

**UTICAJ NESIMETRIJE TROFAZNOG SISTEMA NA MAGNETSKO POLJE “U”  
SABIRNICA****THE INFLUENCE OF UNBALANCED THREE PHASE SYSTEM ON THE MAGNETIC  
FIELD OF “U” SHAPED BUSBARS**Milica Samardžić, Karolina Kasaš-Lažetić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ENERGETIKA, ELEKTRONIKA I  
TELEKOMUNIKACIJE**

**Kratak sadržaj** – U ovom radu je ispitan uticaj nesimetrije faznih struja i različitih faznih stavova struja na raspodjelu magnetskog polja u okolini trofazne “U” sabirnice sa neutralnim provodnikom. Ispitan je i uticaj oklopljavanja sabirnica na raspodjelu magnetskog polja. Proračun je izvršen u programskom paketu “COMSOL Multiphysics”, koji radi na bazi metode konačnih elemenata. Rezultati proračuna su prikazani grafički, kao raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije po poprečnom presjeku sistema i preko najčešće korišćenih grafika i detaljno su protumačeni.

**Ključne reči:** Trofazne „U” sabirnice sa neutralnim provodnikom, Oklopljene sabirnice, Magnetsko polje, Metod konačnih elemenata (MKE)

**Abstract** – This paper researches the influence of current unbalance and different phase shifts of currents on the distribution of the magnetic field around three-phase „U” shaped busbars with neutral conductor. The effect of busbar shielding on the magnetic field distribution is also investigated. The calculation was performed in COMSOL MULTIPHYSICS software program package based on the Finite Element Method. The results of calculation are presented graphically, as the magnetic flux density distribution over the system’s cross-section and as the most common diagrams.

**Keywords:** Unbalanced three phase system, unshielded and shielded “U” shaped busbars with neutral conductor, magnetic field, finite element method (FEM)

**1. UVOD**

Svaki dio energetskog sistema ima svoju ulogu i mora da funkcioniše besprekorno. Jedan od takvih dijelova su sabirnice, koje povezuju vodove koji dovode i odvođe električnu energiju. Za postrojenja nominalnih napona  $U_n \leq 35$  kV, sabirnice se izvode od krutih provodnika, od bakra ili aluminijuma, pravougaonog poprečnog presjeka ili su profilisani u takozvane sabirnice „U” profila [1].

U okolini opterećenih sabirnica postoji elektromagnetsko (EM) polje, čiji nivo može da se menja usled raznih faktora. Jedan od zahteva za zaštitu životne sredine i elektromagnetsku kompatibilnost jeste praćenje i reagovanje na eventualne promene EM polja.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bila dr Karolina Kasaš-Lažetić, docent.

Zbog svega napomenutog, u ovom radu je izvršena analiza uticaja promene faznog stava struja trofaznog sistema, kao i strujne nesimetrije na raspodjelu magnetskog polja u okolini neoklopljenih i oklopljenih „U” sabirnica.

Numeričkim postupkom, primenom programskog paketa COMSOL Multiphysics [2] izvršena je analiza uprošćenog, dvodimenzionalnog (2D) modela sistema. Na osnovu izvršenih analiza i dobijenih rezultata je zaključeno, da do promjene raspodjele magnetskog polja, može da dođe usled promjene redosleda faznih struja u sabirnicama i usled strujne nesimetrije, a da se oklopljavanjem može postići značajno smanjenje magnetskog polja van oklopa.

**2. SIMETRIJA TROFAZNIH SISTEMA****2.1. Pojam simetrije**

Naponi i struje u trofaznim sistemima su prostoperiodični. Ovi sistemi su simetrični (uravnoteženi) ako su im amplitude napona i jačina struja međusobno jednake i ako su njihove trenutne vrednosti pomerene u vremenu za trećinu periode, tj. ako su međusobno fazno pomereni za ugao od  $2\pi/3$ .

