

Izračun parametara peterostupnog transformatora pomoću metode konačnih elemenata

Mandarić, Inge

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:467045>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 134

**IZRAČUN PARAMETARA PETEROSTUPNOG
TRANSFORMATORA POMOĆU METODE KONAČNIH
ELEMENATA**

Inge Mandarić

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 134

**IZRAČUN PARAMETARA PETEROSTUPNOG
TRANSFORMATORA POMOĆU METODE KONAČNIH
ELEMENATA**

Inge Mandarić

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 134

Pristupnica: **Inge Mandarić (0036527213)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektrostrojarstvo i automatizacija
Mentor: izv. prof. dr. sc. Zlatko Hanić

Zadatak: **Izračun parametara peterostupnog transformatora pomoću metode konačnih elemenata**

Opis zadatka:

U radu je potrebno modelirati peterostupni transformator koristeći dvodimenzionalnu metodu konačnih elemenata. Potrebno je provesti elektromagnetske proračune za stanje praznog hoda i za stanje kratkog spoja. Analizom elektromagnetskih izračuna potrebno je odrediti parametre transformatora kao što su gubici u praznom hodu i teretni gubici te struja praznog hoda i napon kratkog spoja, odnosno parametre nadomjesne sheme. Analizirati kako promjena geometrijskih parametara i parametara namota utječe na parametre dobivene elektromagnetskim izračunima transformatora.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Ovim se putem želim zahvaliti roditeljima na bezuvjetnoj podršci tijekom cijelog studija, svome mentoru - izv. prof. dr. sc. Zlatku Haniću na usmjeravanju i pomoći tijekom izrade ovog Diplomskog rada te KPT-u – na savjetima, prijedlozima i podacima koje su sa mnom podijelili.

Sadržaj

Uvod	3
1. Peterostupni trofazni energetski transformator.....	5
1.1. Nadomjesna shema i njeni elementi	6
1.1.1. Otpor namota	7
1.2. Pokus praznog hoda (PH) – analitički proračuni.....	10
1.3. Pokus kratkog spoja (KS) – analitički proračuni.....	12
1.4. Izračun rasipne reaktancije transformatora.....	16
2. Modeliranje transformatora u programskom sučelju MATLAB i automatizirano povezivanje s programskim sučeljem MagNet.....	22
2.1. Metoda konačnih elemenata MKE (FEM)	22
2.2. Računalni program i programski kôd	24
2.2.1. Crtanje transformatora.....	24
2.2.2. Definicija modela - MagNet.....	31
2.2.3. Magnetizirani lim i $B-H$ karakteristika materijala.....	36
2.2.4. Simulacija pokusa praznog hoda i kratkog spoja	38
Prazni hod.....	38
Kratki spoj	41
2.3. Elektromagnetske sile u kratkom spoju.....	43
2.3.1. Radijalne sile	43
2.3.2. Aksijalne sile	45
2.3.3. Izračun elektromagnetskih sila pomoću MKE	46
Grafički prikaz rezultata simulacije po namotima – radijalne i aksijalne sile.....	54
2.4. Promjena geometrijskih parametara i parametara namota te njihov utjecaj na elektromagnetske izračune	102
Zaključak	106
Literatura	107

Sažetak.....	108
Summary.....	109
Skraćenice.....	110

Uvod

Energetski transformatori su statički uređaji srednjih (8 MVA – 100 MVA) i velikih snaga (iznad 100 MVA) koji principom elektromagnetske indukcije pretvaraju električnu energiju iz jednog u drugi izmjenični sustav iste frekvencije, no promijenjenih strujnih i naponskih razina. Sastoje se od željezne magnetske jezgre, dva ili više namota spregnuta zajedničkim elektromagnetskim poljem te konstrukcijskih dijelova poput: steznog sustava jezgre i namota, kotla, konzervatora, hladnjaka, provodnika... [1]

Električna energija dovedena na primarni namot pretvara se u magnetsku, koja se zatim u ostalim električnim krugovima (sekundarnom, tercijarnom namotu, itd.) ponovno pretvara u električnu. Primarni i sekundarni namot nisu električki povezani, već samo magnetski. Budući da se transformatori koriste za povećanje ili smanjenje napona ovisno o potrebi i primjeni, njihovi se namoti, umjesto primarnih/sekundarnih, u primjeni nazivaju visokonaponskim/niskonaponskim, to jest niskonaponskim/visokonaponskim namotima. [2]

Transformator je neizostavan element u omogućavanju univerzalne uporabe izmjeničnog sustava za prijenos i distribuciju električne energije. Budući da razne komponente energetskog sustava poput generatora, prijenosnih vodova, tereta i same distribucijske mreže mogu funkcionirati na vlastitim razinama napona, transformatori su spona koje ih spajaju, snižavajući ili povišujući naponske razine. Jedna od najbitnijih zadaća im je povezivanje proizvodnih sustava energije - elektrana i točaka potrošnje. [2]

Metoda konačnih elemenata (FEM – *engl. Finite element method*) jest alat za numeričko rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje se javljaju u matematičkim modelima za rješavanje inženjerskih problema. Njen je cilj izračunati prostornu raspodjelu rješenja funkcije, najčešće u 2D ili 3D domeni. Parcijalne diferencijalne jednadžbe aproksimiraju fizikalnu pojavu. Za elektromagnetizam koriste se Maxwellove jednadžbe, za termodinamiku jednadžbe prijenosa topline, dok se za mehaniku koriste jednadžbe gibanja i Hookeov zakon. Također, za točnije izračune potrebne su i dodatne jednadžbe za opis materijala. [3]

U narednim je poglavljima opisan postupak povezivanja programskog kôda napisanog u MATLAB korisničkom sučelju sa Simcenter MagNet programskim sučeljem,

automatiziranog crtanja geometrije željenog transformatora, provedbe proračuna kratkog spoja i praznog hoda pomoću dvodimenzionalne metode konačnih elemenata te određivanja parametara nadomjesne sheme transformatora. Opisan je i postupak izračuna sila kratkog spoja s grafičkim prikazom rezultata. Naposljetku je analizirana promjena geometrijskih parametara i parametara namota te utjecaj na parametre dobivene elektromagnetskim izračunima transformatora.

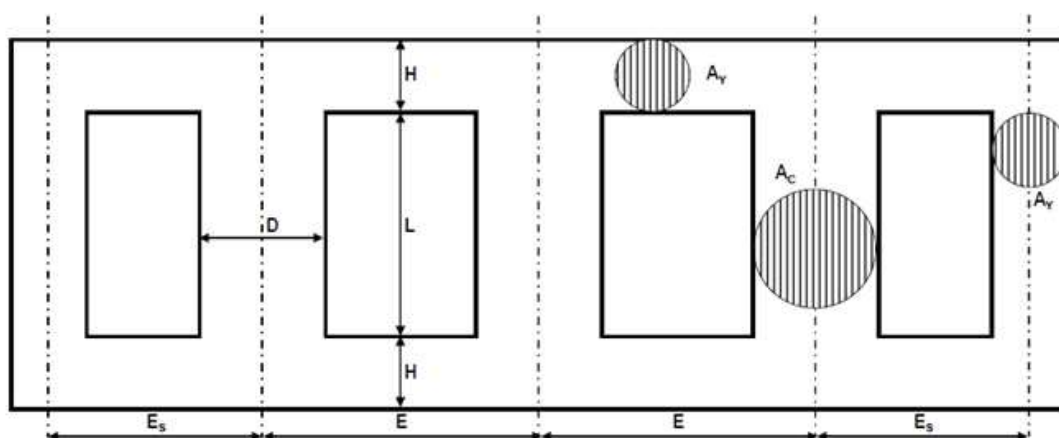
Ovaj se rad temelji na podacima o realnom transformatoru koje je podijelio KONČAR – Energetski transformatori d.o.o., Zajedničko društvo Siemens Energy i Končar.

1. Peterostupni trofazni energetski transformator

Kao model ovog diplomskog rada koristio se peterostupni trofazni energetski transformator čija je skica dana slikom (Slika 1.1), a generalni podaci tablicom (Tablica 1.1).



Koncar Power Transformers Ltd



Slika 1.1 Peterostupna jezgra

Tablica 1.1 Podaci transformatora

Peterostupni trofazni transformator	
Frekvencija f [Hz]	50
Snaga S_n [MVA]	250/250
Naponske razine [kV]	240/25.5
Napon kratkog spoja $u_k\%$ [%]	14.88
Spoj namota	YNd5
Tip hlađenja	ONAN/ONAF

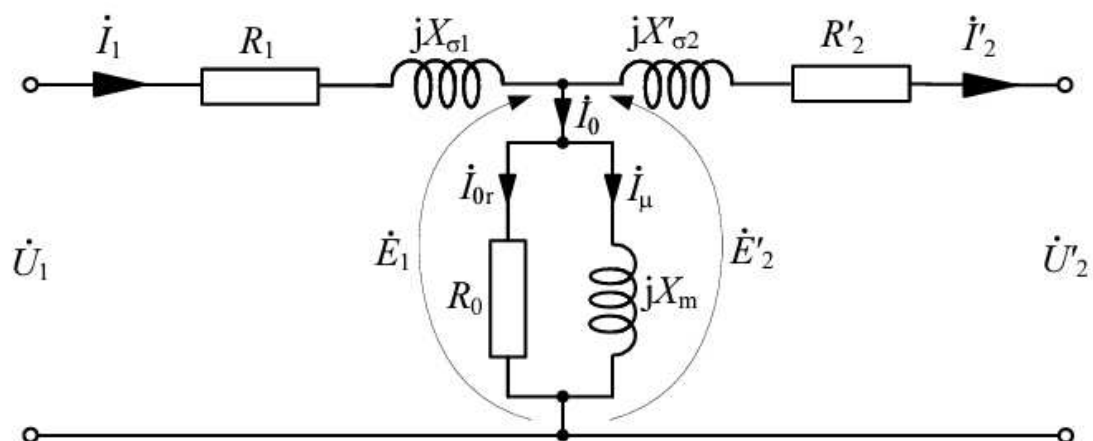
1.1. Nadomjesna shema i njeni elementi

Pri projektiranju transformatora, parametri nadomjesne sheme određuju se analitički, dok se na stvarnim transformatorima dobivaju mjerenjem iz pokusa praznog hoda i pokusa kratkog spoja, kao i ukupni gubitci u transformatoru [1].

Na temelju konačnog oblika naponskih jednadžbi transformatora prema izrazima (1) i (2) može se nacrtati nadomjesna shema prikazana slikom (Slika 1.2), gdje su sve sekundarne veličine preračunate na primar [3].

$$\dot{U}_1 = (R_1 + j\omega L_{\sigma 1})\dot{I}_1 + \dot{E}_1 \quad (1)$$

$$\dot{E}'_2 = j\omega L'_{\sigma 2}\dot{I}'_2 + R'_2\dot{I}'_2 + \dot{U}'_2 \quad (2)$$



Slika 1.2 Nadomjesna shema [5]

U poprečnu je granu dodan nadomjesni otpor R_0 na kojem se disipira snaga gubitaka u željezu. Struja magnetiziranja označena je s I_μ .

Elementi nadomjesne sheme sa svojim značenjima prikazani su tablicom (Tablica 1.2). Često se iskazuju u relativnim jedinicama (pu) ili postotnim vrijednostima. Za bazne vrijednosti napona i struje najčešće se uzimaju nazivni fazni napon primara $U_b = U_{nfl}$, to jest nazivna fazna struja $I_b = I_{nfl}$. Za baznu vrijednost impedancija, reaktancija i otpora uzima se omjer nazivnog faznog napona i nazivne fazne struje primara (3) [3].

$$Z_b = X_b = R_b = \frac{U_{nf1}}{I_{nf1}} \quad (3)$$

Tablica 1.2 Elementi nadomjesne sheme

R_1	Djelatni otpor primara
R'_2	Djelatni otpor sekundara preračunat na stranu primara
$X_{\sigma 1}$	Rasipna reaktancija primara
$X'_{\sigma 2}$	Rasipna reaktancija sekundara preračunata na stranu primara
R_0	Nadomjesni otpor za pokrivanje gubitaka u jezgri P_0
X_m	Glavna reaktancija

1.1.1. Otpor namota

Jedno od temeljnih rutinskih ispitivanja definiranih normom IEC 60076-1 je mjerenje otpora namota, koje se provodi U - I metodom. Namot se priključuje na izvor istosmjernog napona U , mjeri se struja I a otpor R se računa pomoću Ohmovog zakona, $R = U/I$. Bitno je napomenuti da struja ne smije biti prevelika kako ne bi utjecala na promjenu temperature namota, ni premala da ne utječe na točnost mjerenja.

Budući da je otpor namota ovisan o njegovoj temperaturi, potrebno je mjeriti i temperaturu ϑ tijekom mjerenja napona i struje. Iznosi otpora svih namota na kraju se preračunavaju na referentnu temperaturu od 75°C pomoću izraza kojim se dobiva faktor preračunavanja $k_{\vartheta_{CU}}$ za bakreni vodič (4) [1].

$$k_{\vartheta_{CU}} = \frac{235 + 75}{235 + \vartheta} = 1 + \frac{75 - \vartheta}{235 + \vartheta} \quad (4)$$

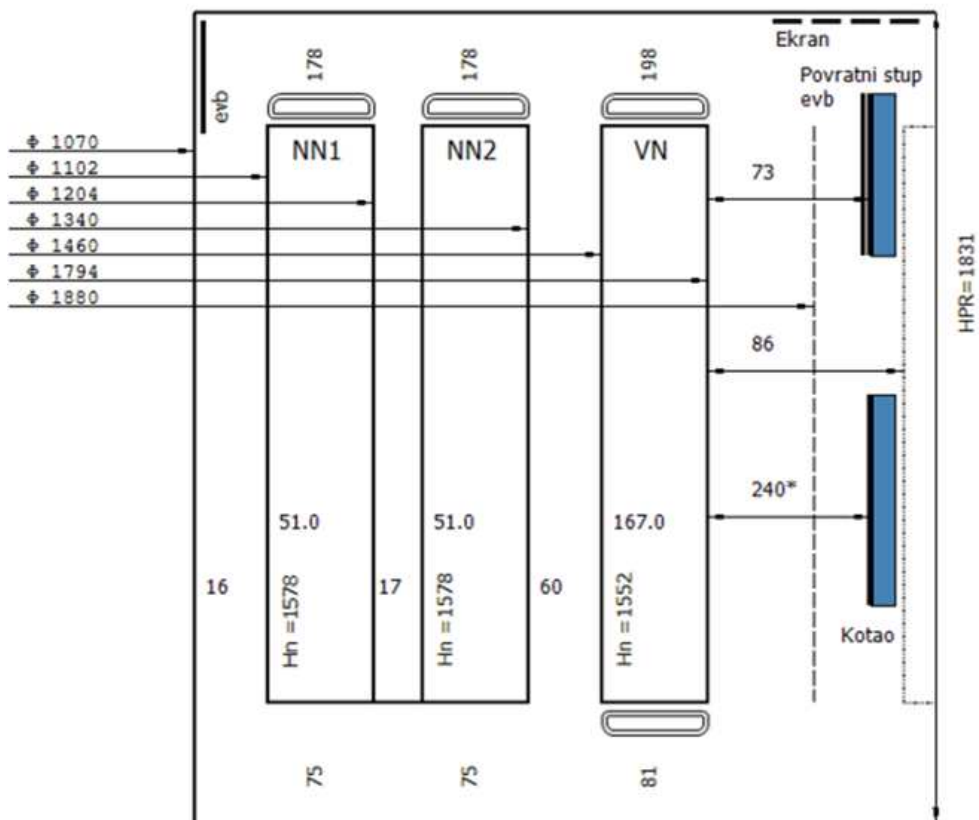
Omski se otpori analitički računaju pomoću izraza (5) i (6), gdje je κ električna vodljivost materijala vodiča, o predstavlja srednji opseg namota, N je broj zavoja, a S_Z je ukupna površina presjeka vodiča jednog zavoja. Indeks 1 predstavlja prvi, a indeks 2 drugi namot [1].

$$R_1 = \frac{1}{\kappa} \frac{N_1 o_1}{S_{Z1}} \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{1}{\kappa} \frac{N_2 o_2}{S_{Z2}} \quad (6)$$

Srednji opseg namota predstavlja opseg kruga na svojem srednjem promjeru jer su namoti cilindričnog oblika.

Končar
Power Transformers
Ltd.
 A Joint Venture of
 Siemens Energy and Končar



Slika 1.3 Prikaz smještaja namota u polovini jednog prozora transformatora

Prethodnom je slikom prikazan smještaj NN i VN namota u polovini jednog transformatorskog prozora (Slika 1.3). Otpori namota računati su prema spomenutim formulama (5) i (6). Budući da je NN namot transformatora u obliku slova „U“, srednji se opseg računao pomoću formula na slici 1.4, gdje je za izračun r_{sr_NN} uzet srednji polumjer prvog i drugog dijela NN namota (Slika 1.4). Proračun je proveden u programskom sučelju MATLAB.

```
r_sr_NN = (r1_NN+r2_NN)/2      %[m]
l_sr_NN = 2*r_sr_NN*pi        %[m]
```

Slika 1.4 Izračun srednjeg opsega NN namota

```
R_NN = (1/kappa_Cu)* l_sr_NN*br_zavoja_NN/(S_Cu_NN*br_paralela_NN)
```

Slika 1.5 Dio programskog kôda za računanje otpora NN namota

```
R_VN = (1/kappa_Cu)* l_sr_VN*br_zavoja_VN/(S_Cu_VN*br_paralela_VN)
```

Slika 1.6 Dio programskog kôda za računanje otpora VN namota

$Kappa_Cu$ iznosi $58.108 \cdot 10^6$ S/m, a ostatak parametara je uzet ovisno o namotu za koji se otpor računao. U jednadžbe je dodan parametar $br_paralela$ koji predstavlja umnožak aksijalnih i radijalnih paralela svakog vodiča.

Dobivene vrijednosti otpora izračunate su za temperaturu od 20°C i bilo ih je potrebno preračunati na temperaturu $\vartheta = 75^\circ\text{C}$.

U nastavku je dan tablični prikaz rezultata te se može uočiti da su vrijednosti otpora približno jednake (Tablica 1.3).

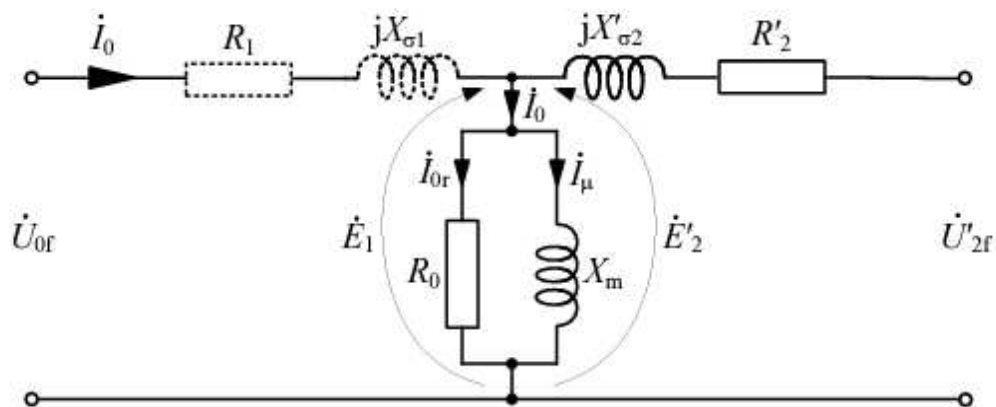
Tablica 1.3 Otpori namota

	Otpor na temperaturi $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ [Ω]	Otpor na temperaturi $\vartheta = 75^\circ\text{C}$ [Ω]	KPT podatak ($\vartheta =$ 20°C) [Ω]
R_{NN}	0.004	0.0049	0.004
R_{VN}	0.1247	0.1516	0.1241

1.2. Pokus praznog hoda (PH) – analitički proračuni

Pokus praznog hoda (PH) izvodi se tako da se dovede napon na VN ili NN namot, dok stezaljke drugog namota ostaju otvorene. U tom slučaju iz mreže teče samo struja praznog hoda. Ona se sastoji od radne komponente koja je u fazi s naponom i služi za pokrivanje gubitaka te jalove komponente za magnetizaciju jezgre. Normom IEC 60076-1 opisano je mjerenje parametara transformatora u pokusu praznog hoda: kod trofaznih transformatora mjere se linijski naponi U_0 između svih parova stezaljki ako je napajani namot spojen u trokut ili fazni naponi U_{0f} ako je namot spojen u zvijezdu s izvedenom nultočkom, linijske struje I_0 svih faza i ukupna trofazna snaga P_0 koju transformator uzima iz mreže. Pomoću tih vrijednosti određuje se impedancija praznog hoda Z_0 u nadomjesnoj shemi i njene komponente R_0 i X_m te faktor snage $\cos\varphi_0$. Gubitci praznog hoda nastaju pretežito u jezgri, a ovise o magnetskoj indukciji u jezgri B_m , debljini lima d_l , frekvenciji f , ukupnoj masi jezgre m te konstantama materijala k_h , k_v , k_a (7). Uključuje gubitke zbog histereze, gubitke vrtložnih struja i anomalijске gubitke.[1]

$$P_{Fe} = m * (p_h + p_v + p_a) = m * \left(k_h f B_m^x + k_v d_l^2 f^2 B_m^2 + k_a f^3 B_m^3 \right) \quad (7)$$



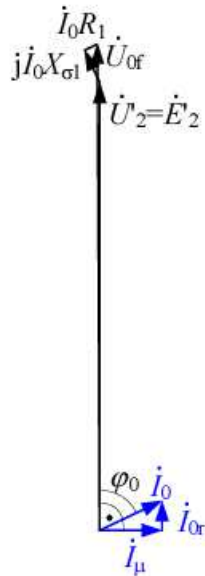
Slika 1.7 Nadomjesna shema transformatora u pokusu praznog hoda [5]

Zbog malih postotnih vrijednosti omskih otpora i struje praznog hoda, gubitci i pad napona na otporu se u praznom hodu mogu zanemariti.

$$Z_0 = \frac{U_0}{\sqrt{3} \cdot I_0} = \frac{U_{0f}}{I_0}, \quad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_0 \cdot I_0}$$

$$X_m = \frac{Z_0}{\sin \varphi_0}, \quad R_0 = \frac{Z_0}{\cos \varphi_0}$$

Slika 1.8 Računati parametri iz pokusa praznog hoda [5]



Slika 1.9 Fazorski dijagram transformatora u pokusu praznog hoda [5]

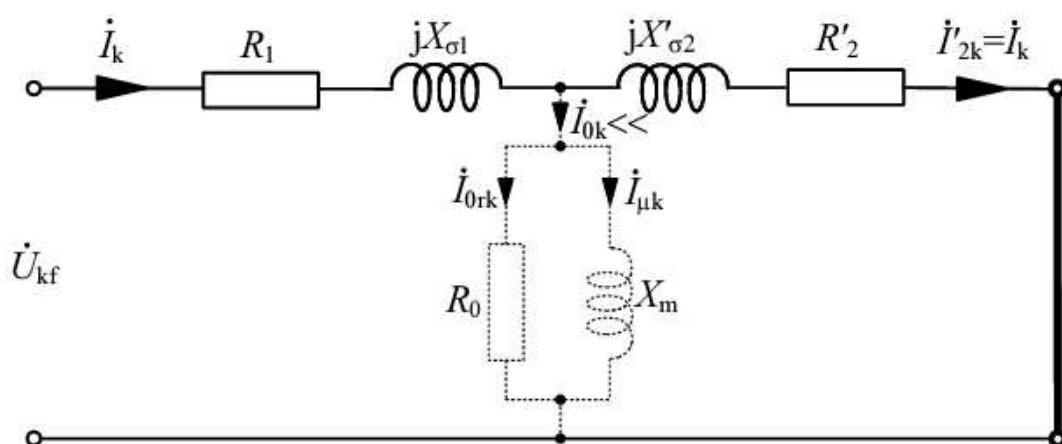
Slikom 1.9 prikazan je fazorski dijagram transformatora u pokusu praznog hoda, pri čemu je radi preglednosti struja praznog hoda nacrtana puno veća od realnih iznosa (Slika 1.9).

1.3. Pokus kratkog spoja (KS) – analitički proračuni

Pokus kratkog spoja izvodi se tako da se VN namot transformatora napaja sniženim naponom iznosa potrebnog da njime potekne nazivna struje ili struja koja nije manja od 50% vrijednosti nazivne struje, a između glavnih glava namota kratko se spoje stezaljke NN namota. Budući da otpor kratkospojnika nije zanemariv kod velikih transformatora - jer je usporediv s otporom NN namota – potrebno je obaviti korekciju njegovih gubitaka/otpora.

Vrijednosti koje se mjere tijekom pokusa su linijski napon U_k , snaga P_k koju transformator uzima iz mreže za pokrivanje gubitaka i linijska struja I_k . Gubitci P_k nazivaju se još i gubitci zbog tereta. Označavaju se s P_{kn} ako se mjere pri nazivnoj struji transformatora u kratkom spoju. Iz navedenih mjerenih vrijednosti određuje se faktor snage $\cos\phi_k$ i impedancija kratkog spoja Z_k .

Gubitci zbog tereta sastoje se od gubitaka u omskim otporima namota P_{I2R} te dodatnih gubitaka. Dodatni gubitci obuhvaćaju gubitke u priključcima namota, gubitke zbog struja izjednačenja između paralelnih vodiča, gubitke u spojnica namota spojenog u trokut, gubitke zbog efekta potiskivanja struje i blizinskog efekta koji dovodi do neravnomjerne raspodjele gustoće struje po presjeku vodiča te naposljetku gubitaka zbog vrtložnih struja induciranih u konstrukcijski dijelovima – steznicima, kolu i vlačnim motkama. [1]



Slika 1.10 Nadomjesna shema transformatora u pokusu kratkog spoja [5]

U nadomjesnoj shemi transformatora u pokusu kratkog spoja može se izbaciti poprečna grana koju čine glavna reaktancija X_m i nadomjesni otpor za gubitke u željezu R_0 zbog zanemarivo male struje magnetiziranja.

$$Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3}I_k}$$

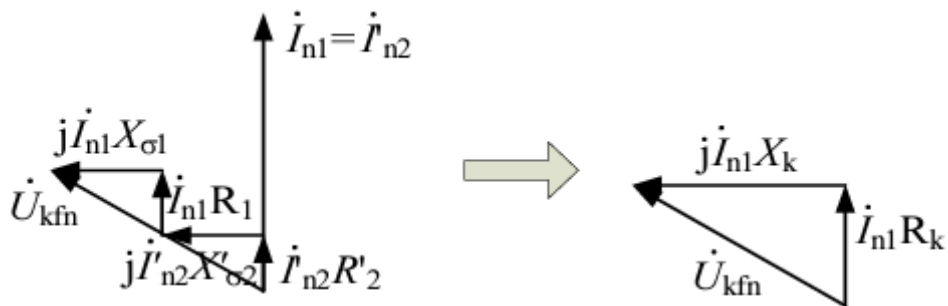
$$R_k = Z_k \cos \varphi_k$$

$$X_k = Z_k \sin \varphi_k$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_k}$$

$$X_k = X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2}$$

Slika 1.11 Računati parametri iz pokusa kratkog spoja [5]



Slika 1.12 Fazorski dijagram transformatora u kratkom spoju [5]

Slikom 1.12 prikazan je fazorski dijagram transformatora, gdje vrijedi (8) (Slika 1.12).

$$I_k = I_{kn} = I_{n1} = I'_{n2} \quad (8)$$

Budući da su u gubitcima zbog tereta sadržani i ukupni gubitci u transformatoru P_{sd} (u obzir su uzeti konstrukcijski dijelovi i namoti), otpor R_k veći je od omskih otpora R_1 i R'_2 izmjerenih U-I metodom. Iz toga slijedi:

$$P_k = 3I_k^2 R_1 + 3I_k^2 R'_2 + P_{sd} \quad (9)$$

$$P_{sd} = 3I_k^2 R_{sd} \quad (10)$$

prilikom čega R_{sd} predstavlja ekvivalentni otpor kojim se uzimaju u obzir ukupni dodatni gubici. [1]

Napon kratkog spoja najčešće se izražava u postocima nazivnog napona, te se za trofazni transformator određuje izrazima (11), (12) i (13).

$$u_{k\%} = \frac{U_{kn}}{U_n} 100\% = \frac{\sqrt{3}I_{nf}Z_k}{\sqrt{3}U_{nf}} 100\% = \frac{S_n Z_k}{U_n^2} 100\% \quad (11)$$

$$S_n = \sqrt{3}U_n I_n = 3U_{nf} I_{nf} \quad (12)$$

$$I_n = I_{nf} \quad (13)$$

U_n i U_{nf} predstavljaju nazivni linijski i fazni napon za spoj nadomjesne zvijezde, U_{kn} je linijski napon kratkog spoja za nazivnu struju, S_n je prividna snaga transformatora dok su I_n i I_{nf} nazivne vrijednosti linijske i fazne struje. Za jalovu i radnu komponentu kratkog spoja vrijede izrazi (14) i (15).

$$u_{x\%} = \frac{I_{nf}X_k}{U_{nf}} 100\% = \frac{S_n X_k}{U_n^2} 100\% \quad (14)$$

$$u_{r\%} = \frac{I_{nf}R_k}{U_{nf}} 100\% = \frac{P_{kn}}{S_n} 100\% = \frac{S_n R_k}{U_n^2} 100\% \quad (15)$$

Postotne su vrijednosti svih komponenata napona kratkog spoja neovisne o tome na kojem namotu se mjeri napon kratkog spoja, a koji se kratko spaja. Potrebno je pripaziti na činjenicu da je u slučaju napajanja sekundarne strane u jednadžbama transformatora potrebno reducirati primarne veličine na sekundarnu stranu. [1]

Gubici kratkog spoja izračunati su u programskom sučelju MATLAB formulom prikazanom slikom 1.13 (Slika 1.13).

$$P_{Cu_23} = 3 * (I1_Vnf^2 * R_VN + I2_NNf^2 * R_NN)$$

Slika 1.13 Izračun gubitaka zbog tereta

$$P_{Cu_75} = 3 * (I1_Vnf^2 * R_VN_75 + I2_NNf^2 * R_NN_75)$$

Slika 1.14 Gubitci zbog tereta preračunati na radnu temperaturu

Uzevši u obzir otpore preračunate na temperaturu od 75°C, gubitci tereta ispadaju nešto veći (Slika 1.14). Rezultati su prikazani tablično (Tablica 1.4).

Tablica 1.4 Usporedba rezultata proračuna gubitaka zbog tereta

	Proračun	KPT
P_{I2R_20} [kW]	264.24	276.3
P_{I2R_75} [kW]	321.23	322.2

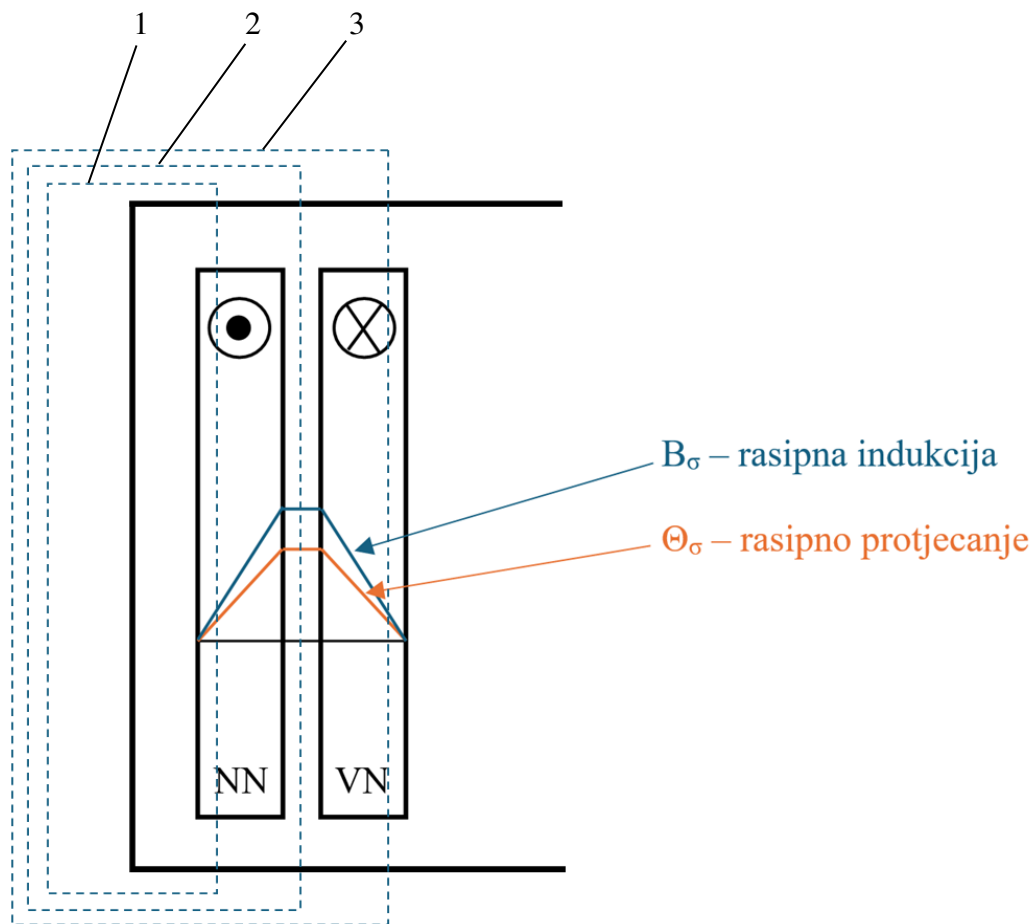
Iz navedene je tablice jasno vidljivo da su izračunati gubitci pri 75°C približno jednaki KPT-ovim gubiticima modeliranog transformatora.

1.4. Izračun rasipne reaktancije transformatora

Rasipna je reaktancija u postocima po iznosu identična jalovoj (reaktivnoj) komponenti napona kratkog spoja transformatora u postocima. Napon kratkog spoja bitan je parametar jer o impedanciji kratkog spoja ovise iznosi struja koje teku u mreži u slučaju trofaznog, dvofaznog i jednofaznog kratkog spoja te spoja sa zemljom. Sa stajališta iskorištenja transformatora i ograničenja pada napona na njemu, poželjno je da iznos Z_k između primara i sekundara bude što manji, dok je sa strane mreže poželjno da transformatori imaju što veći Z_k . Po svom udjelu u Z_k , reaktancija kratkog spoja X_k je dominantan parametar, a njen udio raste s povećanjem snage transformatora. Napon kratkog spoja određuje naručilac transformatora prema karakteristikama mreže te je u postupku projektiranja nužno pronaći optimum između dvaju već spomenutih oprečnih zahtjeva. [1]

Rasipni se induktivitet može dobiti analitičkim metodama (Rothova ili Rabinsova) ili numerički pomoću metode konačnih elemenata. U ovom se radu koristila jednostavna klasična analitička metoda za izračun rasipne reaktancije. Bilo je potrebno odrediti iznos magnetske energije akumulirane u volumenu namota primarne i sekundarne strane transformatora te u prostoru između namota. Rezultat primarnog i sekundarnog protjecanja transformatora je rasipno polje. Pri pokusu kratkog spoja, ta su protjecanja jednakih iznosa no suprotnih predznaka, što vrijedi i pri normalnom pogonu zbog malog udjela struje magnetiziranja u odnosu na struje koje teku primarnim i sekundarnim namotom. [1]

Pomoću slike 1.15 bit će objašnjen rast i pad protjecanja u prozoru transformatora (Slika 1.15). Crtkana linija 1 obuhvaća jedan dio protjecanja NN namota. Pomičući desni rub te linije s lijeva udesno, prema desnom kraju NN namota – protjecanje će linearno rasti. Crtkana linija 2 prolazi kroz područje između NN i VN namota te uvijek obuhvaća samo ukupno protjecanje NN namota. Crtkanom linijom 3 obuhvaćeno je i dalje ukupno protjecanje NN namota, no i dio protjecanja VN namota koje je suprotnog smjera. Pomičući desni rub linije 3 s lijeva na desno – prema desnom rubu VN namota – protjecanje će linearno padati prema nuli. Tako se dobiva trapezni oblik raspodjele protjecanja Θ_σ koji po Ampèrevom zakonu stvara rasipno polje B_σ u prozoru transformatora. Zanemarujući magnetski otpor željeza te s pretpostavkom aksijalno usmjerenih paralelnih silnica rasipnog polja, pojednostavljuje se izračun magnetske indukcije u prozoru B_σ koja tada postaje proporcionalna protjecanju Θ_σ . [1]



Slika 1.15 Raspodjela protjecanja i magnetske indukcije u prozoru transformatora

U nastavku će biti opisan izvod izraza za računanje rasipnog induktiviteta prema izvodu iz knjige „Transformatori u teoriji i praksi“ prof. dr. sc. Damira Žarka i dr. sc. Branimira Ćucića, poglavlje 2.7. [1].

Veza između energije rasipnog magnetskog polja W_σ i rasipnog induktiviteta opisuje se izrazom (16)

$$W_\sigma = \frac{1}{2} L_\sigma i_1^2 \quad (16)$$

prilikom čega je i_1 trenutna struja primara transformatora. Magnetska energija rasipnog polja pohranjena u volumenu V je tada:

$$W_\sigma = \frac{1}{2} \int_V \frac{B_\sigma^2}{\mu} dV \quad (17)$$

gdje je μ permeabilnost materijala, a B_σ magnetska indukcija. Silnice rasipnog polja zatvaraju se kroz jezgru i prozor transformatora. Udio energije rasipnog magnetskog polja u volumenu jezgre zanemariv je u odnosu na energiju u volumenu prozora (zbog znatno većeg iznosa relativne permeabilnosti jezgre od permeabilnosti vakuuma – magnetska energija je obrnuto proporcionalna permeabilnosti materijala) te se dobije:

$$W_\sigma = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B_\sigma^2 dV = W_{\sigma 1} + W_{\sigma 12} + W_{\sigma 2} \quad (18)$$

$W_{\sigma 1}$ je energija akumulirana u prostoru primara, $W_{\sigma 2}$ u prostoru sekundara, a $W_{\sigma 12}$ je energija akumulirana u prostoru između namota.

Indukcija se po širini namota linearno mijenja – od nule do maksimalne vrijednosti. Njena je raspodjela kao funkcija varijabli x_1 i x_2 lokalnih koordinata sustava po primaru i sekundaru definirana izrazima (19) i (20).

$$B_{x_1} = B_\sigma \left(1 - \frac{x_1}{A_{N1}}\right) \quad (19)$$

$$B_{x_1} = \frac{B_\sigma}{A_{N2}} x_2 \quad (20)$$

Gdje A_{N1} i A_{N2} predstavljaju širinu NN to jest VN namota. Infinitesimalni dijelovi volumena po kojima se vrši integracija opisani su idućim izrazima:

$$dV_{x_1} = l_\sigma (D_{u1} + 2x_1)\pi dx_1 \quad (21)$$

$$dV_{x_2} = l_\sigma (D_{u2} + 2x_2)\pi dx_2 \quad (22)$$

dok l_σ predstavlja srednju duljinu magnetskih silnica (izračun po Rogowskom)

$$l_\sigma = \frac{H_{Ne}}{K_R} \quad (23)$$

$$K_R = 1 - \sigma_R \left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma_R}}\right) \approx 1 - \sigma_R \quad (24)$$

$$\sigma_R = \frac{a_{12} + A_{N1} + A_{N2}}{\pi H_{Ne}} \quad (25)$$

Iz toga slijedi

$$\begin{aligned} W_{\sigma 1} &= \frac{1}{2\mu_0} \int B_{x1}^2 dV_{x1} = \frac{1}{2\mu_0} \int_0^{A_{N1}} B_{\sigma}^2 \left(1 - \frac{x_1}{A_{N1}}\right)^2 l_{\sigma} (D_{u1} + 2x_1) \pi dx_1 \\ &= \frac{B_{\sigma}^2 l_{\sigma} \pi A_{N1}}{2\mu_0} \frac{1}{3} \left(D_{u2} + 2A_{N2} + 2a_{12} + \frac{A_{N1}}{2} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} W_{\sigma 12} &= \frac{1}{2\mu_0} B_{\sigma}^2 (D_{u1} - a_{12}) \pi l_{\sigma} a_{12} = \frac{B_{\sigma}^2 l_{\sigma} \pi}{2\mu_0} a_{12} (D_{u1} - a_{12}) \\ &= \frac{B_{\sigma}^2 l_{\sigma} \pi}{2\mu_0} a_{12} (D_{u2} + 2A_{N2} + a_{12}) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} W_{\sigma 2} &= \frac{1}{2\mu_0} \int B_{x2}^2 dV_{x2} = \frac{1}{2\mu_0} \int_0^{A_{N2}} \left(\frac{B_{\sigma}}{A_{N2}} x_2 \right)^2 l_{\sigma} (D_{u2} + 2x_2) \pi dx_2 \\ &= \frac{B_{\sigma}^2 l_{\sigma} \pi A_{N2}}{2\mu_0} \frac{1}{3} \left(D_{u2} + \frac{3A_{N2}}{2} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

Sređivanjem se dobiva izraz ukupne magnetske energije rasipnog polja (29):

$$W_{\sigma} = \frac{B_{\sigma}^2 l_{\sigma} \pi}{2\mu_0} D_s \left[\frac{A_{N2}}{3} \left(1 - \frac{a_{12}}{D_s} - \frac{A_{N2}}{2D_s} \right) + a_{12} + \frac{A_{N1}}{3} \left(1 + \frac{a_{12}}{D_s} + \frac{A_{N1}}{2D_s} \right) \right] \quad (29)$$

a srednji promjer D_s određen je:

$$D_s = D_{u2} + 2A_{N2} + a_{12} \quad (30)$$

Zanemari li se pad magnetskog napona u željezu jezgre, prema zakonu protjecanja vrijedi:

$$B_{\sigma} = \mu_0 \frac{N_1 i_1}{l_{\sigma}} \quad (31)$$

Izraz za rasipni induktivitet dobiva se kombinacijom izraza (16), (29) i (31):

$$L_{\sigma} = N_1^2 \mu_0 \frac{D_s \pi}{l_{\sigma}} \left[\frac{A_{N2}}{3} \left(1 - \frac{a_{12}}{D_s} - \frac{A_{N2}}{2D_s} \right) + a_{12} + \frac{A_{N1}}{3} \left(1 + \frac{a_{12}}{D_s} + \frac{A_{N1}}{2D_s} \right) \right] \quad (32)$$

Ako su širine primara i sekundara približno jednake $A_{N1} \approx A_{N2}$, vrijedi (33) :

$$L_{\sigma} = N_1^2 \mu_0 \frac{D_s \pi}{l_{\sigma}} \left(\frac{A_{N1} + A_{N2}}{3} + a_{12} \right) \quad (33)$$

Koristeći izraz (32), u programskom sučelju MATLAB analitički je izračunat rasipni induktivitet modeliranog transformatora (Slika 1.16).

```
L_sigma = ((N1^2 * mi_0*D_s*pi)/l_sigma) * ...
           ((A_N2/3)*(1 - a12/D_s - A_N2/(2*D_s)) ...
           + a12 + (A_N1/3)*(1 + a12/D_s + A_N1/(2*D_s)))

L_sigma = 0.1092
```

Slika 1.16 Rasipni induktivitet transformatora

```
X_sigma = omega * L_sigma

X_sigma = 34.2937
```

Slika 1.17 Izračunata rasipna reaktancija

Rasipna se reaktancija računa prema jednadžbi sa slike 1.17, gdje *omega* predstavlja kružnu frekvenciju izraženu u rad/s (Slika 1.17). Rasipna se reaktancija u postocima računa relativno prema vrijednosti bazne impedancije, izračunate na slici 1.18 – U_{nf1} predstavlja nazivni fazni napon VN namota, a I_{nf1} nazivnu faznu struju VN namota transformatora (Slika 1.18). Rasipna se reaktancija dobiva prema izrazu (34) (Slika 1.19).

$$x_{\sigma\%} = \frac{X_{\sigma}}{Z_b} 100\% = \frac{X_{\sigma} I_{nf}}{U_{nf}} 100\% = \frac{S_n X_{\sigma}}{U_n^2} 100\% = u_{x\%} \quad (34)$$

```
S_n = 250*10^6;
U_n1 = 240*10^3;
U_nf1 = U_n1/sqrt(3)
```

```
U_nf1 = 1.3856e+05
```

```
I_nf1 = S_n/(sqrt(3)*U_n1)
```

```
I_nf1 = 601.4065
```

```
% bazna reaktancija:
```

```
Z_b = U_nf1/I_nf1
```

```
Z_b = 230.4000
```

Slika 1.18 Bazne vrijednosti i bazna reaktancija

```
x_sigma_posto = X_sigma/Z_b * 100
```

```
x_sigma_posto = 14.8844
```

Slika 1.19 Izračun rasipne reaktancije u postocima

Kao što je već spomenuto, reaktivna (jalova) komponenta napona kratkog spoja u postocima identična je rasipnoj reaktanciji u postocima [1]. U tablici 1.5 prikazana je usporedba analitički izračunatog napona kratkog spoja s KPT-ovom vrijednošću te je vidljivo da su dani rezultati približno jednaki (Tablica 1.5).

Tablica 1.5 Napon kratkog spoja

Analitički izračun [%]	KPT račun [%]
14.8844	14.88

2. Modeliranje transformatora u programskom sučelju MATLAB i automatizirano povezivanje s programskim sučeljem MagNet

U ovom će se poglavlju opisati modeliranje trofaznog peterostupnog transformatora u programskom sučelju MATLAB, simultano crtanje 2D presjeka transformatora u MATLAB-u i MagNet-u, pokretanje simulacija pokusa praznog hoda i kratkog spoja i njihovo rješavanje pomoću metode konačnih elemenata, prikupljanje podataka, grafički prikaz izračuna sila kratkog spoja u namotima transformatora te promjena geometrijskih parametara i parametara namota i njihov utjecaj na elektromagnetske izračune.

