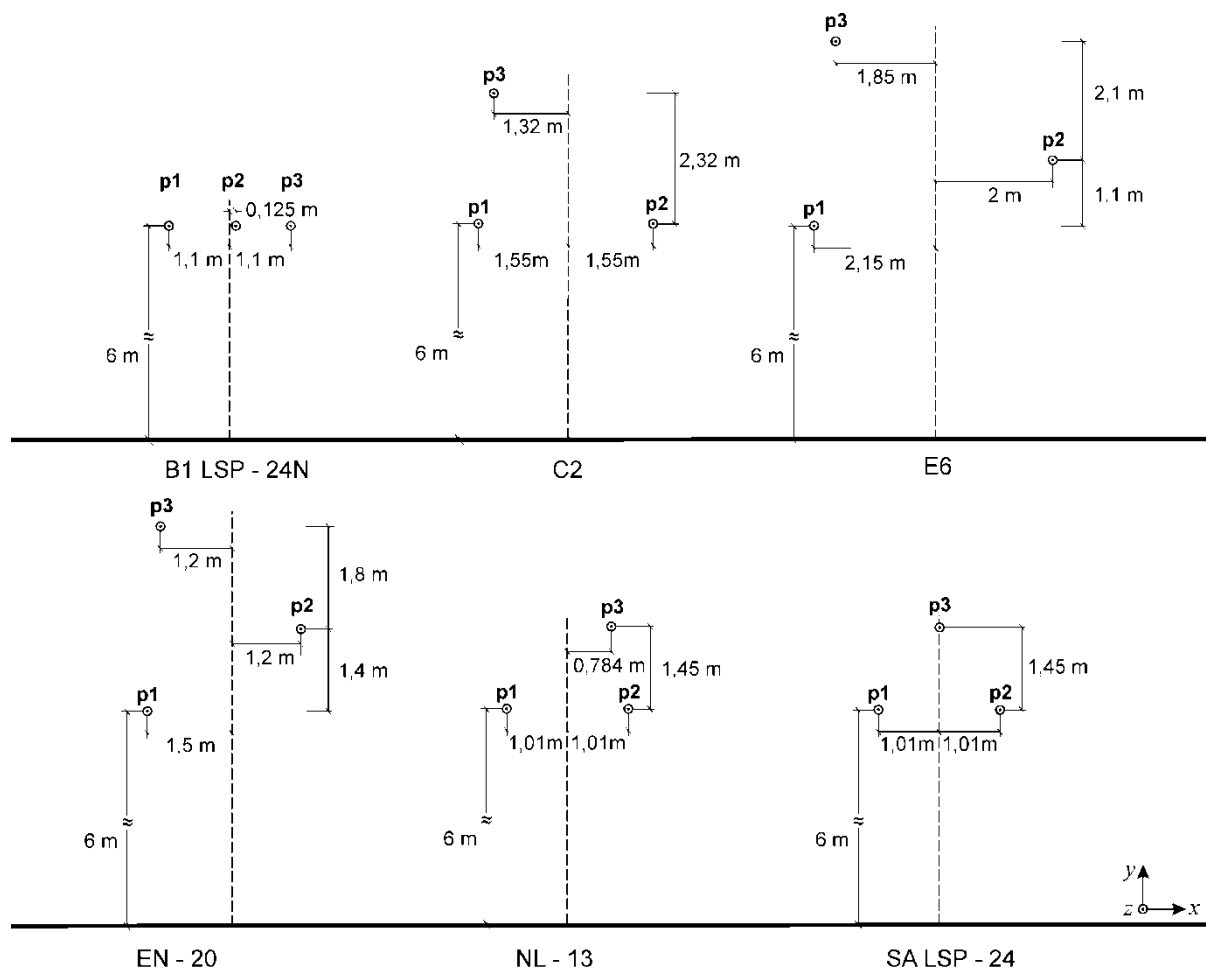
Različiti tipovi distributivnih stubova uvek predstavljaju i različitu prostornu konfiguraciju faznih provodnika, koji oko sebe stvaraju različite raspodele električnog i magnetskog polja. Sa stanovišta ekologije, odnosno sa stanovišta procene izloženosti stanovništva tim poljima, poznavanje raspodele polja je veoma bitno. Zbog toga je ovaj rad posvećen određivanju raspodele električnog i magnetskog polja u prostoru oko faznih provodnika najčešće korišćenih distributivnih stubova u našoj zemlji. Ispitivanje je rađeno za šest različitih tipova distributivnih stubova koji nose oznake B1 LSP-24N, C2, E6, EN-20, NL-13 i SA LSP-24. Konfiguracije faznih provodnika ovih distributivnih stubova date su na slici 1.