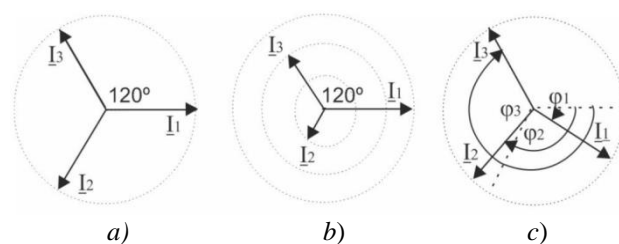
U linearnim sistemima, sa prostoperiodičnim strujama i naponima, analiza i rješavanje problema može da se izvrši u kompleksnom domenu. Kompleksni predstavnici jačina struja u trofaznom simetričnom sistemu su oblika

$$\underline{I}_1 = Ie^{j0^\circ}, \quad \underline{I}_2 = Ie^{-j2\pi/3^\circ}, \quad \underline{I}_3 = Ie^{-j4\pi/3^\circ}. \quad (1)$$

Zbir tih struja u simetričnom trofaznom sistemu je uvijek jednak nuli [3].

**2.2 Pojam nesimetrije**

Nesimetrični režim rada nastaje kao posljedica različitog opterećenja faza, nesimetričnih kratkih spojeva, prekida neke od faza i dr., (slika 1).



**Slika 1.** a) simetrične struje, b) nesimetrija po amplitudi, c) nesimetrija po faznom stavu

**2.3 Uzroci i posljedice nesimetrije**

Glavni uzrok neravnoteže struje i napona jeste nejednaka raspodjela jednofaznih opterećenja između trofaznih

vodova [1]. Strujna nesimetrija ima negativne uticaje na sve systemske dijelove: proizvodnju, prenos, distribuciju i opterećenja. Sa strane generatora, strujna asimetrija negativno utiče na efikasnost. Na strani prenosa i distribucije, strujna nesimetrija umanjuje prenosni kapacitet i efikasnost. Na strani opterećenja smanjuje efikasnost opreme. Kapacitet i efikasnost transformatora su takođe umanjeni. Sve gore navedene činjenice govore u prilog tome, da nesimetrija negativno utiče na rad cjelokupnog elektroenergetskog sistema i da je ispitivanje uticaja nesimetrije uvek potrebno i korisno.

### 3. TEORIJSKA OSNOVA

Sabirnice stvaraju oko sebe EM polje niske frekvencije, predstavljajući time vremenski sporopromjenljiva polja, čija vrijednost naglo opada sa povećanjem udaljenosti od izvora. Analiza magnetske i električne komponente datog EM polja može da se vrši odvojeno, nezavisnim posmatranjem vremenski sporopromjenljivog magnetskog polja i vremenski sporopromjenljivog električnog polja.

#### 3.1 Osnove proračuna

Magnetsko polje se opisuje vektorom magnetske indukcije,  $\mathbf{B}$ , a električno polje, vektorom jačine električnog polja,  $\mathbf{E}$ . Oba ova vektora, mogu da se predstavje preko električnog skalar potencijala  $V$  i magnetskog vektor potencijala,  $\mathbf{A}$ ,

$$\begin{aligned}\vec{E} &= -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \\ \vec{B} &= \nabla \vec{A}\end{aligned}\quad (2)$$

Analiza cijelokupnog sistema sabirnica može da se izvrši u kompleksnom domenu, pošto se cijeli sistem može smatrati linearnim, a struje u sabirnicama prostoperiodičnim. Radi pojednostavljenja proračuna, sabirnice se postavljaju u Dekartov pravougli koordinatni sistem, tako, da je  $z$  osa sistema normalna na poprečni presjek sabirnica (Slika 1).

Vektor gustine struje i magnetski vektor potencijal u tako izabranom koordinatnom sistemu, imaju samo  $z$  komponentu, dok im se intenziteti mijenjaju samo po koordinatama  $x$  i  $y$ . Da bi se odredila raspodjela magnetskog vektor potencijala, radi određivanja raspodjele magnetskog polja, treba da se reši parcijalna diferencijalna jednačina [3], [4]

$$\nabla^2 \vec{A} - j\omega\mu\sigma \vec{A} = -\mu \vec{J}.\quad (3)$$

U Dekartovom koordinatnom sistemu, data jednačina prelazi u skalarni oblik,

$$\frac{\partial^2 \underline{A}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{A}_z}{\partial y^2} - j\omega\mu\sigma \underline{A}_z = -\mu \underline{J}_z.\quad (4)$$

Usvajajući, da magnetski vektor potencijal iščezava van zamišljenog, dovoljno velikog prostora u 2D modelu sistema, dolazi se do partikularnog rešenja diferencijalne jednačine (4). Indukovano električno polje, preko indukovanih struja utiče na pojavu površinskog efekta i efekta blizine, a time i na raspodjelu magnetskog polja unutar sistema.

