

# Elektromagnetski proračun sabirničkog sustava

---

Kovač, Karolina

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:349341>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**ELEKTROMAGNETSKI PRORAČUN  
SABIRNIČKOG SUSTAVA**

**Diplomski rad**

**Karolina Kovač**

**Osijek, 2020.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 31.08.2020.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Karolina Kovač
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-1127, 26.09.2019.
<b>OIB studenta:</b>	38344732775
<b>Mentor:</b>	Izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	Doc. dr. sc. Vedrana Jerković-Štil
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	Izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Toni Varga
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Elektromagnetski proračun sabirničkog sustava
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Za primjere sabirničkih sustava iz literature/prakse potrebno je obaviti simulacije elektromagnetskog polja sabirničkog sustava korišćenjem računalnih alata za numeričke simulacije polja. Na temelju provedenih simulacija obaviti analizu značajki elektromagnetskog polja (jakosti polja, gustoće toka) te dodatne elektro-mehaničke veličine kao što su: induktivitet, kapacitet, raspodjela struje u sabirnicama i mehaničku silu na sabirnice. (Tema rezervirana za studenticu Karolinu Kovač)
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	31.08.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 03.09.2020.

**Ime i prezime studenta:**

Karolina Kovač

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-1127, 26.09.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

3

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Elektromagnetski proračun sabirničkog sustava**

izrađen pod vodstvom mentora Izv. prof. dr. sc. Marinko Barukčić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>2</b>
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	2
<b>2. SABIRNIČKI SUSTAVI .....</b>	<b>3</b>
<b>3. ELEKTROMAGNETSKI PRORAČUN .....</b>	<b>8</b>
3.1. Maxwellove jednačbe i metoda konačnih elemenata .....	8
3.2. Električni model sabirnica .....	12
3.3. Elektromagnetski proračun sila prema IEC standardu .....	14
3.4. Proračun struje kratkog spoja .....	16
<b>4. MODEL SABIRNIČKOG SUSTAVA U PROGRAMU ANSYS MAXWELL .....</b>	<b>18</b>
4.1. Simulacijski program ANSYS Maxwell .....	18
4.2. Model sabirničkog sustava i proračun .....	20
4.3. 2D model sabirničkog sustava .....	21
4.3.1. Definiranje uvjeta za simulaciju u ANSYS Maxwellu .....	22
4.4. 3D model sabirničkog sustava .....	25
4.4.1. Definiranje uvjeta za simulaciju u ANSYS Maxwellu .....	25
<b>5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA .....</b>	<b>27</b>
5.1. Prikaz rezultata 2D simulacije .....	28
5.2. Prikaz rezultata 3D simulacije .....	34
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>42</b>
<b>POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA .....</b>	<b>43</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>45</b>
<b>POPIS SLIKA I TABLICA .....</b>	<b>47</b>
<b>SAŽETAK.....</b>	<b>49</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>49</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>50</b>
<b>PRILOZI .....</b>	<b>51</b>
Prilog 1. Iznosi Dwightovog koeficijenta kao funkcije omjera $a/b$ i $h/b$ .....	51

# 1. UVOD

Na osnovi poznavanja rada u FEM<sup>1</sup> alatu, zadatak ovog diplomskog rada je izrada modela sabirničkog sustava i provedba potrebne analize elektromagnetskog proračuna. Točnije, na modelu sabirničkog sustava potrebno je izvršiti usporedbu rezultata koje daju tri pojedina jednofazna kratka spoja u tri različita fazna vodiča svake sabirnice. Promatrani parametri su induktiviteti, sile na vodiče i gustoća struje. Jedan od FEM alata, a koji se koristi u ovom diplomskom radu, je program ANSYS Maxwell. Ovaj programski alat koristi se pri promatranju elektromagnetskih i elektromehaničkih polja, a za rješavanje te problematike ANSYS Maxwell koristi metodu konačnih elemenata. Metoda konačnih elemenata rješava problematiku zadatka uz pomoć Maxwellovih jednadžbi, te pritom zadanih početnih uvjeta, numeričkom metodom iz geometrije ostvaruju se konačni elementi. Kako bi se što bolje razumjela tematika, unutar rada će biti opisane Maxwellove jednadžbe. U drugom poglavlju, prvotno je objašnjeno što su to sabirnički sustavi, načini izvedbe te ukratko što je elektromagnetski proračun. Detaljnije o elektromagnetskom proračunu i što sve on sadržava, opisano je u trećem poglavlju. Četvrto poglavlje sadrži pregled dizajna sabirnice u ANSYS Maxwellu sa postupkom izrade 2D, a zatim 3D modela sabirnica. Konačno, detaljna usporedba rezultata 2D i 3D simulacije dana je u petom poglavlju. Nadalje, analiza elektromagnetskog proračuna vrlo je važna u svakom dijelu postrojenja u industriji jer se uz pomoć njega povećava produktivnost uređaja. Prilikom povećanja produktivnosti važno je ne izgubiti na preciznosti i kvaliteti realnih veličina u prostoru.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

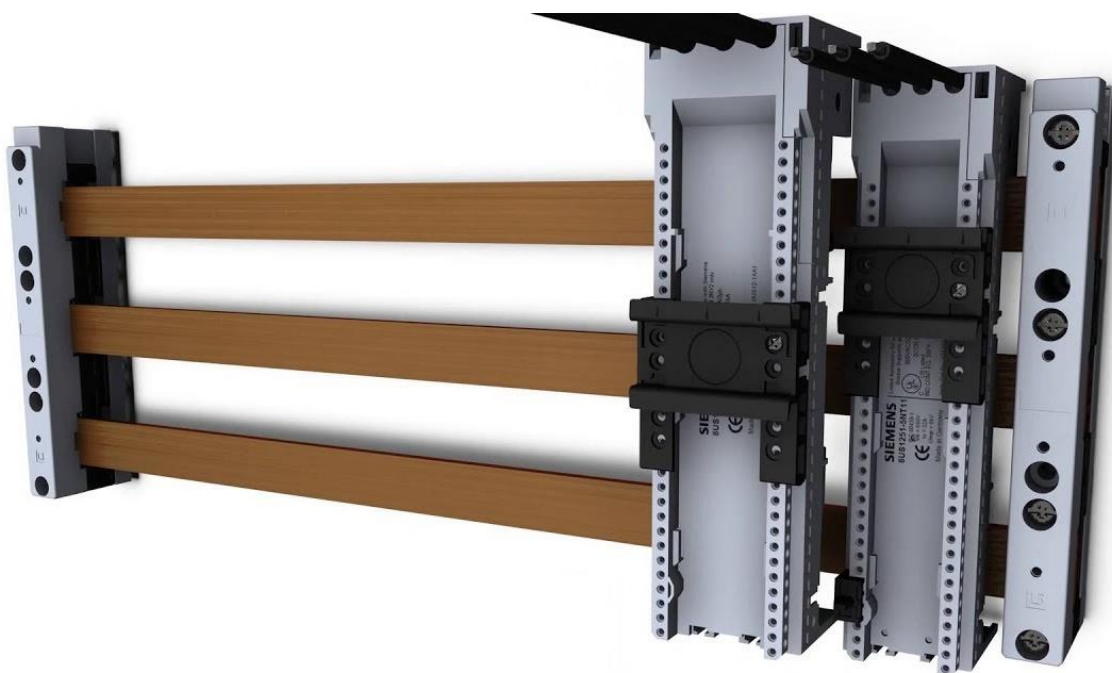
U nastavku rada je potrebno prikazati izvedbu i namjenu sabirničkog sustava na temelju literature, opisati i prikazati postupak izrade simulacijskog modela te način na koji je izvršena simulacija tog sabirničkog sustava u ANSYS Maxwell programskom alatu. Osim toga, potrebno je dati prikaz upotrebe i izvedbe sabirničkih sustava proučavanjem literature. Za izrađene modele treba obaviti 2D i 3D simulacije. Točnije, za izrađene 2D i 3D modele potrebno je obaviti simulacije i elektromagnetske proračune promjene induktiviteta, djelovanja sila i raspodjele gustoće struje, prikazati rezultate te ih naposljetku usporediti.

---

<sup>1</sup> FEM (eng. *Finite Element Method*) je skraćenica za najčešće korištenu metodu rješavanja inženjerskih i matematičkih problema, a to je metoda konačnih elemenata.

## 2. SABIRNIČKI SUSTAVI

„Sabirnice su električna čvorišta i okosnica svakog sklopnog postrojenja. Njihova glavna uloga je povezivanje vodova koji dovode energiju s vodovima koji tu energiju dalje odvede. Sabirnice su najvažnije za normalan pogon sklopnih postrojenja jer su svi vodovi povezani s njima. Sabirnice se najčešće izvode od aluminijskih vodiča ili od neizoliranih bakrenih vodiča te iz legura ta dva materijala. Izvedba sabirnica ovisi o tome jesu li sklopna postrojenja unutarnje ili vanjske izvedbe“, [1]. U literaturi [1] najviše ima govora o odabiru presjeka sabirničkog sustava prema maksimalnoj struji u normalnom pogonu, prema zagrijavanju za vrijeme kratkog spoja i prema mehaničkom naprezanju.

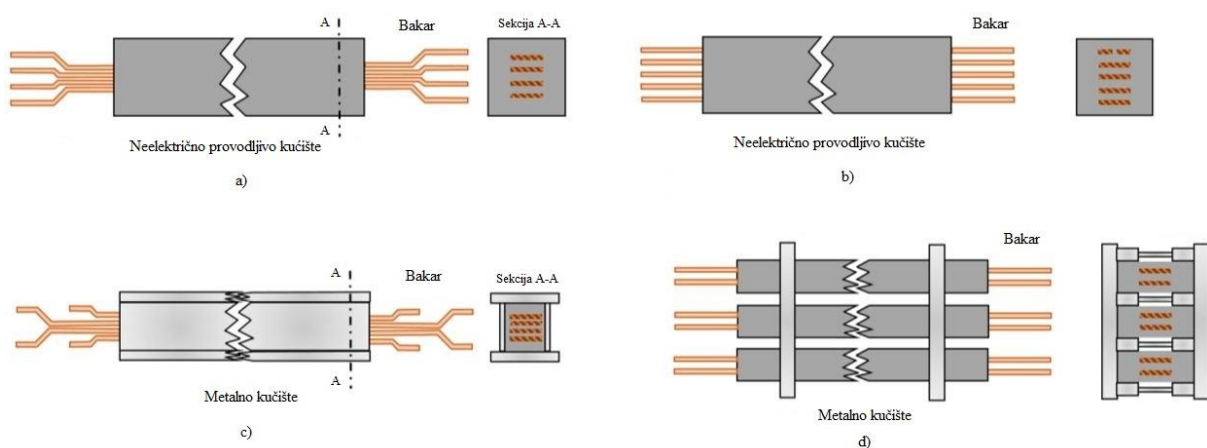


**Slika 2.1.** Primjer sabirnica „Siemens 8US“, [2]

Sabirnice se tradicionalno koriste u sklopovima rasklopnih i upravljačkih uređaja te za distribuciju energije u zgradama. Kako se potrošnja energije u visokim zgradama povećava, sabirnice se često koriste u glavnim ili dovodnim krugovima za distribuciju u različite centre. Ovi sabirnički sustavi su iz sigurnosnih i konstrukcijskih razloga smješteni u metalnim kućištima (kanalima). Impedancija kanala sabirnica važan je parametar u dizajnu distribucijskog sustava niskonaponskih mreža (za predviđanje pada napona, ravnoteže napona, gubitka snage u sustavu i slično). Tradicionalno se impedancija sabirničkog sustava sastoji od prosječnog faznog otpora i efektivne vrijednosti reaktancije koja je dobivena mjerenjima [3]. Reaktancija oznake  $X$  je otpor prema protjecanju izmjenične struje, a može biti induktivni i/ili kapacitivni otpor, ovisno da li se u krugu nalazi induktivni element (zavojnica) i/ili kapacitivni

element (kondenzator). Mjerna jedinica je Ohm [ $\Omega$ ]. Ovaj model daje opće karakteristike sabirnica, ali nije detaljan u procjenama jer ne sadrži toplinske karakteristike i podjelu struje u sustavima sa više vodiča. Metalni kanal je isplativa mjera zaštite magnetskih polja od sabirnica. Utvrđeno je da parametri kanala, poput materijala, debljine i veličine, imaju značajan utjecaj na njegove karakteristike zaštite. U ovom se modelu otpornički dio izvodi iz aproksimacije skin efekta (eng. *skin effect*) i efekta blizine (eng. *proximity effect*), a zanemaruje se efekt vrtložne struje [4]. Usporedbom sabirničkog modela iz [4] dobivena je pogreška od 2 % između analitičkog i numeričkog proračuna. U svrhu ovog rada, preuzet je teorijski dio o matrici impedancije, kao i o numeričkom proračunu otpora i induktiviteta.

Induktivni dio sabirnica se izvodi iz izračunavanja vlastite i međusobne induktivnosti koristeći geometrijske srednje udaljenosti. Ovi su pristupi prikladni za jednostavnu konfiguraciju. Pristup računalne simulacije koristi numeričku metodu za rješavanje jednadžbi difuzije za magnetsko polje i vrtložne struje. Iz ovih veličina se izvodi matrica impedancije. Međutim, komplikacija u analizi rezultat je prisutnosti feromagnetskog materijala u sustavu sabirnica.



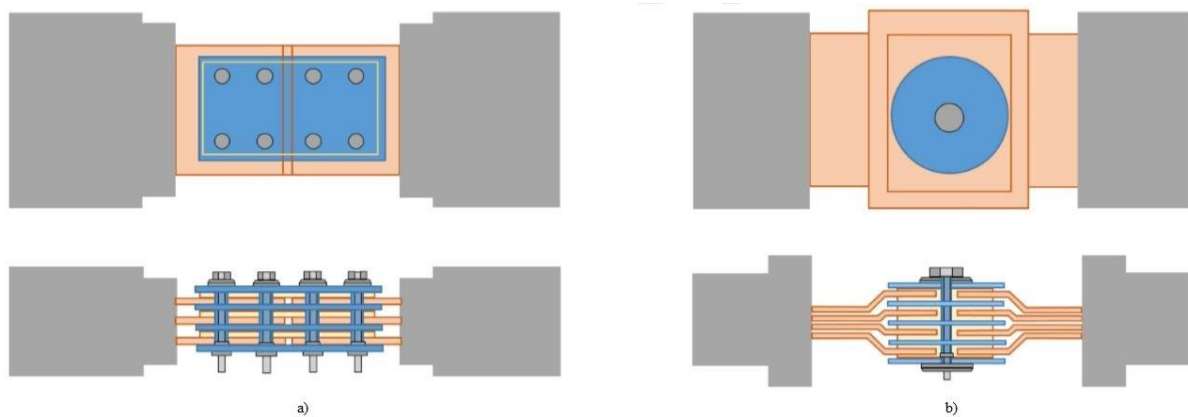
**Slika 2.2.** Primjeri prolaska sabirnica unutar metalnog kućišta, [5]

a) Neodvojene faze, b) Neodvojene faze sa 2 zaštitna vodiča,

c) Neodvojene faze sa metalnim kućištem, d) Izolirana fazna sabirnica sa 2 vodiča po fazi

Različite metode se mogu koristiti za spajanje ravnih dijelova u sabirnici. Na primjer, na slici 2.3.a korišteni su tanjuri i vijci kao što je to godinama već tradicionalno korišteno. Danas se obično rade monoblokarske veze (slika 2.3.b). Primjena ispravnog zakretnog momenta na vijke na ovim priključcima omogućava osiguravanje električnog kontinuiteta uz minimalni pad napona.





**Slika 2.3.** Primjeri povezivanja sabirničkih sustava, [5]

a) Tradicionalni (sa pločicama i vijcima), b) Monoblok (sa pločicama i vijcima)

U tipičnim sustavima sabirnica strujni vodiči obično se postavljaju paralelno jedan s drugim. Elektromagnetska sila koju proizvode paralelni vodiči proporcionalna je produktima njihovih struja. U normalnim pogonskim uvjetima, elektromagnetske sile su vrlo male i ne daju značajan utjecaj na mehaničku strukturu sabirnica. Međutim, u uvjetima kratkog spoja, elektromagnetska sila je relativno velika i može oštetiti mehaničku strukturu sabirnice ako nije pravilno projektirana. Stoga pri projektiranju sustava sabirnice treba uzeti u obzir uvjete kratkog spoja i sigurnosni faktor. Učinci struje kratkog spoja već su tradicionalni predmet mnogih istraživanja. Prilikom dizajniranja sabirnice, proizvođači sklopnih uređaja u transformatorskim stanicama uvijek u obzir uzimaju veličinu struje kratkog spoja. Dakle, na sam dizajn rasporeda sabirnica i povezanih potpornih konstrukcija izravno utječe veličina struje kratkog spoja. Neki od proizvođača i dalje se drže iskustva i praktičnog znanja, a ne uvažavaju rezultate detaljnih izračuna i rezultata simulacija prilikom dizajniranja sabirnica. Kao što je rečeno, dizajn sabirnica zahtijeva detaljnije proračune toplinskih i mehaničkih ponašanja vodiča u stvarnim pogonskim uvjetima. Do sada se konvencionalne metode uglavnom oslanjaju na empirijske jednadžbe ili numeričke tehnike poput metode konačnih elemenata (FEM) koje nisu dovoljno precizne jer zanemaruju interakcije između električnog, magnetskog, termičkog i mehaničkog ponašanja. Opsežna istraživanja o multifizičkom modeliranju sabirnica u uvjetima kratkog spoja mogu se naći u [6] i [7] koja je bazna literatura ovog rada. S obzirom na to da ANSYS Maxwell ne omogućava korištenje postavki za termičku i mehaničku analizu isti nisu uzeti u obzir.

Poznata je činjenica da nakon pojave kvara, uzrokovanog kratkim spojem, izuzetno velika elektromagnetska (naziva se i elektrodinamička) sila djeluje na vodiče sabirnice. To je uzrokovano velikom vrijednosti struje kratkog spoja koja teče kroz susjedne vodiče u strukturi sabirnice. Struja kratkog spoja je višestruko veća od nazivne struje. Prolazeći kroz vodiče

sabirnice, ona stvara dovoljno veliku magnetsku silu da oslabe ili čak dođe do puknuća nosača samih sabirnica. Dakle, sabirnički sustavi nisu dizajnirani samo da daju nazivne struje opterećenja, već i da se opiru velikim elektromagnetskim silama proizvedenima strujom kratkog spoja. Pored proizvodnje elektromagnetske sile, struja kratkog spoja uzrokuje Joulove gubitke koji se realiziraju kao toplina i brzo povećavaju temperaturu vodiča. Zbog toga je potrebno precizno izračunati sile generirane kratkim spojem kako bi se ispravno dimenzionirali i vodiči sabirnica i pripadajuće potporne konstrukcije. Elektromagnetske sile uglavnom se određuju prema vrsti kratkog spoja i amplitudi struje kratkog spoja. Veličina, geometrija i razmak vodova sabirnica su dodatni važni čimbenici. Kao uobičajena praksa, sabirnice se proučavaju pod trofaznim strujama kratkog spoja, koje im nameću najteže elektrodinamičke napetosti. Štoviše, prekomjerne struje kratkog spoja mogu rezultirati brzim porastom temperature sabirnice, što zauzvrat može utjecati na električna i mehanička svojstva vodiča sabirnica [8]. U dizajnu sustava sabirnica, obliku konstrukcije, svojstvu materijala i rasporedu vodiča sabirnica treba pažljivo uzeti u obzir da mehanički pomak i porast temperature uzrokovani strujom kratkog spoja ne oštećuju vodiče sabirnica ili pripadajući pribor poput potporne konstrukcije i spojeva. Štoviše, porast temperature može dovesti do mehaničkog pomaka sabirnica, a to dovodi do povećanog mehaničkog naprezanja i ometanja pravilnog rada prekidača. Također je nekoliko radova koji raspravljaju o toplinskim i mehaničkim konfiguracijama sabirnica u trafostanicama izoliranim plinom pod strujom kratkog spoja [9].