Da bi električna i magnetska polja pojedinih konfiguracija faznih provodnika mogla da se uporede, u cilju pronalaženja konfiguracije koja daje najmanji intenzitet vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije, potrebno je da se proračuni izvrše pod istim uslovima. U skladu sa tim, posmatran je naponski nivo (20 kV), jednako strujno opterećenje (350 A) i fazni provodnici istih poprečnih preseka (Al/Če 95/15 mm<sup>2</sup>). Pri tome je, u skladu sa važećim standardima (1), najniži fazni provodnik svake konfiguracije postavljen na visinu od šest metara iznad zemlje.

U okviru ovog rada urađen je niz proračuna u cilju određivanja električnog i magnetskog polja u prostoru oko faznih provodnika svake ispitane konfiguracije. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da postoje značajne razlike u intenzitetima vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije. Na osnovu toga može da se konstatuje da su ova istraživanja veoma važna, sa stanovišta zaštite životne sredine od nedozvoljenih nivoa električnih i magnetskih polja.

U radu je za svaku ispitivanu konfiguraciju faznih provodnika prikazan intenzitet vektora jačine električnog polja, kao i intenzitet vektora magnetske indukcije na visini od jednog metra iznad zemlje. Na osnovu tih vrednosti zaključeno je koji tip distributivnog stuba sa svojim rasporedom faznih provodnika ima najmanji uticaj na životnu sredinu.

Svi proračuni su izvršeni numerički, koristeći COMSOL Multiphysics 3.5a računarski programski paket (2), na dvodimenzionalnim pojednostavljenim modelima distributivnih stubova i korišćenih faznih provodnika.



Slika 1 – Konfiguracije faznih provodnika ispitanih distributivnih stubova

## TEORIJSKA OSNOVA RADA

Pošto ceo problem može da se posmatra kao linearan i pošto su sve veličine prostoperiodične, proračuni mogu da se pojednostave korišćenjem kompleksne notacije.

Zbog niske frekvencije moguće je odvojeno posmatrati električno i magnetsko polje. Za određivanje električnog i magnetskog polja u kompleksnom domenu, najčešće se koriste kompleksni električni skalar potencijal,  $\underline{V}$  i kompleksni magnetski vektor potencijal,  $\underline{\vec{A}}$ .

Ta dva potencijala se određuju iz kompleksnih parcijalnih diferencijalnih jednačina za kvazistatičko polje (3):

$$\Delta \underline{V} = 0, \quad \Delta \underline{\vec{A}} - j\omega\mu\sigma \underline{\vec{A}} = -\mu \underline{\vec{J}}. \quad (1)$$

Kompleksni vektor jačine električnog polja dobija se na osnovu potencijala,

$$\underline{\vec{E}} = -\text{grad} \underline{V} - j\omega \underline{\vec{A}}. \quad (2)$$

Kao što se iz prethodnih izraza vidi, kompleksni vektor jačine električnog polja,  $\underline{\vec{E}}$ , ima dve komponente. Prva, konzervativna komponenta je,

$$\underline{\vec{E}}_k = -\text{grad} \underline{V}, \quad (3)$$

a druga, vrtložna je,

$$\underline{\vec{E}}_v = -j\omega \underline{\vec{A}}. \quad (4)$$

Kompleksni vektor magnetske indukcije se dobija iz magnetskog vektor potencijala,

$$\underline{\vec{B}} = \text{rot} \underline{\vec{A}}. \quad (5)$$

## REŠAVANJE PROBLEMA U COMSOL MULTIPHYSICS 3.5A PROGRAMSKOM PAKETU

Kao što je i u uvodu rada napomenuto, kompletan problem se rešava numerički, pomoću COMSOL Multiphysics 3.5a računarskog programskog paketa baziranog na metodi konačnih elemenata. U okviru COMSOL Multiphysics 3.5a računarskog programskog za određivanje raspodela električnog i magnetskog polja paketa korišćen je moduo AC/DC.

