

# Modeliranje i analiza elektromagnetskih sila programskim paketom ANSYS

---

**Bilić, Matej**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*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:200:640254>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-16**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**MODELIRANJE I ANALIZA ELEKTOMAGNETSKIH  
SILA PROGRAMSKIM PAKETOM ANSYS**

**Diplomski rad**

**Matej Bilić**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Matej Bilić
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	D-1308, 11.10.2020.
<b>JMBAG:</b>	0165064683
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Tomislav Barić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	prof. dr. sc. Tomislav Barić
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Ružica Kljajić, univ. mag. ing. el.
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Modeliranje i analiza elektromagnetskih sila programskim paketom ANSYS
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U diplomskom radu potrebno je izložiti teorijske osnove nastanka elektromagnetskih sila. Navesti jednadžbe i opisati modele kojima se modeliraju elektromagnetske sile. Rad treba usmjeriti na analizu elektromagnetskih sila koje se javljaju tijekom kratkih spojeva u pogonima, odnosno postrojenjima. Odabrati primjere za modeliranje i analizu (npr. sabirnice) korištenjem programskog paketa ANSYS. Za odabrani primjer osvrnuti se na važeće standarde (norme) te preporučene prakse izračuna sila i momenata tijekom kratkih spojeva. Opisati struje kratkog spoja i
<b>Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	05.11.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum obrane diplomskog rada:</b>	15.11.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):</b>	Izvrstan (5)
<b>Ukupna ocjena diplomskog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:</b>	15.11.2024.



**FERIT**

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

## IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 15.11.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Matej Bilić
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1308, 11.10.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Modeliranje i analiza elektromagnetskih sila programskim paketom ANSYS**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Tomislav Barić

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 pristupnika:

---

**SADRŽAJ**

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1. Zadatak diplomskog rada.....	2
<b>2. ELEKTROMAGNETSKE SILE.....</b>	<b>3</b>
2.1. Općenito o elektromagnetskim silama .....	3
2.2. Elektromagnetske sile između strujnih vodiča .....	4
2.2.1. Sile između paralelnih vodiča .....	4
2.2.2. Sile između vodiča koji nisu paralelni.....	8
<b>3. SABIRNICE .....</b>	<b>11</b>
3.1. Općenito o sabirnicama .....	11
3.2. Cijevne sabirnice .....	13
3.2.1. Vodiči .....	13
3.2.2. Potporni izolatori .....	14
3.2.3. Nosive konstrukcije.....	16
3.3. Opterećenja sabirnica u normalnom pogonu .....	17
3.3.1. Termičko opterećenje .....	17
3.3.2. Mehaničko opterećenje.....	18
3.3.3. Vanjski utjecaji.....	19
<b>4. PRIJENOSNI SUSTAVI.....</b>	<b>23</b>
4.1. Općenito o prijenosnim sustavima.....	23
4.2. Uloga sabirnica .....	25
4.3. Nazivni rad.....	26
4.4. Naprezanja, poremećaji i kvarovi.....	30
<b>5. KRATKI SPOJ.....</b>	<b>33</b>
5.1. Općenito o kratkom spoju .....	33
5.2. Komponente struje kratkog spoja .....	34
5.2.1. Rasklopna struja kratkog spoja.....	34
5.2.2. Trajna struja kratkog spoja .....	37
5.2.3. Struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkoga spoja.....	40
5.3. Udarna struja kratkog spoja.....	43
5.4. Subtranzijentna, tranzijentna i trajna struja kratkoga spoja .....	44

---

<b>5.5. Termički učinci struje kratkog spoja .....</b>	<b>46</b>
5.5.1. Računanje presjeka sabirnice u odnosu na zagrijavanje tijekom kratkog spoja.....	49
<b>5.6. Proračun elektromagnetskih sila na sabirnicama tijekom kratkog spoja .....</b>	<b>50</b>
5.6.1. Jednopolni kratki spoj.....	52
5.6.2. Tropolni kratki spoj .....	54
<b>6. SIMULACIJA U ANSYS-U .....</b>	<b>58</b>
6.1. Što je ANSYS i za što se koristi.....	58
6.2 Modeliranje sustava sabirnica .....	58
6.3. Simulacija jednopolnog kratkog spoja.....	75
6.4. Simulacija trojednopolnog kratkog spoja .....	86
<b>7. ANALIZA SIMULACIJE .....</b>	<b>92</b>
7.1. Analiza simulacije jednopolnog kratkog spoja.....	92
7.2. Analiza simulacije trojednopolnog kratkog spoja .....	96
<b>8. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>101</b>
<b>9. SAŽETAK .....</b>	<b>103</b>
<b>10. ABSTRACT.....</b>	<b>104</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>105</b>

## 1. UVOD

Moderni svijet uvelike ovisi o električnoj energiji, a život bez nje gotovo je nezamisliv. Električna energija napaja industriju, bolnice, kućanstva i druge potrošače, omogućujući normalno funkcioniranje društva. Da bi električna energija stigla do potrošača, potreban je složen elektroenergetski sustav. Ovaj sustav sastoji se od mnogobrojnih dijelova i zahtijeva stalno praćenje različitih varijabli poput napona, struje i frekvencije kako bi sve funkcioniralo bez problema.

Neki od ključnih dijelova elektroenergetskog sustava uključuju generatore, transformatore, prijenosne vodove i sabirnice. Sabirnice, kao važna komponenta, među ostalom, mogu se podijeliti na one koje koriste cijevne sabirnice i na one koje koriste sabirnice u obliku užadi. Ovaj rad fokusira se na cijevne sabirnice, koje su ključne za pouzdanost i efikasnost prijenosnog sustava.

U ovom radu analizirati će se i modelirati jedan od najopasnijih kvarova koji se mogu dogoditi u sustavu sabirnica – kratki spoj. Posebno će se baviti elektromagnetskim i mehaničkim silama koje djeluju na sabirnicu za vrijeme kratkog spoja.

Rad je organiziran na sljedeći način:

- U drugom poglavlju fokus će biti na elektromagnetskim silama, uključujući i sile između paralelnih vodiča, ali i sile između vodiča raznih konfiguracija.
- U trećem poglavlju biti će predstavljen općeniti pregled sabirnica, uključujući vodiče, potporne izolatore, spojni pribor, nosive konstrukcije i temelje.
- Zatim će se razmotriti opterećenja sabirnica u normalnom pogonu, uključujući termičko opterećenje, mehaničko opterećenje i vanjske utjecaje.
- Nakon toga, u dijelu o prijenosnim sustavima, objasniti će se njihova opća funkcija, uloga sabirnica, nazivni rad te poremećaji i kvarovi.
- Slijedi poglavlje o kratkom spoju, gdje će se detaljno obraditi njegov nastanak, njegove komponente, udarna struja, subtranzijentna, tranzijentna i trajna struja kratkog spoja, kao i termički učinci. Također će se analizirati proračuni vezani uz kratki spoj.
- U šestom poglavlju opisati će se simulacije u softveru ANSYS, s fokusom na simulaciju jednopolnog i trolejnog kratkog spoja u sustavu sabirnica.

- U sedmom poglavlju analizirati će se rezultati simulacija iz prethodnog poglavlja te će biti prikazani rezultati simulacije jednopolnog i trolejnog kratkog spoja u sabirničkom sustavu.
- Na kraju, biti će izneseni zaključci i sažetak glavnih nalaza istraživanja.

Uz sve navedeno, rad će se usredotočiti na razumijevanje i simulaciju učinaka kratkog spoja na cijevne sabirnice, pružajući tako sveobuhvatan pregled i analizu ovog važnog aspekta elektroenergetskog sustava.

### **1.1. Zadatak diplomskog rada**

U diplomskom radu potrebno je izložiti teorijske osnove nastanka elektromagnetskih sila. Navesti jednadžbe i opisati modele kojima se modeliraju elektromagnetske sile. Rad treba usmjeriti na analizu elektromagnetskih sila koje se javljaju tijekom kratkih spojeva u pogonima, odnosno postrojenjima. Odabrati primjere za modeliranje i analizu (npr. sabirnice) korištenjem programskog paketa ANSYS. Za odabrani primjer osvrnuti se na važeće standarde (norme) te preporučene prakse izračuna sila i momenata tijekom kratkih spojeva. Opisati struje kratkog spoja i njezine komponente mjerodavne za proračun sila. Pokazati i opisati nastalu razliku u rezultatu dobivenih sila kada je model kvazistatičan te kada su uvaženi skin efekt i efekt blizine, odnosno frekvencija struje kratkog spoja. Prema mogućnosti dobivene rezultate simulacije provjeriti analitičkim izrazima. Izlaganje je potrebno poduprijeti izračunima, grafičkim prikazima i shemama.



## 2. ELEKTROMAGNETSKE SILE

### 2.1. Općenito o elektromagnetskim silama

Elektromagnetske sile javljaju se kao rezultat interakcije između električnih struja i magnetskih polja. Kada kroz vodič prolazi struja, oko vodiča se stvara magnetsko polje, a ako se u blizini nalazi drugi vodič kroz koji također prolazi struja, između njih dolazi do djelovanja elektromagnetskih sila. Ove sile mogu biti privlačne ili odbojne, ovisno o smjeru struja u vodičima. Jednadžba koja povezuje električna i magnetska polja glasi [39]:

$$I_u = \int_l \vec{H} \cdot \vec{dl} \quad (2-1)$$

Učinci nastalog magnetskog polja mogu biti sila i inducirani napon. Jednadžba za silu glasi [39]:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (2-2)$$

Dok jednadžba za inducirani napon glasi [39]:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2-3)$$

Nastalo magnetsko polje u prostoru opisujemo magnetskim silnicama čiji se smjer određuje pravilom desne ruke. Pravilo desne ruke govori da ako ispruženi palac šake pokazuje smjer struje, savinuti prsti pokazuju smjer kružnih silnica nastalog magnetskog polja [39].

Jakost magnetskog polja, s oznakom  $H$ , izravno je povezana s protokom struje  $I$ , što je vidljivo u jednadžbi [39]:

$$H = \frac{I \cdot N}{l} \quad (2-3)$$

## 2.2. Elektromagnetske sile između strujnih vodiča

### 2.2.1. Sile između paralelnih vodiča

Elektromagnetske sile između paralelnih vodiča nastaju kao posljedica magnetskih polja induciranih strujama koje prolaze kroz te vodiče. Ove sile ovise o jakosti struje, udaljenosti između vodiča i njihovim dimenzijama. Kada kroz dva paralelna vodiča teku struje u istom smjeru, vodiči se međusobno privlače zbog međusobnog djelovanja magnetskih polja. Ako su struje suprotnog smjera, vodiči se međusobno odbijaju. Razumijevanje ovih sila ključno je za dizajn elektroenergetskih sustava, jer takve sile mogu uzrokovati deformacije ili oštećenja pri visokim strujama, poput kratkih spojeva [5].

Magnetsko polje oko vodiča koji nosi struju  $I$  i koji je beskonačno dug može se izraziti kao [5]:

$$H = \frac{I}{2\pi a} \quad (2-4)$$

gdje je  $a$  razmak između vodiča, a  $\mu$  permeabilnost sredine [5]:

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (2-5)$$

Izraz (2-4) pokazuje da jakost magnetskog polja opada s povećanjem razmaka između vodiča [5].

Sila po jedinici duljine  $ds$  između dva beskonačno duga paralelna vodiča kroz koje teku struje  $I_1$  i  $I_2$  izražava se kao [5]:

$$\frac{dF}{ds} = 2 \frac{I_1 I_2}{a} 10^{-7} \text{ N/m} \quad (2-6)$$

Ova jednadžba pokazuje da se sila povećava s kvadratom struje i smanjuje s povećanjem razmaka  $a$  između vodiča. Time se objašnjava zašto su elektromagnetske sile posebno izražene u situacijama kada su vodiči blizu jedan drugome ili kada su struje visoke, kao što je slučaj tijekom kratkog spoja [5].

Za vodiče konačne duljine  $l$ , ukupna sila može se dobiti integriranjem po duljini vodiča [5]:

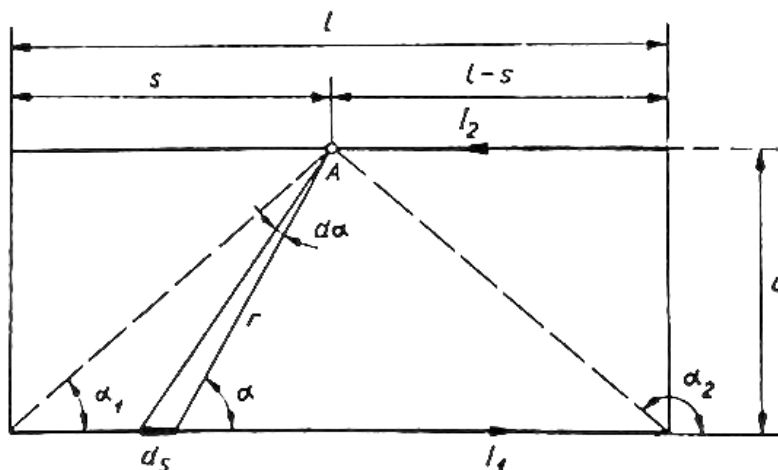
$$F = 2 \frac{I_1 I_2}{a} \cdot 10^{-7} \cdot (\sqrt{l^2 + a^2} - a) \quad (2-7)$$

Ovaj izraz koristi se za procjenu ukupne sile koja djeluje na vodiče ograničene duljine, omogućujući inženjerima da izračunaju mehanička naprezanja u različitim dijelovima elektroenergetskih sustava [5].

Za beskonačno dugi vodič, ukupna sila po jedinici duljine može se izraziti kao [5]:

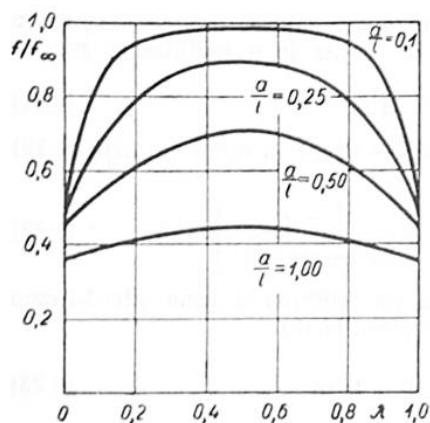
$$F_\infty = 2 \frac{I_1 I_2}{a} \cdot l \cdot 10^{-7} \quad (2-8)$$

Ova jednadžba daje dobar aproksimativni rezultat za situacije u kojima su vodiči vrlo dugi u usporedbi s razmakom između njih. Slika 2.1. prikazuje osnovnu konfiguraciju dvaju paralelnih vodiča kroz koje prolaze struje  $I_1$  i  $I_2$ , ilustrirajući smjer magnetskog polja i sile koje se razvijaju između vodiča [5].

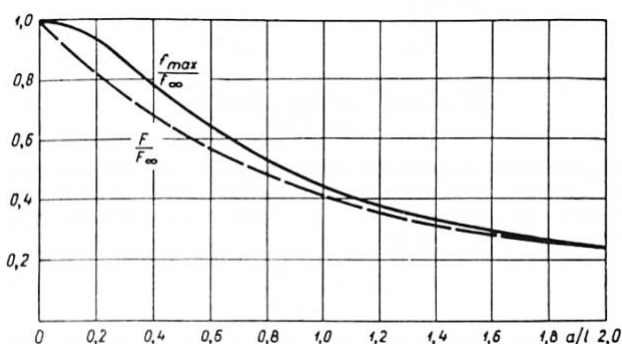


**Slika 2.1.** Prikaz određivanja sila među paralelnim vodičima [5].

Slika 2.2. prikazuje omjer ukupne sile  $f/f_\infty$  o veličini  $\lambda$  za omjere  $a/l$ , što je korisno za vizualizaciju kako duljina vodiča i razmak među njima utječu na ukupnu silu, dok slika 2.3. daje grafički prikaz ovisnosti omjera maksimalne sile  $f_{max}$  prema beskonačnoj sili  $f_\infty$  prema omjeru duljine vodiča i njihove udaljenosti  $a/l$  [5].

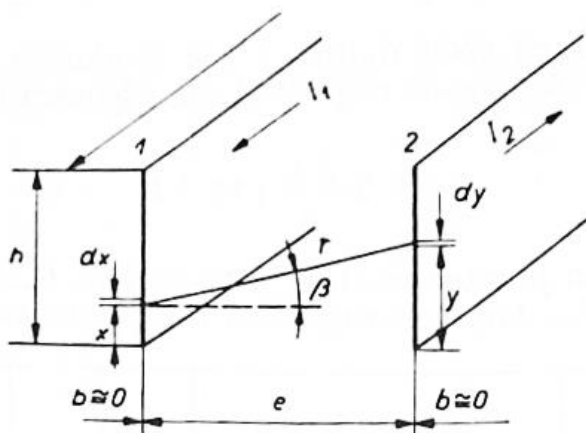


Slika 2.2. Ovisnosti omjera  $f/f_{\infty}$  o veličini  $\lambda$  [5].



Slika 2.3. Ovisnost omjera  $f_{max}/f_{\infty}$ , odnosno  $F_{max}/F_{\infty}$  o omjeru  $a/l$  [5].

Kada su vodiči plosnati (pravokutnog presjeka), magnetsko polje između njih se računa na temelju sličnih principa, ali uz određene prilagodbe zbog geometrije. Na slici 2.4. prikazana je konfiguracija dvaju plosnatih vodiča zanemarive širine, a izrazi za jakost magnetskog polja i silu uključuju specifične faktore [5].



Slika 2.4. Prikaz određivanja sila kod paralelnih vodiča koji su plosnati i zanemarivo male širine [5].

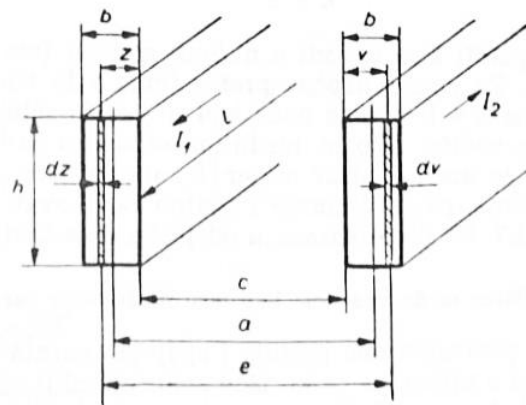
Jakost magnetskog polja između plosnatih vodiča može se opisati kao [5]:

$$dH_1 = \frac{I_1}{2\pi} \cdot \frac{dx}{hr} \quad (2-9)$$

gdje je  $h$  visina vodiča, a  $r$  udaljenost između vodiča. Sila po jedinici duljine na element duljine  $ds_2$  i visine  $dy$  plosnatog vodiča dana je izrazom [5]:

$$\left(\frac{dF}{ds_2}\right)'' = 2I_1I_2 \frac{dx dy}{h^2 r} \cdot 10^{-7} \quad (2-10)$$

Slika 2.5. prikazuje detalje o elektromagnetskim silama između plosnatih vodiča konačne širine  $b$  [5].



**Slika 2.5.** Prikaz određivanja sile među paralelnim plosnatim vodičima [5].

U ovakvim slučajevima, ukupna sila prilagođava se korekcijskim faktorom  $k$ , koji uzima u obzir dimenzije vodiča i razmak među njima [5]:

$$k = \frac{a}{b^2 h} \int_0^b dv \int_0^h \varphi(v, z) dz \quad (2-11)$$

Ova jednadžba važna je za inženjere koji rade s vodičima različitih presjeka jer omogućuje preciznije proračune sila kod vodiča specifičnih dimenzija [5].

### 2.2.2. Sile između vodiča koji nisu paralelni

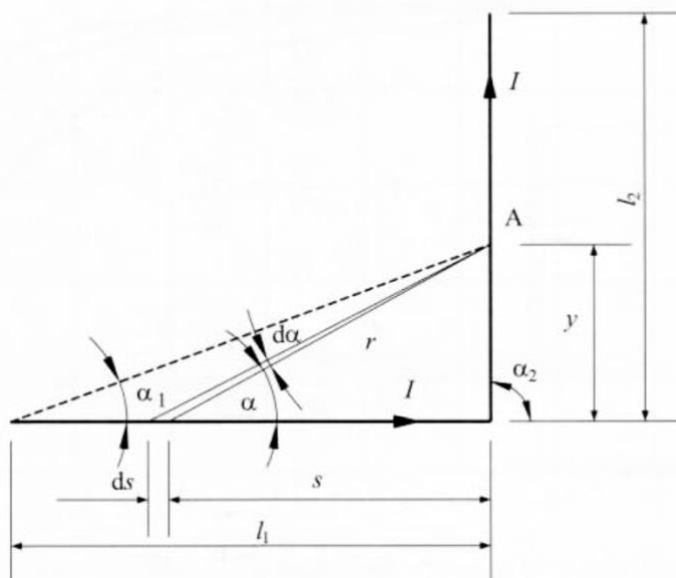
U elektroenergetskim sustavima često se susreću situacije gdje vodiči nisu paralelno postavljeni, kao što su različite spojne konfiguracije ili zavoji vodiča. U takvim slučajevima, elektromagnetske sile između vodiča ovise o specifičnom rasporedu i relativnoj orijentaciji dijelova vodiča, što utječe na jačinu i smjer djelovanja sile [1].

U praksi, napreznja u ovim spojnim vodičima često se određuju približnim formulama koje uzimaju u obzir oblik vodiča. Najčešći oblici spojnih vodiča koji nisu paralelni uključuju konfiguracije u obliku slova „L“, „S“ i „U“ [1].

Za vodiče savijene u oblik slova „L“, elektromagnetske sile nastaju zbog promjene smjera struje pod kutom od 90 stupnjeva. Na slici 2.6. prikazan je vodič savijen u oblik slova „L“, gdje jakost magnetskog polja  $H(A)$  u točki A može biti izračunata formulom [1]:

$$H(A) = \frac{I}{4\pi y} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha \, d\alpha \quad (2-12)$$

gdje je  $\alpha_2 = \frac{2}{\pi}$ , dok su ostale varijable definirane oznakama na slici 2.6 [1].

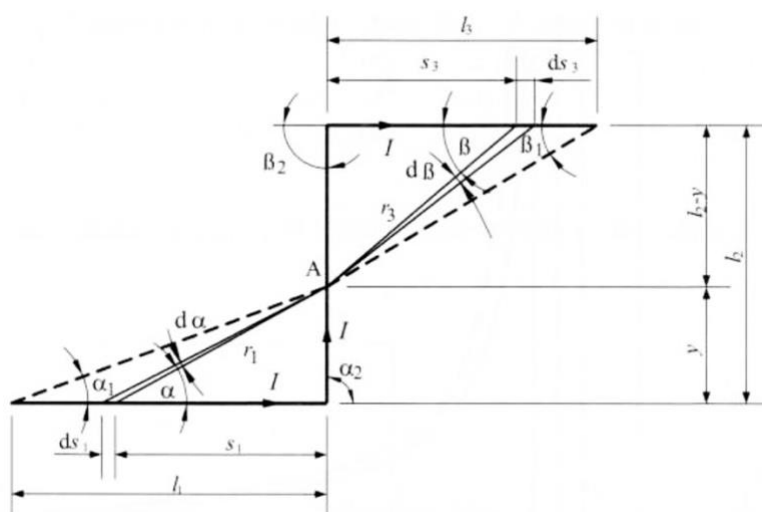


Slika 2.6. Prikaz utjecaja elektromagnetske sile na vodiče spojene u obliku „L“ [1].

Uz pretpostavku magnetske permeabilnosti  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ , sila po jedinici duljine vodiča u ovoj konfiguraciji dana je izrazom [1]:

$$f_{ds} = \frac{I^2}{y} \cdot \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + y^2}} \cdot 10^{-7} \text{ N/m} \quad (2-13)$$

Kod vodiča savijenih u oblik slova „S“, elektromagnetske sile između dva paralelna dijela vodiča djeluju u suprotnim smjerovima zbog suprotnog smjera struje u svakom dijelu. Na slici 2.7. prikazana je geometrija vodiča u obliku slova „S“ i raspored sila koje djeluju na srednji dio vodiča [1].



**Slika 2.7.** Prikaz utjecaja elektromagnetske sile na vodiče spojene u obliku „S“ [1].

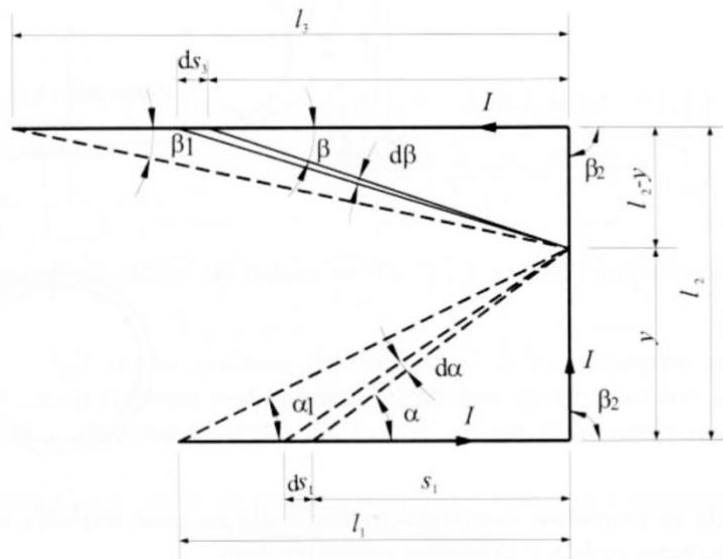
Izraz za silu po jedinici duljine između dijelova vodiča u ovoj konfiguraciji je [1]:

$$f_{ds} = I^2 \cdot 10^{-7} \left[ \frac{l_1}{y\sqrt{l_1^2 + y^2}} - \frac{l_3}{\sqrt{l_3^2 + (l_2 - y)^2}} \right] \text{ N/m} \quad (2-14)$$

Ako se duljine vodiča  $l_1$  i  $l_3$  smatraju beskonačnima ( $l_1 = l_3 = \infty$ ), izraz se pojednostavljuje na [1]:

$$f_{\infty} = I^2 \cdot 10^{-7} \left( \frac{1}{y} - \frac{1}{l_2 - y} \right) \text{ N/m} \quad (2-15)$$

Kod vodiča savijenih u oblik slova „U“, oba dijela vodiča nose struju u istom smjeru, što rezultira silama koje djeluju u istom smjeru na srednji dio vodiča. Na slici 2.8. prikazana je geometrija vodiča u obliku slova „U“ i raspored djelovanja sila [1].



**Slika 2.8.** Prikaz utjecaja elektromagnetske sile na vodiče spojene u obliku „U“ [1].

Izraz za silu po jedinici duljine između dijelova vodiča u ovom slučaju je [1]:

$$f_{ds} = I^2 \cdot 10^{-7} \left[ \frac{l_1}{y\sqrt{l_1^2 + y^2}} + \frac{l_3}{(l_2 - y)\sqrt{l_3^2 + (l_2 - y)^2}} \right] \text{ N/m} \quad (2-16)$$

Ako se pretpostavi da su duljine vodiča  $l_1$  i  $l_3$  beskonačne, izraz za ukupnu silu postaje [1]:

$$f_{\infty} = I^2 \cdot 10^{-7} \left( \frac{1}{y} + \frac{1}{l_2 - y} \right) \text{ N/m} \quad (2-17)$$

Ove formule omogućuju procjenu elektromagnetskih sila između vodiča u različitim nepravilnim konfiguracijama. Ovisno o specifičnom rasporedu („L“, „S“, ili „U“), priroda djelovanja ovih sila se značajno mijenja, što je važno uzeti u obzir pri projektiranju elektroenergetskih sustava kako bi se osigurala mehanička stabilnost vodiča u stvarnim radnim uvjetima [1].



### 3. SABIRNICE

#### 3.1. Općenito o sabirnicama

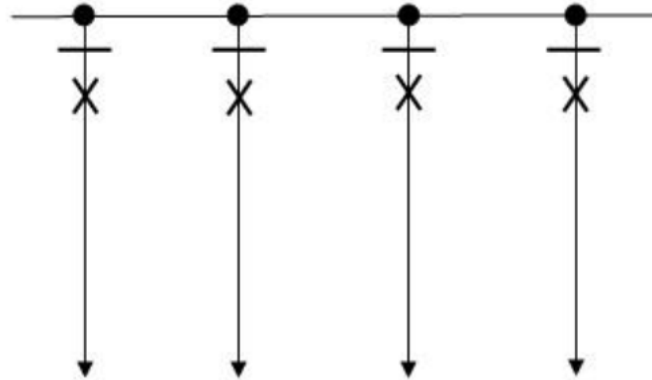
Sabirnice su jedan od najvažnijih dijelova električnih postrojenja jer unutar rasklopnog postrojenja čine električna čvorišta. Glavna uloga koju vrše sabirnice je povezivanje vodova preko kojih se energija dovodi u rasklopno postrojenje s vodovima koji tu energiju dalje odvede – izvan postrojenja ili prema transformatorima. S obzirom na to da je svaki vod u elektroenergetskom sustavu povezan preko sabirnica, pouzdanost sabirnica je iznimno važna za rad potpunog elektroenergetskog sustava. One najčešće mogu biti napravljene od aluminijskih bakrenih vodiča ili pak od neizoliranih bakrenih vodiča te raznih legura tih materijala. Ukoliko se sabirnice nalaze unutar postrojenja unutarnje izvedbe do 38 kV, tada je njihov oblik okrugao, plosnat ili U-profil. Ako se koriste za napone veće od 38 kV, tada su cijevnog oblika ili u obliku užeta [1].

Sabirnički sustavi se mogu izvoditi na nekoliko načina, koji ovise u njihovoj ulozi unutar postrojenja, ali i mreže. Načini izvođenja sabirničkih sustava su sabirnički sustavi sa:

- jednostrukim sabirnicama,
- jednostrukim sekcioniranim sabirnicama,
- dvostrukim sabirnicama [1].

#### Jednostruke sabirnice

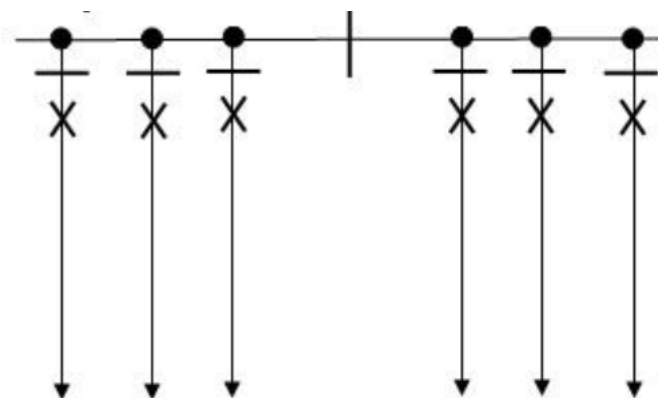
Jednostruke sabirnice imaju najmanju elastičnost, ali s obzirom da je njihova izvedba ekonomična i jednostavna, izvode se u rasklopnim postrojenjima s malo odvoda, gdje nisu spojeni potrošači kojima bi prekid napajanja uzrokovao štetu. Ukoliko dođe do kvara ili do radova na sabirnicama, potrebno je obustaviti pogon cijelog rasklopnog postrojenja, pri čemu potrošači ostaju bez napajanja. Uz jednostavnost i ekonomsku prednost, koriste se jer kvarovi na njima nisu česti. Njihova shema se može vidjeti na slici 3.1 [1].