Loš dizajn sabirnice unutar rasklopnih uređaja niskog ili srednjeg napona može imati katastrofalne rezultate koji mogu dovesti do požara ili čak eksplozije u rasklopnim uređajima. U scenariju prosječnog slučaja, skuplji prekidači bit će oštećeni, a nekoliko izlaznih odvodnika će se isključiti. Najgore stvari tek dolaze jer će možda trebati tjedni da se poprave oštećene sabirnice, što uzrokuje razdoblje prekida opskrbe i obustave postrojenja, a to donosi dodatne financijske gubitke. Stoga, kako bi se izbjegli kvarovi sabirnica, potrebno je uzeti u obzir projektiranje. Provodnici sabirnica trebaju biti dovoljno kruti da se mogu oduprijeti velikim elektromagnetskim silama koje proizvode struje smetnji. Površina poprečnog presjeka vodiča sabirnice i udaljenost između nosača odabiru se na temelju niza čimbenika kao što su nazivna struja, razina struje kratkog spoja i toplinski naponi. Postoji nekoliko standarda koji se bave dizajnom sustava sabirnice. Međutim, svi dijele iste kriterije dizajna [10]. U [10] dani su najčešće korišteni IEC standardi koji se koriste. Ti uobičajeni korišteni parametri za dizajn sustava sabirnica su [1]:

- nazivni napon i struja sabirnice,
- struja kratkog spoja i njegova početna vršna vrijednost,

- trajanje greške,
- razmak provodnika,
- toplinska tolerancija materijala sabirnica (obično između 55 i 65 °C).

Iako je multifizičko modeliranje pojava u stvarnom svijetu, računski zahtijeva mnogo vremena, a sve veće mogućnosti računala omogućuju kvalitetno simuliranje različite povezane fizikalne zakonitosti. Cilj ovog rada je točno prikazati promjene elektromagnetskog polja, gustoće struje i mehaničke sile u tipičnom sustavu sabirnica nakon pojave struje kratkog spoja u vodičima sabirnica. Da bi se to postiglo na ekstremno kvalitetan način, potrebno je problem opisati vezanim električno – magnetsko – termičko – mehaničkim nizom jednadžbi i numerički riješenim FEM pristupom. Jednadžbe su povezane jer većina izvora topline djeluje na električno polje, a električna i mehanička svojstva materijala ovise o temperaturi. No, kako je već spomenuto, za izvođenje simulacije koristiti će se samo vezani električno – magnetski niz jednadžbi. Predstavljene jednadžbe u sljedećem poglavlju temelje se na Maxwellovim jednadžbama, Lorentzovoj sili i Jouleovim gubicima.

Lorentzova sila je sila koja djeluje na električni naboj koji se giba određenom brzinom unutar magnetskog polja i na njega djeluje električno polje. Iznos sile dobiva se zbrojem električne i magnetske sile na električni naboj, a najčešće se podrazumijeva da je Lorentzova sila zapravo samo magnetska sila  $F = q (v \times B)$ . Smjer sile dobiva se pravilom desne ruke koje kaže da se otvoreni dlan postavi tako da silnice magnetskog polja ulaze u njega, prsti pokazuju smjer gibanja, a ispruženi palac pokazuje smjer djelovanja Lorentzove sile.

Osim literature za teorijsku razradu modela, dosta puta je korištena literatura [21] koja je zapravo originalna literatura Maxwell Online Help-a iz 2016. godine. U njoj se nalazi mnoštvo korisnih stvari za kvalitetnu simulaciju modela. Puno je literature korišteno za teorijski dio i istraživanje, no, osim osnovne literature, najviše je korištena literatura [14] gdje je numerički razrađen trofazni sabirnički sustav. Daljnji koraci u radu, kao i rezultati simulacije, pokazat će da li su poistovječeni s literaturom, a ujedno i IEC standardom.

### 3. ELEKTROMAGNETSKI PRORAČUN

Važno je naglasiti kako se ovo istraživanje u diplomskom radu odnosi samo na vršnu vrijednost struje kratkog spoja. U detaljnijim istraživanjima povezuje se električno, magnetsko, toplinsko i mehaničko ispitivanje sabirnice sa strujom kratkog spoja. Zbog toga je u nastavku teorijski opisano djelovanje Maxwellovih jednadžbi, elektromagnetske (Lorentzove) sile na vodič u električnom modelu sabirnice, raspodjela energije zbog promjene temperature odnosno promjene gustoće struje što rezultira Jouleovim gubicima te je sve u teoriji uspoređeno IEC standardom. Još jednom, mehanički i toplinski model u radu nisu promatrani ni u teoriji zbog toga što se ne mogu analizirati u ANSYS Maxwellu.

#### 3.1. Maxwellove jednadžbe i metoda konačnih elemenata

Maxwellove jednadžbe sastoje se od četiri temeljnih jednadžbi elektromagnetizma. One povezuju električna i magnetska polja sa strujama i električnim nabojima koji stvaraju ta polja. Mogu biti iskazane u diferencijalnom ili integralnom obliku, a redom izriču Amperov zakon, Faradayev zakon elektromagnetske indukcije, Gaussov zakon za električno polje te Gaussov zakon za magnetsko polje. Tim redoslijedom su jednadžbe opisane u nastavku. „U Maxwellovim jednadžbama implicitno se pretpostavlja da vrijedi jednadžba kontinuiteta koja u fizici izražava zakon o neuništivosti materije, tj. da je promjena gustoće u nekoj točki uvijek praćena strujanjem tvari iz te točke ili prema njoj te je ukupna promjena količine tvari u nekom sustavu upravo jednaka količini tvari koja je u sustav ušla ili iz njega izašla. Konkretno u elektrodinamici ona izražava na analogan način zakon o neuništivosti električnog naboja“, [11]. Amperov zakon kaže da se magnetsko polje očituje protjecanjem struje i gustoćom toka električnog polja kroz površinu uz promjenu u vremenu što prikazuju relacije (3-1) i (3-2).

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \iint_s \vec{j} d\vec{S} + \frac{d}{dt} \iint_s \vec{D} d\vec{S} \quad (3-1)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \quad (3-2)$$

Integral jakosti magnetskog polja po zatvorenoj krivulji jednak je zbroju struje i vremenske promjene električnog toka obuhvaćenog tom krivuljom [11]. Ukratko, gibanje električnog naboja uzrokuje magnetsko polje. Vide se dva člana u relaciji (3-2) koji govore da se oko vodiča kojim teče električna struja inducira magnetsko polje, ali da i svako promjenjivo električno polje također inducira magnetsko polje.

Faradayev zakon odnosi se na to da se svaka promjena magnetskog polja očituje kao promjena električnog polja. Relacije (3-3) i (3-4) prikazuju da je integral vektora električnog polja po zatvorenoj krivulji jednak negativnoj promjeni po vremenu magnetskog toka obuhvaćenog tom krivuljom [11]. Negativna promjena i znak negacije javlja se zbog Lenzovog pravila u kojem se mijenja polaritet zbog suprotstavljanja svojem uzroku nastanka.

$$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_s \vec{B} d\vec{S} \quad (3-3)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \quad (3-4)$$

„Elektromagnetska sila (električni napon) rezultat je promjene magnetskog toka unutar zavoja vodljive žice što ga obuhvaća. Upravo zbog tih napona teći će i električna struja ako je strujni krug zatvoren. Vjerojatno je poznato kako je prve pokuse o elektromagnetskom indukciji otkrio Michael Faraday davne 1831. godine i pokazao kako se promjenom magnetskog toka može dobiti inducirani napon“, [12]. Ukratko, gibanje vodiča u promjenjivom magnetskom polju stvara struju u vodiču, odnosno brzina promjene magnetskog toka kroz petlju jednaka je induciranoj elektromagnetskoj sili u petlji. Vremenski promjenjivo magnetsko polje  $\vec{B}$  stvara oko sebe kružno električno polje  $\vec{E}$ .

Gaussov zakon za električno polje temelji se na tome da je naboj izvor električnog polja i nema promjena u vremenu.

$$\oiint_s \vec{D} d\vec{S} = \iiint_v \rho dV \quad (3-5)$$

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (3-6)$$

Relacije (3-5) i (3-6) kažu kako je jakost električnog toka kroz zatvorenu plohu površine  $S$  jednaka ukupnom električnom naboju unutar njezine unutrašnjosti (volumena). Ukratko, ova Maxwellova jednadžba jednostavno govori da je električni naboj upravo taj koji stvara električno polje, silnice električnog naboja su otvorene krivulje, a istoimeni naboji se odbijaju dok se raznoimeni privlače. Dodatno, naboj izoliranog vodiča smješten je na njegovoj površini. Gaussov zakon za magnetsko polje vrlo je jednostavnog tipa jer koliko silnica uđe unutar površine  $S$ , toliko ih i izađe. Dakle, magnetski tok kroz bilo koju plohu jednak je nuli prema (3-7) i (3-8), unutar vakuuma.

$$\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (3-7)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (3-8)$$

Kako bi se dobila ova Maxwellova jednadžba u diferencijalnom obliku, potrebno je znati vezu između magnetskog polja  $\vec{B}$  i struje  $I$  koja prolazi nekim vodičem. Nju su eksperimentalnim putem otkrili Biot i Savart (još davne 1820. godine) te formulirali u matematičkom obliku koji danas nazivamo Biot-Savartovim zakonom. „Prema Helmholtzovu teoremu, svako je vektorsko polje u cijelosti određeno zadavanjem svoje divergencije i rotacije. Ako sada izračunamo divergenciju od magnetske indukcije  $\vec{B}$ , zapravo računamo divergenciju rotacije vektorskog potencijala, a divergencija rotacije uvijek je nula. Time se dobiva ova Maxwellova jednadžba u diferencijalnom obliku koja se može interpretirati tako da ne postoje magnetski monopoli, tj. ne postoji magnetski naboj iz kojeg bi proizlazio magnetski tok različit od nule. U svakoj točki prostora, broj silnica magnetskog polja koja ulazi u tu točku, jednaka je broju silnica koje iz te točke izlaze“, [11].

**Tablica 3.1.** Maxwellove jednadžbe

Zakon	Integralni zapis	Diferencijalni zapis
<i>Amperov zakon</i>	$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \iint_S \vec{j} d\vec{S} + \frac{d}{dt} \iint_S \vec{D} d\vec{S}$	$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D}$
<i>Faradayev zakon</i>	$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} d\vec{S}$	$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \vec{B}$
<i>Gaussov zakon za električno polje</i>	$\oiint_S \vec{D} d\vec{S} = \iiint_V \rho dV$	$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$
<i>Gaussov zakon za magnetsko polje</i>	$\oiint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$	$\operatorname{div} \vec{B} = 0$

Divergencija daje informaciju da li u nekoj točki postoji skalarni iznos (vrijednost koliko je tok polja), što znači da je divergencija jednaka gustoći izvora. Za Kartezijev koordinatni sustav vrijedi da je:

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{d}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{d}_y + \frac{\partial}{\partial z} \vec{d}_z \quad (3-9)$$

Svaka od Maxwellovih jednadžbi daje svoj doprinos pri rješavanju pojedine problematike metodom konačnih elemenata. „Metoda konačnih elemenata je metoda u kojoj je područje promatranog fizičkog sustava u procesu diskretizacije kontinuuma i mora biti podijeljena na konačan broj dijelova određene geometrije, nazvanih konačnim elementima. Sva dobivena rješenja odnose se na određene točke promatrane strukture i rješenja su približna. Konačni elementi su povezani međusobno u točkama na rubovima elemenata - čvorovi. Svaki konačni element opisan je jednadžbom. Povećavanje broja elemenata, odnosno jednadžbi povećava točnost rješenja. Kombinacijom jednadžbi stvara se slika čitave strukture. Rješenja jednadžbi predstavljaju odgovarajuće veličine ovisno o vrsti problema koji se rješava (napon, induktivitet, naprezanje, pomak, temperatura i slično). Potrebno je u računalnom programu znati prepoznati odgovarajući element kako bi se sve točke spojile u smislenu simulaciju. Detaljnije, u fazi prije samog računanja potrebno je obratiti pažnju na sljedeće aspekte:

- granice elemenata trebale bi se podudarati sa strukturnim diskontinuitetima,
- nagle promjene na raspodijeljenom opterećenju moraju se dogoditi na granicama elementa, a točke primjene sila moraju se podudarati s odgovarajućim čvorovima,
- čvorovi bi trebali biti na mjestima interesa za koja su potrebni izlazni podaci,
- odzivne varijable variraju s obzirom na funkciju koja je odabrana za određenu varijablu. Potrebno je znanje inženjera kako bi prepoznao što treba uključiti u simulaciju, a što treba zanemariti,
- moraju se unijeti granični uvjeti i svojstva materijala. Opterećenja i ograničenja često su najteži parametri za određivanje preciznosti i imaju značajan utjecaj na predviđanje,
- moraju se provesti opsežne provjere modela, ima li pukotina, sudara, preklapanja zadanih elemenata.

U fazi rješavanja potrebno je doći do rješenja temeljnih nepoznanica jednadžbi za svaki čvor. Ostali podaci se zatim računaju na osnovu temeljnih rješenja. Faza obrade započinje kada su rezultati rješenja dani u obliku grafova, deformiranih geometrija i popisom rješenja za svaki čvor. Razni programi omogućuju stvaranje slikovnih datoteka s rezultatima ili datoteke za čitanje rezultata za daljnju obradu podataka“, [13].

### 3.2. Električni model sabirnica

U potpoglavlju 3.1. opisane su Maxwelllove jednadžbe koje opisuju električni model sabirnica. Osim tih jednadžbi, bitno je istaknuti varijable vezane uz Lorentzovu silu i Jouleove gubitke prema relacijama (3-10) i (3-11) [6].

$$\vec{F}_L = I_{SC} \int d\vec{l} \times \vec{B} \quad (3-10)$$

$$Q_{loss} = J \cdot E \quad (3-11)$$

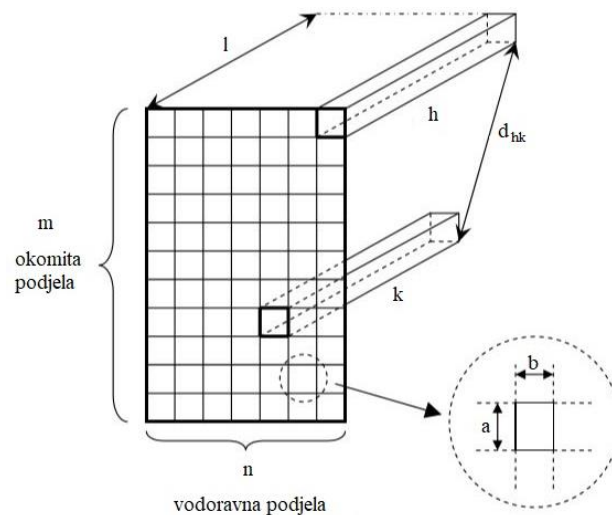
Rasipanje energije, još zvano i Jouleovim gubicima, u vodičima sabirnica utječu na električna svojstva materijala te uzrokuju toplinsko širenje što rezultira pomakom samog vodiča. Stvorena toplina uzrokovana Jouleovim gubicima u vodičima rasipa se kroz površinu. Nekoliko električno – toplinskih učinaka je zanemareno zbog svojih neznatnih utjecaja na promjene, kao što su piroelektričnost te elektrokaločni i termoelektrični efekt. U obzir se uzima toplinska ovisnost električne vodljivosti, specifični toplinski kapacitet i koeficijent toplinske vodljivosti. Izgled i dizajn sabirnice izabran je prema IEC 60947-1 standardu koji u obzir uzima sve do sada navedene parametre kako bi sabirnica mogla podnijeti maksimalni iznos struje kratkog spoja. Detaljnije, o modelu sabirničkog sustava, je opisano u četvrtom poglavlju. Osim Jouleovih gubitaka, u proračun prema IEC standardu mora se uzeti i elektromagnetski proračun sila koji je opisan u potpoglavlju 3.3.

Prema [14], najnoviji modeli sabirnice prilikom modeliranja u obzir uzimaju ograničenja u pogledu onečišćenja magnetskog polja okoliša i potrebe smanjenja volumena samih sabirnica. Numerički pristup omogućuje procjenu raspodjele gustoće struje unutar svakog masivnog vodiča, a iz raspodjele struje moguće je procijeniti neke izvedbe električnih parametara kao što je to skin efekt (eng. *skin effect*), efekt blizine (eng. *proximity effect*), elektrodinamičke sile i slično. Skin efekt je učinak koji rezultira povećanjem električnog otpora unutar vodiča sa povećanjem frekvencije izmjenične struje. Zbog toga izmjenična struja na velikim frekvencijama zapravo teče kroz tanki površinski sloj. U nastavku rada koristit će se pojam debljine prodiranja elektromagnetskog vala koji predstavlja razmak izmjenične struje unutar vodiča do vanjske površine samog vodiča. Efekt blizine je učinak koji nastaje pri velikim izmjeničnim strujama, gdje raspodjela struje po površini presjeka vodiča nije jednaka. Najčešće ovisi o čimbenicima kao što su to materijal, promjer, struktura vodiča i frekvencija. Između dva paralelna vodiča protjecana strujom, veća je gustoća struje ako su vodiči protjecani strujama različitog smjera. Dakle, efekt blizine izraženiji je u vodičima gdje je struja istog smjera.



Poznato je da u slučaju istosmjerne struje ne postoji skin efekt i efekt blizine jer je frekvencija istosmjerne struje jednaka nuli.

Jedna od najčešće korištenih metoda je metoda konačnih elemenata. No, prilikom numeričkog proračuna može poslužiti i PEEC metoda (eng. *Partial element equivalent circuit method*) koja se u ovom slučaju može ograničiti na MC metodu (eng. *Multi-Conductor method*). Ova se tehnika vrlo uspješno primjenjuje u masivnim vodičima prilikom proučavanja raspodjele struje. U ovom je radu MC metoda potpuno formalizirana za sustav sabirnica koji se može proučavati prolaskom struje kroz samu sabirnicu. U MC modelu svaki fazni vodič podijeljen je u nekoliko elemenata tankih vodiča koji se smatraju jednim žičnim provodnikom [15] i [16]. Ključna točka MC metode je izbor žica. Frix i Karaday [15] usvojili su kružni presjek uvodeći žice drugog reda kako bi se popunio međuprostor. Ovaj postupak se može izbjeći kao što je objašnjeno u [16] koristeći pravokutni presjek. U ovom radu je svaki fazni vodič podijeljen u  $m \times n$  žica koje imaju jednake pravokutne presjeke kako je prikazano slikom 3.1.



**Slika 3.1.** Podjela masivnog vodiča u MC modelu, [14]

Da bi se postigli dobri rezultati, potrebno je odabrati dimenzije poluvodiča s obzirom na debljinu prodiranja elektromagnetskog vala.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu}} \quad (3-12)$$

Dobra točnost može se dobiti ako dijagonala poluvodiča nije veća od debljine prodiranja vala.

$$\sqrt{a^2 + b^2} < \delta \quad (3-13)$$

Što je dijagonala kraća, to je veća točnost rezultata. Samoinduktivnost se može procijeniti pomoću jednadžbe koju je predložio Grover u [17].

$$L = L_{hh} = L_{kk} = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \ln \left[ \left( \frac{2 \cdot l}{r_{eq}} \right) - 1 + k \right] \quad (3-14)$$

Ovdje je koeficijent  $k$  obično zanemariv, dok je  $r_{eq}$  geometrijski kvadrat koji se može izračunati pomoću relacije (3-15) u nastavku.

$$r_{eq} = 0,2235 \cdot (a + b) \quad (3-15)$$

Za određivanje međuinduktiviteta, može se koristiti jednadžba (3-16) također iz [17].

$$M_{hk} = M_{kh} = \frac{\mu_0 \cdot l}{2 \cdot \pi} \ln \left[ \frac{l}{d_{hk}} + \sqrt{\left(1 + \frac{l^2}{d_{hk}^2}\right)} - \sqrt{\left(1 + \frac{d_{hk}^2}{l^2}\right)} + \frac{d_{hk}}{l} \right] \quad (3-16)$$

Konačno, parametar otpora za svaki vodič dobije se relacijom (3-17).

$$R = R_{hh} = R_{kk} = \rho \frac{l}{S} \quad (3-17)$$

Numerički proračun izvršen je u nastavku, u petom poglavlju.