Da bi se odredilo električno polje pomoću ovog programskog paketa, neophodno je, za svaku konfiguraciju faznih provodnika koja se u ovom radu ispituje, izvršiti sledeće korake:

1. Definirati geometriju modela,
2. Definirati materijale korišćene u sistemu,
3. Zadati ulazne podatke,
4. Definirati mrežu konačnih elemenata i
5. Rešiti problem.

### Definisanje geometrije modela

Geometrija problema sugerše korišćenje dvodimenzionalnog Dekartovog koordinatnog sistema postavljenog kao što je prikazano na slici 1. Posmatrani sistem za svaki od ispitanih stubova se sastoji od crteža tri fazna provodnika (svaki predstavljen kao krug) i velikog pravougaonika, koji predstavlja granicu domena od interesa. Taj pravougaonik je podeljen na dva manja, od kojih jedan predstavlja zemlju, a drugi vazduh.

### Definisanje materijala

Korišćeni programski paket omogućava da se definišu električne i magnetske karakteristike materijala od kojeg je izgrađen svaki element geometrije. U ovom radu, provodnici su definisani kao da su u potpunosti od aluminijuma pošto čelično jezgro ne utiče bitno na raspodelu električnog i magnetskog polja. Za pravougaonik u kojem se nalaze fazni provodnici definisan je vazduh kao materijal od kojeg je izgrađen, a za drugi pravougaonik koji zajedno sa prvim predstavlja domen od interesa definisana je zemlja.

### Zadavanje ulaznih podataka

Kao ulazni podaci su zadati kompleksni električni skalar potencijali provodnika i zemlje i vektori gustina struje svakog faznog provodnika. COMSOL Multiphysics 3.5a računarski programski paket radi sa maksimalnim vrednostima veličina. U radu je prikazan samo jedan naponski nivo i to 20 kV. Kako se kao nominalni napon uvek definiše linijski (međufazni) napon, kompleksni potencijali prema zemlji se definišu kao fazni naponi,

- Potencijal prvog provodnika:  $\underline{V}_1 = \frac{20}{\sqrt{3}} e^{j0^\circ} \text{ kV},$
- Potencijal drugog provodnika:  $\underline{V}_2 = \frac{20}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ} \text{ kV},$
- Potencijal trećeg provodnika:  $\underline{V}_3 = \frac{20}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ} \text{ kV},$
- Potencijal zemlje:  $\underline{V}_z = 0 \text{ kV}.$

Za strujno opterećenje faznih provodnika uzeta je trajno dozvoljena jačina struja faznih provodnika Al/Če 95/15 mm<sup>2</sup> od 350 A (4). Na osnovu te vrednosti zadat je vektor gustine struje, koji ima samo z-komponentu, svakog faznog provodnika,

- Vektor gustine struje prvog provodnika:  $\vec{J}_1 = \frac{I_1}{S} \vec{i}_z = \frac{350 e^{j0^\circ}}{110} \vec{i} = 3,182 e^{j0^\circ} \vec{i}_z \text{ A/mm}^2,$
- Vektor gustine struje drugog provodnika:  $\vec{J}_2 = 3,182 e^{-j120^\circ} \vec{i}_z \text{ A/mm}^2,$
- Vektor gustine struje trećeg provodnika:  $\vec{J}_3 = 3,182 e^{j120^\circ} \vec{i}_z \text{ A/mm}^2.$

Kao granični uslov, zadato je da je potencijal svih tačaka na granici posmatrane oblasti jednak 0 V.

## Definisanje mreže konačnih elemenata

U okviru ovog koraka definiše se i broj konačnih elemenata, kao i njihova veličina. Za sve ispitane modele broj konačnih elemenata se kreće između 9700 i 10340, a broj granica između tih elemenata iznosi oko 211.