2.1. Metoda konačnih elemenata MKE (FEM)

Metoda konačnih elemenata MKE (FEM – *engl. Finite Element Method*) numerička je tehnika koja se koristi pri izvođenju analize konačnih elemenata (FEA – *engl. Finite Element Analysis*) bilo kojeg fizičkog fenomena. Potrebno je koristiti matematičke izraze za sveobuhvatno razumijevanje i kvantifikaciju fizikalnih pojava poput strukturnog ili fluidnog ponašanja, rasta bioloških stanica, širenja valova i toplinskog transporta. Proces se opisuje parcijalnim diferencijalnim jednačinama (PDE – *engl. Partial Differential Equations*). Tijekom vremena, razvijale su se numeričke tehnike za računalno rješavanje diferencijalnih jednačina, a jedna od najistaknutijih je metoda konačnih elemenata. [4]

Cilj metode konačnih elemenata jest izračunati prostornu raspodjelu rješenja funkcije, najčešće u 2D ili 3D domeni. Domena (*engl. domain*) je ograničeno područje u kojem je potrebno riješiti parcijalne diferencijalne jednačine. Rješavanje nije moguće ako je nepoznato što se događa na rubu domene – radi toga je potrebno definirati rubne uvjete. Rubni uvjeti (*engl. boundary conditions*) trebali bi biti ispravno definirani kako bi se odredilo ponašanje nepoznatog polja na vanjskim granicama modela te dobilo točno rješenje. Dobro odabrani rubni uvjeti mogu ubrzati cjelokupno rješavanje problema jer se

time reducira veličina domene u geometrijskom smislu, što je pogodno za matematičku optimizaciju gdje se koristi veliki broj uzastopnih izračuna. [3]

Osnovni koraci za primjenu metode konačnih elemenata su:

0. Razumijevanje problema
1. Postavljanje problema (*engl. pre-processing*)
2. Rješavanje problema (*engl. processing*)
3. Obrada rezultata (*engl. post-processing*)
4. Razumijevanje rezultata

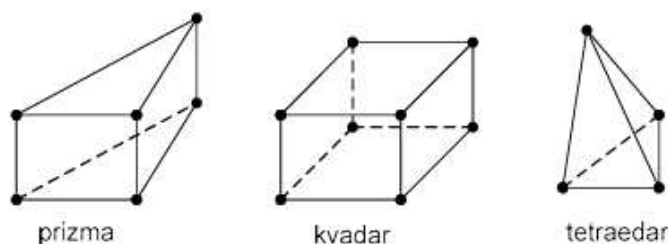
Ključne su točke za rješavanje inženjerskog problema 0. i 4., jer bez njihovog uspješnog provođenja dolazi do „GIGO“ rezultata (GIGO – *engl. Garbage in – Garbage out*).

Problem se postavlja definiranjem geometrije i mreže konačnih elemenata (*engl. mesh*), definiranjem materijala i izvora te naposljetku definicijom rubnih uvjeta. Pri definiranju geometrije i mreže, često se koristi 2D geometrija omeđena lukovima i linijama, odnosno 3D geometrija omeđena plohami. Domena se dijeli (cijepa) na više malih elemenata povezanih „čvorovima“ (*engl. nodes*). Elementi trebaju biti dovoljno maleni da mogu točno opisati proučavanu fizikalnu pojavu, ali ne smiju biti premaleni jer se vrijeme izvođenja proračuna naglo povećava. Taj se postupak naziva diskretizacijom domene i stvara se mreža konačnih elemenata. U 2D domeni pretežito se koriste trokutići, a u 3D tetraedri (Slika 2.1). [3]

2D



3D



Slika 2.1 Vrste elemenata 2D i 3D domene [3]

2.2. Računalni program i programski kôd

Peterostupni trofazni energetski transformator modeliran je pomoću programskog kôda u programskom sučelju MATLAB. Funkcijama za povezivanje simultano je modeliran i u programskom sučelju MagNet. Proračuni pokusa praznog hoda i kratkog spoja proveli su se automatski pomoću dvodimenzionalne metode konačnih elemenata te su se podaci prikupili i „prosljedili“ u MATLAB-ovo korisničko sučelje.

U nastavku je detaljnije opisan cjelokupni proces modeliranja pomoću 2D modela.

2.2.1. Crtanje transformatora

Na početku je bilo potrebno definirati geometrijske parametre transformatora – visinu i širinu jezgre, jarma, stupova, prozora te presjek jezgre i udaljenost između namota (Slika 2.2). Idući je korak bio odrediti glavne vrijednosti svakog pojedinog namota: ime, visinu, gornju i donju udaljenost od jarma, broj zavoja, unutarnji i vanjski radijus te njegov centar (Slika 2.4). Analogno kôdu prikazanom slikom 2.3. definirani su parametri za svaki preostali namot transformatora.

```
mm=1e-3;
cm=1e-2;
dm=1e-1;

param.core.window_height= 1831*mm;      %      L
param.core.window_width=  810*mm;      %+      Wwidth
param.core.window_width_2= 375*mm;      %+      Wwidth2
param.core.airbox_offset= param.core.window_height*0.5;
param.core.limb_width=    1070*mm;      %+      D

param.core.yoke_height=    600*mm;      %+      Hyoke
param.core.limb2_width=    param.core.yoke_height;
param.core.area=           83.7*dm^2;
D = sqrt(param.core.area/pi);
param.core.interspace_w_l_to_NN1 = 16*mm;
param.core.interspace_NN1_to_NN2 = 17*mm;
param.core.interspace_NN2_to_VN = 60*mm;
```

Slika 2.2 Geometrijski parametri transformatora

Nakon toga bilo je potrebno kreirati MagNet dokument koji će biti povezan s MATLAB-om pomoću funkcije

```
function MNfileHandle(MN, what2do, filePath)
```

Zadani su parametri: programska aplikacija (MagNet), željeni postupak rada s dokumentom *what2do* te putanja samog dokumenta *filePath* (Slika 2.3).

```
%%% ===== MagNet OPENING =====  
  
currentDirectory=cd;  
filename='test1.mn';  
  
filepath=[currentDirectory, '\', filename];  
  
%MagNet opening  
MagNet = actxserver('MagNet.Application'); % Create a handle  
%                                     to the MagNet application  
set (MagNet, 'Visible', 'True'); % Make the application visible  
  
%New file  
MNfileHandle(MagNet, 'new', filePath)
```

Slika 2.3 Kreiranje MagNet dokumenta i povezivanje s MATLAB-om

```
%%% ===== NAMOTI =====  
param.winding(1).name= 'NN';  
param.winding(1).height= 1556*mm;  
param.winding(1).yoke2wind_lower= 75*mm;  
param.winding(1).yoke2wind_upper= 200*mm;  
param.winding(1).turns= 85/2;  
param.winding(1).Rin= 1102/2*mm;  
param.winding(1).Rout= (1102/2+51)*mm;  
param.winding(1).center = (param.winding(1).Rout-param.winding(1).Rin)/2;
```

Slika 2.4 Parametri polovice NN namota

Nakon definicije glavnih parametara, bilo je potrebno nacrtati transformator. Najprije se koristila funkcija koja dodaje linije u strukturu koja će se crtati:

```
function struct = addPolyline(struct,varargin)
```

Kao dva parametra uzimaju se željena struktura – primjerice prazna matrica *window* te *varargin* koji predstavlja točke definirane kao vektore dimenzije 1x2 ([x1, y1], [x2, y2], ...) – one opisuju oblik koji će se crtati. Implementacija navedene funkcije dana je slikom 2.5 (Slika 2.5).

```
%window
window=[];
window=addPolyline(window,...
    [param.core.limb_width/2+param.core.window_width,param.core.window_height/2],...
    [param.core.limb_width/2,param.core.window_height/2],...
    [param.core.limb_width/2,-param.core.window_height/2],...
    [param.core.limb_width/2+param.core.window_width,-param.core.window_height/2],...
    [param.core.limb_width/2+param.core.window_width,param.core.window_height/2]);
```

Slika 2.5 Definicija strukture *window* koja predstavlja prozor transformatora

S obzirom na to da je bilo potrebno omeđiti jezgru transformatora u određeni prostor u kojem će se metodom konačnih elemenata rješavati parcijalne diferencijalne jednačbe koje opisuju transformator, definirao se „*airbox*“ (Slika 2.6). Najprije su se odredile krajnje točke koje omeđuju prostor: *t1*, *t2*, *t3* i *t4*. Zatim su se funkcijom *addStruct* strukturi koju je potrebno nacrtati pridodale linije i lukovi koji opisuju željeni oblik (Slika 2.6).

Navedena funkcija je oblika

```
function struct = addStruct(struct,t1,t2,tc,arcType)
```

te kao parametre uzima strukturu *struct* s podacima za crtanje i točke *t1* i *t2* koje predstavljaju vektore dimenzija 1x2. Ako se crta luk, *tc* predstavlja centar luka, dok je *arcType* „*char*“ parametar koji određuje smjer crtanja luka: „n“ predstavlja negativan smjer (crtanje u smjeru kazaljke na satu) te „p“ – pozitivan smjer (suprotan od smjera vrtnje kazaljke na satu).

```

%airbox
airbox=[];
t1=[param.core.window_width+param.core.limb_width*3/2+param.core.airbox_offset,...
    param.core.window_height/2+param.core.yoke_height+param.core.airbox_offset];
t2=[-t1(1),t1(2)];
t3=[-t1(1),-t1(2)];
t4=[t1(1),-t1(2)];

airbox=addStruct(airbox,t1,t2);
airbox=addStruct(airbox,t2,t3,(t2+t3)/2,'p');
airbox=addStruct(airbox,t3,t4);
airbox=addStruct(airbox,t4,t1,(t1+t4)/2,'p');

```

Slika 2.6 Definicija strukture *airbox*

Analogno se definirao svaki parametar – u ovom slučaju jezgra, sporedni prozori te namoti transformatora. Naposljetku je bilo potrebno nacrtati navedene elemente u MATLAB-u, te simultano u MagNet-u. Za to je dan prikaz kôda na slici 2.7, gdje se crtanje odvijalo pomoću funkcija `draw`, `mirrorStruct` i `MNdraw` (Slika 2.7).

Prva navedena funkcija crta oblike pomoću parametara *object*. On predstavlja strukturu koja ima definirane linije i lukove koji bi trebali biti nacrtani. Parametar *param* služi za određivanje boja crteža i može biti izostavljen. U slučaju sa slike 2.7, „-r“ predstavlja crvenu (*engl. red*), a „-b“ plavu boju linija (*engl. blue*).

```
function draw(object,param)
```

Funkcija `mirrorStruct` koristi parametar *structRef* s kojim se zadaje objekt koji je potrebno zrcaliti, te *pm1* i *pm2* koji služe za orijentaciju zrcaljenja i definiciju zrcalne osi. Korisna je za ubrzanje procesa crtanja kompleksnih oblika.

```
function struct = mirrorStruct(structRef,pm1,pm2)
```

Naposljetku se koristila funkcija `MNdraw`: pod *MN* se upisuje aplikacija s kojom se MATLAB korisničko sučelje povezuje, a pod *drawStruct* struktura koju je potrebno nacrtati.

```
function drawStruct = MNdraw(MN,drawStruct)
```



```

%%%%%%%%%%%% crtanje elemenata %%%%%%%%%%%%%
figure
draw(airbox, '-b')

draw(core, '-b')
draw(window, '-b')
draw(window_2, '-b')
draw(mirrorStruct(window,[0,0],[0,1]), '-r')
draw(mirrorStruct(window_2,[0,0],[0,1]), '-r')
axis equal

MNdraw(MagNet,airbox);

MNdraw(MagNet,core);
MNdraw(MagNet>window)
MNdraw(MagNet>window_2)
MNdraw(MagNet,mirrorStruct>window,[0,0],[0,1]))
MNdraw(MagNet,mirrorStruct>window_2,[0,0],[0,1]))

```

Slika 2.7 Crtanje elemenata

Zadnji elementi koje je bilo potrebno definirati i nacrtati u transformatoru su namoti. U postupku se koristila *for* petlja koja definira krajnje točke svakog namota, stvara strukture prozora u koje će se namoti postaviti te se sve naposljetku crta u MATLAB-u i MagNet-u. Programski kôd opisanog postupka prikazan je slikom 2.8 (Slika 2.8).

Slikom 2.9 nalazi se prikaz cjelokupnog nacrtanog presjeka jezgre transformatora, sa svim navedenim komponentama u programskom sučelju MATLAB, a na slici 2.10 u programskom sučelju MagNet (Slika 2.9 i Slika 2.10).

```

for i=1:numel(param.winding)
    t1=[param.winding(i).Rin,...
        -param.core.window_height/2+param.winding(i).yoke2wind_lower];
    t2=[param.winding(i).Rout,...
        -param.core.window_height/2+param.winding(i).yoke2wind_lower];
    t3=[param.winding(i).Rout,...
        param.core.window_height/2-param.winding(i).yoke2wind_upper];
    t4=[param.winding(i).Rin,...
        param.core.window_height/2-param.winding(i).yoke2wind_upper];

    win1=[];
    win1=addPolyline(win1,t1,t2,t3,t4,t1);
    win2=mirrorStruct(win1,[0,0],[0,1]);

    offset=[param.core.window_width+param.core.limb_width,0];
    win3=[];
    win3=addPolyline(win3,t1+offset,t2+offset,t3+offset,t4+offset,t1+offset);
    win4=mirrorStruct(win3,[0,0]+offset,[0,1]+offset);

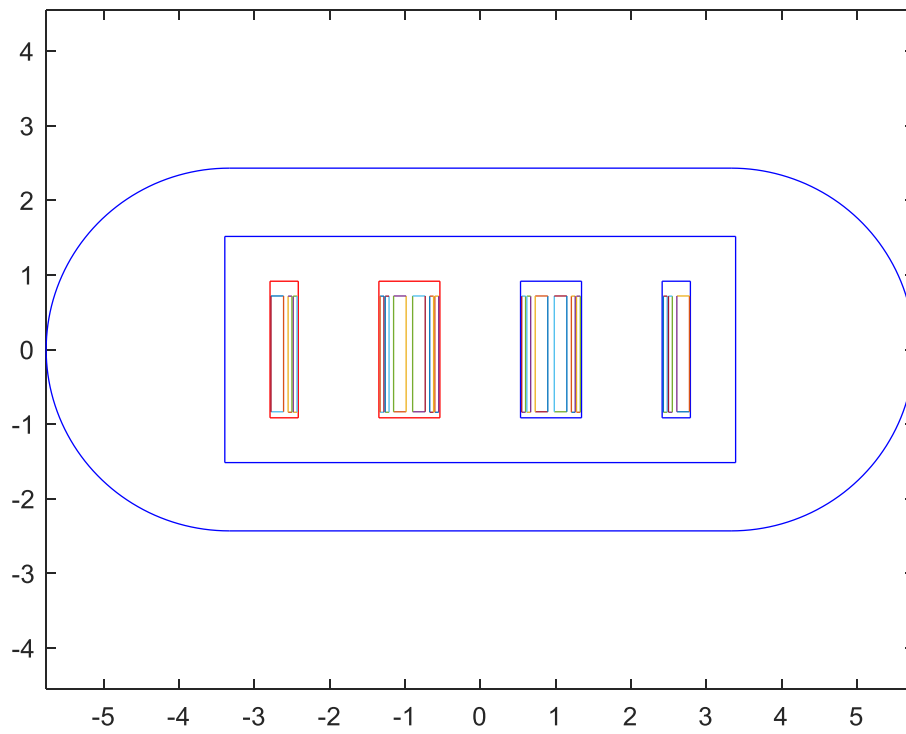
    win5=[];
    win5=addPolyline(win5,t1-offset,t2-offset,t3-offset,t4-offset,t1-offset);
    win6=mirrorStruct(win5,[0,0]-offset,[0,1]-offset);

    draw(win1)
    draw(win2)
    draw(win3)
    draw(win4)
    draw(win5)
    draw(win6)

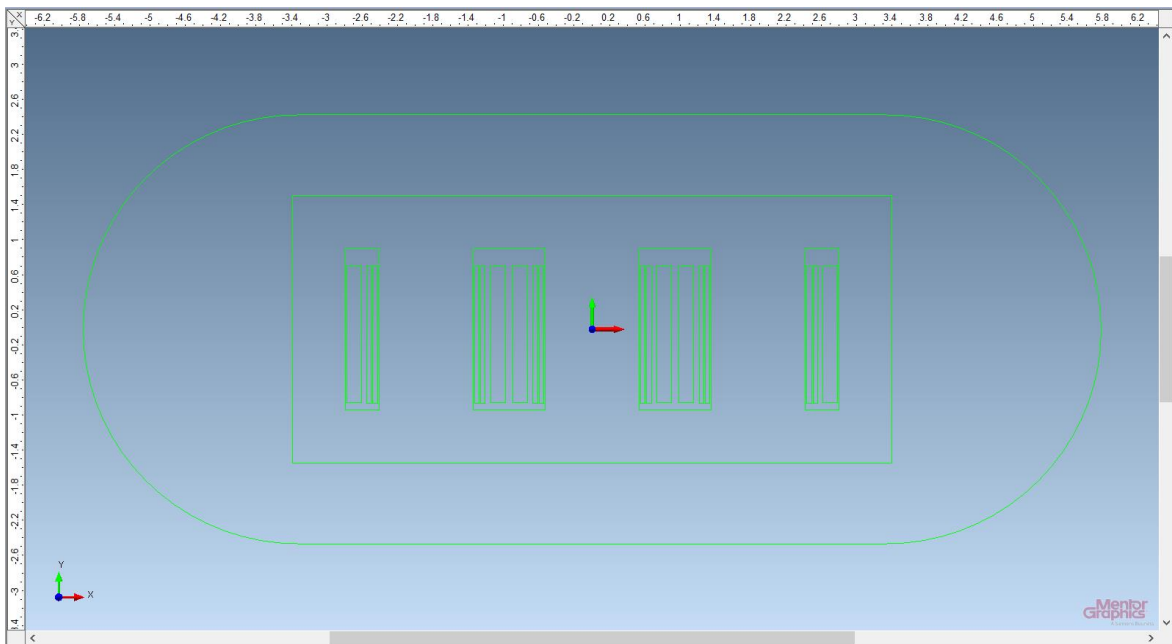
    MNdraw(MagNet,win1);
    MNdraw(MagNet,win2);
    MNdraw(MagNet,win3);
    MNdraw(MagNet,win4);
    MNdraw(MagNet,win5);
    MNdraw(MagNet,win6);
end

```

Slika 2.8 Definicija i crtanje namota



Slika 2.9 Jezgra transformatora omeđena *airbox*-om – MATLAB



Slika 2.10 Jezgra transformatora omeđena *airbox*-om – MagNet

2.2.2. Definicija modela - MagNet

Nakon crtanja jezgre i namota transformatora te *airbox*-a, bilo je potrebno definirati svaku komponentu pomoću funkcije `MNdefineComponent` (Slika 2.11).

```
function MNdefineComponent (MN, compName, RP, Lz, material)
```

Kao *MN* parametar zadaje se program u kojem će se definirati parametri strukture (MagNet), *compName* predstavlja ime komponente transformatora koja se definira, *RP* služi za automatizirano određivanje pozicije željene komponente i njen odabir, *Lz* predstavlja vrijednost prostorne ekstruzije komponente te *material* – materijal od kojeg je napravljena.

```
MNdefineComponent(MagNet, 'air_box', [0, ...  
    param.core.window_height/2+param.core.yoke_height+param.core.airbox_offset/2], ...  
    param.Lz, 'Virtual Air')  
  
MNdefineComponent(MagNet, 'right_window', ...  
    [param.core.limb_width/2+param.core.window_width/2, 0], param.Lz, 'Virtual Air')  
MNdefineComponent(MagNet, 'second_right_window', ...  
    [param.core.limb_width/2+param.core.window_width+param.core.limb_width...  
    +param.core.window_width_2/2, 0], param.Lz, 'Virtual Air')  
MNdefineComponent(MagNet, 'left_window', ...  
    -[param.core.limb_width/2+param.core.window_width/2, 0], param.Lz, 'Virtual Air')  
MNdefineComponent(MagNet, 'second_left_window', ...  
    -[param.core.limb_width/2+param.core.window_width+param.core.limb_width+...  
    param.core.window_width_2/2, 0], param.Lz, 'Virtual Air')  
MNdefineComponent(MagNet, 'core', [0, 0], param.Lz, 'ET 110-30 LS')
```

Slika 2.11 Definicija modela

```
MNsetMesh(MagNet, 'air_box', 0.1)  
MNsetMesh(MagNet, 'right_window', 0.1)  
MNsetMesh(MagNet, 'second_right_window', 0.1)  
MNsetMesh(MagNet, 'left_window', 0.1)  
MNsetMesh(MagNet, 'second_left_window', 0.1)  
MNsetMesh(MagNet, 'core', 0.1)
```

Slika 2.12 Definicija *mesh*-a

Idući je korak bio određivanje mreže konačnih elemenata, to jest „*mesh*“-a za svaku navedenu komponentu. Postupak se proveo pomoću funkcije `MNsetMesh` koja poziva MagNet korisničko sučelje, te za danu komponentu (parametar *component*) određuje veličinu trokutića mreže (*meshSize*).

```
function MNsetMesh (MagNet, component, meshSize)
```

Što je manja vrijednost parametra veličine mrežnih trokutića, to će mreža biti gušća, trokutići manji, a vrijeme izvedbe simulacije veće. Radi toga je potrebno odabrati optimalnu veličinu mreže – kako se nauštrb smanjenja vremena izvođenja simulacije ne bi dogodilo smanjenje točnosti izvedenih proračuna.

```
t1=[param.winding(1).Rin,-param.core.window_height/2+param.winding(1).yoke2wind_lower];
t2=[param.winding(1).Rout,-param.core.window_height/2+param.winding(1).yoke2wind_lower];
t3=[param.winding(1).Rout,param.core.window_height/2-param.winding(1).yoke2wind_upper];
t4=[param.winding(1).Rin,param.core.window_height/2-param.winding(1).yoke2wind_upper];

rp=(t1+t2+t3+t4)/4;

rp_mirror=mirror(rp,[0,0],[0,1]);

offset=[param.core.window_width+param.core.limb_width,0];

MNdefineComponent(MagNet,[param.winding(1).name,'_1'],...
    rp_mirror-offset,param.Lz,'Copper: 100% IACS')
MNdefineComponent(MagNet,[param.winding(1).name,'_2'],...
    rp-offset,param.Lz,'Copper: 100% IACS')

%mesh za namote
MNsetMesh(MagNet, [param.winding(1).name,'_1'], 0.025)
MNsetMesh(MagNet, [param.winding(1).name,'_2'], 0.025)

conductorObjects(1).name=[param.winding(1).name,'_1'];
conductorObjects(2).name=[param.winding(1).name,'_2'];
conductorObjects(1).direction=-1;
conductorObjects(2).direction=1;

%%define coil U
MNdefineCoil(MagNet,[param.winding(1).name,'_U'],...
    conductorObjects,param.winding(1).turns)
```

Slika 2.13 Kôd za definiciju NN namota i U faze transformatora

Na slici 2.13 prikazana je definicija NN1 i NN2 namota (Slika 2.13). Oni zajedno predstavljaju NN namot, no budući da se radi o plošnom prikazu i presjeku jezgre, potrebno ga je razdvojiti i crtati kao dvije zasebne komponente.

Najprije su se definirale krajnje točke koje omeđuju namot NN1: $t1$, $t2$, $t3$ i $t4$. Pomoću varijable rp odredila se aritmetička sredina namota te se izvršilo njegovo zrcaljenje, kako bi se nacrtao NN2 dio namota koji se nalazi s druge strane stupa jezgre transformatora. Već spomenutom funkcijom `MNdefineComponent`, obama namotima pridodao se materijal od kojeg su izrađeni – bakar, 100% IACS. `MNsetMesh` postavio je veličinu mreže trokutića. Odabrana je vrijednost 0.025 kako bi provedba simulacije bila točnija. Određeno je usmjerenje motanja namota:

```
conductorObjects(1).direction = -1
```

za NN1, to jest

```
conductorObjects(2).direction = 1
```

za NN2, gdje -1 predstavlja z, a 1 -z smjer.

Naposljetku je definiran „coil“ (svitak) koji predstavlja „U“ fazu NN namota, pomoću funkcije `MNdefineCoil`.

```
function MNdefineCoil(MN,coilName,conductorObjects,NoTurns)
```

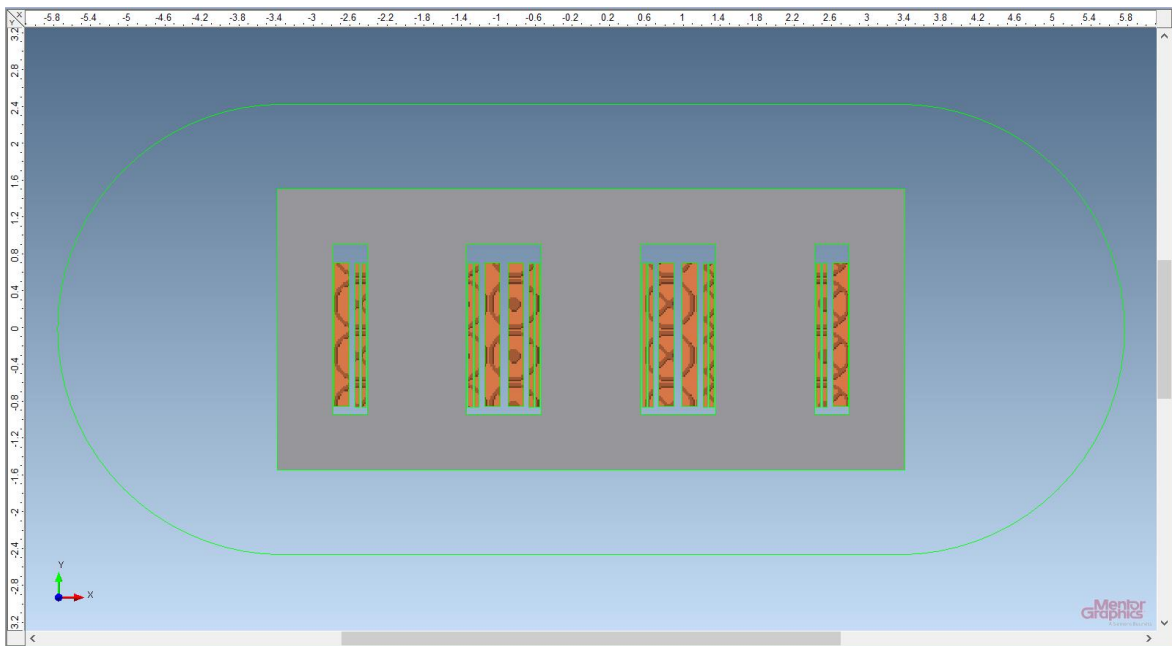
Parametar MN predstavlja aplikaciju koja se koristi za crtanje (MagNet) , $coilName$ naziv namota, $conductorObjects$ listu struktura, a $NoTurns$ broj zavoja namota koji se crta.

Na identičan se način se definirao svaki preostali namot, te pripadajući svitak.

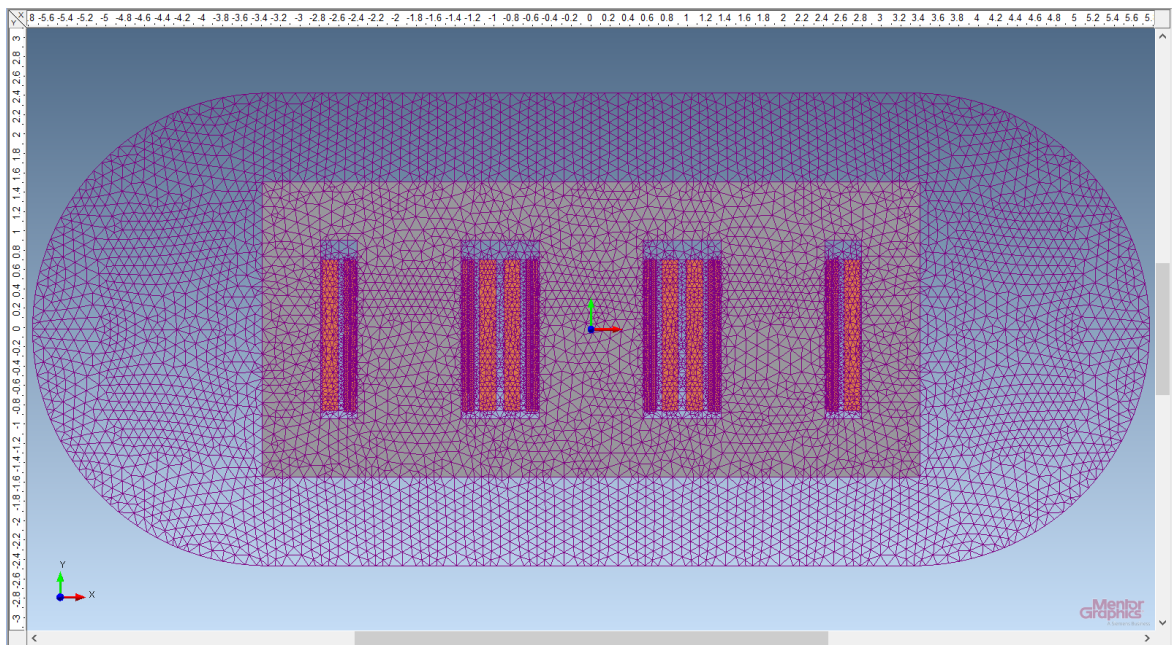
Slikom 2.14 prikazan je gotov transformator sa svakom svojom definiranom komponentom (Slika 2.14).

Na slici 2.16 vidljiva je NN „U“ faza transformatora koju čine namoti NN1, NN2, NN2_1 i NN2_2¹ (Slika 2.16).

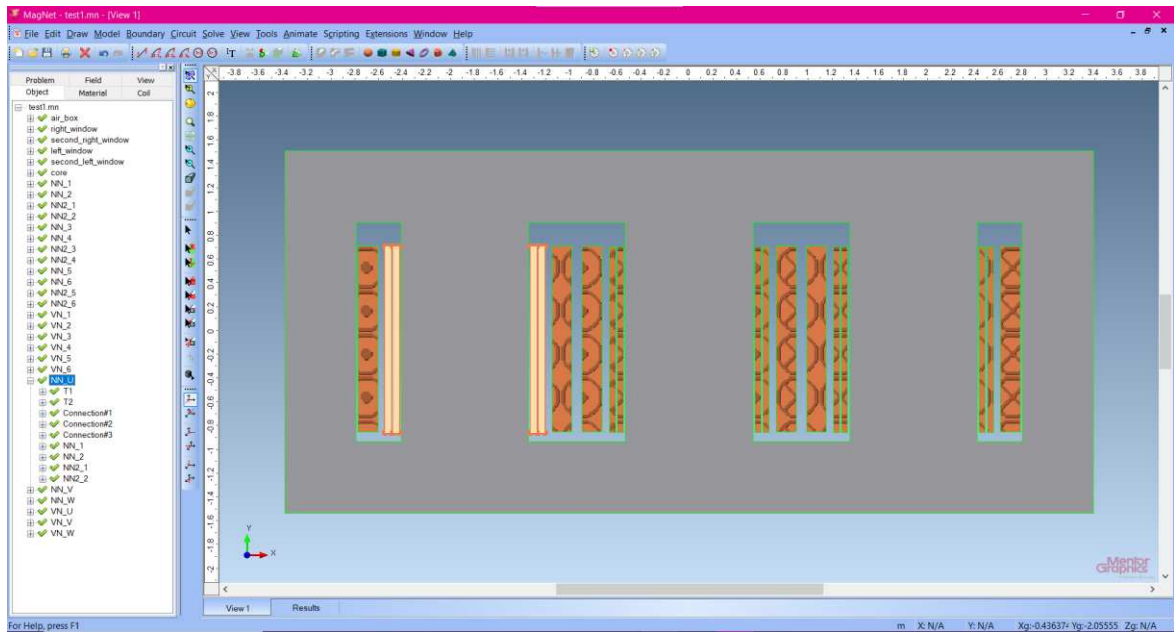
¹ S obzirom na to da je NN namot namotan oko stupa u obliku slova „U“, prilikom presijecanja jezgre transformatora, lako je uočiti da se NN namot sastoji od 4 dijela, a ne od 2 kao što je uobičajeno.



Slika 2.14 Transformator s definiranim komponentama – MagNet



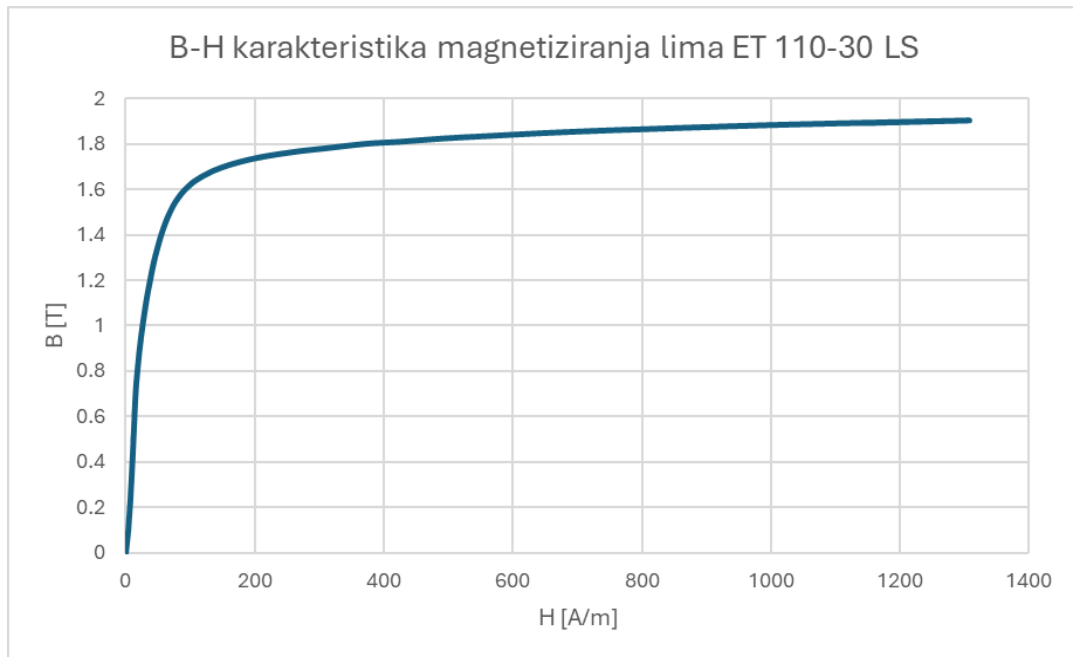
Slika 2.15 Mesh transformatora i pripadajućeg mu *airbox*-a



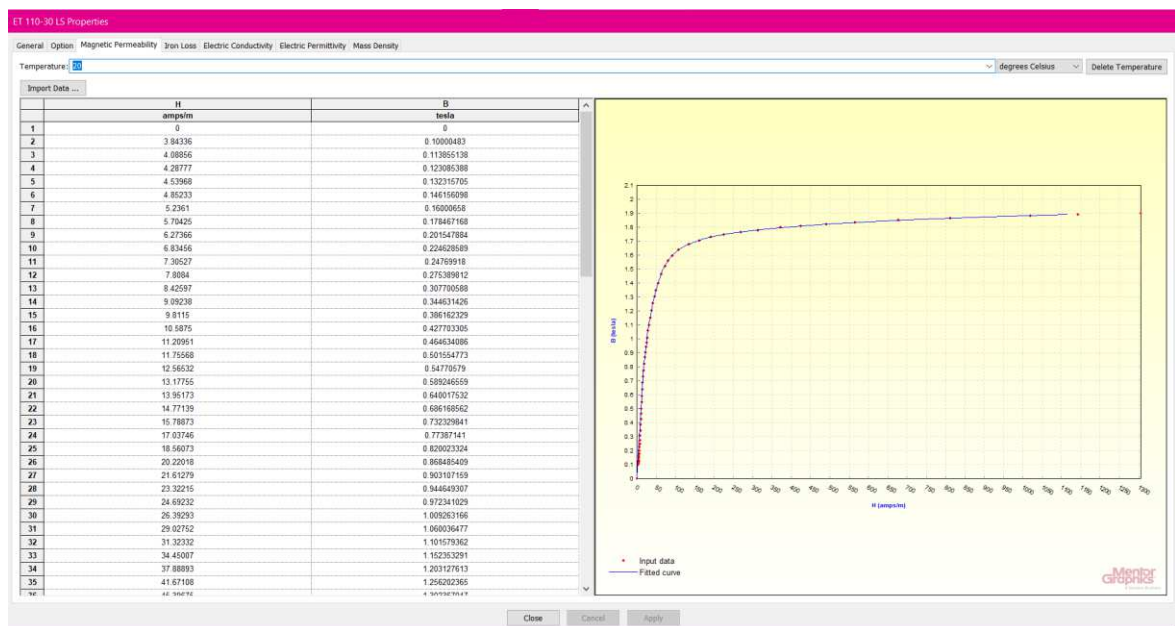
Slika 2.16 "U" svitak niskonaponskog namota

2.2.3. Magnetizirani lim i $B-H$ karakteristika materijala

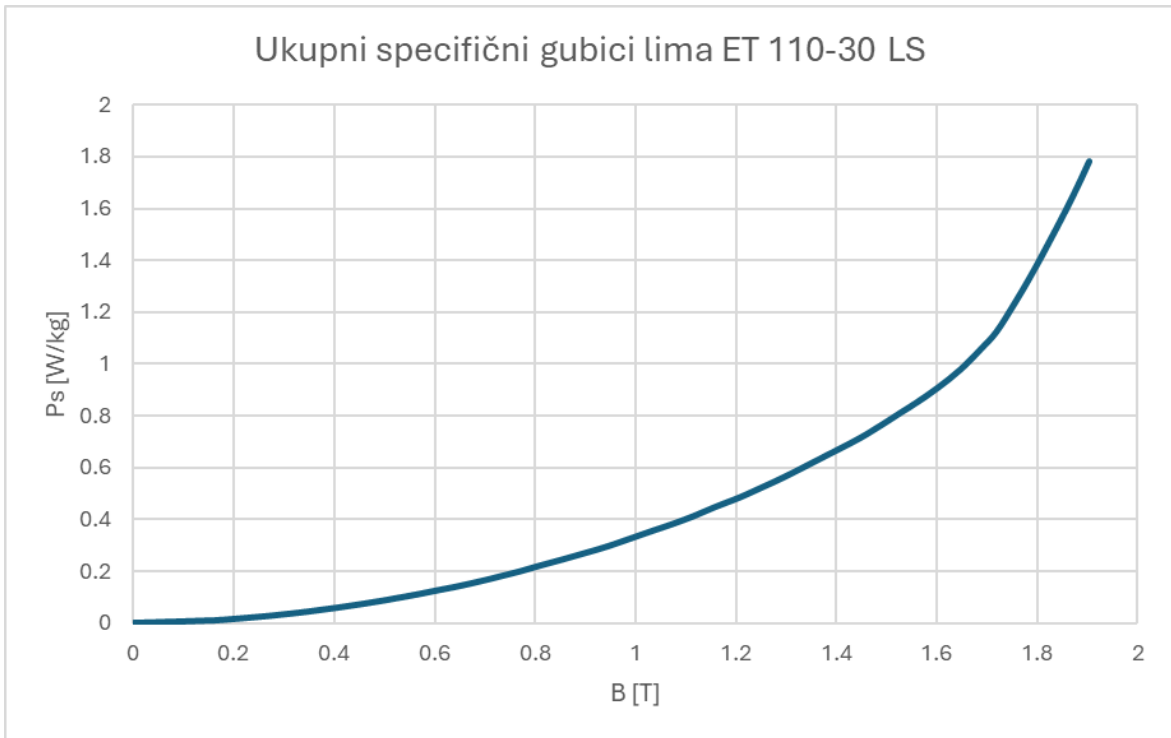
Budući da se za izradu jezgre transformatora koristio željezni lim ET 110-30 LS koji nije definiran u programskom sučelju MagNet, bilo je potrebno manualno kreirati novi materijal – „ET 110-30 LS“ i definirati podatke $B-H$ krivulje magnetiziranja te krivulje ukupnih specifičnih gubitaka tog lima.



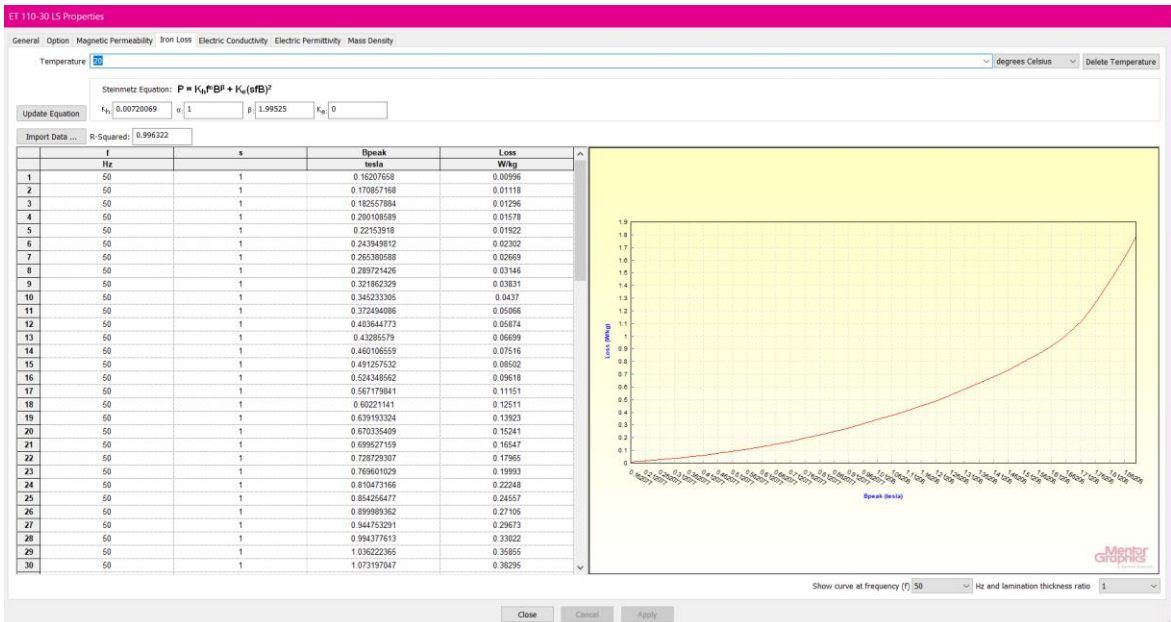
Slika 2.17 $B-H$ krivulja lima



Slika 2.18 $B-H$ krivulja lima u MagNet-u



Slika 2.19 Krivulja ukupnih specifičnih gubitaka



Slika 2.20 Krivulja ukupnih specifičnih gubitaka u MagNet-u

2.2.4. Simulacija pokusa praznog hoda i kratkog spoja

Prazni hod

Nakon završetka definiranja i crtanja komponenti transformatora, bilo je moguće provesti proračun praznog hoda (Slika 2.21). Funkcijom `MNsetVoltage`

```
function MNsetVoltage (MagNet, type, coilName, Rend, Lend, Iacdc, anglet)
```

definišu se naponi koji će biti narinuti na svaki svitak transformatora. *Type* određuje vrstu napona – radi li se o istosmjernom (DC) ili izmjeničnom (AC) naponskom izvoru. Pod parametar *coilName* upisuje se naziv svitka na koju je potrebno dovesti napon, *Rend* i *Lend* označavaju gdje će se dovesti napon, *Iacdc* označava vrijednost napona, a *anglet* fazni kut napona za svaku pojedinu fazu.

Pomoću funkcije `MNsetCurrent` definiše se struja koja će protjecati kroz željeni namot.

```
function MNsetCurrent (MagNet, type, coilName, Iacdc, anglet)
```

Svi parametri koji se mogu iščitati iz dane funkcije su ekvivalentni parametrima prethodne funkcije, osim *Iacdc* koja u ovom slučaju predstavlja vrijednost struje.

```
MNsetVoltage(MagNet, 'ac', 'VN_U', 0, 0, 138564.06, 0)
MNsetVoltage(MagNet, 'ac', 'VN_V', 0, 0, 138564.06, -120)
MNsetVoltage(MagNet, 'ac', 'VN_W', 0, 0, 138564.06, -240)

MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'NN_U', 0, 0)
MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'NN_V', 0, -120)
MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'NN_W', 0, -240)

MNrunSimulationTransient(MagNet, 'time harmonic', 2, 50, 0, 1, 500)
```

Slika 2.21 Postavke za simulaciju pokusa praznog hoda

Na slici 2.21 vidljiva je i funkcija `MNrunSimulationTransient` kojom se definiraju postavke provedbe proračuna.

```
function MNrunSimulationTransient(MagNet,type,poly,ffund,tstart,tstep,tend)
```

Pod *type* se definira radi li se o statičkom (*static*), *time harmonic*, jednostavnom tranzijentnom (*transient*) ili tranzijentnom proračunu s kretanjem (*transient with motion*). *Poly* određuje red polinoma koji će se koristiti pri definiranju čvorova (*nodes*) za računanje pomoću metode konačnih elemenata; *ffund* označava osnovnu frekvenciju *time harmonic* i tranzijentnih proračuna. Samo se kod tranzijentnih simulacija koristi *tstart*. On određuje vremenski trenutak početak simulacije, odnosno, ako nisu dodani dodatni parametri *tend* i *tstep* kojim se određuju vrijeme kraja simulacije i korak izvođenja, onda *tstart* predstavlja vektor vremena trajanja simulacije.

Budući da je nazivni napon VN strane transformatora 240 kV, na VN namote dovela se vrijednost faznog napona u iznosu od

$$U_{1f,RMS} = \frac{240 * 10^3}{\sqrt{3}} = 138564.06 \text{ V}$$

a s obzirom na to da se simulirao pokus praznog hoda, stezaljke NN namota ostavile su se „otvorenima“, to jest zadano je da njima ne protječe struja.