**Slika 3.1.** Shema jednostrukih sabirnica [37].

### Jednostruke sekcionirane sabirnice

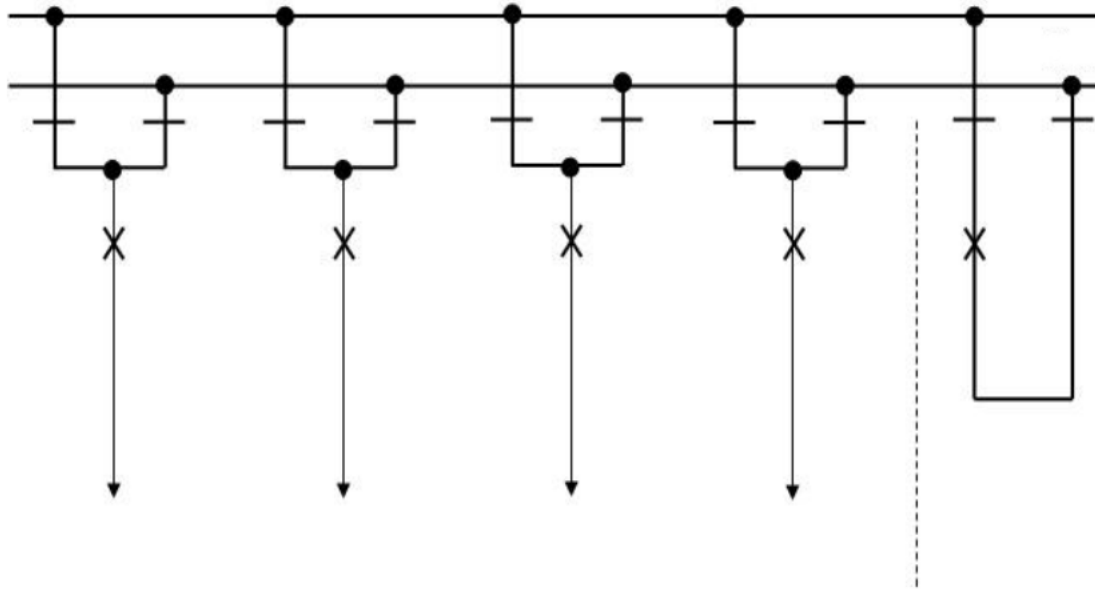
Jednostruke sekcionirane sabirnice, čija je shema prikazana na slici 3.2., omogućavaju malo veću elastičnost u pogonu od jednostrukih sabirnica. U jednoj sekciji se nalaze dva rastavljača, što omogućuje da jedna sekcija ostane u pogonu dok se na drugoj vrše radovi [1].



**Slika 3.2.** Shema jednostrukih sekcioniranih sabirnica [37].

### Dvostruke sabirnice

Dvostruke sabirnice, sa shemom prikazanom na slici 3.3., imaju znatno složeniju izvedbu od jednostrukih sabirnica, ali zato omogućuju znatno veću elastičnost. Na oba seta sabirnica se mogu priključiti odvodi, pa se mogu vršiti radovi na jednom setu sabirnica dok je drugi u pogonu [1].



Slika 3.3. Shema dvostrukih sabirnica [37].

## 3.2. Cijevne sabirnice

Sabirnice imaju dvije tehnološke izvedbe – cijevne i užetne. Izbor izvedbe ovisi o nazivnom naponu, strujnom opterećenju i općenitim uvjetima na mjestu izgradnje, ali i ekonomskim čimbenicima. Cijevne sabirnice imaju mehaničku i električku prednost nad užetnim sabirnicama. Sabirnički sustav koji koristi cijevne sabirnice se sastoji od vodiča, potpornih izolatora, nosive konstrukcije (čelične), temelja i spojnog pribora [1].

### 3.2.1. Vodiči

Vodiči koji se koriste u cijevnim sabirnicama zbog svojih mehaničkih, električnih, estetskih i ekonomskih karakteristika donose brojne prednosti u usporedbi sa vodičima koji su izvedeni u obliku užeta. Od materijala koji se najčešće koriste za izradu cijevnih vodiča, ističu se aluminijske slitine E- $AlMgSi0,5F22$  te  $AlMgSi0,5F25$  (tablica 3.1.). Aluminijske legure se koriste za izradu spojnog pribora uz aluminij ili aluminijske legure. Uzimajući u obzir važne karakteristike, legura E- $AlMgSi0,5F22$  koristi se kada je nazivno trajno opterećenje i kratkoročno strujno opterećenje presudno za određivanje dimenzija sabirnica. Legura  $AlMgSi0,5F25$  se koristi kada je mehanička čvrstoća važniji uvjet za određivanje dimenzija sabirnica, a ne električna vodljivost [1].

**Tablica 3.1.** Karakteristike materijala za cijevne sabirnice.

Svojstvo	Jedinica	E-AlMgSi0,5F22	AlMgSi0,5F25
Naprezanje $\sigma_{max}$	N/mm <sup>2</sup>	215	245
Naprezanje $\sigma_{0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	160	195
Električna vodljivost	mm/( $\Omega$ mm <sup>2</sup> )	30,0	28,0
Električni specifični otpor	( $\Omega$ mm <sup>2</sup> )/m	0,03333	0,03571
Temperaturni koeficijent otpora	1/K	0,0036	0,0036
Modul elastičnosti	KN/mm <sup>2</sup>	70	70
Temperaturni koeficijent rastezanja	1/K	$23 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$
Specifična toplina	Ws/kgK	920	920
Specifična masa	Kg/m <sup>3</sup>	2700	2700

Bakar ima nešto veću električnu vodljivost od aluminija, ali kada se usporede druge karakteristike, kao što su mehanička i tehnološka svojstva, gustoća, otpornost prema utjecajima iz atmosfere, otpornost utjecaja agresivnih sredstava, aluminij je optimalan za primjenu u rasklopnim postrojenjima. Aluminij je kemijski stabilan pod utjecajem izolacijskog ulja, masti i lakova, ima nisku osjetljivost te je ekonomski povoljniji od bakra. Kako bi legure aluminija koje se koriste za cijevne vodiče imale poboljšana svojstva, provodi se toplinska obrada, koja uključuje zarenje i kaljenje, što povećava čvrstoću i tvrdoću legure. Postupci toplinske obrade uključuju normaliziranje, rekristalizacijsko zarenje i homogenizacijsko zarenje, što poboljšava mehanička svojstva materijala [1].

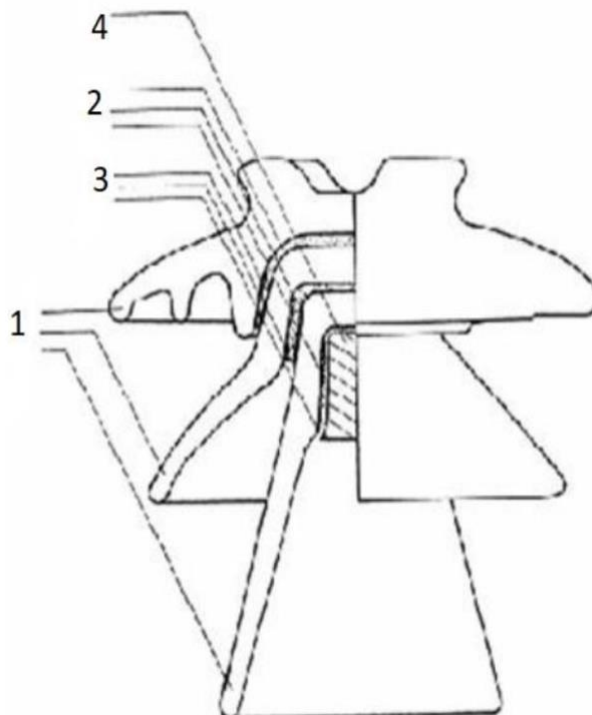
### 3.2.2. Potporni izolatori

Izolator je komponenta najčešće korištena za izolaciju električnih vodiča od uzemljenih dijelova te prenošenje i podnošenje sila koje djeluju na sabirnice. Sastoji se od metalnih elektroda i unutarnjih dijelova koji su obloženi dielektrikom. Dielektrici koji su korišteni kod proizvodnje izolatora su porculan, staklo i organski polimerni materijali. Porculanski i stakleni izolatori se još nazivaju i konvencionalni izolatori, jer su se dugo koristili u industriji. Osim što se primjenjuju u uređajima svih razreda napona, njihova je glavna funkcija služiti kao nosači sabirnica. [1].

Po mjestu ugradnje, razlikujemo izolatore za unutarnju i vanjsku montažu. Postoje i porculanski izolatori i kompozitni polimerni izolatori za visokonaponska postrojenja, te porculanski izolatori i izolatori od umjetnih smola za srednjenaponska i niskonaponska postrojenja. Potporni izolatori koji se koriste na otvorenom prostoru moraju biti izdržljivi i moraju zadovoljavati određene zahtjeve zbog teških radnih uvjeta u kojima se nalaze.

Izolatori koji se nalaze u postrojenjima na otvorenom se izrađuju od porculana, stakla, silikonske smole i cikloalifatske epoksidne smole (araldit) jer ovi materijali mogu izdržati teške radne uvjete i zadovoljiti sve potrebne zahtjeve. Pored toga, ovi materijali su izdržljivi i otporni na visoke temperature, vjetar, vlagu i ostale vanjske utjecaje [10].

Na slici 3.4. [9] su prikazani glavni dijelovi potpornog izolatora. Izolatorska masa je označena brojem 1, sloj pijeska je označen brojem 2, a sloj cementne mase je označen brojem 3. Ovi slojevi povezuju slojeve izolacije ili izolaciju i metalne dijelove. Mjesto montaže je označeno brojem 4. Slika 3.5. prikazuje ostale tipove i veličine potpornih izolatora [9].



**Slika 3.4.** Shema potpornog izolatora [9].



**Slika 3.5.** Različiti tipovi i veličine potpornih izolatora [8].

### 3.2.3. Nosive konstrukcije

Nosiva čelična konstrukcija koja se koristi u elektroenergetskim postrojenjima sastoji se od sabirničkih cijevi, potpornih izolatora, čeličnog postolja i betonskih temelja. Sabirničke cijevi se obično izrađuju od aluminija, dok se izolatori izrađuju od porculana ili kompozitnih materijala. Svi su dijelovi povezani, što znači da je nemoguće pomaknuti jedan od njih bez da to utječe na ostale dijelove konstrukcije. Širina polja se određuje nazivnim naponom postrojenja i kreće se od 8 do 21 metara. To također određuje raspon sabirničkih cijevi. Sabirničke cijevi se spajaju s potpornim izolatorima pomoću posebnih aluminijskih spojnika. Najčešće se koriste dva potporna izolatora [1].

Sabirnička polja koja se nalaze okomito u odnosu na smjer sabirnica čine jedinstvenu cjelinu i povezana su s glavnim sabirnicama pomoću sabirničkih rastavljača. Postoje dvije vrste sabirničkih cijevi, ovisno o njihovoj kontinuiranosti: kontinuirane i diskontinuirane. Kontinuirane cijevi se protežu duž cijele dužine sabirničkog sustava i spojene su pomoću spojnika kako bi se omogućilo njihovo pomicanje zbog toplinske dilatacije. Diskontinuirane cijevi se smještaju između dva potporna izolatora i imaju duljinu jednaku širini jednog polja. Nosive konstrukcije su prikazane na slici 3.10. [1].



**Slika 3.10.** Nosive konstrukcije [11].

### 3.3. Opterećenja sabirnica u normalnom pogonu

Opterećenje sabirnica u normalnom pogonu odnosi se na različite faktore koji utječu na sabirnice tijekom njihovog uobičajenog rada. Ti faktori uključuju termička i mehanička opterećenja te vanjske utjecaje, koji mogu značajno utjecati na performanse i dugovječnost sabirnica. Razumijevanje i proračun ovih opterećenja ključni su za osiguranje sigurne i učinkovite operacije električnih postrojenja.

U nastavku se razmatraju termička, mehanička i vanjska opterećenja u normalnom pogonu, njihovi utjecaji na sabirnice i metode za njihovo izračunavanje i upravljanje.

#### 3.3.1. Termičko opterećenje

Pri radu sabirnica u normalnom pogonu, struja izaziva povećanje temperature. Sabirnicu je potrebno dimenzionirati tako da porast temperature ne prijeđe dozvoljenu granicu. Kada se računa termičko opterećenje za vrijeme normalnog pogona, gleda se veza između struje i temperatura nadzemnih vodiča pri atmosferskim uvjetima okoline.

Maksimalno dozvoljeno strujno opterećenje se računa pomoću sljedećeg izraza [13]:

$$I = \sqrt{\frac{P_{rad} + P_{conv} - P_{sol}}{R_T}} \quad (3-1)$$

$P_{rad}$  je oznaka za toplinu koja se iz vodiča odvodi zračenjem, odnosno radijacijom. Jednadžba za izračun  $P_{rad}$  glasi [14]:

$$P_{rad} = s \cdot \pi \cdot D \cdot K_e \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (3-2)$$

$P_{conv}$  označava toplinu koja se sa površine vodiča odnosi konvekcijom te iznosi [14]:

$$P_{conv} = \lambda \cdot N_u \cdot (T_2 - T_1) \cdot \pi \quad (3-3)$$

$P_{sol}$  predstavlja toplinu koju vodič prima zračenja Sunca, te se računa jednadžbom [14]:

$$P_{sol} = \gamma \cdot D \cdot S_i \quad (3-4)$$

### 3.3.2. Mehaničko opterećenje

Sabirnice se mogu smatrati kontinuiranim gredama s jedinstvenim opterećenjem. Razmak između oslonaca  $l$  jednak je razmaku između potpornih izolatora. Moment savijanja može se odrediti pomoću sljedeće formule [5]:

$$M = -\frac{f \cdot l^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{6} - \frac{x}{l} + \frac{x^2}{l^2} \right) \text{ Nm} \quad (3-5)$$

gdje je:

- $f$  - sila po jedinici duljine pri tropskom kratkom spoju,
- $x$  - udaljenost od jednog oslonca.

Maksimalni moment savijanja je [5]:

$$M_{max} = \frac{f \cdot l^2}{12} \text{ Nm} \quad (3-6)$$

Ovaj moment je ključan za dimenzioniranje sabirnica. Naprezanje na savijanje određuje se iz omjera momenta savijanja i momenta otpora  $W$  [5]:

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} \text{ N/m}^2 \quad (3-7)$$



Gdje je:

- $W$  moment otpora.

Naprezanja izražena tehničkim sustavom jedinica u  $\text{kp}/\text{cm}^2$  preračunavaju se ovako [5]:

$$1 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} = 9,81 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (3-8)$$

Iako vlastita frekvencija sabirnica nije od presudne važnosti za njihovo dimenzioniranje, potrebno je moći odrediti ovu frekvenciju. Osnovna vlastita frekvencija sabirnice može se izračunati pomoću sljedeće formule [5]:

$$c_1 = \frac{s_1^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E J}{\rho Q}} s^{-1} \quad (3-9)$$

Gdje su:

- $l$  - duljina sabirnice u metrima između dva potporna izolatora,
- $E$  - modul elastičnosti u  $\text{N}/\text{m}^2$  materijala sabirnice,
- $J$  - moment tromosti u  $\text{m}^4$  presjeka sabirnice s obzirom na os koja je okomita na smjer sile,
- $\rho$  - gustoća (masa po jedinici volumena) u  $\text{kg}/\text{m}^3$  materijala sabirnice,
- $Q$  - površina presjeka sabirnice u  $\text{m}^2$ .

Vrijednost  $s_l$  ovisi o načinu pričvršćenja sabirnice:

- Za ukliještenu je nosač  $s_l = 4,73$ ,
- Za nosač ukliješten samo na jednoj strani  $s_l = 3,927$ ,
- Za nosač s pomičnim osloncima na oba kraja  $s_l = 3,141$ .

### 3.3.3. Vanjski utjecaji

Kod projektiranja cijevnih sabirnica bitno je uzeti u obzir sljedeće meteorološke čimbenike:

- temperatura okoline,
- dodatni teret (led),
- dodatni teret (vjetar).

Njihove vrijednosti se određuju na temelju mjerenja izvršenih na mjestu izgradnje sabirničkog sustava. Period u kojem se vrše mjerenja meteoroloških veličina, a koje se koriste za proračune, se određuju nacionalnim zakonima [13].

Za statističku obradu rezultata mjerenja i procjenu ekstremnih vrijednosti koristi se Gumbelova razdioba [15, 16]. Ova metoda najbolje rezultate daje za maksimalne oborine, ekstremne temperature zraka i maksimalne brzine vjetra. Gumbelova razdioba daje vjerojatnost premašivanja proračunate ekstremne vrijednosti ili ekstremnu vrijednost koju slučajna varijabla poprima u određenom periodu.

Prijenosna razdoblja za ekstremne vrijednosti su tipično definirana kao povratno razdoblje od 50 godina, iako se mogu koristiti različiti periodi ovisno o specifičnim zahtjevima projekta [17]. Ekstremne vrijednosti se određuju u povratnom periodu  $T$ , pri čemu on predstavlja srednji razmak (u godinama) koji protječe između dva premašaja vrijednosti  $x$ . Dakle,  $\frac{1}{T}$  je vjerojatnost da će  $x$  biti premašena u bilo kojoj godini.

### **Temperatura zraka**

Temperaturni utjecaji na cijevne sabirnice temelje se na sljedeća dva izvora topline:

- grijanje cijevi uslijed protjecanja struje i razvijanja toplinske energije u omskom otporu cijevi,
- grijanje i hlađenje cijevi uslijed razmjene toplinske energije s okolišem [13].

Djelovanje temperature ovisi o mnogim klimatskim čimbenicima tako da se ne može uvijek promatrati odvojeno. Djelovanje temperature podijeljeno je u pet različitih situacija:

- minimalna temperatura bez drugih klimatskih čimbenika,
- pretpostavljena temperatura pri uvjetima ekstremnih brzina vjetra,
- reducirana brzina vjetra u kombinaciji pri uvjetima minimalne temperature,
- pretpostavljena temperatura pri kojoj može doći do zaleđivanja (ako nije drugačije specificirano za oba glavna tipa zaleđivanja uzima se temperatura  $-5$  °C dok se niže

temperature uzimaju u razmatranje u područjima gdje se temperatura nakon snježnih oborina znatno smanji),

- temperatura pri kombiniranom djelovanju vjetra i leda [13].

### **Brzina vjetra**

Kod projektiranja cijevnih sabirnica kao jedan od najvažnijih meteoroloških parametara koristi se maksimalna brzina vjetra  $v_m$  (u mjernom razdoblju od 2 sekunde). Maksimalna brzina vjetra se može izračunati iz srednje brzine vjetra  $v_{\text{sred}}$ , koja je srednja brzina vjetra u razdoblju od 10 minuta na visini 10 metara iznad tla, na području vrste terena II. Zbog turbulencije postoje vremenske i prostorne promjene trenutne brzine vjetra u odnosu na srednju brzinu vjetra. Intenzitet turbulencije ovisi o vrsti terena. Utjecaj terena je podijeljen u 5 kategorija. Prve četiri su određene pomoću duljine hrapavosti  $z_0$ , dok se peta nije mogla direktno povezati s duljinom hrapavosti [13].

### **Dodatni teret leda**

U slučaju proračuna opterećenja uzrokovanog ledom na vodiču potrebno je razlikovati „normalno opterećenje“ i „iznimno opterećenje“.

Normalno opterećenje je najveće opterećenje koje se javlja u prosjeku svakih 5 godina. Iznimno opterećenje treba uzeti u razmatranje ako se pojavljuje učestalo, a ovisi o karakteru terena na mjestu izgradnje. Vrijednost iznimnog opterećenja može nekoliko puta premašiti vrijednosti normalnog opterećenja. Pri određivanju iznimnog opterećenja potrebno je razmatrati podatke meteoroloških motrenja prethodnih godina te posebne topografske i meteorološke uvjete na mjestu izgradnje [13].

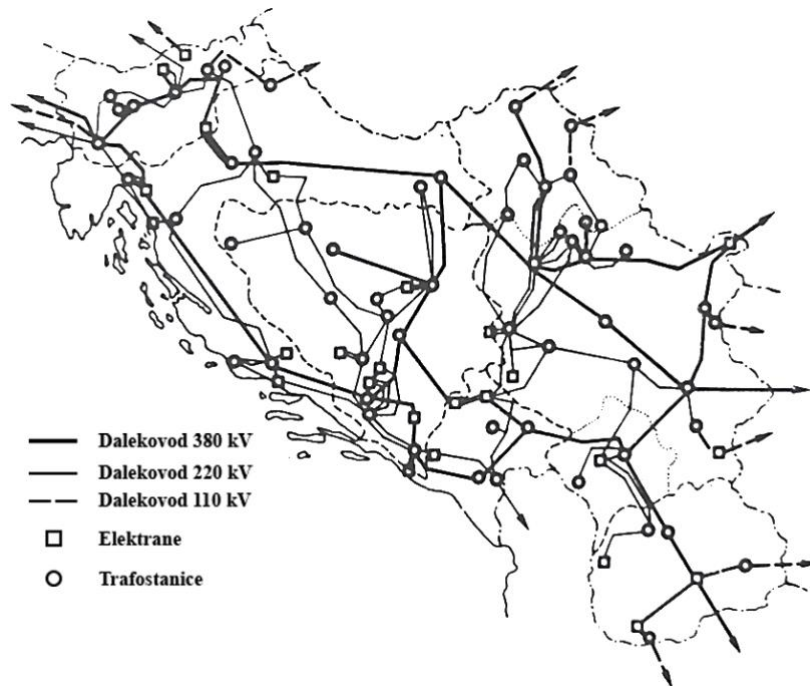
Opterećenja uzrokovana kombinacijom leda i vjetra i pripadajući faktori dani su u nacionalnim normama. Ako je za pojedinu zemlju potrebno, odnosno ako je u suglasju s praksom, mogu se uključiti veće vrijednosti brzina vjetra. Vjetreno opterećenje javlja se u različitim kombinacijama s opterećenjem uzrokovanim ledom (nataloženi led uzrokuje vertikalno opterećenje) i rezultira kombinacijom opterećenja. Pri proračunu treba paziti jer

kombinacija tih opterećenja može uzrokovati kritičnu situaciju koja nije rezultat samo vjetrovog opterećenja ili samo opterećenja uzrokovanog ledom [13].

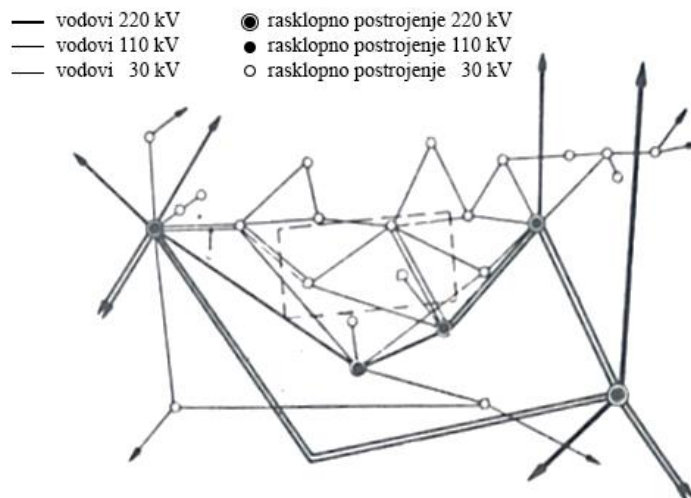
## 4. PRIJENOSNI SUSTAVI

### 4.1. Općenito o prijenosnim sustavima

Rastuća potražnja za električnom energijom zahtijeva izgradnju velikih elektrana i ekstenzivnih prijenosnih mreža koje obuhvaćaju cijele države i međusobno ih povezuju, kao i razvodnih mreža visokog i niskog napona koje dosežu do krajnjih korisnika. Primjer prijenosnog sustava na prostoru grada i država je vidljiv na slikama 4.1. i 4.2. [5].



**Slika 4.1.** Shema rasklopne mreže i postrojenja 1982 [5].



**Slika 4.2.** Shema mreže i rasklopnih postrojenja 30, 110 i 220 kV na području grada [5].

Elektroenergetski sustav je mreža koja vrši procese proizvodnje, prijenosa, distribucije i potrošnje električne energije. Neki od sastavnih dijelova su [3]:

- Elektrane – služe za proizvodnju energije i često se nalaze dalje od gusto naseljenih područja [3],
- trafostanice i rasklopna postrojenja – spajaju mreže različitih naponskih razina [3],
- prijenosni sustav – služi za prijenos električne energije preko velikih udaljenosti [3],
- distribucijska mreža – dostavlja energiju potrošačima, pri čemu se napon snižava na potrebnu razinu [3].

S obzirom na visoke napone i velike struje, nije moguće provesti distribuciju i transformaciju električne energije bez posebnih postrojenja. Taj zadatak obavljaju rasklopna postrojenja. U njima se nalaze uređaji za uključivanje i isključivanje, transformatori, zaštitna oprema za transformatore i vodove, mjerni uređaji za kontrolu pogona i obračun energije, te oprema za upravljanje i signalizaciju stanja različitih aparata [5].

Prijenos električne energije podrazumijeva prijenos velike količine električne energije od mjesta proizvodnje, preko prijenosne mreže do trafostanice koja se spaja na distribucijsku mrežu. S obzirom na to da se energija često proizvodi daleko od potrošača, prijenosni sustav mora imati mogućnost pokrivanja velikih udaljenosti. Iz tog razloga, prijenosni sustav koristi vodove i kabele koji su najčešće visokonaponski (od 110 kV do 400 kV) i načinjeni od bakra ili aluminijske. Prijenos je uglavnom izmjenični i trofazni, jer se tako može isporučiti više snage. Tako se postiže mali električni otpor kako bi se minimalizirali gubici pri prijenosu električne energije [4].

Rasklopno postrojenje je potrebno u svakom čvorištu mreže, bez obzira na prisutnost transformacija. Ova postrojenja smještena su u elektranama, gdje distribuiraju energiju proizvedenu u generatorima prema vodovima koji povezuju elektranu s mrežom. Unutar mreže razlikuju se transformatorske stanice, koje osim čvorišta vodova sadrže i transformaciju, te razdjelne stanice koje služe kao čvorišta vodova istog napona. Veliki potrošači također imaju rasklopna postrojenja koja preuzimaju energiju iz mreže, vrše transformaciju i razvode energiju dalje [5].

Sva distribucijska područja u pravilu rade sa sinkroniziranim frekvencijama trofazne izmjenične struje, što daje mogućnost povezivanja velikog broja proizvođača i potrošača

električne energije, omogućuje učinkovitije tržište električne energije i smanjuje suvišnu proizvodnju [3].

Pojam električni vod predstavlja skup jednog ili više vodiča, njihove izolacije i ostale električne opreme koja se koristi u svrhu prijenosa električne energije. Dije se na nadzemne i kabelske vodove, koji mogu biti podzemni, podvodni, i slično. Nadzemni vodovi kao izolaciju koriste zrak, dok kabeli koriste gumu, termoplastične mase i papir natopljen uljem ili smolom [4].

## 4.2. Uloga sabirnica

Sabirnice predstavljaju temeljni element u rasklopnim postrojenjima. Njihova funkcija je povezivanje vodova koji dovode energiju s vodovima koji je dalje distribuiraju. Budući da su svi vodovi povezani sa sabirnicama, njihova uloga u normalnom radu rasklopnog postrojenja je od iznimne važnosti. Sabirnice se izrađuju od neizoliranih vodiča, najčešće od bakra ili aluminija. Za unutarnja rasklopna postrojenja s nazivnim naponom do 35 kV koriste se okrugli, plosnati ili U-profil, a za postrojenja viših napona, bilo unutarnje ili vanjske izvedbe, upotrebljavaju užeta ili cijevi [5].

Odabir presjeka sabirnica temelji se na sljedećim kriterijima:

1. uzimajući u obzir maksimalnu struju u normalnom radu,
2. uzimajući u obzir porast temperature sabirnica tijekom trajanja kratkog spoja,
3. uzimajući u obzir mehaničko naprezanje u slučaju kratkog spoja [5].

U distribuciji električne energije, sabirnica je metalna traka ili šipka, koja se obično nalazi unutar rasklopnih postrojenja, razvodnih ploča i kućišta za lokalnu distribuciju visokih struja. Također se koriste za povezivanje visokog naponske opreme u električnim rasklopnim postrojenjima te niskonaponske opreme u baterijskim bankama. Općenito su neizolirane i dovoljno čvrste da ih u zraku podržavaju izolirani stupovi. Ove karakteristike omogućuju adekvatno hlađenje vodiča i omogućuju priključivanje na različitim točkama bez potrebe za stvaranjem novih spojeva.

Sabirnice se proizvode u različitim oblicima, uključujući ravne trake, čvrste šipke i štapove, a obično su izrađene od bakra, mesinga ili aluminija, bilo kao čvrste ili šuplje cijevi [6].

Sabirnica mora biti dovoljno kruta da podnosi vlastitu težinu, sile uzrokovane mehaničkim vibracijama i eventualne potrese, kao i nakupljanje padalina kada je izložena vanjskim uvjetima. Sabirnica može biti podržana na izolatorima ili omotana izolacijskim materijalom. Zaštićena je od slučajnog kontakta metalnim uzemljenim kućištem ili podizanjem izvan dosega [7].

### **4.3. Nazivni rad**

Pri izboru opreme i dimenzioniranju dijelova rasklopnih postrojenja, važno je razlikovati nazivnu struju od struja koje se javljaju tijekom kratkog spoja. Nazivna struja je struja koja može prolaziti kroz uređaj, stroj ili vodič neograničeno dugo, bez izazivanja njihovog oštećenja. Međutim, to ne znači da tijekom normalnog rada za kraće vrijeme ne smije teći veća struja od nazivne bez rizika od oštećenja [5].

Maksimalna struja tijekom normalnog rada, koja je važna za odabir presjeka sabirnica, definira najveću struju koja teče kroz najopterećeniji dio sabirnica u uobičajenim uvjetima pogona. Cijele sabirnice se dimenzioniraju prema najopterećenijem dijelu. Porast temperature iznad temperature okoline koristi se kao kriterij za određivanje dopuštenog opterećenja sabirnica, pod uvjetom da maksimalna struja može trajati neograničeno dugo. Povišenje temperature sabirnica za 30 °C iznad temperature okoline je prihvatljivo. Dopuštena opterećenja utvrđena su eksperimentalno [5].

U tablicama 4.1. i 4.2. [5] navedena su dopuštena trajna opterećenja za bakrene i aluminijske plosnate profile, dok su u tablicama 4.3. i 4.4. [5] navedena dopuštena trajna opterećenja za okrugle profile i cijevi.



**Tablica 4.1.** Dopuštena trajna opterećenja u A bakrenih plosnatih profila (povišenje temperature za 30 °C) [5].

Visina x širina [mm]	Obojeni vodiči				Neobojeni vodiči			
	Broj vodiča po fazi				Broj vodiča po fazi			
	I	II	III	-   50   -	I	II	III	-   50   -
12 x 2	125	225			110	200		
15 x 2	155	270			140	240		
20 x 2	205	350			185	315		
25 x 3	300	510			270	460		
30 x 5	450	780			400	700		
40 x 5	600	1000			520	900		
40 x 10*	835	1500	2060	2800	750	1350	1850	2500
50 x 5*	700	1200	1750	2300	630	1100	1550	2100
50 x 10*	1025	1800	2450	3300	920	1620	2200	3000
60 x 5*	825	1400	1980	2650	750	1300	1800	2400
60 x 10*	1200	2100	2800	3800	1100	1860	2500	3400
80 x 5	1060	1800	2450	3300	950	1650	2200	2900
80 x 10*	1540	2600	3450	4600	1400	2300	3100	4200
100 x 10*	1880	3100	4000	5400	1700	2700	3600	4800
120 x 10*	2200	3500	4600	6100	2000	3200	4200	5500

*\*Preporučuje se za sabirnice, ostali profili za spoj sabirnica i aparata.*

**Tablica 4.2.** Dopuštena trajna opterećenja u A aluminijskih plosnatih profila (povišenje temperature za 30 °C) [5].

Visina x širina [mm]	Obojeni vodiči				Neobojeni vodiči			
	Broj vodiča po fazi				Broj vodiča po fazi			
	I	II	I	II	I	II	I	II
12 x 2	100	180			80	140		
20 x 2	195	340			145	270		
25 x 3	240	410			180	330		
30 x 3	280	480			205	385		
30 x 5*	360	625			270	500		
40 x 5*	460	800			350	650		
40 x 10*	670	1200	1650	2250	515	975	1350	1800
50 x 5*	560	970	1400	1850	425	780	1120	1500
50 x 10*	820	1440	1960	2660	625	1150	1600	2160
80 x 10*	1230	2100	2760	3680	930	1650	2300	3100
100 x 10*	1500	2450	3200	4300	1100	1950	2700	3700
120 x 10*	1760	2800	3700	4900	1310	2350	3100	4300

*\*Preporučuje se za sabirnice, ostali profili za spoj sabirnica i aparata.*

Zagrijavanje plosnatih profila pretpostavlja da je dulja stranica presjeka okomita na tlo i da razmak između vodiča odgovara njihovoj širini. Dopuštena trajna opterećenja vrijede za horizontalan raspored sabirnica, dok se za vertikalni raspored smanjuju za 10% do 15% zbog smanjenog hlađenja. Položeni vodiči imaju slabije odvođenje toplote, stoga su dopuštena trajna opterećenja manja. Dopuštena opterećenja određuju se korištenjem korekcijskih faktora, zbog čega se plosnati vodiči najčešće postavljaju okomito [5].