## REZULTATI PRORAČUNA

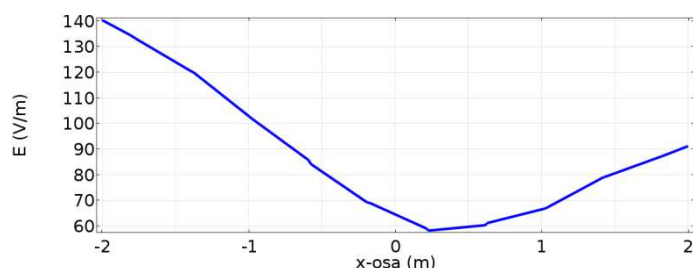
U ovom poglavlju je prvo pokazana zavisnost modula vektora jačine električnog polja i modula vektora magnetske indukcije od rasporeda faza kod najčešće korišćenog distributivnog stuba u našoj zemlji, a zatim su upoređene vrednosti modula vektora jačine električnog polja i modula vektora magnetske indukcije pri takvom rasporedu faza, tako da su ove vrednosti maksimalne za svaki ispitani distributivni stub. Rezultati su prikazani grafički, tako što je prikazana vrednost modula vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije na visini od 1 m iznad zemlje duž linije koja se proteže po dva metra od ose  $x=0$ , sa obe strane distributivnog stuba.

### Zavisnost električnog i magnetskog polja od rasporeda faza stuba B1 LSP-24N

U ovom potpoglavlju je pokazano kako raspored faza utiče na raspodelu električnog i magnetskog polja kod najčešće korišćenog stuba u našoj distributivnoj mreži B1 LSP-24N. Ispitane su sve moguće kombinacije rasporeda faznih napona i faznih gustina struja i izdvojene su raspodele sa najvećom i najmanjom maksimalnom vrednošću modula vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije.

U nastavku će se raspored faznih napona i faznih gustina struja označavati tako što će biti naveden samo redosled faznih napona ili faznih gustina struja koji odgovaraju provodnicima p1, p2 i p3 tačno tim redosledom (npr.  $\underline{V}_1\underline{V}_2\underline{V}_3$  znači da je provodniku p1 dodeljen fazni napon  $\underline{V}_1$ , provodniku p2 fazni napon  $\underline{V}_2$  i provodniku p3 vazni napon  $\underline{V}_3$ ).

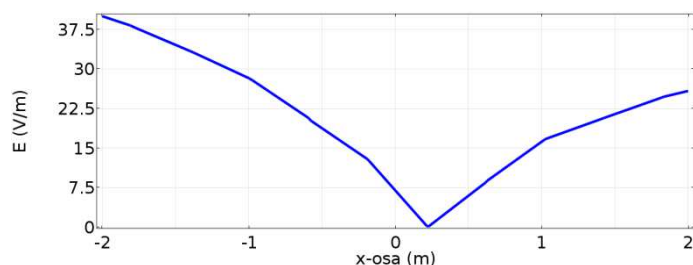
Na slici 2 je prikazana raspodela modula vektora jačine električnog polja pri kojoj taj moduo dostiže najveću maksimalnu vrednost.



Slika 2 – Raspodela maksimalnog modula vektora jačine električnog polja

Ova raspodela električnog polja se dobija pri rasporedu faznih napona  $\underline{V}_1\underline{V}_2\underline{V}_3$  i  $\underline{V}_1\underline{V}_3\underline{V}_2$ . Maksimalna vrednost modula vektora jačine električnog polja iznosi 140,30 V/m.

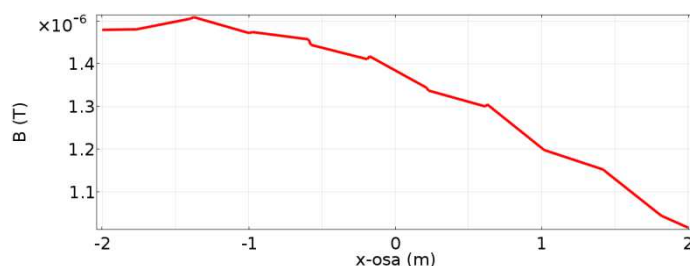
Na slici 3 je prikazana raspodela modula vektora jačine električnog polja pri kojoj taj moduo ima najmanju maksimalnu vrednost.



Slika 3 – Raspodela minimalnog modula vektora jačine električnog polja

Ova raspodela električnog polja se dobija pri rasporedu faznih napona  $\underline{V}_2\underline{V}_1\underline{V}_3$  i  $\underline{V}_3\underline{V}_1\underline{V}_2$ . Maksimalna vrednost modula vektora jačine električnog polja u ovom slučaju iznosi 40 V/m što je za 71% manje nego pri rasporedu faznih napona  $\underline{V}_1\underline{V}_2\underline{V}_3$  i  $\underline{V}_1\underline{V}_3\underline{V}_2$ .