Bitno je napomenuti da je za ovaj proračun definiran parametar ekstruzije modela `param.Lz` kao

```
param.Lz = core_area/core_limb_width
```

gdje *core_area* predstavlja presjek jezgre, a *core_limb_width* širinu stupa.

Rezultati provedene simulacije dobili su se pomoću funkcija `MNgetIronLosses` - dohvaća gubitke u jezgri koji se sastoje od gubitaka zbog histereze i gubitaka zbog vrtložnih struja te `MNgetCurrent` koja dohvaća vrijednost struje određenog namota (Slika 2.22) .

```
function [Peddy,Physt]= MNgetIronLosses (MagNet,componentName)
```

```
function [Current,tphase]= MNgetCurrent (MagNet,coilName)
```

Struja praznog hoda izračunala se pomoću zbroja vrijednosti struja koje teku kroz sve tri faze transformatora, podijeljenog s brojem faza.

Tablicom 2.1 prikazani su rezultati simulacije (Tablica 2.1).

```
[Peddy,Physt] = MNgetIronLosses(MagNet, 'core')  
  
[Current_U,tphase_U]= MNgetCurrent(MagNet, 'VN_U')  
[Current_V,tphase_V]= MNgetCurrent(MagNet, 'VN_V')  
[Current_W,tphase_W]= MNgetCurrent(MagNet, 'VN_W')  
  
i_0_sr = (Current_U + Current_V + Current_W)/3
```

Slika 2.22 Dohvaćanje rezultata

Tablica 2.1 Rezultati proračuna praznog hoda

Veličine	Simulacija	KPT izračun
P_0 [kW]	84.67	95.9
I_0 [A]	0.5006	/

Iz danih je rezultata vidljivo odstupanje u vrijednostima između simulacije pomoću dvodimenzionalne metode konačnih elemenata u MagNet-u i KPT-ovog izračuna. Razlog tomu je nesavršenost modela te korištenje aproksimacija prilikom provedbe simulacije te modeliranje pojednostavljenog modela transformatora.

Kratki spoj

Proračun kratkog spoja simulirao se tako da se, pomoću funkcija već spomenutih u poglavlju 2.2.4 – Prazni hod, definirala struja koja će teći kroz svaku fazu VN namota transformatora (Slika 2.23). Zadana je RMS vrijednost fazne struje VN namota, dok su se stezaljke NN namota „kratko spojile“, odnosno, zadala im se vrijednost napona od 0 V.

$$I_{1f,RMS} = \frac{250 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 240 \cdot 10^3} = 601.407 \text{ A}$$

```
MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'VN_U', 601.407, 0)
MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'VN_V', 601.407, -120)
MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'VN_W', 601.407, -240)

MNsetVoltage(MagNet, 'ac', 'NN_U', 0, 0, 0, 0)
MNsetVoltage(MagNet, 'ac', 'NN_V', 0, 0, 0, -120)
MNsetVoltage(MagNet, 'ac', 'NN_W', 0, 0, 0, -240)

MNrunSimulationTransient(MagNet, 'time harmonic', 2, 50, 0, 1, 500)
```

Slika 2.23 Postavke za simulaciju pokusa kratkog spoja

Bitno je napomenuti da je za proračun kratkog spoja definiran parametar ekstruzije modela `param.Lz` tako da glasi:

$$\text{param.Lz} = \text{opseg}/2$$

gdje *opseg* predstavlja duljinu kružnice radijusa r_{sr} koji označava radijus od središta stupa do sredine razmaka između VN i NN namota transformatora (Slika 1.15). Model treba dobro modelirati pojave koje se događaju prilikom kratkog spoja, uzevši pritom u obzir da je magnetsko polje koncentrirano u prozoru transformatora – između NN i VN namota. Magnetski se otpor definira pomoću specifične geometrije – silocijevi. Prilikom kratkog spoja, silocijev ima izgled šupljeg cilindra. Glavne su joj dimenzije ekstruzija u z smjeru, odnosno dubina l_i , visina w i širina L . Budući da je potrebno definirati ekvivalentni model s linearnom ekstruzijom u z smjeru, širina i visina silocijevi bit će jednake širini i visini prozora, dok će dubina odgovarati stvarnoj dubini modela. Odabir dubine silocijevi može se predočiti na primjeru jednog vodiča namota. Naime, jedan je vodič namotan oko stupa te prolazi kroz dva prozora transformatora (referentni i povratni). Svaki će prozor tada imati ekstruziju *opseg/2*, kao i model transformatora u cjelini.

U nastavku su prikazani dijelovi kôda za iščitavanje ulančenog magnetskog toka namota MNgetFluxLinkage (Slika 2.24). Funkcija MNgetFluxLinkage kao parametar uzima naziv svitka – *coilName*,

```
function [Psi,tphase]= MNgetFluxLinkage(MagNet,coilName)
```

te vraća vrijednost i fazni kut ulančenog magnetskog toka. Iz toga analitički izračunao napon kratkog spoja $u_{k\%}$ (Slika 2.24).

Tablicom 2.2 dan je tablični prikaz rezultata simulacije (Tablica 2.2). Bitno je napomenuti da nije bilo potrebno računati omske gubitke pomoću dvodimenzionalne metode konačnih elemenata, već da su oni izračunati analitički u poglavlju 1.3.

```
[Psi_U,tphase_U] = MNgetFluxLinkage(MagNet, 'VN_U')
[Psi_V,tphase_V] = MNgetFluxLinkage(MagNet, 'VN_V')
[Psi_W,tphase_W] = MNgetFluxLinkage(MagNet, 'VN_W')

psi_sr = (Psi_U + Psi_V + Psi_W)/3
u_sigma = psi_sr*2*pi*50;
u_r = I1_VNf * R_VN_75;

uk_f = sqrt(u_sigma^2 + u_r^2)
uk_lin = uk_f*sqrt(3)
uk_posto = (uk_lin/U1)*100
```

Slika 2.24 Kôd za iščitavanje ulančenog magnetskog toka i određivanje napona kratkog spoja

Tablica 2.2 Rezultati proračuna kratkog spoja

Veličine	Simulacija	KPT izračun
ψ_{sr} [Wb]	65.2656	/
$u_{k\%}$ [%]	14.7973	14.88
P_{I2R} [kW] ²	321.23	322.2

Vrijednosti napona kratkog spoja dobivene simulacijom pomoću metode konačnih elemenata bliske su KPT-ovom izračunu, dok su omski gubitci približno jednaki.

² Omski su gubitci analitički izračunati u poglavlju 1.3 Pokus kratkog spoja (KS) – analitički proračuni.

2.3. Elektromagnetske sile u kratkom spoju

U ovom poglavlju opisan je izračun unutrašnjih elektromagnetskih sila energetskog transformatora pod uvjetima kratkog spoja pomoću metode konačnih elemenata. Proučavane su radijalne i aksijalne sile koje djeluju na namote u kratkom spoju. Svaki je namot transformatora podijeljen na 20 aksijalnih regija radi istraživanja utjecaja radijalnih i aksijalnih sila na svaku te usporedbe gdje su najveće vrijednosti tih sila.

Struja kratkog spoja je u prosjeku do 8 puta veća nego nazivna struja u velikim energetskim transformatorima. Posljedica toga su nastale sile koje mogu biti i do 100 puta veće nego u normalnom načinu rada jer su sile proporcionalne kvadratu struje. Tako velike sile stvaraju velike štete – deformaciju i pomak u namotima transformatora. Oštećenja transformatora radi sila nastalih u kratkom spoju od velike su važnosti za proizvođače struje i projektante transformatora. [6]

Međudjelovanje gustoće struje i magnetske indukcije stvaraju elektromagnetske sile u namotima transformatora, te se mogu analitički odrediti jednačinom (35):

$$f = J \times B \quad (35)$$

Spomenute su sile prisutne na niskonaponskim i visokonaponskim namotima transformatora. Elektromagnetske sile i rasipni magnetski tok su relativno mali u normalnim uvjetima rada, no tijekom vanjskog kvara ili kratkog spoja struja počinje rasti. Rastom struje rastu i elektromagnetske sile, koje se mogu podijeliti na radijalne i aksijalne. [6]

2.3.1. Radijalne sile

Tijekom normalnih uvjeta rada, aksijalna komponenta rasipnog toka puno je veća od radijalne komponente u namotima transformatora. Na vrhu i dnu namota, radijalna komponenta rasipnog toka je najveća, dok je najmanja u sredini namota energetskog transformatora. Radijalna se sila pojavljuje zbog međudjelovanja između struje koja teče kroz namot i aksijalne komponente magnetske indukcije (36). Sila se računa pomoću izraza (36) i (37).

$$F_r = B_z \times J_\varphi \quad (36)$$

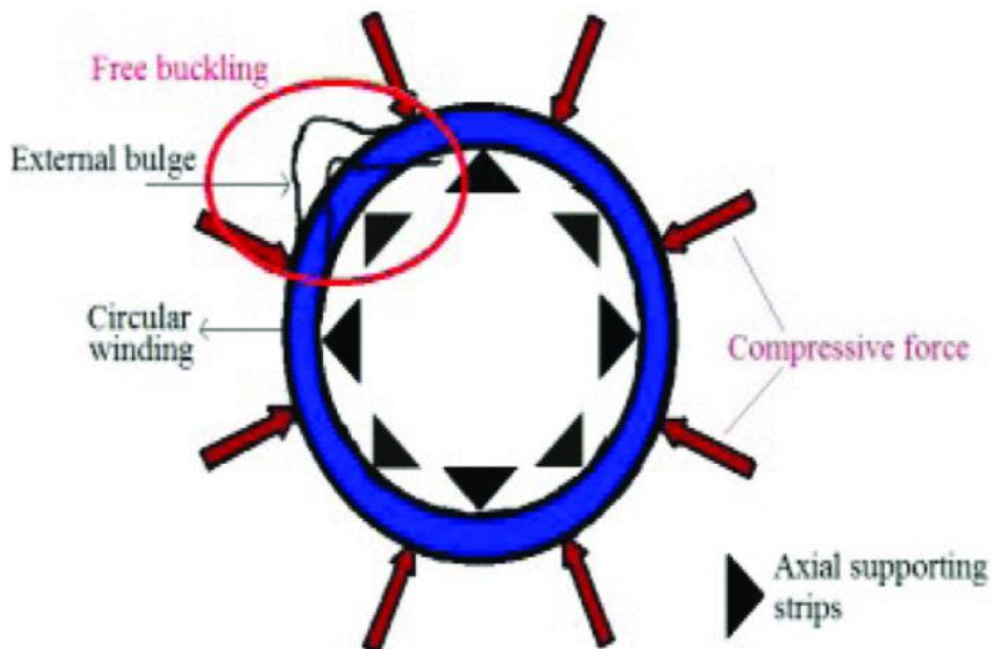
$$F_r = \frac{2\pi^2(NI)^2 D_m 10^{-7}}{h} \quad (37)$$

U izrazu (37), NI predstavlja vrijednost amper-zavoja namota, D_m srednji promjer namota, a h njegovu visinu.

Aksijalna gustoća rasipnog polja računa se izrazom (38):

$$B_a = \frac{4\pi(NI)}{10^4} \quad (38)$$

Veće radijalne sile mogu povećati slobodan prostor između dvaju namota. One djeluju na vanjsku stranu namota prema stupu transformatora, dok s unutrašnje strane namota djeluju prema van te se stvara izvijanje (*engl. buckling*) (Slika 2.25). [6]



Slika 2.25 Izvijanje unutrašnjeg namota transformatora uslijed utjecaja radijalnih sila [6]

2.3.2. Aksijalne sile

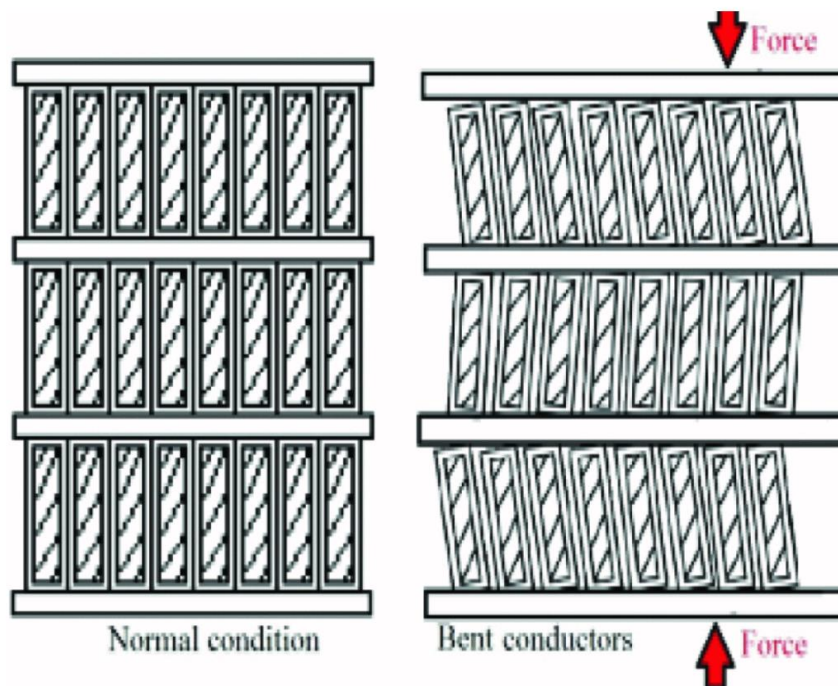
Međudjelovanjem struje i radijalne komponente rasipnog toka generiraju se aksijalne sile u namotima transformatora. Što je veća razlika u naponima između NN i VN namota, to je veća aksijalna sila, a to povećanje dovodi do sabijanja vodiča duž cijele sredine vertikalne namota. Također, još jedan razlog povećanja aksijalnih sila jest razlika između amper-zavoja visokonaponskog i niskonaponskog namota.

Aksijalna se sila može izračunati na idući način (39) (40):

$$F_a = B_r \times J_\varphi \quad (39)$$

$$B_r = \frac{4\pi}{10^4} \times \frac{A(NI)}{2h_{eff}} \quad (40)$$

gdje u prvoj jednadžbi B_r predstavlja radijalnu komponentu magnetske indukcije, J_φ gustoću struje u φ osi cilindričnog koordinatnog sustava, dok u drugom izrazu A predstavlja duljinu područja djelovanja sile i izražen je kao dio ukupne duljine namota. Parametar h_{eff} označava efektivnu duljinu silnica radijalnog toka te on varira za svako područje djelovanja. [6]



Slika 2.26 Utjecaj aksijalne sile na namote transformatora: normalan položaj vodiča (lijevo) i izvnuti vodiči (desno) [6]

2.3.3. Izračun elektromagnetskih sila pomoću MKE

U programskom sučelju MATLAB izračunata je struja kratkog spoja prema (41) [7] (Slika 2.27).

$$I_{ku1} = \sqrt{2} * k_u \frac{100}{u_{k\%}} * \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{n1}} \quad (41)$$

Udarna struja kratkog spoja je I_{ku1} , k_u predstavlja faktor opadanja istosmjerne komponente struje KS (42), $u_{k\%}$ je napon kratkog spoja izražen u postotnoj vrijednosti, S_n je prividna snaga transformatora, a U_{n1} je nazivni napon visokonaponske strane transformatora.

Faktor k_u je približno jednak (42), gdje je R otpor, a X reaktancija:

$$k_u = 1.02 + 0.98e^{-3\frac{R}{X}} \quad (42)$$

```
X_sigma = 34.2937;
```

```
R_VN = 0.1247;
```

```
k_u = 1.02 + 0.98*exp((-3)* (R_VN/X_sigma))
```

```
k_u = 1.9894
```

```
S_n = 250*10^6;
```

```
U_n1 = 240*10^3;
```

```
u_k_posto = 14.88;
```

```
I_ku1 = sqrt(2)*k_u*(100/u_k_posto)*(S_n/(sqrt(3)*U_n1))
```

```
I_ku1 = 1.1371e+04
```

```
I_ku_u_w = I_ku1/2
```

```
I_ku_u_w = 5.6855e+03
```

```
N1 = 461;
```

```
N2 = 85;
```

```
I_ku2 = I_ku1 * N1/N2
```

```
I_ku2 = 6.1670e+04
```

```
I_ku2_u_w = I_ku2/2
```

```
I_ku2_u_w = 3.0835e+04
```

Slika 2.27 Izračun udarne struje KS u programskom sučelju MATLAB

Nadalje, pomoću funkcije `MNsetCurrent`, zadane su struje kratkog spoja koje protječu kroz namote, a funkcijom `MNrunSimulationTransient` zadan je način provedbe simulacije – *static* (Slika 2.28).

```
MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'VN_U', -5685.5, 0)
MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'VN_V', 11371, 0)
MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'VN_W', -5685.5, 0)

MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'NN_U', -30835, 0)
MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'NN_V', 61670, 0)
MNsetCurrent(MagNet, 'ac', 'NN_W', -30835, 0)

MNrunSimulationTransient(MagNet, 'static', 1)
```

Slika 2.28 Zadavanje struja i postavke simulacije

Idući je korak bio dohvatiti podatke o mreži konačnih elemenata – *mesh*-u željenog namota. Koristila se funkcija `MNgetMesh` koja kao parametar prihvaća aplikaciju u kojoj se simulacija provodi (`MagNet`) te naziv namota (parametar *component*). Vraća matricu trokuta DT , te matrice koordinata pripadajućih vrhova trokuta x i y (Slika 2.29).

```
function [DT, x, y] = MNgetMesh (MagNet, component)
```

```
x_VN1 = [];
y_VN1 = [];
DT_VN1 = [];
[DT_VN1, x_VN1, y_VN1] = MNgetMesh (MagNet, 'VN_1');
```

Slika 2.29 Dohvaćanje *mesh*-a za namot VN_1

Pomoću spomenutih matrica određuju se koordinate težišta svakog trokuta (43) i (44) te njegova površina (45):

$$x_c = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \quad (43)$$

$$y_c = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \quad (44)$$

$$A = \frac{1}{2} |x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)| \quad (45)$$

```
figure
triplot(DT_VN1, x_VN1, y_VN1)
```

Slika 2.30 Crtanje *mesh*-a

Grafički prikaz *mesh*-a može se dobiti crtanjem namota pomoću MATLAB funkcije `triplot` (Slika 2.30).

Nakon provedenih računica, bilo je potrebno dobiti *JxB* *x* komponentu te *JxB* *y* komponentu polja svakog namota funkcijom `MNgetField` (Slika 2.31).

```
function [xComponent,yComponent]=
MNgetField(MagNet,fieldName,component,timeVector)
```

Kao parametri zadaju se ime aplikacije (*MagNet*), naziv polja koje je potrebno dohvatiti (*fieldName*), naziv komponente čija se polje dohvaća (*component*) te *timeVector* koji označava za koji se trenutak simulacije dohvaća vrijednost polja.

```
[x_fieldx_VN1,y_fieldx_VN1]=MNgetField(MagNet,'JxB x','VN_1',0);
[x_fielddy_VN1,y_fielddy_VN1]=MNgetField(MagNet,'JxB y','VN_1',0);
```

Slika 2.31 Dobavljanje *JxB* polja za VN_1 namot iz programskog sučelja *MagNet*

Kako bi se provjerila točnost dohvaćenih podataka, koristila se funkcija `plot1dField` koja crta vrijednost polja u određenom dijelu namota ili u cijelom namotu (Slika 2.32).

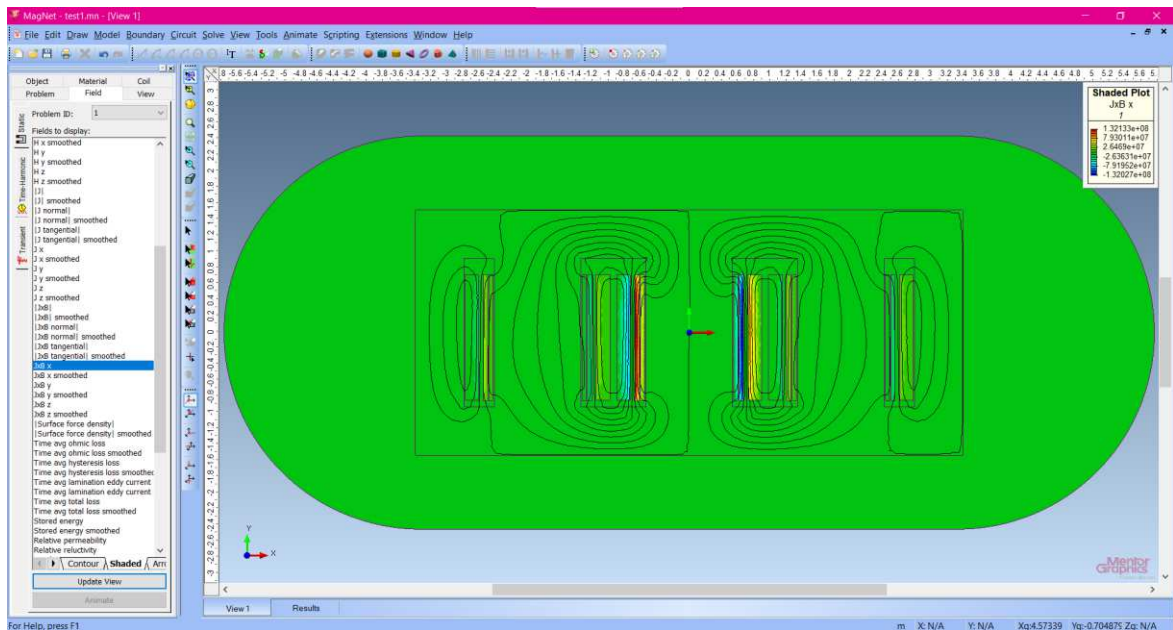
```
function plot1dField(DT, x, y, B)
```

Funkcija za crtanje koristi dane matrice trokutića DT , koordinata vrhova trokuta x i y te matricu vrijednosti polja B .

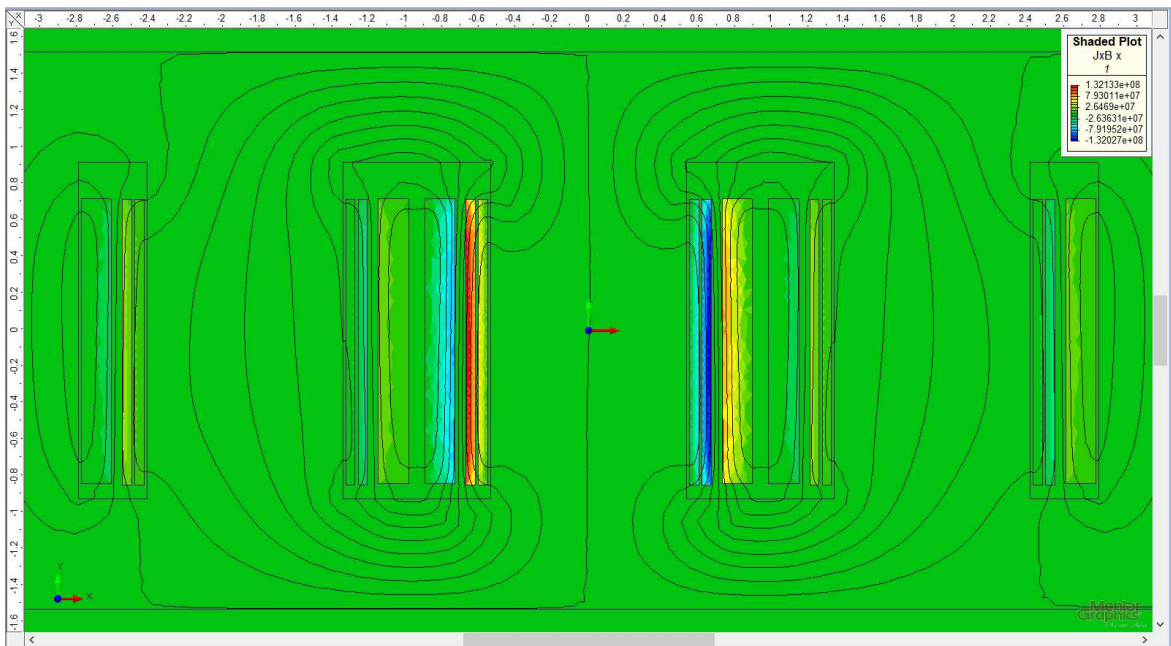
```
figure
plot1dField(DT_VN1, x_VN1, y_VN1, polje);
```

Slika 2.32 Crtanje vrijednosti JxB polja VN_1 namota

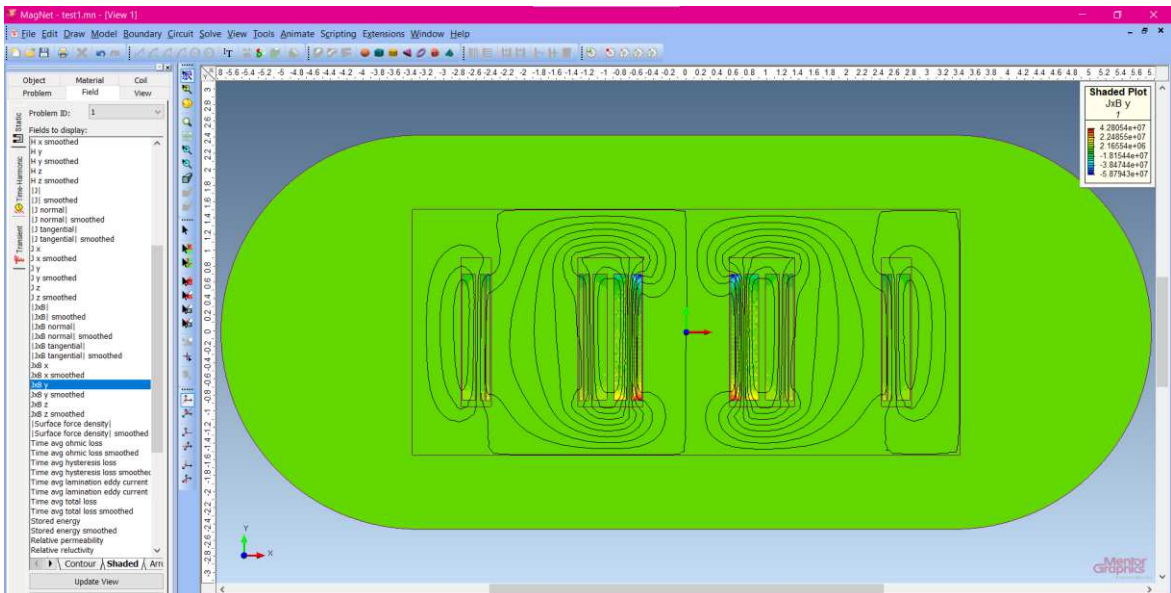
U nastavku je dan prikaz JxB x komponente i JxB y komponente polja u transformatoru simuliranog u programskom sučelju MagNet (Slika 2.33, Slika 2.34, Slika 2.35, Slika 2.36).



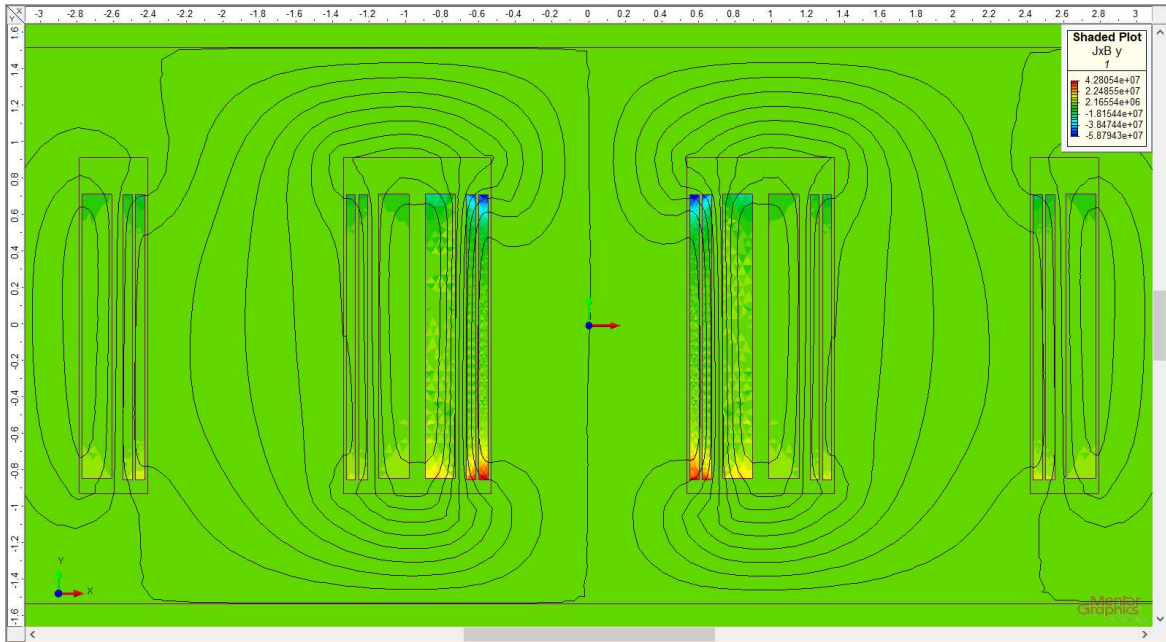
Slika 2.33 JxB x komponenta polja



Slika 2.34 JxB x komponenta polja – detalj



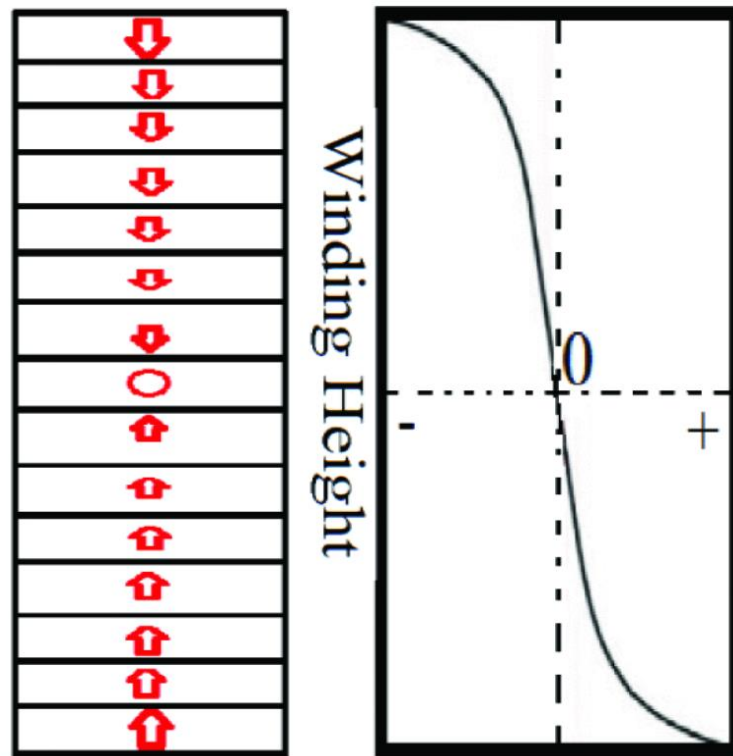
Slika 2.35 JxB y komponenta polja



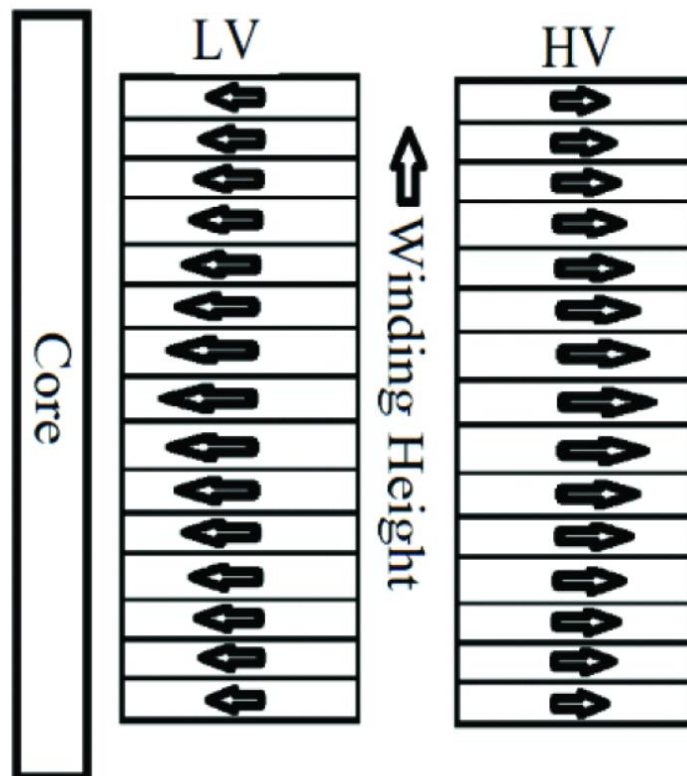
Slika 2.36 JxB y komponenta polja – detalj

Idući je korak bio podijeliti namot na N aksijalnih regija (odabrano je 20). Pronađeni su trokutići koji pripadaju svakoj aksijalnoj regiji pomoću izračunatih težišta te su dohvaćene pripadajuće vrijednosti polja. Integracijom JxB polja [N/m^3] po površini dobiveno je naprezanje [N/m^2]. Ukupna sila u smjeru x , odnosno y za aksijalnu regiju dobivena je integracijom naprezanja preko površine aksijalne regije. Ta je sila podijeljena s aksijalnom duljinom jedne aksijalne regije (visina namota/ N), a rezultat toga je sila po duljini [N/m] za svaku od aksijalnih regija. Integracijom, odnosno sumacijom tih sila po visini namota u N točaka dobivaju se kumulativne sile za svaki namot [6].

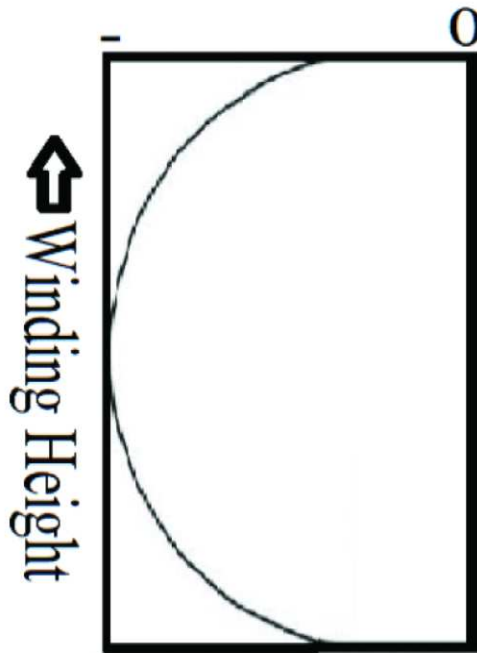
Naredne slike prikazuju referentnu raspodjelu aksijalnih i radijalnih sila uzduž namota transformatora te grafički prikaz kumulativnih sila u ovisnosti o visini transformatora (Slika 2.37, Slika 2.38, Slika 2.39, Slika 2.40).



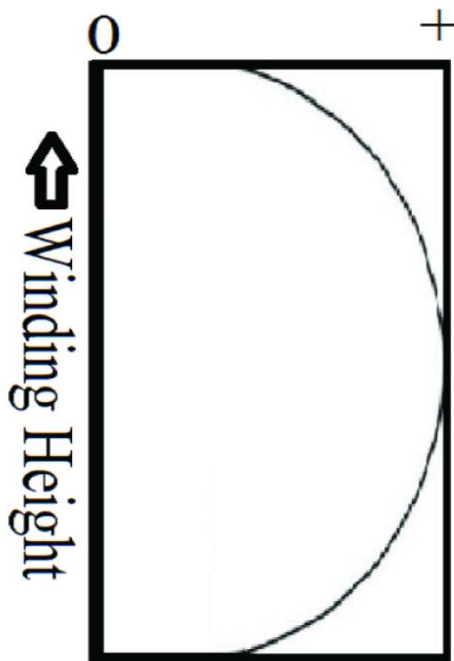
Slika 2.37 Raspodjela po aksijalnim regijama i usmjerenje aksijalne sile uzduž visine namota [6]



Slika 2.38 Usmjerenje i jačina radialne sile uzduž visine namota transformatora [6]



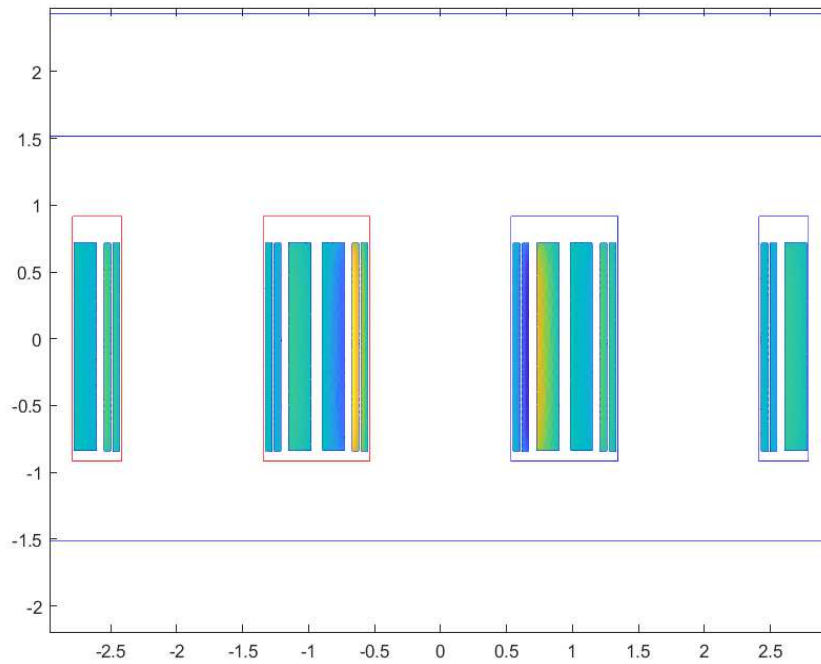
Slika 2.39 Raspodjela radijalne sile po aksijalnim regijama uzduž NN namota [6]



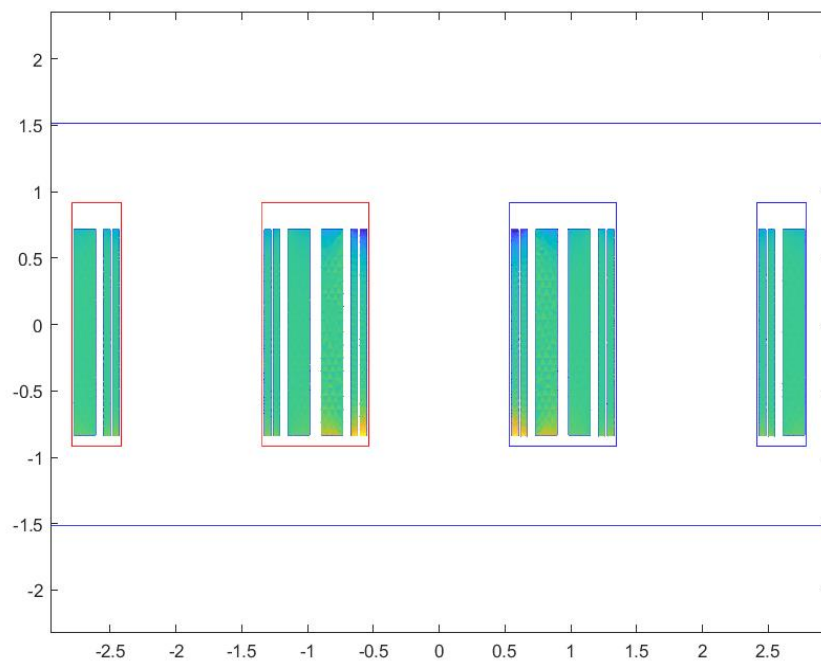
Slika 2.40 Slika 2.39 Raspodjela radijalne sile po aksijalnim regijama uzduž VN namota [6]

U nastavku je dan grafički i tablični prikaz rezultata simulacije, odnosno sila u ovisnosti o aksijalnim sekcijama te visini namota, s pripadajućim *mesh*-om namota te $J \times B$ poljem u namotu.

Grafički prikaz rezultata simulacije po namotima – radijalne i aksijalne sile

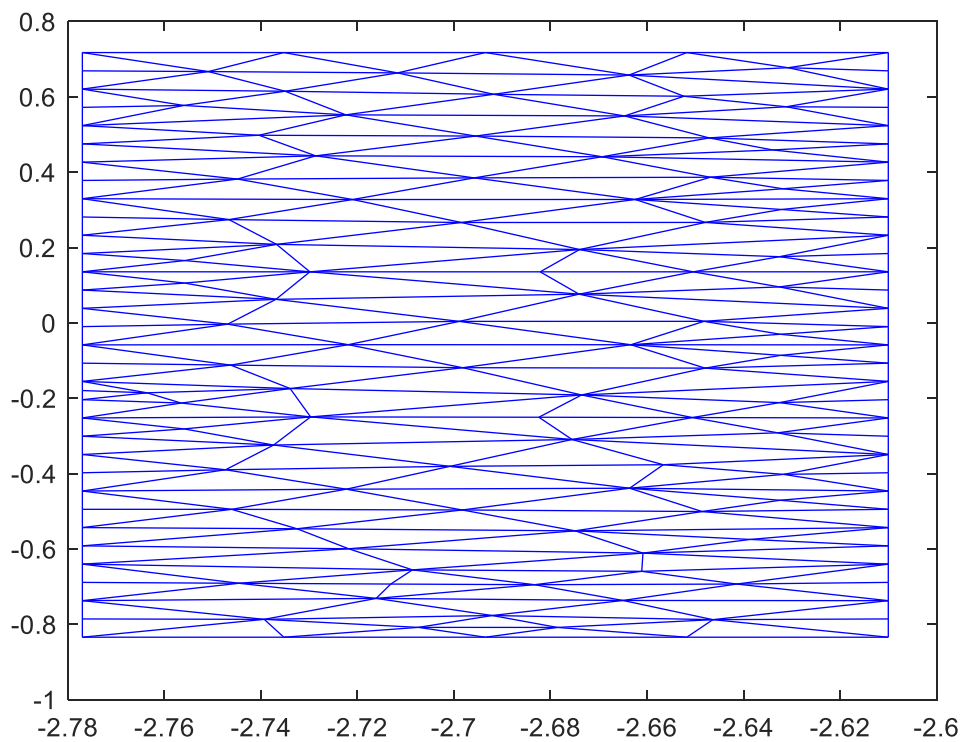


Slika 2.41 Raspodjela JxB x komponente polja u namotima transformatora – MATLAB

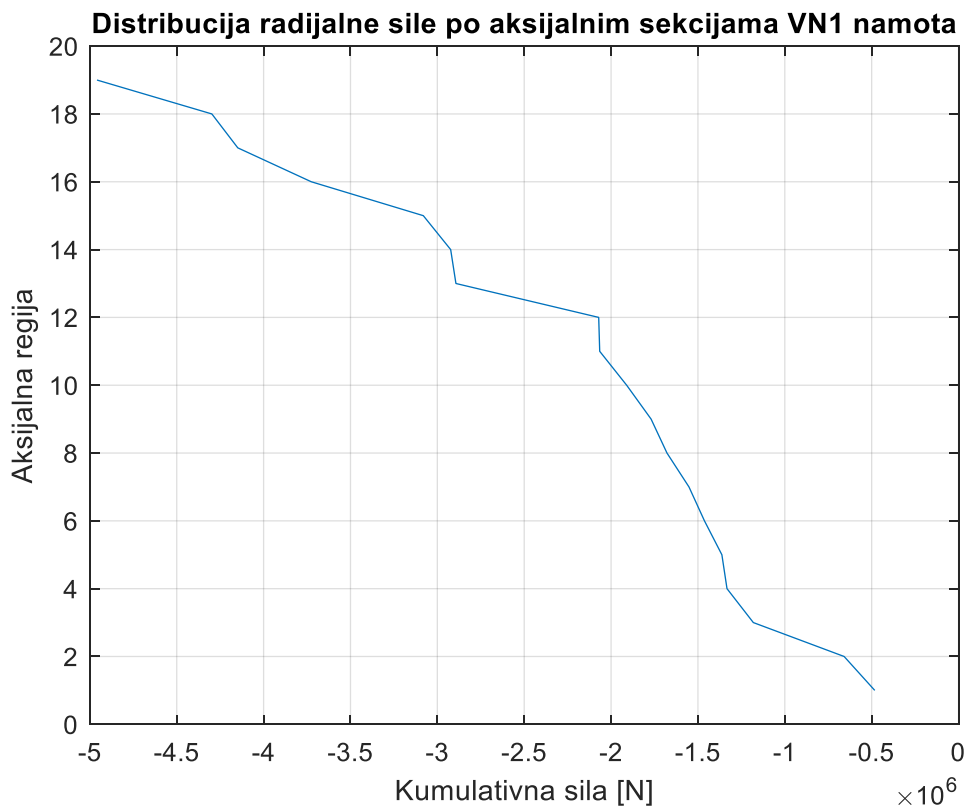


Slika 2.42 Raspodjela JxB y komponente polja u namotima transformatora – MATLAB

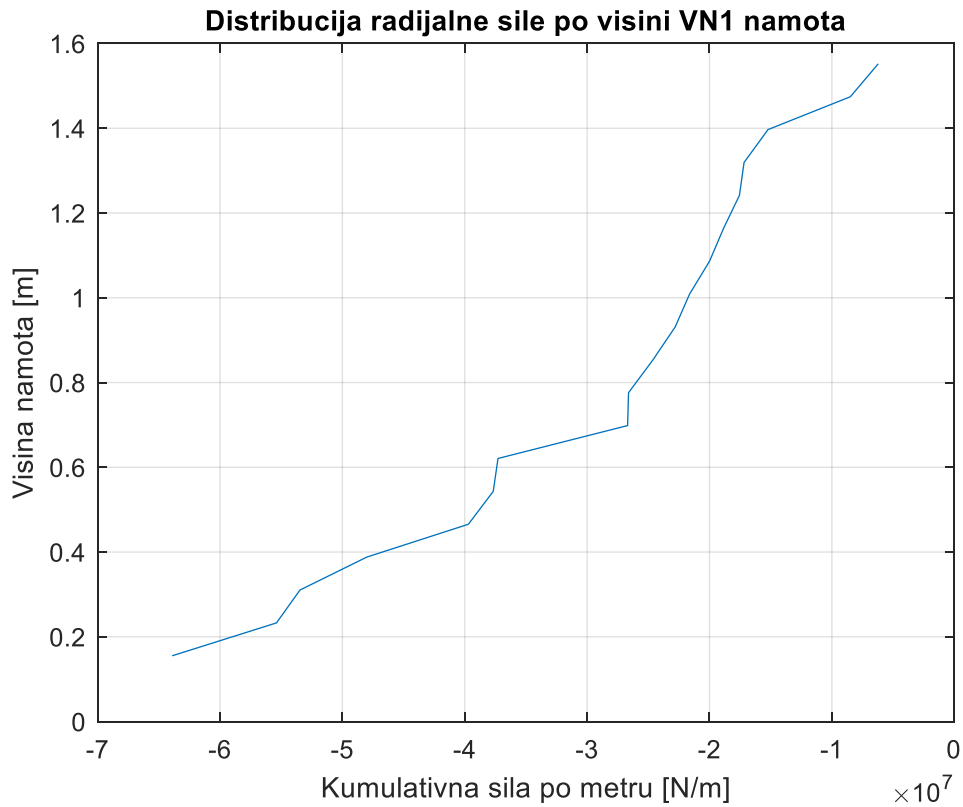
Usporede li se slike 2.41 i 2.42 sa slikama 2.34 i 2.36, može se lako uočiti kako su raspodjele polja u namotima jednake te da je iščitavanje podataka točno izvedeno (Slika 2.41, Slika 2.42, Slika 2.34, Slika 2.36).