**Tablica 4.3.** Dopuštena trajna opterećenja u A okruglih profila (povišenje temperature za 30 °C) [5].

Promjer [mm]	Bakar		Aluminij	
	Obojeni vodič	Neobojeni vodič	Obojeni vodič	Neobojeni vodič
6	125	120	65	60
8	160	150	-	-
10	250	210	200	160
16	480	410	380	316
20	640	540	500	410
30	1100	900	870	680

**Tablica 4.4.** Dopuštena trajna opterećenja u A bakrenih i aluminijskih cijevi (povišenje temperature za 30 °C) [5].

Vanjski promjer [mm]	Unutarnji promjer [mm]	Bakar		Aluminij	
		Obojeni vodič	Neobojeni vodič	Obojeni vodič	Neobojeni vodič
20	16	360	325	280	230
	14	430	400	350	285
	12	480	430	385	320
30	26	550	500	430	350
	24	650	600	520	420
	22	800	650	580	470
50	44	1100	950	850	670
	42	1200	1100	970	770
	40	1400	1200	1000	820

**Tablica 4.4.** Nastavak [5].

Vanjski promjer [mm]	Unutarnji promjer [mm]	Bakar		Aluminij	
		Obojeni vodič	Neobojeni vodič	Obojeni vodič	Neobojeni vodič
60	54	1250	1200	1000	800
	52	1500	1300	1150	920
	50	1600	1450	1275	1000

Bojenjem sabirnica poboljšava se odvođenje topline, zbog čega su posebno navedena dopuštena opterećenja za obojene i neobojene vodiče.

U postrojenjima do 35 kV, zbog zahtjeva čvrstoće, sabirnice se ne izrađuju s profilom manjim od 40 x 5 mm, dok je za napone od 110 kV i više minimalni presjek, odnosno promjer, određen zahtjevom za sprečavanje pojave korone. Za rasklopno postrojenje nazivnog napona od 110 kV, minimalni presjek užeta je 95 mm<sup>2</sup>, a minimalni promjer cijevi 30 mm. Za napon od 220 kV, minimalni presjek užeta iznosi 300 mm<sup>2</sup>, a minimalni promjer cijevi 50 mm.

Profil, odnosno presjek vodiča za sabirnicu, određen prema maksimalnoj struji u normalnom pogonu, polazna je točka pri dimenzioniranju sabirnice. Tako odabrani profil treba međutim kontrolirati s obzirom na ugrijavanje i s obzirom na mehaničko naprezanje u slučaju kratkog spoja [5].

#### **4.4. Naprezanja, poremećaji i kvarovi**

Aktivni dijelovi rasklopnih postrojenja nalaze se pod naponom i kroz njih teku struje. Rasklopno postrojenje mora biti dizajnirano i održavano tako da spriječi oštećenja uzrokovana naponom između vodiča ili između vodiča i uzemljenih dijelova. Također mora izdržati djelovanje velikih struja koje se mogu pojaviti, posebno u slučaju kratkog spoja [5].

Aparati ugrađeni u rasklopna postrojenja trebaju biti odabrani da izdrže i napon i struju. Za elektrifikaciju se koristi trofazni sistem, a kada se govori o naponu, obično se misli na efektivnu vrijednost linijskog napona. Nazivni napon mreže je konvencionalna vrijednost po

kojoj je mreža nazvana, npr. ako je nazivni napon 10 kV, stvarni napon može biti malo veći ili manji od te vrijednosti [5].

Najviši napon mreže predstavlja maksimalnu vrijednost napona koja se može pojaviti u bilo kojem trenutku i na bilo kojem dijelu mreže u normalnim uvjetima rada. Ova vrijednost ne uzima u obzir privremene promjene uzrokovane smetnjama ili naglim isklapanjem velikih opterećenja. Informacija o najvišem naponu je ključna za određivanje razine izolacije te se više detalja može vidjeti u tablici 4.5. [5].

**Tablica 4.5.** Nazivni i najviši naponi mreža prema Međunarodnoj elektrotehničkoj komisiji (IEC) [5].

Nazivni naponi mreže [kV]			Najviši naponi mreže [kV]
Niz I	Niz II	Niz III	
3	3,3		3,6
6	6,6		7,2
10	11		12
15			17,5
20	22		24
30	33		36
45	44		52
60	66	69	72
80	88	90	100
100	110	115	123
120	132	138	145
150	161		170
220	225	230	245
275	287,5		300
380			420

Pri odabiru uređaja i dimenzioniranju dijelova rasklopnih postrojenja, potrebno je razlikovati nazivnu struju od struja koje se pojavljuju tijekom kratkog spoja. Nazivna struja je ona koja može neprekidno teći kroz uređaj, stroj ili vodič, a da ne uzrokuje njihovo oštećenje.

Međutim, to ne znači da u normalnom pogonu, za kratke vremenske intervale, kroz te komponente ne može teći struja veća od nazivnog opterećenja bez opasnosti od oštećenja [5].

U slučaju kratkog spoja, razlikuje se udarna struja kratkog spoja, rasklopna struja i struja relevantna za ugrijavanje tijekom kratkog spoja. Veličina tih struja ovisi o mreži u kojoj je rasklopno postrojenje ugrađeno, pa je za svako postrojenje i njegove dijelove potrebno posebno odrediti vrijednosti struja kratkog spoja. Zbog toga se ne mogu donijeti opći propisi za struje kratkog spoja kao za napone [5].

## 5. KRATKI SPOJ

### 5.1. Općenito o kratkom spoju

Kratki spoj je stanje u elektroenergetskom sustavu kada struja prolazi kroz neželjenu putanju s vrlo niskom impedancijom. Rezultat toga je pojava prekomjerne struje koja može ozbiljno oštetiti električni krug, njegove elemente, i uzrokovati pregrijavanje ili čak požar. U kontekstu sabirnica, kratki spoj može dovesti do termičkih oštećenja uslijed pregrijavanja, ili mehaničkih oštećenja uzrokovanih silama koje se javljaju prilikom struje kratkog spoja [5, 28].

Kratki spoj se događa kada dođe do premošćivanja izolacije između vodljivih dijelova sustava, što dovodi do kontakta između točaka s različitim potencijalima. Ova pojava može biti uzrokovana raznim čimbenicima kao što su oštećenja izolacije, vanjski atmosferski utjecaji (poput udara munje), pogrešna montaža ili drugi tehnički kvarovi. Posljedica kratkog spoja je nagli porast struja u sustavu koje premašuju nominalne vrijednosti, što može uzrokovati preopterećenje opreme i veliku štetu na sustavu [28].

Posljedice kratkog spoja su ozbiljne i mogu uključivati [28]:

- Termičko djelovanje velikih struja koje dovode do pregrijavanja opreme poput transformatora, sabirnica i vodiča,
- mehaničko djelovanje zbog jakih elektromagnetskih sila koje se javljaju uslijed kratkog spoja, što može deformirati ili čak uništiti dijelove elektroenergetskog sustava,
- potencijalna opasnost za ljudski život uslijed električnog luka koji može izazvati požar ili eksplozivne efekte.

Osim oštećenja na opremi, tijekom kratkog spoja dolazi do pada napona u mreži, što može rezultirati ispadom dijelova sustava iz pogona, smanjenom pouzdanošću opskrbe električnom energijom i posljedičnim ispadima potrošača. Zbog toga je neophodna brza intervencija zaštitnih uređaja poput prekidača, koji moraju prepoznati kvar i isključiti zahvaćeni dio sustava kako bi se spriječilo daljnje oštećenje [28].

Neki od najčešćih uzroka kratkog spoja su [28]:

- Oštećenja izolacije vodiča,
- dodir vodiča s drugim vodičem ili zemljom,
- pogrešno sklapanje uslijed ljudske greške,
- atmosferski utjecaji poput munje.

Navedene posljedice i uzroci zahtijevaju učinkovite mjere zaštite i brzu intervenciju kako bi se smanjile štete u sustavu i osigurala stabilnost mreže [28].

## 5.2. Komponente struje kratkog spoja

Kratki spoj je kompleksna pojava u elektroenergetskim sustavima i izaziva različite vrste struja koje utječu na rad sustava. Razumijevanje komponenti struje kratkog spoja ključno je za pravilno dimenzioniranje i zaštitu sustava. Struja kratkog spoja dijeli se na nekoliko faza, ovisno o trenutku pojave kratkog spoja i ponašanju električnih elemenata u sustavu [28].

### 5.2.1. Rasklopna struja kratkog spoja

Rasklopna struja kratkog spoja označava efektivnu vrijednost struje koja prolazi kroz prekidač u trenutku razdvajanja kontakata tijekom kratkog spoja. Glavni cilj isključenja kratkog spoja je eliminirati kvar u što kraćem vremenu kako bi se spriječila oštećenja električnih sustava i opreme. U tom procesu ključnu ulogu ima tzv. „*breaking current*”, označen kao  $I_b$ , koji predstavlja efektivnu vrijednost struje kratkog spoja u trenutku isklopa [28].

Vrijeme razdvajanja kontakata, poznato kao minimalno vrijeme zatezanja isklopa ( $t_{min}$ ), predstavlja vremenski interval između pojave kvara i trenutka kada prekidač počinje razdvajati svoje kontakte. Ovaj interval direktno utječe na veličinu rasklopne struje – što je  $t_{min}$  kraće, to su veće vrijednosti struje. Vrijednosti  $t_{min}$  variraju ovisno o tipu mreže. Na visokonaponskim mrežama ovo vrijeme iznosi između 0,06 s i 0,2 s, dok je na niskonaponskim mrežama znatno kraće, tipično između 0,01 s i 0,03 s [28].

Rasklopna struja ovisi o kombinaciji simetričnih i asimetričnih komponenti struje. Simetrične komponente definiraju se eksponencijalnim padom tijekom vremena, dok asimetrične komponente više ovise o uvjetima unutar sustava, uključujući poziciju generatora ili



transformatora te specifičnosti opreme u mreži. Na primjer, u blizini generatora, asimetrična rasklopna struja  $I_{b,asim}$  može se izraziti jednažbom [28]:

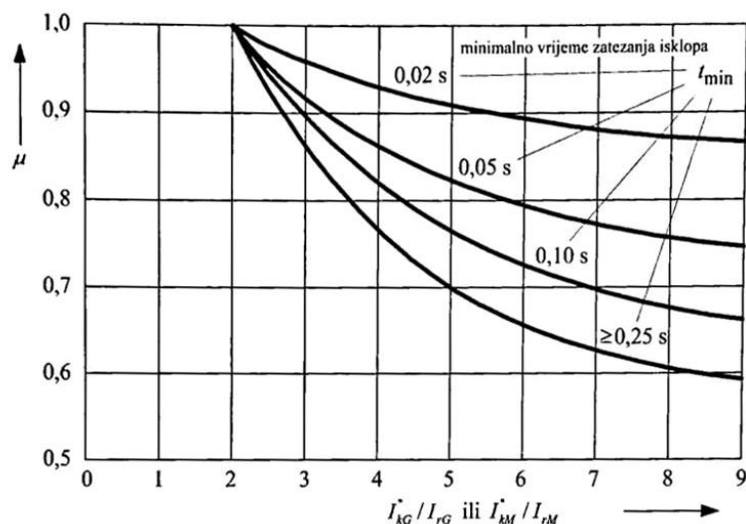
$$I_{b,asim} = \sqrt{\left[ (I''_k - I'_k) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} + (I'_k - I_k) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_k \right]^2 + \left[ I''_k \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \right]^2} \quad (5-1)$$

Za simetrične komponente, formula je nešto jednostavnija [28]:

$$I_{b,sim} = (I''_k - I'_k) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} + (I'_k - I_k) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_k \quad (5-2)$$

Na rasklopnu struju utječu brojni čimbenici, uključujući vrstu i lokaciju kvara (blizu ili daleko od generatora), reaktancija generatora, vremenske konstante i opće radne uvjete mreže. Primjerice, prekidači u visokoreaktantskim mrežama često moraju reagirati brže kako bi se smanjile posljedice kratkog spoja [28].

Vrijeme zatezanja prekidača uvelike utječe na ukupnu rasklopnu struju. Minimalno vrijeme ( $t_{min}$ ) određeno je sumom svih kašnjenja koja nastaju prilikom detekcije kvara, od trenutka kvara do trenutka isklopa prekidača. U praksi, za visokonaponske mreže  $t_{min}$  može iznositi 0,06 s, dok na niskonaponskim mrežama vrijednosti padaju i do 0,01 s. Faktor opadanja struje kratkog spoja ( $\mu$ ) važan je parametar koji se određuje kao omjer subtranzijentne i nazivne struje generatora. Dijagram na slici 5.1. ilustrira kako se faktor opadanja mijenja ovisno o vremenu isklopa prekidača ( $t_{min}$ ) i omjeru struja  $I_{kG} / I_{rG}$  [28].



**Slika 5.1.** Ovisnost faktora opadanja struje kratkoga spoja  $\mu$  o vremenu i omjeru struja  $I_{KG} / I_{rG}$  [28].

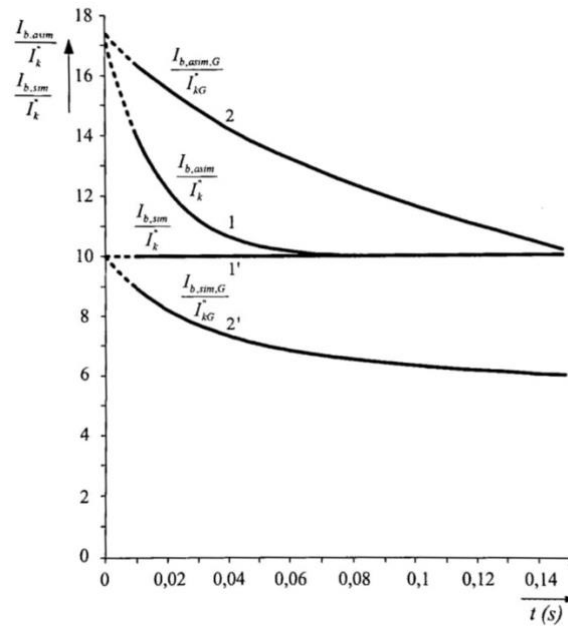
Jednadžbe koje opisuju ove odnose su [28]:

$$\mu = 0,84 + 0,26e^{-0,26\frac{I'_{KG}}{I_{rG}}} \quad \text{za } t_{min} = 0,02 \text{ s} \quad (5-3)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51e^{-0,30\frac{I'_{KG}}{I_{rG}}} \quad \text{za } t_{min} = 0,05 \text{ s} \quad (5-4)$$

Vrijednosti ovih faktora mogu se dobiti na temelju tablica iz IEC standarda 60909-0, a za svaki slučaj promjene napona u sustavu koriste se odgovarajuće aproksimacije [28].

Na slici 5.2. može se vidjeti usporedba vremenske funkcije asimetrične i simetrične rasklopne struje s obzirom funkciju subtranzijentne struje. Dijagrami pokazuju kako asimetrične komponente imaju tendenciju pada brže u slučajevima kvara blizu generatora, dok je pad simetričnih komponenti blaži [28].



**Slika 5.2.** Prikaz vremenske funkcije asimetrične i simetrične struje u odnosu na subtranzijentnu struju [28].

Zaključno, prilikom izračuna rasklopne struje, važno je uzeti u obzir sve faktore kao što su brzina prekidača, reaktancija generatora, lokacija kvara te vrijeme isklopa. Svi ovi parametri direktno utječu na vrijednost rasklopne struje i time na izbor zaštitnih mjera koje će se primijeniti u sustavu [28].

### 5.2.2. Trajna struja kratkog spoja

Trajna struja kratkog spoja ( $I_k$ ) predstavlja efektivnu vrijednost izmjenične komponente struje koja se zadržava nakon što su prijelazni procesi u mreži završeni. Ona ovisi o raznim čimbenicima, uključujući sustav uzbude, promjene naponskih stanja u mreži, opterećenje generatora i promjenu uklopnog stanja. Simetrične komponente struje, koje su ključne u ovom izračunu, često se izražavaju kao jednačba za efektivnu vrijednost početne struje  $I''_k$ , koja je jednaka  $I_k$  za slučaj kratkog spoja blizu generatora. Važno je napomenuti da se trajna struja razlikuje ovisno o udaljenosti od generatora i tipovima opreme u mreži [28].

Za određivanje minimalne trajne struje kratkog spoja ( $I_{k,min}$ ), kod generatora u praznome hodu bez regulacije napona, unutarnja fazna elektromotorna sila može se aproksimirati pomoću izraza [28]:

$$E_{min} = E_0 = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}} \quad (5-5)$$

Gdje je  $U_{rG}$  nazivni fazni napon stezaljki generatora. Nasuprot tome, za generator s maksimalnim uzbuđenjem, maksimalna trajna struja može se opisati pomoću [28]:

$$E_{max} = E = k_{max} \cdot \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}}; \quad k_{max} > 1 \quad (5-6)$$

Pretpostavljajući da je kratki spoj na stezaljkama generatora, nakon što su svi prijelazni procesi završeni, minimalna trajna struja kratkog spoja može se izračunati kao [28]:

$$I_{k,min} = \frac{E_{min}}{X_d} = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}X_d} \quad (5-7)$$

Gdje je  $X_d$  sinkrona reaktancija generatora. Ova reaktancija se također može definirati relativnim omjerom nazivnih vrijednosti kao [28]:

$$x_d = \frac{X_d}{X_{rG}} = \frac{\sqrt{3}I_{rG}X_d}{U_{rG}} \quad (5-8)$$

Relativna vrijednost minimalne trajne struje kratkog spoja zatim se može izraziti kao [28]:

$$\frac{I_{k,min}}{I_{rG}} = \frac{1}{x_d} = \lambda_{min} \quad (5-9)$$

Ovdje,  $\lambda_{min}$  označava faktor koji uzima u obzir relativnu vrijednost reaktancije i koristi se za proračun minimalne struje kratkog spoja. Vrijednosti za  $\lambda_{min}$  variraju ovisno o tipu generatora, pri čemu su orijentacijske vrijednosti za turbogeneratore  $x_d \approx 2$  do 3 i  $\lambda_{min} \approx 0,3$  do 0,5, dok su za hidrogeneratore vrijednosti  $x_d \approx 0,7$  do 1 i  $\lambda_{min} \approx 1$  do 1,4 [28].

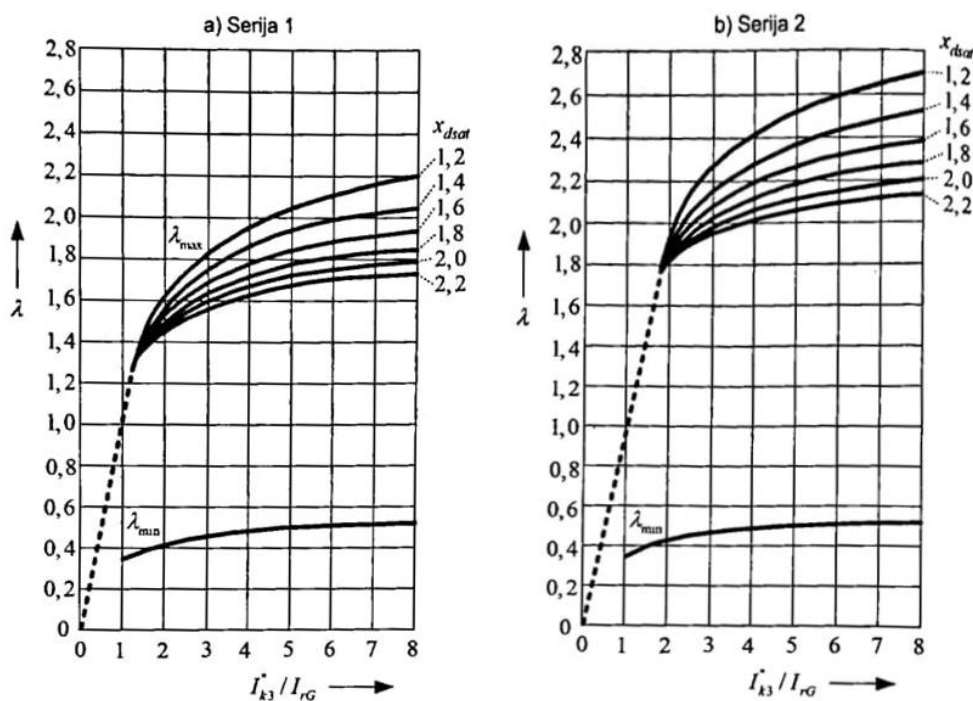
Maksimalna trajna struja kratkog spoja može se izračunati na sličan način, uzimajući u obzir maksimalno uzbuđenje generatora [28]:

$$I_{k,max} = \frac{E_{max}}{X_d} = k_{max} \cdot \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}X_d} \frac{1}{X_d} \quad (5-10)$$

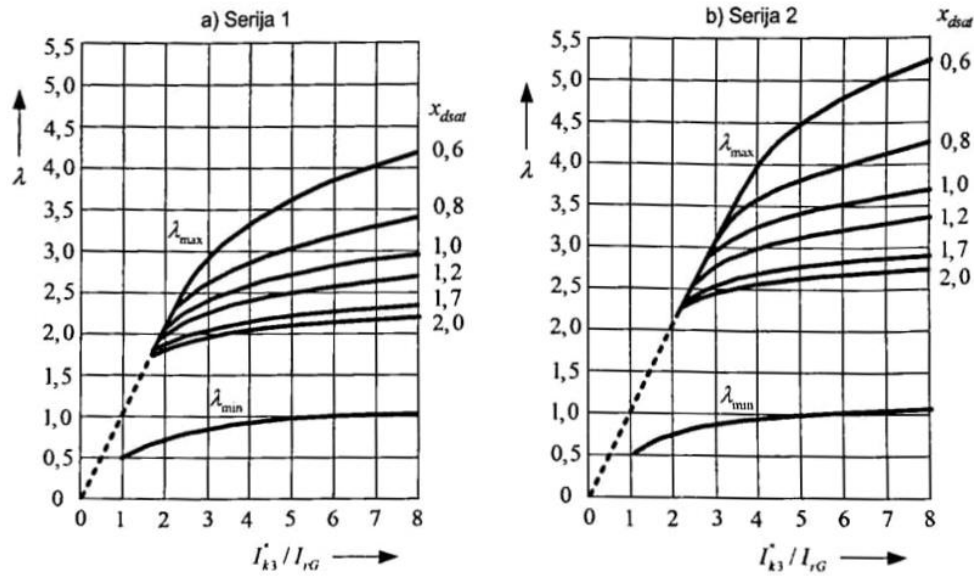
Ili, relativno [28]:

$$\frac{I_{k,max}}{I_{rG}} = \frac{k_{max}}{x_d} = \lambda_{max} \quad (5-11)$$

Konačno, za slučajeve gdje sudjeluje više generatora u napajanju mjesta kvara, trajna struja kratkog spoja može se dobiti kao suma doprinosa svakog generatora. Faktor  $\lambda_{max}$  definira odnos maksimalne uzbude generatora i njegove sposobnosti da proizvede trajnu struju kratkog spoja. Krivulje na slikama 5.3. i 5.4. prikazuju promjenu faktora  $\lambda_{min}$  i  $\lambda_{max}$  u odnosu na početnu struju kratkog spoja za različite tipove generatora [28].



Slika 5.3. Faktori  $\lambda_{min}$  i  $\lambda_{max}$  za turbogeneratore [28].



Slika 5.4. Faktori  $\lambda_{min}$  i  $\lambda_{max}$  za hidrogeneratore [28].

### 5.2.3. Struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkoga spoja

Struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkoga spoja računa se pomoću Jouleovog integrala koji mjeri proizvedenu toplinsku energiju unutar mreže tijekom kratkoga spoja. Ova toplinska energija proizvedena je zbog protoka struje kroz otporne komponente mreže tijekom trajanja kratkoga spoja. Kako bi se odredila efektivna vrijednost izmjenične struje  $I$ , koristi se relacija [28]:

$$I = \frac{1}{\sqrt{T}} \int_0^T i^2(t) dt \quad (5-12)$$

Gdje  $i(t)$  predstavlja trenutačnu vrijednost struje, a  $T$  predstavlja vrijeme promatranja. Kod sinusne struje, koja ima konstantnu amplitudu  $I_{max}$ , integracija ovog izraza rezultira [28]:

$$I = I_{max} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (5-13)$$

Ova vrijednost ne ovisi o trajanju promatranja jer se amplituda sinusne struje mijenja s konstantnom frekvencijom [28].

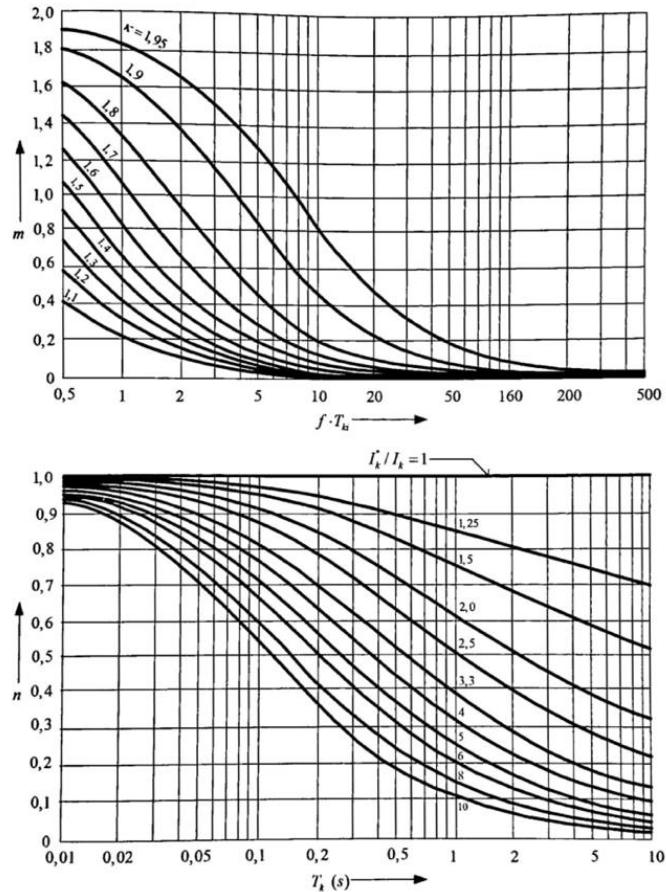
Efektivna vrijednost struje mjerodavna za ugrijavanje, označena kao  $I_{th}$ , može se definirati pomoću Jouleovog integrala koji uzima u obzir trajanje kratkoga spoja  $T_k$ . Ako se pretpostavi da je  $T_k$  vrijeme trajanja kratkoga spoja, efektivna vrijednost struje može se izraziti kao [28]:

$$\int_0^{T_k} i_k^2(t) dt = I_k^2 \cdot (m + n) \cdot T_k = I_{th}^2 \cdot T_k \quad (5-14)$$

Ovdje su  $m$  i  $n$  faktori koji uzimaju u obzir različite vremenske komponente struje tijekom kratkoga spoja, pri čemu je  $m$  vezan uz termičko djelovanje istosmjerne komponente, a  $n$  uz izmjenične komponente. Konačna vrijednost struje mjerodavne za ugrijavanje tijekom kratkoga spoja je [28]:

$$I_{th} = I_k \cdot \sqrt{m + n} \quad (5-15)$$

Vrijednosti  $m$  i  $n$  ovise o trajanju kvara  $T_k$  i minimalnom vremenu zatezanja prekidača, a prikazane su u dijagramima na slici 5.5. Na temelju tih vrijednosti i Jouleovog integrala, može se procijeniti koliko toplinske energije proizvodi struja tijekom kvarova [28].



**Slika 5.5.** Prikaz faktora  $m$  i  $n$  za određivanje struje koja je mjerodavna za ugrijavanje tijekom kratkog spoja [28].

Ako se javlja više kratkih spojeva u nizu (npr. zbog neuspjelih pokušaja prekidanja strujnog kruga), integracija se vrši za svaki pojedini kratki spoj, i suma Jouleovih integrala može se koristiti za dobivanje ukupne efektivne vrijednosti struje mjerodavne za ugrijavanje [28]:

$$\int_0^{T_k} i_k^2(t) dt = \sum_{i=1}^r I_{ki}^2 (m_i + n_i) T_{ki} = I_{th}^2 T_k \quad (5-16)$$

$$T_k = \sum_{i=1}^r T_{ki} \quad (5-17)$$

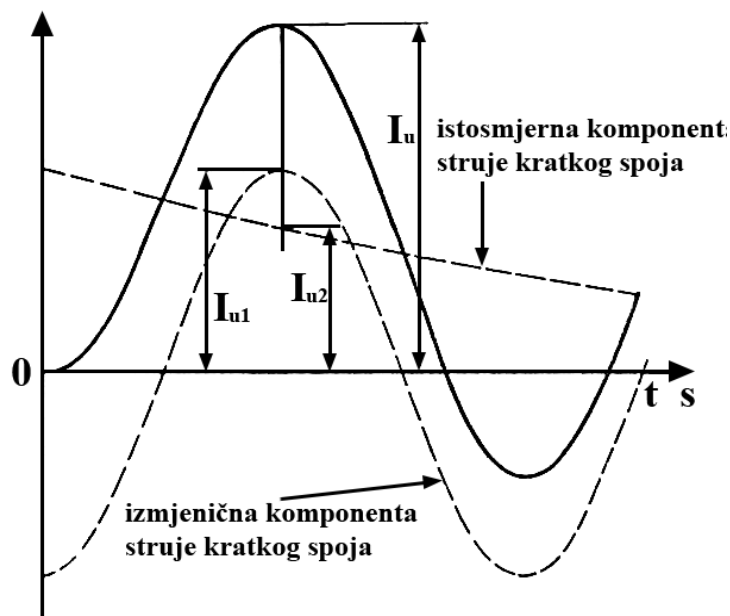
$$I_{th} = \frac{1}{T_k} \sum_{i=1}^r I_{ki}^2 (m_i + n_i) T_{ki} \quad (5-18)$$



Vrijednosti  $m_i$  i  $n_i$  se mogu pronaći pomoću dijagrama za specifične tipove kvarova, gdje su vrijednosti udarnih faktora  $k$  također uključene [28].

### 5.3. Udarne struja kratkog spoja

Udarne struja kratkog spoja odnosi se na maksimalnu struju koja se javlja odmah nakon što nastane kratki spoj, kao što je prikazano na slici 5.15. [5].



Slika 5.6. Prilog definiciji udarne struje kratkog spoja [5].

Kombinira simetričnu (sinusoidnu) komponentu struje i asimetričnu komponentu koja sadrži jednosmjernu (DC) komponentu. Ta kombinacija uzrokuje da udarna struja dosegne veću vrijednost od one koju čini samo simetrična komponenta. Asimetrična komponenta opada eksponencijalno s vremenom, dok se preostala struja stabilizira na simetričnu vrijednost. X/R omjer, koji predstavlja omjer reaktancije i otpornosti sustava, ključan je za razumijevanje brzine opadanja asimetrične komponente. Što je veći X/R omjer, to asimetrična komponenta sporije opada i udarna struja traje duže [29, 30].