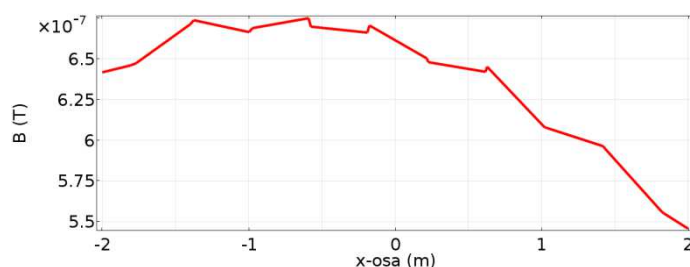
Na slici 4 je prikazana raspodela modula vektora magnetske indukcije pri kojoj taj moduo ima najveću maksimalnu vrednost.



Slika 4 – Raspodela maksimalnog modula vektora magnetske indukcije

Ova raspodela magnetskog polja se dobija pri rasporedu faznih gustina struja  $\vec{J}_2 \vec{J}_1 \vec{J}_3$  i  $\vec{J}_2 \vec{J}_3 \vec{J}_1$ . Maksimalna vrednost modula vektora magnetske indukcije iznosi 1,51  $\mu$ T.

Na slici 5 je prikazana raspodela modula vektora magnetske indukcije pri kojoj taj moduo ima najmanju maksimalnu vrednost.



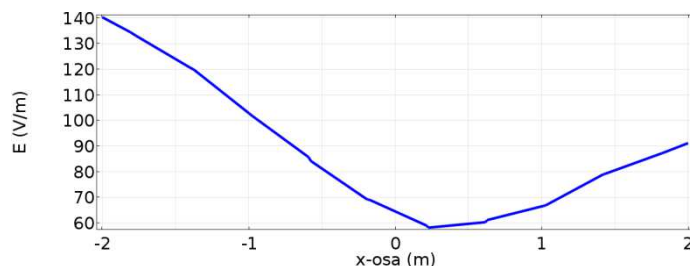
Slika 5 – Raspodela minimalnog modula vektora magnetske indukcije

Ova raspodela magnetskog polja se dobija pri rasporedu faznih gustina struja  $\vec{J}_3 \vec{J}_1 \vec{J}_2$  i  $\vec{J}_3 \vec{J}_2 \vec{J}_1$ . Maksimalna vrednost modula vektora magnetske indukcije u ovom slučaju iznosi 0,675  $\mu$ T.

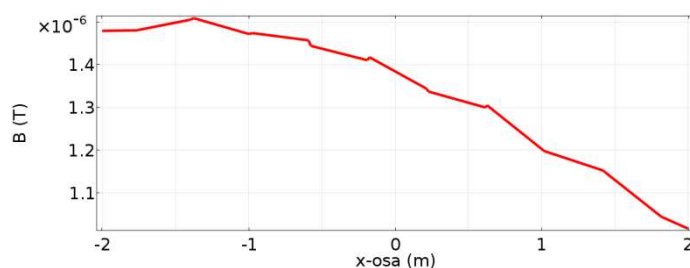
### Određivanje najboljeg distributivnog stuba sa ekološkog aspekta

U ovom potpoglavlju su dati najgori mogući slučajevi za sve ispitane distributivne stubove, odnosno raspodele sa najvećim maksimalnim vrednostima modula vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije pri odgovarajućim rasporedima faznih napona i faznih gustina struja.

Na slikama 6 i 7 su ponovljeni grafici iz prethodnog potpoglavlja za stub B1 LSP-24N.



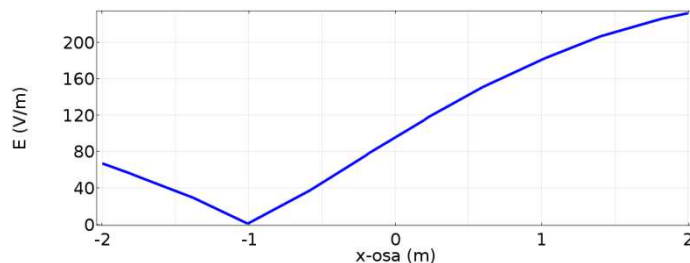
Slika 6 – Raspodela maksimalnog modula vektora jačine električnog polja stuba B1 LSP-24N