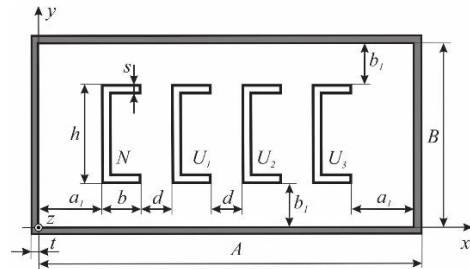
### 3. MODEL

Da bi se izvršila analiza uticaja promene faznog stava struja, strujne nesimetrije i/ili oklopljavanja trofaznih

sabirnica na raspodjelu intenziteta vektora magnetske indukcije, posmatran je simetričan trofazni sistem „U” sabirnica sa neutralnim vodom (bez i sa oklopom), čije su standardizovane dimenzije prikazane u tabeli 1, prema oznakama datih na slici 1 [5]. Neutralan vod i sabirnice pojedinih faza obeleženi su kao  $N$ ,  $U_1$ ,  $U_2$  i  $U_3$ .

Tabela 1. Dimenzije standardizovanih „U6” sabirnica

Tip sabirnice	$h$ [mm]	$b$ [mm]	$s$ [mm]	$d$ [mm]	$S$ [mm <sup>2</sup> ]
U6	60	30,0	4	25	448



Slika 1. Raspored i dimenzije oklopljenih „U6” sabirnica sa neutralnim vodom

Neutralna sabirnica je na rastojanju  $a_1 = 35$  mm od  $y$  ose, dok su sve sabirnice na istom rastojanju  $b_1 = 45$  mm, od  $x$  ose. Debljina oklopa iznosi  $t = 3$  mm.

Za analizu raspodjele intenziteta vektora magnetske indukcije, uticaja nesimetrije, kao i oklopljavanja sabirnica, korišćenjen je programski paketa COMSOL Multiphysics i pripadajući AC/DC modul. Nakon izbora podmodula i tipa simulacije, prvo je definisana geometrija sistema, a zatim su zadati potrebni ulazni parametri (jačina struje, električne i magnetske karakteristike sabirnica, oklopa i okolnog prostora). U sledećem koraku su usvojeni granični uslovi, a nakon formiranja mreže konačnih elemenata izvršen je proračun. Rezultat proračuna predstavljaju vrednosti magnetskog vektor potencijala u svim tačkama sistema, pomoću kojih se određuju ostale veličine od interesa; u ovom primeru, to je raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije.

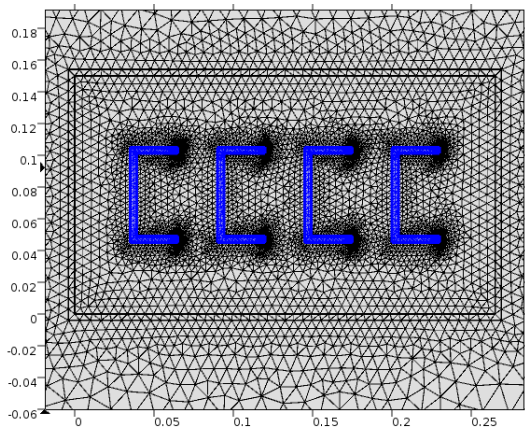
U radu su posmatrane bakarne sabirnice, specifične provodnosti  $\sigma_{Cu} = 5,998e^7$  S/m, koje se nalaze u vazduhu. Električne i magnetske karakteristike vazduha su iznosile ( $\epsilon_{r0} = 1$ ,  $\mu_{r0} = 1$ ,  $\sigma_0 = 0$ ). Ceo sistem je bio ograničen kružnom ljuskom poluprečnika  $R_{gr} = 2$  m, debljine  $d = 50$  mm, koja je simulirala domen „beskonačnih elemenata” u konačnim granicama. Oklop oko sabirnica je bio od aluminijuma, specifične provodnosti  $\sigma_{Al} = 3,771e^7$  S/m.