Formula za udarnu struju kratkog spoja uzima u obzir obje komponente [29]:

$$I_u = \sqrt{(I_{sim})^2 + (I_{DC})^2} \quad (5-19)$$

Gdje su  $I_u$  udarna struja,  $I_{sim}$  simetrična komponenta struje, i  $I_{DC}$  asimetrična komponenta struje koja uključuje istosmjernu komponentu. Ova udarna struja ključna je za dimenzioniranje zaštitnih uređaja kao što su osigurači i prekidači, jer oni moraju izdržati tu početnu visoku struju prije nego što prekinu strujni tok [29].

Udarni faktor je omjer udarne struje i simetrične struje kratkog spoja i koristi se za procjenu koliko je udarna struja veća od simetrične komponente. Formula za udarni faktor je [30]:

$$K_u = \frac{I_u}{I_{sim}} \quad (5-20)$$

Ovaj faktor daje važan uvid u to koliko visoke struje zaštitni uređaji moraju podnijeti u trenutku kratkog spoja. Udarni faktor ovisi o  $X/R$  omjeru; što je veći ovaj omjer, to je veći i udarni faktor, jer DC komponenta sporije opada [30].

#### 5.4. Subtranzijentna, tranzijentna i trajna struja kratkoga spoja

Valni oblik struje kratkog spoja prolazi kroz tri faze: subtranzijentnu, tranzijentnu i trajnu struju kratkog spoja. Svaka faza predstavlja specifično ponašanje struje u trenutku kvara te ima različite vrijednosti reaktancije koje su ključne za procjenu opterećenja električnih uređaja i zaštitnih sustava. Početni udar struje, poznat kao subtranzijentna struja, najvažniji je jer se u prvih nekoliko milisekundi kratkog spoja javlja najviša amplituda struje, što može oštetiti električnu opremu ako sustav zaštite nije pravilno dimenzioniran [31, 32].

Subtranzijentna struja kratkog spoja nastaje odmah nakon kratkog spoja i doseže najveću vrijednost, jer su impedancije sustava najmanje u toj fazi. Ova struja može biti 10 do 18 puta veća od nominalne struje, a ključan parametar za ovu fazu je subtranzijentna reaktancija  $X''_d$ , koja definira razinu otpora sustava prema izmjeni struje u ovoj fazi. Manja vrijednost  $X''_d$  znači veću početnu struju, što se izražava formulom [31, 32]:

$$I'' = \frac{E}{X''_d} \quad (5-21)$$

Gdje je  $I''$  subtranzijentna struja,  $E$  napon sustava, a  $X''_d$  subtranzijentna reaktancija [31, 32].

Nakon subtranzijentne faze, dolazi do faze tranzijentne struje, kada se istosmjerna komponenta postepeno smanjuje, dok se reaktancija povećava. Ova se faza opisuje tranzijentnom reaktancijom  $X'_d$ , a vrijednost tranzijentne struje može se izračunati pomoću formule [31]:

$$I' = \frac{E}{X'_d} \quad (5-22)$$

Kako se istosmjerna komponenta smanjuje, struja prelazi u stabilno stanje, poznato kao trajna struja, u kojoj izmjenična komponenta postaje dominantna. Trajna struja ovisi o stacionarnoj reaktanciji  $X_d$  i računa se prema formuli [31]:

$$I = \frac{E}{X_d} \quad (5-23)$$

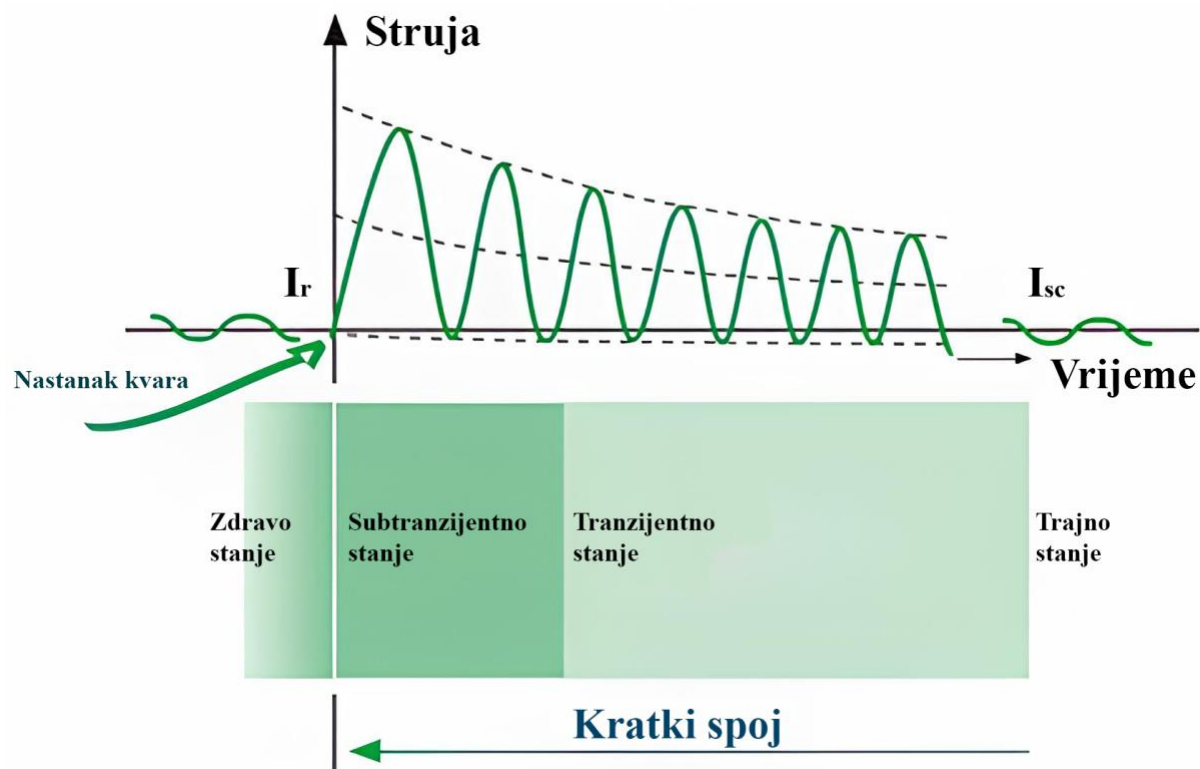
U ovoj fazi, struja se stabilizirala i više nema značajnog smanjenja [31].

Subtranzijentna struja važna je za dizajn zaštitnih uređaja jer predstavlja najvišu vršnu vrijednost struje u trenutku kratkog spoja. Ova vršna struja, poznata kao udarna struja, kombinira simetričnu izmjeničnu komponentu i asimetričnu istosmjernu komponentu. Ukupna udarna struja može se izračunati pomoću sljedeće formule [31, 32]:

$$I_u = \sqrt{(I_{sim})^2 + (I_{DC})^2} \quad (5-24)$$

Gdje  $I_u$  označava udarnu struju,  $I_{sim}$  simetričnu komponentu, a  $I_{DC}$  asimetričnu komponentu struje. Udarni faktor se koristi za procjenu maksimalnog opterećenja koje zaštitni uređaji moraju izdržati i definiran je jednačbom (5-20) te olakšava dimenzioniranje sustava zaštite, jer omogućuje izračun kolika će biti maksimalna vrijednost udarne struje u odnosu na simetričnu komponentu [31, 32].

Slika 5.7. prikazuje valni oblik struje kratkog spoja, uključujući subtranzijentnu, tranzijentnu i trajnu komponentu [32].



Slika 5.7. Valni oblik struje kratkog spoja [Y].

### 5.5. Termički učinci struje kratkog spoja

Kratki spojevi predstavljaju ozbiljnu prijetnju za električne sustave, budući da mogu uzrokovati značajna oštećenja na sabirnicama. Pretpostavlja se da tijekom trajanja kratkog spoja toplina nema dovoljno vremena da se odvede u okolinu, što rezultira proporcionalnim povećanjem temperature vodiča s proizvedenom toplinom. To se može opisati sljedećom jednačinom [1]:

$$m \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta_{ks} = I_t^2 \cdot R \cdot t \quad (5-25)$$

Gdje je:

- $m$  - masa vodiča [kg],
- $c_p$  - specifična toplinski kapacitet vodiča [Ws/kg·°C],
- $\Delta\vartheta_{ks}$  - povećanje temperature tijekom kratkog spoja [°C],

- $I_t$  - efektivna vrijednost struje tijekom trajanja kratkog spoja [kA],
- $t$  - trajanje kratkog spoja [s],
- $R$  - djelatni otpor vodiča [ $\Omega$ ].

Kako bi se izračunao otpor i masa vodiča, koriste se sljedeći izrazi [1]:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (5-26)$$

$$m = A \cdot l \cdot \gamma \quad (5-27)$$

Zamjenom ovih izraza u početnu jednadžbu dobiva se:

$$A^2 = I_t^2 \cdot t \cdot \frac{1}{\frac{\gamma \cdot c_p}{\rho} \cdot \Delta\vartheta_{ks}} \quad (5-28)$$

Efektivna vrijednost struje kratkog spoja određuje se rješavanjem integrala [1]:

$$I_2^t = \frac{1}{t} \int_0^t i_k^2(t) dt \quad (5-29)$$

Jednadžba za zagrijavanje vodiča tijekom kratkog spoja glasi [1]:

$$i^2 \cdot R \cdot dt = m \cdot c_p \cdot d\vartheta + A \cdot \alpha_s \cdot \vartheta \cdot dt \quad (5-30)$$

Uzimajući u obzir promjenu otpora tijekom trajanja kratkog spoja, koristi se sljedeći izraz:

$$R = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta) \cdot \frac{l}{A} \quad (5-31)$$

Integriranjem i rješavanjem jednadžbe za otpor tijekom trajanja kratkog spoja dobiva se [1]:

$$\frac{i^2}{A^2} \cdot dt = \frac{\kappa_{20} \cdot \gamma \cdot c_p}{1 + \alpha \cdot \vartheta} \cdot d\vartheta \quad (5-32)$$

Rezultat ovih izračuna daje efektivnu vrijednost struje kratkog spoja [1]:

$$\frac{I_t}{A} = \sqrt{\frac{\kappa_{20} \cdot c \cdot \rho}{\alpha_{20} \cdot t} \cdot \ln \frac{1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_e - 20)}{1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_a - 20)}} \quad (5-33)$$

gdje su korištene sljedeće konstante i parametri:

- $c = 910 \text{ Ws/kg}^\circ\text{C}$ ,
- $\gamma = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ ,
- $\kappa_{20} = 34,8 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ ,
- $\alpha_{20} = 0,0041 / ^\circ\text{C}$ ,
- $t = 1 \text{ s}$  - vrijeme trajanja kratkog spoja,
- $\vartheta_a$  - početna temperatura kratkog spoja,
- $\vartheta_e$  - krajnja temperatura kratkog spoja.

Posljedice kratkog spoja su brojne. Za vrijeme kratkog spoja može nastati električni luk koji može prouzročiti oštećenja izolacije, trajno spajanje vodiča, požare i može predstavljati opasnost po život živim bićima koja se nalaze u blizini. Posljedice kratkog spoja nisu

ograničene samo na sustav u kojem se dogodio, već mogu zahvatiti i okolne mreže. Može doći do naponskih propada u vremenu potrebnom za otklanjanje kratkog spoja, što može trajati od nekoliko milisekundi do nekoliko stotina milisekundi. Ovisno o dizajnu mreže i njenim zaštitnim uređajima, gašenje dijela mreže je također jedna od potencijalnih posljedica. U sinkronim strojevima može doći do dinamičke nestabilnosti i gubitka sinkronizma, dok u ostatku mreže može doći do smetnji u vođenju strujnih krugova [1, 5].

### 5.5.1. Računanje presjeka sabirnice u odnosu na zagrijavanje tijekom kratkog spoja

Koristeći prethodno navedene konstante i parametre, možemo izvršiti sljedeći izračun kod sabirnice gdje vrijede sljedeći podaci:

- $\theta_a = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- $\theta_b = 170 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- $D = 0,035 \text{ m}$ ,
- $d = 0,03 \text{ m}$ .

Koristeći jednadžbe [1]:

$$A' = \frac{I_t}{\sqrt{\frac{\kappa_{20} \cdot c \cdot \rho}{\alpha_{20} \cdot t} \cdot \ln \frac{1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_e - 20)}{1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta_a - 20)}}} \quad (5-34)$$

$$A = \frac{D^2 - d^2}{4} \cdot \pi \quad (5-35)$$

Kada se uvrste vrijednosti, dobije se [1]:

$$A' = \frac{\sqrt{2} \cdot 10 \cdot 10^3}{\sqrt{\frac{34,8 \cdot 910 \cdot 0,03333}{0,004} \cdot \ln \frac{1 + 0,004 \cdot (170 - 20)}{1 + 0,004 \cdot (70 - 20)}}}$$

$$A = \frac{0,035^2 - 0,03^2}{4} \cdot \pi$$

Nakon uvrštavanja brojeva i rješavanja jednadžbi, rezultat je:

$$A' \approx 175,07 \text{ mm}^2$$

$$A \approx 254,47 \text{ mm}^2$$

S obzirom da vrijedi  $A' \leq A$ , zaključuje se da sabirnica zadovoljava uvjete.

## 5.6. Proračun elektromagnetskih sila na sabirnicama tijekom kratkog spoja

Sabirnički sustav koji se analizira dio je 110 kV postrojenja, gdje su sabirnice postavljene na visinu od 7000 mm, s razmacima između sabirnica od 2500 mm. Duljina analiziranih sabirnica iznosi 9500 mm. Sabirnice su cijevi E-ALMgSi0.5f22 80mm, što znači da im je promjer 80 mm. S obzirom da je u osnovnim tehničkim podacima (tablica 5.1.) zadana struja kratkog spoja te ona iznosi 40 kA, koristiti će se kao struja kratkog spoja, a analizirati će se jednopolni kratki spoj s obzirom da je to najčešći kvar koji se događa u praksi i proizvodi najveće sile na sabirnice, kao i tropolni kratki spoj.

U tablici 5.1. su dani neki osnovni tehnički podaci navedenog polja, a sustav sabirnica prikazan je na slici 5.8.

**Tablica 5.1.** Osnovni tehnički podaci 110 kV polja koje se analizira.

Osnovni tehnički podaci		
Oznaka	Naziv	Vrijednost
$U_n$	Nazivni linijski napon	110 kV
$U_{max}$	Najviši pogonski linijski napon	123 kV
$U_{peak}$	Najviši podnosivi udarni napon	550 kV
$I_{ns}$	Nazivna trajna struja sabirnica	1900 A
$I_{ks3}$	Struja kratkog spoja za dimenzioniranje opreme čeličnih konstrukcija	40 kA
$t_{ks}$	Vrijeme trajanja struje kratkog spoja	0,5 s





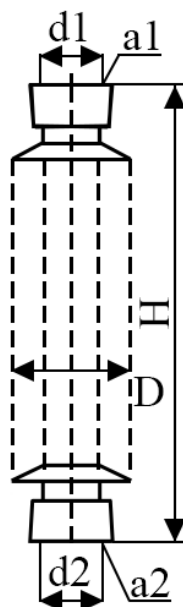
**Slika 5.8.** Sustav sabirnica

Pri izgradnji promatranog postrojenja korišteni su C8 potporni izolatori. U tablici 5.2. možemo vidjeti njihove podatke:

**Tablica 5.2.** Podaci C8 potpornih izolatora [38]:

Type BIL 125 kV						
IEC Broj Klase	Puzaona udaljenost [mm]	Dimenzije [mm]		Granično opterećenje		Masa [kg]
		H	D	Savijanje [kN]	Torzija [kNm]	
C8-123II	500	305	155	8	1,2	8,1

Na slici 5.9. se može vidjeti shema navedenog potpornog izolatora:

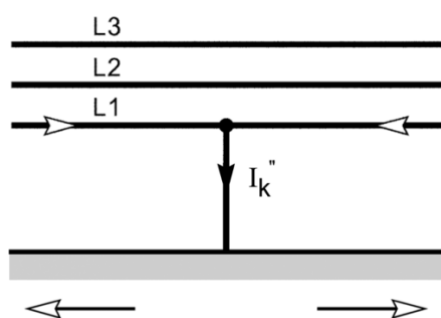


**Slika 5.9.** Shema C8 potpornog izolatora [38].

### 5.6.1. Jednopolni kratki spoj

Kod pojave kratkog spoja na sabirničkom sustavu dolazi do stvaranja vrlo velikih struja, koje generiraju jake elektromagnetske sile između sabirnica. Te sile izazivaju mehaničke deformacije na sabirnicama, a jedan od ključnih zadataka je pravilno dimenzioniranje sabirnica i nosača kako bi sustav mogao izdržati te sile bez oštećenja [33].

Na slici 5.10. može se vidjeti shema jednopolnog kratkog spoja koji će se računati:



**Slika 5.10.** Jednopolni kratki spoj [13].

S obzirom da su struje u sabirnicama L2 i L3 zanemarive u odnosu na struju kratkog spoja, za  $I_2$  će se pretpostaviti da vodičem teče nazivna struja, stoga elektromagnetske sile između paralelnih vodiča tijekom kratkog spoja se mogu izračunati koristeći formulu [39]:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi \cdot a} \quad (5-36)$$

Gdje su:

- $F$  - sila po jedinici duljine (N/m),
- $\mu_0$  - permeabilnost vakuuma ( $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ ),
- $I$  - struja kratkog spoja (A),
- $l$  - duljina sabirnice (m),
- $a$  – razmak između sabirnica (m) [39].

Za potrebe ovog proračuna, pretpostavljena struja kratkog spoja iznosi 40 kA, duljina sabirnica 9,5 m, a razmak između njih 2,5 m. Na temelju tih parametara, izračun elektromagnetske sile između sabirnica iznosi [39]:

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 40000 \cdot 1900 \cdot 9,5}{2\pi \cdot 2,5} = 57,76 \text{ N}$$

Ova sila djeluje na svaku jedinicu duljine sabirnica i može prouzročiti deformacije ili pomake u sustavu sabirnica ako nisu dovoljno čvrsto podržane. Kako bi se osigurala stabilnost sustava, potrebno je izračunati zakretno momente koji djeluju na sabirnice. Na slici 5.11. prikazana je struktura nosača i sabirnica.



**Slika 5.11.** Struktura nosača i sabirnica.

Zakretni moment može se izračunati pomoću formule [33]:

$$M = F \cdot r \quad (5-37)$$

Gdje je:

- $M$  - zakretni moment (Nm),
- $F$  - sila (N),
- $r$  - udaljenost od osi rotacije (m) [33].

S obzirom da je sabirnica postavljena horizontalno, s podrškom na oba kraja, za udaljenost od osi rotacije će se uzeti polovina duljine sabirnice, odnosno 4,75 m. Na temelju prethodno izračunate sile  $F = 57,76 \text{ N}$ , zakretni moment iznosi:

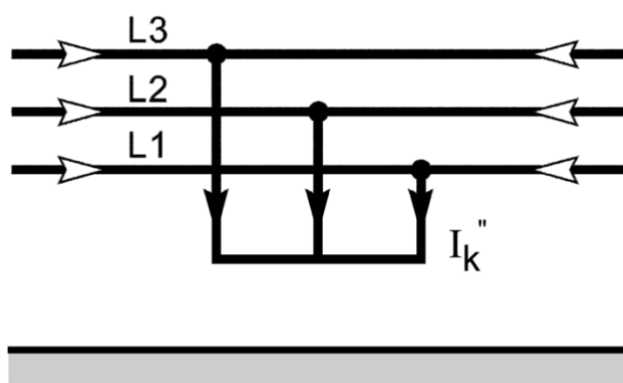
$$M = 57,76 \text{ N} \cdot 4,75 \text{ m} = 274,36 \text{ Nm}$$

Ovaj zakretni moment potrebno je uzeti u obzir prilikom dimenzioniranja i planiranja montaže sabirnica, kako bi sustav mogao izdržati sve moguće mehaničke napore prouzrokovane kratkim spojem. Elektromagnetske sile i zakretni momenti ključni su faktori koji utječu na dizajn potpornog sustava sabirnica.

Sabirnice napravljene od AlMgSi0,5 F22 mehanička svojstva definiraju normom EN 755-2 (DIN 1748 T.1) [35]. Iz te norme možemo vidjeti da cijevna sabirnica koja se analizira ima vlačnu čvrstoću oko 220 MPa i granicu tečenja 160 MPa [36]. Naprezanja koja bi nastala pri kratkom spoju koji je analiziran su znatno ispod tog praga što znači da na sabirnici neće biti trajnih deformacija ili oštećenja. Također može se primijetiti da su iznosi sile i zakretnog momenta vrlo mali, što je očekivano, s obzirom da samo jednom sabirnicom teče struja kratkog spoja.

### 5.6.2. Tropolni kratki spoj

Kod tropolnog kratkog spoja, kroz sve tri sabirnice prolaze struje kratkog spoja te će se pojaviti značajno međudjelovanje sila. Shema tropolnog kratkog spoja može se vidjeti na slici 5.11.:



Slika 5.11. Tropolni kratki spoj [13].

Za izračun će se koristiti jednačba (2-7) koja je navedena u drugom poglavlju i koja glasi [5]:

$$F = 2 \frac{I_1 I_2}{a} \cdot 10^{-7} \cdot \left( \sqrt{l^2 + a^2} - a \right)$$

Gdje su:

- $F$  – ukupna sila na sabirnicu (N),
- $I_1, I_2$  – struje koje teku paralelnim vodičima (A),
- $a$  – razmak između vodiča (m),
- $l$  – duljina vodiča (m) [5].

Budući da je riječ o simetričnom trofaznom kratkom spoju, tada vrijedi da je  $I_1 = I_2 = I_{KS} = 40$  kA. Duljina sabirnica je 9,5 m, a razmak između sabirnica je 2,5 m. Za ovaj proračun će vrijediti sljedeće:

$$F_{L1} = F_{L3} = F_{v,u} + F_{v,v}$$

Gdje vrijedi sljedeće:

$$F_{v,u} = 2 \frac{I_{KS}^2}{a_{v,u}} \cdot 10^{-7} \cdot \left( \sqrt{l^2 + a_{v,u}^2} - a_{v,u} \right)$$

$$F_{v,v} = 2 \frac{I_{KS}^2}{a_{v,v}} \cdot 10^{-7} \cdot \left( \sqrt{l^2 + a_{v,v}^2} - a_{v,v} \right)$$

U prethodno navedenim jednačbama važi sljedeće:

- $F_{v,u}$  - sila između vanjskih vodiča (L1 i L3) i unutarnjeg vodiča (L2),
- $F_{v,v}$  – sila između dva vanjska vodiča (L1 i L3),
- $a_{v,u}$  - udaljenost vanjskih vodiča (L1 i L3) do unutarnjeg vodiča (L2),
- $a_{u,u}$  - udaljenost između dva vanjska vodiča (L1 i L3).

Računa se sila između vanjskih vodiča i unutarnjeg vodiča:

$$F_{v,u} = 2 \frac{40000^2}{2,5} \cdot 10^{-7} \cdot \left( \sqrt{9,5^2 + 2,5^2} - 2,5 \right) = 937,4 \text{ N}$$

A zatim se računa sila između dva vanjska vodiča:

$$F_{v,u} = 2 \frac{40000^2}{5} \cdot 10^{-7} \cdot (\sqrt{9,5^2 + 5^2} - 5) = 367,1 \text{ N}$$

Zbroje se dobivene vrijednosti te se dobiva rješenje sila na sabirnicama L1 i L3:

$$F_{L1} = F_{L3} = 937 + 367 = 1304,5 \text{ N}$$

Sila na središnjoj sabirnici računa se na sljedeći način:

$$F_{L2} = F_{v,u} + F_{v,u} = 2 \cdot F_{v,u}$$

Izračunom se dobije vrijednost sile na središnjoj sabirnici L2:

$$F_{L2} = 2 \cdot 937,4 = 1874,8 \text{ N}$$

Za računanje zakretnog momenta koristi se jednadžba (5-37). Zakretni momenti na sabirnicama L1 i L3 će biti jednaki te će iznositi:

$$M_{L1} = M_{L3} = 1304,5 \cdot 4,75 = 6197,56 \text{ Nm}$$

Dok će zakretni moment na sabirnici L2 iznositi:

$$M_{L2} = 1874,8 \cdot 4,75 = 8905,3 \text{ Nm}$$

S obzirom na značajno veće iznose sila i zakretnih momenata u usporedbi sa jednopolnim kratkim spojem, može se reći da je trolni kratki spoj mjerodavan za računanje sila i momenata. Za precizniji proračun, važno je dobiti točne podatke o stvarnoj struji kratkog spoja u sustavu, kao i dodatne podatke o presjeku sabirnica i materijalu od kojeg su izrađene. Time se osigurava da dimenzioniranje zaštitne opreme, kao što su nosači i spojni elementi, bude izvedeno u skladu s mehaničkim opterećenjima koja mogu nastati tijekom kvara. Na slici 5.12. prikazan je dio analiziranog sustava sabirnica.



**Slika 5.12.** Dio sabirničkog sustava koji se analizira

## 6. SIMULACIJA U ANSYS-U

### 6.1. Što je ANSYS i za što se koristi

Ansys Electronics Desktop (AEDT) je moćna platforma za dizajn i simulaciju elektroničkih sustava. AEDT omogućuje pristup Ansysovim vrhunskim simulacijskim rješenjima za elektromagnetiku, uključujući Ansys HFSS, Ansys Maxwell, Ansys Q3D Extractor, Ansys SIwave i Ansys Icepak, koristeći radne procese električnog CAD-a (ECAD) i mehaničkog CAD-a (MCAD). Integracija s Ansysovim portfeljem toplinskih, fluidnih i mehaničkih rješenja omogućuje sveobuhvatnu Multiphysics analizu, pružajući korisnicima jednostavnost korištenja i brže rješavanje složenih simulacija za dizajn i optimizaciju [22].

AEDT je također softversko rješenje za „*multiphysics*“ simulacije koje omogućuje dizajn i simulaciju elektromagnetskih uređaja te provođenje toplinskih analiza. Korisničko sučelje verzije Ansys Electronics Desktop Student pruža kratak opis svih dostupnih podprozora i intuitivnih vrpca, te osnovne korake umetanja HFSS dizajna s prečacima za učinkovitije postavljanje uobičajenih operacija [23].

To je vodeći softverski alat za simulacije višestrukih disciplina i multiphysics simulacije, sa sjedištem u Canonsburgu, PA, SAD. Ansys Electronics Desktop koristi zajedničko grafičko korisničko sučelje za više proizvoda i podržava zajedničke ekstenzije datoteka (\*.aedt i \*.aedtz) za ZIP arhive. AEDT omogućuje otvaranje više projekata i različitih simulatora istovremeno, čime se postiže visoka fleksibilnost i učinkovitost u radu [24].

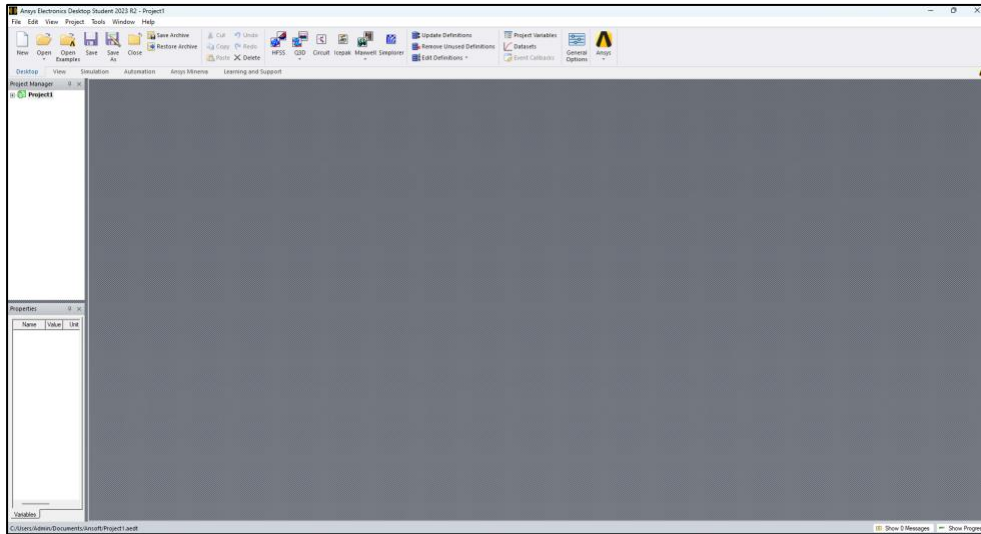
### 6.2 Modeliranje sustava sabirnica

Simulacija će se vršiti sa sljedećim parametrima:

- Promjer vodiča je 80 mm,
- duljina vodiča je 9,5 m,
- struja kratkog spoja je 40 kA.

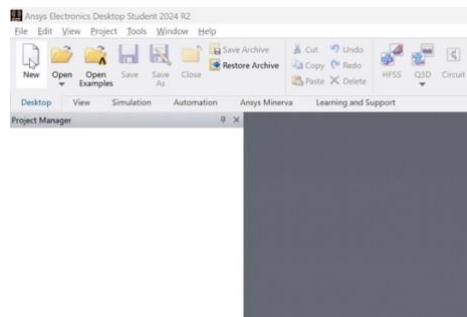


Pokrene se ANSYS Electronics Desktop (AEDT) te se vidi sljedeće korisničko sučelje:



**Slika 6.1.** Korisničko sučelje AEDT.

Zatim se bira „New“:



**Slika 6.2.** Odabir opcije „New“.

Pojavi se novi projekt sa automatski zadanim nazivom „Project2“:



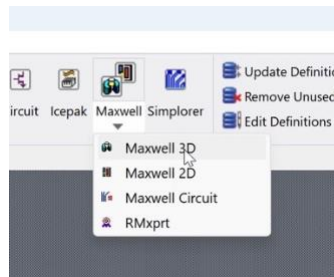
**Slika 6.3.** Prikaz projekta u prozoru „Project Manager“.

Preimenuje se u „*Poracun\_KS*“:



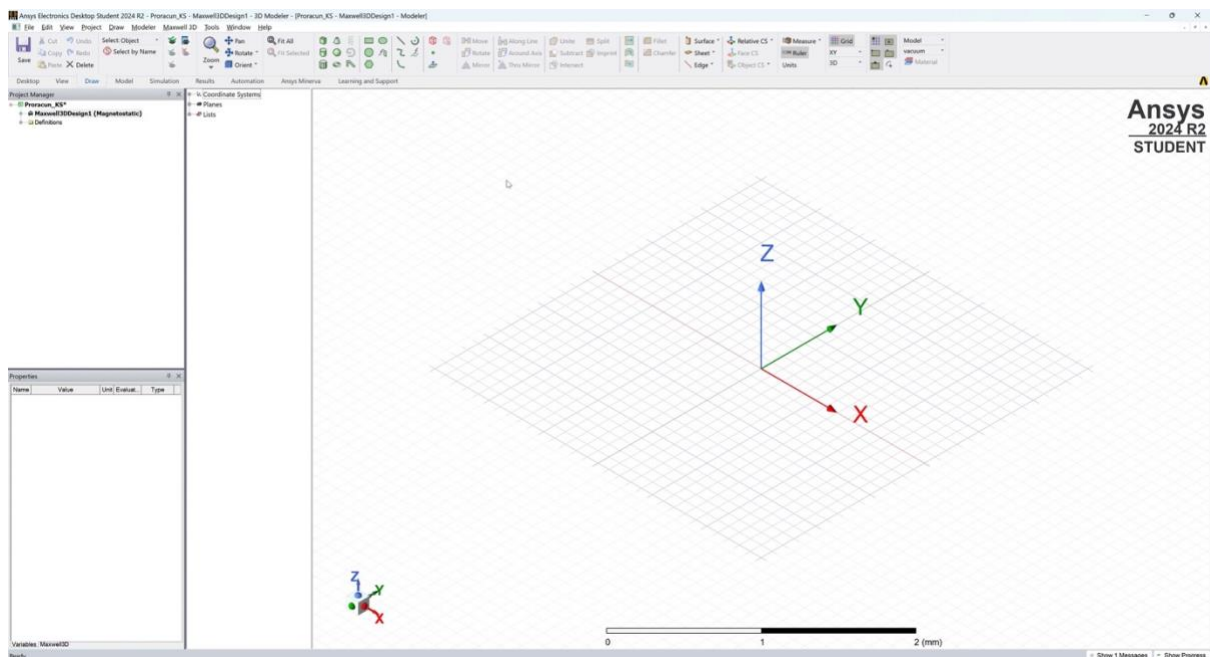
Slika 6.4. Preimenovani projekt.