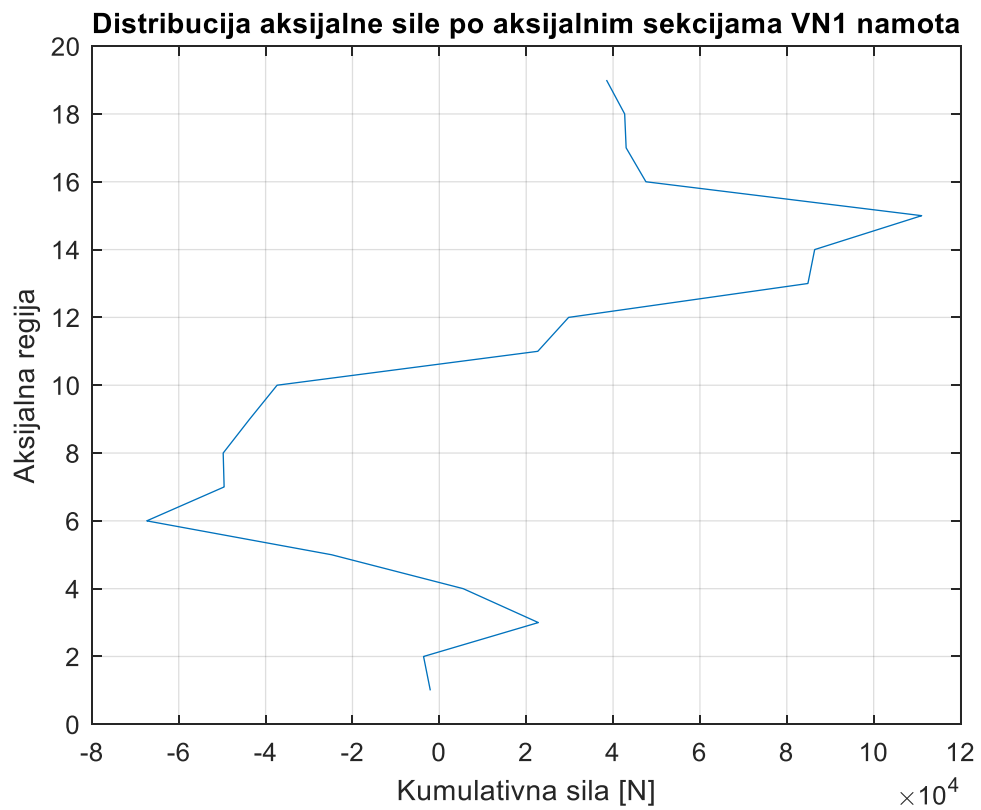
Slika 2.43 Mesh VN_1 namota



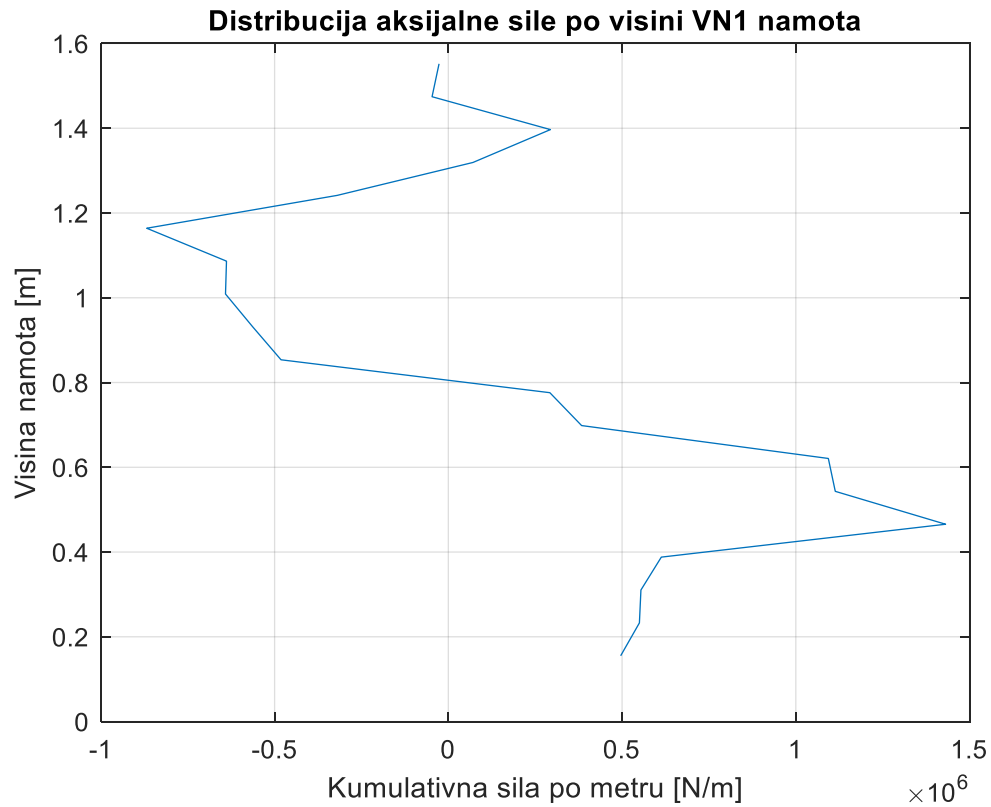
Slika 2.44 Raspodjela kumulativne radialne sile po aksijalnim regijama za VN_1 namot



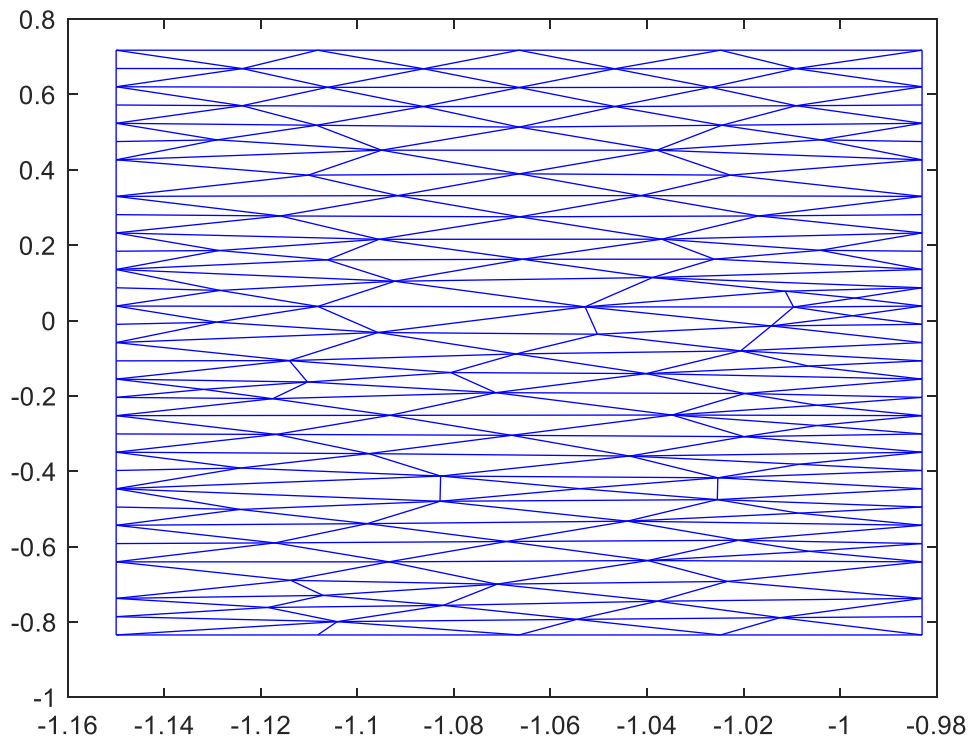
Slika 2.45 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_1 namot



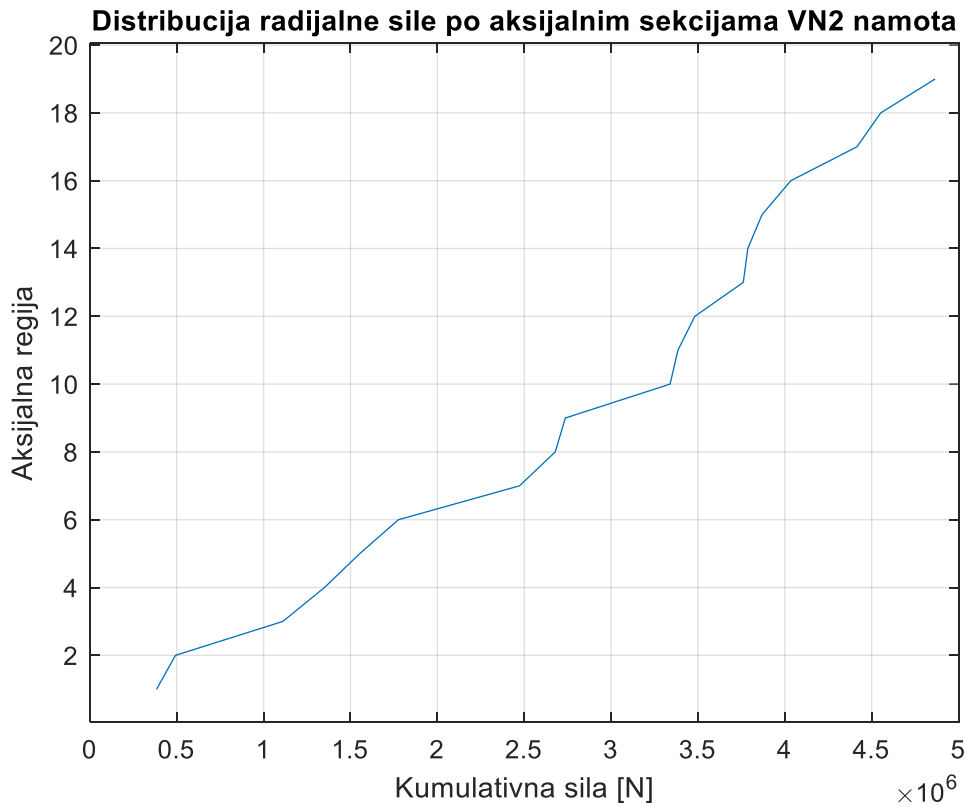
Slika 2.46 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za VN_1 namot



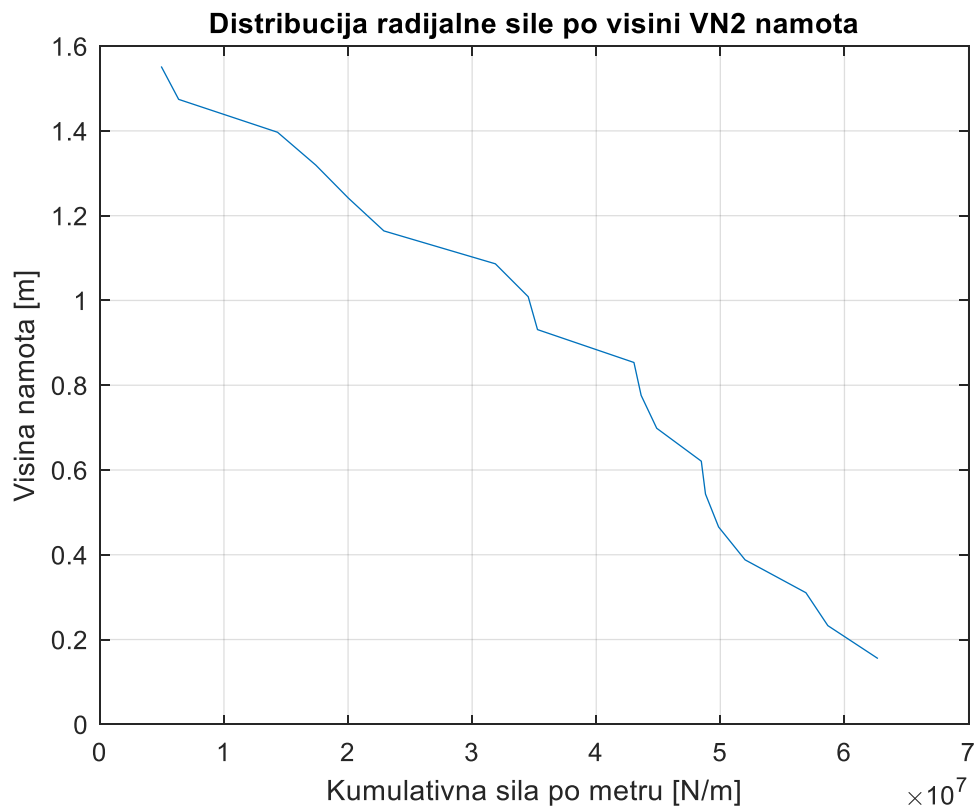
Slika 2.47 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_1 namot



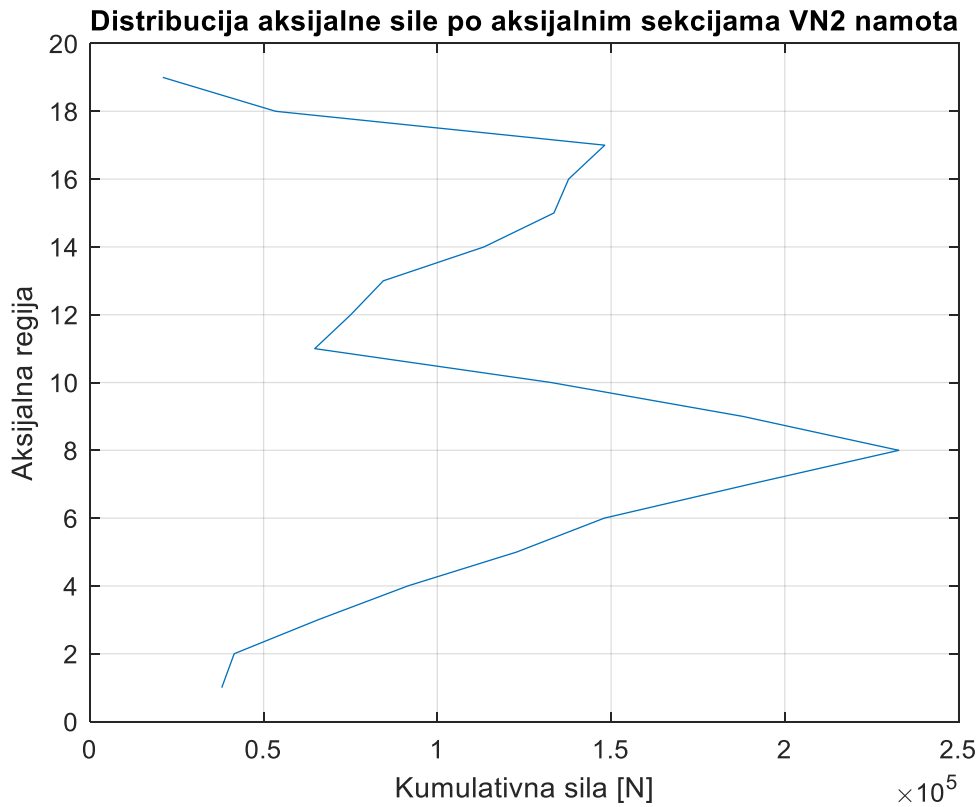
Slika 2.48 Mesh VN2 namota



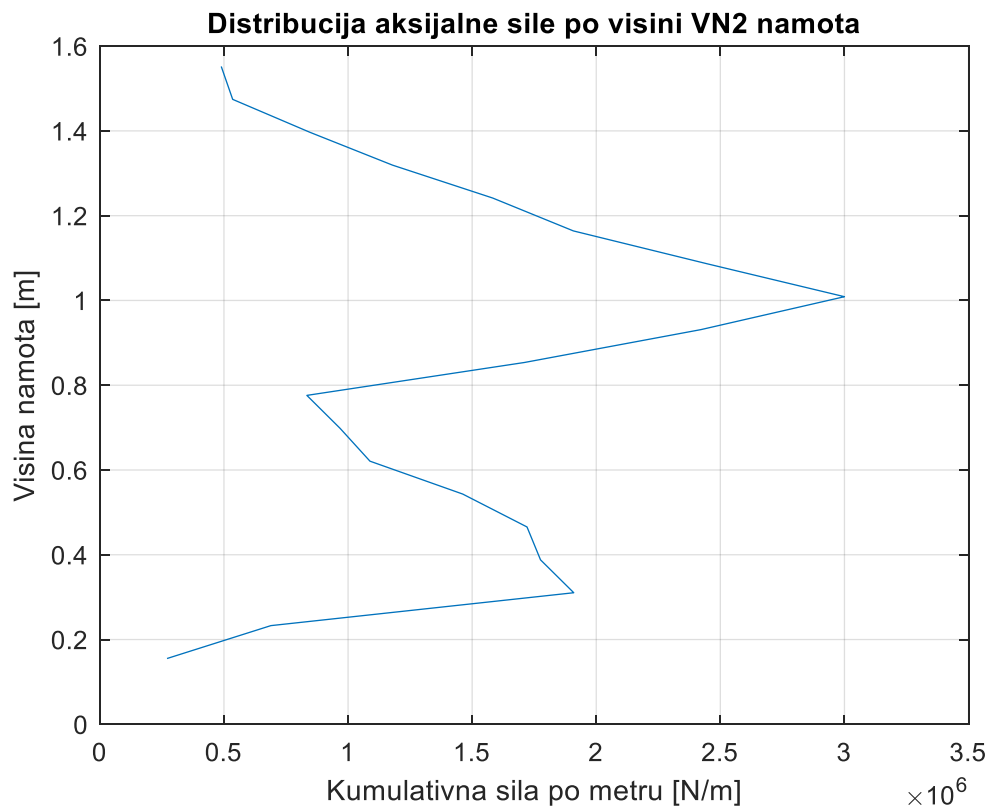
Slika 2.49 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za VN_2 namot



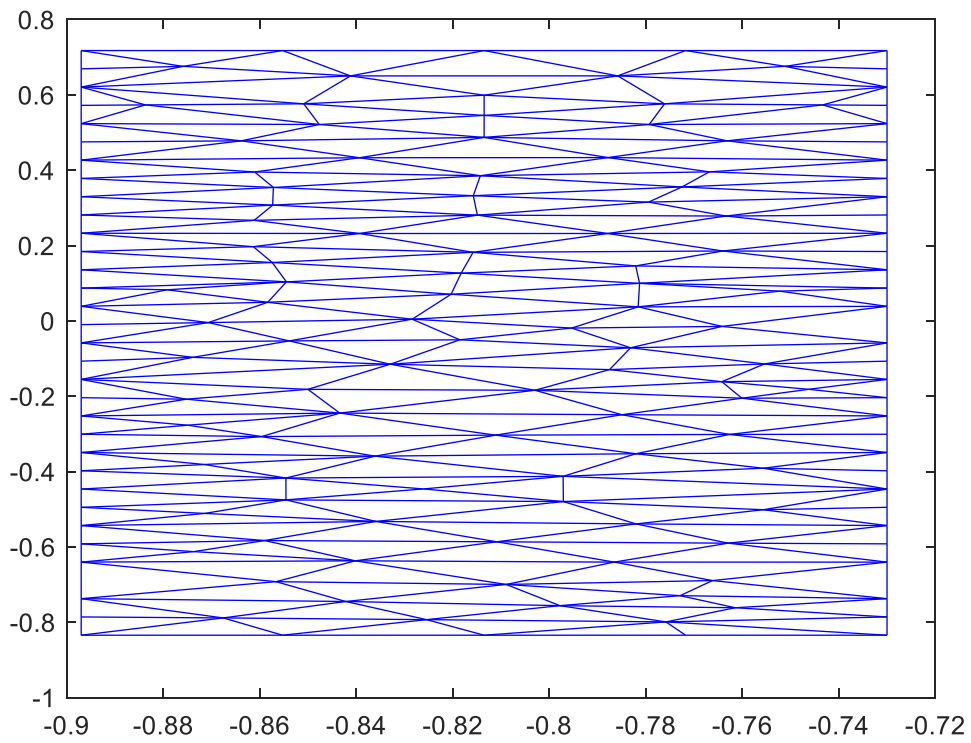
Slika 2.50 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_2 namot



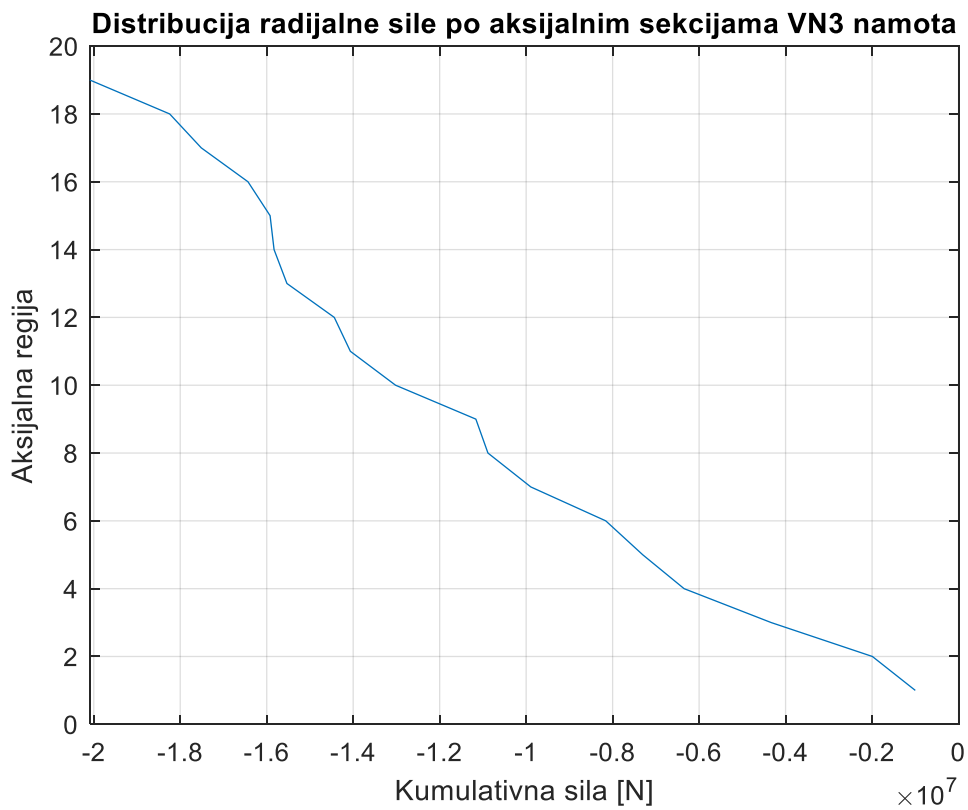
Slika 2.51 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za VN_2 namot



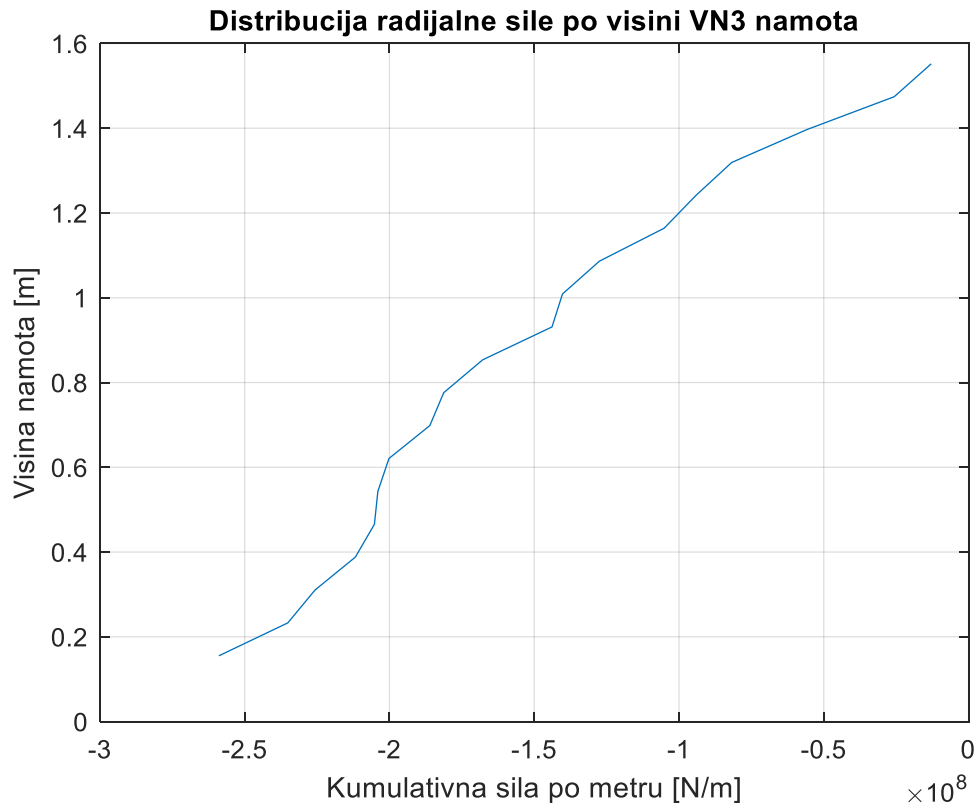
Slika 2.52 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_2 namot



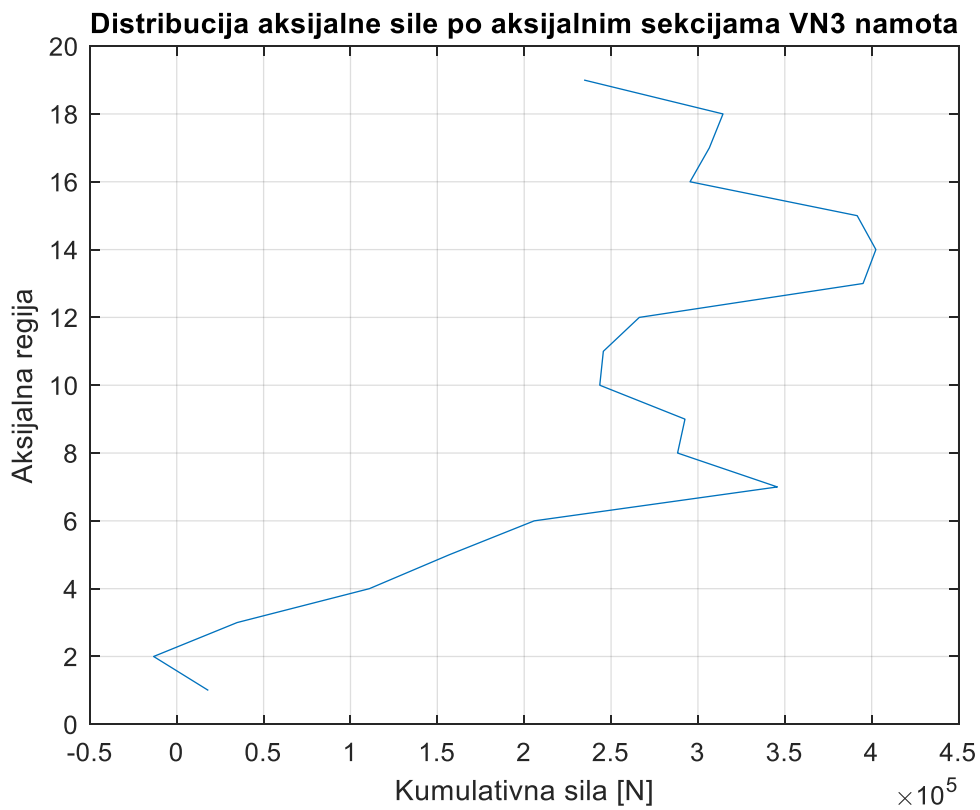
Slika 2.53 Mesh VN3 namota



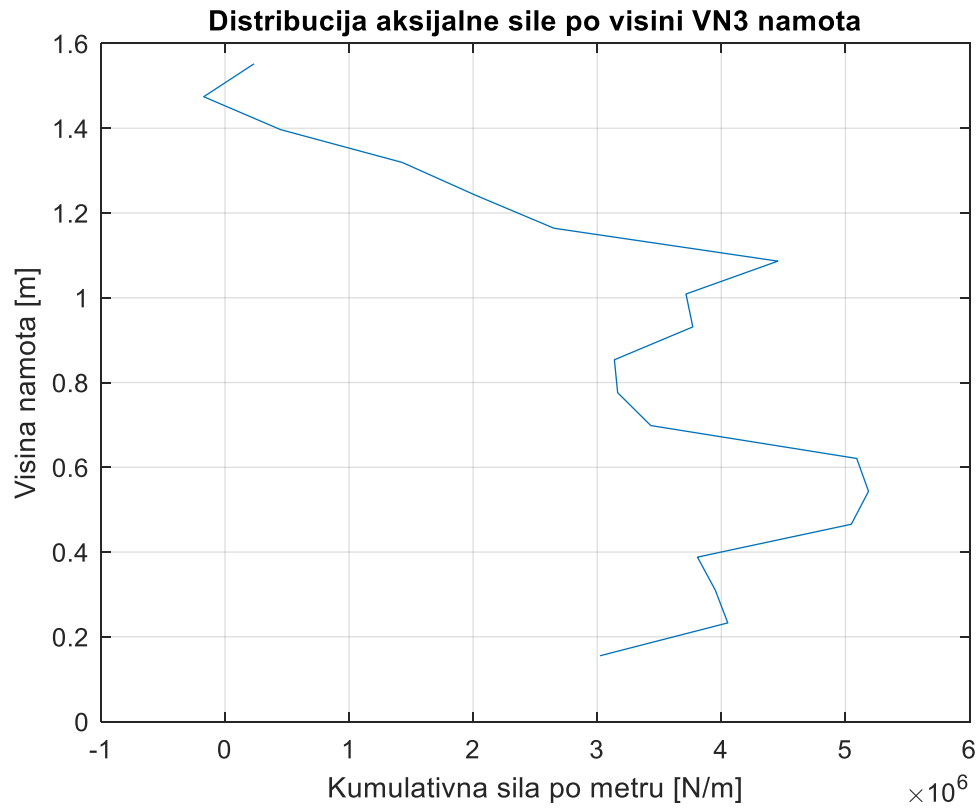
Slika 2.54 Raspodjela kumulativne radialne sile po aksijalnim regijama za VN_3 namot



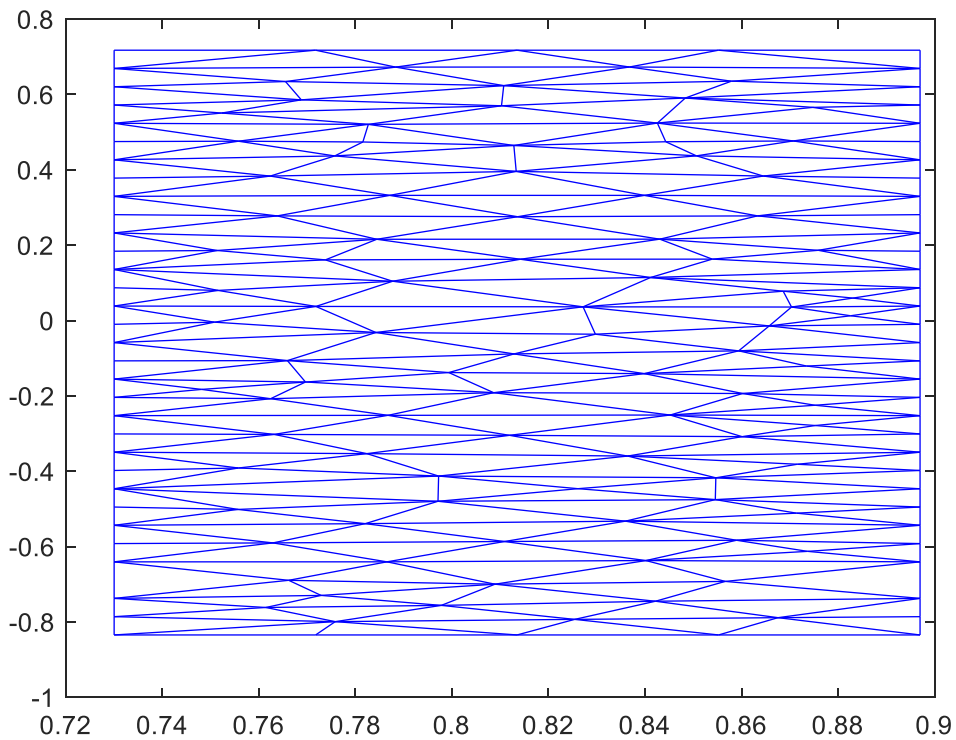
Slika 2.55 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_3 namot



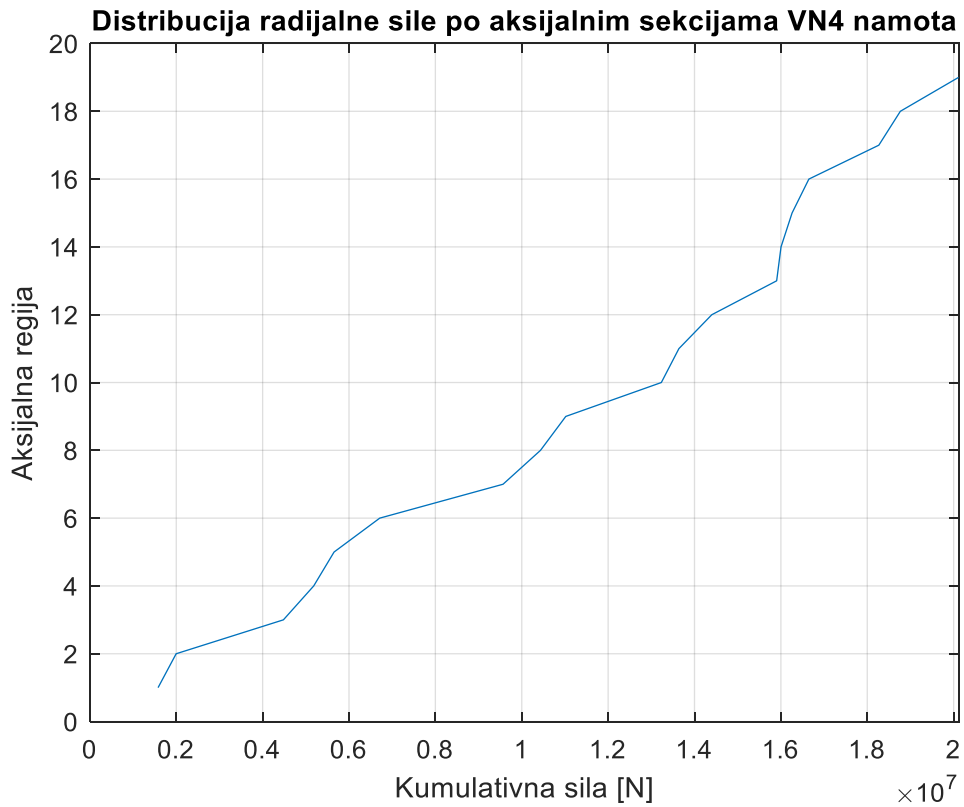
Slika 2.56 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za VN_3 namot



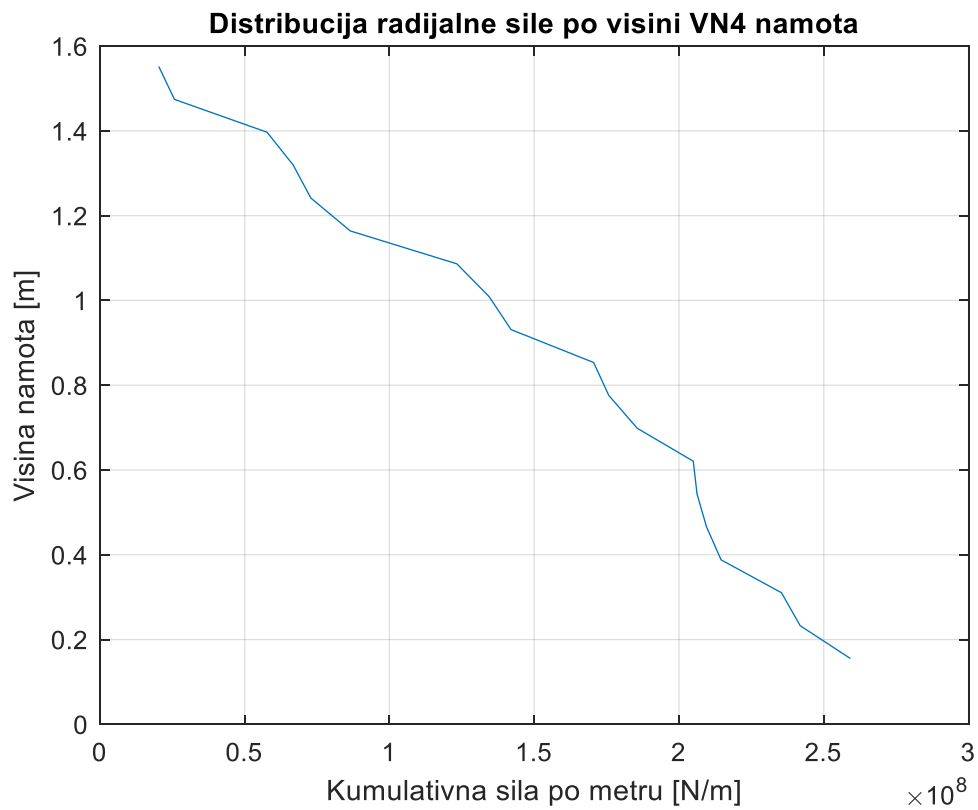
Slika 2.57 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_3 namot



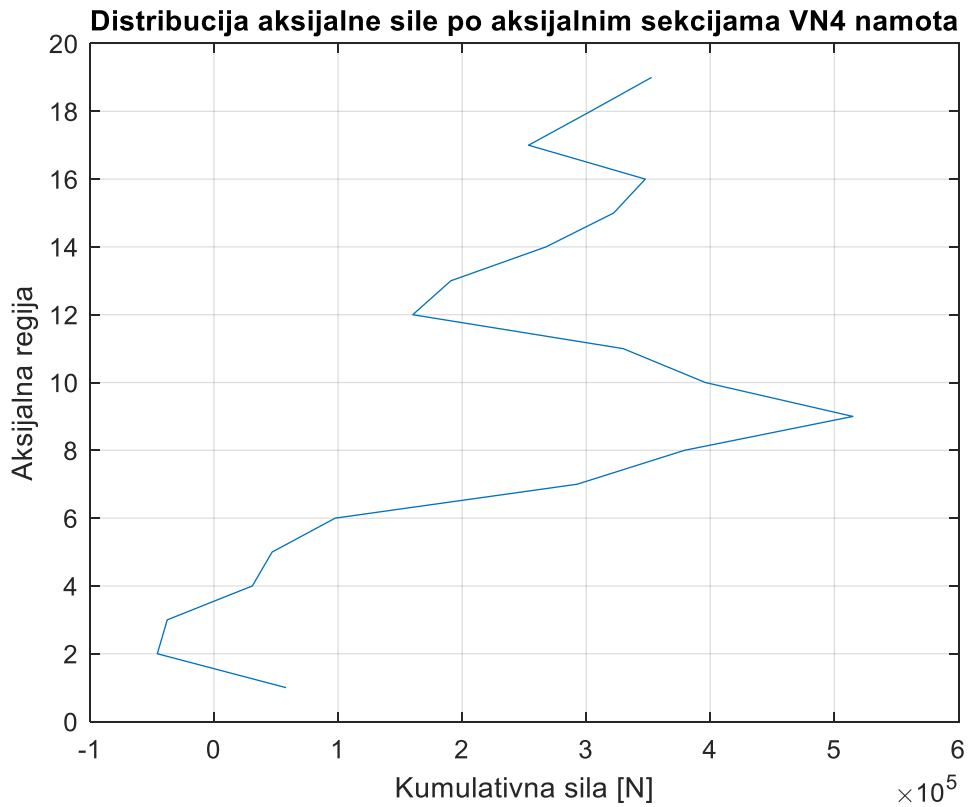
Slika 2.58 Mesh VN4 namota



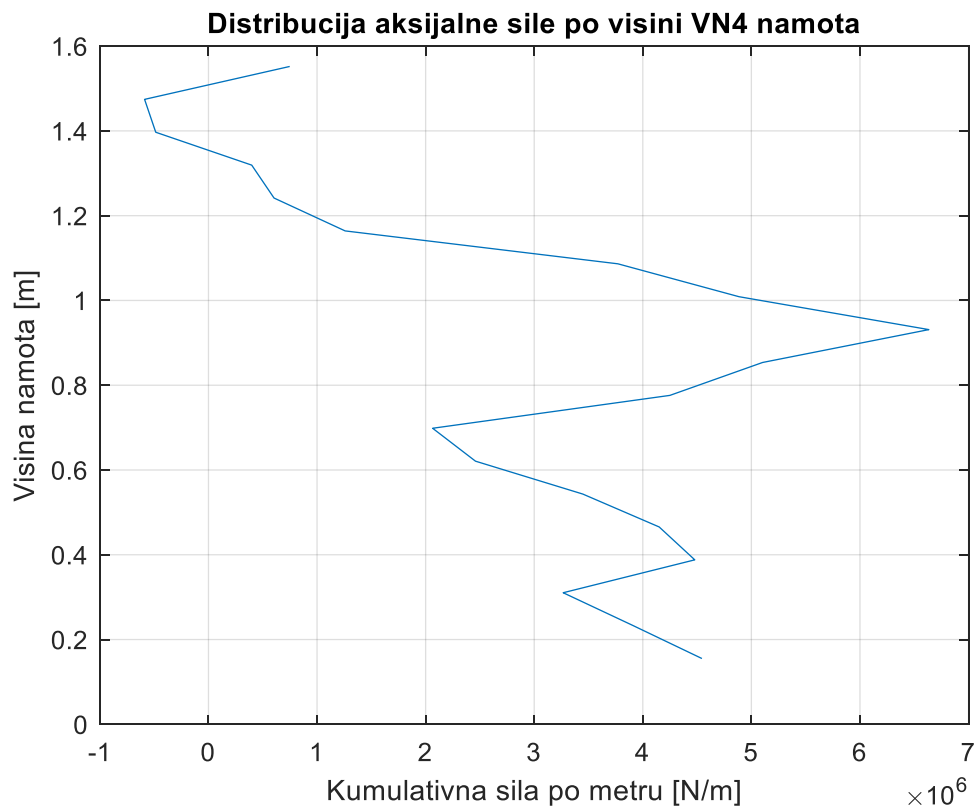
Slika 2.59 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za VN_4 namot



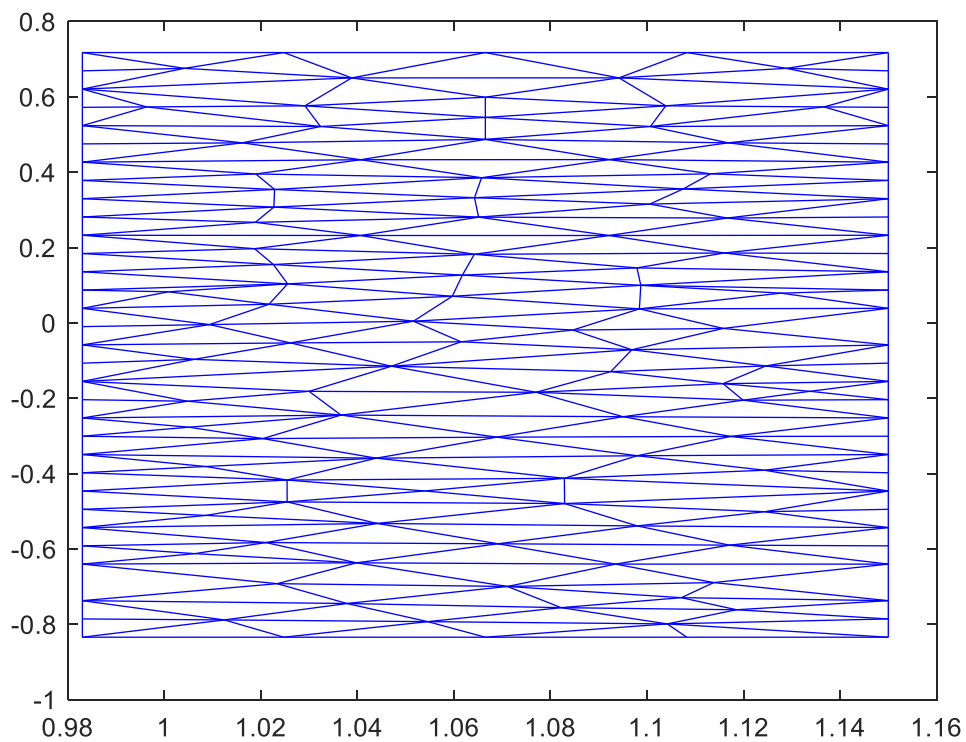
Slika 2.60 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_4 namot