U posmatranom modelu, prvo je izvršena analiza simetričnog trofaznog sistema, kada kompleksna vrijednost jačine struje u neutralnom provodniku sistema iznosi  $\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$ . Zatim su posmatrana tri odvojena slučaja nesimetrije sistema, dobijena množenjem struja definisanih u (1), koeficijentima, preuzetih iz [6],

$$\begin{aligned}1ns &= 1, & 2ns &= 0,733, & 3ns &= 0,733 \\ 1ns &= 1, & 2ns &= 1, & 3ns &= 1 \\ 1ns &= 1, & 2ns &= 1, & 3ns &= 0,733.\end{aligned}\quad (5)$$

Mreža konačnih elemenata je adaptivna; gušća u oblastima sistema u kojima se očekuju izrazitije promene

veliĉine od interesa (u provodniku, u oklopu i duŹ pravaca proraĉuna), a rjeĉa unutar ostatka sistema. Izgled formirane mreŹe konaĉnih elemenata je prikazana na slici 3.



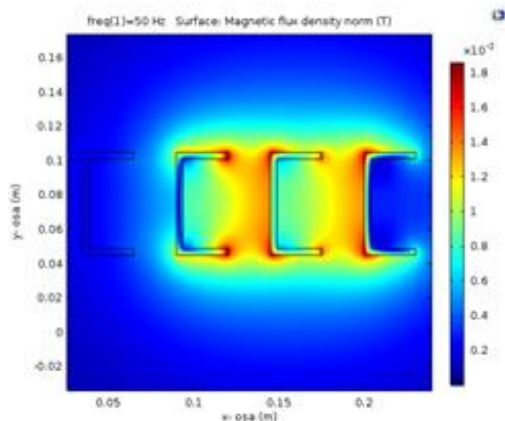
Slika 3. Dio modela sa formiranom mreŹom

### 3. REZULTATI

U radu je izvrŹena analiza raspodjele magnetskog polja u okolini simetriĉnog i nesimetriĉnog sistema, neoklopljenih i oklopljenih, „U6” sabirnica. Sabirnice su od neobojenog bakra, nominalne jaĉine struje 1000 A.

Prvo je izvrŹen proraĉun neoklopljenog simetriĉnog trofaznog sistema „U6” sabirnica, sa ciljem da se ispita uticaj promjene faza na raspodjelu intenziteta vektora magnetske indukcije. Analize su pokazale, da po tri fazna rasporeda daju istu raspodjelu intenziteta vektora magnetske indukcije: 123=231=312 i 132=213=321.

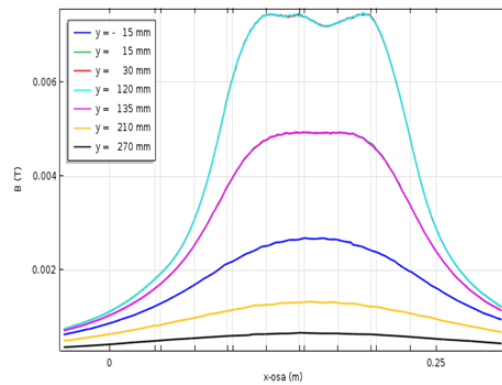
Na slici 4 prikazana je prostorna raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije kroz popreĉni presjek neoklopljenih simetriĉnih sabirnica, za fazne stavove trofaznih struja u provodnicima sistema, 123=231=312.



Slika 4. Prostorna raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije za raspored faza 123, 231, 312

Sa slike 4 moŹe da se uoĉi, da je magnetsko polje najjaĉeg intenziteta izmeĉu faznih sabirnica, usled dejstva povrŹinskog efekta i efekta blizine.

Na slici 5 prikazana je raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini neoklopljenih trofaznih sabirnica sa neutralnim provodnikom za simetriĉan redosljed faza (123=231=312), duŹ pravaca koji prolaze kroz vazduh, ispod i iznad sabirnica, paralelno sa x osom. Sa slike 5 se vidi, da je raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije u vazduhu najveĉa ispod i iznad sabirnica, a smanjuje se udaljavanjem od njih. Najveĉi intenzitet je duŹ pravaca  $y = 30$  mm i  $y = 120$  mm.