### 3.3. Elektromagnetski proračun sila prema IEC standardu

U potpoglavlju 3.1. opisane su Maxwelllove jednadžbe koje opisuju djelovanje elektromagnetskih sila. U ovom potpoglavlju je opisan proračun elektromagnetske sile prema standardu IEC 60865/1993 kako slijedi u nastavku i u [18]. Elektromagnetska sila koju generiraju struje kratkog spoja dobiva se korištenjem konvencionalnih jednadžbi predloženih u [6]. Za svaki raspored sabirnica, prihvaćen je određeni pristup za izračunavanje elektromagnetske sile koja djeluje na vodiče. Dakle, elektromagnetska sila po jedinici duljine koja djeluje na pravokutne vodiče dana je relacijom (3-18).

$$F_L = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot d_m} \cdot i_1 \cdot i_2 \quad (3-18)$$

Struje  $i_1$  i  $i_2$  su struje koje teku kroz susjedne vodiče. Tako bi se za konstrukciju sabirnice (prema slici 4.2. u nastavku), najveća elektromagnetska sila po jedinici duljine koja djeluje na središnji pravokutni vodič (faza B) izračunala prema relaciji (3-19) [7].

$$F_{mb} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot d_m} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_p^2 \quad (3-19)$$

Može se uvidjeti kako je djelovanje elektromagnetske sile na preostala dva vodiča  $F_{ma}$  i  $F_{mc}$  manjeg iznosa od  $F_{mb}$ . Te se sile mogu izračunati prema relaciji (3-20) [7].

$$F_{ma} = F_{mc} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi \cdot d_m} \cdot \frac{3 + 2\sqrt{3}}{8} \cdot i_p^2 \quad (3-20)$$

Bitno je naglasiti kako je uvedena efektivna vrijednost  $d_m$  umjesto udaljenosti središnje linije  $d$ . Ovo je uvedeno zbog skin efekta i efekta blizine u sustavu niskog napona koji se ne mogu zanemariti, što je ujedno već opisano u potpoglavlju 3.2. Efektivna vrijednost je definirana prema relaciji (3-21) [7].

$$d_m = \frac{d}{k_1} \quad (3-21)$$

Korekcijski faktor  $k_1$  može se izračunati iz IEC standarda 865/1993 [18]. Parametar  $d_m$  predstavlja Dwightov koeficijent koji se izračunava iz krivulja prema slici 1 danoj u prilogu [7]. Numerički proračun izvršen je u nastavku, u petom poglavlju.

Također je važno spomenuti da zbog djelovanja elektromagnetske sile dolazi do mehaničkog pomaka između sabirnica. Mehanički pomak ne može se promatrati u ANSYS Maxwellu, ali važno je imati na umu teorijske pojmove jer su oni u praksi izrazito važni. Dakle, maksimalni pomak vodiča sabirnice koji su kao rezultat elektromagnetske sile, slobodno oslonjeni na svakom kraju, može se dobiti prema izrazima (3-22) i (3-23) [6].

$$\Delta = \frac{5 \cdot F_L \cdot a^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (3-22)$$

$$I = \frac{m \cdot n^3}{12} \quad (3-23)$$

Gdje su  $a$ ,  $m$  i  $n$  veličine vodiča sabirnice. Prema slici 4.2. u nastavku rada,  $m$  i  $n$  su jednaki parametrima  $b$  i  $c$ .

Pošto je vrsta korištenog modela sabirničkog sustava puni okrugli vodič (eng. *solid*), omogućena je upotreba skin efekta u izmjeničnom sustavu. Također, za izračun sile potreban je parametar gustoće struje  $J$  [ $A/m^2$ ]. Trenutna vrijednost sile se sastoji od istosmjerne (DC) i izmjenične (AC) komponente. Dakle, trenutna vrijednost sile rezultat je sume ovih dviju komponenti. Relacija (3-24) vrijedi za istosmjernu komponentu sile, a za izmjeničnu vrijedi relacija (3-25).

$$F_{DC} = \frac{1}{2} \int Re |\bar{J} \times \bar{B}^*| dV \quad (3-24)$$

$$F_{AC} = \frac{1}{2} \int |\bar{J} \times \bar{B}| dV \quad (3-25)$$

Kako je gore navedeno da je resultantna sila jednaka sumi istosmjerne i izmjenične komponente, tada vrijedi relacija (3-26).

$$F_{inst} = F_{DC} + F_{AC} \quad (3-26)$$

### 3.4. Proračun struje kratkog spoja

Ispitivanje kratkog spoja jedan je od važnih koraka za provjeru kvalitete sabirnice nakon proizvodnog postupka. Ispitivanje se izvodi kako bi se dokazalo da je sabirnica sposobna izdržati struju kratkog spoja određeno vrijeme i izdržati silu nastalu zbog trenutne vršne vrijednosti struje kratkog spoja. Pojava kratkog spoja u sustavu sabirnice proizvodi vrlo visoku struju koja teče kroz vodič sabirnice. Jačina struje kratkog spoja ovisi o izvoru napona i ukupnoj impedanciji operativne opreme [19]. Veća vrijednost struje inducira elektromagnetsku silu između svakog paralelnog vodiča sabirnice. Svaka sabirnica neke faze izložena je elektromagnetskoj sili zbog djelovanja između ostalih faza. Elektromagnetska sila daje maksimalnu vrijednost u prvom polukružnom ciklusu pojave kratkog spoja što je uzrokovano vršnom vrijednosti struje kratkog spoja. Ovu silu treba identificirati kako bi se odredila veličina vodiča i konstrukcija za njihovo podupiranje [20]. Elektromagnetska sila ovisi o jačini struje kratkog spoja i konfiguracijskoj dimenziji vodiča sabirnice.

Struja kratkog spoja za ovu simulaciju je trofazna simetrična jer daje najveći dinamički napon. Tipični kratki spoj koji prolazi kroz svaki vodič sustava sabirnice može se izraziti kao prema [7].

$$I_a(t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \gamma) - \frac{V_m}{Z} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\alpha - \gamma) \quad (3-27)$$

$$I_b(t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \gamma - 120^\circ) - \frac{V_m}{Z} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\alpha - \gamma - 120^\circ) \quad (3-28)$$

$$I_c(t) = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \gamma + 120^\circ) - \frac{V_m}{Z} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\alpha - \gamma + 120^\circ) \quad (3-29)$$

Gore navedeni parametri mogu se izračunati iz sljedećih nekoliko jednadžbi [7]:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3-30)$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3-31)$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (3-32)$$

$$\alpha = \gamma - \frac{\pi}{2} \quad (3-33)$$

Otpor  $R$  i induktivitet  $L$  odnose se na sam vodič sabirnice. Trofazna struja kratkog spoja zadana je relacijom (3-34) te ovisi o parametrima nazivnog napona, impedanciji strujnog kruga i naponskom faktoru  $c$  [19].

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_T} \quad (3-34)$$

U prvom polukružnom ciklusu struja će biti vršna vrijednost trofazne struje kratkog spoja. Ova vršna vrijednost struje kratkog spoja uzima se u obzir za izračunavanje maksimalne elektromagnetske sile između vodiča sabirnice. Vršna struja kratkog spoja može se izračunati iz jednadžbe (3-35) [19].

$$i_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3} \quad (3-35)$$

Faktor  $k$  je udarni koeficijent koji ovisi o omjeru  $R/X$  kratkog spoja kako je prikazano relacijom (3-36) [19].

$$k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3\frac{R}{X}} \quad (3-36)$$

Ukupan otpor predstavljen je oznakom  $R$ , a ukupna reaktancija sustava oznakom  $X$ . Sustavi sabirnica izloženi su mehaničkoj sili kao rezultat kratkog spoja. Ova najveća elektromagnetska sila nastaje tijekom pojave kratkog spoja strujom koja teče u susjednim vodičima u strukturi sabirnice. Ta sila uglavnom ovisi o jačini struje kratkog spoja, obliku, kao i dimenzijskom rasporedu vodiča. Dimenzioniranje sabirnice da bi ona bila stabilnost u pogledu djelovanja mehaničke sile, opisano je točno u IEC 60865 standardu [19].

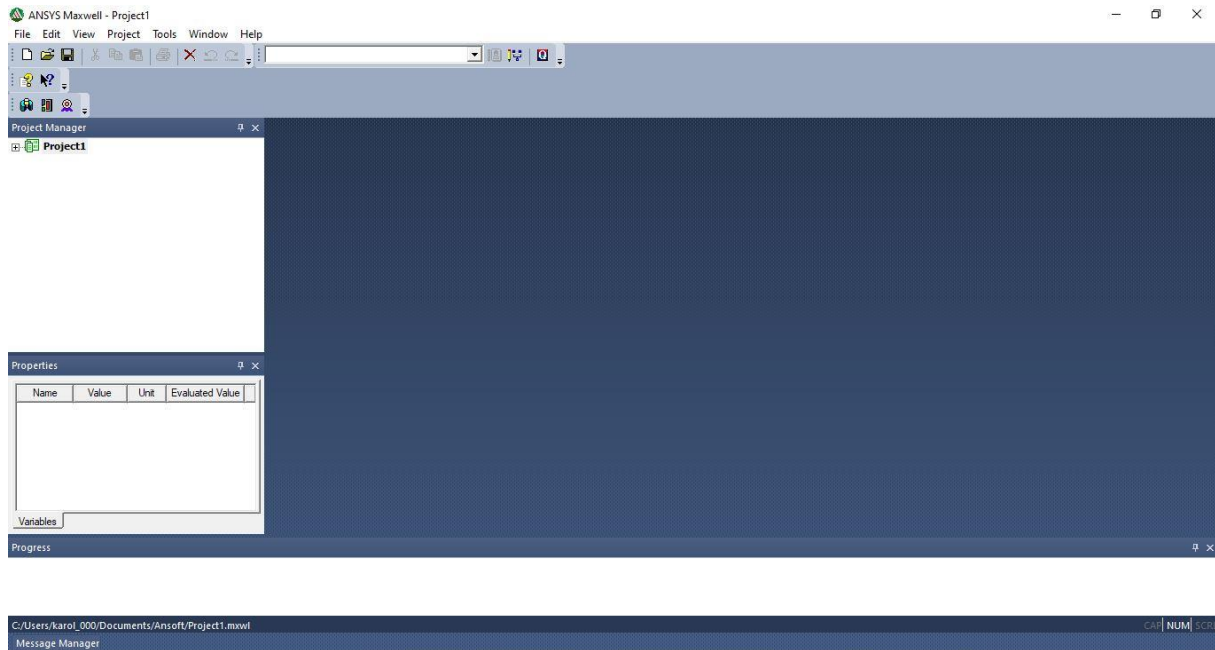
## 4. MODEL SABIRNIČKOG SUSTAVA U PROGRAMU ANSYS MAXWELL

Ovo poglavlje podijeljeno je na nekoliko potpoglavlja u kojima je detaljno opisan postupak dizajniranja i veličine sabirničkog sustava. Dakle, detaljnije je opisan postupak crtanja geometrije, definiranje materijala, dodjela izvora polja i graničnih svojstava u 2D modelu te način izrade 3D modela kao i postavke simulacije, provođenje (pokretanje) simulacije i prikaz rezultata u oba modela. Izgled i dizajn sabirnice izabran je prema IEC 60947-1 standardu koji u obzir uzima sve do sada navedene parametre kako bi sabirnica mogla podnijeti maksimalni iznos struje kratkog spoja. Provodnici sabirnica obično su izrađeni od aluminijske ili bakrene. Bakrene su sabirnice ravnog oblika (kao i u primjeru ovog rada), dok su aluminijske cijevi u obliku slova C. Provodnici sabirnica izabrani su na način da izdrže elektromagnetske sile tijekom stanja kratkog spoja, a presjek vodiča sabirnice odabire se na temelju nazivne struje. Izvor napona modelira se kao električni potencijal koji se ostvaruje na jednom prekidu vodiča sabirnice, dok je drugi prekid uzemljen. Ova se konfiguracija obično koristi u laboratorijima za postavljanje ispitivanja kratkog spoja. Vrijednosti  $R$  i  $L$  postavljaju se u skladu sa međunarodnim standardom IEC 61439-1 kako bi se dobila željena vršna vrijednost struje kratkog spoja.

### 4.1. Simulacijski program ANSYS Maxwell

U ovom potpoglavlju prikazan je kratki opis programa koji se koristi pri simulacijama. Opis je baziran na postupak i tip simulacije koji se u primjeru ovog rada konkretno koristi. Ukratko su opisani i alati unutar Maxwella za parametarske simulacije i analizu. ANSYS Maxwell je, dakle, simulacijski softver za inženjere koji projektiraju i odrađuju analizu 2D i 3D prikaza elektromagnetskih i elektromehaničkih uređaja. Kako je već rečeno, polazna metoda na kojoj se temelji princip rada ovog softvera je metoda konačnih elemenata, opisana u potpoglavlju 3.1. Elektromagnetska i električna polja za analizu mogu biti statička, ali i vremenski promjenjiva. Može se reći kako se ovaj se program koristi pri detaljnijoj analizi rada kondenzatora, prigušnica, transformatora, motora, senzora i ostalih električnih uređaja u kojima se promatraju već spomenuta polja. Ključna prednost ANSYS Maxwell programa je njegov proces rješavanja problema gdje je potrebno odrediti i nacrtati geometriju, odrediti svojstva materijala i željeni rezultat (može biti više izlaznih vrijednosti). Nakon toga, ANSYS sam automatski određuje odgovarajuću i točnu mrežu za rješavanje problema. Ovaj korak omogućava visoku učinkovitost u obradi rezultata. Mreža (eng. *Grid mesh*) je cjelokupni skup elemenata koji se

dobiva iz niza riješenih algebarskih jednažbi te se geometrija same mreže automatski diskretizira. Riječ je o pločastoj geometriji modeliranoj uglavnom pravokutnim elementima ujednačene debljine sa  $n$  nepoznanica u  $n$  broju jednažbi. Recimo, ukoliko se u 3D modelu poveća mreža, rezultati su bolji i precizniji, no simulacija traje duže. Što se tiče samog dizajna sučelja, on je vrlo jednostavnog izgleda. Početni prikaz dan je slikom 4.1.



**Slika 4.1.** Početni prikaz novog modela u ANSYS Maxwell programu

ANSYS Maxwell uključuje i može rješavati probleme vezane za:

- elektrostatičko područje,
- magnetostatičko područje,
- izmjenično elektromagnetsko područje,
- magnetsko prijelazno područje,
- električno prijelazno područje,
- stručna dizajnerska sučelja za električne strojeve i transformatore.

Uz sve navedeno, program je idealan za simuliranje ponašanja elektromagnetskih uređaja u različitim uvjetima te tako onda nema potrebe za izradom testnih predmeta i provođenjem raznih testiranja u praksi sve dok se ne dođe do optimalnog rezultata koji zadovoljava uvjete simulacije. Osim svega navedenog, ANSYS Maxwell omogućuje povezivanje s drugim alatima za analize, što naravno daje još veću vjerodostojnost rezultata. „Služi za modeliranje petlje histereze za tvrde i meke materijale u ovisnosti o temperaturi. Služi za izračun gubitaka snage nastalih vrtložnim strujama u sabirnicama. Omogućuje proračun buke i vibracije koristeći Fourierovu transformaciju. Za električna polja omogućuje analizu prijelaznih pojava,

elektrostatike i tok struje. Pri izmjenjivom elektromagnetskom polju mogu se analizirati harmonici unutar uređaja, skin efekt te vrtložne struje za različite frekvencije. Postoji mogućnost nelinearne analize magnetostatike automatiziranim procesom za sve vrste magnetskih krugova. Koristi se i u razvoju automobilske industrije, posebno za dizajn novih generacija električnih i hibridno-električnih pogona, u sigurnosnim sustavima i nadzoru. Sve više je zastupljen u zrakoplovnoj industriji gdje se tradicionalni mehanički i hidraulički sustav, uz pomoć softvera, nastoji pouzdano zamijeniti sa električnim sustavom. Inženjeri koji rade na dizajnu morskih vjetroturbina koriste ANSYS za analizu utjecaja vjetra, valova, oceanskih struja i drugih sila. ANSYS se koristi i u složenim industrijskim procesima proizvodnje (tvornice čelika i slično) [21]. Unutar ANSYS Maxwell sučelja postoji razvijeni sustav specijaliziranih alata za rješavanje određenih problema. To su Electronics Desktop, HFSS, SIwave, Icepak, Sherlock, Q3D Extractor i drugi.

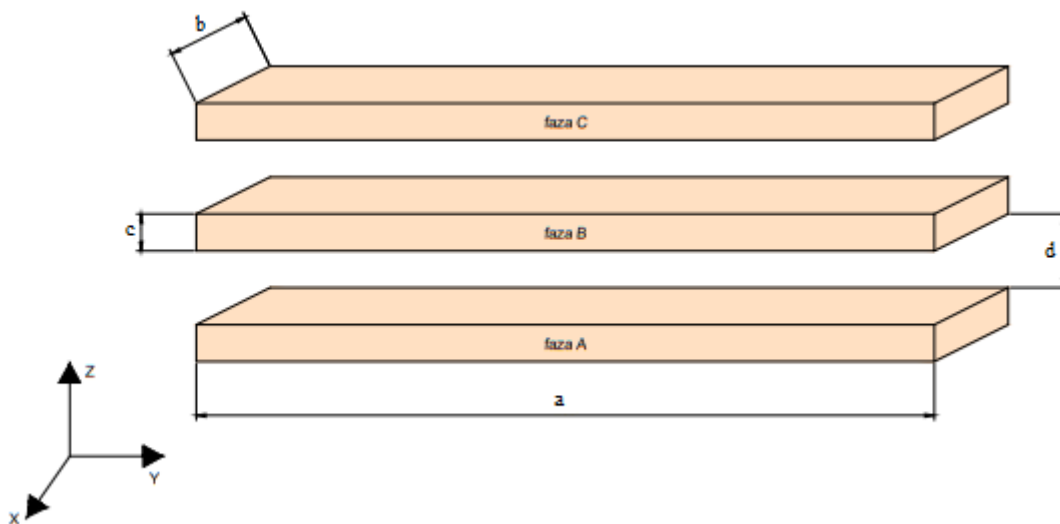
#### 4.2. Model sabirničkog sustava i proračun

Na samome početku modeliranja, bitno je krenuti s crtanjem u 2D geometriji gdje je prvo potrebno odrediti da li je za problem prikladna planarna (ravninska) ili osnosimetrična geometrija. Planarna geometrija još se naziva i Kartezijev model. Kako je spomenuto na početku, za simulaciju elektromagnetskog polja potrebno je poznavati geometriju i elektromagnetska svojstva prostora. Odabir prostora se treba odrediti tako da obuhvaća sve točke koje su od interesa u simulaciji i rješavanju konkretnog problema. Nakon definiranja prostornih granica za rješavanje problema zadanog nacrtanom geometrijom, potrebno je definirati vrstu materijala svakog omeđenog volumena. Volumen u 2D geometriji je ploha, a u 3D geometriji se odnosi na prostor. Za izradu modela prema [6], sve je poznato. Dakle, dimenzije sabirnica i ostale potrebne veličine dane su tablicom 4.1., a početni model prikazan je slikom 4.2.