Potrebno je dodati 3D koordinatni sustav, stoga je potrebno odabrati „*Maxwell*“, nakon čega se bira „*Maxwell 3D*“:



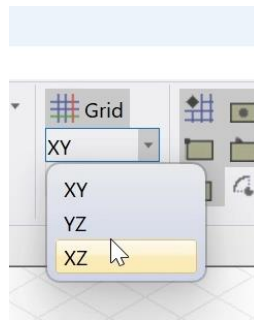
Slika 6.5. Dodavanje „*Maxwell 3D*“ sustava.

Vidljivo je sljedeće korisničko sučelje:



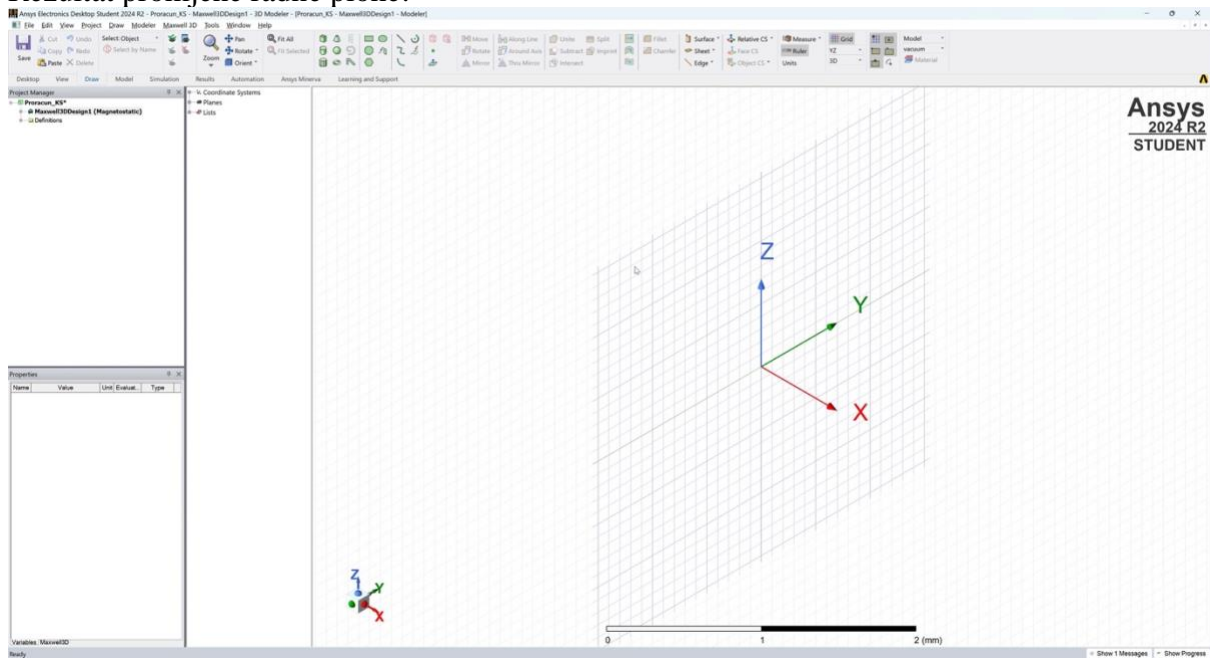
Slika 6.6. 3D koordinatni sustav.

Sada je potrebno nacrtati sabirnice. Potrebno ih crtati horizontalno, stoga se mijenja radna ravnina iz „XY“ u „XZ“:



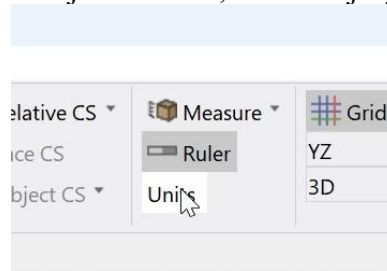
Slika 6.7. Promjena radne ravnine.

Rezultat promjene radne plohe:



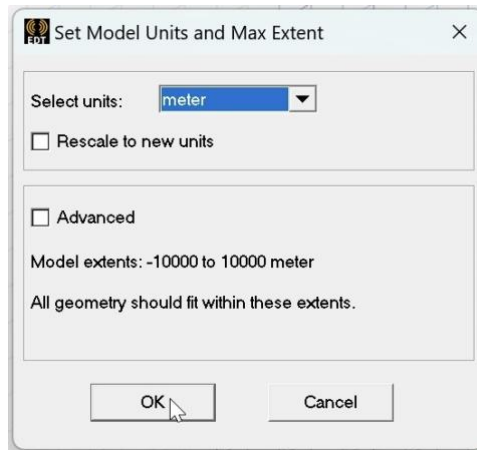
Slika 6.8 „XZ“ radna ploha.

Potrebno je promijeniti jedinice s kojima se radi, što se mijenja odabirom tipke „Units“:



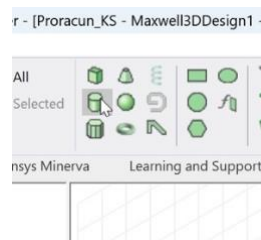
Slika 6.9. Odabir opcije „Units“.

U svrhe ove simulacije će najpraktičnije biti koristiti metar kao osnovnu jedinicu, pa se to unosi kao odabrana jedinica:



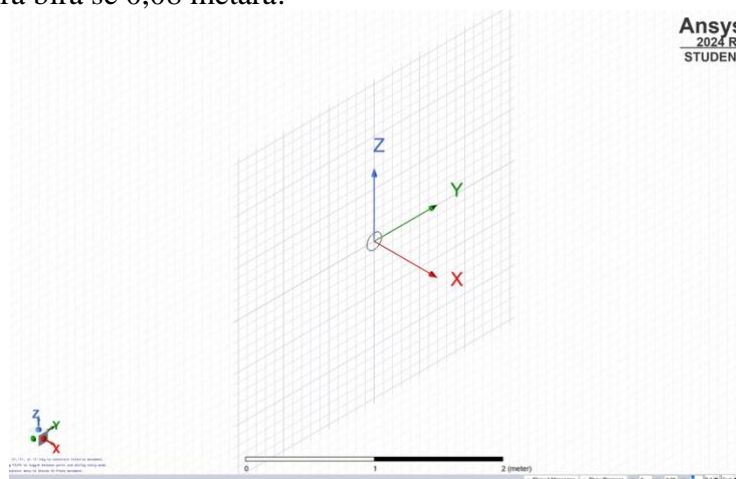
Slika 6.10. Promjena mjernih jedinica.

Bira se „OK“. Sada se može početi sa crtanjem sabirnica. Potrebno je odabrati opciju „Draw Cylinder“:



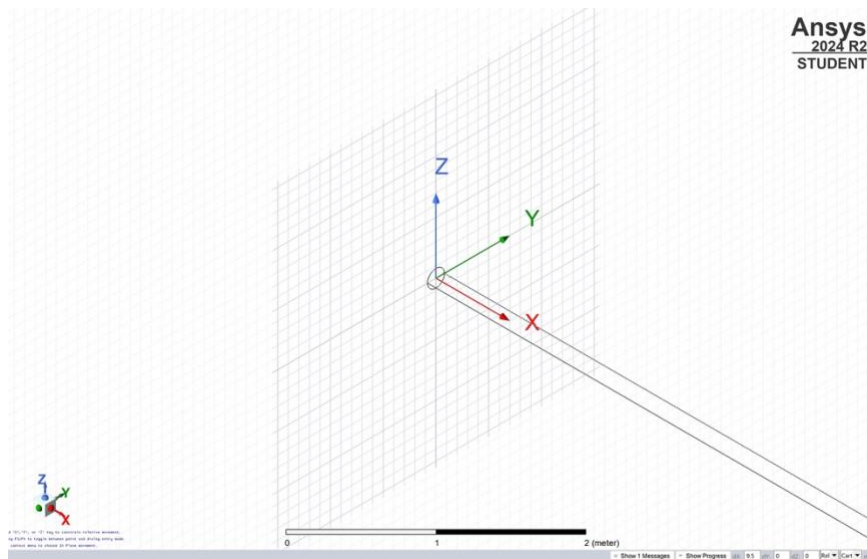
Slika 6.11. Opcija „Draw Cylinder“.

Za promjer cilindra bira se 0,08 metara:



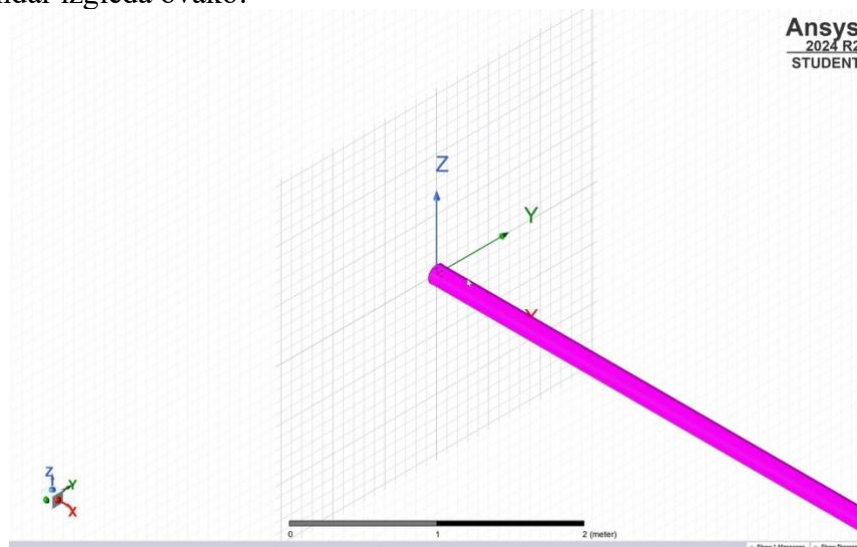
Slika 6.12. Crtanje promjera cilindra.

Za duljinu se unosi 9,5 metara:



Slika 6.13. Unos duljine cilindra.

Završeni cilindar izgleda ovako:



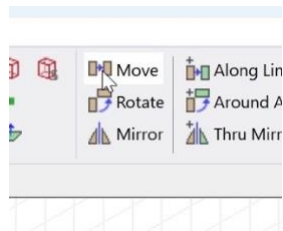
Slika 6.14. Završeni prvi cilindar.

Dimenzije se potvrđuju u prozoru „Properties“:

Name	Value	Unit	Evaluated V...
Com...	CreateCylinder		
Coor...	Global		
Cent...	0,0,0	meter	0meter, 0m...
Axis	X		
Radius	0.08	meter	0.08meter
Height	9.5	meter	9.5meter
Num...	0		0

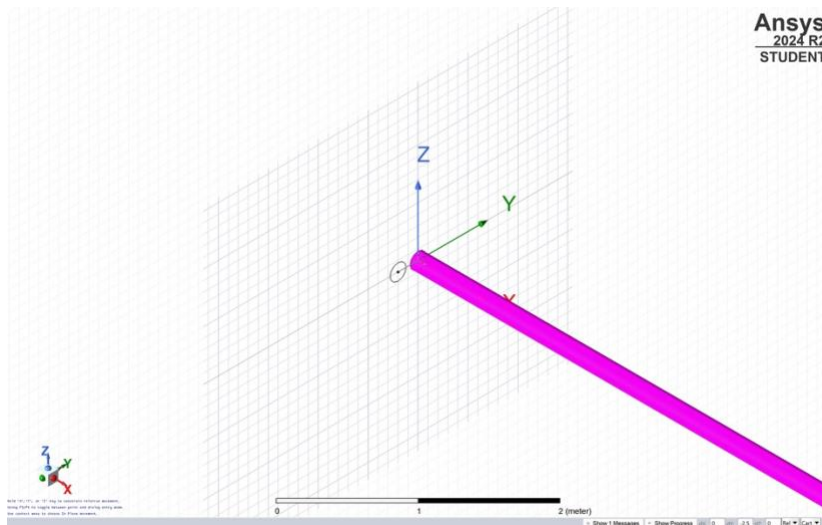
Slika 6.15. Prikaz dimenzija cilindra u prozoru „Properties“.

Sada je potrebno pomaknuti cilindar, odnosno sabirnicu koristeći opciju „Move“:



Slika 6.16. Opcija „Move“.

Označava se centar cilindra:



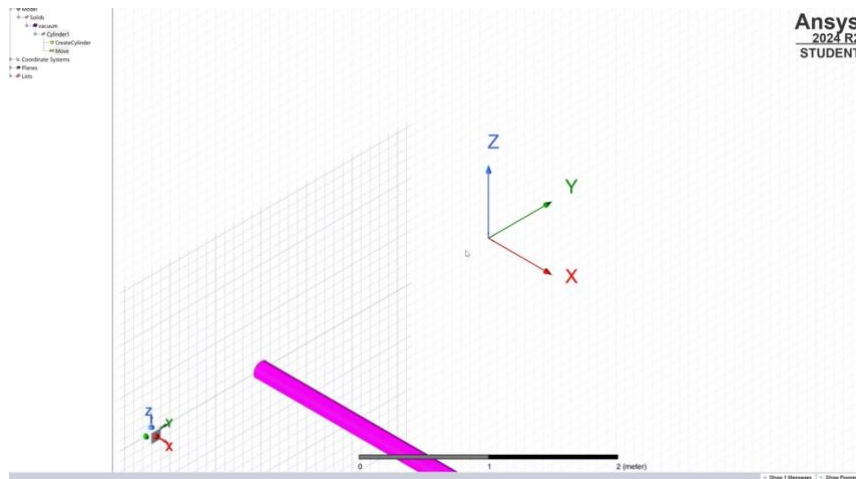
Slika 6.17. Pomicanje cilindra.

Pomiče ga se za 2,5 metra u Y osi:



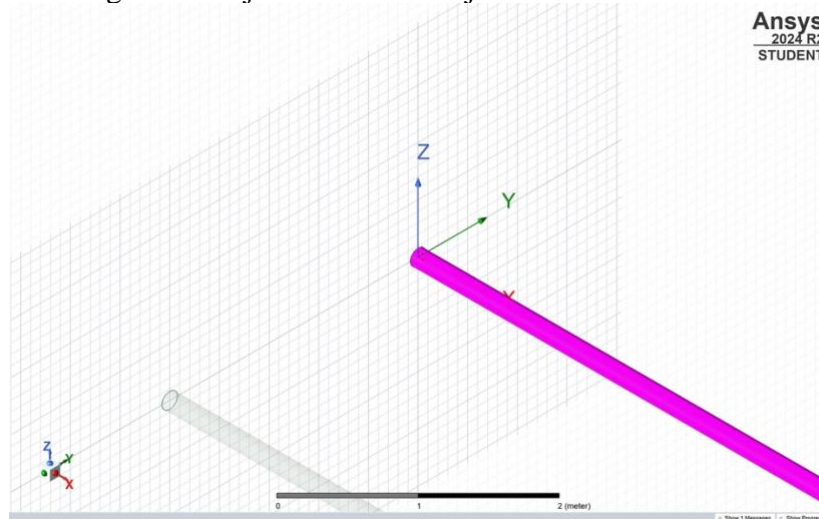
Slika 6.18. Unos udaljenosti pomicanja.

Rezultat pomicanja:



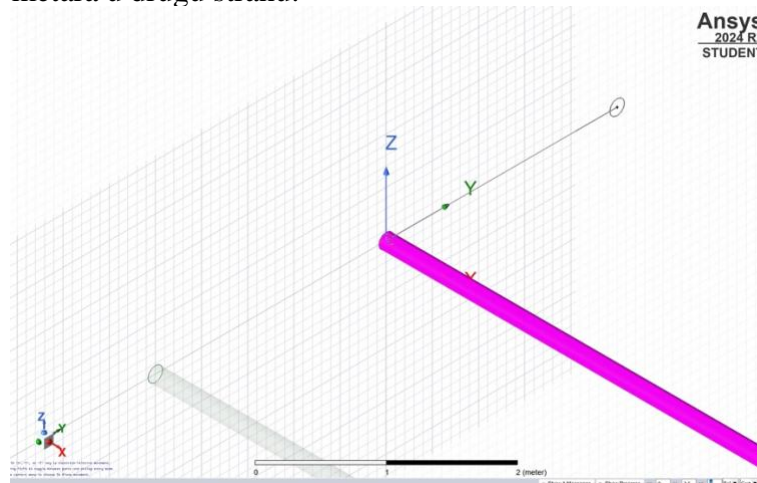
Slika 6.19. Pomaknuti prvi cilindar.

Nakon toga se crta drugi cilindar jednakih dimenzija:



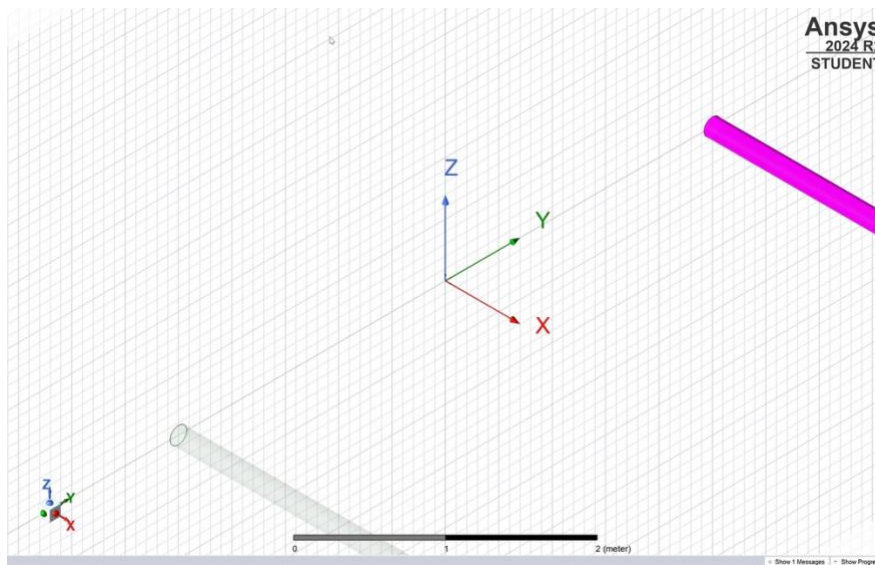
Slika 6.20. Završeni drugi cilindar.

Pomiče ga sa 2,5 metara u drugu stranu:



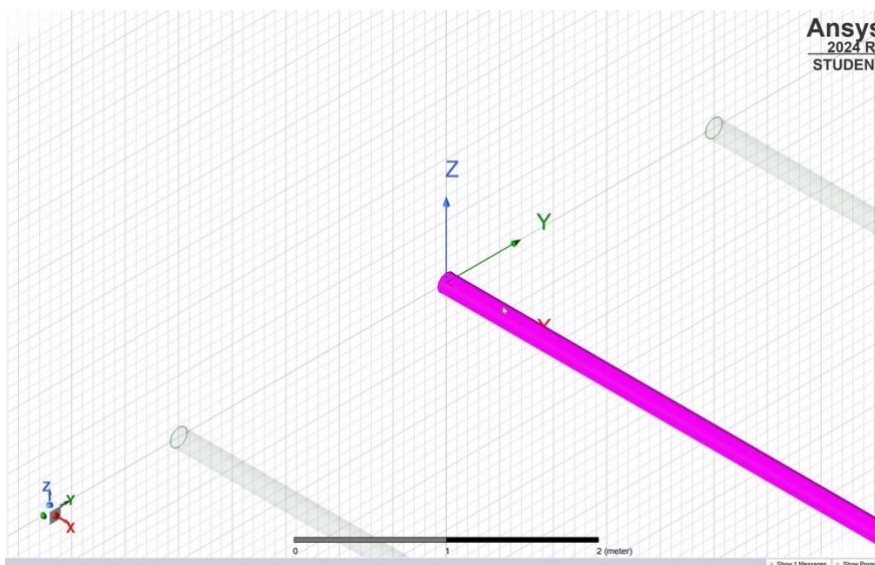
Slika 6.21. Pomicanje drugog cilindra.

Rezultat pomicanja:



Slika 6.22. Pomaknuti drugi cilindar.

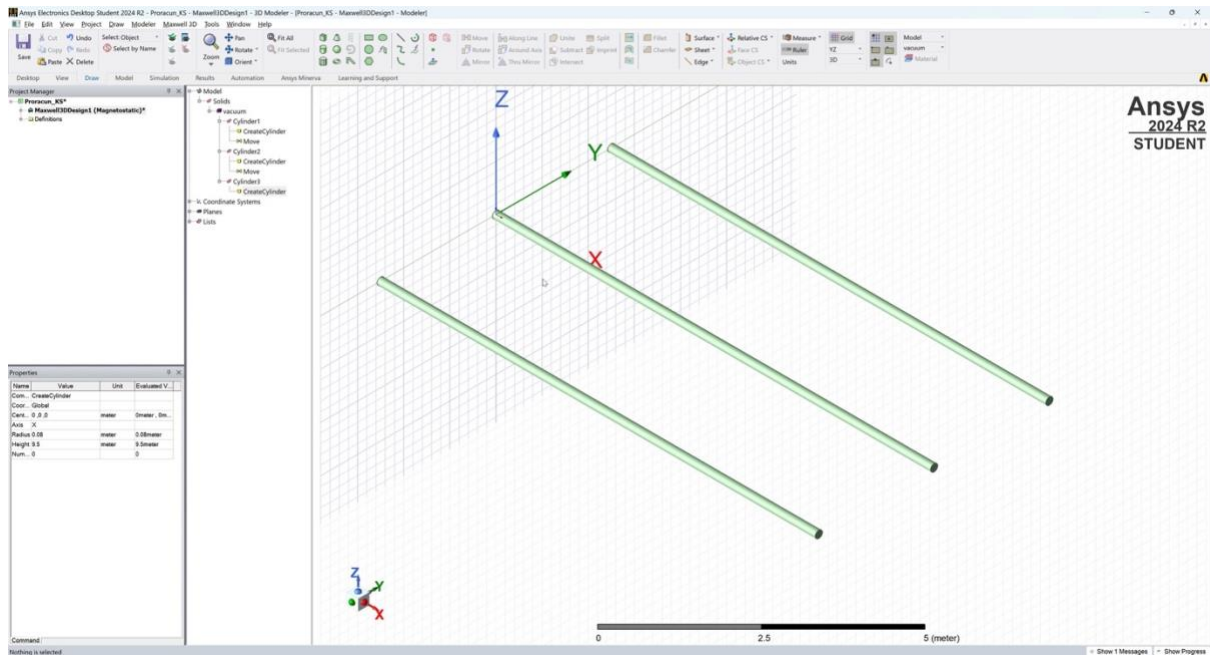
Konačno, crta se i treći cilindar, identičnih dimenzija:



Slika 6.23. Crtanje trećeg cilindra.

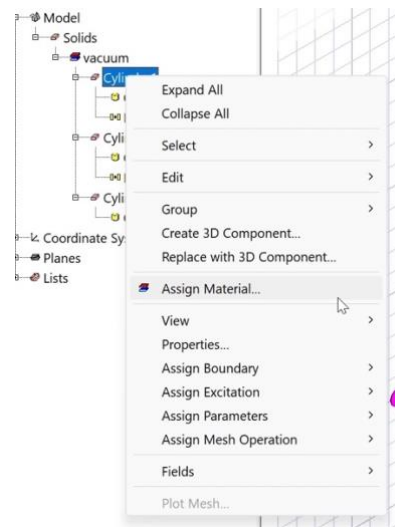


Sada se može vidjeti sustav od sve tri sabirnice:



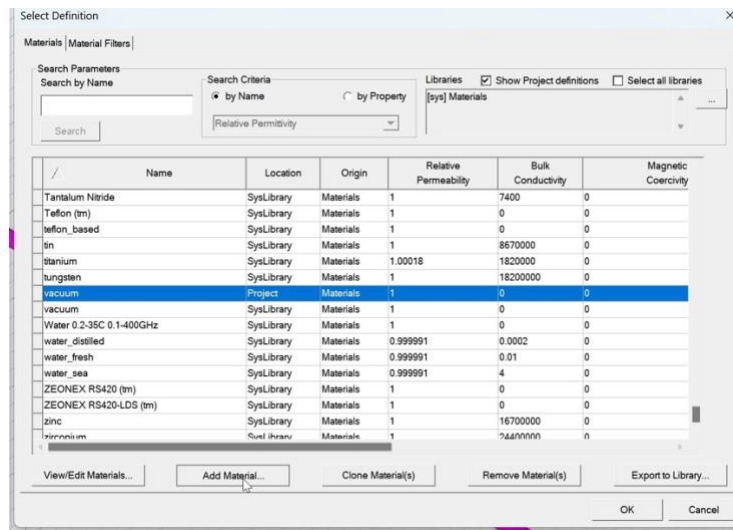
Slika 6.24. Modelirani sustav sabirnica.

Sabirnicama je potrebno dodati materijal, što se radi koristeći opciju „Assign Material“:



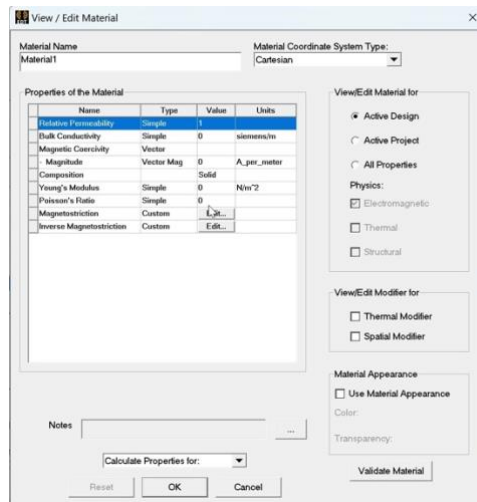
Slika 6.25. Opcija „Assign Material“.

Otvara se prozor za dodjelu materijala:



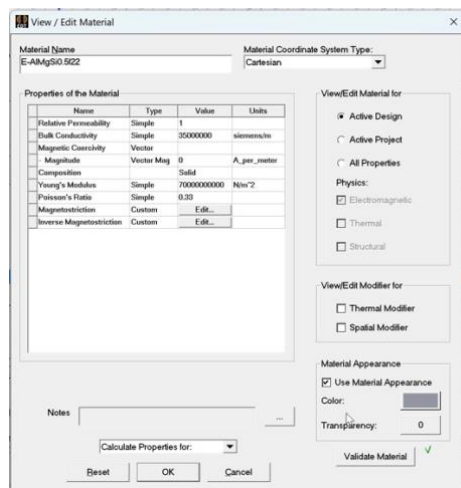
Slika 6.26. Prozor za dodjelu materijala.

Potrebno je simulirati sabirnice izrađene od legure E-AlMgSi0.5f22. Ta legura nije ponuđena u materijalima, stoga ju je potrebno napraviti. To se radi klikom na opciju „Add Material“:



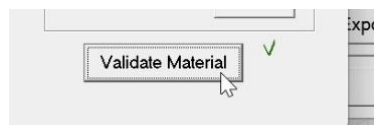
Slika 6.27. Dodavanje novog materijala.

Podatke o materijalu potrebno je ispuniti na sljedeći način:



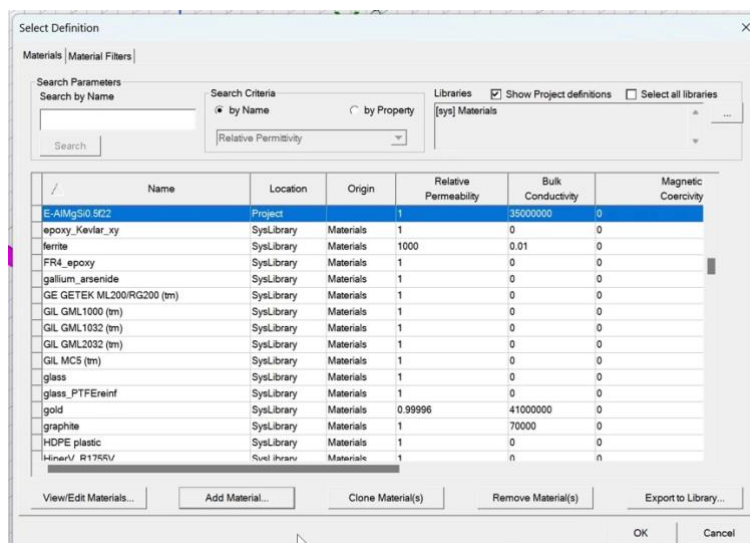
**Slika 6.28.** Prozor za dodavanje novog materijala sa ispunjenim vrijednostima materijala.

Kako bi se provjerilo je li materijal ispravno unesen, treba odabrati opciju „*Validate Material*“. Ukoliko je sve ispravno, pored te opcije se pojavi zelena kvačica:



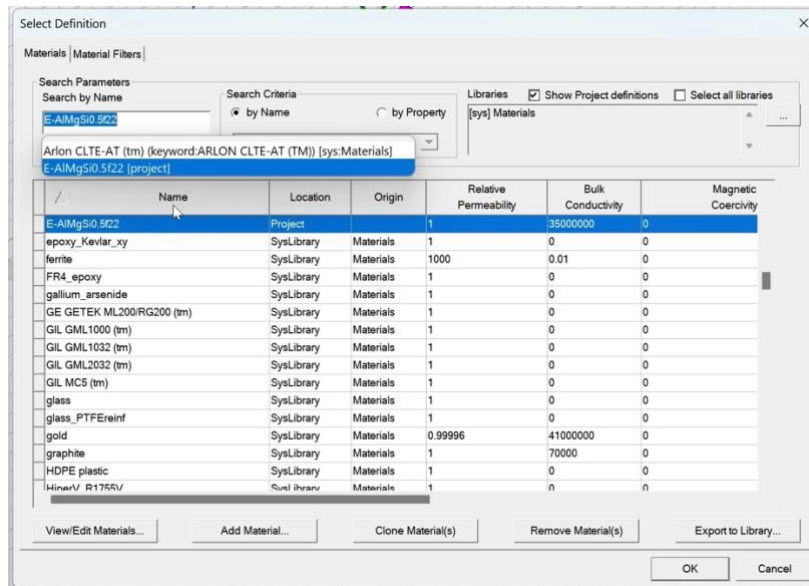
**Slika 6.29.** Opcija „*Validate Material*“.

Bira se „*OK*“. Sada se može vidjeti da se novi materijal nalazi na listi materijala. Dodjeljuje ga se sabirnici tako što ga se označi i bira „*OK*“:



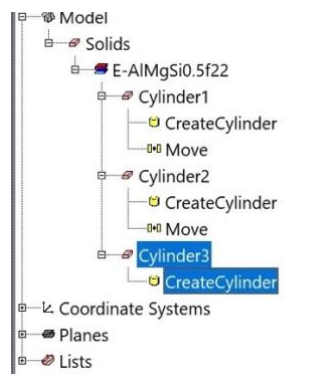
**Slika 6.30.** Dodani materijal.

Materijal je potrebno staviti i na preostale dvije sabirnice. Ponovno se koristi opcija „Assign Material“, te se u tražilicu upisuje ime materijala. Nakon što se pojavi, odabere ga se i bira „OK“:



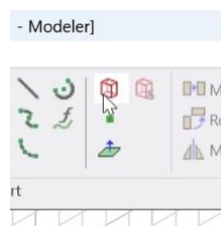
Slika 6.31. Dodavanje novog materijala ostalim sabirnicama.