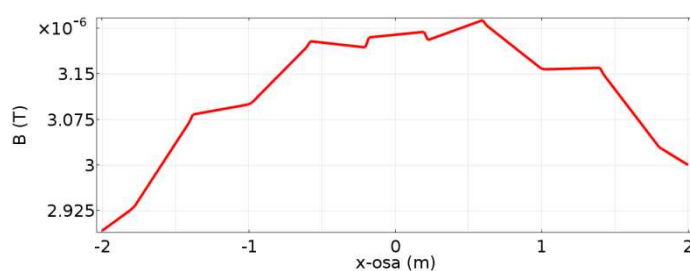
Slika 7 – Raspodela maksimalnog modula vektora magnetske indukcije stuba B1 LSP-24N

Kao što je već u prethodnom potpoglavlju navedeno, maksimalni moduli za vektor jačine električnog polja i vektor magnetske indukcije iznose 140,30 V/m (raspored faznih napona -  $\underline{V}_1\underline{V}_2\underline{V}_3$  i  $\underline{V}_1\underline{V}_3\underline{V}_2$ ) i 1,51  $\mu\text{T}$  (raspored faznih struja -  $\underline{J}_2\underline{J}_1\underline{J}_3$  i  $\underline{J}_2\underline{J}_3\underline{J}_1$ ).

Na slikama 8 i 9 su prikazane raspodele modula vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije za distributivni stub C2.



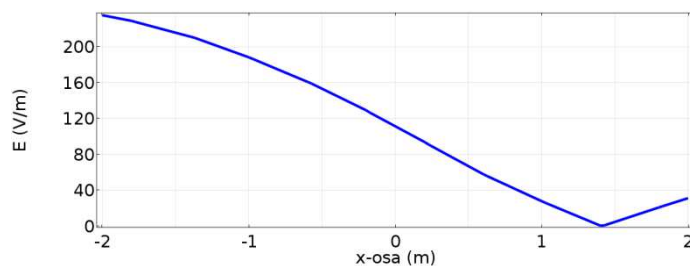
Slika 8 – Raspodela maksimalnog modula vektora jačine električnog polja stuba C2



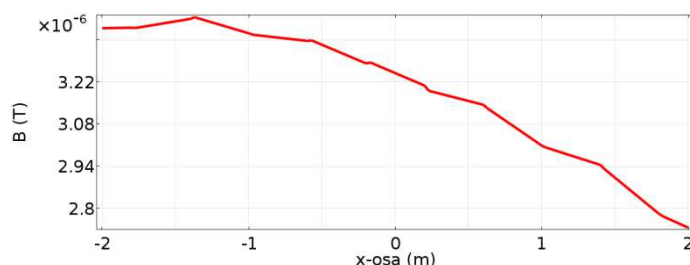
Slika 9 – Raspodela maksimalnog modula vektora magnetske indukcije stuba C2

Maksimalni moduo za vektor jačine električnog polja iznosi 232 V/m pri rasporedu faznih napona  $\underline{V}_2\underline{V}_1\underline{V}_3$  i  $\underline{V}_3\underline{V}_1\underline{V}_2$ , a maksimalni moduo vektora magnetske indukcije iznosi 3,24  $\mu\text{T}$ , pri rasporedu faznih gustina struja  $\underline{J}_2\underline{J}_1\underline{J}_3$  i  $\underline{J}_2\underline{J}_3\underline{J}_1$ .

Na slikama 10 i 11 su prikazane raspodele modula vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije za distributivni stub E6.



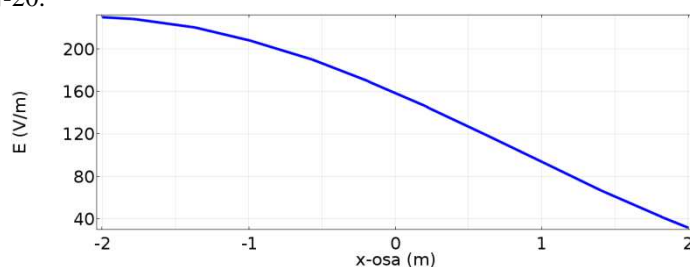
Slika 10 – Raspodela maksimalnog modula vektora jačine električnog polja stuba E6