**Tablica 4.1.** Specifikacije modela sabirničkog sustava

Parametri	Vrijednosti
<i>Napon mreže</i>	380 [V]
<i>Struja mreže</i>	1650 [A]
<i>Struja kratkog spoja</i>	50 [kA]
<i>Broj vodiča u fazi</i>	1
<i>Veličina vodiča (a x b x c)</i>	105 x 12 x 1 [cm]
<i>Razmak između susjednog vodiča (d)</i>	7.5 [cm]

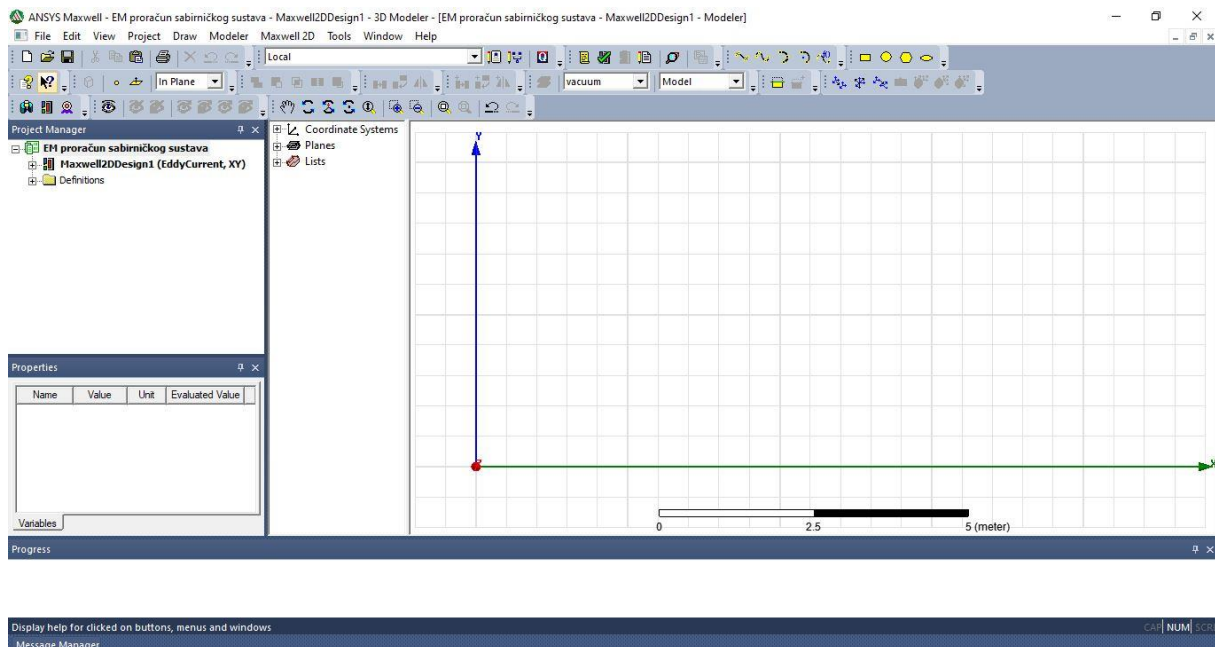




**Slika 4.2.** Model sabirničkog sustava sa parametrima

### 4.3. 2D model sabirničkog sustava

U prvom koraku izrade 2D modela sabirničkog sustava, potrebno je otvoriti ANSYS Maxwell program gdje se otvara prozor kao na slici 4.1. te se omogućava rad u prostoru za crtanje s x, y i z koordinatama. Nakon otvaranja novog projekta, po želji se može promijeniti ime projekta, no svakako je potrebno taj projekt spremiti na željenu lokaciju (*File* → *Save As*). Zatim je potrebno odabrati vrstu dizajna (*Project* → *Insert Maxwell 2D Design*). Nadalje, potrebno je odrediti tip izračuna elektromagnetskog polja (*Maxwell 2D* → *Solution Type* → *Eddy Current*), a u istom prozoru potrebno je odabrati tip geometrije (*Maxwell 2D* → *Solution Type* → *Cartesian XY*). S lijeve strane prozora omogućen je pogled na dodijeljene izvore, materijale, parametre matrice, granične uvjete i ostalo što je potrebno za analizu i rezultate simulacije – grafovi, tablice, kalkulator i slično. Također je vidljiva lista ucrtanih geometrija tijela i objekata. Prije samog crtanja potrebno je još odrediti mjerne jedinice (*Modeler* → *Units*) i odabrati metar kao mjernu jedinicu. Trenutni izgled prozora prikazan je slikom 4.3.



**Slika 4.3.** Prikaz novog modela u ANSYS Maxwell programu nakon početnih uvjeta

U svakom trenutku unutar sučelja svojstva (eng. *Properties*) vidljive su karakteristike pojedinog elementa koji se označi u programu. Sučelje upravljanja porukama (eng. *Message manager*) izbacuje poruke ukoliko dođe do neželjenih pogrešaka kako bi se one uklonile te daje povratne informacije nakon što simulacija završi. Sučelje procesa (eng. *Progress*) aktivno je prilikom izvršavanja simulacije gdje se prikazuje trenutno stanje simulacija, te je vidljivo približno vrijeme trajanja simulacije i ostali procesi.

#### 4.3.1. Definiranje uvjeta za simulaciju u ANSYS Maxwellu

Dimenzije sabirničkog sustava već su prikazane tablicom 4.1. i slikom 4.2. Prema tim dimenzijama nacrtana je geometrija sa po jednim vodičem u svakoj fazi trofaznog sabirničkog sustava. Taj nacrtani model trenutno se nalazi u nedefiniranom prostoru. Crtanjem područja okoliša (*Draw* → *Region* → *Percentage Offset*) s dimenzijama 200 % većim od krajnjih točaka geometrije ostvaruje se vakuumski prostor u kojem se nalazi model sabirnica. Kako bi se simulacija mogla provesti, potrebno je još odrediti uvjete kao što su materijal svakog pojedinog vodiča, izvor polja svakog pojedinog vodiča, granična svojstva i postavke simulacije. Odabrana metoda vrtložnih struja (eng. *Eddy Current*) omogućava izračun oscilirajućeg magnetskog polja sa izmjeničnim strujama. To je važno zbog parametara kao što su gustoća struje, skin efekt, debljina prodiranja elektromagnetskog vala, vrtložne struje, matrica impedancije, sile, zakretni moment, gubici u jezgri i tokovi struje. Za svaki pojedini vodič dodijeljen je materijal – bakar (*Assign Material* → *Copper*). Zatim je dodan Neumanov rubni uvjet. To je rubni uvjet koji je dinamičkog tipa i određuje vrijednost dinamičkog polja na rubovima. Najkraće rečeno, lijevi

rub postaje slobodan. Odnosno okomito od plohe ne postoji funkcija, a za takav rubni uvjet kažemo da je homogen.

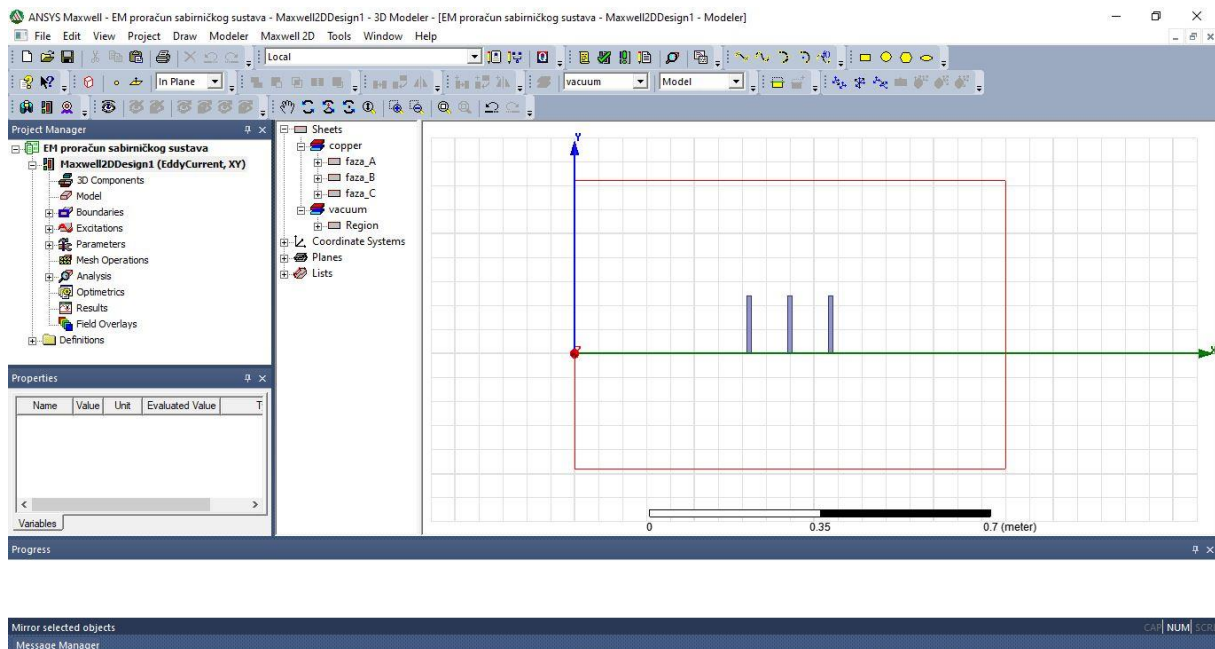
$$\frac{\partial \varphi}{\partial \vec{n}_0} = f(r) = 0 \quad (4-1)$$

Dakle, potrebno je označiti preostala 3 ruba vakuuma i pridijeliti mu rubni uvjet (*Assign Boundary* → *Ballon*). Nadalje, parametri i vrijednosti izmjenične struje i napona također su prikazani tablicom 4.1. Tako da u vodiču faze A teče struja od 1650 A pod električnim kutom od 0 °, u vodiču faze B teče struja od 1650 A pod električnim kutom od 120 ° te u fazi C struja od 1650 A pod kutom 240 °. Dodjela izvora polja ostvaruje se naredbom *Assign Excitation* → *Current*. Vrsta sabirničkog vodiča je puni vodič (eng. *solid*) jer drugi izbor je licnasti vodič što govori da je vodič višežični (eng. *stranded*), ali taj se neće koristiti u ovome modelu.

Da bi se promatrali određeni rezultati, potrebno je postaviti parametar sile na svaki pojedini vodič u fazi (*Assign Parameters* → *Force*) i matricu impedancije (*Assign Parameters* → *Matrix*) na cijeli sabirnički sustav. Matrica impedancije je dimenzije 3x3. Na samom kraju izrade početnog modela potrebno je definirati i način provođenja simulacije (*Maxwell 2D* → *Analysis Setup* → *Add Solution Setup*). Ove postavke generalno se mogu podijeliti na dvije glavne skupine:

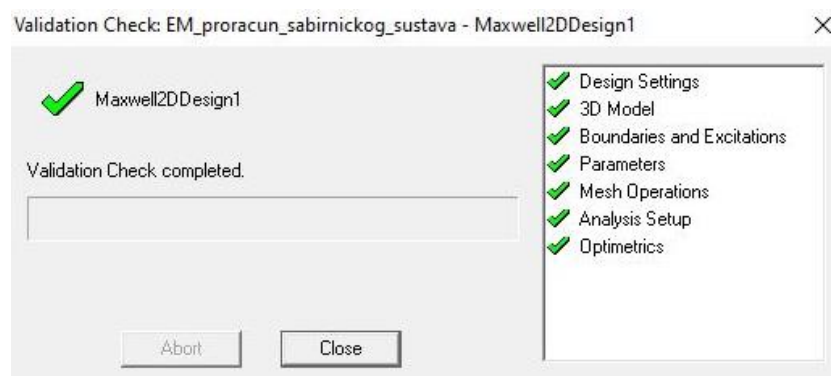
- postavke koje se odnose na sam matematički alat (u ovom slučaju parametri matematičke/numeričke FEM metode) kojim se obavlja proračun,
- postavke koje se odnose na definiranje izračuna dodatnih fizikalnih veličina kao što su to općenito sve one koje se mogu izračunati iz vrijednosti  $E$ ,  $D$ ,  $B$  i  $H$  polja, npr. kapacitet, induktivitet, sila, moment, naprezanje i slično.

U novoootvorenom prozoru potrebno je promijeniti iznos koraka (eng. *Number of passes*). Kako bi rezultati bili točniji i simulacija preciznija. Dovoljno je taj iznos povećati sa vrijednosti 10 na 15. Već ranije je definirano da će pogreška simulacije biti 2 %, a frekvencija je iznosa 50 Hz. Osim navedenog, sve ostale vrijednosti ostaju kako ih je sam program zadao po definiciji.



**Slika 4.4.** 2D model sabirničkog sustava u ANSYS Maxwell programu

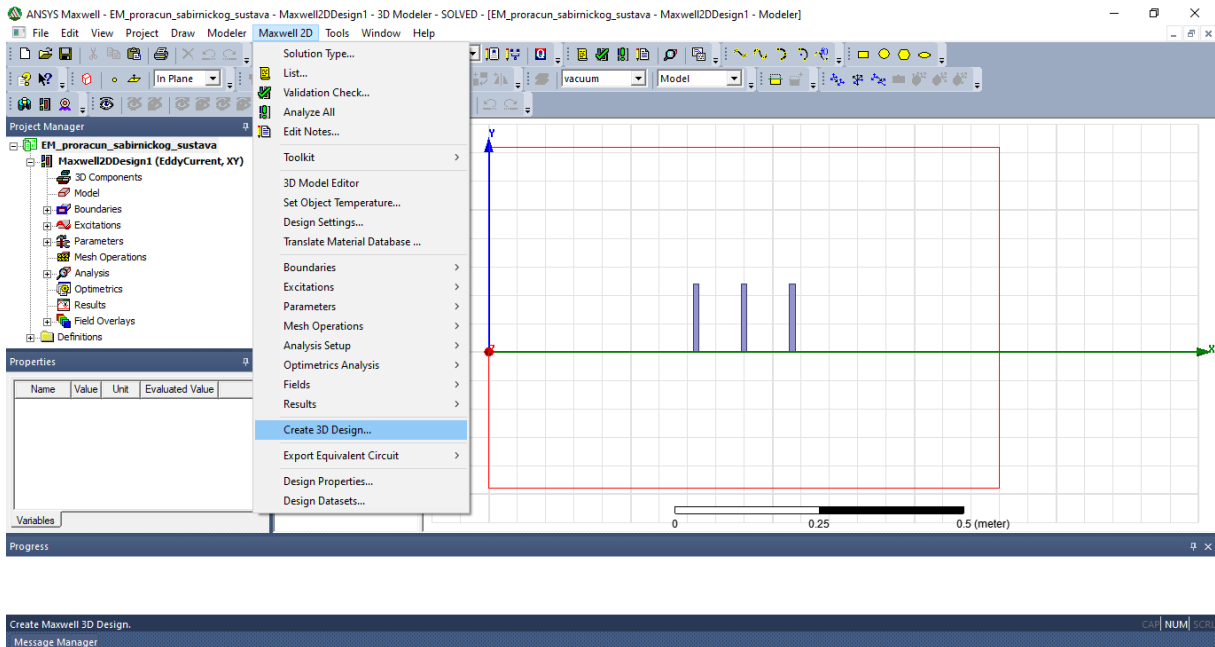
Prije samog pokretanja simulacije, potrebno je provjeriti postavke izrađenog modela i postavke simulacije (eng. *Validate*). Nakon obavljene validacije, novootvoreni prozor prikazuje da li su svi koraci obavljeni na ispravan način. Ako jesu, označeni su zelenim kvačicama. U suprotnom, ako je neki korak obavljen neispravno, bio bi označen znakom „x“ u crvenom krugu. Za tako označene korake potrebno je provjeriti u čemu je greška te je ispraviti. Pomoć u detektiranju greške može biti i poruka prikazana u prozoru *Message Manager*. Kada je rješavanje simulacije odrađeno, potrebna je izvedba obrade rezultata. Sve je to prikazano u nastavku rada.



**Slika 4.5.** *Validation Check* uspješno proveden

## 4.4. 3D model sabirničkog sustava

Izrada i konstrukcija samog 3D modela sabirničkog sustava gotovo je svedena na minimum jer se koristi gotov 2D model koji se pretvara u 3D model. U nastavku je opisan postupak stvaranja ovog 3D modela, promjene parametara koje je potrebno izvršiti, postavke simulacije, provođenje (pokretanje) i prikaz rezultata simulacije. Dakle, prvotno je potrebno otvoriti ANSYS Maxwell program, a zatim i 2D model koji je izrađen već za prvi dio ovog rada. Slika 4.6. prikazuje potreban prvi korak prilikom pretvorbe modela.



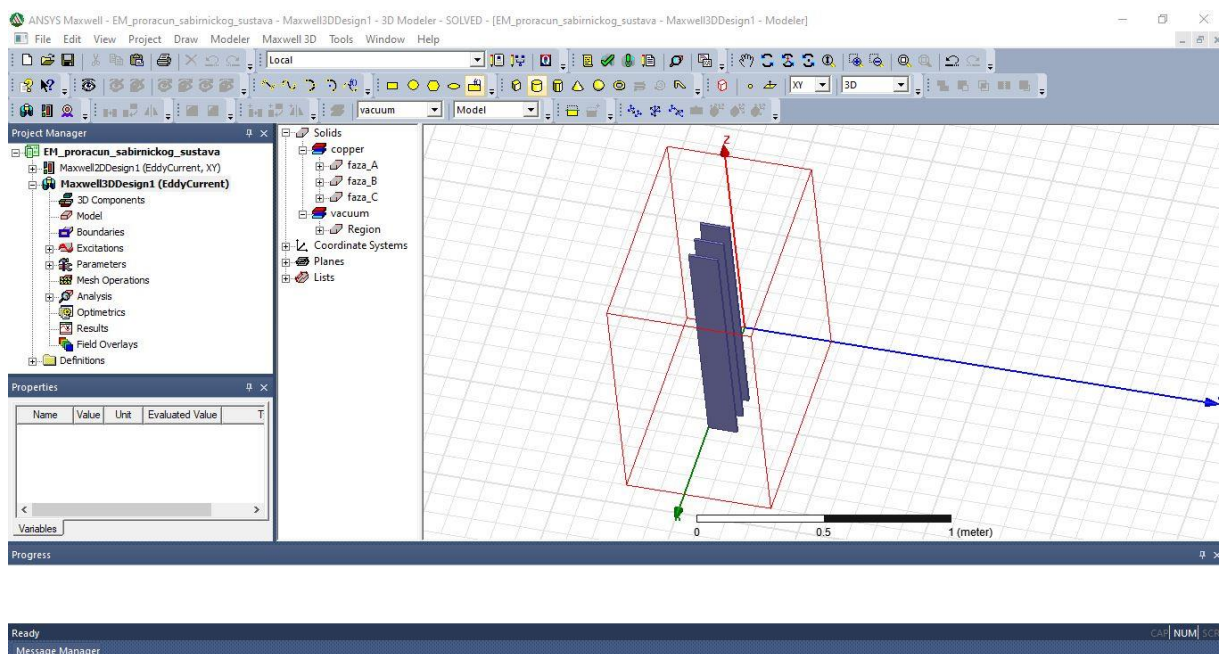
**Slika 4.6.** Prvi korak pri pretvorbi 2D u 3D model

U drugom koraku slijedi unos dužine, tj. unos iznosa z osi. Kako je zadano literaturom, za ovaj rad je potrebna dužina sabirnica u vrijednosti od  $1.05\text{ m}$ . U međuvremenu je potrebno spremati promjene koje su napravljene unutar programa. Zatim je potrebno odabrati vrstu 3D dizajna (*Maxwell 3D* → *Solution Type* → *Eddy Current*). Mjerne jedinice već su podešene i nije ih potrebno konfigurirati.