Na popisu objekata može se vidjeti da je uspješno dodijeljen materijal svim sabirnicama:



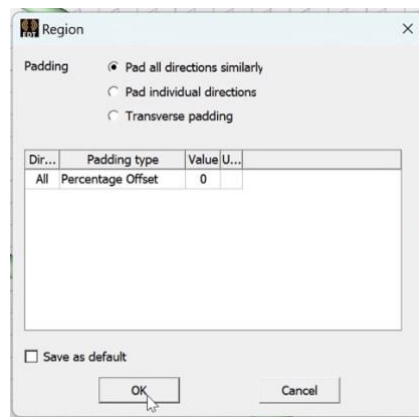
Slika 6.32. Prikaz objekata sa materijalom.

Sada je potrebno nacrtati regiju unutar koje ćemo promatrati rezultate simulacije. Koristi se opcija „Add Region“:



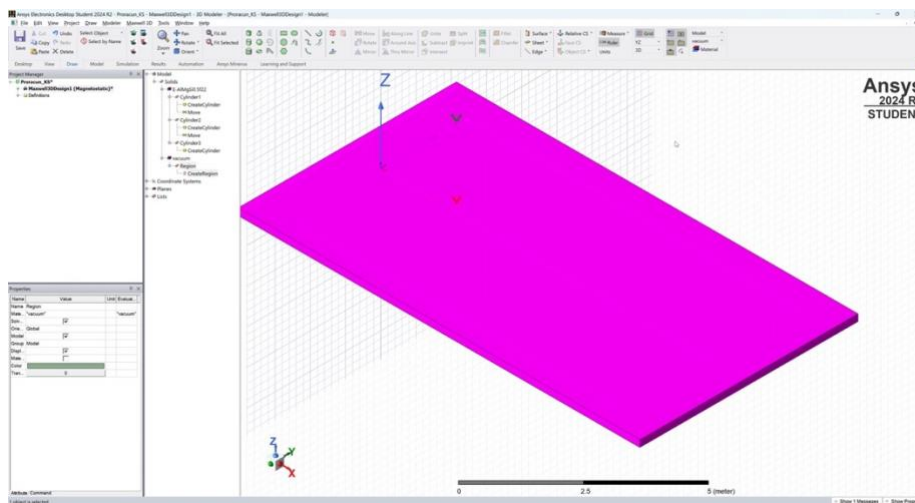
Slika 6.33. Opcija „Add Region“.

Pojavljuje se prozor „Region“ i postavke regije potvrđuju se biranjem opcije „OK“:



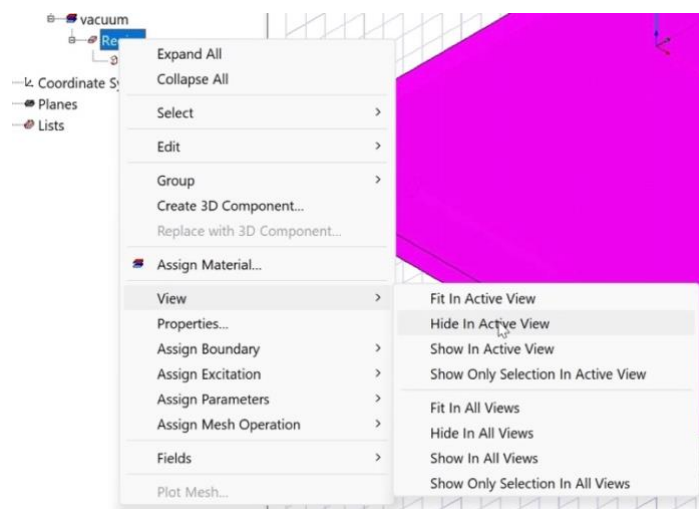
Slika 6.34. Prozor za dodavanje regije.

Vidi se regija promatranja:



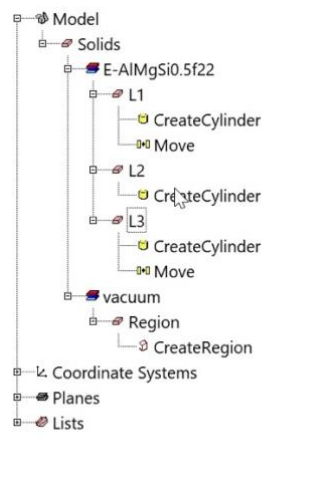
Slika 6.35. Prikaz regije promatranja.

Kako regija ne bi smetala u daljnjem radu, skriva se biranjem opcije „View“, zatim „Hide In Active View“:



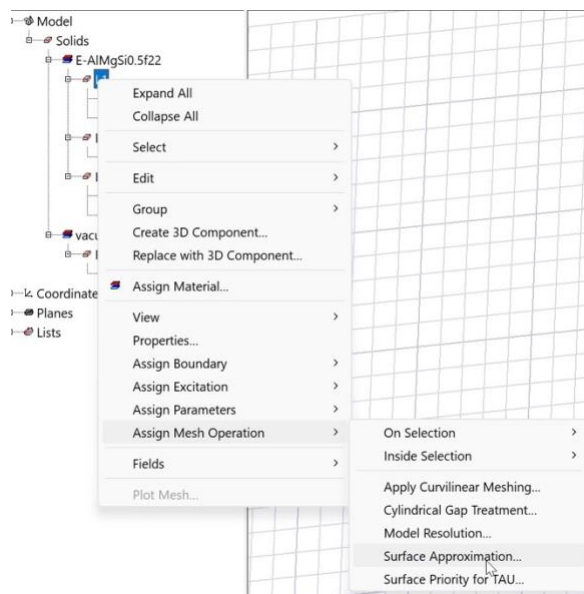
Slika 6.36. Skrivanje regije.

Sabirnice, odnosno cilindre, potrebno je preimenovati u „L1“, „L2“ i „L3“:



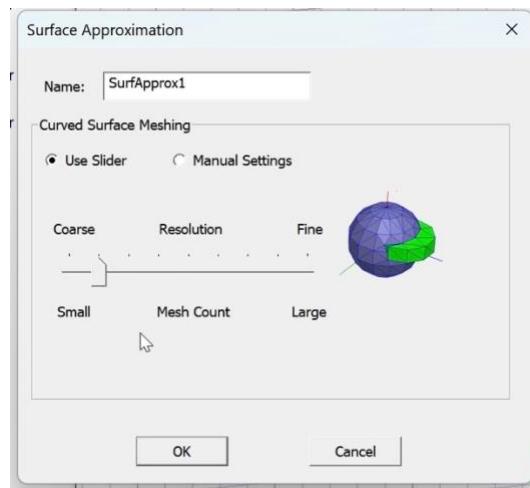
**Slika 6.37.** Preimenovane sabirnice.

Za ovu simulaciju koristi se studentska verzija programskog paketa Ansys Electronics Desktop koja ima postavljeno ograničenje za kompleksnost modela. Kako bi simulacija bila ispod tog ograničenja, potrebno je pojednostaviti modele. To se radi tako što za se svaku sabirnicu bira „Assign Mesh Operation“ te „Surface Approximation“:



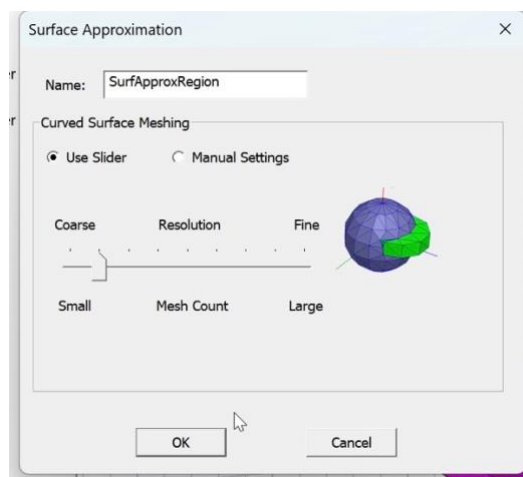
**Slika 6.38.** Dodavanje opcija „Surface Approximation“.

Zatim se smanjuje „Mesh Count“:



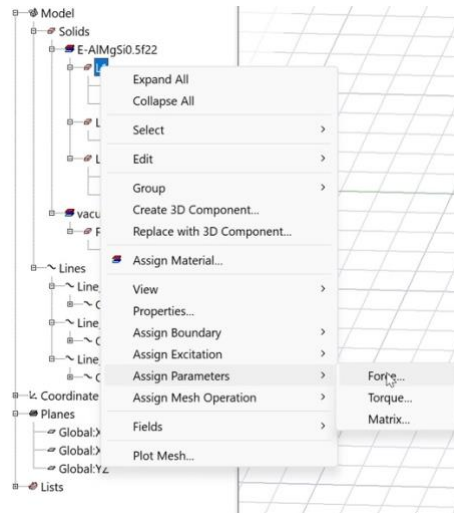
Slika 6.39. Prozor „Surface Approximation“.

Isto se radi i za regiju promatranja:



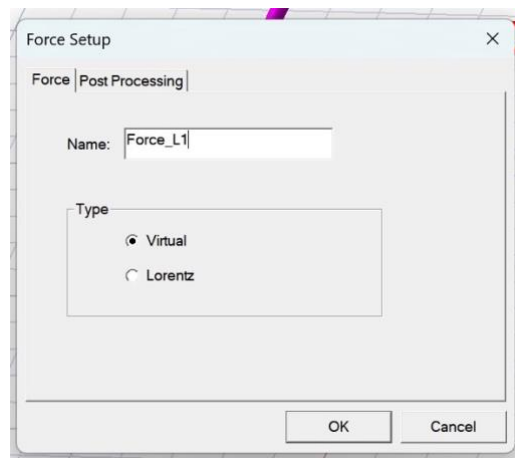
Slika 6.40. Dodavanje opcije „Surface Approximation“ regiji.

Ansys Electronics Desktop ima mogućnost analiziranja sila, ali to ne radi automatski, već je potrebno označiti objekte za koje se želi da se to analizira. Analiza sile se radi tako što se odabere „*Assign Parameters*“, zatim „*Force*“:



**Slika 6.41.** Dodavanje parametra „*Force*“.

Dodaje se ime sile i bira „*OK*“. Ovo se radi za sve tri sabirnice:

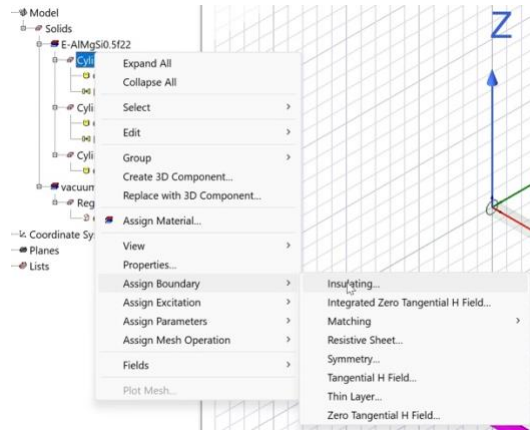


**Slika 6.42.** Prozor „*Force Setup*“.



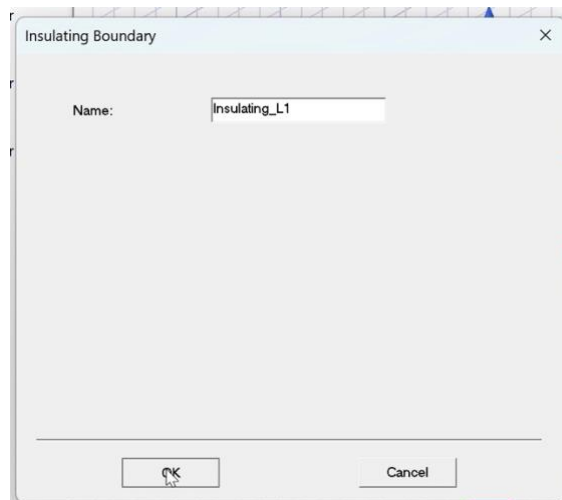
### 6.3. Simulacija jednopolnog kratkog spoja

Nakon modeliranja sustava sabirnica, za sabirnice kroz koje ne protječe struja bira se „Assign Boundary“ te zatim „Insulating“:



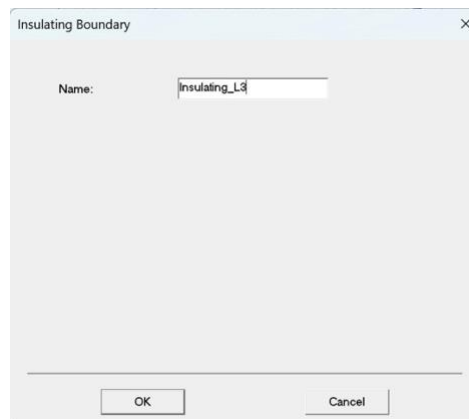
Slika 6.43. Dodavanje graničnog uvjeta „Insulating“.

Dodaje se ime:



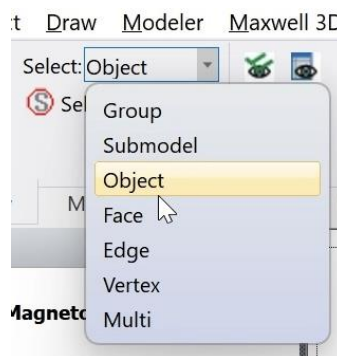
Slika 6.44. Prozor „Insulating Boundary“.

Isto se ponavlja i za L3:



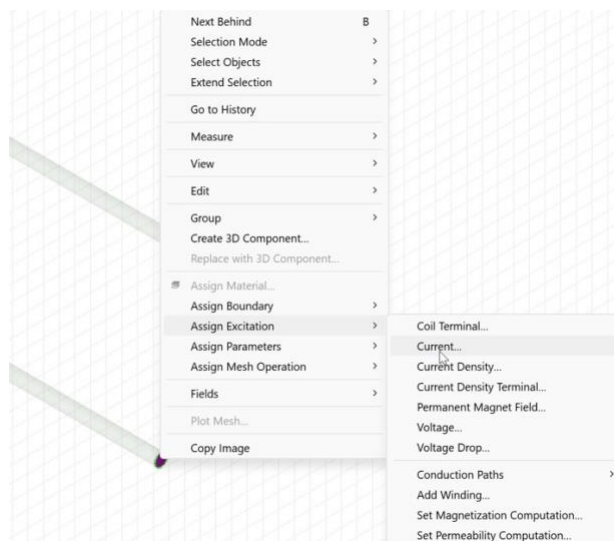
Slika 6.45. Dodavanje „*Insulating*“ uvjeta na L3.

Kako bi se dodala struja kratkog spoja na sabirnicu L2, mora se staviti uzbudnu struju na ravne plohe na rubovima cilindra. Jedna uzbuda predstavlja ulaz struje, a druga izlaz. Kako bi se to moglo napraviti, način označavanja objekata se mora promijeniti u „*Face*“:



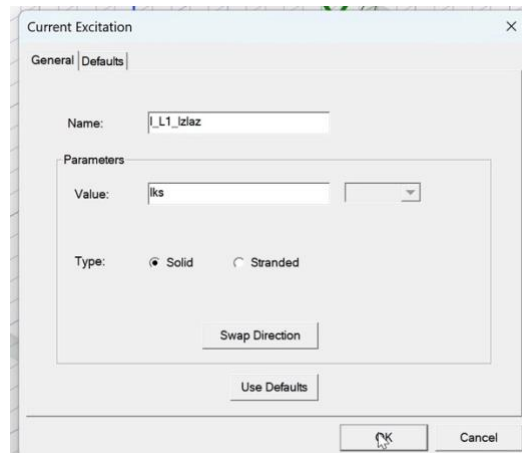
Slika 6.46. Promjena „*Select*“ opcije.

Zatim se bira jedan kraj sabirnice te „*Assign Excitation*“, pa „*Current*“:



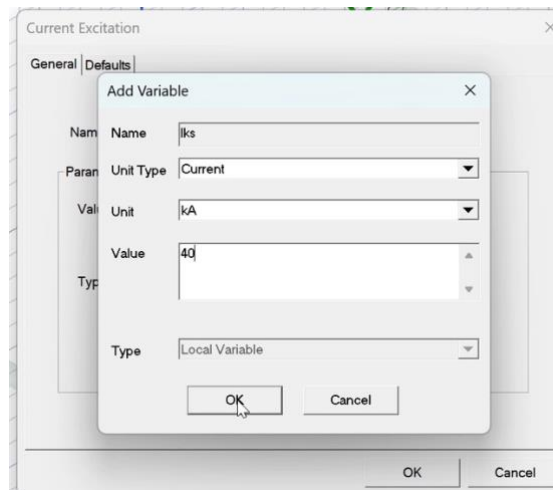
Slika 6.47. Dodavanje strujne uzbude.

Za vrijednost struje stavlja se „Iks“. Na taj način se struja kratkog spoja sprema kao varijabla:



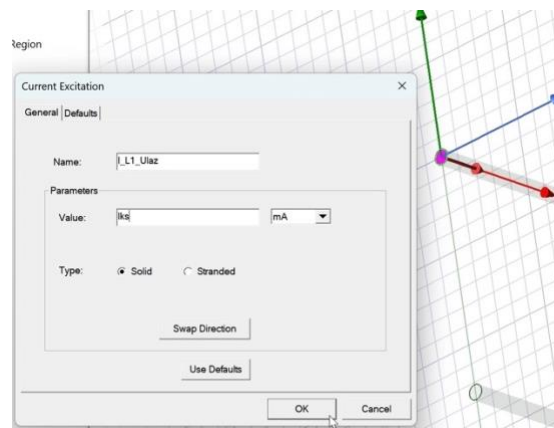
**Slika 6.48.** Prozor „Current Excitation“.

Otvara se prozor za dodavanje nove varijable. Tu se definira da „Iks“ iznosi 40 kA:



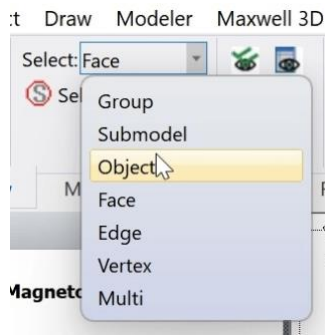
**Slika 6.49.** Dodavanje nove varijable.

Struja kratkog spoja se dodaje i na „ulaz“ u sabirnicu:



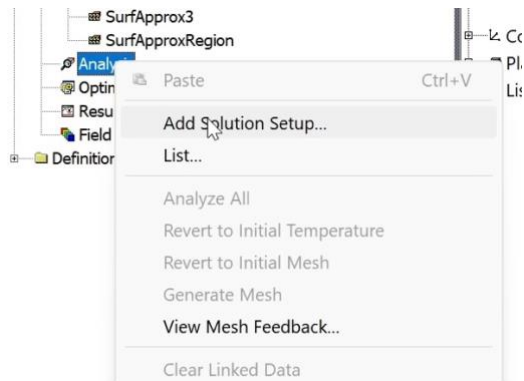
**Slika 6.50.** Dodavanje struje na „ulaz“ u sabirnicu.

Način odabira objekata može se vratiti na „Object“:



Slika 6.51. Promjena opcije „Select“ na „Object“.

Sada je potrebno definirati kako će se izvršiti simulacija. Koristi se opcija „Add Solution Setup“:



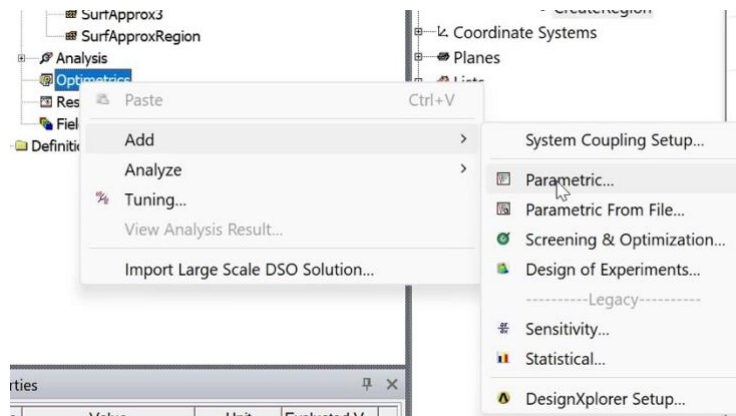
Slika 6.52. Opcija „Add Solution Setup“.

Otvora se prozor sa podešavanje postavki simulacije. Broj prolaza stavlja se na 5 kako bi simulacija bila unutar ograničenja studentske verzije programskog paketa:



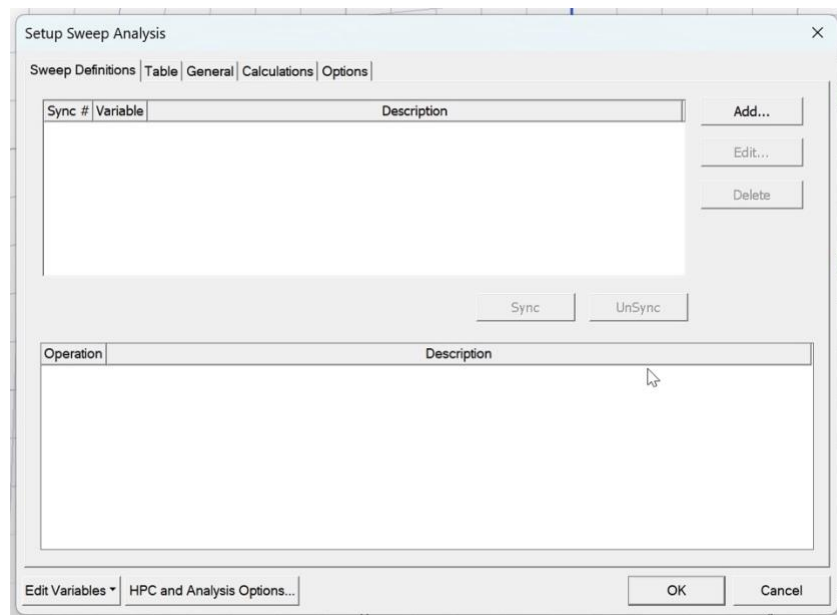
Slika 6.53. Postavljanje uvjeta simulacije.

U ovoj simulaciji također je potrebno vidjeti utjecaj struje kratkog spoja na sile. Pod izbornikom za „Optimetrics“ bira se „Add“ te dodaje „Parametric“:



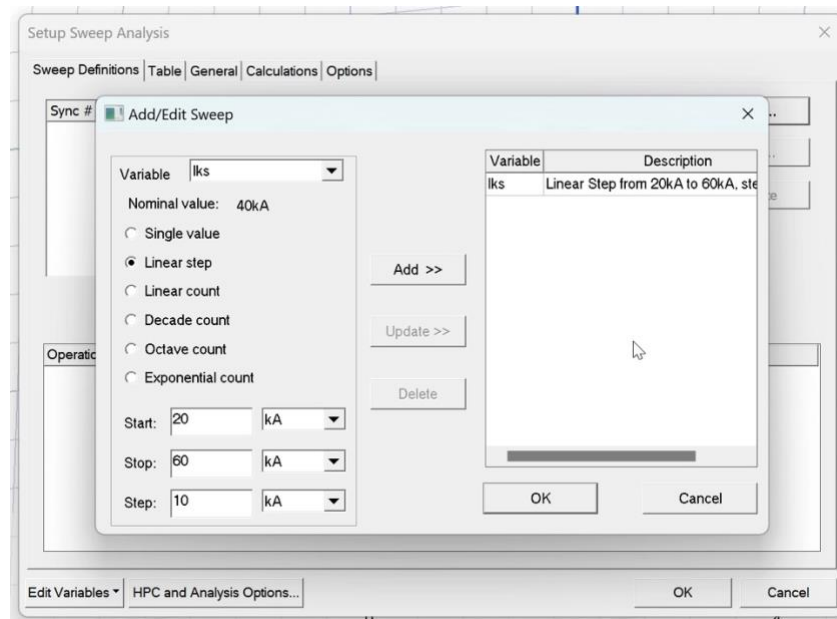
Slika 6.54. Dodavanje „Parametric“ opcije.

Pojavljuje se sljedeći prozor. Bira se opcija „Add“:



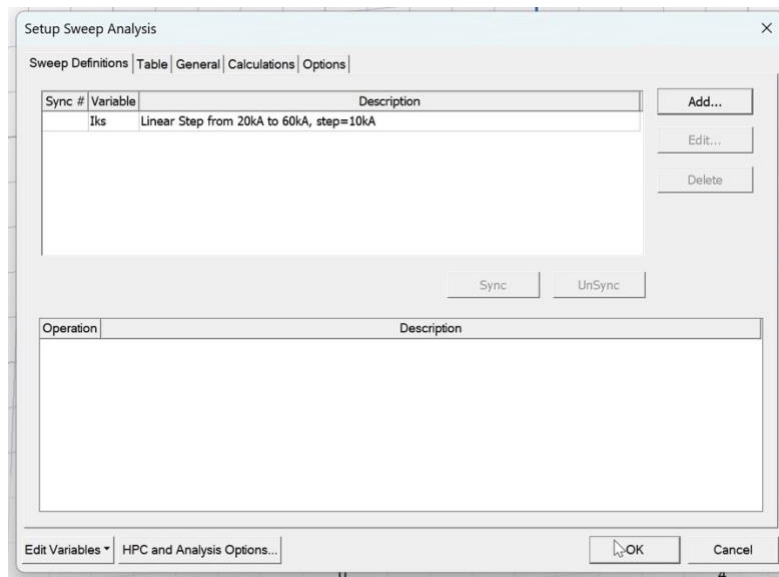
Slika 6.55. Prozor „Setup Sweep Analysis“.

Dodaju se postavke za analizu više scenarija gdje se mijenja struju kratkog spoja od 20 kA do 60 kA sa koracima od 10 kA:



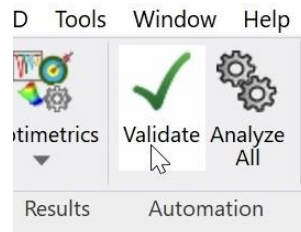
Slika 6.56. Prozor „Add/Edit Sweep“.

Kada se odabere „OK“, pojavi se opcija ponovnog pregledavanja postavki. Ponovno se bira „OK“:



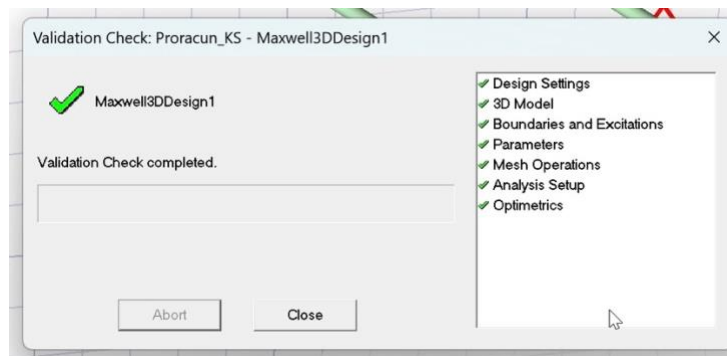
Slika 6.57. Prozor „Setup Sweep Analysis“ sa dodanom „Sweep“ opcijom.

Nakon toga bira se opciju „*Validate*“ kako bi se provjerilo je li model spreman za simuliranje:



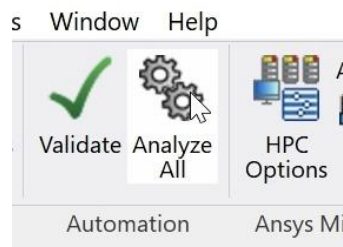
**Slika 6.58.** Opcija „*Validate*“.

Ukoliko se dobivene sve zelene kvačice, znači da se može započeti sa simulacijom.



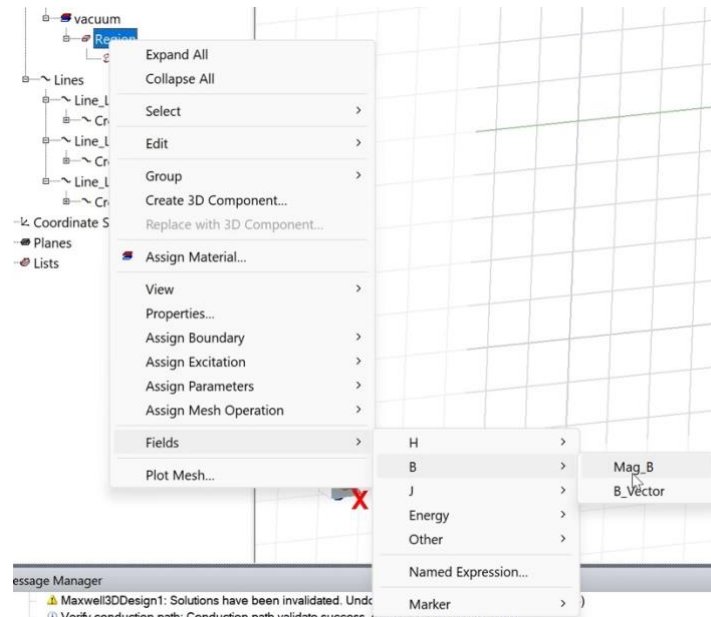
**Slika 6.59.** Prozor „*Validation Check*“.

Simulaciju se započinje odabirom tipke „*Analyze All*“:



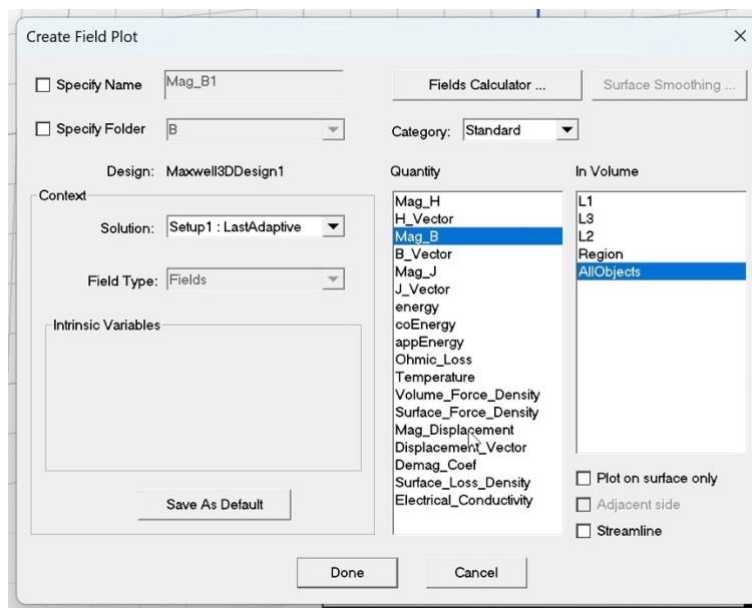
**Slika 6.60.** Opcija „*Analyze All*“.

Nakon završetka simulacije, mogu se prikazati rezultati. Prvi rezultat koji će se prikazati je intenzitet magnetskog polja koji se prikaže tako što se odabere regiju te bira „*Fields*“, zatim „*B*“, i „*Mag\_B*“:



Slika 6.61. Dodavanje „Mag\_B“ polja.

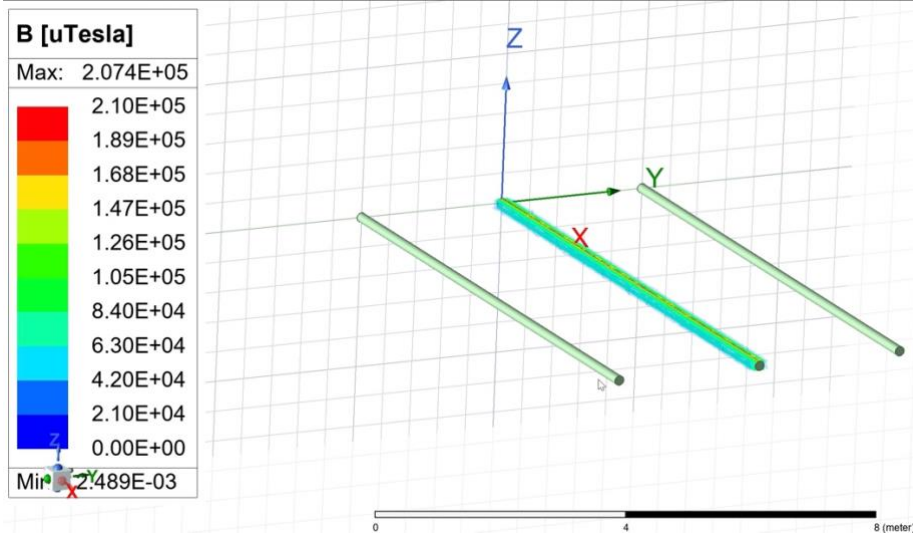
Otvora se sljedeći prozor. Bira se „AllObjects“ te „Done“.