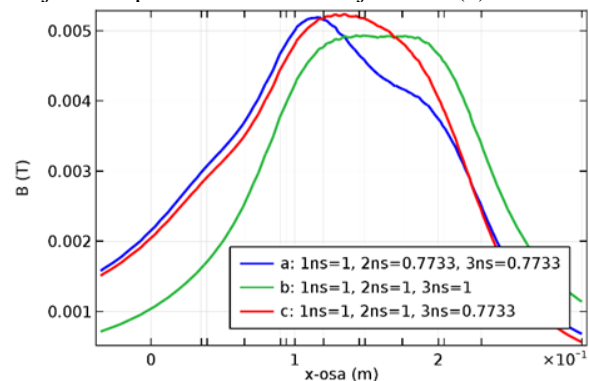


Slika 5. Raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije simetriĉnih neoklopljenih za raspored faza 132=213=321

koji su najbliŹi horizontalnim ivicama sabirnica (dati grafici se poklapaju). Isto takvo poklapanje se javlja i za vrijednosti intenziteta vektora magnetske indukcije na visinama 15 mm i 135 mm. MoŹe da se primijeti, da je pri vertikalnom poloŹaju sabirnica, raspodjela polja relativno ravnomjerna u oblasti ispod i iznad sabirnica.

Posle analize simetriĉnih neoklopljenih sabirnica, uraĉena je analiza nesimetriĉnih sabirnica, pri faznim rasporedima 123=231=312. Rezultati su prikazani na slici 6.

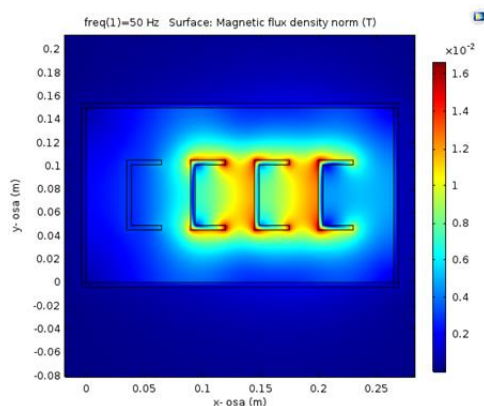
Na tim slikama je prikazana raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije duŹ pravca na visini  $y = 135$  mm (30 mm iznad gornje horizontalne stranice sabirnica), za vrijednosti parametara nesimetrije date u (5).



Slika 6. Raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije nesimetriĉnih neoklopljenih sabirnica za raspored faza 123, 231, 312

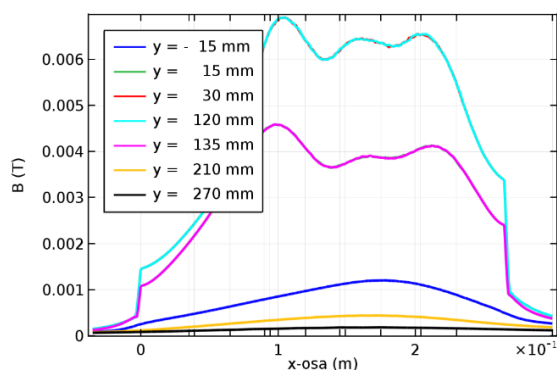
Na slici 6 se vidi uticaj nesimetrije na vrijednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, pri razliĉitim kombinacijama parametara, pri ĉemu parametri pod  $b$  predstavljaju simetriĉan trofazni sistem. Nesimetrija blago poveĉava intenzitet vektora magnetske indukcije i unosi promjenu u raspodjelu magnetskog polja u okolini sabirnica.

Posle analize raspodjele intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini neoklopljenih trofaznih „U” sabirnica sa neutralnim vodom, izvrŹena je analiza trofaznih „U” sabirnica sa neutralnim vodom i oklopom oko njih, da bi se utvrdilo kako utiĉe oklop na raspodjelu magnetskog polja. Analizom rezultata je utvrĉeno, da raspored faza utiĉe na raspodjelu magnetskog polja i u sluĉaju oklopljenih sabirnica i da je magnetsko polje smanjenog intenziteta izvan oklopa. Sa slike 7 se vidi, da se najveĉi intenziteti vektora magnetske indukcije javljaju u okolini vrhova sabirnica, izmeĉu faznih sabirnica, kao i ispod i iznad njih.



Slika 7. Prostorna raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije simetričnih oklopljenih sabirnica za raspored faza 123, 231, 312

Na slici 8 prikazana je raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije u slučaju simetričnih trofaznih sabirnica, u prisustvu oklopa.