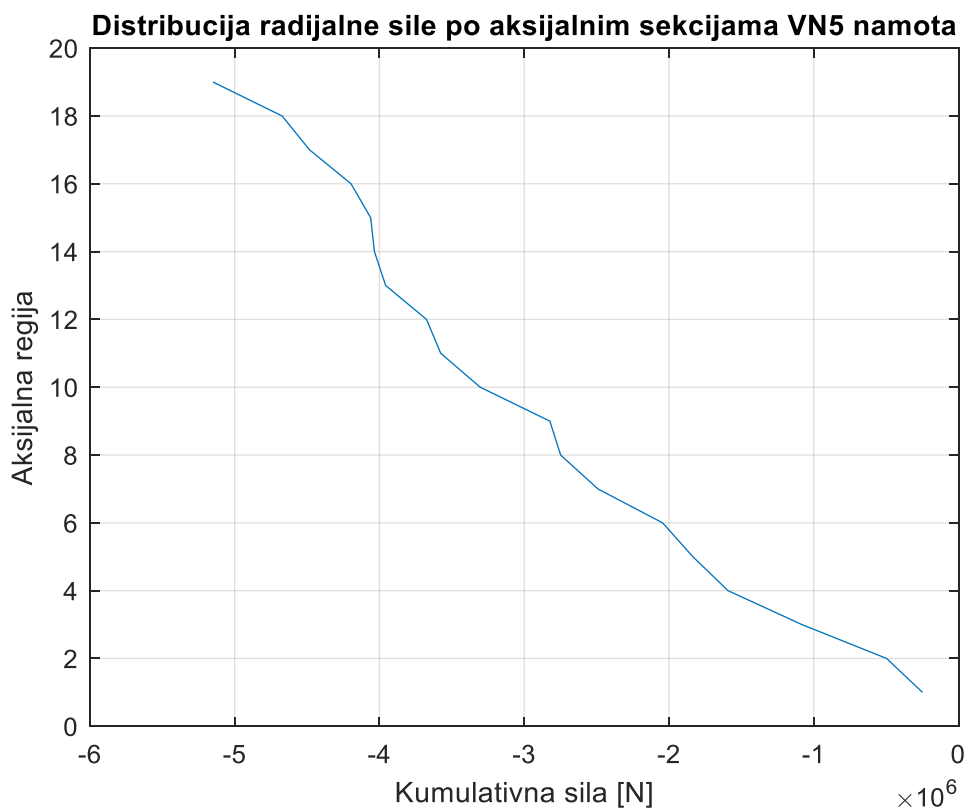
Slika 2.61 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za VN_4 namot



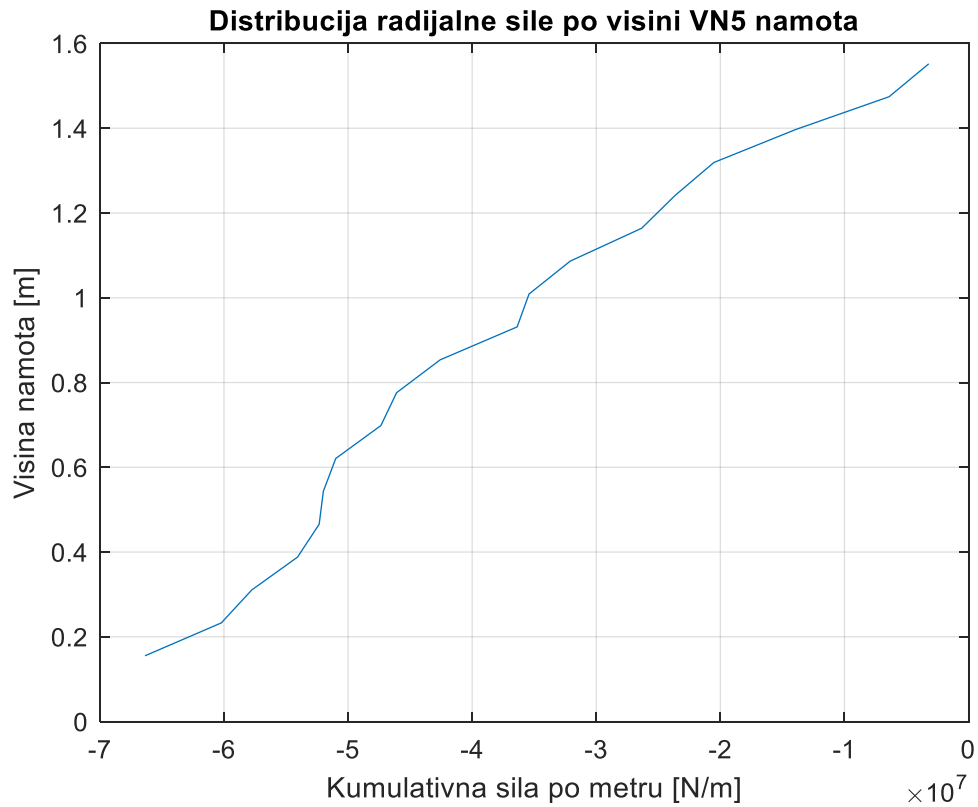
Slika 2.62 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_4 namot



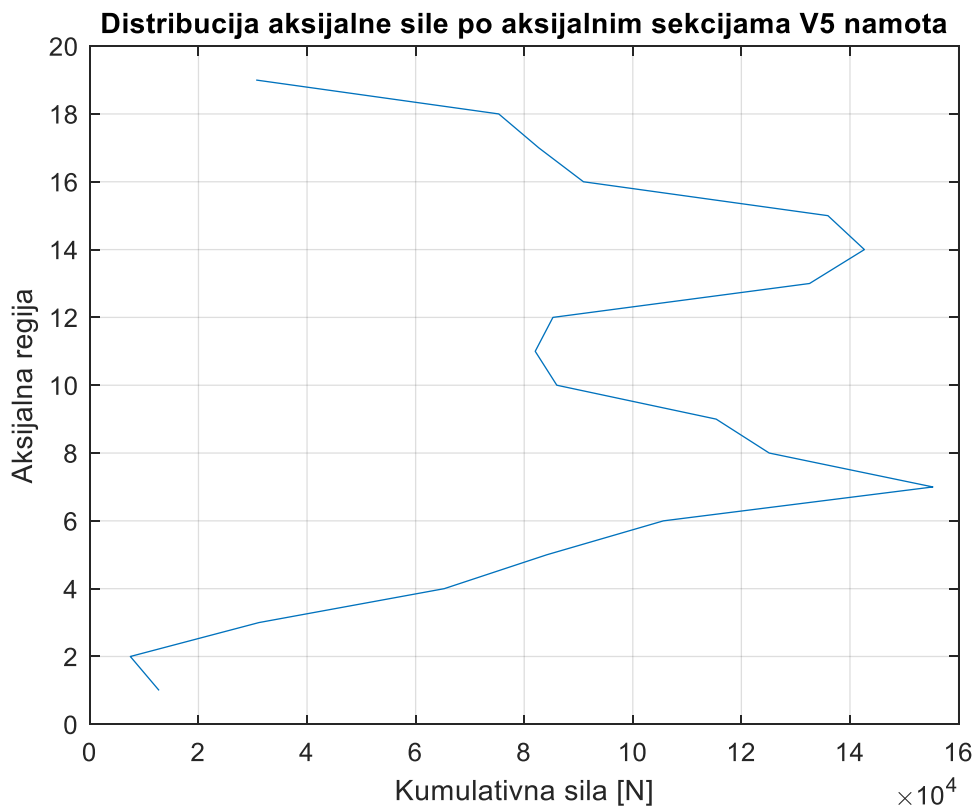
Slika 2.63 Mesh VN5 namota



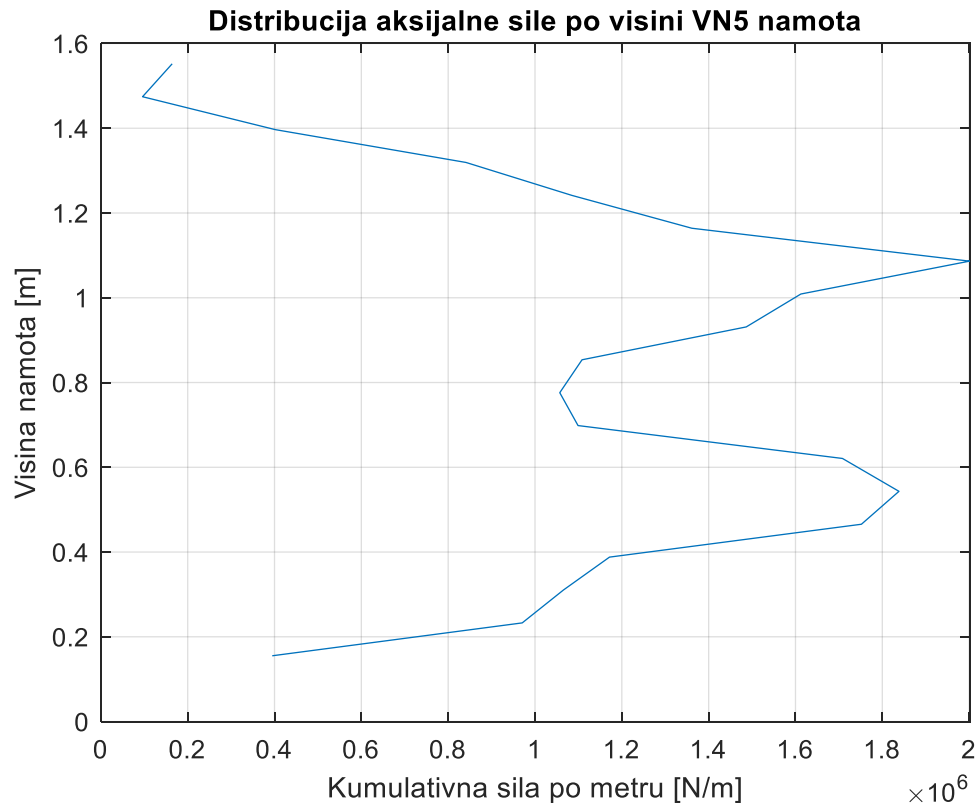
Slika 2.64 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za VN_5 namot



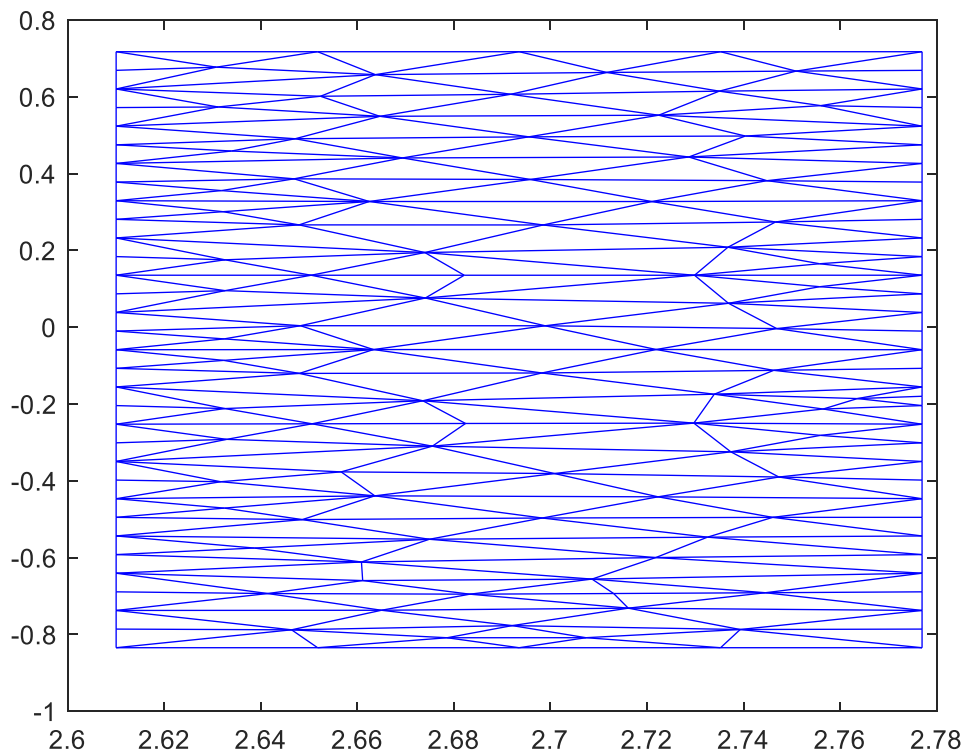
Slika 2.65 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_5 namot



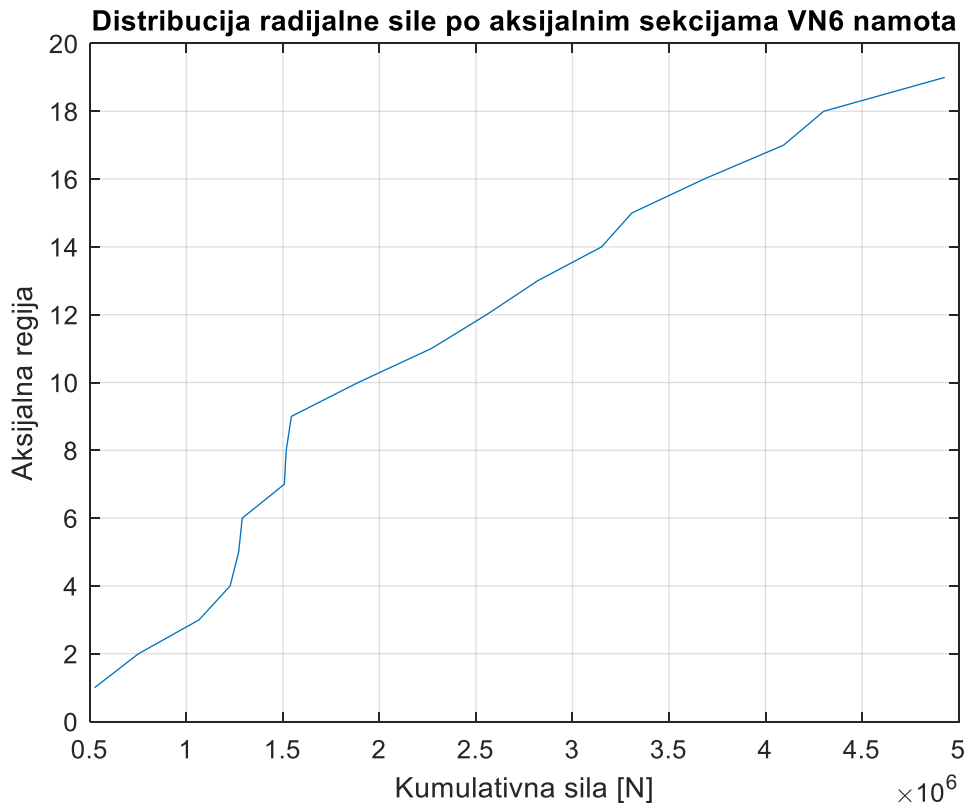
Slika 2.66 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za VN_5 namot



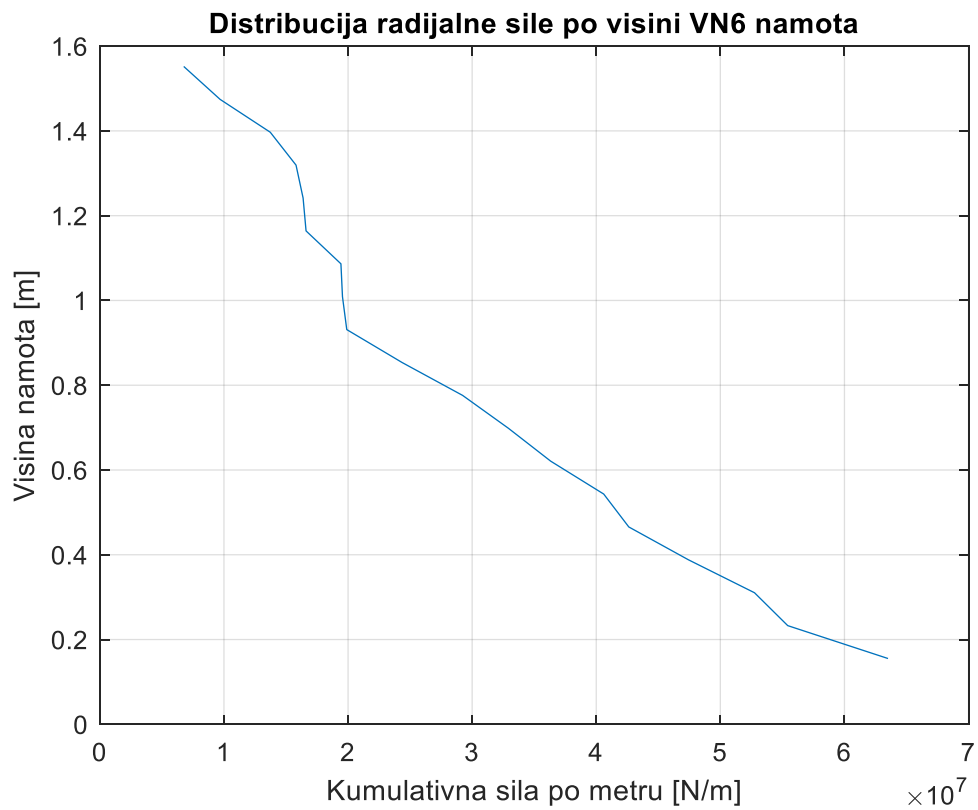
Slika 2.67 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_5 namot



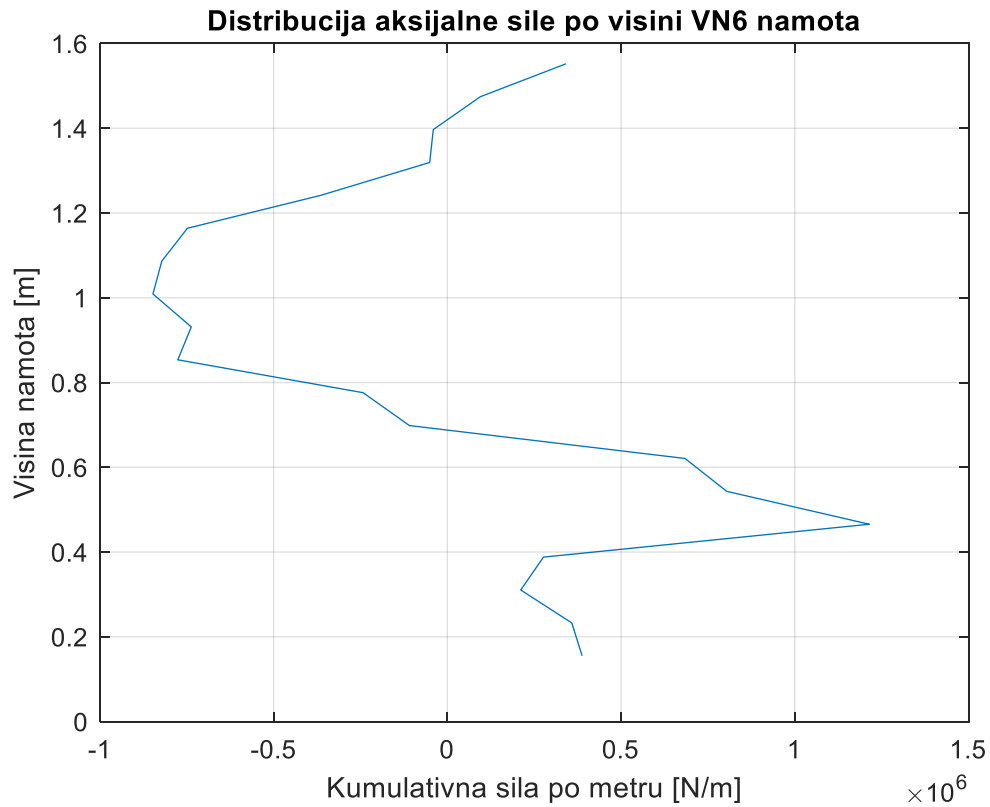
Slika 2.68 Mesh VN6 namota



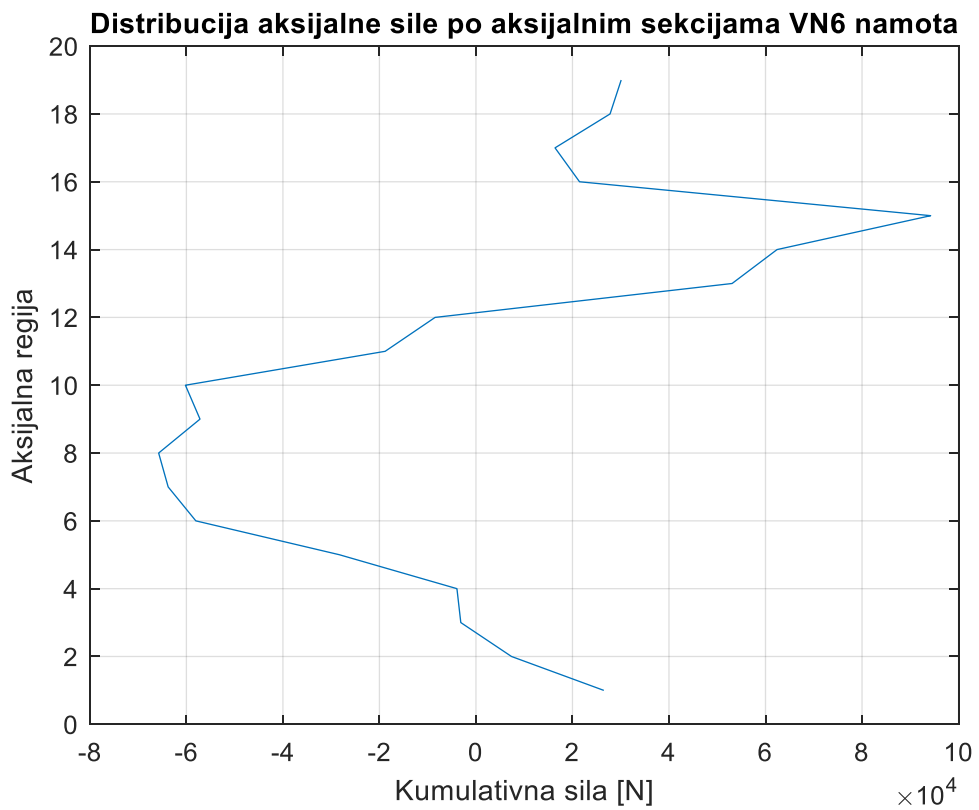
Slika 2.69 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za VN_6 namot



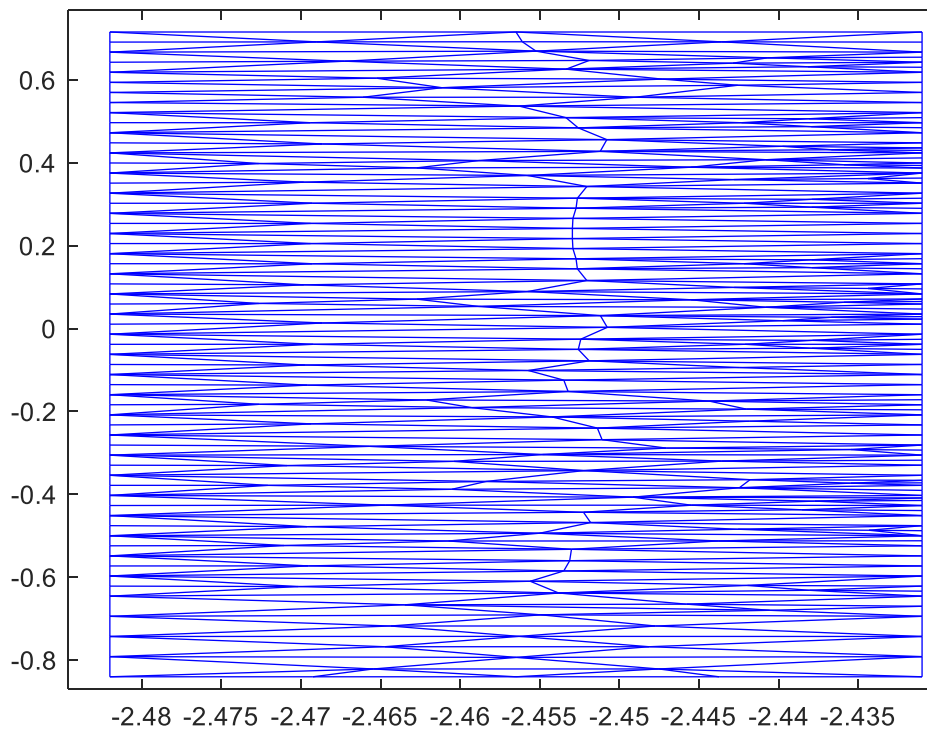
Slika 2.70 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_6 namot



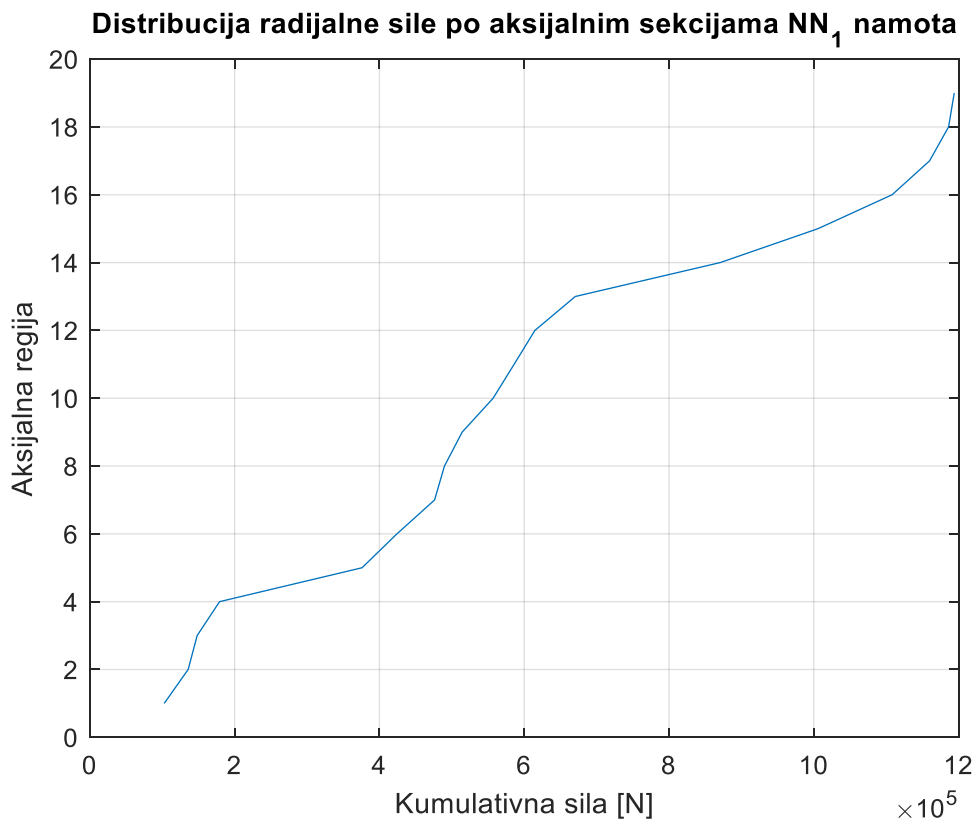
Slika 2.71 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za VN_6 namot



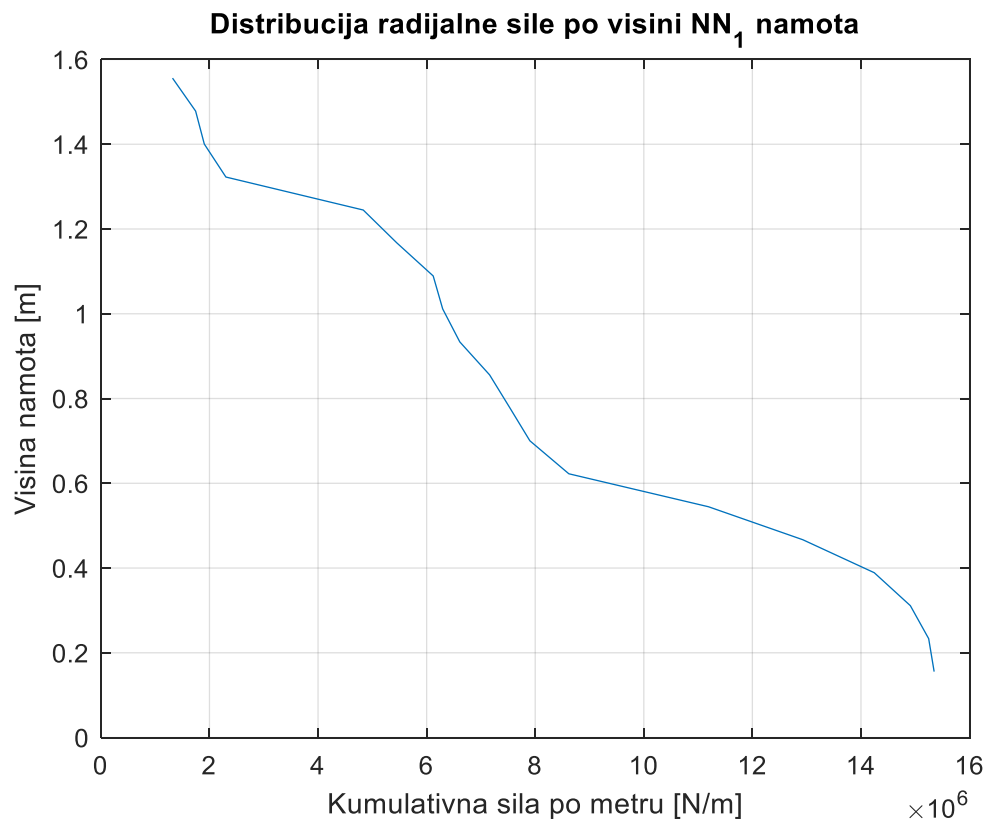
Slika 2.72 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za VN_6 namot



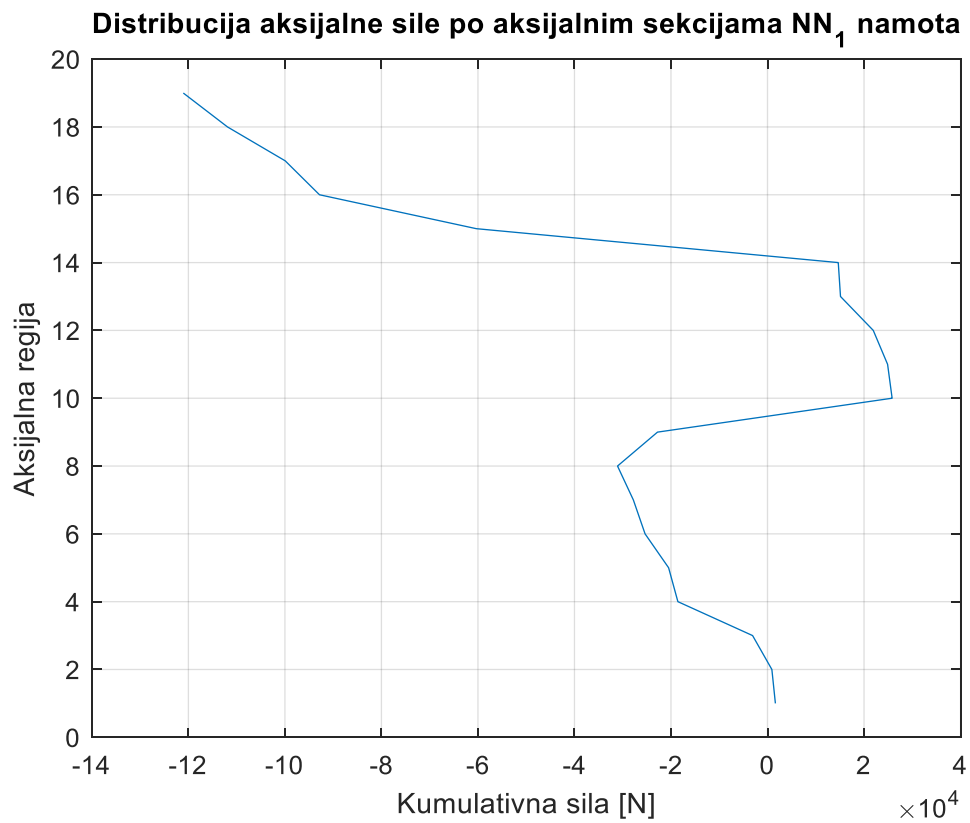
Slika 2.73 Mesh NN_1 namota



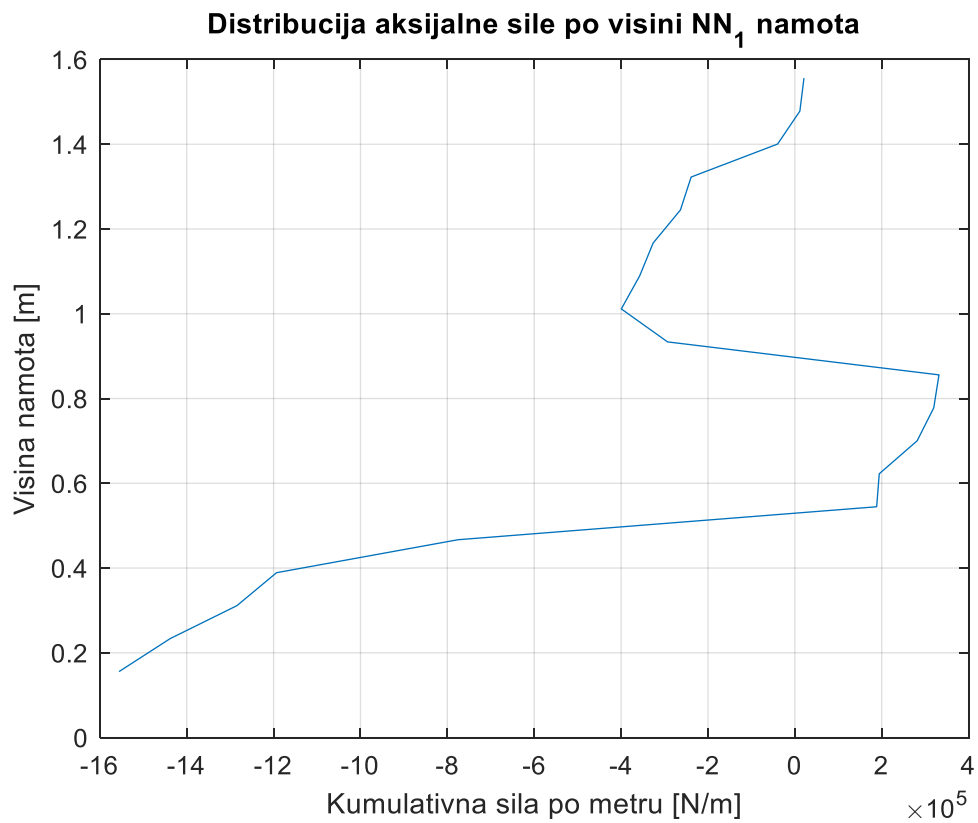
Slika 2.74 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN₁ namot



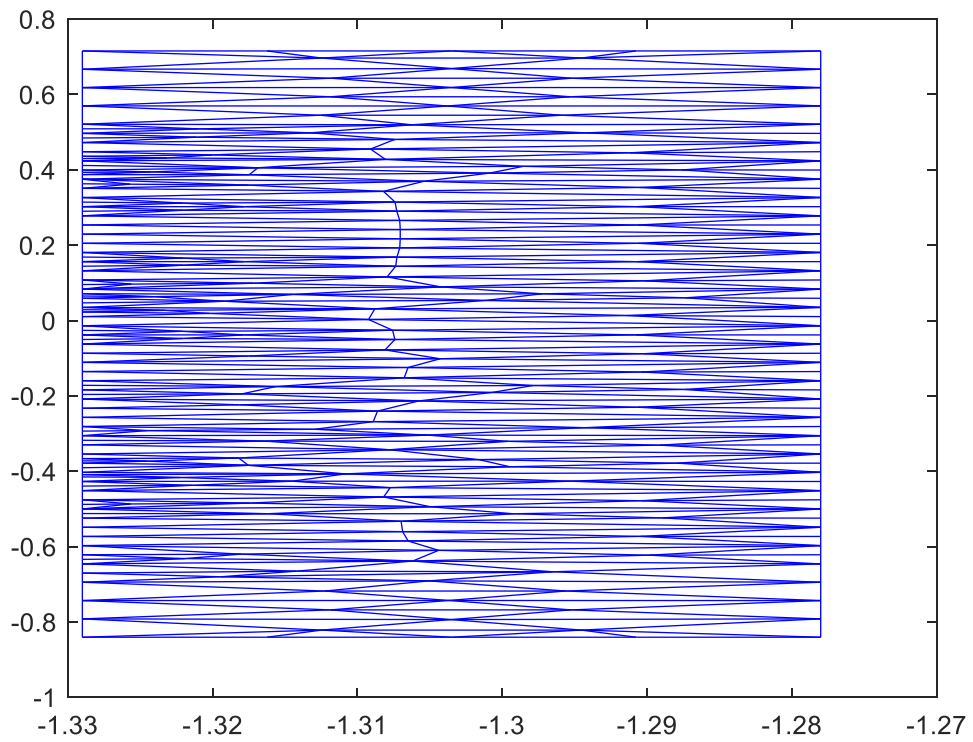
Slika 2.75 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₁ namot



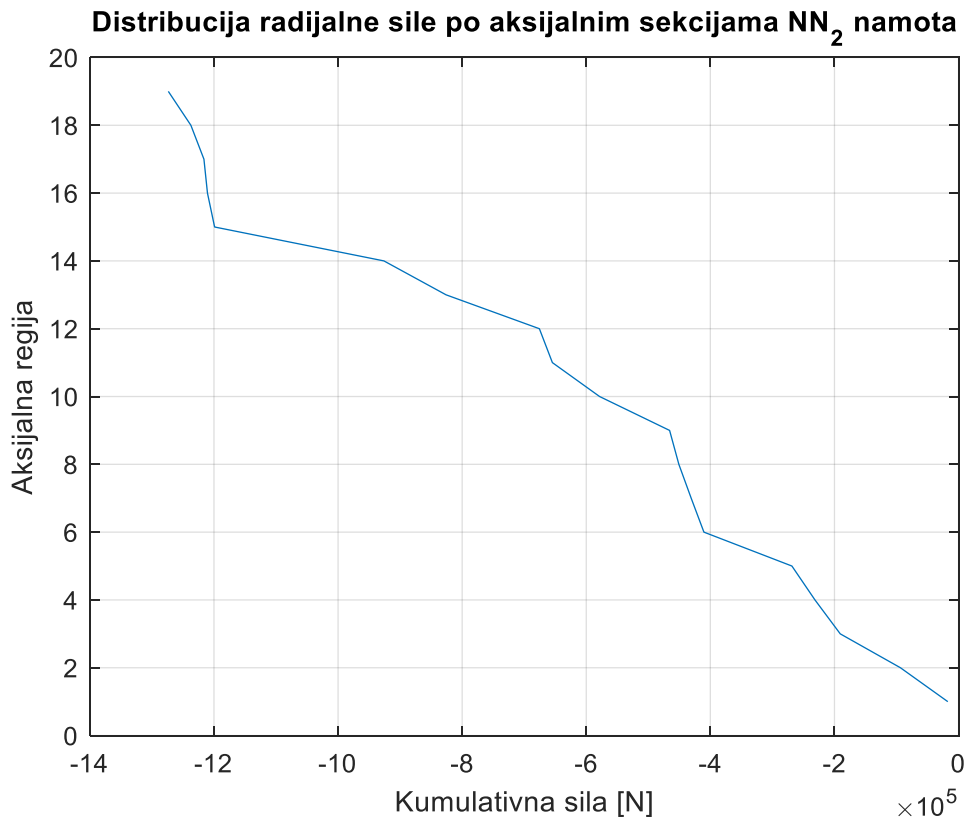
Slika 2.76 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN₁ namot



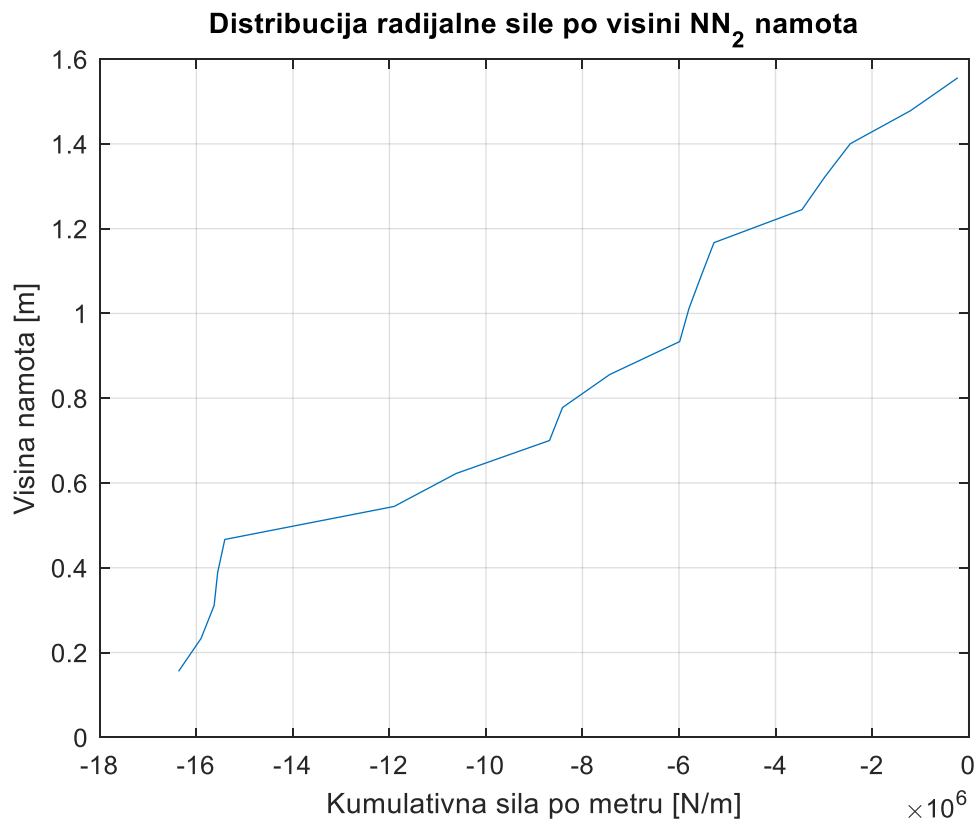
Slika 2.77 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₁ namot



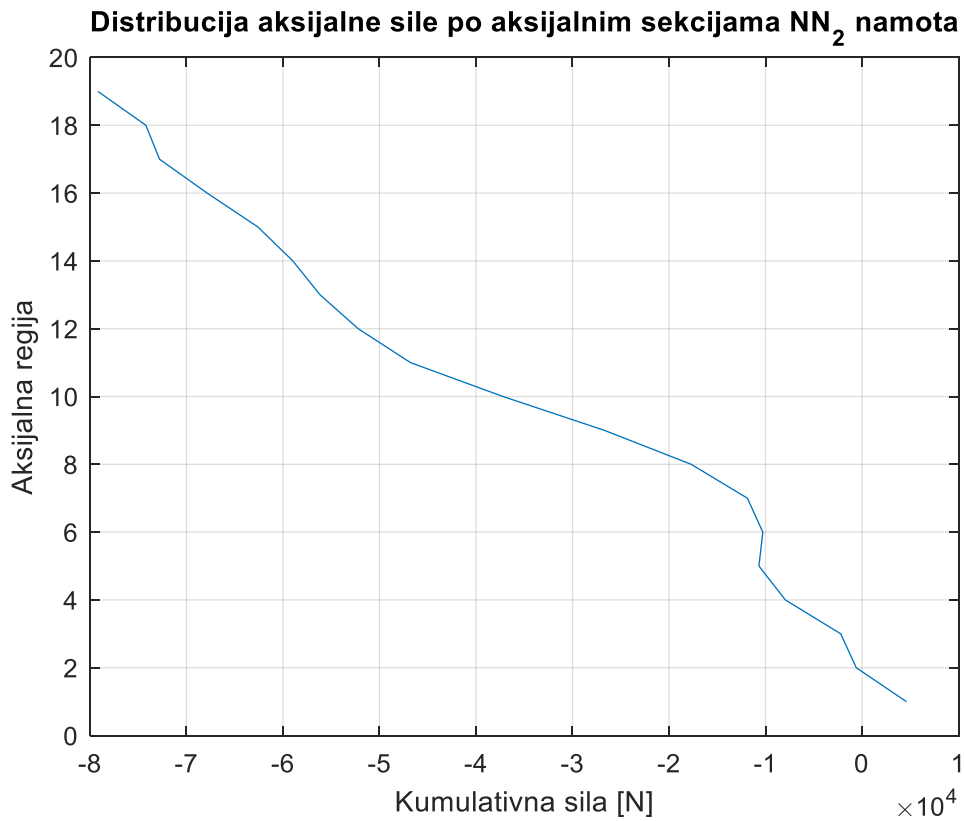
Slika 2.78 Mesh NN₂ namota



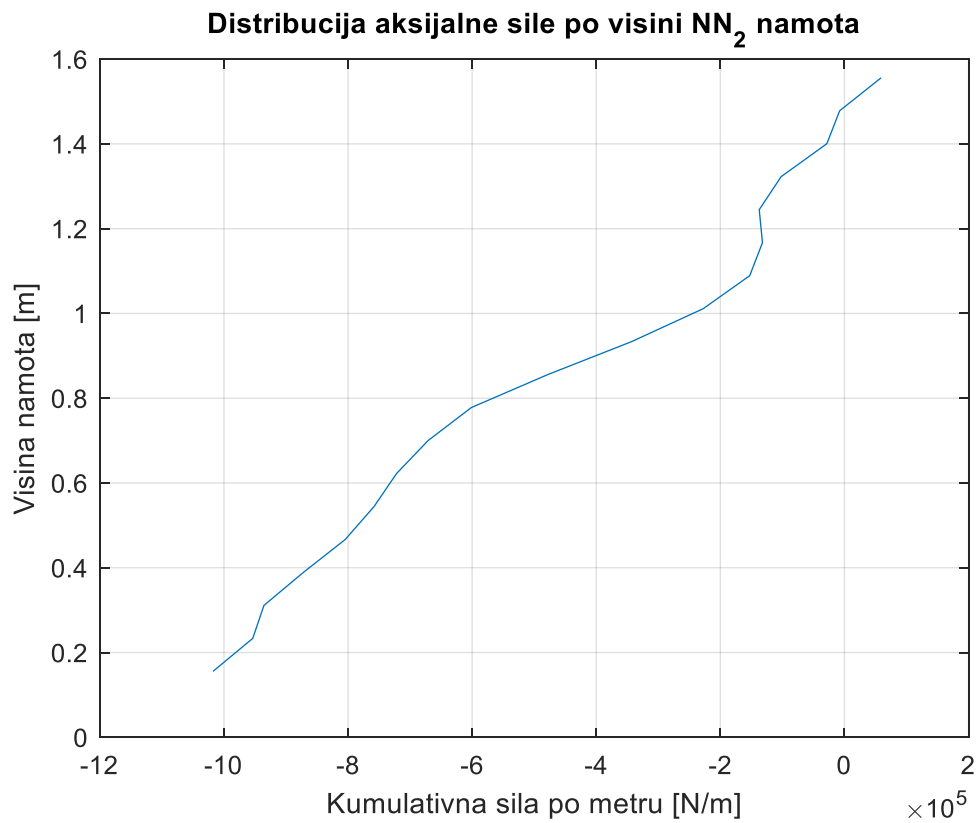
Slika 2.79 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN₂ namot