Slika 6.62. Prozor „Create Field Plot“.

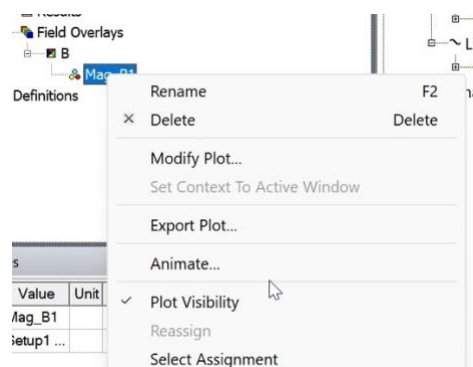


Sada se može vidjeti 3D prikaz intenziteta magnetskog polja:



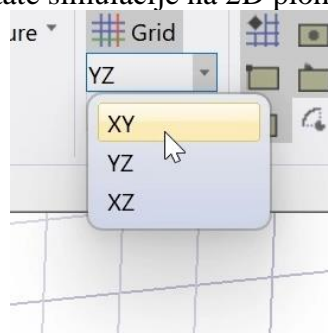
Slika 6.63. Prikaz intenziteta magnetskog polja.

Kako bi se prikaz rezultata sakrio, bira se „Plot Visibility“:



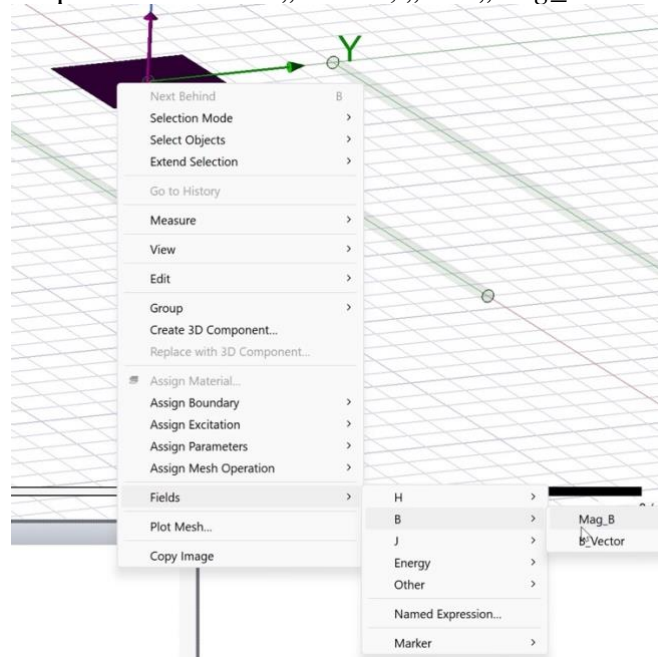
Slika 6.64. Skrivanje prikazanog rezultata.

Sada je potrebno analizirati rezultate simulacije na 2D plohi. Radna ploha se mijenja u „XY“:



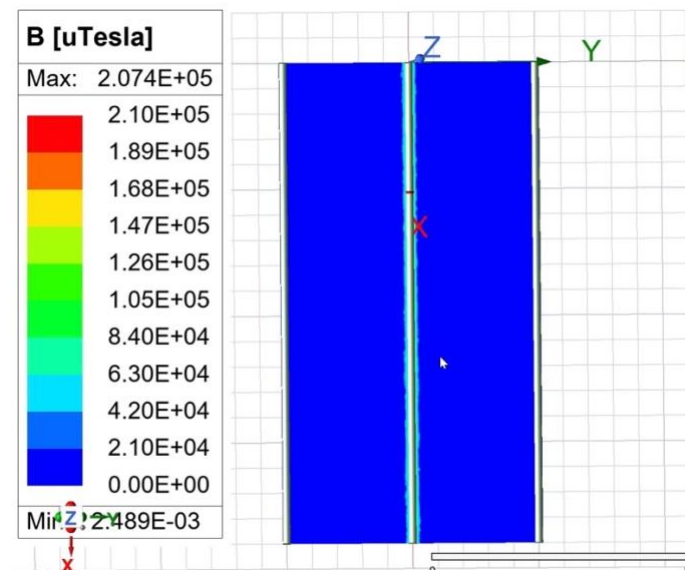
Slika 6.65. Promjena radne ravnine u „XY“.

Bira se „XY“ plohu te se ponovno odabire „Fields“, „B“ i „Mag\_B“:



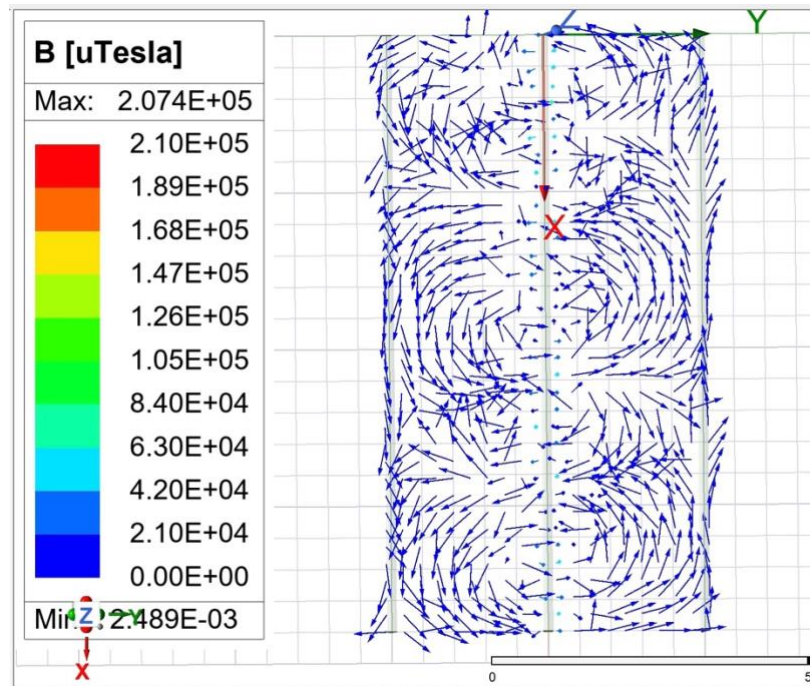
Slika 6.66. Dodavanje „Mag\_B“ polja na „XY“ plohu.

Dobiva se sljedeći rezultat:



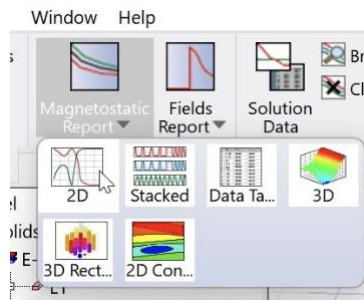
Slika 6.67. 2D prikaz intenziteta magnetskog polja.

Također je zanimljivo pogledati silnice magnetskog polja. To se može napraviti tako što se umjesto „Mag\_B“ bira „B\_Vector“, nakon čega se dobije sljedeći rezultat:



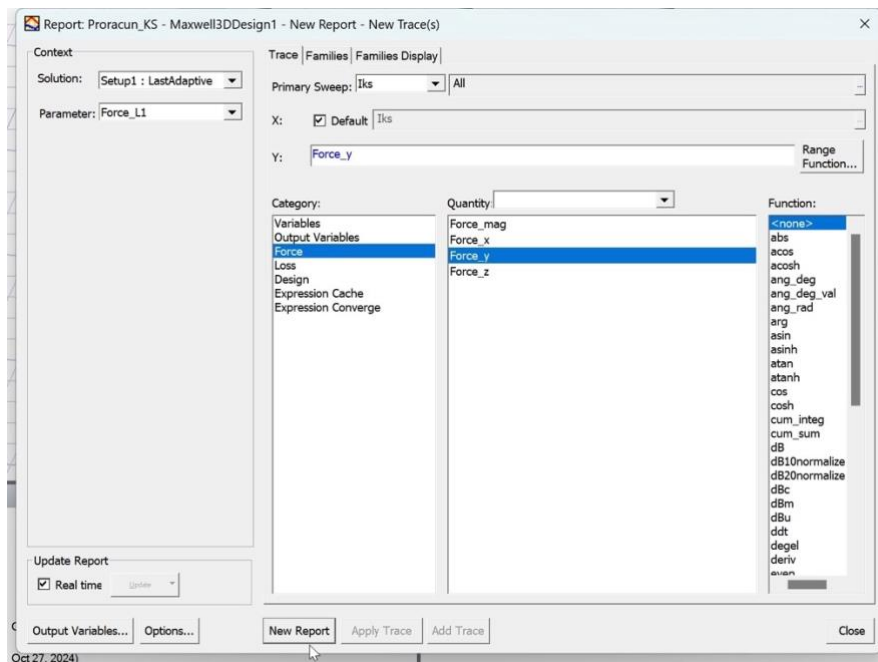
Slika 6.68. Prikaz silnica magnetskog polja.

Sada je moguće pripremiti grafove ovisnosti sile i momenta o struji kratkog spoja. To se radi tako što se bira „*Magnetostatic Report*“ i zatim „*2D*“:



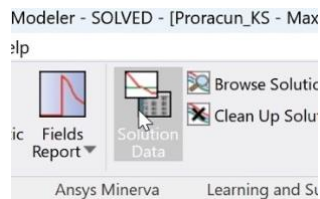
Slika 6.69. Dodavanje opcije „*Magnetostatic Report*“.

Odabere se da se vidi graf ovisnosti sile na osi Y o struji kratkog spoja. To se ponavlja za sve tri sabirnice:



Slika 6.70. Dodavanje prikaza ovisnosti sile u struji.

Koristeći opciju „*Solution Data*“, može se pogledati izračunate vrijednosti sile i momenta za struju kratkog spoja od 40 kA:



Slika 6.71. Opcija „*Solution Data*“.

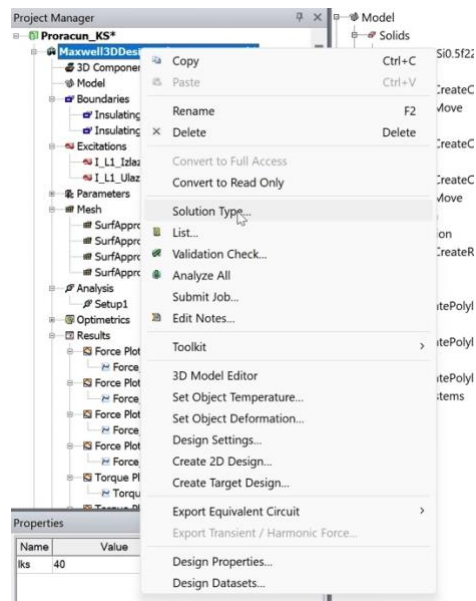
Dobiveni grafovi i podaci iz „*Solution Data*“ će biti prikazani u analizi rezultata simulacije.

#### 6.4. Simulacija troleznog kratkog spoja

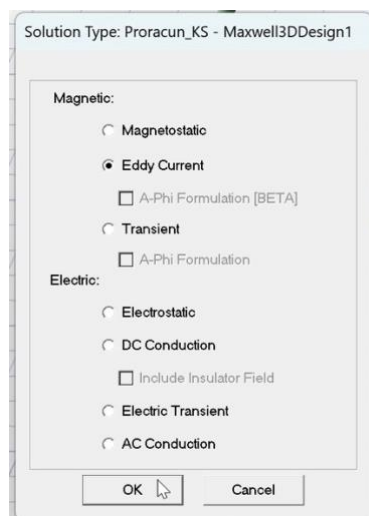
Trolezni kratki spoj se simulira vrlo slično kao i jednopolni, ali se mora na sve tri sabirnice postaviti strujno uzbuđenje. To se radi jednako kao i kod simulacije jednopolnog kratkog spoja, ali se dodaje fazni pomak, stoga će tri struje koje se dodaju izgledati ovako:

- $I_R = 40 \text{ kA}$  s faznim pomakom  $0^\circ$ ,
- $I_S = 40 \text{ kA}$  s faznim pomakom  $120^\circ$ ,
- $I_T = 40 \text{ kA}$  s faznim pomakom  $-120^\circ$ .

Prije nego što se dodaju strujne uzbude sa faznim pomakom, mora se promijeniti „*Solution Type*“ iz „*Magnetostatic*“ u „*Eddy Current*“.

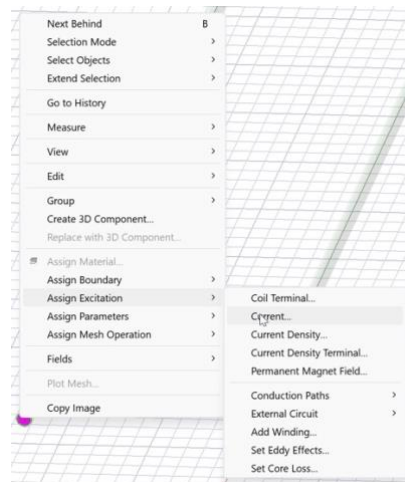


Slika 6.72. Opcija „*Solution Type*“.



Slika 6.73. Biranje opcije „*Eddy Current*“.

Nakon toga se dodaje struju kratkog spoja na ostale sabirnice.



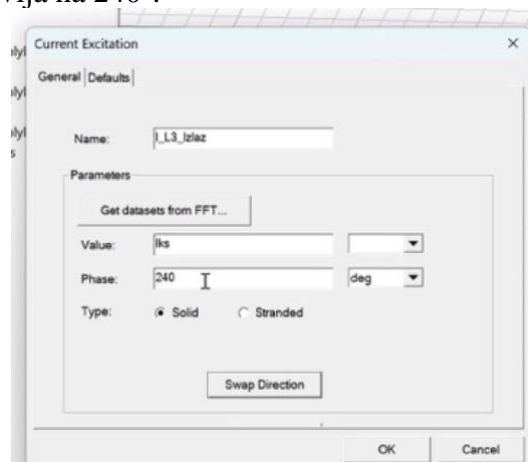
Slika 6.74. Dodavanje opcije „Current“ na druge sabirnice.

Dodaje se fazni pomak 120°:



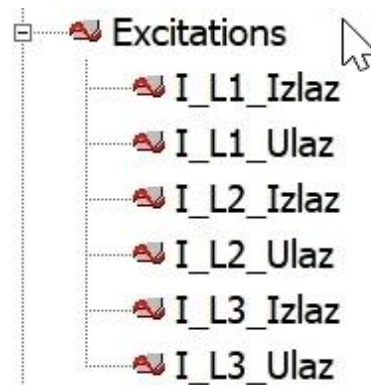
Slika 6.75. Dodavanje struje s faznim pomakom.

Na L3 fazni pomak se stavlja na 240°:



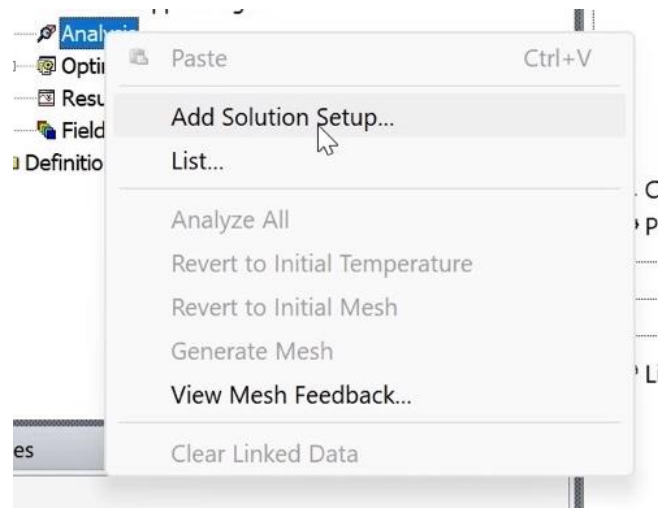
Slika 6.76. Dodavanje struje s faznim pomakom na L3.

U „Excitations“ se mogu vidjeti dodane struje:



Slika 6.77. Prikaz dodanih struja.

Ponovno se definiraju parametri simulacije:

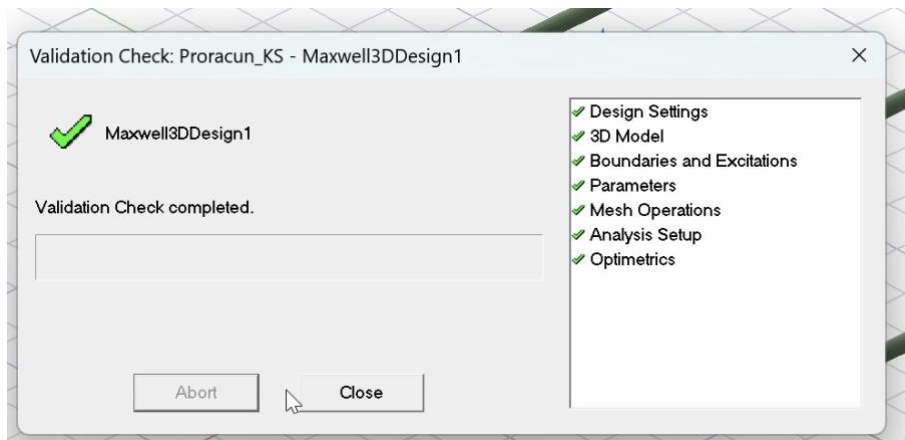


Slika 6.78. Opcija „Add Solution Setup“.



Slika 6.79. Prozor „Solve Setup“.

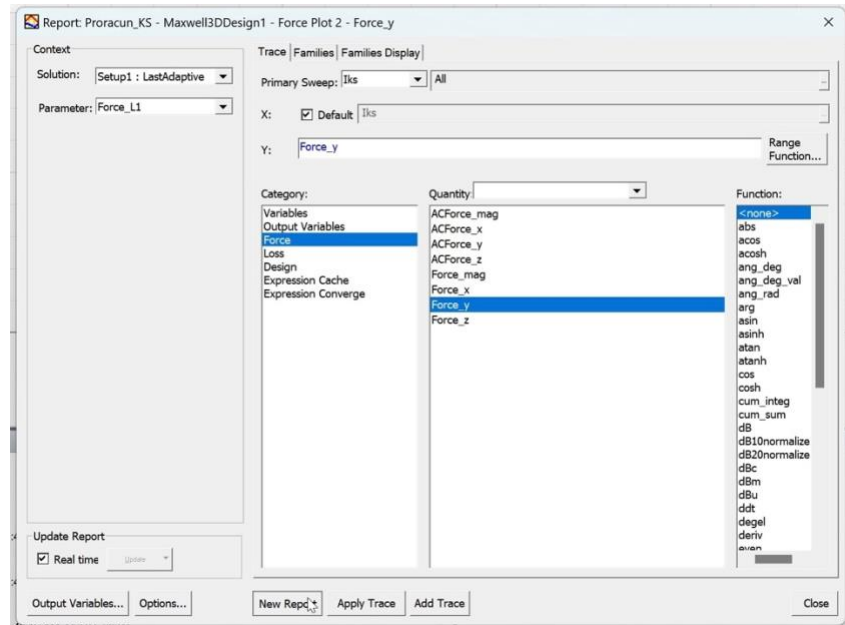
Bira se opciju „Validate“ kako bi se mogla pokrenuti simulacija:



Slika 6.80. Rezultat validacije.

Budući da je sve ispravno, može se odraditi simulacija biranjem opcije „Analyze All“. Nakon završetka simulacije, može se pripremiti grafove ovisnosti sile o struji kratkog spoja, što se ponavlja za sve tri sabirnice:





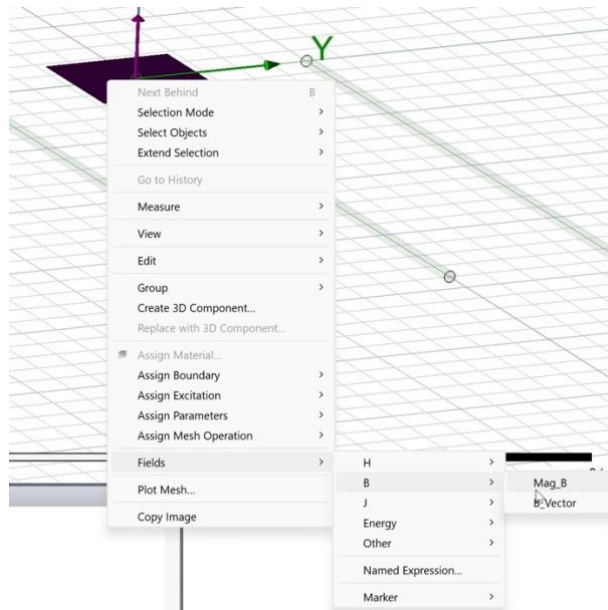
Slika 6.81. Stvaranje prikaza ovisnosti sile o struji.

Na kraju se provjerava i „*Solution Data*“. Rezultate će se pregledati u analizi rezultata simulacije.

## 7. ANALIZA SIMULACIJE

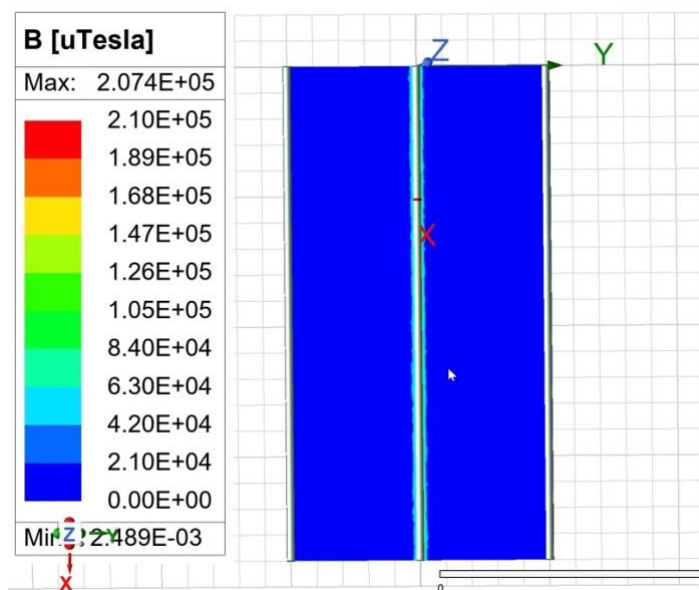
### 7.1. Analiza simulacije jednopolnog kratkog spoja

U prethodnom poglavlju je izvršena simulacija na sustavu od tri sabirnice gdje postoji jednopolni kratki spoj sa strujom od 40 kA. Pošto je simulacija uspješno izvršena, sada je moguće prikazati i analizirati rezultate simulacije. To se može napraviti tako što se odabere ravninu XY, te odabere „Fields“, zatim „B“ te „Mag\_B“:



Slika 7.1. Odabir prikaza rezultata simulacije.

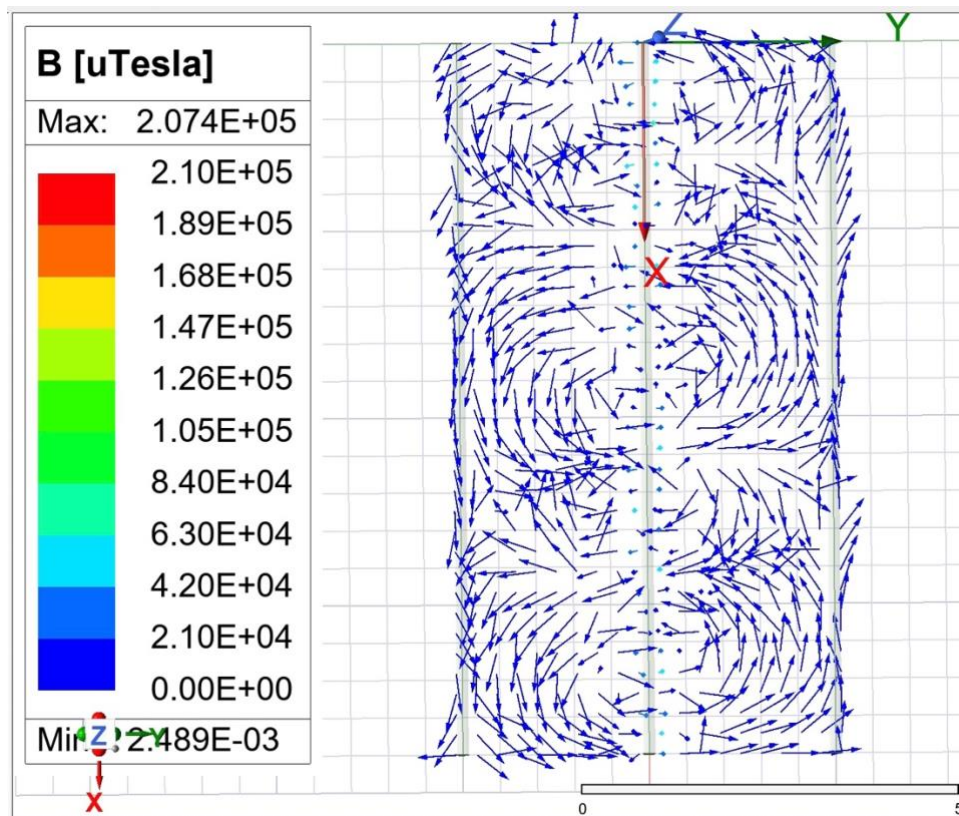
Kada se odabere „Mag\_B“, vizualizira se magnituda, odnosno intenzitet magnetskog polja na svakom mjestu u simulaciji. Dobije se sljedeći rezultat:



Slika 7.2. Intenzitet magnetskog polja u sustavu sabirnica.

Sa slike 7.2. može se vidjeti da najviša zabilježena vrijednost magnetskog polja iznosi 207,4 mT, odnosno 0,2074 T, što se odnosi na područja gdje je magnetsko polje najjače, što je prikazano crvenim bojama. Također se vidi da je magnetsko polje najjače u blizini sredine sabirnice kroz koju prolazi struja kratkog spoja, a kako se udaljava od te sabirnice, intenzitet polja opada, što je vidljivo kroz prijelaz boja prema plavom spektru. To znači da magnetsko polje ima svoju najveću koncentraciju bliže žicama/sabirnicama kroz koje teče struja, što je očekivano u ovakvim sustavima. Najmanja zabilježena vrijednost magnetskog polja je  $2,489 \cdot 10^{-3} \mu\text{T}$ , što je praktično zanemarivo magnetsko polje i odnosi se na područja dalje od sabirnica, gdje nema značajnog utjecaja struje. Vizualizacija daje jasan uvid u distribuciju polja te može pomoći u daljnjoj analizi elektromagnetskih sila, koje su važne za izračunavanje zakretnog momenta i sile na sabirnicama.

Ako se umjesto „Mag\_B“ odabere „B\_Vector“, onda se dobije prikaz i smjera i intenziteta magnetskog polja. U ovoj simulaciji, to izgleda ovako:

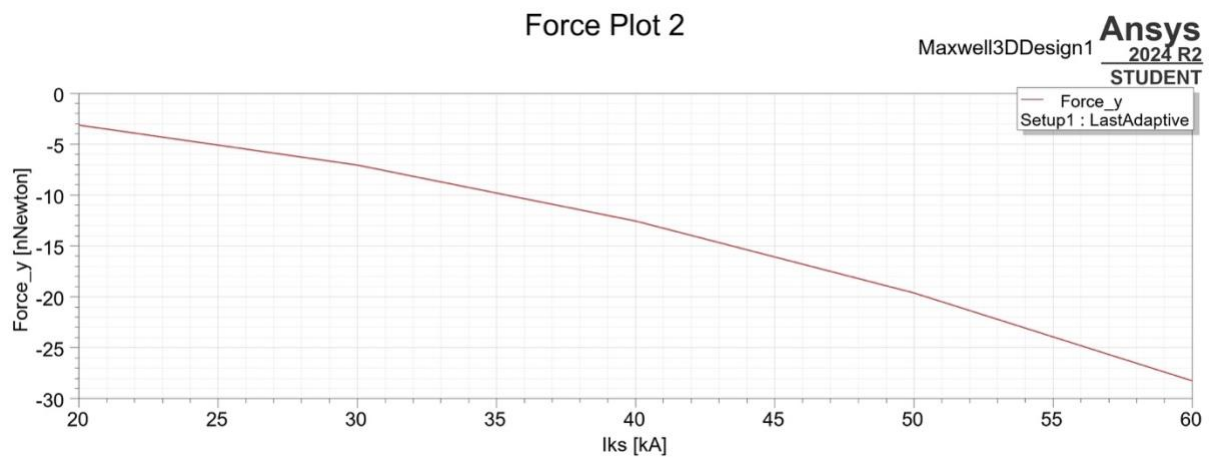


**Slika 7.3.** Smjer i intenzitet magnetskog polja u sustavu sabirnica.

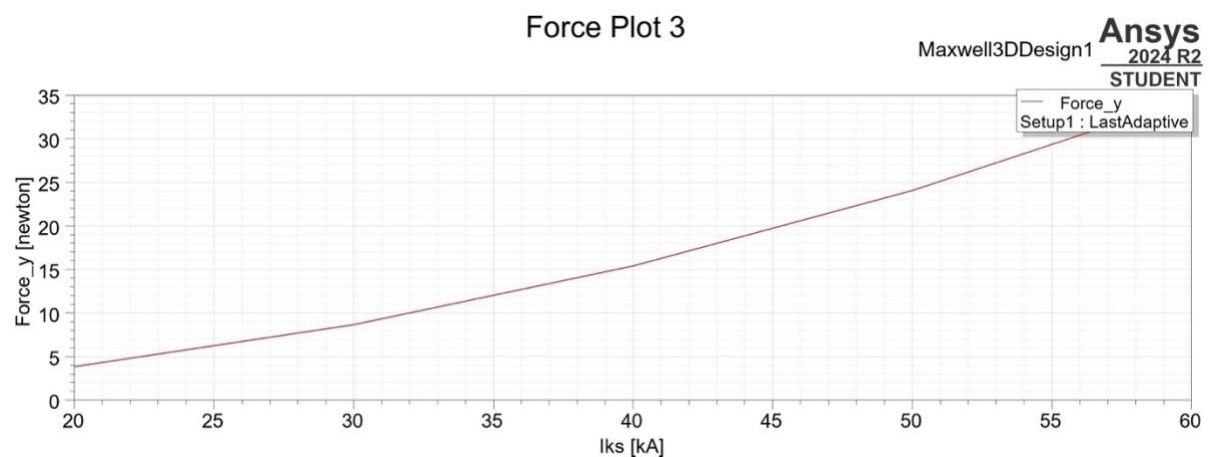
Sada se iz slike 7.3. vide sljedeće informacije - Linije polja kruže oko vodiča, prikazujući tipične obrasce za magnetska polja koja generiraju vodiči kroz koje teče struja. Strelice

pokazuju smjer magnetskog polja na svakoj lokaciji, a njihova gustoća i duljina odražavaju snagu polja. Način na koji linije polja međusobno djeluju ukazuje na to kako magnetska polja generirana svakim vodičem utječu jedna na druga. Vidljivo je da magnetska polja između susjednih vodiča međusobno djeluju, stvarajući složene strukture polja zbog struja u tri paralelne sabirnice. Najveće jačine magnetskog polja javljaju se blizu vodiča, što je očekivano jer je tamo protok struje najveći. Gradijent boja pokazuje kako jačina magnetskog polja opada s povećanjem udaljenosti od vodiča. Ova analiza pokazuje da postoji interakcija između vodiča kroz njihova magnetska polja, što je očekivano s obzirom na protok struje u sabirnicama.