### 4.4.1. Definiranje uvjeta za simulaciju u ANSYS Maxwellu

Uvjeti koje je sada potrebno definirati su materijal, izvor, granična svojstava i postavke simulacije. No, materijal vodiča i okoliša je već definiran. Područje okoliša (eng. *Region*) mora graničiti s krajnjim točkama geometrije jer se u suprotnom ne bi moglo ostvariti zadavanje uzbude (zbog *Eddy Current* tipa postavki). Nakon dodjele graničnih svojstava i materijala, preostaje još dodijeliti izvor polja na površinama priključnica svake pojedine faze sabirničkog sustava. Površine koje je potrebno odabrati (eng. *Select faces*) su one koje se nalaze na površini

vanjske granice. Tako dakle, u 3D modelu postoji 6 uzbuda umjesto 3 uzbude kao u 2D modelu. Iznosi uzbuda su jednaki kao u 2D modelu sa faznim pomakom, ali je prilikom izlazne uzbude potrebno odabrati *Swap Direction*. Ovaj uvjet ujedno osigurava Kirchhoffov zakon struja. Vrsta sabirničkog vodiča je također puni vodič (eng. *solid*). Nadalje, potrebno je postaviti parametar sile na svaki pojedini vodič u fazi (*Assign Parameters* → *Force* → *Lorentz force*) i matricu impedancije (*Assign Parameters* → *Matrix*) kako bi se promatrali parametri koji su potrebni za obradu rezultata u ovom radu. Lorentzova sila predstavlja prosječnu silu na objekt (ili grupu objekata) zbog struje u vremenski promjenjivom magnetskom polju. Virtualna sila u vrtložnom problemu izračunava se na isti način kao i magnetostatska virtualna sila. Jedina je razlika što se izračunava prosječna sila tijekom vremena, a ne neto sila u određenom trenutku. Na samom kraju izrade početnog modela potrebno je definirati i način provođenja simulacije (*Maxwell 3D* → *Analysis Setup* → *Add Solution Setup*). Slika 4.7. prikazuje gotov 3D model sabirničkog sustava.



Slika 4.7. 3D model sabirničkog sustava u ANSYS Maxwellu



## 5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

U poglavlju analize dobivenih rezultata prikazani su dobiveni rezultati prilikom 2D i 3D simulacije. Rezultati su u nastavku uspoređeni te su donešena konstruktivna razmišljanja. Nakon teorijskog dijela o modelu sabirničkog sustava te prije samog kreiranja modela sabirničkog sustava, proveden je i numerički proračun. Očekivani rezultati trebali bi se ostvariti i nakon simulacije. Usporedba je izvršena u ovom poglavlju. Pretpostavljena temperatura na kojoj se nalazi sabirnički sustav je  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pošto su važni parametri materijala, poznato je da su sami vodiči sabirnice od bakra. Električna otpornost bakra iznosa je  $\rho = 1,68 \cdot 10^{-8} \Omega m$ . Ovi parametri važni su zbog izračuna otpora kako je prikazano jednadžbama (5-1) i (5-2).

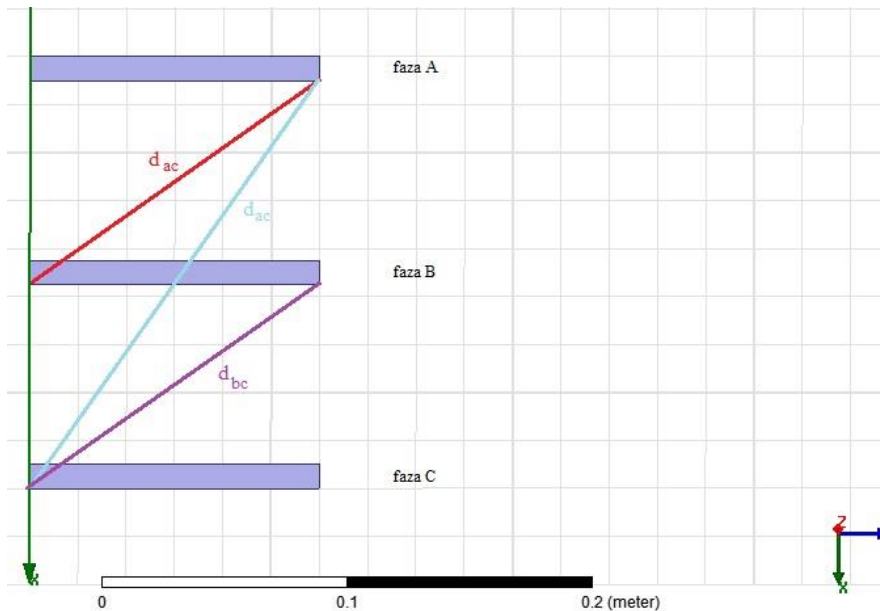
$$S = b \cdot c = 0,12 \cdot 0,01 = 12 \cdot 10^{-4} m^2 \quad (5-1)$$

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1,68 \cdot 10^{-8}}{12 \cdot 10^{-4}} = 1,4 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (5-2)$$

Električna vodljivost bakra iznosi  $\sigma = 5,96 \cdot 10^7 S/m$  dok permeabilnost ovisi o relativnoj permeabilnosti i o materijalu u modelu. Pa tako dakle, za bakar vrijedi da je relativna permeabilnost  $\mu_r = 1$  i  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H/m$ . Prema već gore navedenoj relaciji (3-12) sada vrijedi izračun za debljinu prodiranja elektromagnetskog vala koji je iznosa  $\delta = 9,31 \cdot 10^{-3} m$ .

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \sigma \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,96 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}} = 9,31 \cdot 10^{-3} m \quad (5-3)$$

Prema isto već gore navedenoj relaciji (3-13), vrijednosti  $a$  i  $b$  mogu se izabrati proizvoljno. Pa tako za  $a = 6 \cdot 10^{-3} m$  i  $b = 1 \cdot 10^{-3} m$  se dobiva iznos  $r_{eq} = 1,565 \cdot 10^{-3}$  prema (3-14). A vrijednost samoindukcije prema (3-15) iznosi  $L = 1,43 \cdot 10^{-6} H$ . Kod međuinduktiviteta, potrebna je vrijednost dijagonale  $d_{hk}$ . Izračun se vrlo lako očitava sa slike 5.1.



**Slika 5.1.** Određivanje vrijednosti potrebnih dijagonala

Pa su tako iznosi  $d_{ab} = 0,1471 \text{ m}$ ,  $d_{ac} = 0,2081 \text{ m}$  i  $d_{bc} = 0,1471 \text{ m}$ . I na kraju, prema (3-16) izračunate vrijednosti za međuinduktivitete su  $M_{ab} = 5,1 \cdot 10^{-7} \text{ H}$ ,  $M_{ac} = 4,37 \cdot 10^{-7} \text{ H}$  i  $M_{bc} = 5,1 \cdot 10^{-7} \text{ H}$ .

### 5.1. Prikaz rezultata 2D simulacije

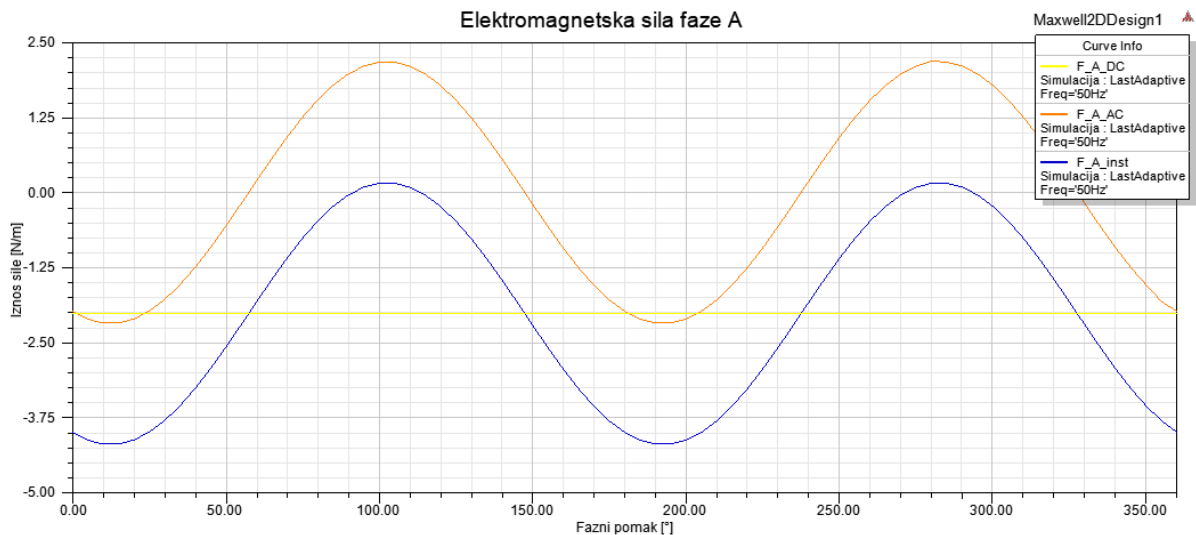
Prvotno je odrađena simulacija u normalnom pogonskom stanju, sa fazno pomaknutim strujama i iznosom od 1650 A. Tablica 5.1. prikazuje matricu impedancije. Impedancija se sastoji od iznosa otpora i induktiviteta  $[Z] = [R, L]$ , a vrijednosti otpora su iskazane u  $\mu\Omega$  i u  $\mu H$  za induktivitet.

**Tablica 5.1.** Matrica impedancije u normalnom pogonskom stanju u 2D modelu

Faza	Iznosi otpora i induktiviteta		
A	$[18.617 \mu\Omega, 1.117 \mu H]$	$[1.727 \mu\Omega, 0.874 \mu H]$	$[0.529 \mu\Omega, 0.746 \mu H]$
B	$[1.727 \mu\Omega, 0.874 \mu H]$	$[18.699 \mu\Omega, 1.093 \mu H]$	$[1.649 \mu\Omega, 0.853 \mu H]$
C	$[0.529 \mu\Omega, 0.746 \mu H]$	$[1.649 \mu\Omega, 0.853 \mu H]$	$[18.442 \mu\Omega, 1.075 \mu H]$

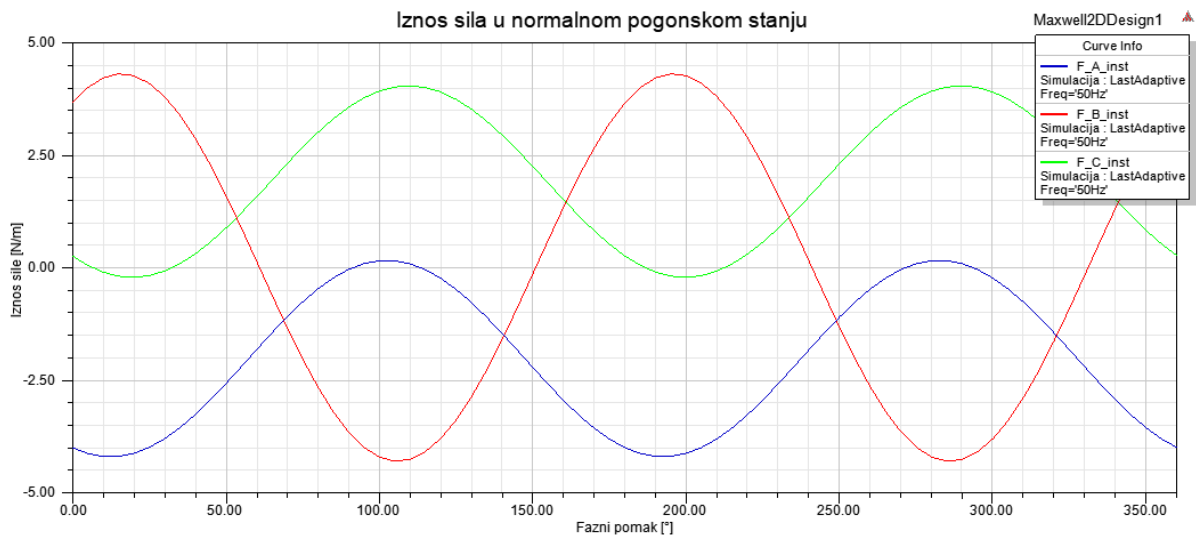
Slika 5.2. prikazuje iznose sile u fazi A u punom rasponu faznog pomaka, od 0 do  $360^\circ$  električnih pri normalnom pogonskom stanju. Trenutan iznos sile sastoji se od istosmjerne (DC) i izmjenične (AC) komponente. Istosmjerna komponenta označena je žutom bojom, izmjenična komponenta narančastom bojom, a trenutni iznos sile plavom bojom.





**Slika 5.2.** Iznos sila u fazi A u normalnom pogonskom stanju u 2D modelu

Iznos trenutne vrijednosti sile moguće je izračunati uz pomoć kalkulatora (eng. *Calculator*) unutar ANSYS Maxwella. Teorijski izračun već je opisan relacijama (3-24) – (3-26). Maksimalni iznos sile se očitava iz grafičkog prikaza sa slike 5.3. Plavom bojom predstavljena je sila faze A, crvenom bojom sila faze B i zelenom bojom sila faze C. Sila je iskazana u mjernoj jedinici Newton [*N*].



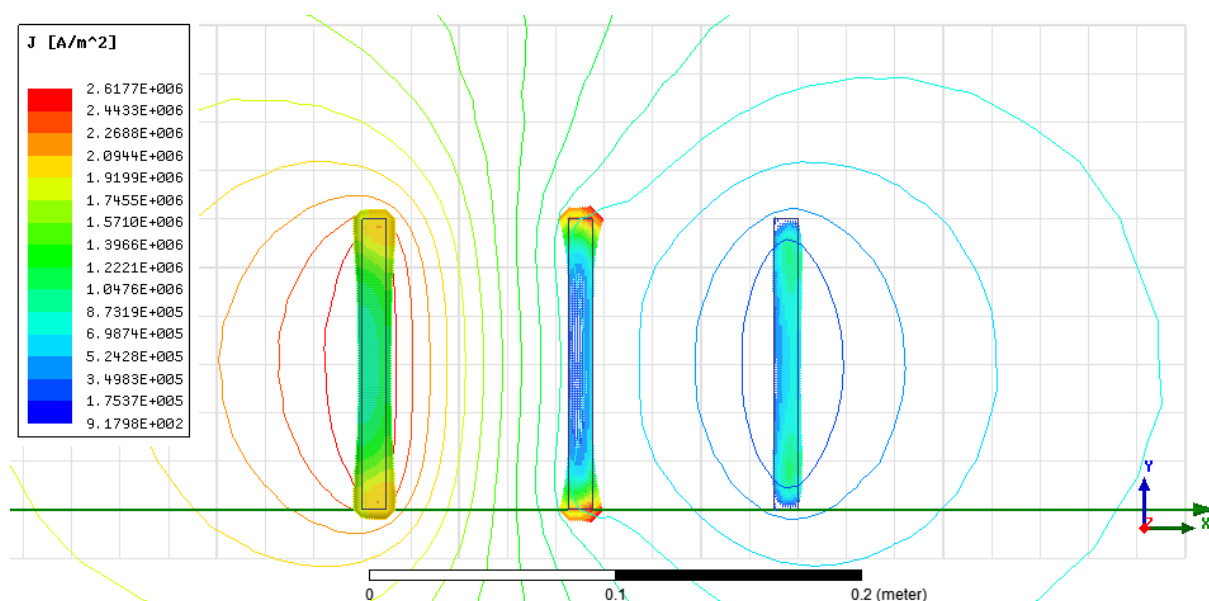
**Slika 5.3.** Iznos sila u sabirničkom sustavu u normalnom pogonskom stanju u 2D modelu

U tablicu 5.2. unešene su trenutne vrijednosti iznosa sila u sve tri faze pri  $\varphi = 0^\circ$ , maksimalni iznos sile unutar perioda faznog pomaka i iznos sile dobiven numeričkim putem. Numerički izračun ujedno služi za usporedbu sa IEC 60865/1993 standardom. On je ujedno efektivna vrijednost iznosa sile sa grafičkog prikaza unutar jednog perioda.

**Tablica 5.2.** Iznosi sile u normalnom pogonskom stanju u 2D modelu

Faza	Trenutna sila pri $\varphi = 0^\circ$	Maksimalni iznos sile	Iznos sile prema IEC
A	$-3.969 \text{ N/m}$	$1.296 \text{ N/m}$	$2.991 \text{ N/m}$
B	$3.672 \text{ N/m}$	$4.305 \text{ N/m}$	$2.265 \text{ N/m}$
C	$2.729 \text{ N/m}$	$4.196 \text{ N/m}$	$2.991 \text{ N/m}$

Gustoća struje očitava se prema grafičkim iznosima polja gustoće struje. Grafički iznosi polja za primjer normalnog pogonskog stanja u 2D modelu prikazani su slikom 5.4. i dani u mjernoj jedinici  $[A/m^2]$ . Na toj slici se vidi raspodjela gustoće magnetskog toka gdje se već sada opažaju nejednoliko raspoređene silnice.

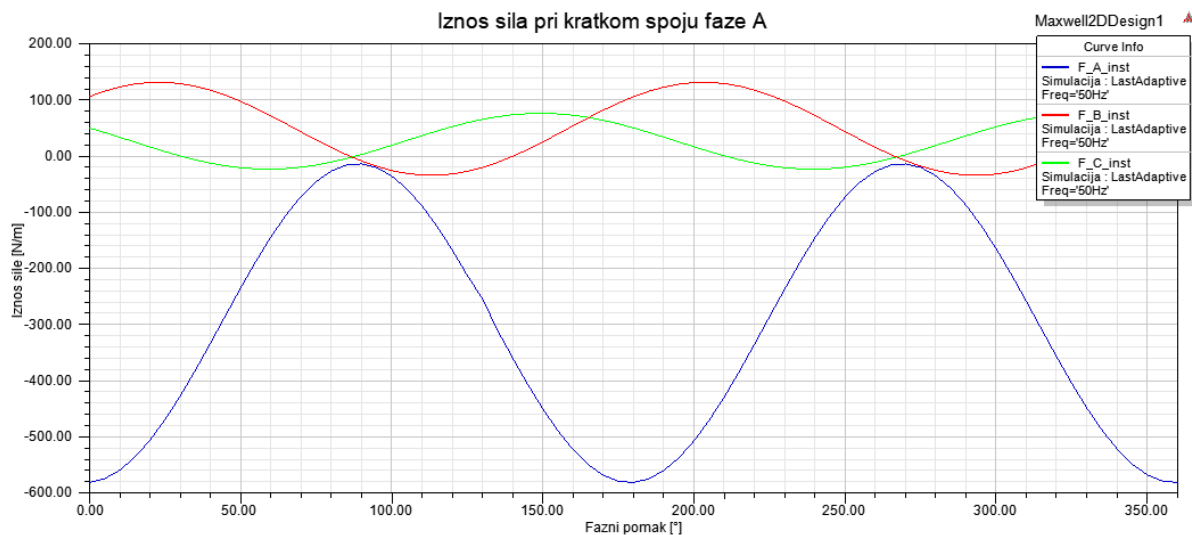


**Slika 5.4.** Gustoća struje i magnetski tok u normalnom pogonskom stanju u 2D modelu

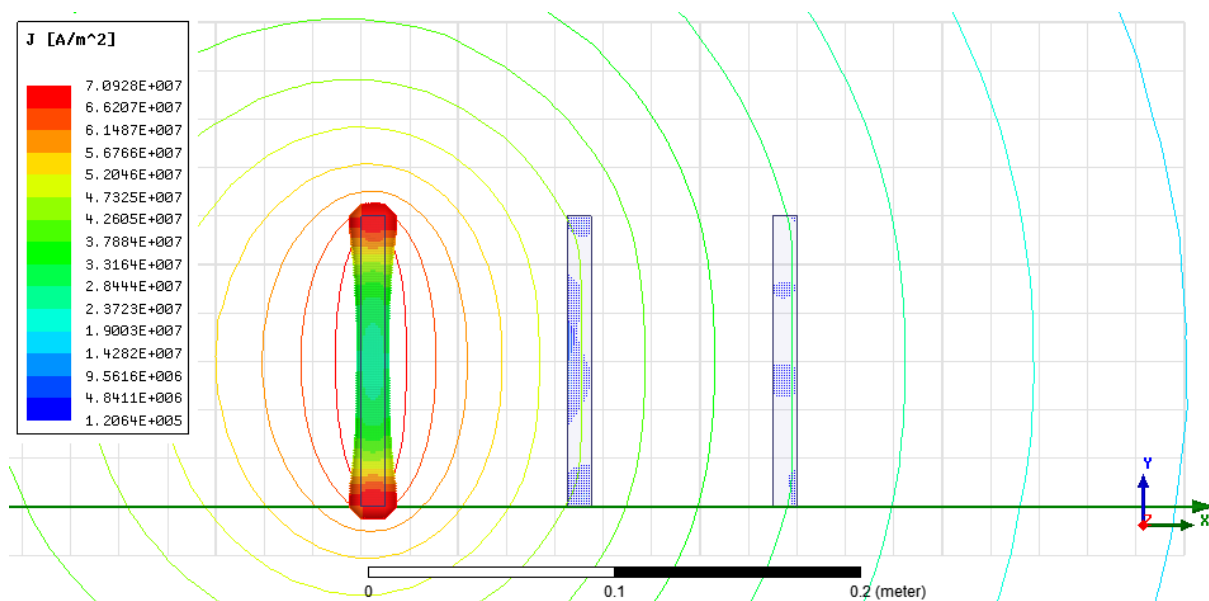
U radu se u nastavku promatra djelovanje jednofaznog kratkog spoja na pojedinu fazu vodiča te promjena induktiviteta, sile na pojedini vodič i gustoća struje. Struja kratkog spoja koja se javlja iznosa je od  $50 \text{ kA}$ . Rezultati simulacija prikazani su tablično.