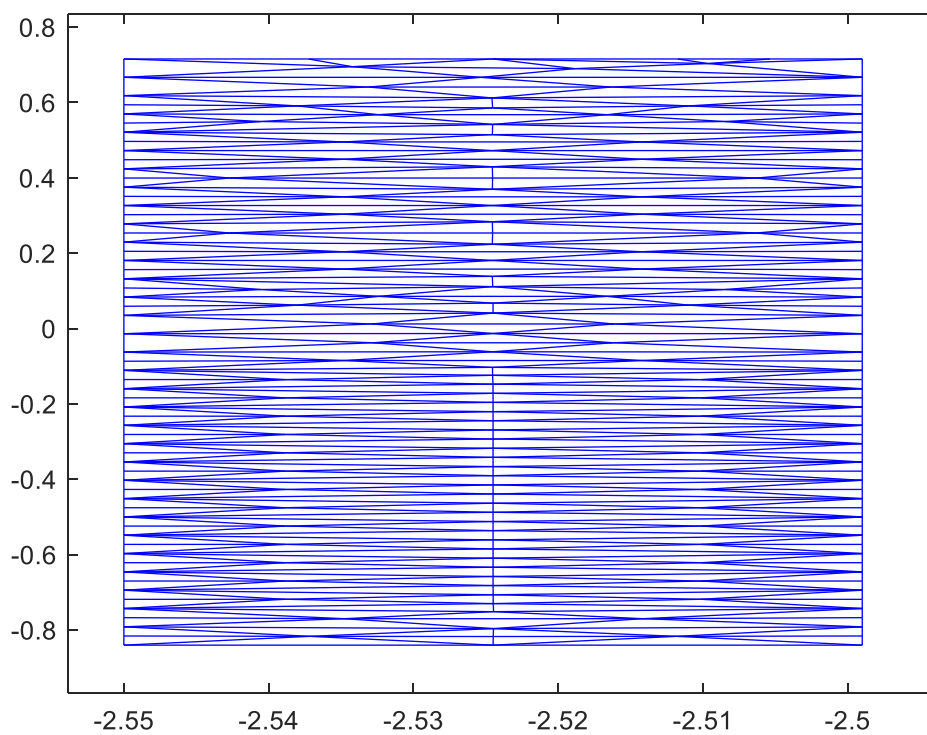
Slika 2.80 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₂ namot



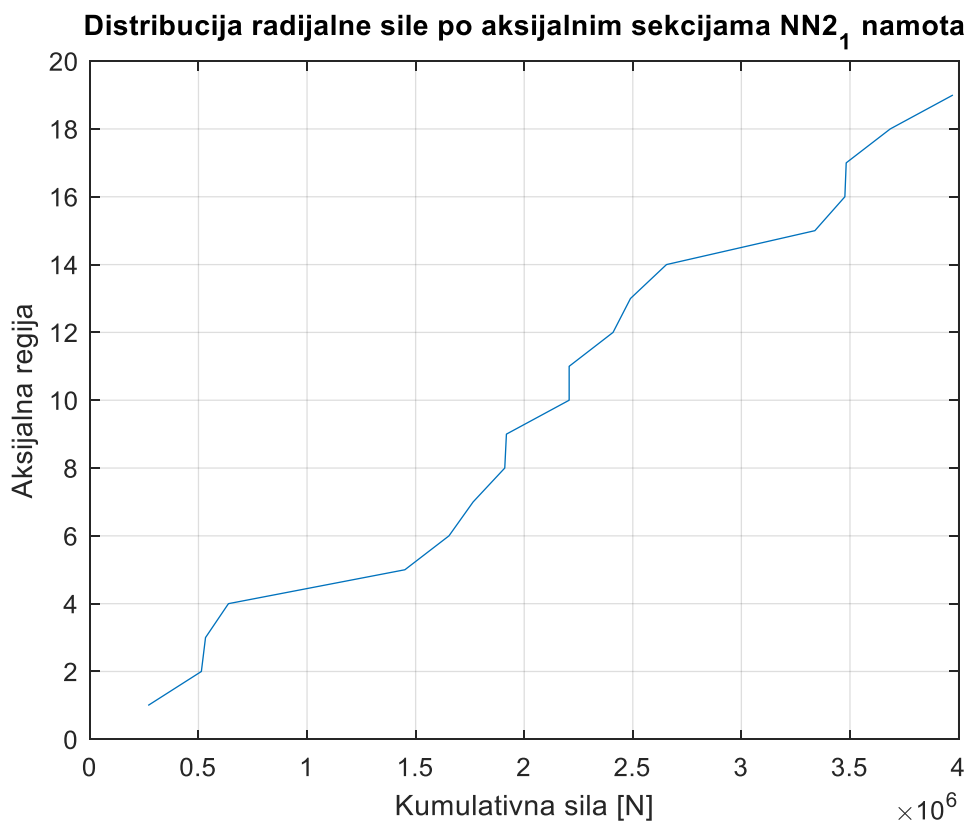
Slika 2.81 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN₂ namot



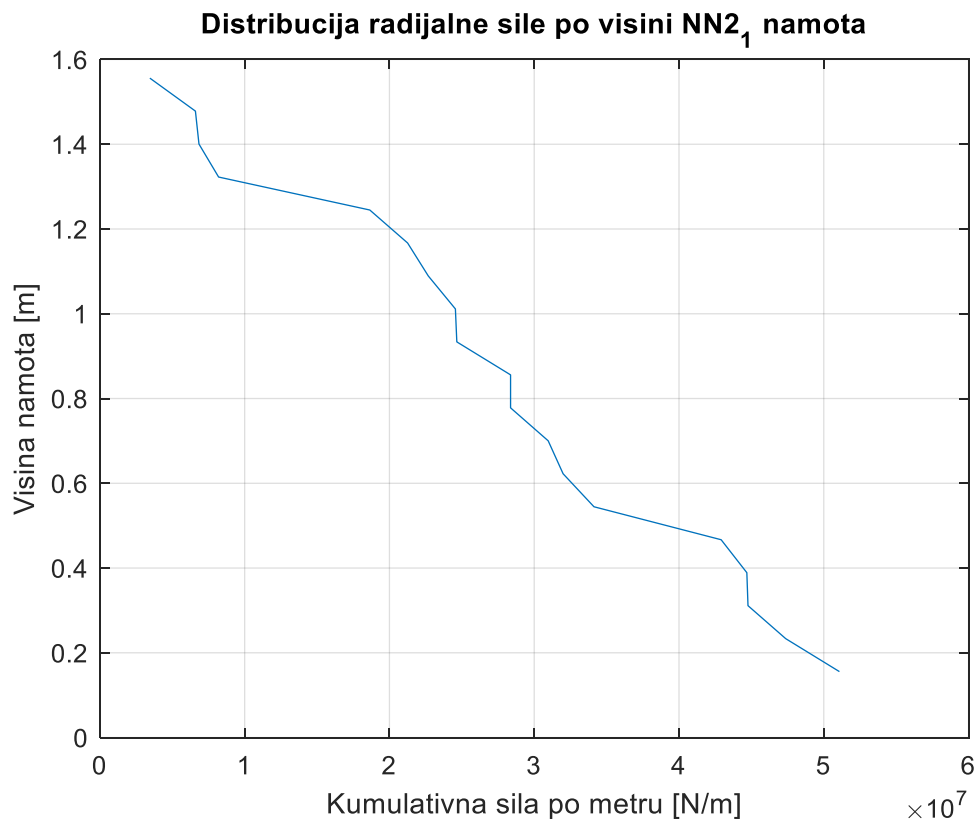
Slika 2.82 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₂ namot



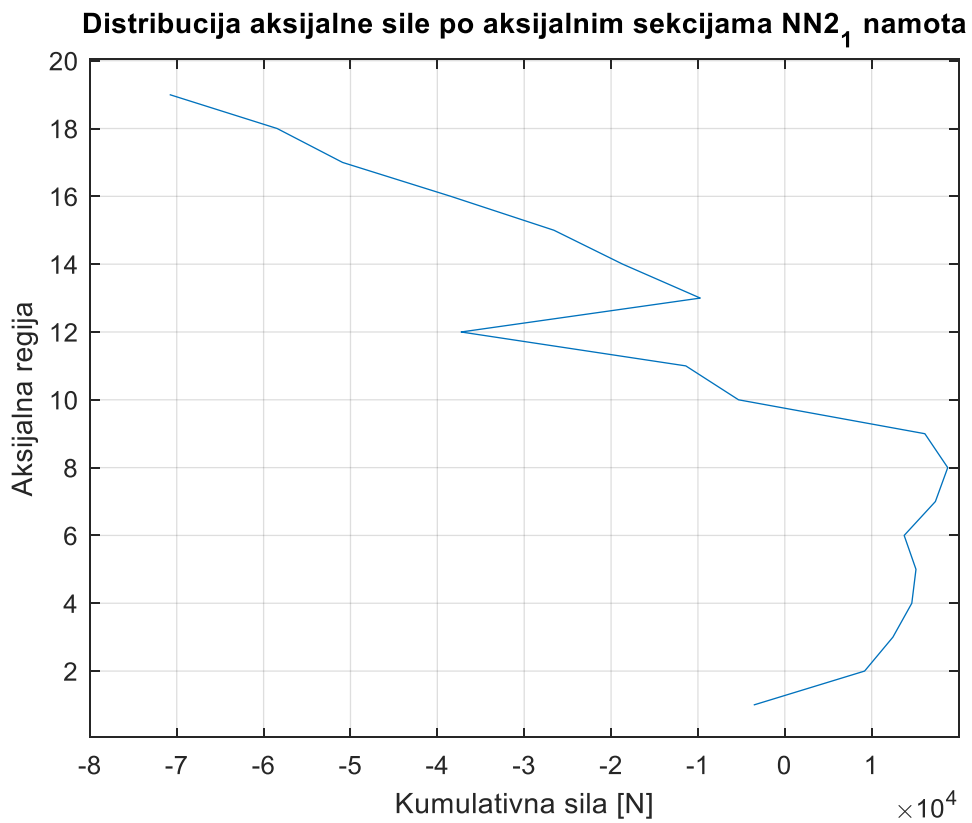
Slika 2.83 Mesh NN2_1 namota



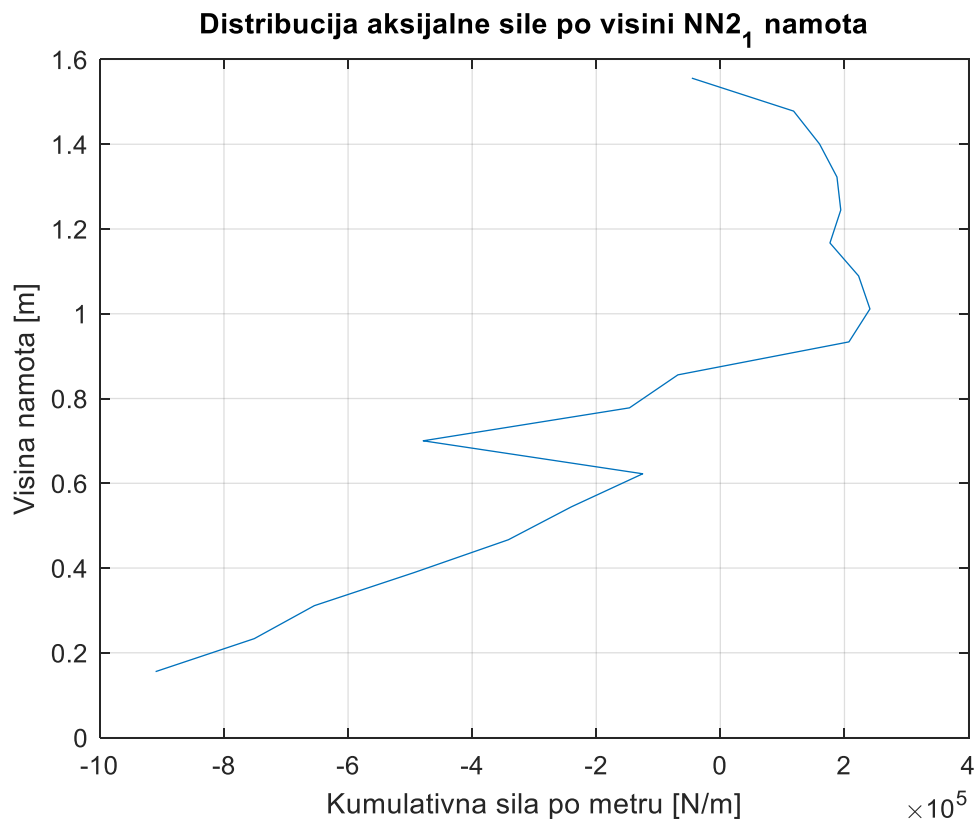
Slika 2.84 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN2₁ namot



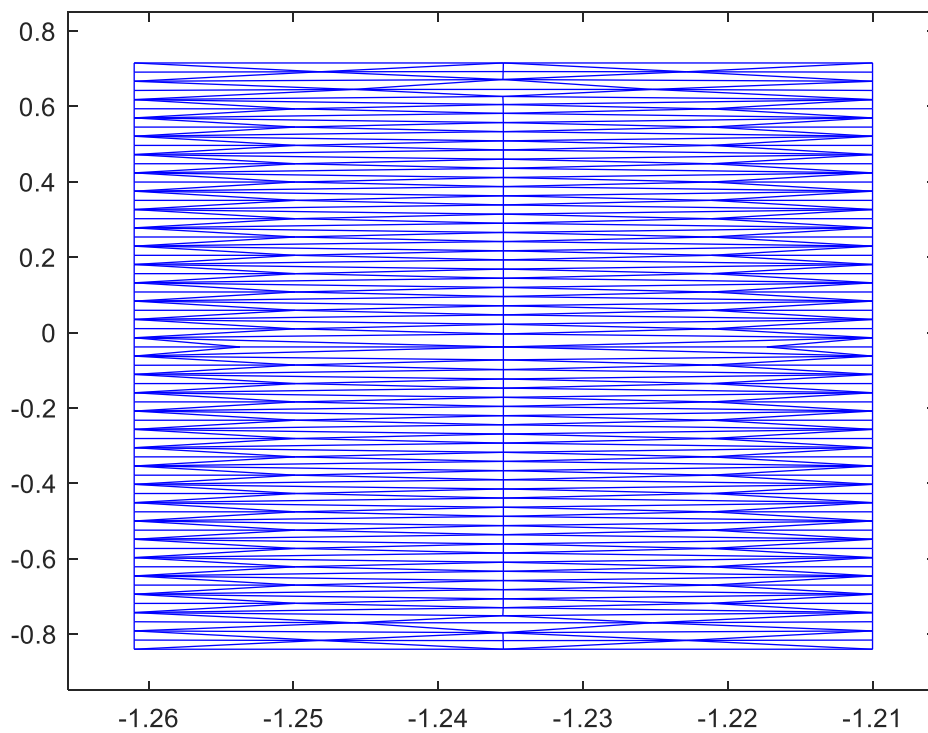
Slika 2.85 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN2₁ namot



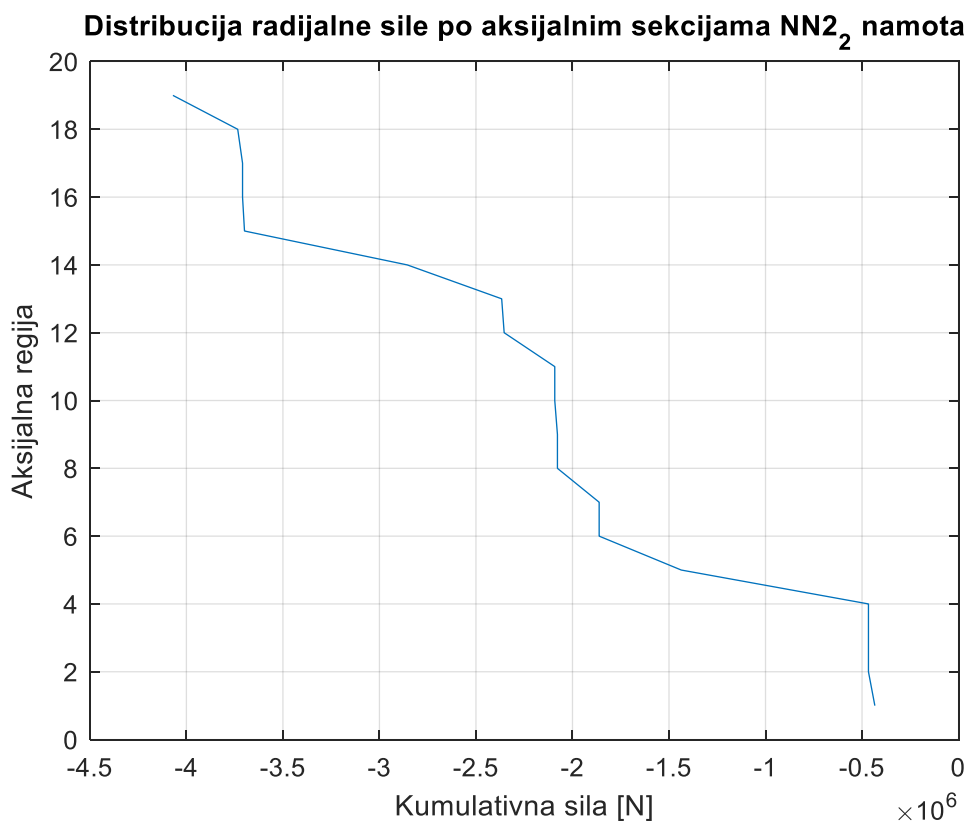
Slika 2.86 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN2₁ namot



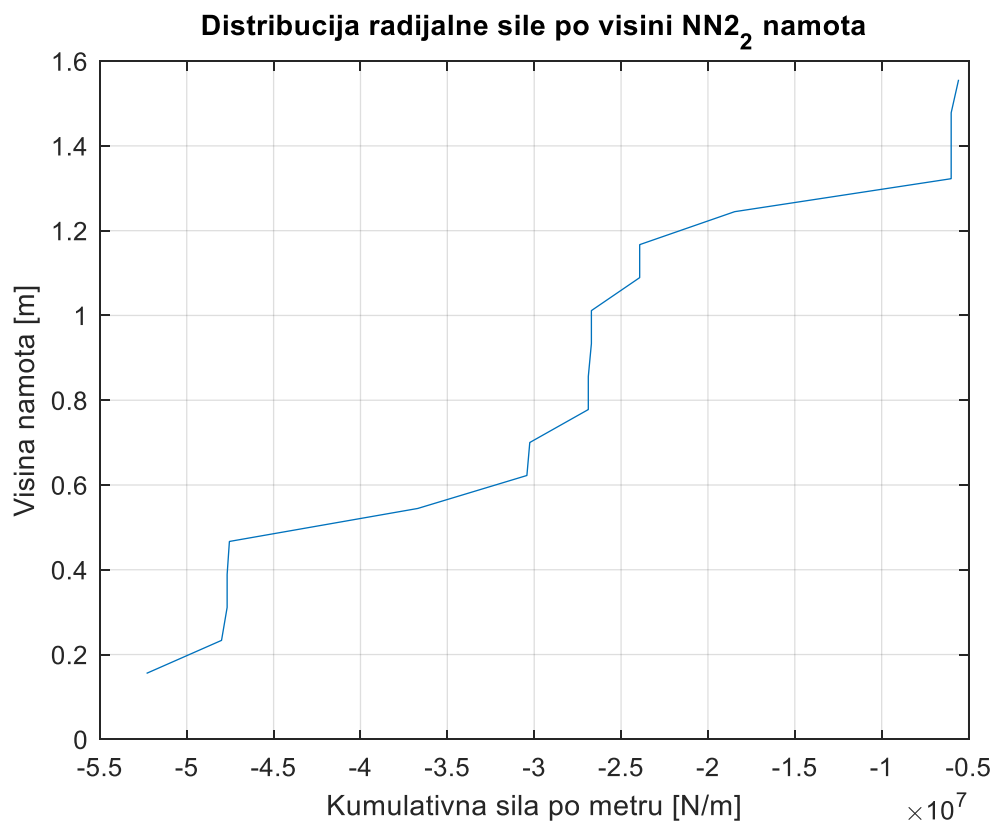
Slika 2.87 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN2₁ namot



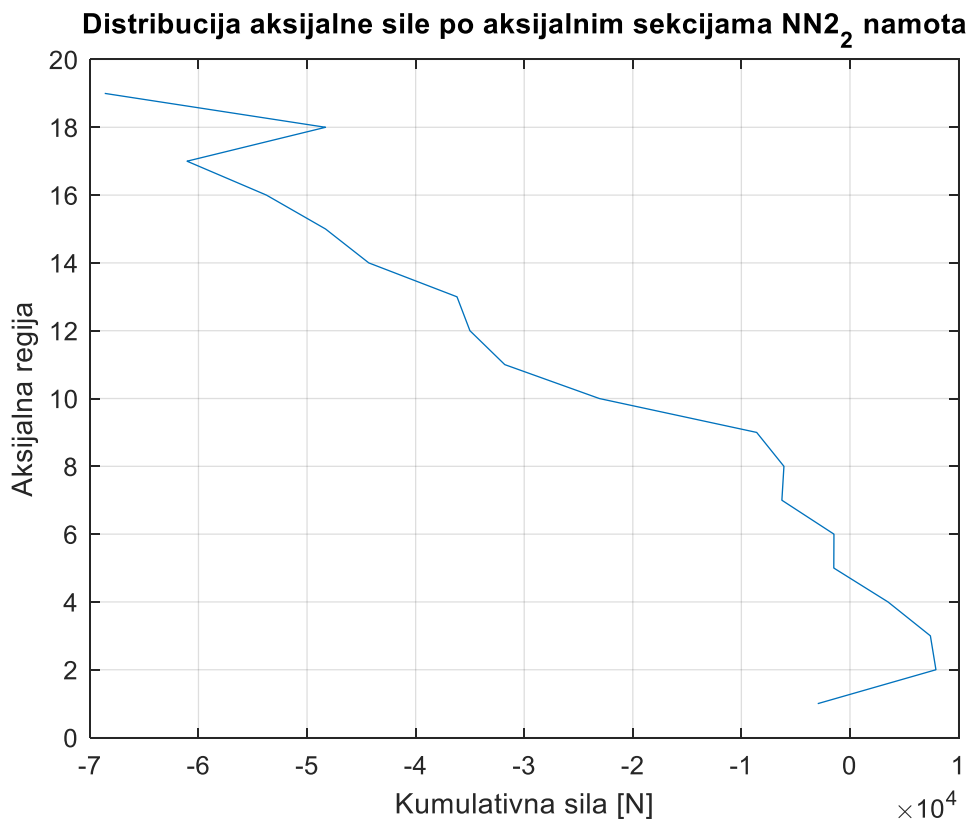
Slika 2.88 Mesh NN2₂ namota



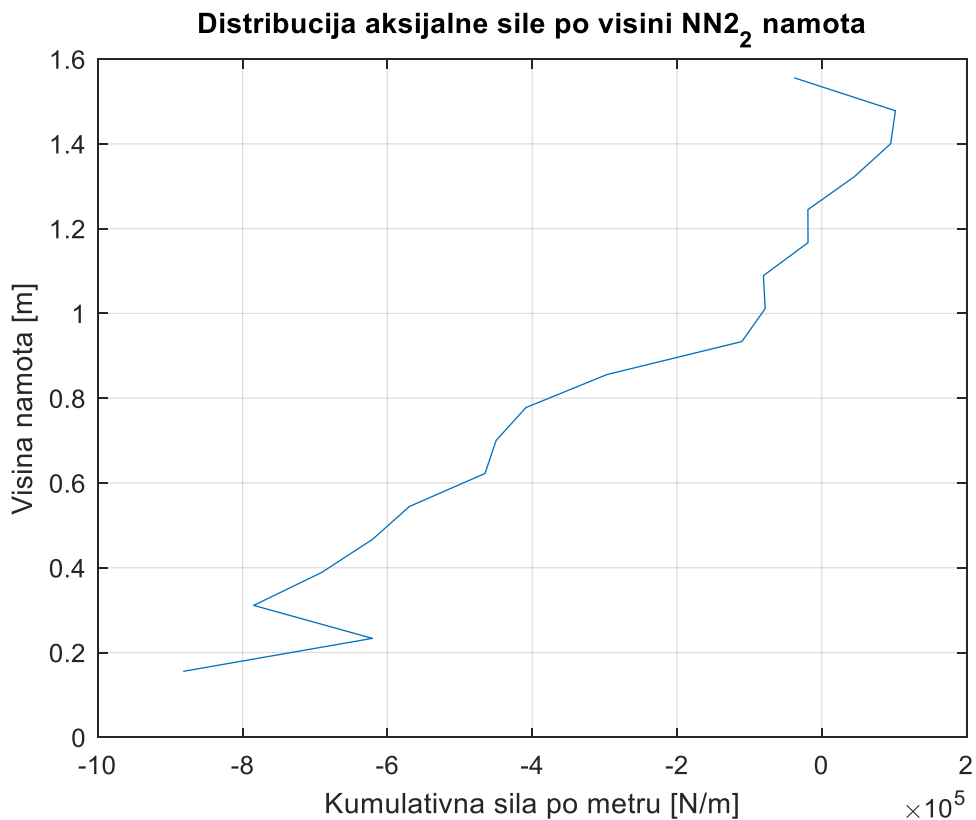
Slika 2.89 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN₂_2 namot



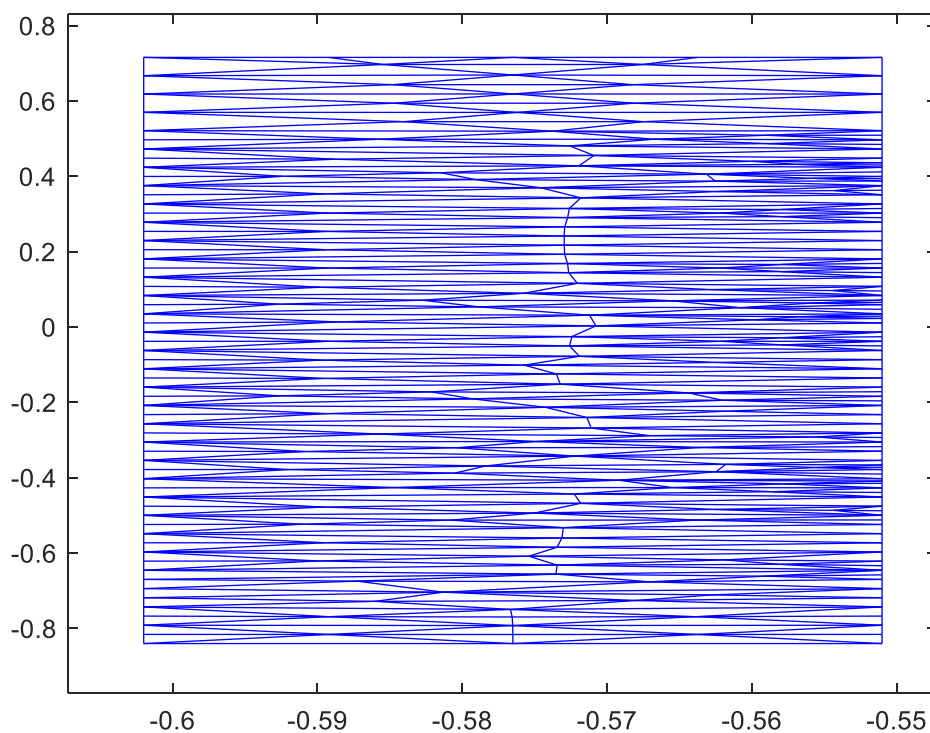
Slika 2.90 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₂_2 namot



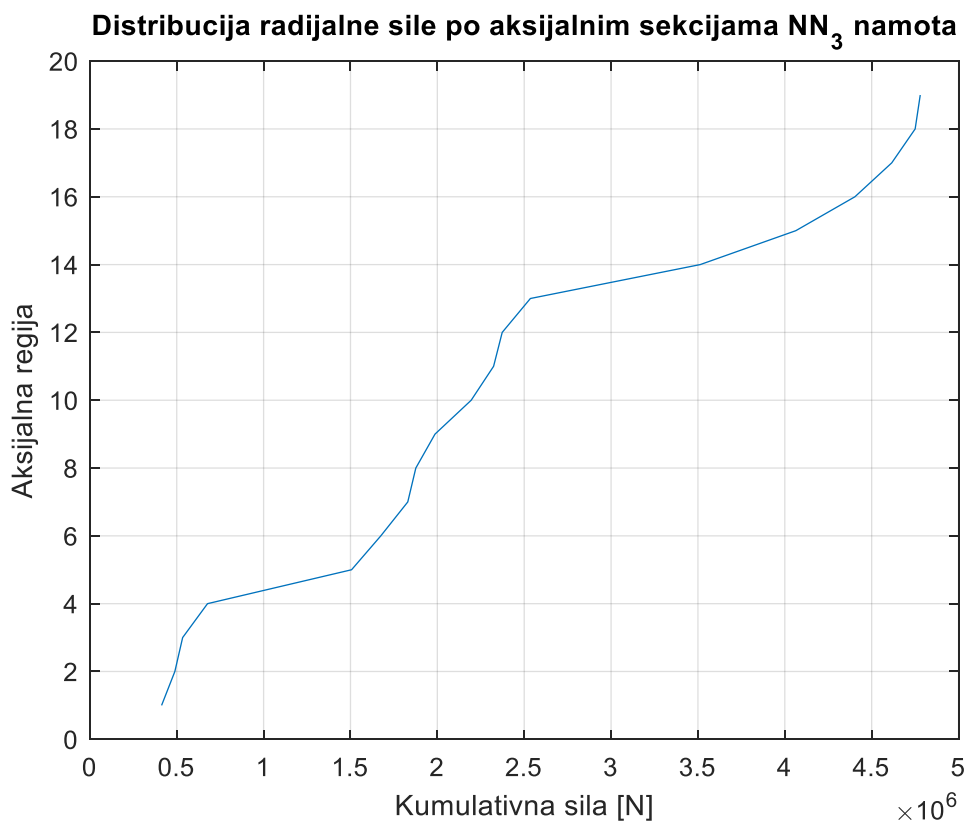
Slika 2.91 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN2₂ namot



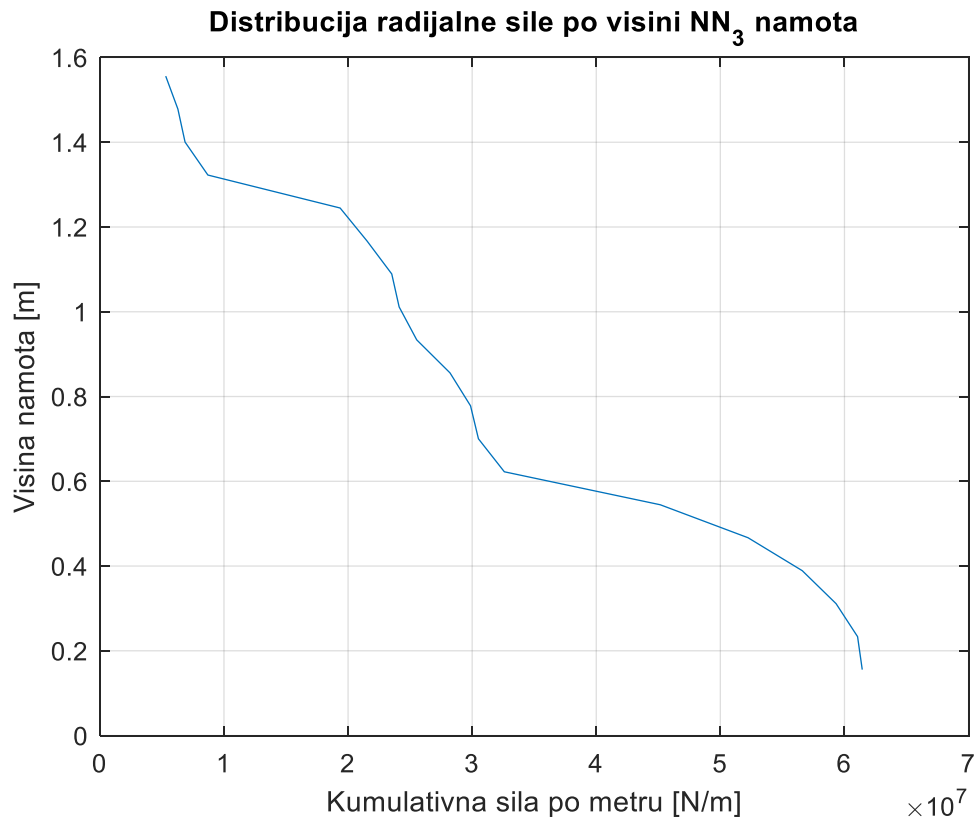
Slika 2.92 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN2₂ namot



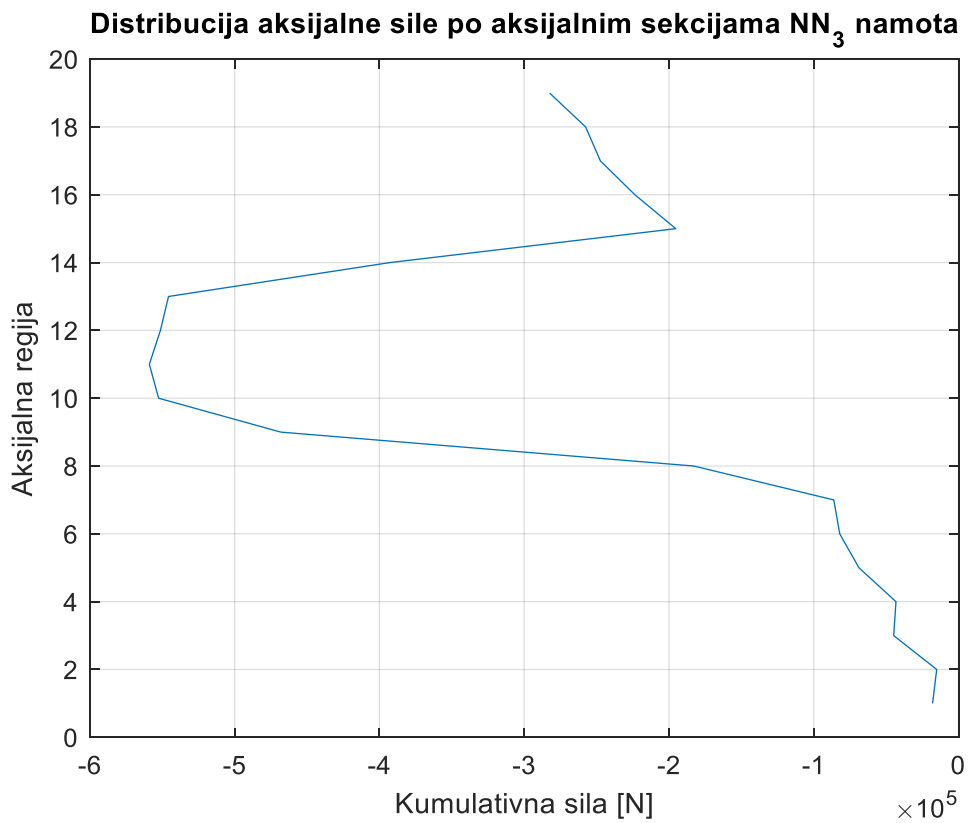
Slika 2.93 Mesh NN_3 namota



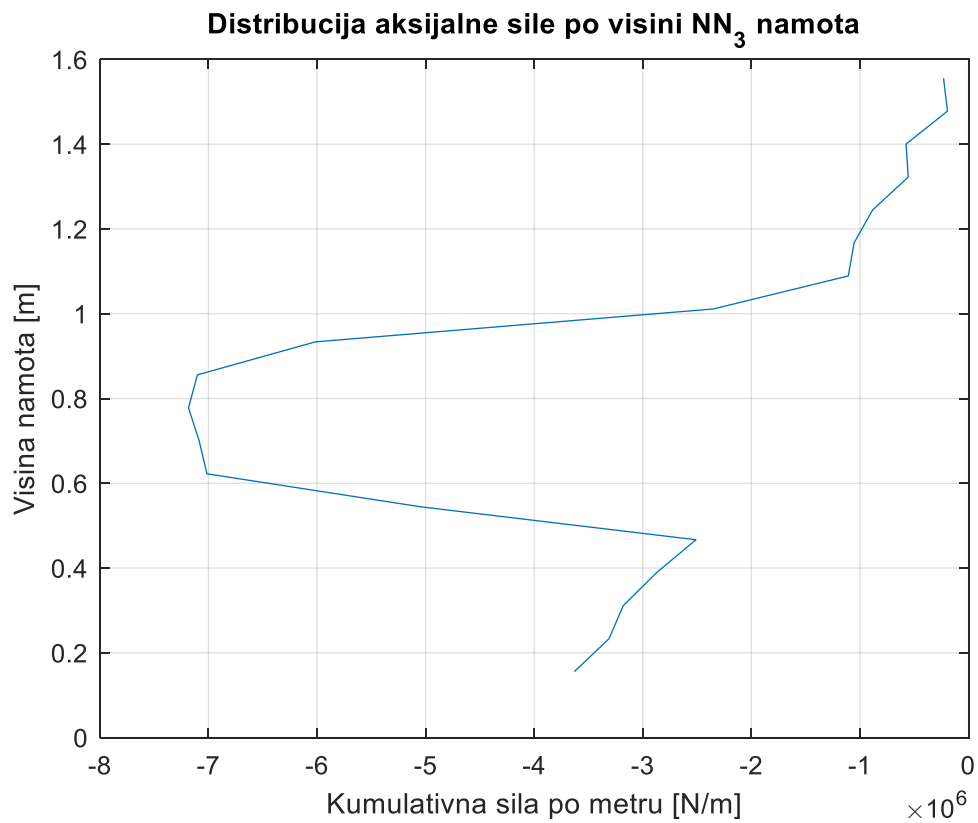
Slika 2.94 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN₃ namot



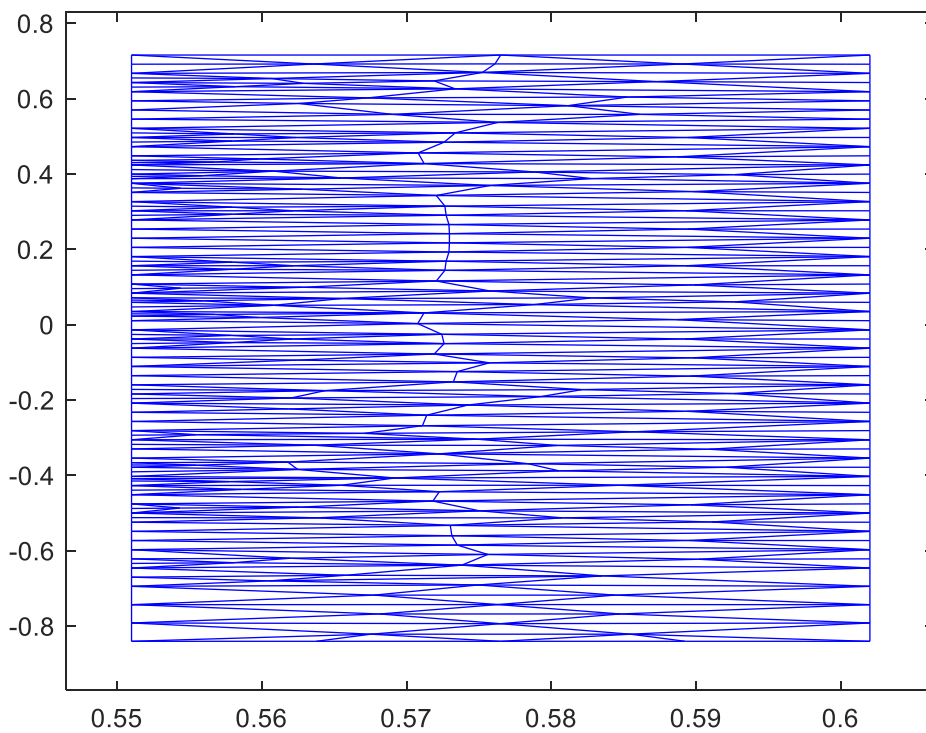
Slika 2.95 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₃ namot



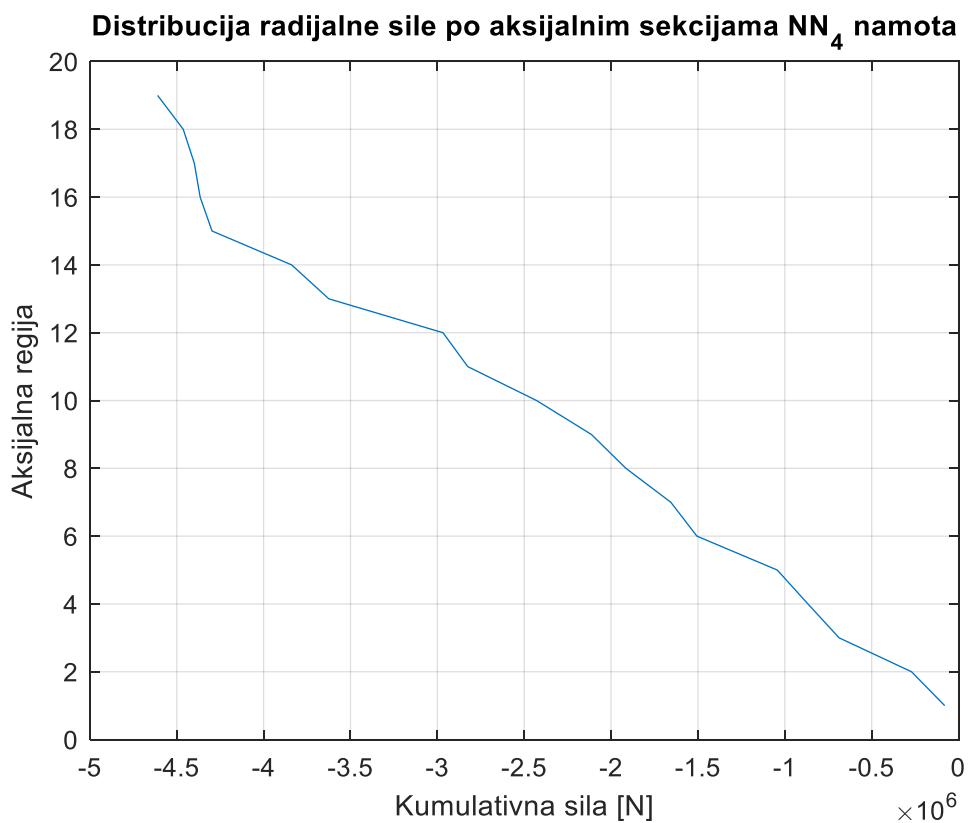
Slika 2.96 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN₃ namot



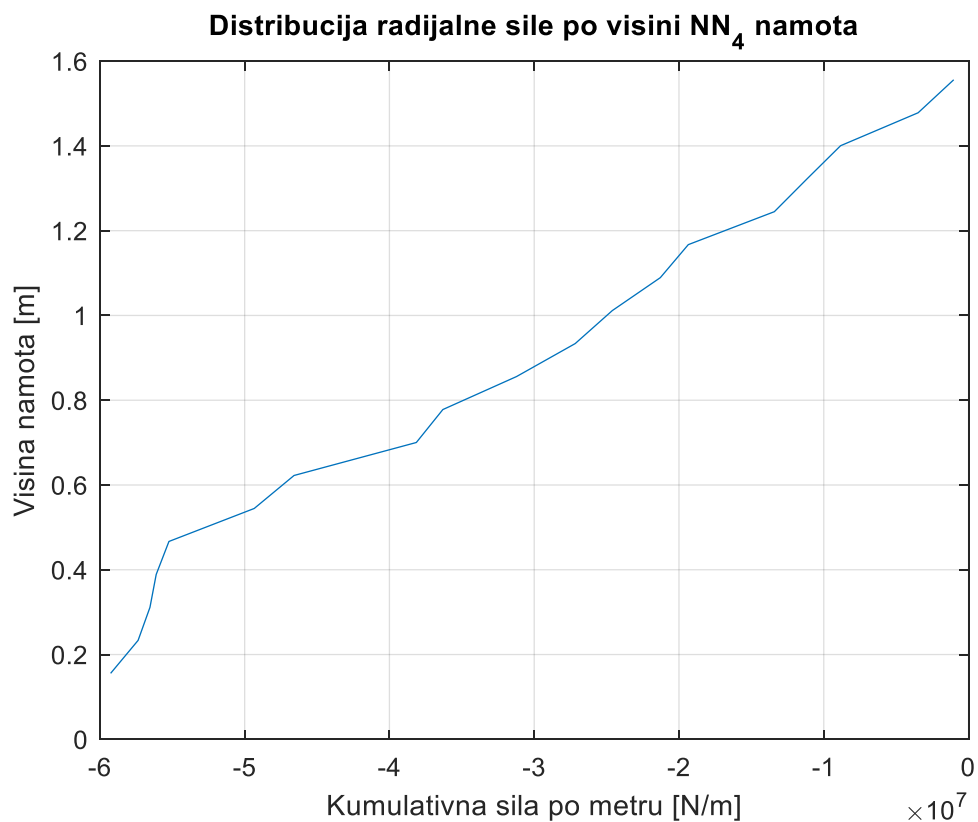
Slika 2.97 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₃ namot