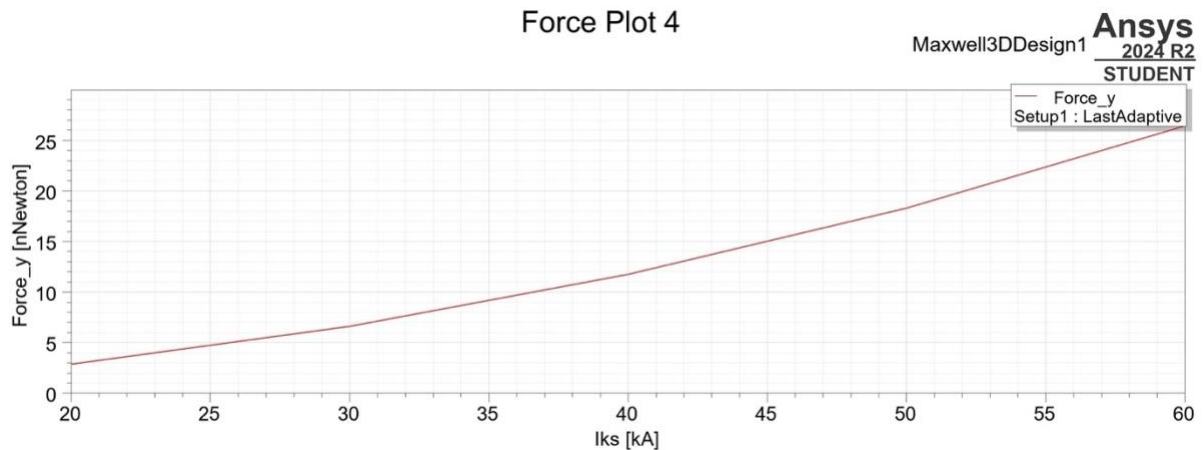
Sada se mogu pogledati grafovi koji prikazuju ovisnost sile na sabirnici o struji.



**Slika 7.4.** Ovisnost sile na L1 o struji.



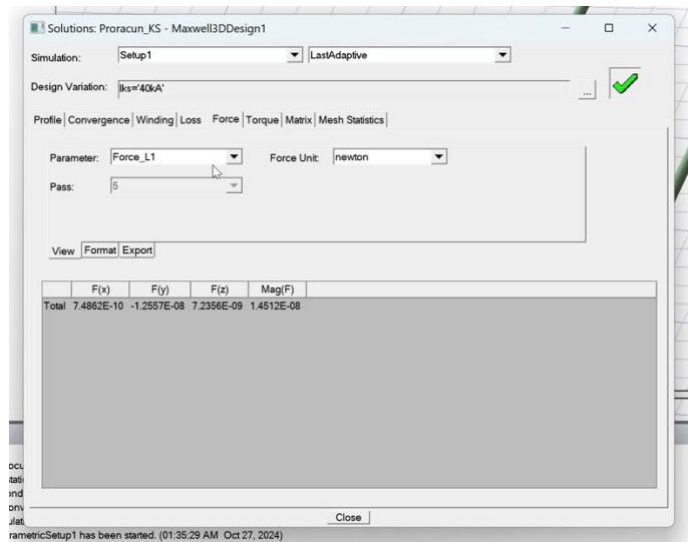
**Slika 7.5.** Ovisnost sile na L2 o struji.



**Slika 7.6.** Ovisnost sile na L3 o struji.

Grafovi sila prikazuju linearnu ovisnost u odnosu na struju, što je također u skladu s elektromagnetskim zakonom – veća struja stvara jaču silu. Primjećuje se da sila raste proporcionalno s porastom struje. Ovo je u skladu s očekivanim ponašanjem jer povećanjem struje dolazi do povećanja magnetskog polja, što rezultira većom silom na sabirnicama. Grafovi pokazuju linearnu povezanost između trenutne struje i sile, što je tipično ponašanje pod visokim strujama.

Također može se prikazati izračun sile dobivenog birajući opciju „*Solution Data*“:



**Slika 7.7.** Prikaz sile u „*Solutions*“.

Ostale sile se mogu vidjeti u tablici 7.1.

**Tablica 7.1.** Sile dobivene simulacijom jednopolnog kratkog spoja.

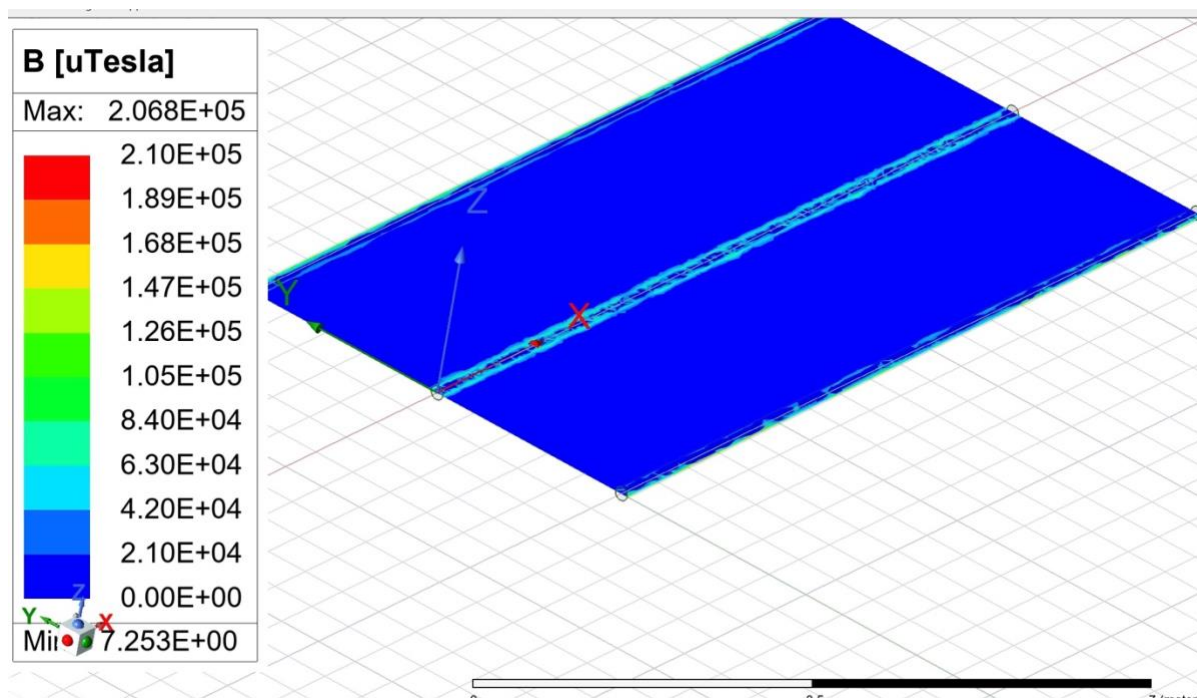
Sile [N]		
L1	L2	L3
$1,451 \cdot 10^{-8}$	132,05	$2,164 \cdot 10^{-8}$

Iz tablice 7.1. je vidljivo da su sile na L1 i L3 zanemarive. Također se može vidjeti da se iznos sile na L2 razlikuje od onog dobivenog proračunom. Najveći razlog za to je što je pri proračunu pretpostavljeno da sabirnicama L1 i L3 teče nazivna struja. Također nije uzeto u obzir međudjelovanje sila i magnetskih polja.

## 7.2. Analiza simulacije trolnog kratkog spoja

U prethodnom poglavlju je izvršena simulacija na sustavu od tri sabirnice gdje postoji jednopolni kratki spoj sa strujom od 40 kA. Pošto je simulacija uspješno izvršena, sada postoji mogućnost prikazati i analizirati rezultate simulacije. To se može napraviti tako što se odabere regiju simulacije, te se odabere „Field“, zatim „B“ te „Mag\_B“:

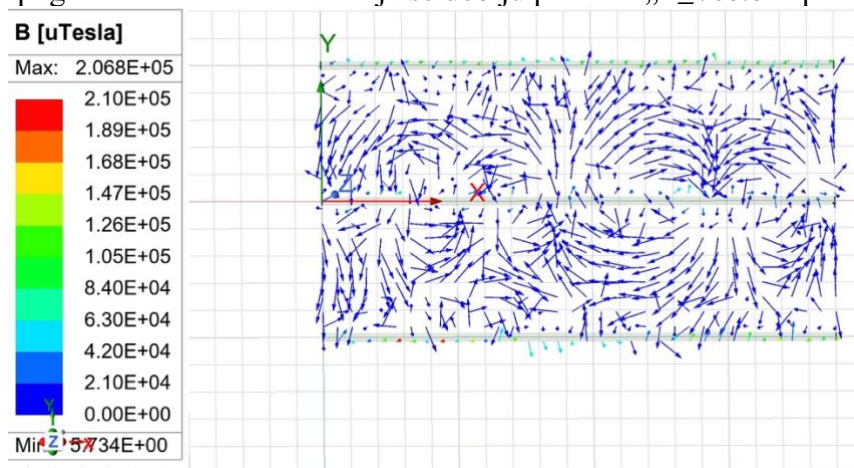
Prikaz rezultata trolnog kratkog spoja je sličan prikazu jednopolnog kratkog spoja, ali će se rezultati prikazivati u skladu s njihovim faznim pomacima. Struja kratkog spoja iznosi 40 kA i prolazi kroz sve tri sabirnice, ali sa faznim pomakom od  $120^\circ$  između svake sabirnice. Prvo će se pogledati intenzitet magnetskog polja:



Slika 7.8. Intenzitet magnetskog polja kod trolnog kratkog spoja u fazi  $0^\circ$ .

Sa slike 7.12. vidi se da prikazana vizualizacija „Mag\_B“ u „XY“ ravnini tijekom trolnog kratkog spoja pokazuje maksimalnu magnetsku indukciju od približno 206,8 mT, koncentriranu uz sabirnice zbog visokih struja. Gradacija boja ukazuje na snažno polje uz vodiče, koje opada prema vanjskim dijelovima prostora. Kod trolnog kratkog spoja, međusobna indukcija i fazni pomaci stvaraju dodatne magnetske sile koje mogu uzrokovati mehanička naprezanja i zagrijavanje.

Sada se može pogledati vektorske slike koje se dobiju pomoću „B\_Vector“ prikaza.



Slika 7.9. Vektorski prikaz za fazni pomak od  $0^\circ$ .

Na temelju prikaza magnetskog vektorskog polja na slici, vide se kružni uzorci linija sile oko svake sabirnice. Ove linije predstavljaju smjer i intenzitet magnetskog polja u blizini svake faze trofaznog sustava u slučaju kratkog spoja. Rotacija linija sile oko vodiča ukazuje na elektromagnetsku interakciju između faza, što stvara sile privlačenja ili odbijanja među vodičima, što je očekivano u slučaju trofaznog kratkog spoja.

U tablici 7.2. mogu se vidjeti sile dobivene u „*Solution Data*“:

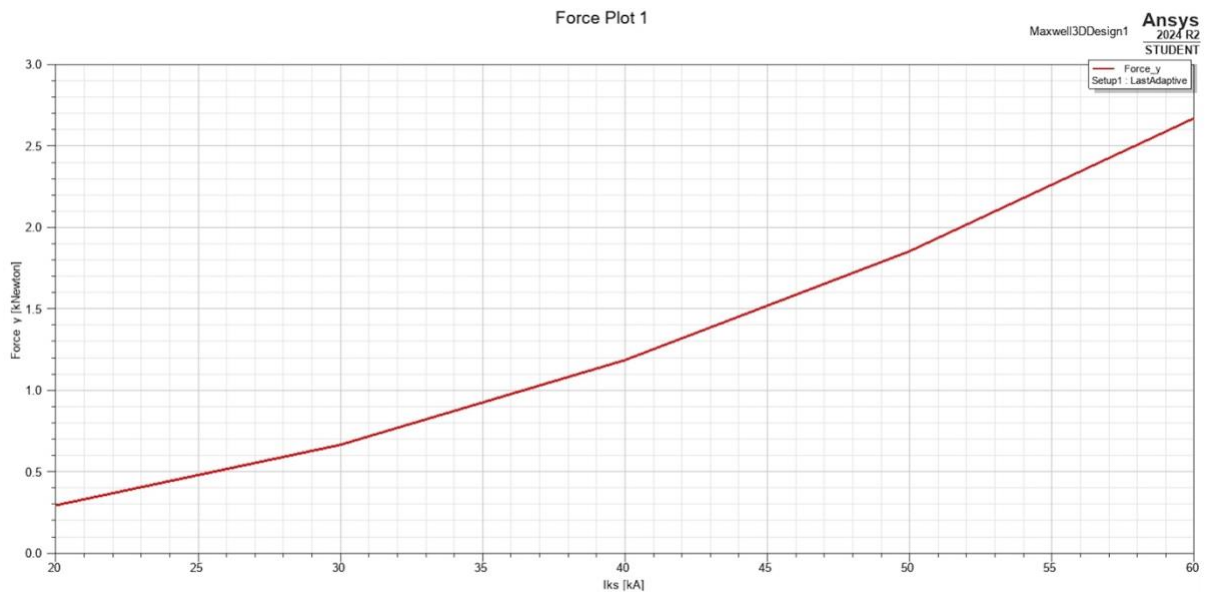
**Tablica 7.2.** Sile dobivene simulacijom trolejnog kratkog spoja.

Sile [N]		
L1	L2	L3
1186,6	186,86	1146,1

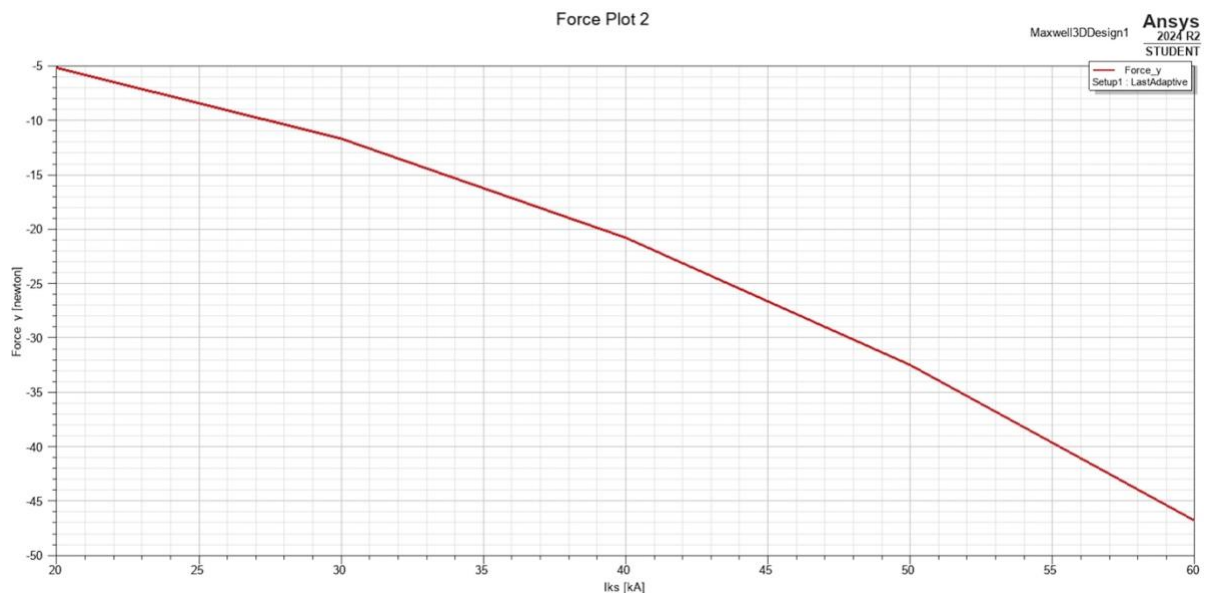
Za razliku od simulacije jednopolnog kratkog spoja, može se primijetiti da sabirnice L1 i L3 ovaj puta nemaju zanemarive sile dok sabirnica L2 ima manju vrijednost sile od one dobivene proračunom. Tijekom trolejnog kratkog spoja, magnetska polja koja stvaraju struje u L1 i L3 mogu uzrokovati promjene u magnetskom polju središnje sabirnice L2. Simulacija bolje prikazuje ove složene međudjelovanja, dok analitički proračun obično pretpostavlja idealizirane uvjete bez uzimanja u obzir stvarnih polja. Materijalna svojstva sabirnica i njihova okolina mogu utjecati na raspodjelu magnetskog polja, što može dovesti do nelinearnih efekata. Simulacija vjerojatno bolje modelira ove efekte, što može uzrokovati velike razlike između teorijskih i simuliranih rezultata. Ručni proračun obično koristi pojednostavljene modele koji ne uzimaju u obzir sve faktore, poput udaljenosti i orijentacije polja, što može dovesti do precjenjivanja sile na središnjoj sabirnici.



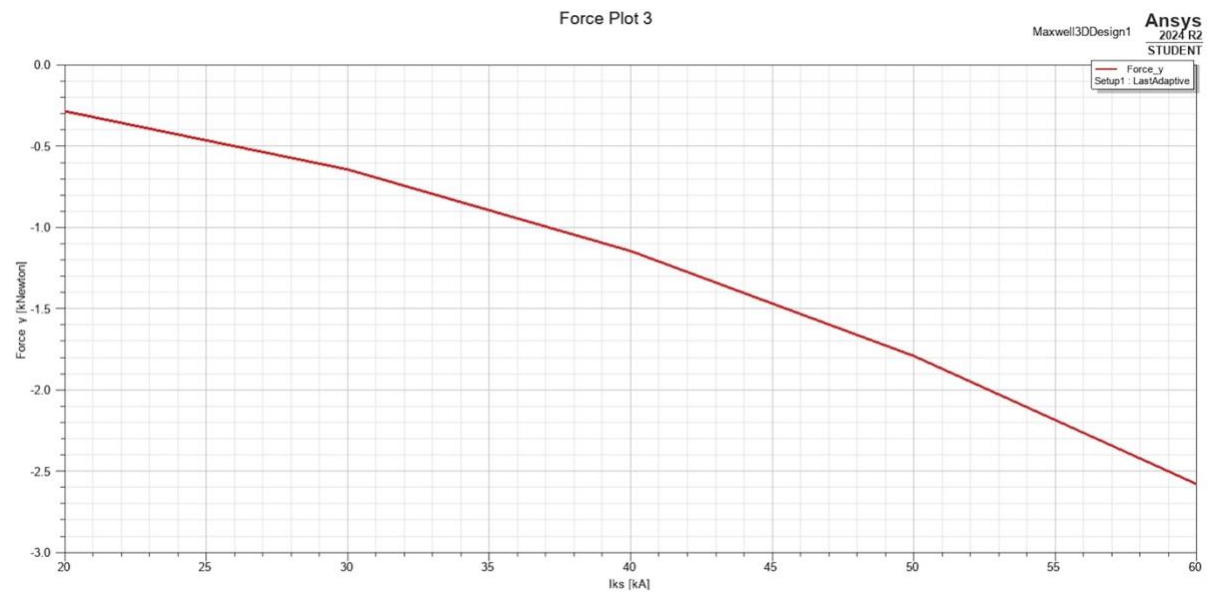
Sljedeći grafovi prikazuju ovisnosti sila o struji:



Slika 7.10. Ovisnost sile na L1 o struji.



Slika 7.11. Ovisnost sile na L2 o struji.



**Slika 7.12.** Ovisnost sile na L3 o struji.

Jednako kao i u simulaciji jednopolnog kratkog spoja, može se vidjeti da sila ima linearnu ovisnost o struji.

## 8. ZAKLJUČAK

Ovaj rad pruža sveobuhvatan pregled elektromagnetskih sila koje se javljaju tijekom kratkih spojeva u elektroenergetskim sustavima, s posebnim naglaskom na simulaciju i analizu tih sila na cijevnim sabirnicama korištenjem ANSYS programskog paketa. Kroz teorijski prikaz i numeričke simulacije, prikazana je važnost točnog modeliranja tih sila zbog njihovog utjecaja na sigurnost i stabilnost elektroenergetskih postrojenja.

U uvodnom dijelu rada, prikazan je značaj elektroenergetskih sustava i uloga sabirnica u prijenosu električne energije te je postavljen zadatak diplomskog rada.

U drugom poglavlju su analizirane elektromagnetske sile, ponajviše između paralelnih vodiča, ali i vodiča koji su postavljeni u raznim konfiguracijama.

Treće poglavlje bavi se sabirnicama, s posebnim fokusom na cijevne sabirnice. Obradeni su njihovi ključni dijelovi, kao što su vodiči, potporni izolatori i nosive konstrukcije, te su objašnjena opterećenja sabirnica u normalnom pogonu.

U četvrtom poglavlju analizirani su prijenosni sustavi, njihova funkcija, kao i različite vrste naprezanja i kvarova koji se mogu pojaviti unutar tih sustava. Detaljno je opisana uloga sabirnica u tim sustavima te kako se dimenzioniraju prema nazivnim uvjetima rada.

Peto poglavlje obrađuje temu kratkog spoja, njegove komponente te udarnu i trajnu struju kratkog spoja. Također, prikazani su proračuni za određivanje elektromagnetskih sila koje djeluju na sabirnice tijekom kratkog spoja, što je ključno za razumijevanje mehaničkih i termičkih opterećenja koja mogu nastati.

Simulacije provedene u šestom poglavlju koristile su programski paket ANSYS Electronics Desktop za modeliranje jednopolnih i tropolnih kratkih spojeva na sabirnicama. Analizirane su sile koje nastaju tijekom tih kvarova, a rezultati su poslužili za procjenu stvarnog ponašanja sustava.

U završnom, sedmom poglavlju, analizirani su rezultati simulacija, pri čemu su detaljno prikazane elektromagnetske sile koje su djelovale na sabirnice tijekom simuliranih kratkih

spojeva. Ova analiza pružila je uvid u ponašanje sabirnica pod opterećenjem te je potvrđena valjanost provedenih simulacija u realnim uvjetima.

Rezultati simulacija ukazuju na to da elektromagnetske sile, osobito u prvim trenucima kratkog spoja, mogu dosegnuti vrlo visoke vrijednosti, što može dovesti do ozbiljnih mehaničkih naprezanja na sabirnicama. Pravilno dimenzioniranje i postavljanje sabirničkih sustava stoga je ključno za smanjenje rizika od oštećenja, čime se poboljšava pouzdanost i sigurnost postrojenja. Simulacije su također potvrdile da korištenje cijevnih sabirnica ima prednosti u odnosu na druge vrste sabirnica, poput bolje mehaničke otpornosti na elektromagnetske sile i veće efikasnosti u prijenosu energije.

## 9. SAŽETAK

Uvodni dio diplomskog rada definira zadatak rada i pruža pregled teorijskih osnova o sabirnicama. Drugo poglavlje daje uvid u elektromagnetske sile gdje najviše ističe sile između paralelnih vodiča. U trećem poglavlju obrađene su vrste sabirnice, s posebnim naglaskom na cijevne sabirnice, te su pojašnjeni njihovi ključni dijelovi i opterećenja u normalnom pogonu. Četvrto poglavlje daje pregled prijenosnih sustava i uloge sabirnica unutar tih sustava, s naglaskom na njihovo dimenzioniranje i naprezanja koja se javljaju tijekom rada. Peto poglavlje objašnjava pojavu kratkog spoja i analizira njegove komponente, dok se u šestom poglavlju opisuje simulacija kratkog spoja u softveru ANSYS, gdje su provedene simulacije jednopolnih i trolnih kratkih spojeva na sabirnicama. U sedmom poglavlju analizirani su rezultati simulacija, s naglaskom na elektromagnetske sile koje djeluju na sabirnice tijekom kratkog spoja.

**Ključne riječi:** sabirnice, kratki spoj, elektromagnetske sile, ANSYS, elektroenergetski sustav

## 10. ABSTRACT

The introductory part of the thesis defines the task of the thesis and provides an overview of the theoretical background on busbars, along with the literature used in the preparation of the thesis. The second chapter offers insights into electromagnetic forces, with a particular emphasis on the forces between parallel conductors. The third chapter deals with different types of busbars, with a special focus on busbars, explaining their key components and loads during normal operation. The fourth chapter gives an overview of transmission systems and the role of busbars within these systems, emphasizing their dimensioning and the stresses that occur during operation.

The fifth chapter explains the occurrence of a short circuit and analyzes its components, while the sixth chapter describes the simulation of a short circuit in the ANSYS software, where single-phase and three-phase short circuit simulations were conducted on the busbars. The seventh chapter analyzes the simulation results, with a focus on the electromagnetic forces acting on the busbars during a short circuit.

**Key words:** busbars, short circuit, electromagnetic forces, ANSYS, power system

**LITERATURA**

- [1] Ravlić, V., "Cijevne sabirnice u visokonaponskim postrojenjima", Kigen i Ravel, Zagreb, 2006.
- [2] Razdjelne mreže i distribuirana proizvodnja, available at : [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/04 Elementi razdjelnih mreza%5b2%5d.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/04_Elementi_razdjelnih_mreza%5b2%5d.pdf) , accessed at: 21.11.2022.
- [3] Kaplan, S. M. (2009). Smart Grid. Electrical Power Transmission: Background and Policy Issues. The Capital.Net, Government Series. Pp. 1-42.
- [4] Prijenos i razdjela električne energije: available at: [https://www.fer.unizg.hr/download/ repository/ PRIJENOS\\_I\\_RAZDJELA\\_ELEKTRICNE\\_ENERGIJE.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/PRIJENOS_I_RAZDJELA_ELEKTRICNE_ENERGIJE.pdf), accessed at: 22.11.2022.
- [5] Požar, H., „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, Tehnička knjiga, Zagreb, 1990.
- [6] "Copper for Busbars : Guidance for Design and Installation" (PDF). Copperalliance.org.uk.
- [7] Starline, "What is a Busbar & Other FAQs on Electrical Copper Busbars", available at: <https://starlinepower.com/busbar-faq/>, accessed at: 18.10.2023.
- [8] Elektroporcelan A.D., Potporni izolatori, available at: <https://elektroporcelan.com/potporni-izolatori/>, accessed at: 18.10.2023.
- [9] M., Delimar, Prijenos i razdjela električne energije, available at : [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/PRIJENOS\\_I\\_RAZDJELA\\_ELEKTRICNE\\_ENERGIJE.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/PRIJENOS_I_RAZDJELA_ELEKTRICNE_ENERGIJE.pdf), accessed at: 23.11.2022.
- [10] Elektroenergetski vodovi, Elektroindustrijska i obrtnička škola Rijeka, available at: <http://mabacic.eios.hr/oo/vodovi.pdf> , accessed at: 23.11.2022.
- [11] Dalekovod, Transformatorske stanice, available at: <https://www.dalekovod.hr/transformatorske-stanice-1.aspx>, accessed at: 18.10.2023.
- [12] Sanac, službena stranica, Sanacije temelja, available at: <http://www.sanac.hr/reference-sanacija-ts-bilice.html>, accessed at: 23.11.2022.
- [13] Petranović, D., „Mehanički učinci struja kratkoga spoja na sustav užetnih sabirnica“, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2019.
- [14] IEC/TR 61597:1995, Technical report – Type 3, "Overhead electrical conductors – Calculation methods for stranded bare conductors", First edition, 1995-05.

- [15] Glišić, Đ., "Prilog izvođenja jednačine mehaničkog stanja provodnika", Elektroprivreda, br. 1-2, Beograd, Srbija, 1988., str. 23-31.
- [16] Poje, D., "Neki rezultati istraživanja o brzinama vjetra u SRH", Građevinar, vol. 37, br. 1, 1985., str. 7-14.
- [17] Penzar, B., Makjanić, B., "Osnovna statistička obrada podataka u klimatologiji", Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 1980.
- [18] Električna postrojenja, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, available at: [http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zee/nastava/svel/ep/download/ELEKTRICNA%20POSTROJENJA%204-p.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zee/nastava/svel/ep/download/ELEKTRICNA%20POSTROJENJA%204-p.pdf), accessed at: 24.11.2022.
- [19] "Cijevne sabirnice u tipskoj TS 110/x kV – jednostruke sabirnice", 317-20397, PB Elektroprivreda Dalmacije, Split, 1987.
- [20] "Cijevne sabirnice u tipskoj TS 110/x kV – dvostruke sabirnice", 341-21055, PB Elektroprivreda Dalmacije, Split, 1987.
- [21] HRN EN 1993-1-1:20XX Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija – dio 1-1: Opća pravila i pravila za zgrade (EN 1993-1-1:2006).
- [22] Ansys Electronics, „Ansys Electronics Desktop (AEDT)“, available at: <https://www.ansys.com/products/electronics>, accessed at: 20.7.2024.
- [23] Ansys, „Electronics Engineering Courses“, available at: <https://courses.ansys.com/index.php/electronics/>, accessed at: 20.7.2024.
- [24] Ansys, „Outline - Introductions - ANSYS, Inc. - AEDT - HFSS“, available at: [https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2021/07/HFSS\\_GS\\_2020R2\\_EN\\_LE1\\_Intros.pdf](https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2021/07/HFSS_GS_2020R2_EN_LE1_Intros.pdf), accessed at: 20.7.2024.
- [25] Ansys, „Intro to AEDT User Interface — Lesson 1“, available at: <https://courses.ansys.com/index.php/courses/intro-to-ansys-hfss/lessons/intro-to-aedt-user-interface-lesson-1/>, accessed at: 20.7.2024.
- [26] Ansys, „Ansys Maxwell“, available at: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>, accessed at: 20.7.2024.
- [27] Schröpfer, F.: Kraftwirkungen an elektrische Leitungen, Elin – Zeitschrift, 1952, str. 174.
- [28] Lajos, J., Fekete, K., Glavaš, H. „Kratki spojevi u elektroenergetskim mrežama“, Graphis d.o.o., Zagreb, 2020.



- [29] Electrical Engineering Portal, „An Overview Of Short Circuit Current (part 1)“, available at: <https://electrical-engineering-portal.com/an-overview-of-short-circuit-current-part-1>, accessed at: 8.9.2024.
- [30] Xi W., Zhen, C., Yinming, Z., Qin, J., Baohong, L., Yao, H., Qiping, L., „The Short-Circuit Fault Current Impact Mechanism and Adaptive Control Strategy of an MMC-HVDC“, available at: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/3/837>, accessed at: 8.9.2024.
- [31] Electricalbaba, Electrical Concepts, „Concept of Subtransient, Transient & Steady State“, available at: <https://electricalbaba.com/concept-of-subtransient-transient-steady-state/>, accessed at: 8.9.2024.
- [32] Electrical Engineering Portal, „Calculating the short-circuit current across the terminals of a synchronous generator“, available at: <https://electrical-engineering-portal.com/calculating-the-short-circuit-current-synchronous-generator>, accessed at: 8.9.2024.
- [33] Electrical Engineering Portal, „An Overview Of Short Circuit Current (part 2)“, available at: <https://electrical-engineering-portal.com/an-overview-of-short-circuit-current-part-2>, accessed at: 8.9.2024.
- [34] Electrical Engineering Portal, „Calculating the short-circuit current across the terminals of a synchronous generator“, available at: <https://electrical-engineering-portal.com/calculating-the-short-circuit-current-synchronous-generator>, accessed at: 9.9.2024.
- [35] Schachermayer, „Werkstoffdatenblatt AlMgSi0,5 F22“, available at: [https://webshop.schachermayer.com/cdn/medias/docus/53/sdat\\_Datenblatt\\_AlMgSi0\\_5.pdf](https://webshop.schachermayer.com/cdn/medias/docus/53/sdat_Datenblatt_AlMgSi0_5.pdf), accessed at: 9.9.2024.
- [36] SIST EN 755-2:2016, „Aluminium and aluminium alloys - Extruded rod/bar, tube and profiles - Part 2: Mechanical properties“, 2016.
- [37] Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Sarajevu, „Elementi VN postrojenja u transformatorskim stanicama i u razvodnim postrojenjima. Neke karakteristične izvedbe VN postrojenja“, available at: [https://c2.etf.unsa.ba/pluginfile.php/38223/mod\\_resource/content/0/OEES\\_Predavanje\\_6.pdf](https://c2.etf.unsa.ba/pluginfile.php/38223/mod_resource/content/0/OEES_Predavanje_6.pdf), accessed at: 10.9.2024.
- [38] Royal Insulator, „Post Insulator“, available at: <https://www.royalinsulator.com/station-post-insulator/>, accessed at: 15.9.2024.

- [39] Tehnički Fakultet, Sveučilište u Rijeci, „Elektromagnetska polja“, available at: <https://samomaterijali.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/10/oe-elektromagnetizam.pdf>, accessed at: 15.9.2024.