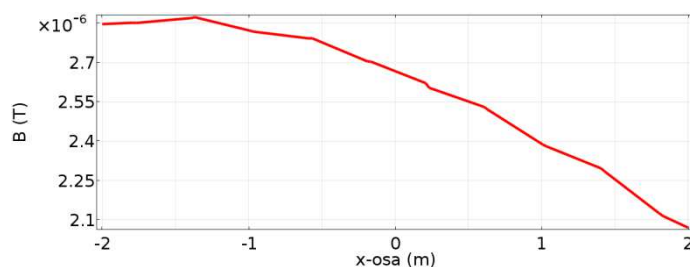
Slika 11 – Raspodela maksimalnog modula vektora magnetske indukcije stuba E6

Za distributivni stub E6 maksimalni moduo vektora jačine električnog polja iznosi 235,3 V/m, pri rasporedu faznih napona  $\underline{V}_1\underline{V}_2\underline{V}_3$  i  $\underline{V}_1\underline{V}_3\underline{V}_2$ , a maksimalni moduo vektora magnetske indukcije iznosi 3,436  $\mu\text{T}$ , pri rasporedu faznih gustina struja  $\underline{J}_2\underline{J}_1\underline{J}_3$  i  $\underline{J}_2\underline{J}_3\underline{J}_1$ .

Na slikama 12 i 13 su prikazane raspodele modula vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije za distributivni stub EN-20.



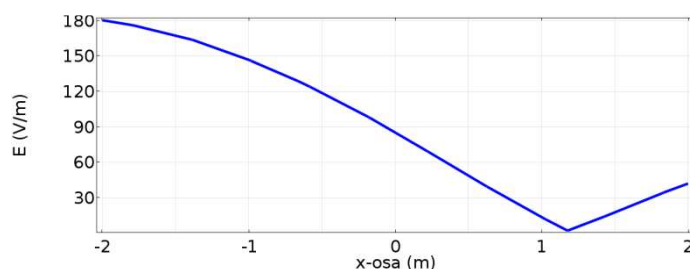
Slika 12 – Raspodela maksimalnog modula vektora jačine električnog polja stuba EN-20



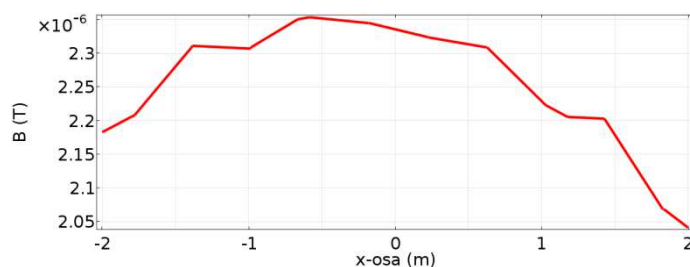
Slika 13 – Raspodela maksimalnog modula vektora magnetske indukcije stuba EN-20

Za distributivni stub EN-20 maksimalni moduo vektora jačine električnog polja iznosi 230 V/m, pri rasporedu faznih napona  $\underline{V}_1\underline{V}_2\underline{V}_3$  i  $\underline{V}_1\underline{V}_3\underline{V}_2$ , a maksimalni moduo vektora magnetske indukcije iznosi 2,873  $\mu$ T, pri rasporedu faznih gustina struja  $\underline{J}_2\underline{J}_1\underline{J}_3$  i  $\underline{J}_2\underline{J}_3\underline{J}_1$ .

Na slikama 14 i 15 su prikazane raspodele modula vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije za distributivni stub NL-13.



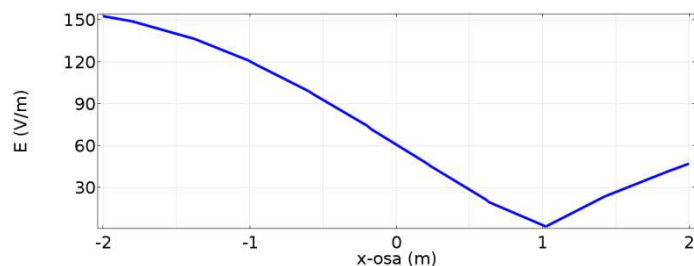
Slika 14 – Raspodela maksimalnog modula vektora jačine električnog polja stuba NL-13