**Tablica 5.3.** Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi A u 2D modelu

Faza	Iznosi otpora i induktiviteta		
A	$[18.339 \mu\Omega, 1.121 \mu H]$	$[1.676 \mu\Omega, 0.876 \mu H]$	$[0.511 \mu\Omega, 0.748 \mu H]$
B	$[1.676 \mu\Omega, 0.876 \mu H]$	$[18.686 \mu\Omega, 1.096 \mu H]$	$[1.645 \mu\Omega, 0.855 \mu H]$
C	$[0.511 \mu\Omega, 0.748 \mu H]$	$[1.645 \mu\Omega, 0.855 \mu H]$	$[18.44 \mu\Omega, 1.078 \mu H]$



Slika 5.5. Iznos sila u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi A u 2D modelu



Slika 5.6. Gustoća struje i magnetski tok pri kratkom spoju u fazi A u 2D modelu

Tablica 5.4. Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi A u 2D modelu

Faza	Trenutna sila pri $\varphi = 0^\circ$	Maksimalni iznos sile
A	$-552.061 \text{ N/m}$	$1.508 \text{ N/m}$
B	$106.497 \text{ N/m}$	$131.41 \text{ N/m}$
C	$49.704 \text{ N/m}$	$75.917 \text{ N/m}$

Prilikom nastupanja kratkog spoja u fazi A, dolazi do povećanja vrijednosti otpora i smanjenja vrijednosti induktiviteta unutar cijelog zapisa matrice impedancije. Djelovanje sile ima znatan utjecaj. Amplituda sile na fazi A najveće je vrijednosti. Gustoća struje u normalnom pogonskom

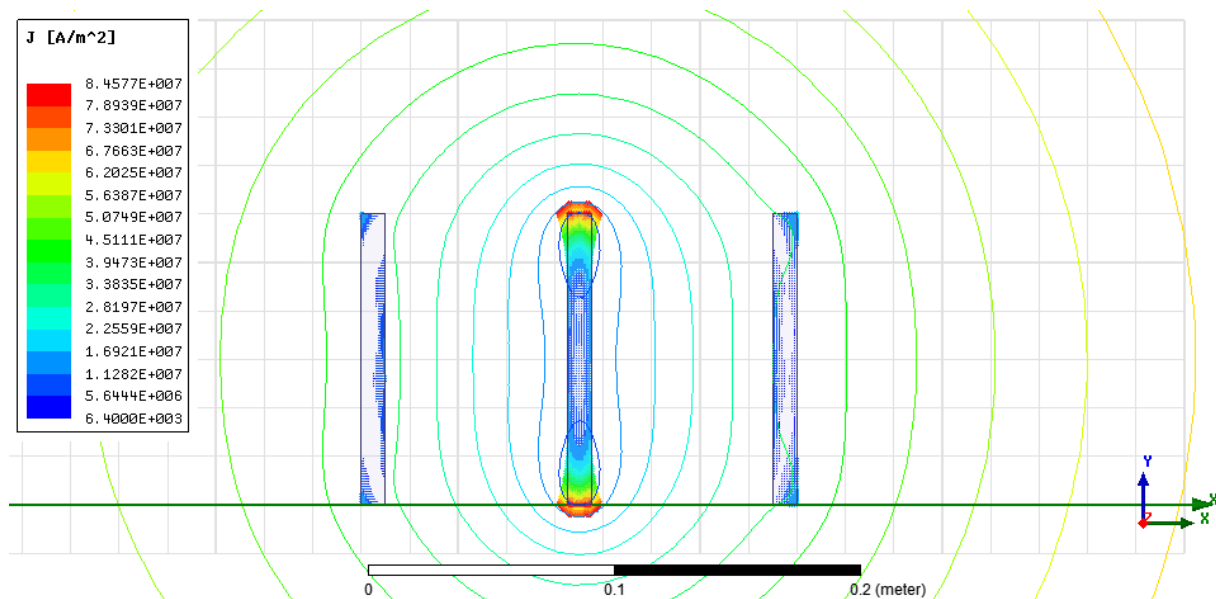
stanju raspoređena je u sve tri sabirnice, dok je kod kratkog spoja u fazi A došlo do zanemarivog iznosa gustoće struje na fazama B i C zbog toga što je gustoća struje u fazi A najizraženija.

**Tablica 5.5.** Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi B u 2D modelu

Faza	Iznosi otpora i induktiviteta		
A	[18.331 $\mu\Omega$ , 1.122 $\mu H$ ]	[1.64 $\mu\Omega$ , 0.877 $\mu H$ ]	[0.492 $\mu\Omega$ , 0.749 $\mu H$ ]
B	[1.64 $\mu\Omega$ , 0.877 $\mu H$ ]	[18.49 $\mu\Omega$ , 1.097 $\mu H$ ]	[1.592 $\mu\Omega$ , 0.856 $\mu H$ ]
C	[0.492 $\mu\Omega$ , 0.749 $\mu H$ ]	[1.592 $\mu\Omega$ , 0.856 $\mu H$ ]	[18.238 $\mu\Omega$ , 1.08 $\mu H$ ]



**Slika 5.7.** Iznos sile u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi B u 2D modelu



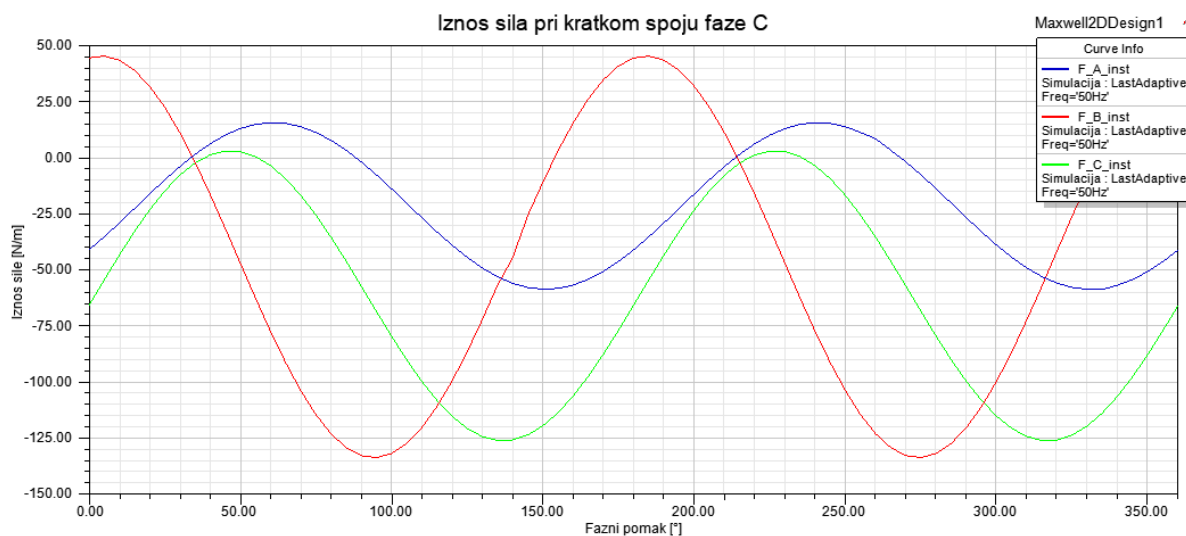
**Slika 5.8.** Gustoća struje i magnetski tok pri kratkom spoju u fazi B u 2D modelu

**Tablica 5.6.** Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi B u 2D modelu

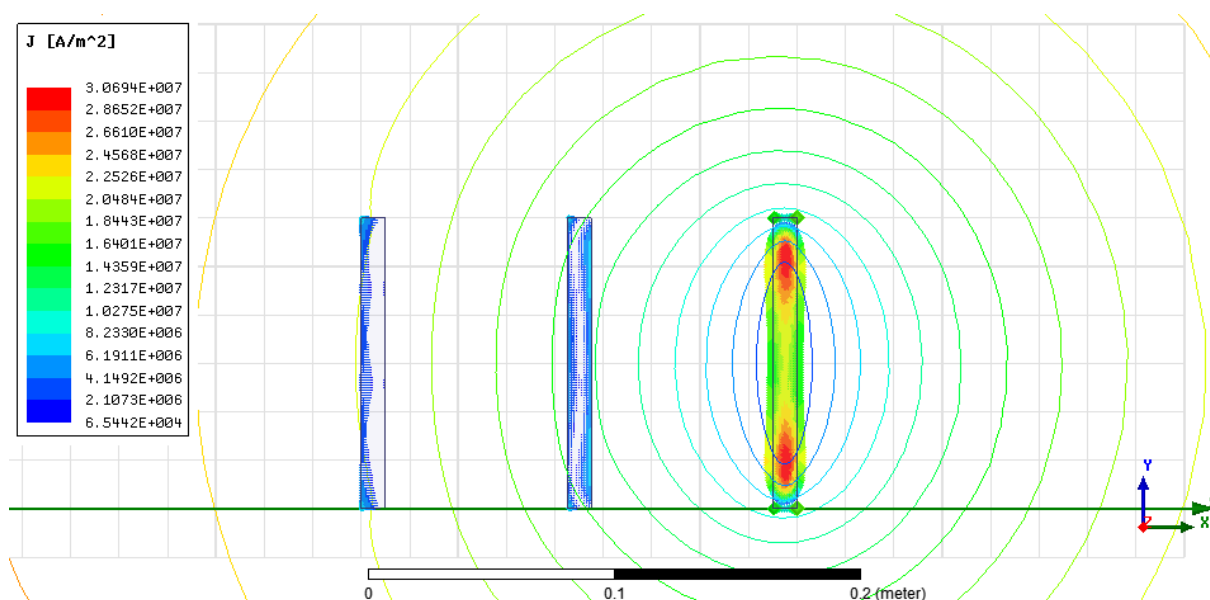
Faza	Trenutna sila pri $\varphi = 0^\circ$	Maksimalni iznos sile
A	-81.137 N/m	37.848 N/m
B	38.799 N/m	47.527 N/m
C	-23.688 N/m	128.44 N/m

**Tablica 5.7.** Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi C u 2D modelu

Faza	Iznosi otpora i induktiviteta		
A	[18.331 $\mu\Omega$ , 1.122 $\mu H$ ]	[1.639 $\mu\Omega$ , 0.877 $\mu H$ ]	[0.486 $\mu\Omega$ , 0.749 $\mu H$ ]
B	[1.639 $\mu\Omega$ , 0.877 $\mu H$ ]	[18.487 $\mu\Omega$ , 1.097 $\mu H$ ]	[1.574 $\mu\Omega$ , 0.857 $\mu H$ ]
C	[0.486 $\mu\Omega$ , 0.749 $\mu H$ ]	[1.574 $\mu\Omega$ , 0.857 $\mu H$ ]	[18.13 $\mu\Omega$ , 1.081 $\mu H$ ]



**Slika 5.9.** Iznos sila u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi C u 2D modelu



**Slika 5.10.** Gustoća struje i magnetski tok pri kratkom spoju u fazi C u 2D modelu

**Tablica 5.8.** Iznosi sile pri kratkom spoju u fazi C u 2D modelu

Faza	Trenutna sila pri $\varphi = 0^\circ$	Maksimalni iznos sile
A	$-40.979 \text{ N/m}$	$15.521 \text{ N/m}$
B	$42.365 \text{ N/m}$	$43.067 \text{ N/m}$
C	$-53.37 \text{ N/m}$	$11.674 \text{ N/m}$

Prilikom nastanka kratkog spoja u fazi B, ali i u fazi C, također dolazi do povećanja vrijednosti otpora i smanjenja vrijednosti induktiviteta unutar cijelog zapisa matrice impedancije. Gustoća struje nije toliko izražena jer utjecaj imaju fazni kutevi. U fazi B teče struja pod kutem  $120^\circ$ , a u fazi C pod kutem  $240^\circ$  dok je struja kratkog spoja pod kutem od  $0^\circ$  električnih. Gustoća struje pri kratkom spoju faze B u vrijednostima je  $kA/m^2$  što je tisuću puta manje od preostala dva slučaja pojave kratkog spoja.

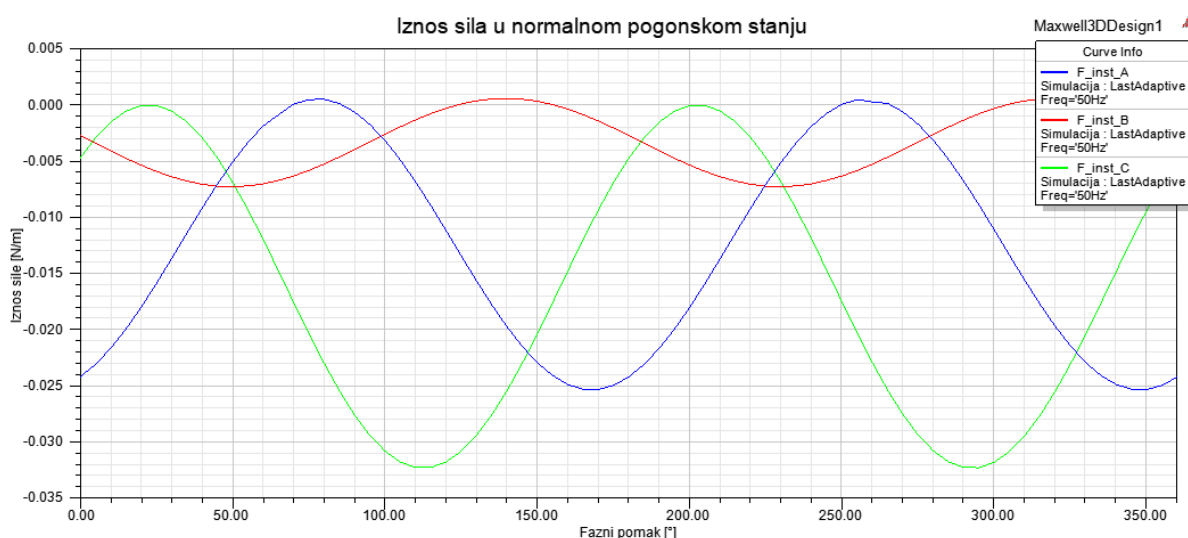
## 5.2. Prikaz rezultata 3D simulacije

Prvotno je odrađena simulacija u normalnom pogonskom stanju, s fazno pomaknutim strujama i iznosom od  $1650 \text{ A}$ , kao što je to odrađeno i u 2D modelu. Tablica 5.9. prikazuje matricu impedancije s iznosima otpora u  $\mu\Omega$  i induktiviteta u  $\mu H$ .

**Tablica 5.9.** Matrica impedancije u normalnom pogonskom stanju u 3D modelu

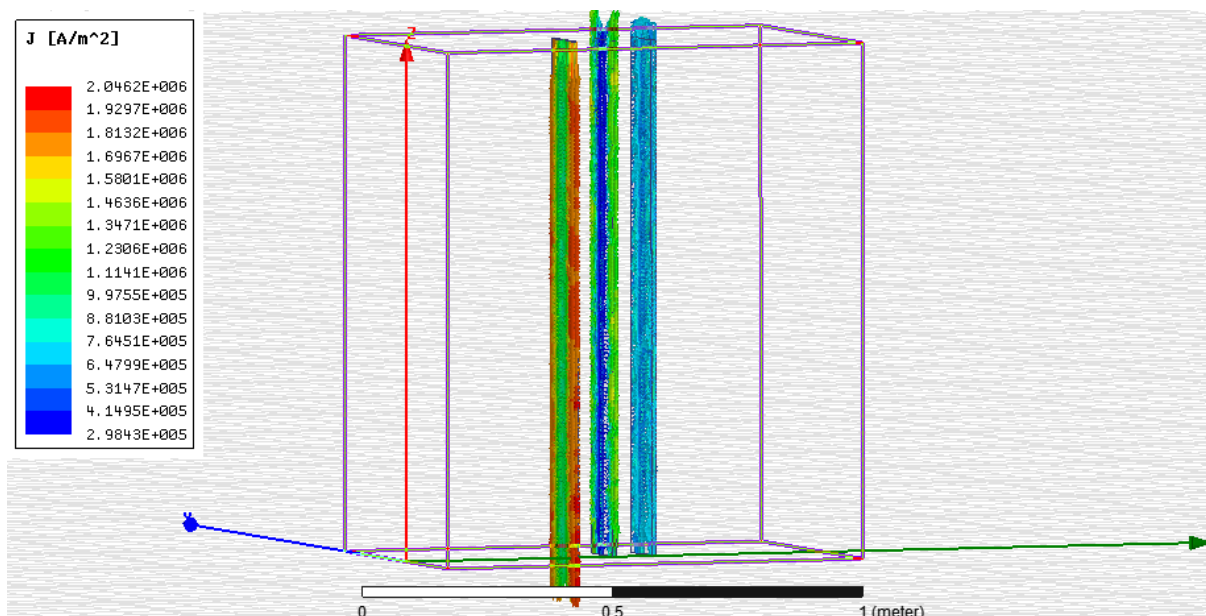
Faza	Iznosi otpora i induktiviteta		
A	[17.5 $\mu\Omega$ , 0.522 $\mu H$ ]	[1.168 $\mu\Omega$ , 0.279 $\mu H$ ]	[0.497 $\mu\Omega$ , 0.165 $\mu H$ ]
B	[1.168 $\mu\Omega$ , 0.279 $\mu H$ ]	[17.723 $\mu\Omega$ , 0.523 $\mu H$ ]	[1.232 $\mu\Omega$ , 0.279 $\mu H$ ]
C	[0.497 $\mu\Omega$ , 0.165 $\mu H$ ]	[1.232 $\mu\Omega$ , 0.279 $\mu H$ ]	[17.647 $\mu\Omega$ , 0.521 $\mu H$ ]

Na slici 5.11. plavom bojom predstavljena je sila faze A, crvenom bojom sila faze B i zelenom bojom sila faze C.



**Slika 5.11.** Iznos sila u sabirničkom sustavu u normalnom pogonskom stanju u 3D modelu

Gustoća struje očitava se prema grafičkim iznosima polja gustoće struje kako je prikazano slikom 5.12. i iskazana je u mjernoj jedinici jakosti struje po površini [ $A/m^2$ ].