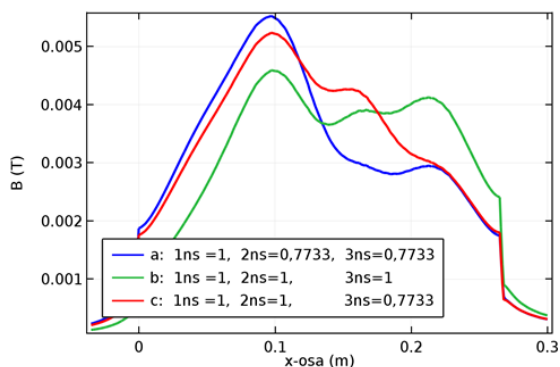


Slika 8. Raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije simetričnih oklopljenih sabirnica za raspored faza 123, 231, 312

Sa slike 8 se jasno vidi, da je prisustvo oklopa naglo smanjilo intenzitet vektora magnetske indukcije uz bočne ivice oklopa.

Ovim je pokazano, da prisustvo oklopa smanjuje intenzitet vektora magnetske indukcije u oblasti van oklopa i da, po potrebi, oklopljavanje može da se primjeni u cilju zaštite okoline od neželjenog dejstva magnetskog polja sabirnica.

Slika 9 prikazuje raspodjelu intenziteta vektora magnetske indukcije za nesimetrične, oklopljene sabirnice, duž prave  $y = 135$  mm, pri istim koeficijentima nesimetrije kao za neoklopljen slučaj.



Slika 9. Raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije nesimetričnih, oklopljenih sabirnica za raspored faza 123, 231, 312

Analizirajući rezultate prikazane na slici 9, može da se vidi, da je usled nesimetrije, raspodjela intenziteta vektora magnetske indukcije neravnomernija između sabirnica i da je raspodjela veće oko neutralnog provodnika, što nije bio slučaj sa simetričnim sistemom.

Nesimetričnost faznih struja dovodi do veće neujednačenosti magnetskog polja. Oklop, i u ovom slučaju, naglo smanjuje intenzitet vektora magnetske indukcije izvan oklopa.

#### 4. ZAKLJUČAK

Neravnoteža je ozbiljan problem kvaliteta električne energije, koji uglavnom pogađa distributivne sisteme niskog napona. U ovom radu je objašnjena neravnoteža struje, njihovi uzroci i negativni efekti do kojih dolazi usljed nesimetrije.

U radu je ispitan uticaj promene faznog stava struja u trofaznim, vertikalno postavljenim „U” sabirnicama, uticaj strujne nesimetrije na raspodjelu intenziteta vektora magnetske indukcije, kao i efekti do kojih dovodi oklopljavanje sabirnica.

Pokazano je da promena faznog stava struja menja raspodjelu magnetskog polja u okolini sabirnica, da se pomoću oklopa može izvršiti zaštita prostora oko sabirnica od neželjenog uticaja magnetskog polja sabirnica i da strujna nesimetrija takođe dovodi do promene raspodele intenzitet vektora magnetske indukcije.

Formiran model sabirnica, kao i proračuni izvršeni u ovom radu, mogu da posluže za analizu sabirničkih sistema drugih oblika, osobina i pod različitim radnim uslovima.

#### 5. LITERATURA

- [1] J. Nahman, V. Mijailović, „Razvodna postrojenja”, Akademska misao, Elektrotehnički Fakultet, Beograd, 2005.
- [2] COMSOL Multiphysics, documentation, 2016.
- [3] B. D. Popović, „Elektromagnetika”, Građevinska knjiga, Beograd, 2000.
- [4] M. Stojaković, „Matematička analiza 2“- drugi deo, 2. Izdanje, FTN Novi Sad, Novi Sad, 2007.
- [5] LJ. Gerić, „Razvodna postrojenja-zbirka zadataka, drugo izdanje”, Novi Sad, FTN, 2006.
- [6] K. Kasaš-Lažetić, G. Mijatović, D. Herceg, M. Prša, “Electromagnetic field distribution in vicinity of unbalanced mixed overhead power lines”, ПЕС 2019, Niš, Srbija, 2019.

#### Kratka biografija:



**Milica Samardžić** rođena je 1993. godine u Trebinju. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnika i računarstvo – Energetska elektronika i električne mašine je odbranila 2019.god.

kontakt: [milicasamardzic97@yahoo.com](mailto:milicasamardzic97@yahoo.com)



**Karolina Kasaš-Lažetić**, rođena je u Novom Sadu 1964. Doktorirala je na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva. Oblast interesovanja je primenjena elektromagnetika.