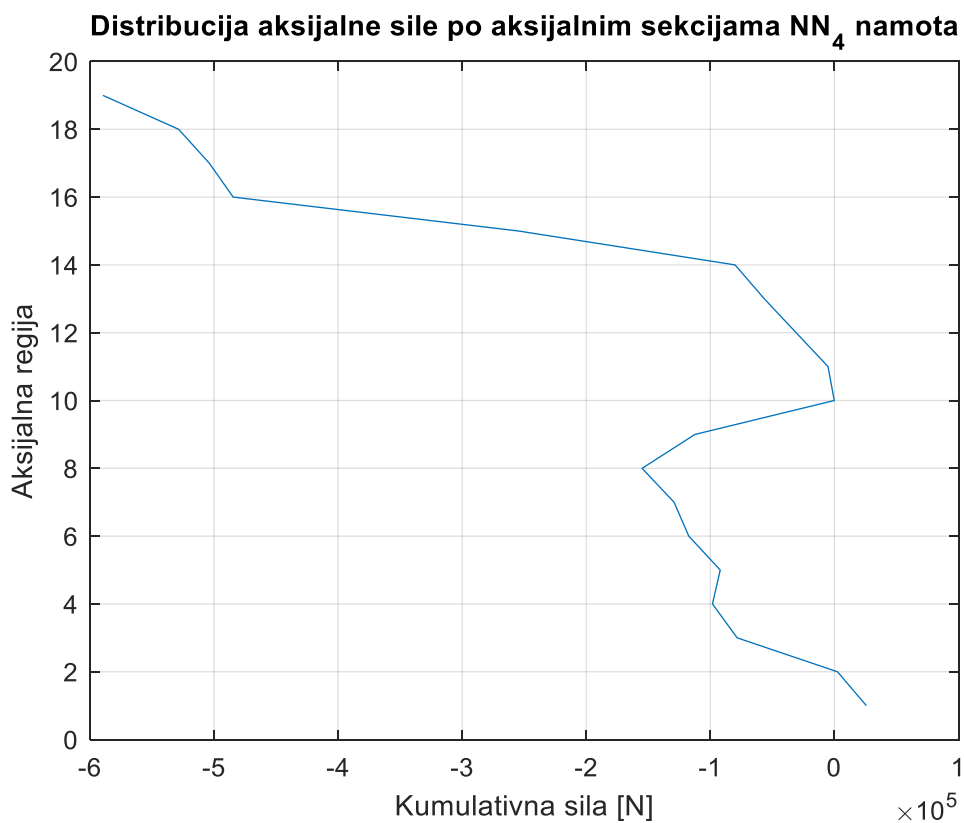
Slika 2.98 Mesh NN₄ namota



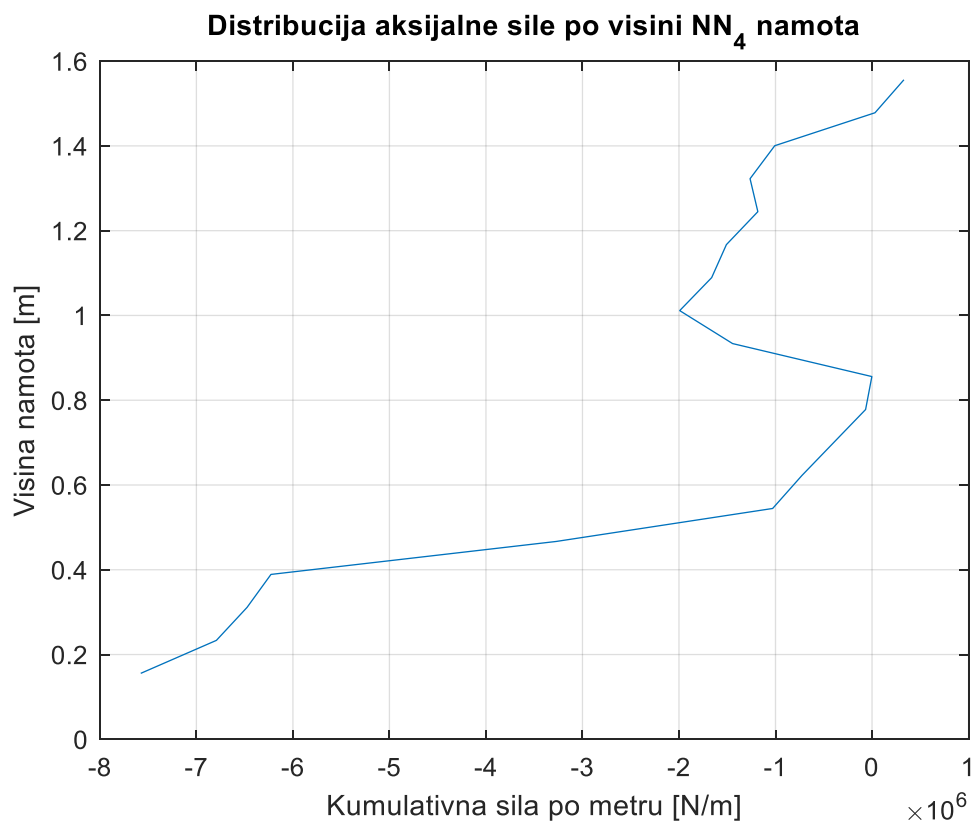
Slika 2.99 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN₄ namot



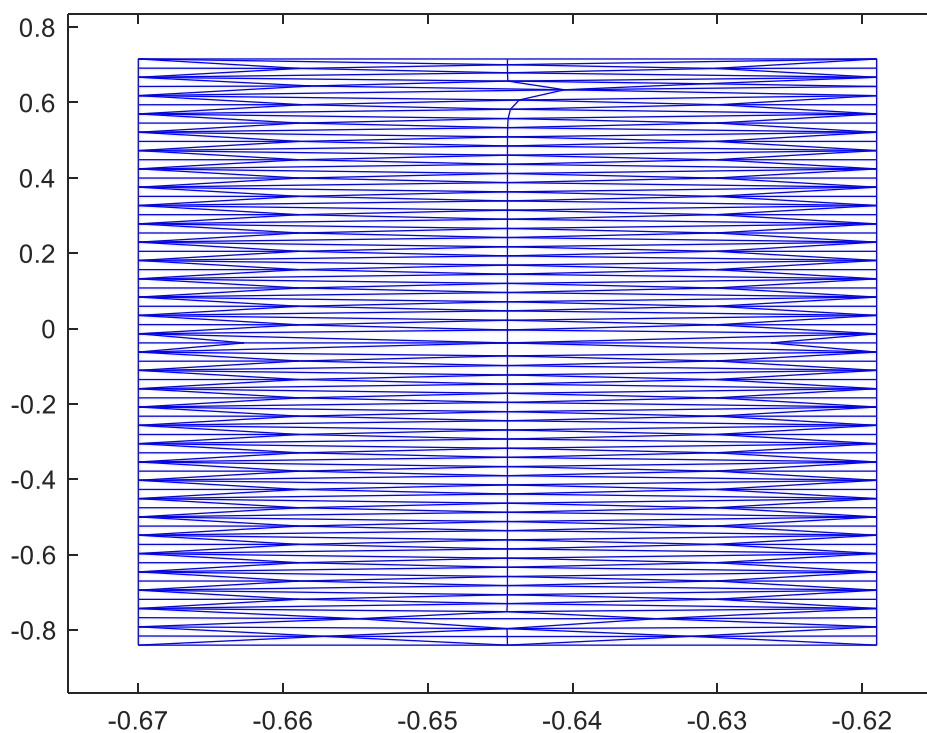
Slika 2.100 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₄ namot



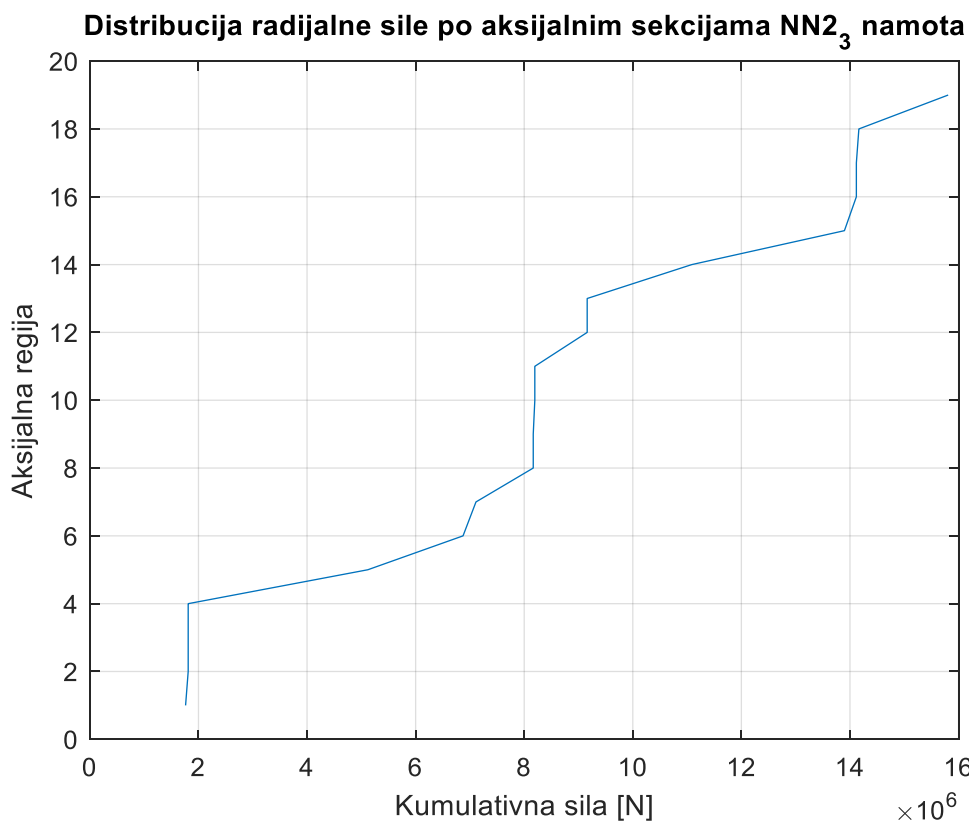
Slika 2.101 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN₄ namot



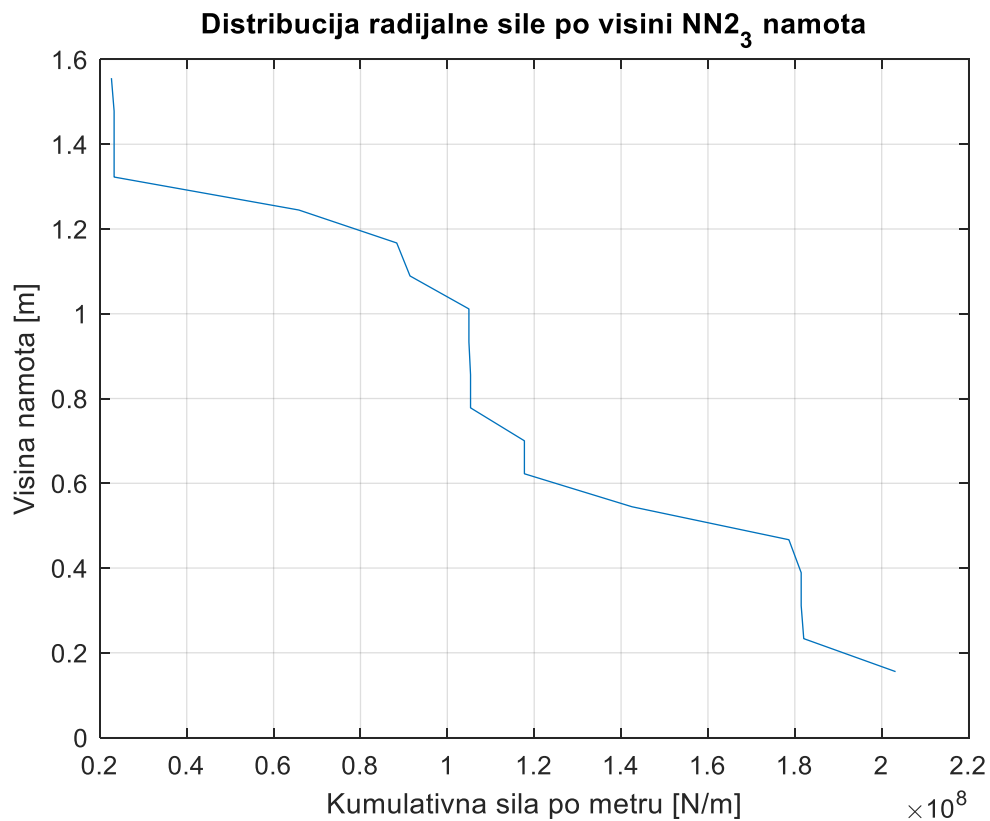
Slika 2.102 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₄ namot



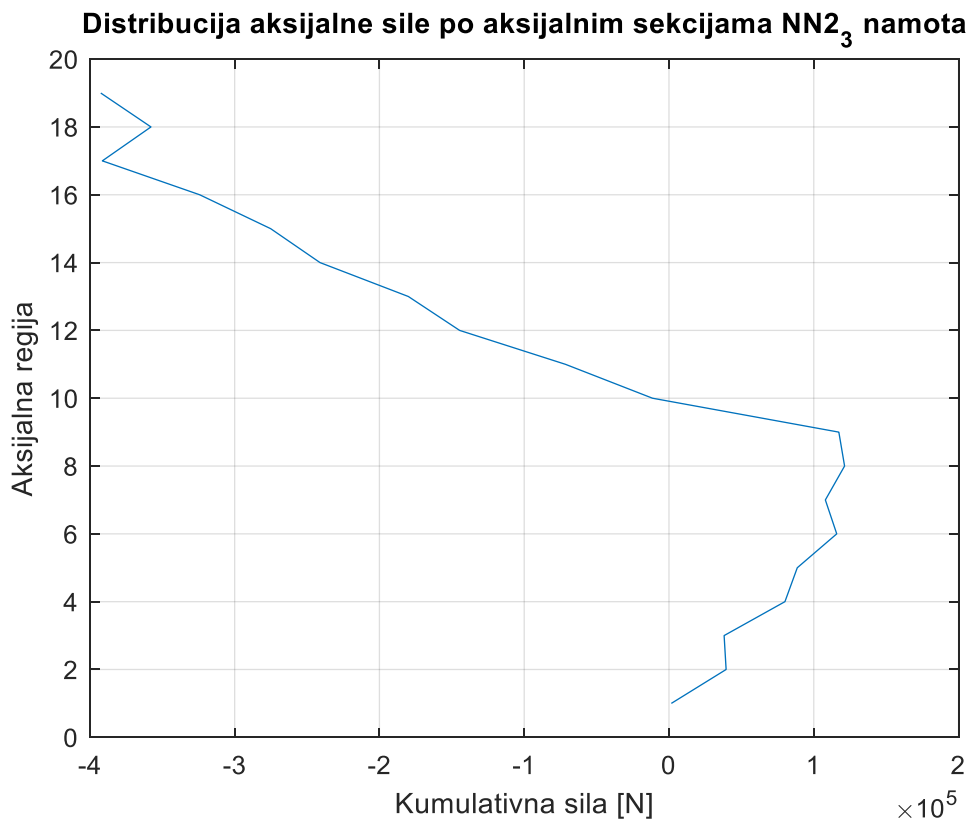
Slika 2.103 Mesh NN2_3 namota



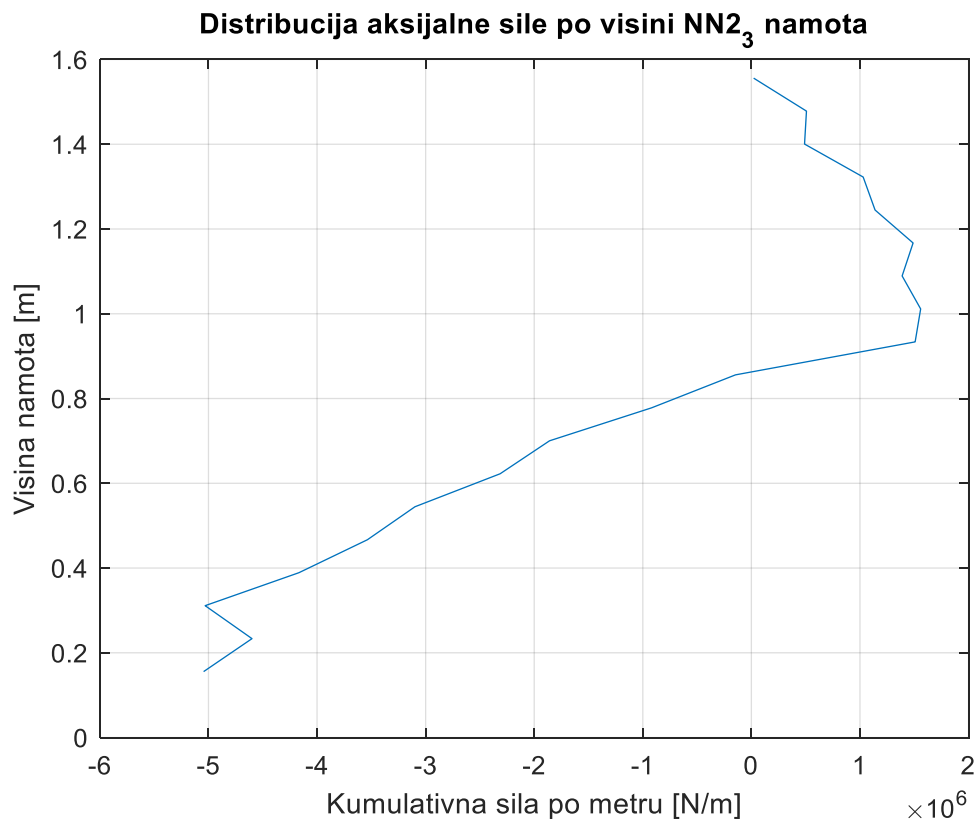
Slika 2.104 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN2_3 namot



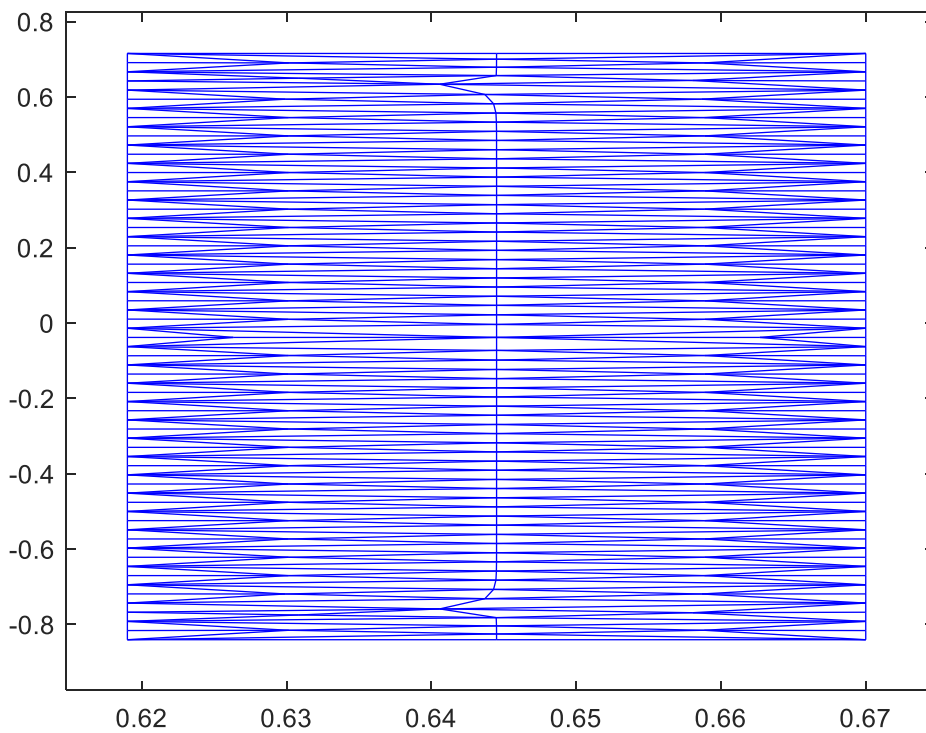
Slika 2.105 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN_{2_3} namot



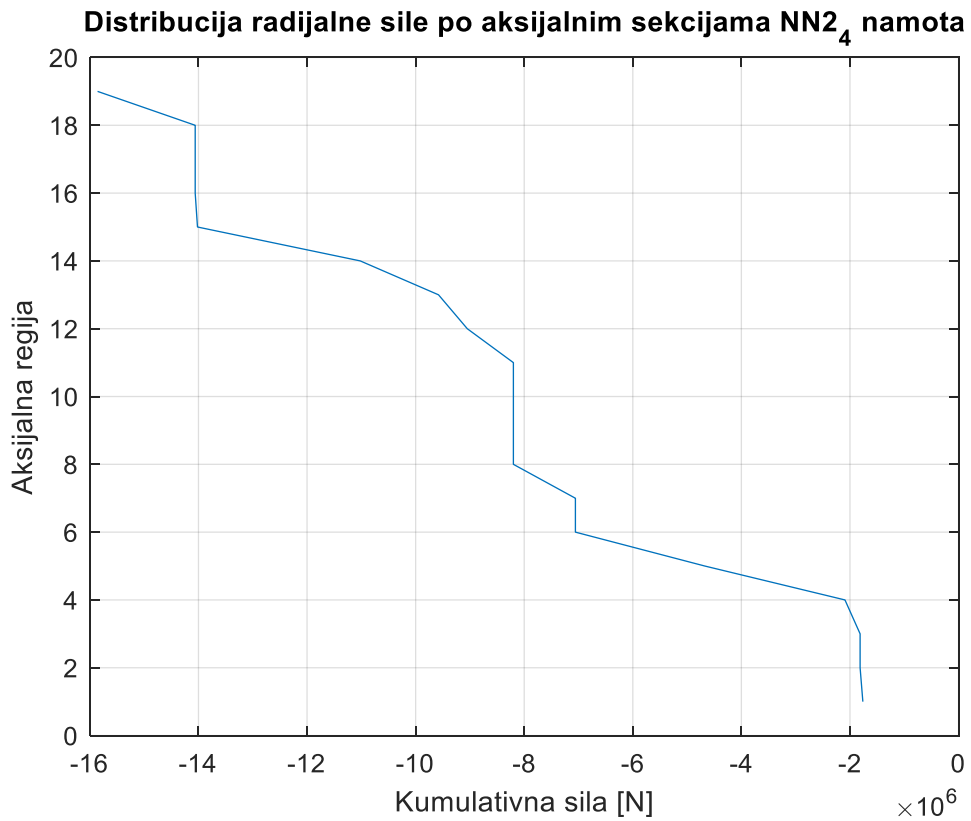
Slika 2.106 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN_{2_3} namot



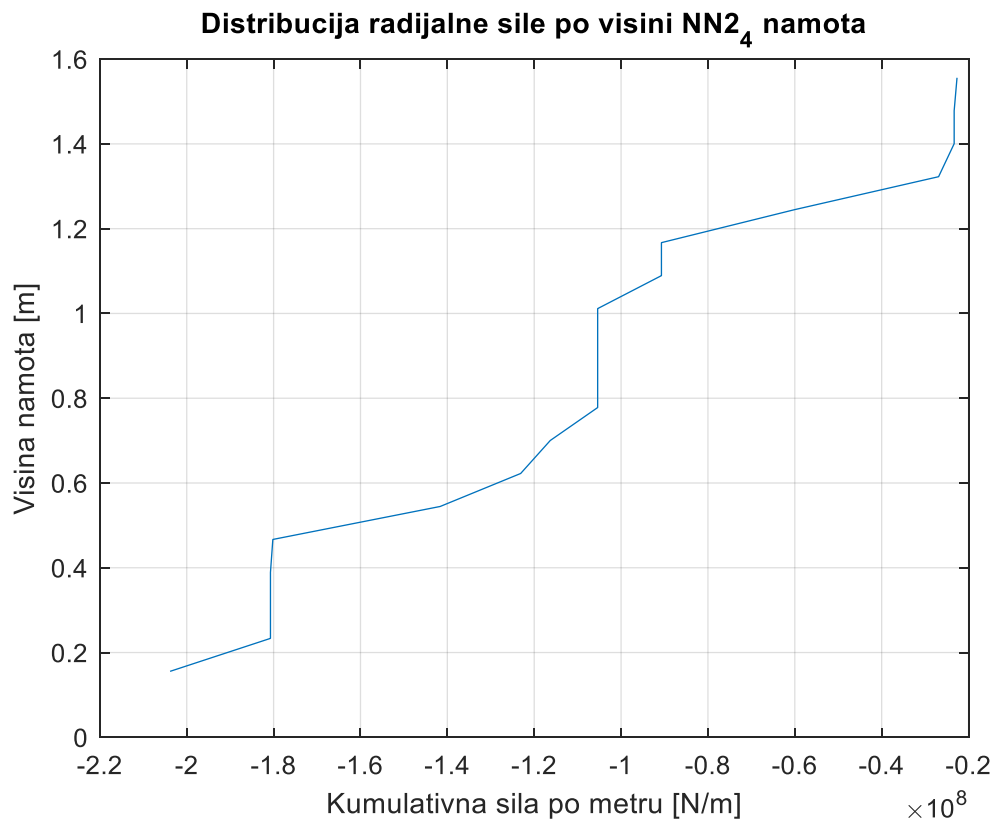
Slika 2.107 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN_{2,3} namot



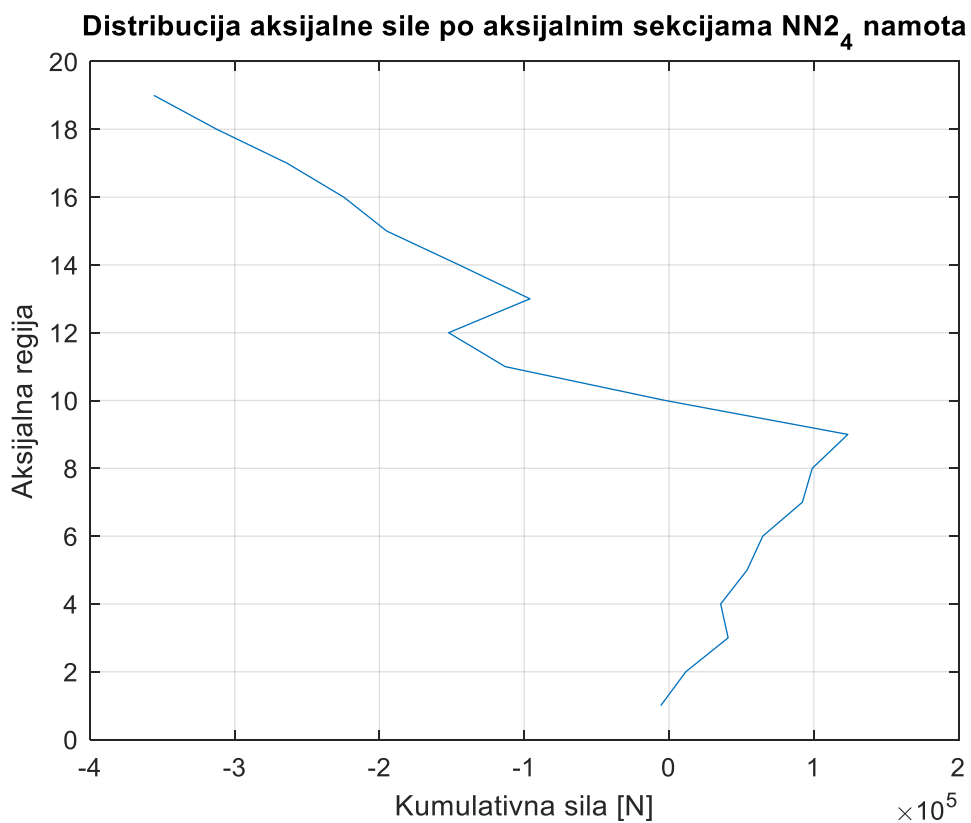
Slika 2.108 Mesh NN_{2,4} namota



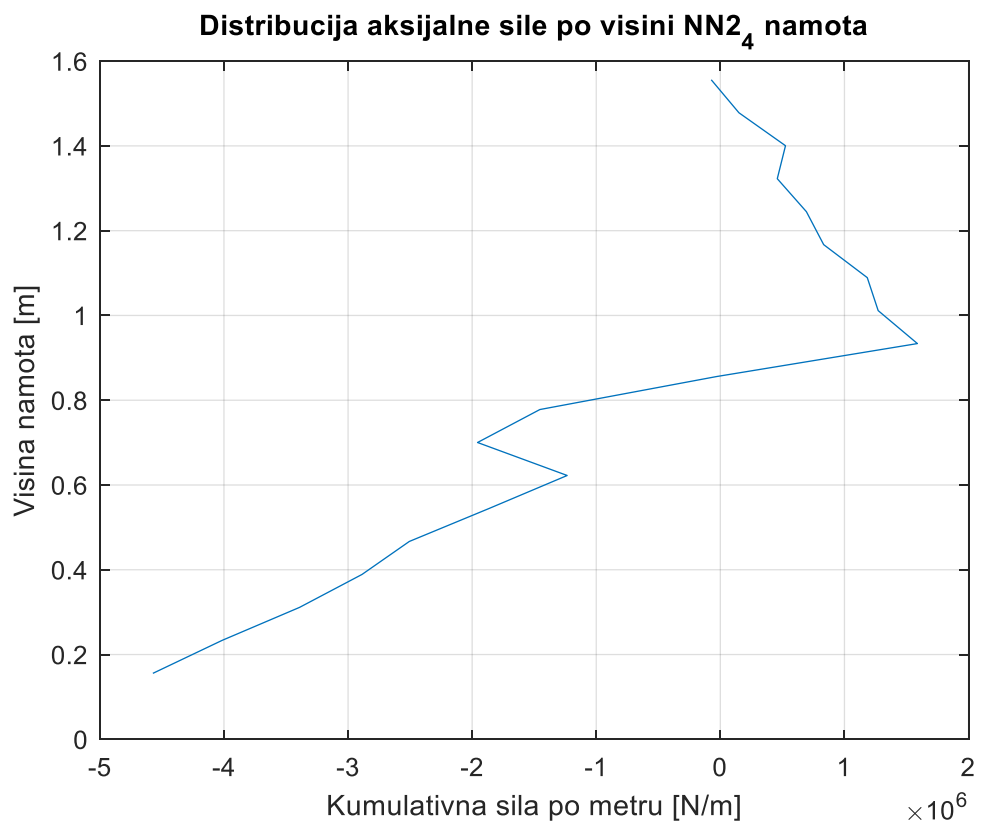
Slika 2.109 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN₄ namot



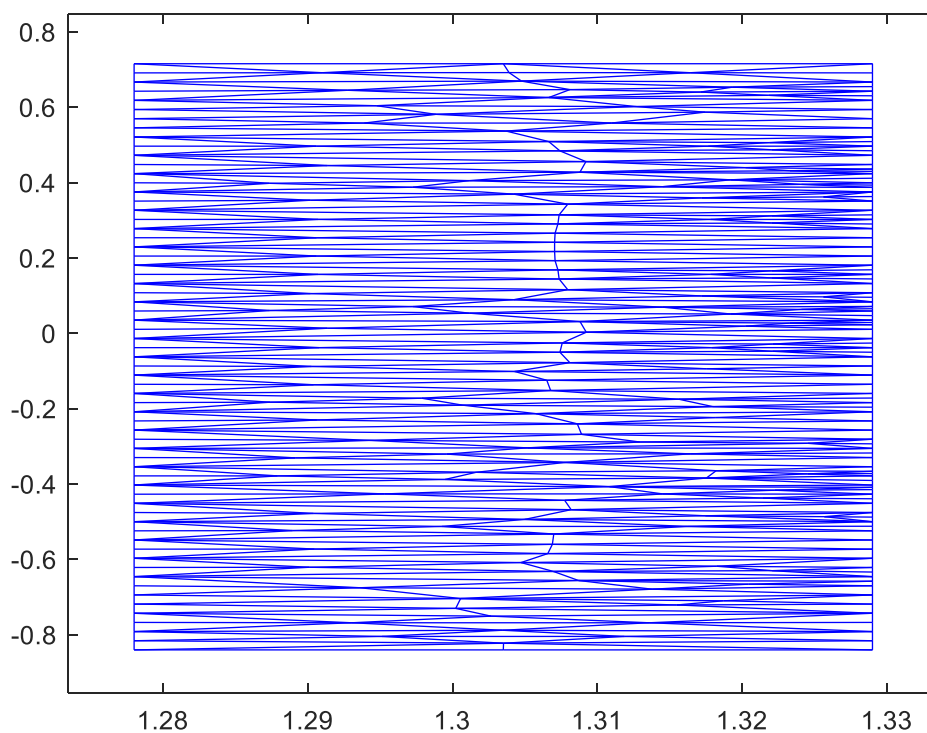
Slika 2.110 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₄ namot



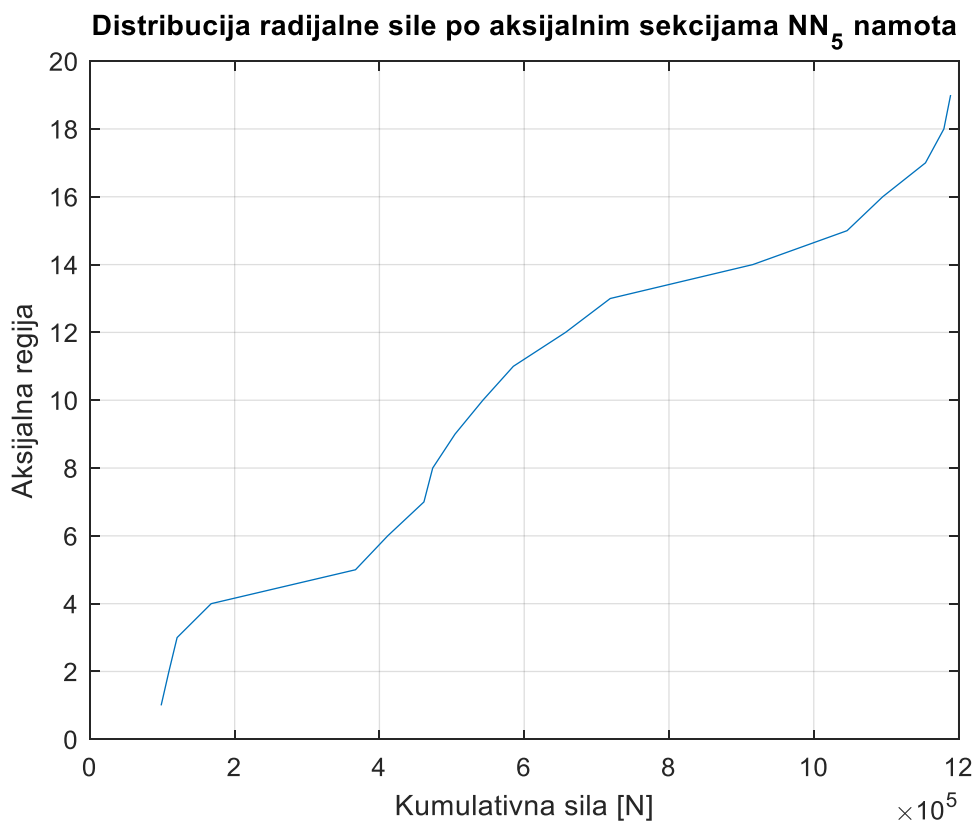
Slika 2.111 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN2₄ namot



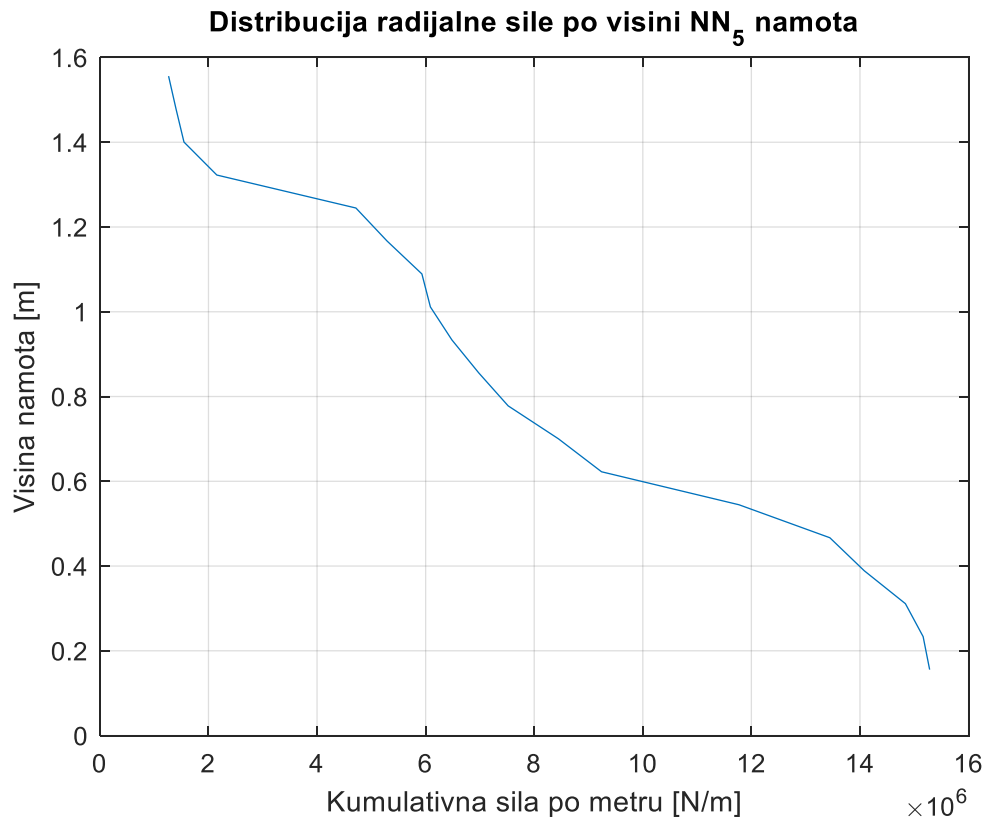
Slika 2.112 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN2₄ namot



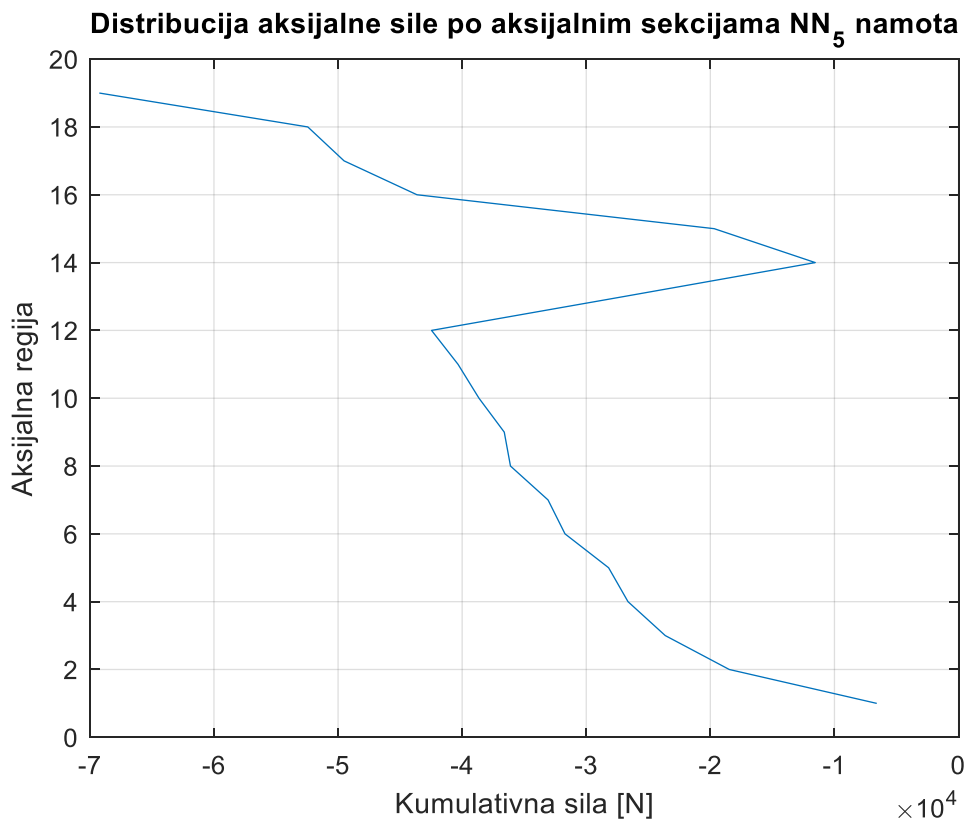
Slika 2.113 Mesh NN_5 namota



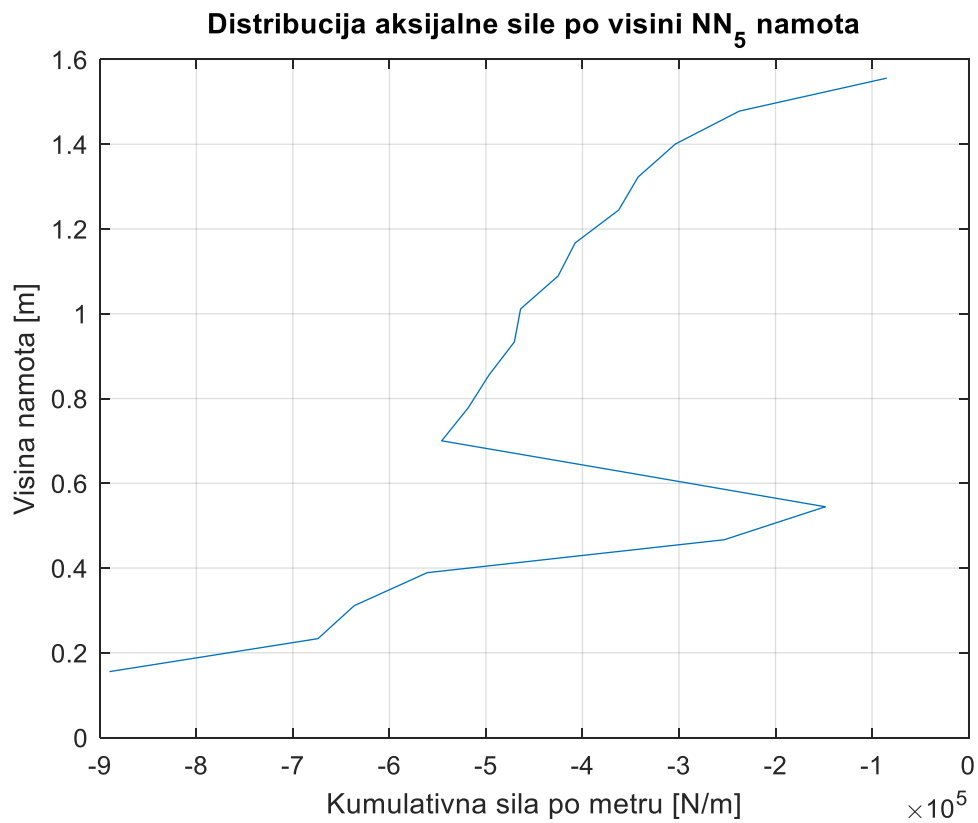
Slika 2.114 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN₅ namot



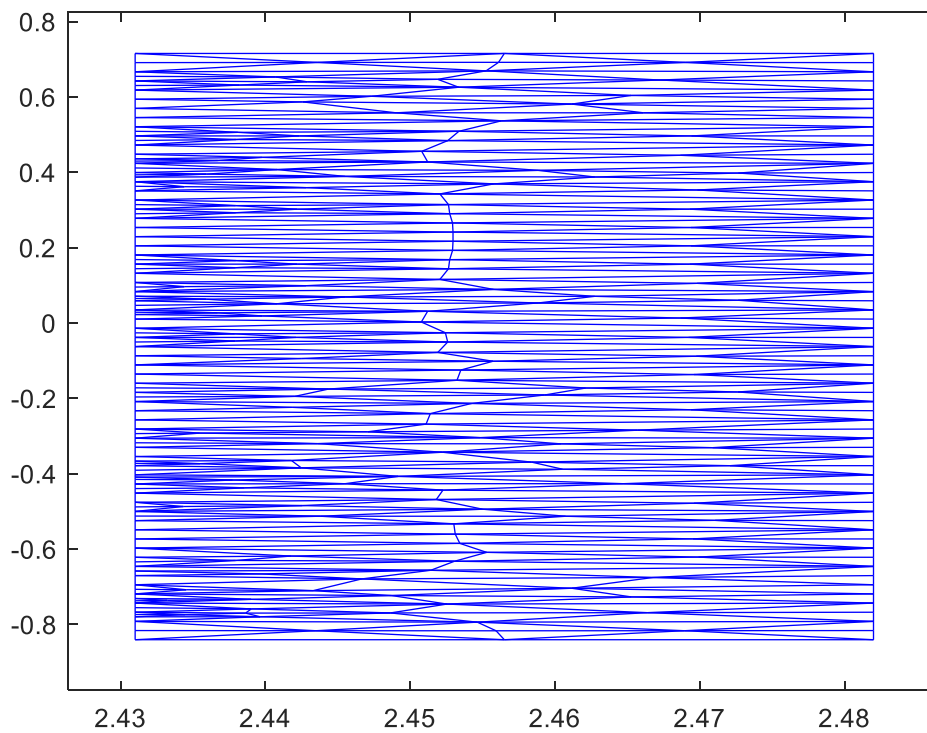
Slika 2.115 Kumulativna radialna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₅ namot