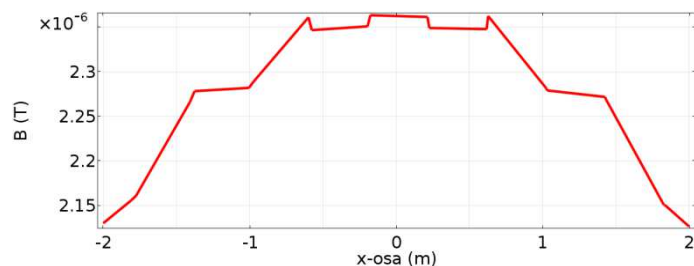
Slika 15 – Raspodela maksimalnog modula vektora magnetske indukcije stuba NL-13

Za distributivni stub NL-13 maksimalni moduo vektora jačine električnog polja iznosi 180 V/m, pri rasporedu faznih napona  $\underline{V}_1\underline{V}_2\underline{V}_3$  i  $\underline{V}_1\underline{V}_3\underline{V}_2$ , a maksimalni moduo vektora magnetske indukcije iznosi 2,354  $\mu$ T, pri rasporedu faznih gustina struja  $\underline{J}_2\underline{J}_1\underline{J}_3$  i  $\underline{J}_2\underline{J}_3\underline{J}_1$ .

Na slikama 16 i 17 su prikazane raspodele modula vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije za distributivni stub SA LSP-24.



Slika 16 – Raspodela maksimalnog modula vektora jačine električnog polja stuba SA LSP-24



Slika 17 – Raspodela maksimalnog modula vektora magnetske indukcije stuba SA LSP-24

Za distributivni stub SA LSP-24 maksimalni moduo vektora jačine električnog polja iznosi 152,80, V/m pri rasporedu faznih napona  $\underline{V}_1 \underline{V}_2 \underline{V}_3$  i  $\underline{V}_1 \underline{V}_3 \underline{V}_2$ , a maksimalni moduo vektora magnetske indukcije iznosi 2,364  $\mu\text{T}$ , pri rasporedu faznih gustina struja  $\vec{J}_2 \vec{J}_1 \vec{J}_3$  i  $\vec{J}_2 \vec{J}_3 \vec{J}_1$ .

Na osnovu prikazanih rezultata lako može da se zaključi da postoje značajne razlike u maksimalnim vrednostima modula vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije za različite stubove. Poređenjem ovih rezultata se uočava da je stub B1 LSP-24N najbolji sa ekološkog aspekta jer ima najbolju raspodelu, kako električnog, tako i magnetskog polja, dok stub E6 ima najgoru raspodelu električnog i magnetskog polja.

## ZAKLJUČAK

U ovom radu je prvo pokazano da raspored faznih napona i faznih struja utiče na raspodelu električnog i magnetskog polja u okolini faznih provodnika distributivnih stubova, a zatim su upoređene maksimalne vrednosti modula vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije, u cilju određivanja najbolje konfiguracije faznih provodnika odnosno distributivnog stuba koji obezbeđuje tu konfiguraciju. Na osnovu poređenja dobijenih rezultata utvrđeno je da je najčešće korišćeni distributivni stub u distributivnim mrežama naše zemlje - B1 LSP-24N najbolji sa ekološkog aspekta, jer ima najmanji maksimalni moduo vektora jačine električnog polja i vektora magnetske indukcije od svih ispitanih stubova. Na kraju je potrebno napomenuti da svi stubovi sa svojim konfiguracijama faznih provodnika zadovoljavaju ograničenja o nejonizujućim zračenjima (5), odnosno maksimalne vrednosti modula vektora jačine električnog polja su manje od 2000 V/m, a maksimalne vrednosti modula vektora magnetske indukcije su manje od 40  $\mu\text{T}$  za svaki ispitani distributivni stub.

## LITERATURA

1. “Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV” br. člana 100,101 i 102.
2. COMSOL MULTIPHYSICS, CLS 3.5a documentation 2008.
3. Popović B, 2004, “Elektromagnetika”, Akademska misao, str. 35
4. Gerić Lj, Đapić P, “Razvodna postrojenja – Zbirka zadataka”, FTN Izdavaštvo, str.147
5. “Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima”, “Sl. Glasnik RS”, br. 104/2009, str. 7

## ZAHVALNICA

Rad predstavlja deo istraživanja na projektu broj TR32055, finansiranom od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije, 2011-2016.

Autori se takođe zahvaljuju firmi Schneider Electric DMS NS na finansijskoj podršci u prikazivanju rada.