**Slika 5.12.** Gustoća struje u normalnom pogonskom stanju u 3D modelu

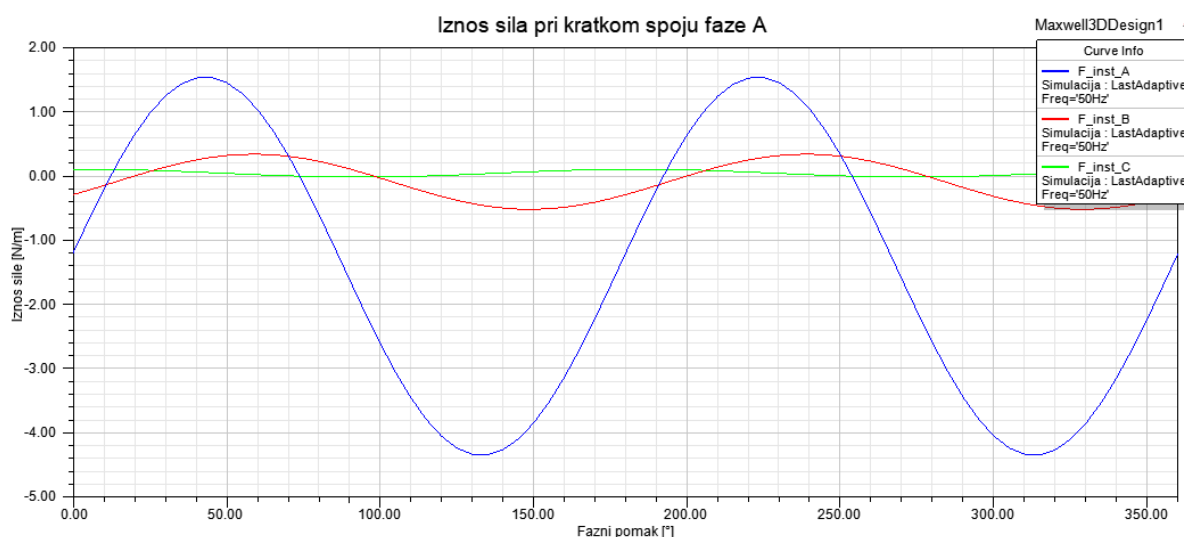
**Tablica 5.10.** Iznosi sila u normalnom pogonskom stanju u 3D modelu

Faza	Trenutna sila pri $\varphi = 0^\circ$	Maksimalni iznos sile
A	$-1.059 \text{ mN/m}$	$2.307 \text{ mN/m}$
B	$9.054 \text{ mN/m}$	$16.274 \text{ mN/m}$
C	$-4.692 \text{ mN/m}$	$0.342 \text{ mN/m}$

Mogu se primijetiti manji iznosi sila zbog toga što je model u 3D. Korištene su konačne dimenzije u sve tri osi, za razliku od 2D modela gdje je korištena x i y dimenzija. U radu se u nastavku promatra djelovanje jednofaznog kratkog spoja na pojedinu fazu vodiča, sve kao i u 2D modelu.

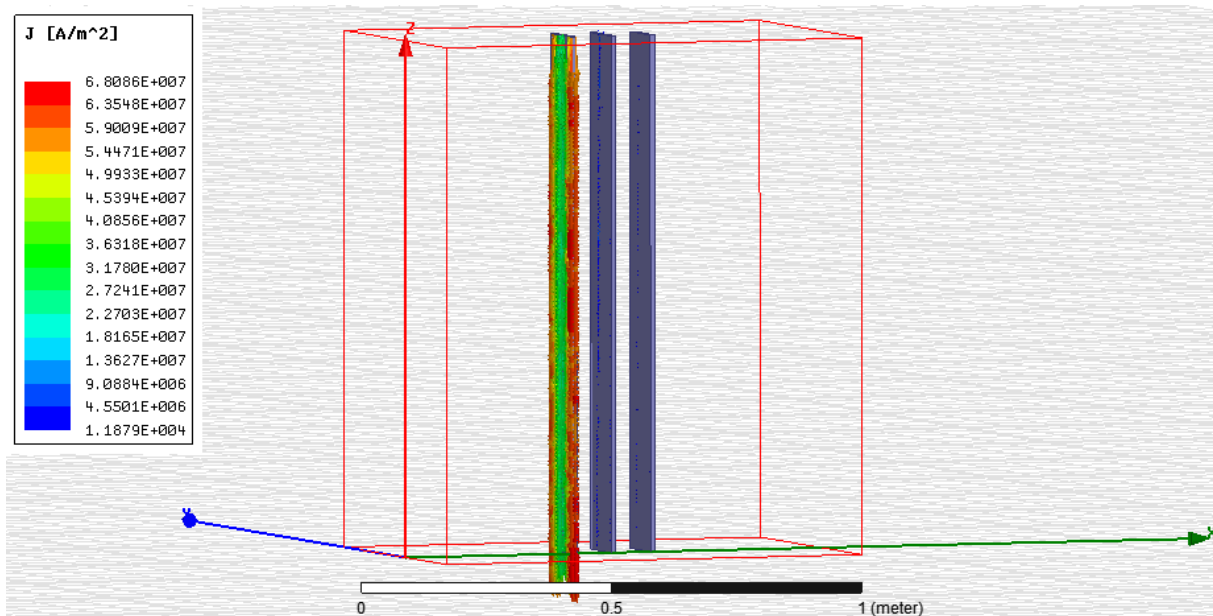
**Tablica 5.11.** Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi A u 3D modelu

Faza	Iznosi otpora i induktiviteta		
A	$[17.817 \mu\Omega, 0.519 \mu H]$	$[1.262 \mu\Omega, 0.278 \mu H]$	$[0.526 \mu\Omega, 0.165 \mu H]$
B	$[1.262 \mu\Omega, 0.278 \mu H]$	$[17.833 \mu\Omega, 0.522 \mu H]$	$1.242 \mu\Omega, 0.279 \mu H]$
C	$[0.526 \mu\Omega, 0.165 \mu H]$	$[1.242 \mu\Omega, 0.279 \mu H]$	$[17.664 \mu\Omega, 0.52 \mu H]$



**Slika 5.13.** Iznos sila u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi A u 3D modelu





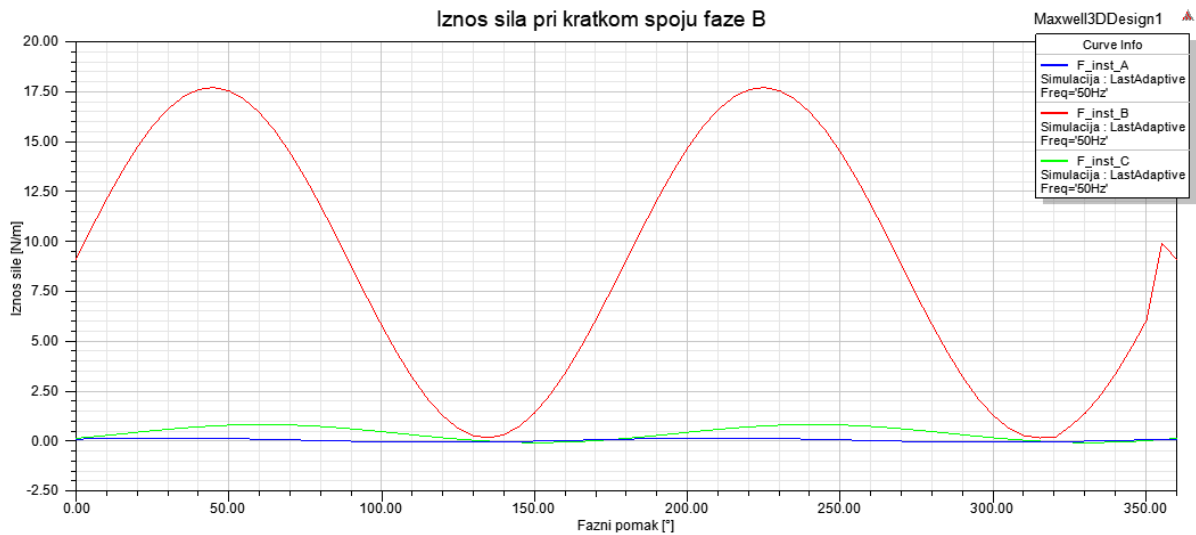
Slika 5.14. Gustoća struje pri kratkom spoju u fazi A u 3D modelu

Tablica 5.12. Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi A u 3D modelu

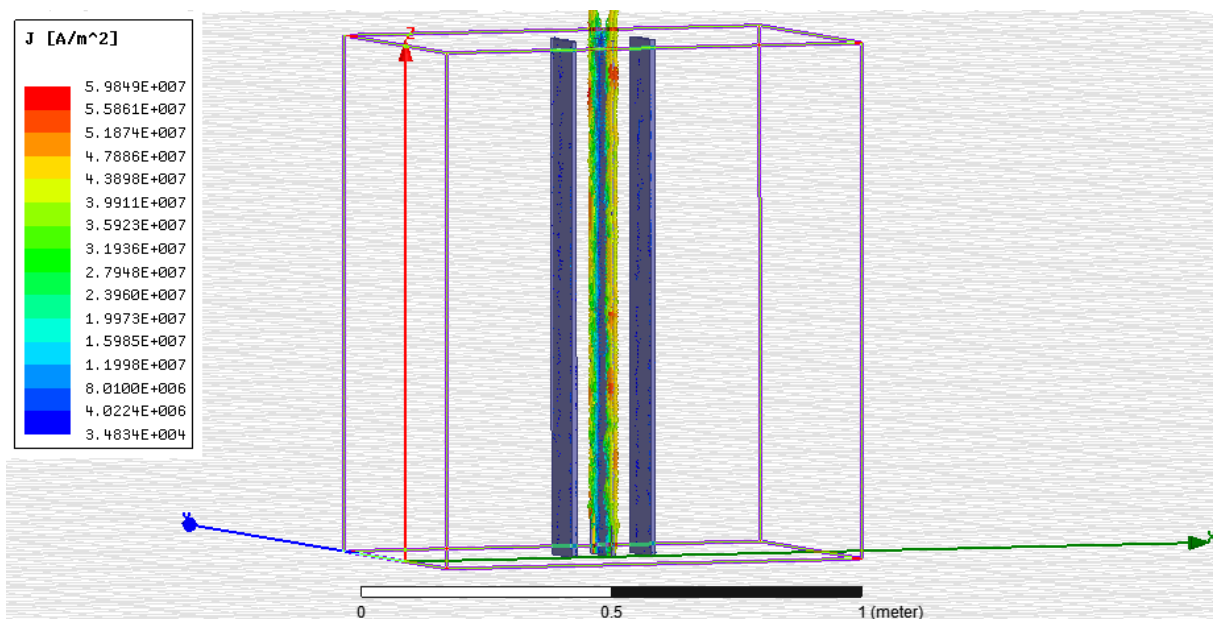
Faza	Trenutna sila pri $\varphi = 0^\circ$	Maksimalni iznos sile
A	$-1.201 \text{ N/m}$	$1.529 \text{ N/m}$
B	$-0.293 \text{ N/m}$	$0.336 \text{ N/m}$
C	$0.101 \text{ N/m}$	$0.102 \text{ N/m}$

Tablica 5.13. Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi B u 3D modelu

Faza	Iznosi otpora i induktiviteta		
A	$[17.817 \mu\Omega, 0.519 \mu H]$	$[1.262 \mu\Omega, 0.278 \mu H]$	$[0.526 \mu\Omega, 0.165 \mu H]$
B	$[1.262 \mu\Omega, 0.278 \mu H]$	$[17.833 \mu\Omega, 0.522 \mu H]$	$[1.242 \mu\Omega, 0.278 \mu H]$
C	$[0.526 \mu\Omega, 0.165 \mu H]$	$[1.242 \mu\Omega, 0.278 \mu H]$	$[17.664 \mu\Omega, 0.52 \mu H]$



Slika 5.15. Iznos sila u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi B u 3D modelu



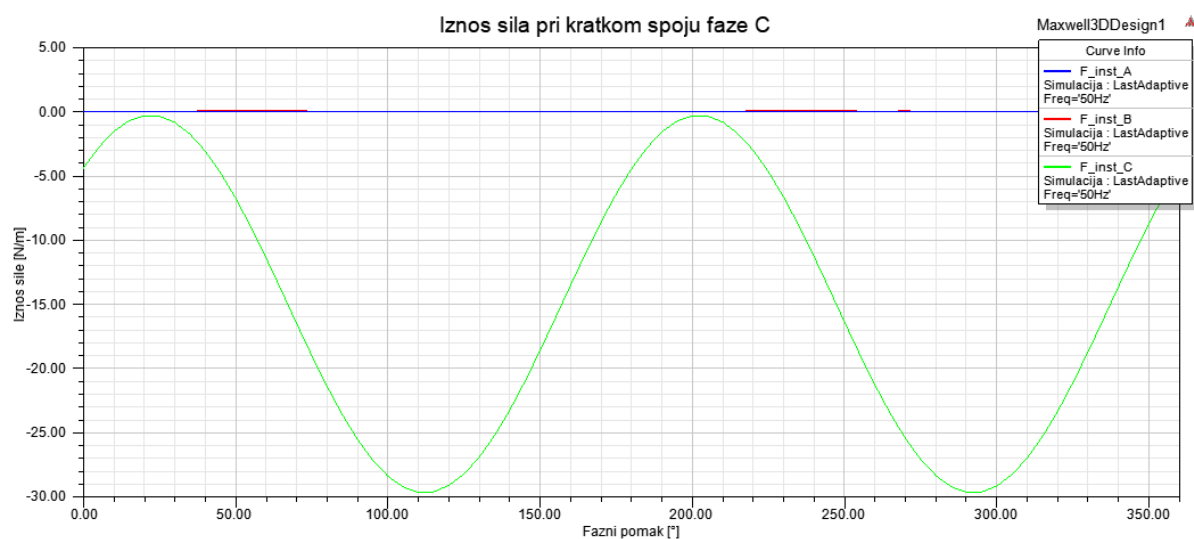
Slika 5.16. Gustoća struje pri kratkom spoju u fazi B u 3D modelu

Tablica 5.14. Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi B u 3D modelu

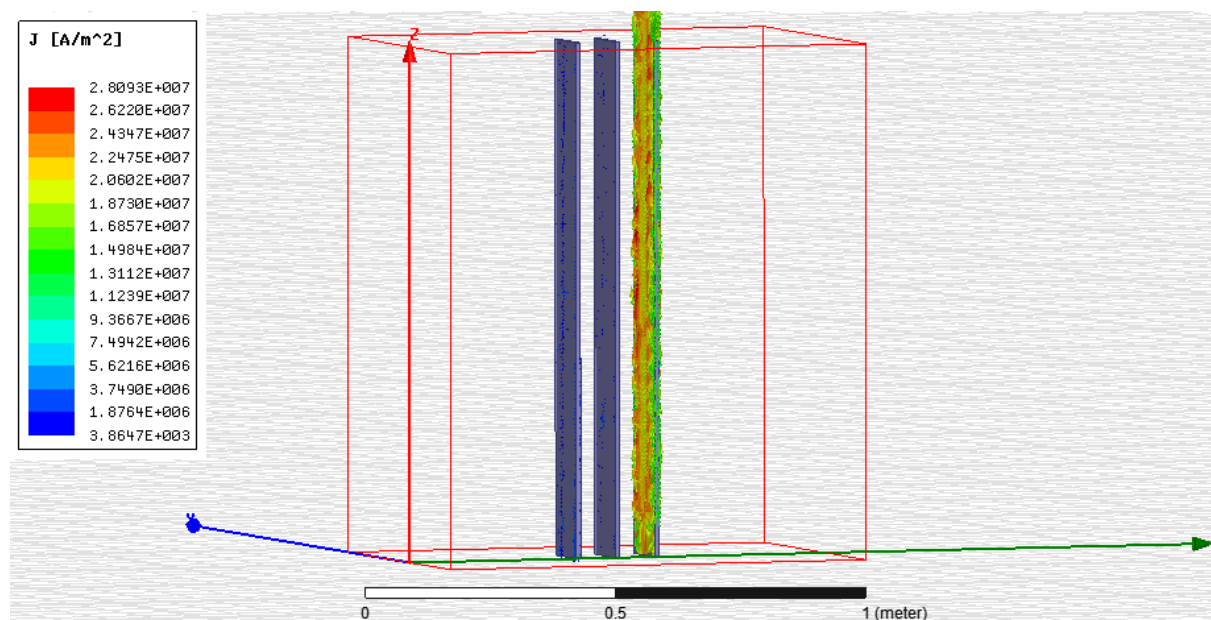
Faza	Trenutna sila pri $\varphi = 0^\circ$	Maksimalni iznos sila
A	0.113 N/m	0.164 N/m
B	9.071 N/m	17.685 N/m
C	0.152 N/m	0.841 N/m

**Tablica 5.15.** Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi C u 3D modelu

Faza	Iznosi otpora i induktiviteta		
A	[17.817 $\mu\Omega$ , 0.519 $\mu H$ ]	[1.262 $\mu\Omega$ , 0.278 $\mu H$ ]	[0.526 $\mu\Omega$ , 0.165 $\mu H$ ]
B	[1.262 $\mu\Omega$ , 0.278 $\mu H$ ]	[17.833 $\mu\Omega$ , 0.522 $\mu H$ ]	[1.242 $\mu\Omega$ , 0.278 $\mu H$ ]
C	[0.526 $\mu\Omega$ , 0.165 $\mu H$ ]	[1.242 $\mu\Omega$ , 0.278 $\mu H$ ]	[17.664 $\mu\Omega$ , 0.52 $\mu H$ ]



**Slika 5.17.** Iznos sile u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi C u 3D modelu



**Slika 5.18.** Gustoća struje pri kratkom spoju u fazi C u 3D modelu

**Tablica 5.16.** Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi C u 3D modelu

Faza	Trenutna sila pri $\varphi = 0^\circ$	Maksimalni iznos sile
A	$-35.758 \text{ mN/m}$	$-3.551 \text{ mN/m}$
B	$-8.736 \text{ mN/m}$	$63.929 \text{ mN/m}$
C	$-4437.25 \text{ mN/m}$	$-319.3 \text{ mN/m}$

Promatrajući rezultate simulacije, impedancija u 2D modelu većeg je iznosa dva do tri puta od impedancije u 3D modelu. Točnije, radi se o iznosima induktiviteta. Utjecaj na to imaju uvjeti na krajevima sabirnica jer su u 3D modelu krajevi sabirnica zapravo konačnih dimenzija, dok su u 2D modelu, kao i u izračunu, krajevi sabirnica beskonačnih dimenzija. Iznos otpora sabirničkog sustava može se usporediti pomoću kalkulatora preko volumne gustoće gubitaka (eng. *Ohmic losses*). Relacija za izračun dana je sa (5-4), a proračun u kalkulatoru potrebno je izvršiti za normalno pogonsko stanje, tri kratka spoja, i tako za 2D i 3D model.

$$R = \frac{\text{Ohmic losses}}{I^2} \quad (5-4)$$

Odstupanje je 4 %, što je u dozvoljenim granicama. U nastavku su tablice za usporedbu elektromagnetske sile.

Pošto je poznat iznos otpora svakog pojedinog vodiča sabirnice u vrijednosti od  $18.86 \mu\Omega$  u prosjeku, a iznos opterećenja ima vrijednost  $2.1415 \text{ m}\Omega$ , tada je ukupni otpor faze  $2.16 \text{ m}\Omega$ . Poznat je i iznos induktiviteta odnosno reaktancije. Dakle, ukupna impedancija je u iznosu od  $8.657 \text{ m}\Omega$ . S tim podatkom može se izračunati trofazna struja kratkog spoja, ali i vršna vrijednost struje. Ovo je potrebno radi usporedbe iznosa maksimalne sile dobivene numeričkim i simulacijskim putem. Naravno, vrijednosti dobivene numeričkim putem ovise o početnim fazama napona i struje u vremenu kratkog spoja. Zbog toga maksimalne vrijednosti za tri faze nemaju iste vrijednosti.

**Tablica 5.17.** Ukupni efektivni iznosi sila u 2D modelu

Faza	Normalno pogonsko stanje	Kratki spoj faze A	Kratki spoj faze B	Kratki spoj faze C
A	$3.016 \text{ N/m}$	$396.39 \text{ N/m}$	$119.66 \text{ N/m}$	$52.82 \text{ N/m}$
B	$6.166 \text{ N/m}$	$112.43 \text{ N/m}$	$257.61 \text{ N/m}$	$76.09 \text{ N/m}$
C	$3.117 \text{ N/m}$	$70.16 \text{ N/m}$	$108.11 \text{ N/m}$	$126.85 \text{ N/m}$

**Tablica 5.18.** Ukupni efektivni iznosi sila u 3D modelu

Faza	Normalno pogonsko stanje	Kratki spoj faze A	Kratki spoj faze B	Kratki spoj faze C
A	18.23 mN/m	4133.7 mN/m	147.51 mN/m	35.69 mN/m
B	5.55 mN/m	606.27 mN/m	12630.1 mN/m	55.95 mN/m
C	22.88 mN/m	82.31 mN/m	635.63 mN/m	21181.1 mN/m

Prilikom nastanka kratkog spoja, opaža se pojava relativno velike elektromagnetske sile. Tu elektromagnetsku silu proizvodi struja koja teče kroz susjedne vodiče u sabirnicama, a određuje se prema amplitudi struje kratkog spoja. Opažaju se dva perioda valnog oblika elektromagnetske sile u rasponu od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  električnih. Veličina, geometrija i razmak između vodiča sabirnica dodatni su čimbenici koji smanjuju ili povećavaju iznos sile. Zbog uvedene relacije (3-21) sa pojmom efektivnog razmaka, iznos sile je točniji. Dakako, elektromagnetska sila ovisi o gustoći struje i gustoći magnetskog toka vodiča. Što je veća struja koju provodi sabirnica, nastaje veći magnetski tok oko vodiča. Poznato je da ova sila može biti toliko jaka da ošteti sabirnice. Kada se tri paralelna vodiča kroz koje protječe struja nalaze u magnetskom polju, osjećaju elektromagnetsku silu između svakog vodiča. Unutar središnje faze sabirničkog sustava javlja se najveća vrijednost sile zbog toga što vodič središnje faze (faza B) dobiva utjecaj struje koja prolazi kroz vodiče susjednih faza (faza A i faza C). Sile između vodiča također ovise o geometrijskom rasporedu i profilu vodiča. Ukoliko se poveća razmak između faza sabirnica, međuinuktivitet ima manji utjecaj, a veći promjer (površina) sabirnice zahtjeva veću struju provođenja. Nadalje, gustoća struje u fazama neravnomjerno je raspoređena i nema stalnu vrijednost. Utjecaj imaju skin efekt i efekt blizine. Efekt blizine izraženiji je, posebno ako su fazni vodiči međusobno bliži. To je i zbog međusobne fazne razlike od  $120^\circ$  električnih. Inače, kao posljedica toga, dolazi do zagrijavanja samog vodiča sabirnice, različitih iznosa temperatura duž sabirnica te onda i do Jouleovih gubitaka. Prilikom FEM analize, u obzir su uzeti skin efekt, efektivna udaljenost (a ne srednja udaljenost) te se sa pokretljivom mrežom (eng. *Grid mesh*) dobivaju bolji i točniji rezultati. Kroz broj prolazaka (eng. *Number of passes*) u rezultatima simulacije moguće je vidjeti kako se mijenjao rezultat simulacije te da li je konačan rezultat dovoljno kvantitivan. Najčešće istraživanja u radovima iz literature, kao i numeričke metode, nisu dovoljno precizne jer zanemaruju interakciju između električnog, magnetskog, termičkog i mehaničkog ponašanja. Najčešće je poneki element zanemaren.

## 6. ZAKLJUČAK

Razvoj sabirničkih sustava u zamahu je posljednjih desetljeća. U praksi se kombinira raspored vodiča faza i nosača sabirnica kako bi djelovanje elektromagnetske sile u drugim fazama bilo znatno smanjeno. Većina radova promatra samo vršnu vrijednost struje kratkog spoja sa procjenom magnetske sile, porasta temperature, mehanički pomak i njihovu međusobnu interakciju, kao i učinak nosača sabirnica. U elektroenergetici je uobičajena praksa da se po fazi koriste paralelni vodiči, posebno u slučaju visokih nazivnih struja i kratkih spojeva. To se radi kako bi se smanjila razina struje koja teče u svakom vodiču, što zauzvrat uzrokuje smanjenje proizvedenih magnetskih sila.

U ovom radu je prikazana simulacija djelovanja induktiviteta, elektromagnetske sile i gustoća struje pri nastanku kratkog spoja u svakoj pojedinoj fazi. Prvotno je pri izradi modela važno postaviti sabirnički sustav tako da struja prolazi duž sabirnice (pravilo desne ruke). Sustav je linearan jer je okoliš ujedno zrak (vakuum) pa se vrijednosti otpora i induktiviteta ne mijenjaju s jakošću struje. Otpor i induktivitet se mijenjaju jedino u ovisnosti o frekvenciji, i to tako da otpor ovisi izraženije o frekvenciji nego induktivitet. Ukoliko bi došlo do većeg razmaka između faza sabirnica, manji bi bio utjecaj međuinduktiviteta. Prekomjerne struje kratkog spoja rezultiraju i brzim porastom temperature, ali temperatura se nije promatrala u ovom radu. A poznato je kako Joulovi gubici rastu sa porastom temperature. Pretpostavka je da je struja kratkog spoja podjednako raspoređena unutar faze sabirnice. U 2D modelu, rezultati simulacije za elektromagnetsku silu točniji su nego u 3D modelu zbog toga što ima manje podjele mreže (eng. *Grid mesh*). Ali analiza u praksi se najčešće radi u 3D modelu jer je taj model simetričan duž jedne osi, a to je glavni uvjet. Nasuprot tome, povećanjem mreže izaziva se duže trajanje simulacije. Numerički pristup modelu omogućuje procjenu raspodjele gustoće struje unutar masivnog vodiča, a iz raspodjele struje moguće je procijeniti neke električne parametre (npr. skin efekt, onečišćenje magnetskog polja okoliša, elektrodinamičke sile, temperaturu različitih komponenti) sustava sabirnica. Obično je 2D model dovoljan jer je komponenta invarijantna po svojoj duljini. Istodobno, analitički modeli imaju ključnu ulogu u polju sabirnica jer predstavljaju brzu i konačnu metodu za dizajn koji ne zahtijeva korištenje numeričkog koda. Proizvođači sklopnih uređaja se ne oslanjaju samo na standarde, jer trebaju voditi računa i o praktičnim razmatranjima. Visina i širina rasklopnih uređaja, lokacije dolaznih i odlaznih odvodnika i način postavljanja razvodnih uređaja na mjestu kupca spadaju u praktična razmatranja koja utječu na dizajn sustava sabirnice, tako da se dizajn sustava sabirnica sastoji od različitih nazivnih struja, oblika kabina razvodnih uređaja i slično.

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA

$a, b, c, d$	Veličine dimenzija vodiča sabirnica
$B$	Gustoća magnetskog polja
$B_z$	Okomito polje magnetske indukcije
$\bar{B}^*$	Konjugirani vektor iznosa jakosti magnetskog polja
$\vec{B} d\vec{S}$	Vektor jakosti gustoće magnetskog toka unutar vektorskog polja $\vec{S}$
$d$	Udaljenost
$d_m$	Efektivna udaljenost, Dwightov koeficijent
$dI$	Promjena struje
$dt$	Promjena u vremenu
$\vec{D} d\vec{S}$	Vektor gustoće električnog toka sa točkama na liniji $l$ unutar vektorskog polja $\vec{S}$
$div \vec{B}$	Divergencija vektora gustoće magnetskog toka te preslikava vektorsko polje u skalarno
$div \vec{D}$	Divergencija vektora gustoće električnog toka te preslikava vektorsko polje u skalarno
$E$	Intenzitet električnog polja
$E_y$	Transverzalno električno polje
$\vec{E} d\vec{l}$	Vektori jakosti magnetskog polja koji imaju hvatište na putanji $l$
$F_L$	Lorentzova sila
$\vec{H} d\vec{l}$	Vektori jakosti magnetskog polja koji imaju hvatište na putanji $l$
$I_{sc}$	Struja kratkog spoja
$\vec{j} d\vec{S}$	Tok vektora vektorskog polja kroz nezatvorenu krivulju
$J$	Gustoća struje
$\vec{j}$	Vektor jakosti gustoće struje
$k_1$	Korekcijski faktor
$l$	Zatvorena krivulja
$L$	Induktivitet
$L_{hh} = L_{kk}$	Dijagonala matrice impedancije koja predstavlja samoinduktivitet
$M_{hk} = M_{kh}$	$h$ -ti redak i $k$ -ti stupac matrice impedancije koji predstavljaju međuintektivitet
$Q_{loss}$	Izvor topline zbog električnih gubitaka
$R$	Otpor

$R_H$	Hallova konstanta ili Hallov otpor
$rot \vec{E}$	Rotacija vektorskog polja jakosti električnog polja
$rot \vec{H}$	Rotacija vektorskog polja jakosti magnetskog polja
$S$	Površina
$T$	Temperatura
$U$	Napon
$U_N$	Nominalna (nazivna) vrijednost napona
$V_m$	RMS vrijednost izvora napona
$Z$	Ukupna impedancija
$X$	Ukupna reaktancija
$\alpha$	Fazni kut struje
$\delta$	Debljina prodiranja elektromagnetskog vala
$\mu$	Magnetska permeabilnost jednaka umnošku $\mu_r \cdot \mu_0$ , (za bakar $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ )
$\rho$	Električna otpornost koja za bakar iznosi $1,68 \cdot 10^{-8} \Omega m$ na sobnoj temperaturi
$\rho dV$	Volumna gustoća naboja
$\sigma$	Električna vodljivost koja za bakar iznosi $5,96 \cdot 10^7 S/m$ na sobnoj temperaturi
$\tau$	Vremenska konstanta
$\omega$	Kružna frekvencija jednaka iznosu $2\pi f$
$\Phi$	Magnetski tok
$\frac{\partial}{\partial t} \vec{D}$	Parcijalna derivacija vektora gustoće električnog toka



## LITERATURA

- [1] A. Lovas, Sabirnički sustavi u elektroenergetskim postrojenjima, Završni rad, Osijek, 2018.
- [2] Siemens 8US Busbar System, pristup: 21.3.2020  
<https://www.youtube.com/watch?v=V1gcKgRfhjU>
- [3] IEC 439, Low Voltage Switchgear and Controlgear Assemblies, Part II: Particular Requirements for Busbar Trunking Systems (Busways), 1987.
- [4] Y. Du, J. Burnett, Z.C. Fu, Experimental and numerical evaluation of busbar trunking impedance, Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- [5] F. Delgado, C.J. Renedo, A. Ortiz, I. Fernández, A. Santisteban, 3D thermal model and experimental validation of a low voltage three-phase busduct, Applied Thermal Engineering, 2015
- [6] G. Kadkhodaei, K. Sheshyekani, M. Hamzeh, S.D. Tavakoli, Multiphysics analysis of busbars with various arrangements under short-circuit condition, IET Electrical Systems in Transportation, 2016.
- [7] G. Kadkhodaei, K. Sheshyekani, M. Hamzeh, Coupled electric – magnetic – thermal – mechanical modelling of busbars under short–circuit conditions, IET Generation, Transmission & Distribution, 2015.
- [8] W.H. Middendorf, Design of devices and systems, CRC Press, United States, 1997.
- [9] J.K. Kim, S.C. Hahn, Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magnetothermal finite element method, IEEE Trans. Magn., 2005.
- [10] IEC low–voltage switchgear and controlgear – general rules, IEC Std. 60947-1, 2004.
- [11] R. Nedeljković, Maxwelllove jednadžbe i kovarijantna formulacija klasične elektrodinamike, Završni rad, Osijek, 2019.
- [12] T. Livaja, Simetričnost Maxwellovih jednadžbi, Završni rad, Osijek, 2015.
- [13] S. Lemeš, Historijski razvoj, principi i primjena metoda konačnih elemenata, Univerzitet u Zenici, 2014.
- [14] A. Canova, L. Giaccone, Numerical and analytical modeling of busbar systems, IEEE Transactions on Power Delivery, 2009.
- [15] W. Frix, G. Karady, A circuital approach to estimate the magnetic field reduction of nonferrous metal shields, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1997.
- [16] A. Canova, G. Grusso, M. Repetto, Integral methods for analysis and design of low-frequency conductive shields, IEEE Transactions on Magnetics, 2003.

- [17] F. Groover, *Inductance Calculation: Working Formulas and Tables*, New York: Van Nostrand, 1947.
- [18] IEC Std. 60865-1, *Short-circuit currents - calculation of effects - part 1: definitions and calculation methods*, Geneve, 1993.
- [19] I. Kasikci, *Short Circuits in Power Systems*, Wiley-VCH Verlag-GmbH, 2002.
- [20] J.P. Thierry, C. Killindjian, *Electrodynamic Forces on Busbars in LV Systems*, Cahier Technique Merlin Gerin, 1996.
- [21] Skupina autora, *Maxwell Online Help (Release 18.0)*, ANSYS, Inc., Canonsburg, 2016.

## POPIS SLIKA I TABLICA

- Slika 2.1. Primjer sabirnica „Siemens 8US“, [2]
- Slika 2.2. Primjeri prolaska sabirnica unutar metalnog kućišta, [5]
- a) Neodvojene faze,
  - b) Neodvojene faze sa 2 zaštitna vodiča,
  - c) Neodvojene faze sa metalnim kućištem,
  - d) Izolirana fazna sabirnica sa 2 vodiča po fazi
- Slika 2.3. Primjeri povezivanja sabirničkih sustava, [5]
- a) Tradicionalni (sa pločicama i vijcima),
  - b) Monoblok (sa pločicama i vijcima)
- Slika 3.1. Podjela masivnog vodiča u MC modelu, [14]
- Slika 4.1. Početni prikaz novog modela u ANSYS Maxwell programu
- Slika 4.2. Model sabirničkog sustava sa parametrima
- Slika 4.3. Prikaz novog modela u ANSYS Maxwell programu nakon početnih uvjeta
- Slika 4.4. 2D model sabirničkog sustava u ANSYS Maxwell programu
- Slika 4.5. Validation Check uspješno proveden
- Slika 4.6. Prvi korak pri pretvorbi 2D u 3D model
- Slika 4.7. 3D model sabirničkog sustava u ANSYS Maxwellu
- Slika 5.1. Određivanje vrijednosti potrebnih dijagonala
- Slika 5.2. Iznos sila u fazi A u normalnom pogonskom stanju u 2D modelu
- Slika 5.3. Iznos sila u sabirničkom sustavu u normalnom pogonskom stanju u 2D modelu
- Slika 5.4. Gustoća struje i magnetski tok u normalnom pogonskom stanju u 2D modelu
- Slika 5.5. Iznos sila u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi A u 2D modelu
- Slika 5.6. Gustoća struje i magnetski tok pri kratkom spoju u fazi A u 2D modelu
- Slika 5.7. Iznos sila u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi B u 2D modelu
- Slika 5.8. Gustoća struje i magnetski tok pri kratkom spoju u fazi B u 2D modelu
- Slika 5.9. Iznos sila u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi C u 2D modelu
- Slika 5.10. Gustoća struje i magnetski tok pri kratkom spoju u fazi C u 2D modelu
- Slika 5.11. Iznos sila u sabirničkom sustavu u normalnom pogonskom stanju u 3D modelu
- Slika 5.12. Gustoća struje u normalnom pogonskom stanju u 3D modelu
- Slika 5.13. Iznos sila u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi A u 3D modelu
- Slika 5.14. Gustoća struje pri kratkom spoju u fazi A u 3D modelu
- Slika 5.15. Iznos sila u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi B u 3D modelu

- Slika 5.16. Gustoća struje pri kratkom spoju u fazi B u 3D modelu
- Slika 5.17. Iznosi sila u sabirničkom sustavu pri kratkom spoju u fazi C u 3D modelu
- Slika 5.18. Gustoća struje pri kratkom spoju u fazi C u 3D modelu
- 
- Tablica 3.1. Maxwellove jednadžbe
- Tablica 4.1. Specifikacije modela sabirničkog sustava
- Tablica 5.1. Matrica impedancije u normalnom pogonskom stanju u 2D modelu
- Tablica 5.2. Iznosi sila u normalnom pogonskom stanju u 2D modelu
- Tablica 5.3. Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi A u 2D modelu
- Tablica 5.4. Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi A u 2D modelu
- Tablica 5.5. Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi B u 2D modelu
- Tablica 5.6. Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi B u 2D modelu
- Tablica 5.7. Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi C u 2D modelu
- Tablica 5.8. Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi C u 2D modelu
- Tablica 5.9. Matrica impedancije u normalnom pogonskom stanju u 3D modelu
- Tablica 5.10. Iznosi sila u normalnom pogonskom stanju u 3D modelu
- Tablica 5.11. Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi A u 3D modelu
- Tablica 5.12. Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi A u 3D modelu
- Tablica 5.13. Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi B u 3D modelu
- Tablica 5.14. Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi B u 3D modelu
- Tablica 5.15. Matrica impedancije pri kratkom spoju u fazi C u 3D modelu
- Tablica 5.16. Iznosi sila pri kratkom spoju u fazi C u 3D modelu
- Tablica 5.17. Ukupni efektivni iznosi sila u 2D modelu
- Tablica 5.18. Ukupni efektivni iznosi sila u 3D modelu

## SAŽETAK

U ovom diplomskom radu simuliran je sabirnički sustav koji se sastoji od po jednog vodiča u svakoj od tri faze sustava. Sabirnički sustav modeliran je u 2D i 3D izgledu unutar ANSYS Maxwell programskog alata. Na svakoj pojedinoj fazi nastao je kratki spoj sa strujom od 50 kA. Promatrane veličine su iznos induktiviteta, sile i raspodjela gustoće struje. Geometrija je iskorištena iz literature gdje je sustav već testiran prema IEC 60947-1 standardu. Ovaj sabirnički sustav trebao bi izdržati amplitude nastale zbog struje kratkog spoja. Prilikom provođenja simulacija, opisani su detaljni koraci koji su odrađeni u ANSYS Maxwellu, kao što je crtanje geometrije, parametriranje modela, dodjeljivanje materijala i graničnih uvjeta. Nakon provedenih simulacija, ponuđeni su rezultati sa usporedbom gore navedenih parametara te kratak zaključak.

Ključne riječi: sabirnički sustav, elektromagnetsko polje, ANSYS Maxwell, struja kratkog spoja

## ABSTRACT

In this thesis is simulated a busbar system consisting of one conductor in each of the three phases of the system. The busbar system is modeled in 2D and 3D layout within the ANSYS Maxwell software tool. At each conductor is occurred a short circuit with a current of 50 kA occurred. The observed parameters are the amount of inductance, force and distribution of current density. The geometry is used from the literature where the system has already been tested according to the IEC 60947-1 standard. This busbar system should withstand the amplitudes caused by a short circuit current. In the simulations, detailed steps performed in ANSYS Maxwell are described, such as geometry drawing, model parameterization, material assignment and boundary conditions. After the simulations, the results are offered with a comparison of the above parameters and a brief conclusion.

Keywords: busbar system, electromagnetic field, ANSYS Maxwell, short circuit current

## ŽIVOTOPIS

Karolina Kovač rođena je 20. prosinca 1995. u Čakovcu, sa trenutnim prebivalištem u Slavanskom Brodu. Pohađala je osnovnu školu „Hugo Badalić“ u Slavanskom Brodu te završila s odličnim uspjehom. Nakon toga upisuje Tehničku školu Slavonski Brod koju završava također s odličnim uspjehom za zanimanje elektrotehničarke. 2014. godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, a 2015. godine se usmjerava na smjer elektroenergetike.

Dobro se služi engleskim jezikom. Od računalnih vještina ima dobro vladanje Microsoft Office alatima, osnovna znanja u programskim alatima Matlab, Eplan, ANSYS Maxwell, AutoCAD, Relux, DIS i DDS. Osim toga, započela je edukaciju za Autodesk certificirano zvanje CAD specijalistice.

U slobodno vrijeme bavi se odbojkom. Kao članica ŽOK Osijeka postala je viceprvak u Kupu Hrvatske, 3. ekipa Superlige i kategorizirani sportaš. Kao članica ŽOK ENNA Vukovar izborila je polufinale Kupa Hrvatske. Predstavljala je Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku na Europskom sveučilišnom prvenstvu 2015. godine u Italiji te na Europskim sveučilišnim igrama 2016. godine u Zagrebu. Može se opisati kao timski igrač vedrog duha i organiziranog vremena sa velikom željom stjecanja novih znanja i vještina.

Studentica:

Karolina Kovač



---

## PRILOZI

Prilog 1. Iznosi Dwightovog koeficijenta kao funkcije omjera  $a/b$  i  $h/b$