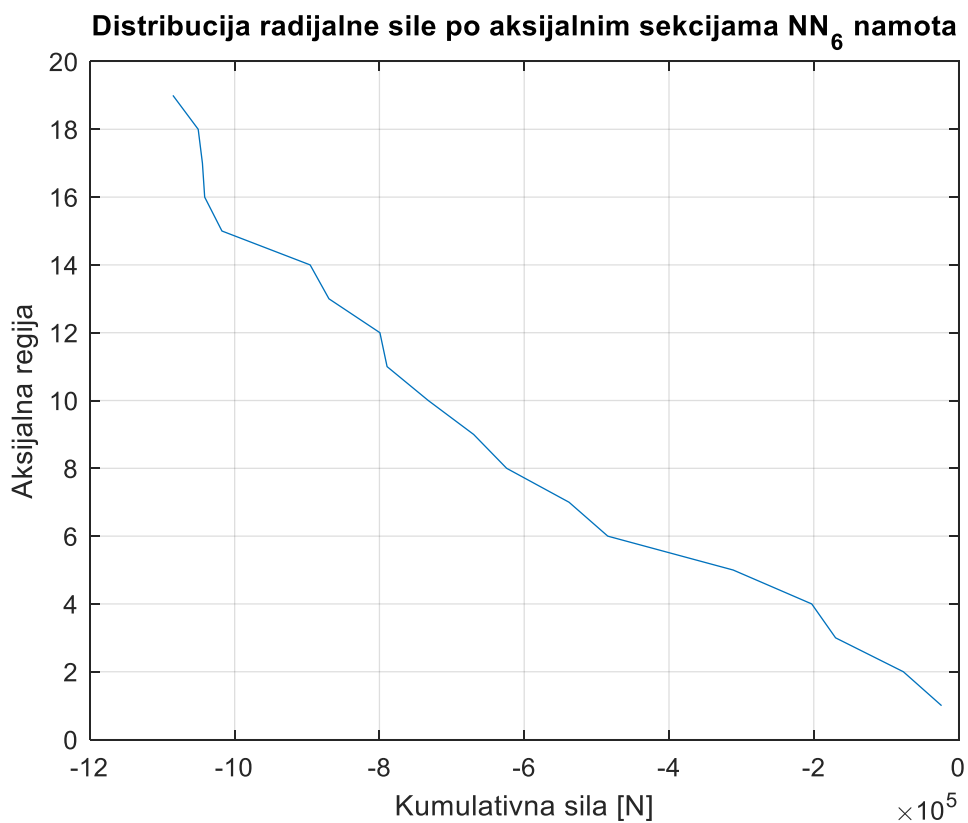
Slika 2.116 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN₅ namot



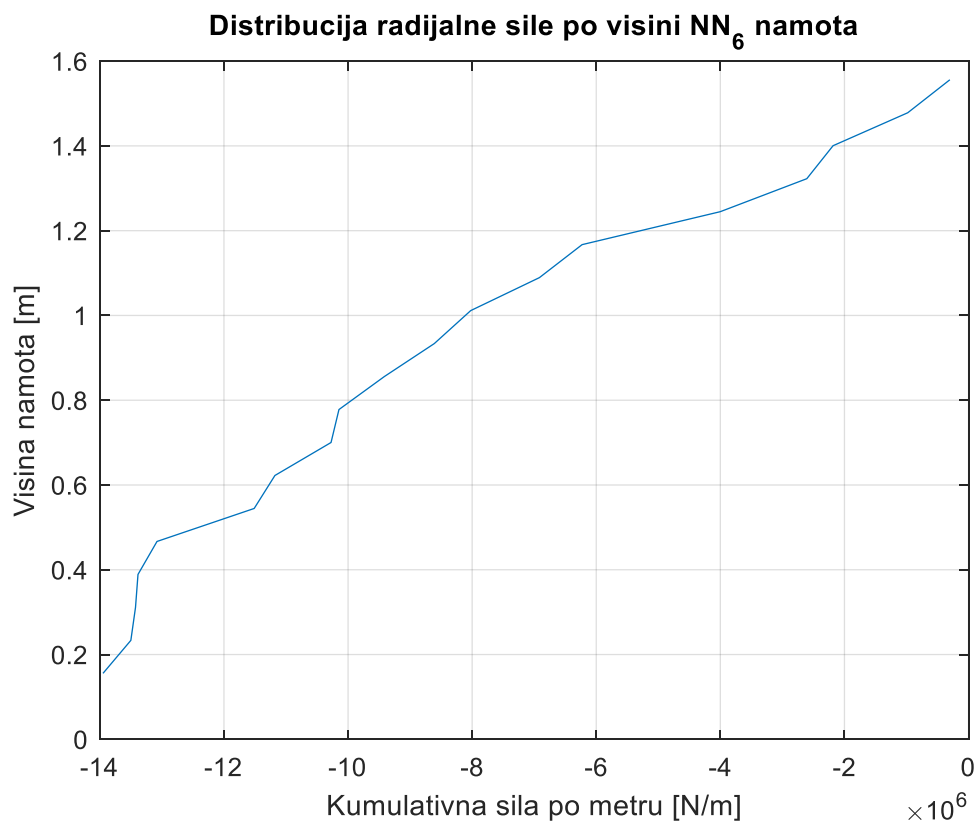
Slika 2.117 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₅ namot



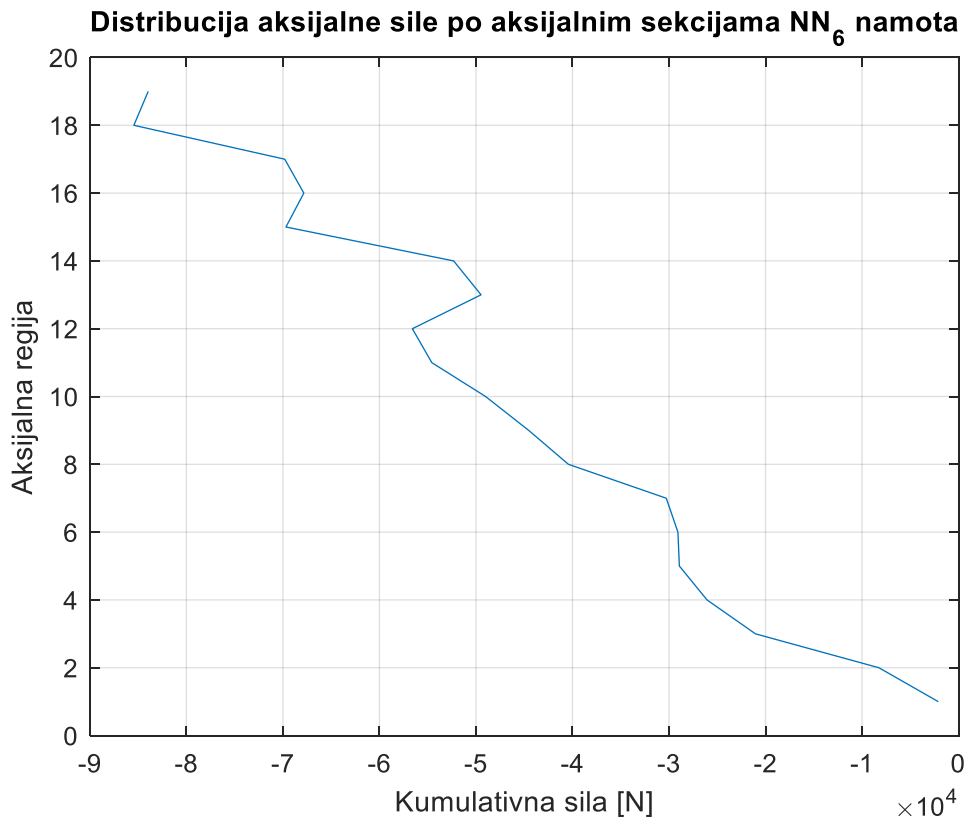
Slika 2.118 Mesh NN₆ namota



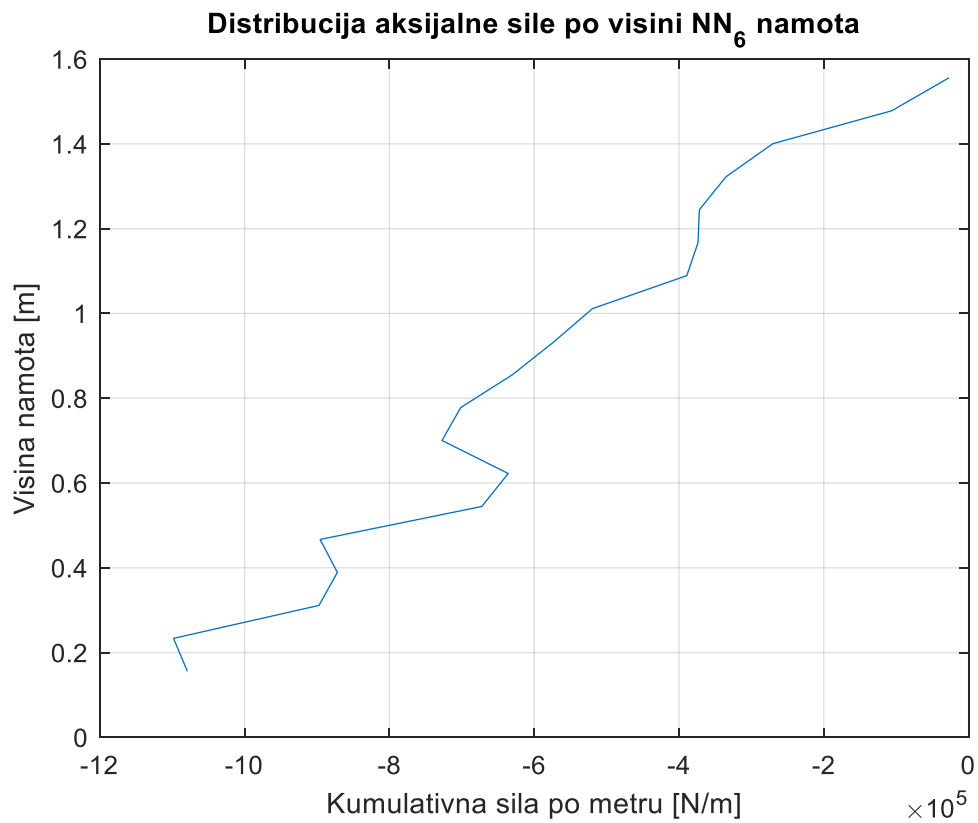
Slika 2.119 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN₆ namot



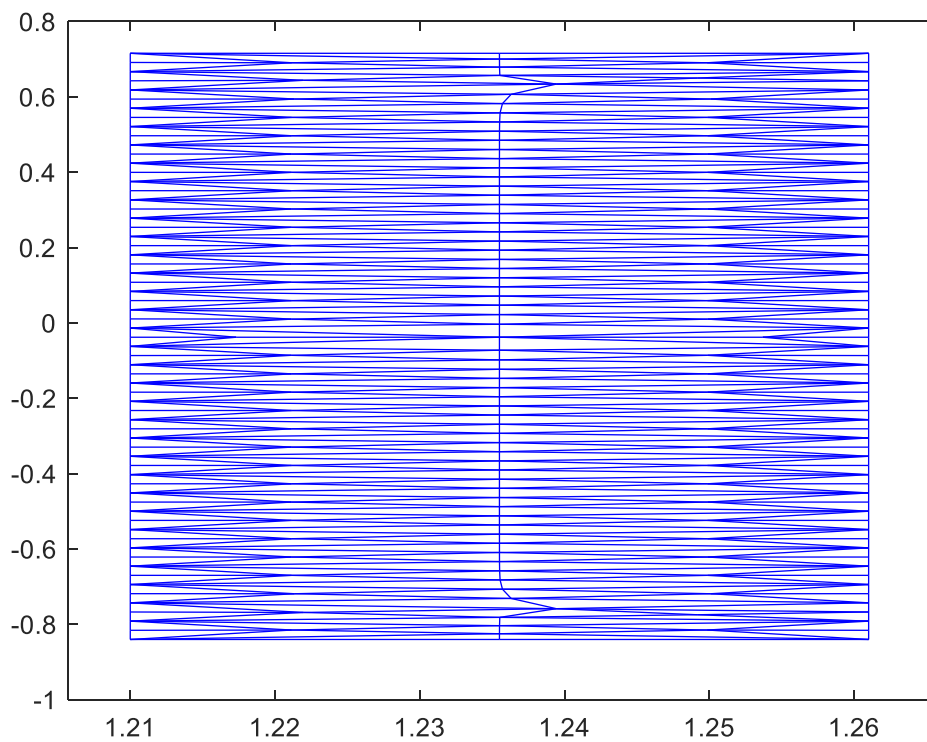
Slika 2.120 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₆ namot



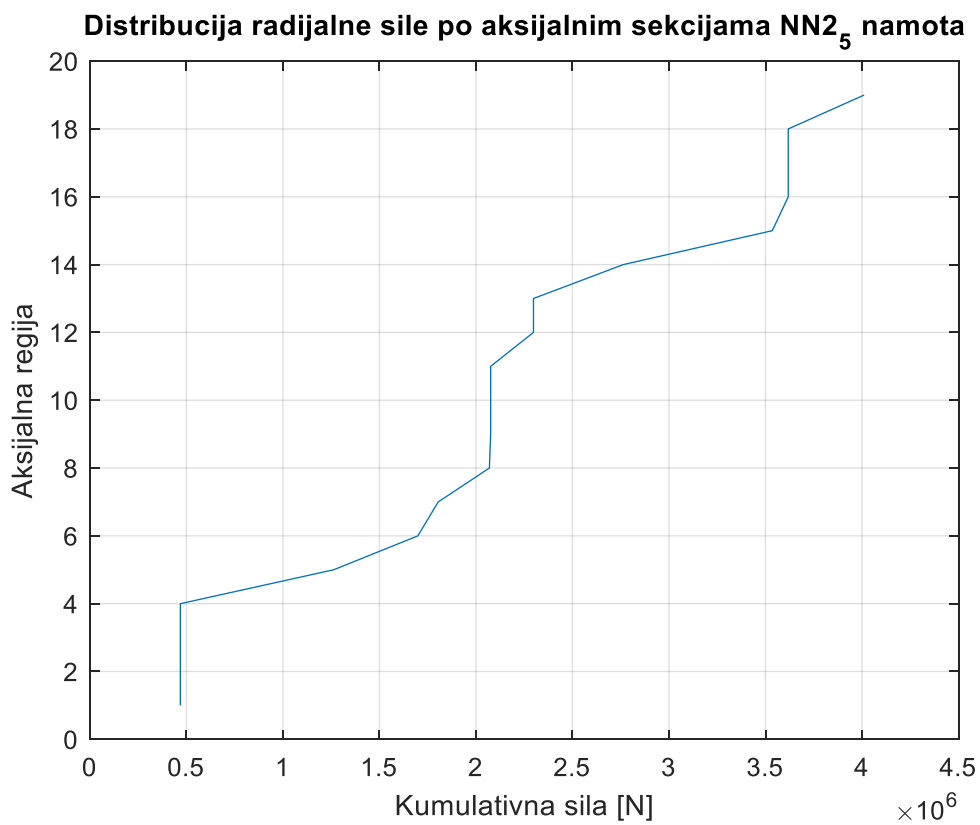
Slika 2.121 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN₆ namot



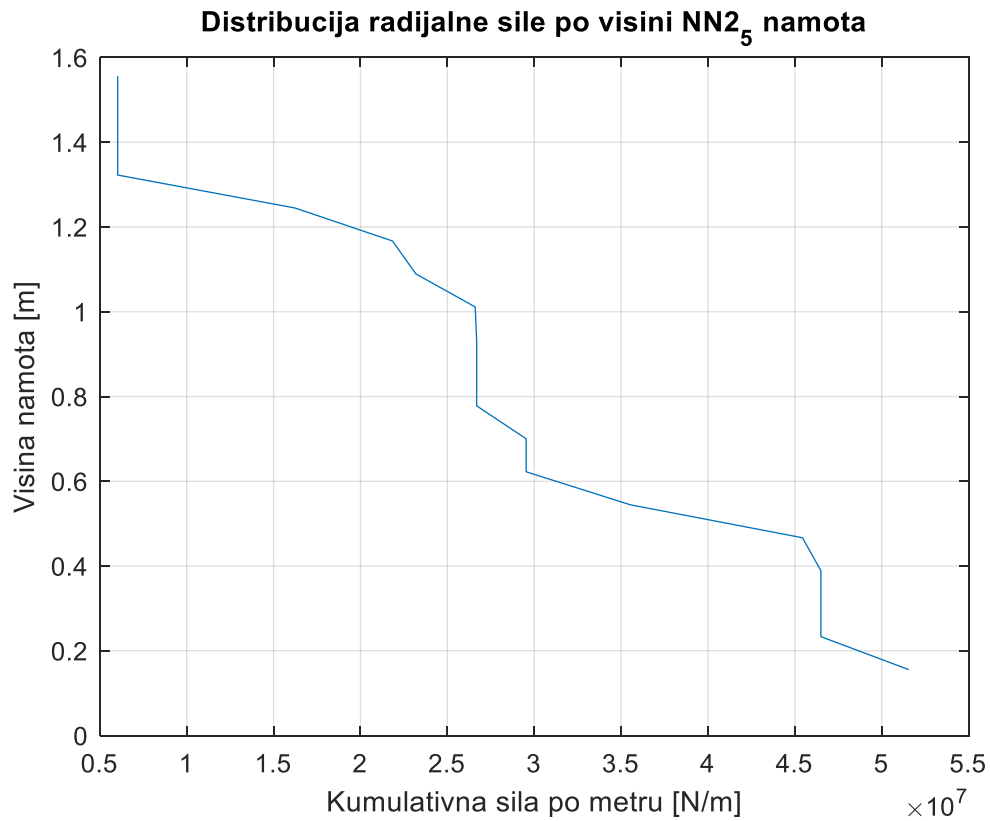
Slika 2.122 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN₆ namot



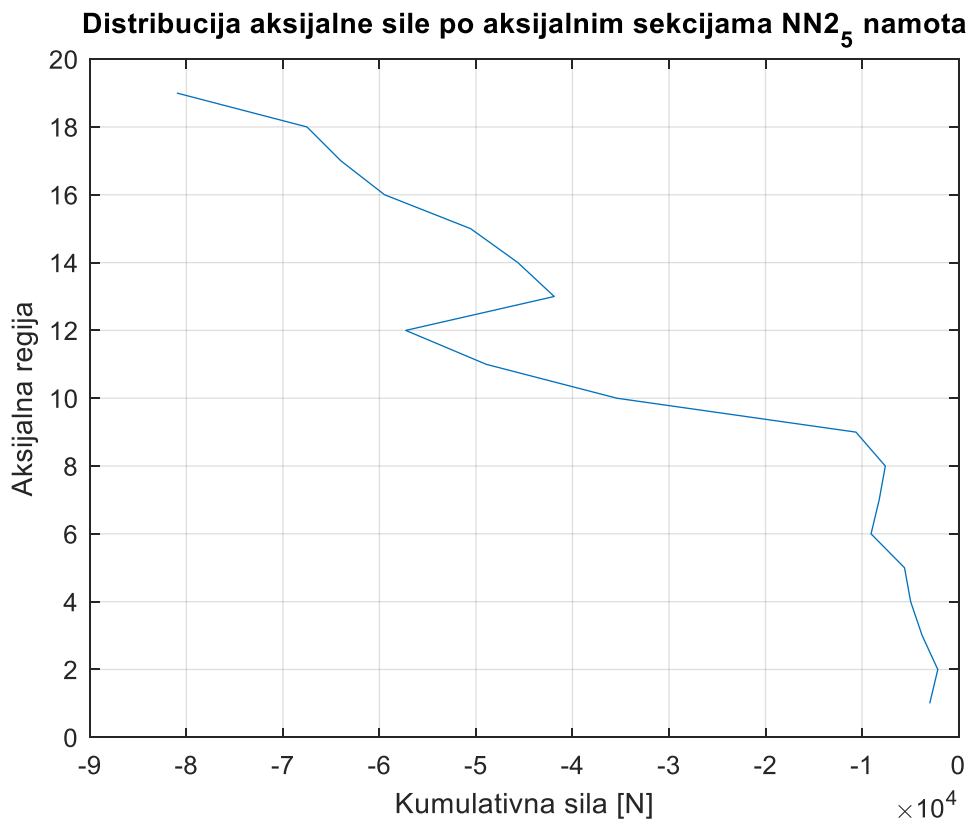
Slika 2.123 Mesh NN2_5 namota



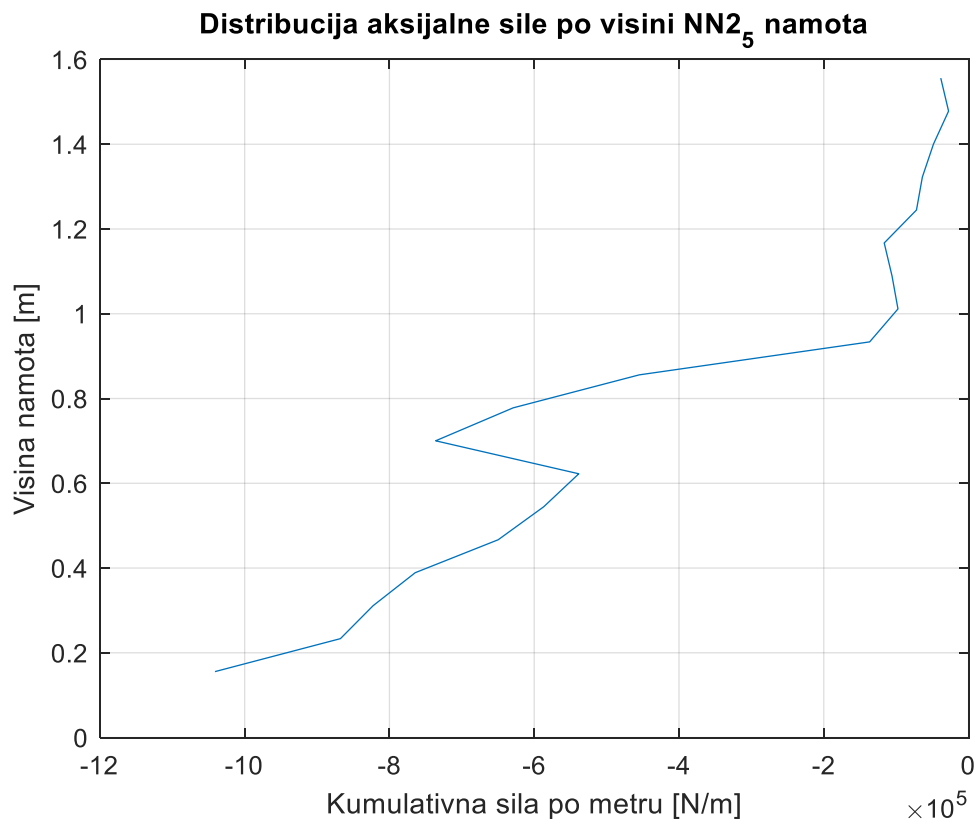
Slika 2.124 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN2₅ namot



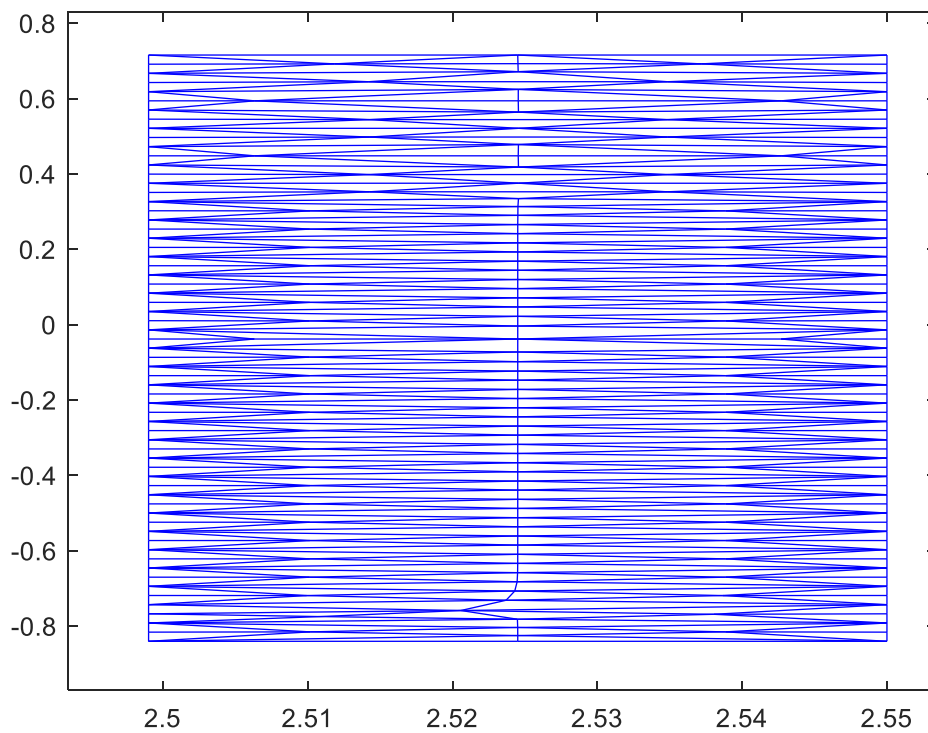
Slika 2.125 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN2₅ namot



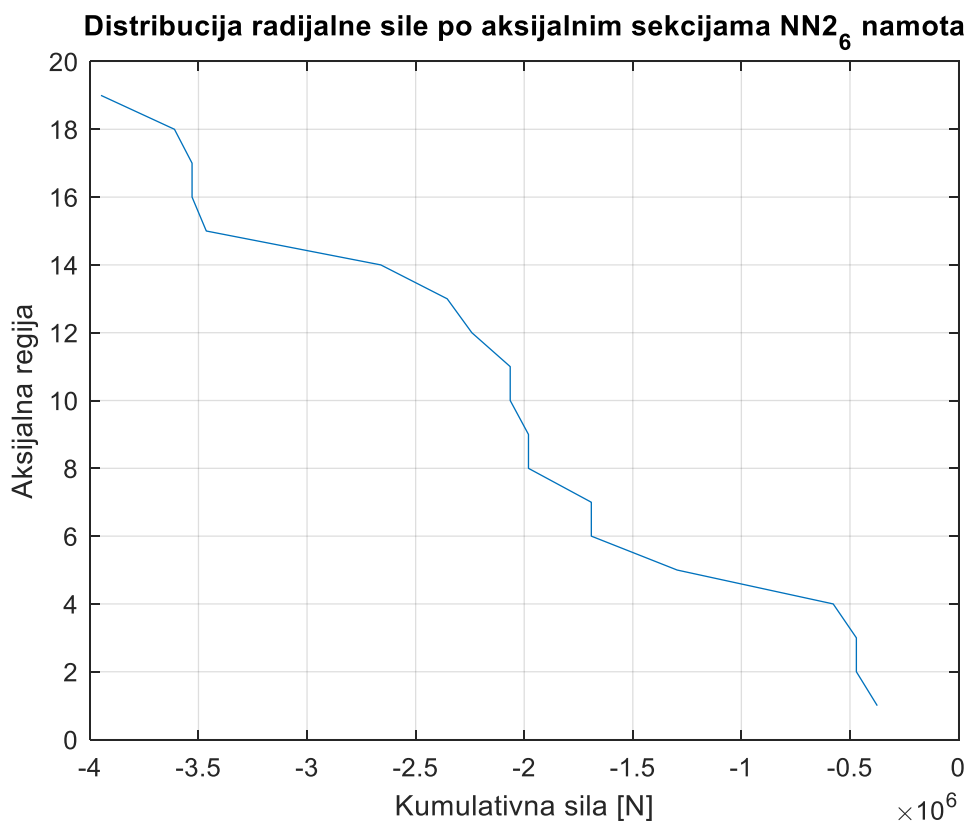
Slika 2.126 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN2₅ namot



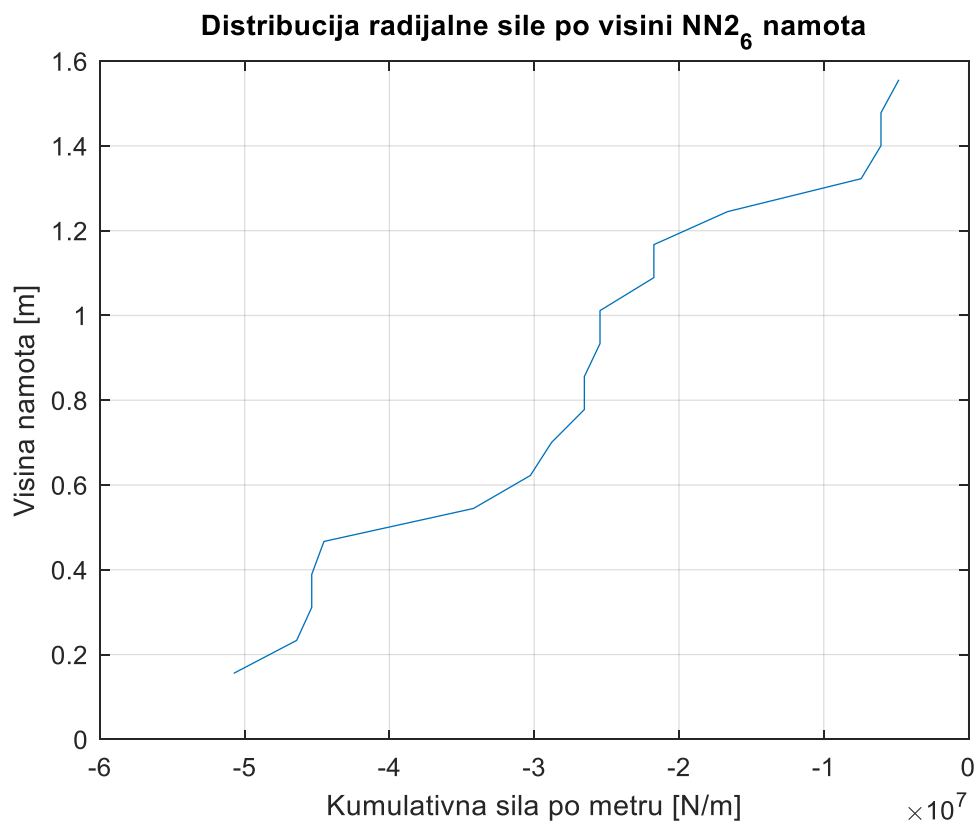
Slika 2.127 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN2₅ namot



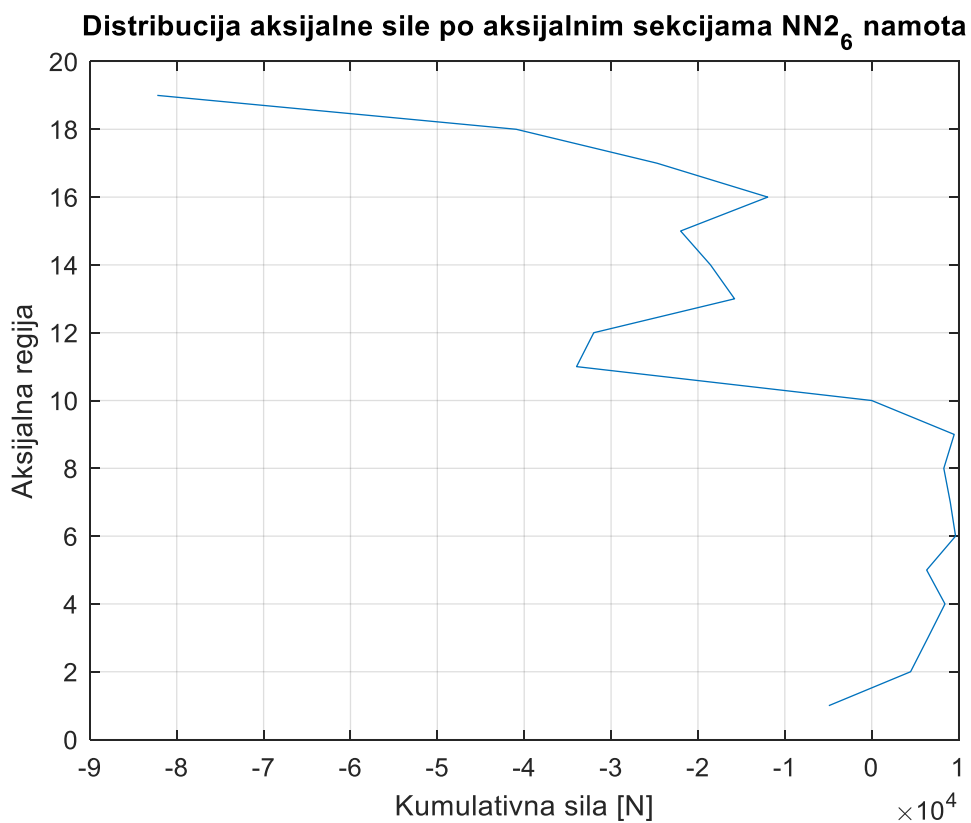
Slika 2.128 Mesh NN2₆ namota



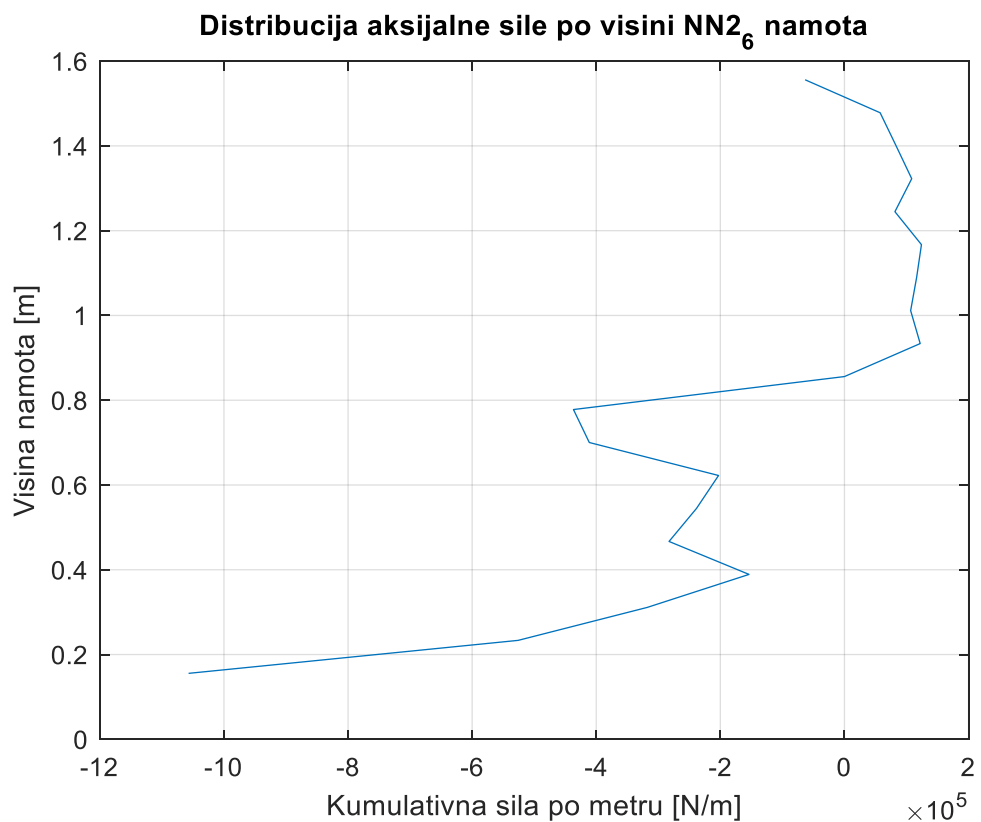
Slika 2.129 Raspodjela kumulativne radijalne sile po aksijalnim regijama za NN2₆ namot



Slika 2.130 Kumulativna radijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN2₆ namot



Slika 2.131 Raspodjela kumulativne aksijalne sile po aksijalnim regijama za NN2₆ namot



Slika 2.132 Kumulativna aksijalna sila po metru u ovisnosti o visini namota za NN2₆ namot

Iz priloženih slika vidljive su ovisnosti radijalnih i aksijalnih sila o aksijalnim regijama, to jest o visini namota. Naime, kod VN1 namota može se uočiti smanjenje radijalne sile s porastom visine namota (Slika 2.45). Aksijalna sila za VN1 namot najveća je oko šeste i petnaeste regije namota pri glavnom kanalu, dok je uz njegovu donju stranu približno jednaka 0 (Slika 2.46). Radijalna sila VN2 namota raste s visinom namota, a aksijalna fluktuirá - niže vrijednosti su uočljive pri sredini namota (Slika 2.50, Slika 2.52). Za VN3 namot vrijedi da radijalna sila raste s povećanjem visine, kao i aksijalna. Najmanja vrijednost nalazi se pri početku namota (Slika 2.55, Slika 2.57). Radijalna sila VN4 namota također raste s višim aksijalnim regijama, a aksijalna je sila najveća oko središta namota (Slika 2.59, Slika 2.61). Kod VN5 namota uočljivo je da radijalna komponenta pada s povećanjem visine, dok aksijalna ima niže vrijednosti blizu sredine namota (Slika 2.65, Slika 2.66). Aksijalna sila VN6 namota je najveća pri donjem dijelu namota, dok radijalna pada s njegovom visinom (Slika 2.70, Slika 2.72). Za NN1 namot vrijednost radijalne komponente pada s visinom, dok je aksijalna komponenta također najveća pri dnu namota, kao i u prethodnom slučaju (Slika 2.75, Slika 2.77). Aksijalne se sile kod NN2 namota smanjuju visinom, što također vrijedi i za radijalne (Slika 2.80, Slika 2.82). Kod NN2_1 namota vrijedi da su i aksijalne i radijalne sile manje što je namot viši, a navedeno vrijedi i za NN2_2 namot (Slika 2.85, Slika 2.87, Slika 2.90, Slika 2.92). Kod NN3 vrijedi porast vrijednosti radijalne sile s visinom, dok je aksijalna sila najveća na polovini namota (Slika 2.95, Slika 2.96). Radijalna sila pada s visinom, dok je aksijalna najveća pri dnu NN4 namota (Slika 2.100, Slika 2.102). Za namote: NN2_3, NN2_4, NN5, NN6, NN2_5 i NN2_6 vrijedi da su njihove radijalne sile i aksijalne sile najveće pri dnu namota, a porastom visine njihove se vrijednosti smanjuju (Slika 2.105, Slika 2.107, Slika 2.110, Slika 2.112, Slika 2.115, Slika 2.117, Slika 2.120, Slika 2.122, Slika 2.125, Slika 2.127, Slika 2.130, Slika 2.132).

Iz navedenih se grafova može uočiti sličnost s referentnim oblicima, no većina grafova se dosta razlikuje radi nesavršenosti i jednostavnosti modela transformatora te aproksimacija koje su korištene pri njegovom modeliranju (Slika 2.37, Slika 2.38, Slika 2.39, Slika 2.40).

U nastavku se daje uvid u bitne vrijednosti radijalnih i aksijalnih sila u namotima te njihov tablični prikaz (Tablica 2.3).

Tablica 2.3 Radijalne i aksijane sile u namotima

Namot	Max vrijednost srednje radijalne sile [MN/m]	Max vrijednost srednje aksijalne sile [kN]	Srednja vrijednost kumulativne aksijalne sile [kN]	Max vrijednost aksijalne sile [kN/m]
VN1	-6.2136	111.05	13.503	-868.09
VN2	62.694	232.8	109.61	3000.1
VN3	-12.891	402.43	238.69	5185.9
VN4	259.20	514.84	224.24	6634.6
VN5	-3.2046	155.28	86.643	2001.0
VN6	63.512	94.227	-1.4891	1214.3
NN_1	15.348	25.825	-27.910	331.94
NN_2	-0.2225	4.6005	-36.381	59.132
NN2_1	51.081	18.758	-11.254	241.10
NN2_2	-5.5728	7.9189	-24.128	101.79
NN3	61.434	-15.090	-253.49	-193.96
NN4	-1.0247	25.705	-173.06	330.40
NN2_3	203.20	121.28	-88.376	1558.9
NN2_4	-22.652	123.53	-70.765	1587.8
NN5	15.283	-6.5903	-33.448	-84.708
NN6	-0.30141	-2.0982	-45.755	-26.969
NN2_5	51.555	-2.1458	-31.927	-27.581
NN2_6	-4.8117	9.6567	-11.834	124.12

Iz tablice 2.3 može se iščitati kako su najveće srednje sile po iznosu zapravo radijalne sile u VN namotima. Maksimalna vrijednost je u VN4 namotu i iznosi 259.2 MN/m. Što se tiče srednjih aksijalnih sila, najveće su u VN3 i VN4 namotu te redom iznose 402.43 kN i 514.84 kN. Razlog tomu je što namoti VN3 i VN4 zajedno predstavljaju „V“ svitak koji je omotan oko srednjeg stupa transformatora. Kroz njega teku najveće struje, a budući da su sile proporcionalne njenom kvadratu, očekivano je da će iznosi sila koje djeluju na ta dva dijela namota biti veliki (Slika 2.28).

2.4. Promjena geometrijskih parametara i parametara namota te njihov utjecaj na elektromagnetske izračune

U ovom je poglavlju tablično prikazana promjena parametara transformatora i njihov utjecaj na gubitke u željezu, struju magnetiziranja, ulančeni tok te napon kratkog spoja (Tablica 2.4).

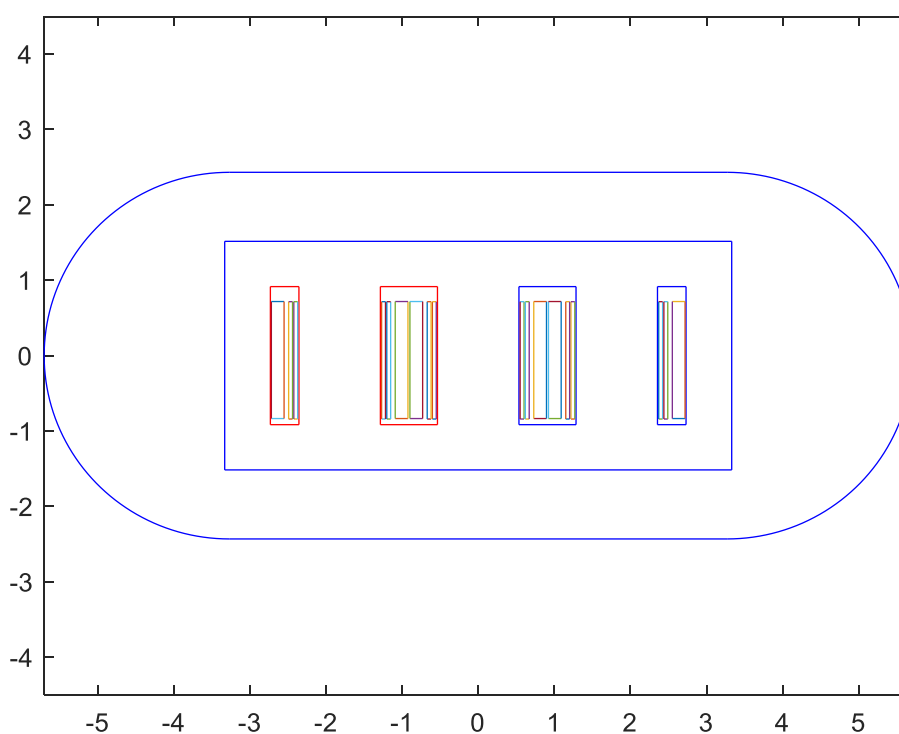
Tablica 2.4 Promjena parametara transformatora i utjecaj na elektromagnetske izračune

Promijenjen parametar	Pokus praznog hoda		Pokus kratkog spoja	
	P_0 [kW]	I_0 [A]	ψ_{sr} [Wb]	$u_{k\%}$ [%]
/	84.67	0.5006	65.2656	14.7973
Povećana visina VN namota za 148 mm	84.73	0.5010	68.7413	15.5854
Smanjena visina VN namota za 148 mm	84.63	0.5008	72.0806	16.3425

Povećana visina NN namota za 144 mm	84.47	0.5005	66.5198	15.0817
Smanjena visina NN namota za 144 mm	84.75	0.5008	74.3387	16.8545
Povećana visina VN namota za 148 mm, a NN za 144 mm	84.63	0.5030	59.7404	13.5447
Smanjena visina VN namota za 148 mm, a NN za 144 mm	84.67	0.5012	69.8103	15.8278
Povećana visina prozora za 169 mm	88.37	0.5247	58.0645	13.1647
Smanjena visina prozora za 169 mm	80.85	0.4763	71.0923	16.1184
Povećana širina prozora za 190 mm	87.71	0.5181	63.8445	14.4752
Smanjena širina prozora za 60 mm ³	83.66	0.4945	63.9774	14.5053

³ Vrijednost koja je uzeta za smanjenje širine prozora nije identična onoj koja je uzeta za njegovo proširenje zbog geometrijskih razloga, to jest, u slučaju smanjena širine prozora za 190 mm, VN namoti dviju faza bi se međusobno preklapali.

Širina jarma povećana za 200 mm	74.33	0.3557	63.9239	14.4932
Širina jarma smanjena za 200 mm	113.56	125.3775	63.9269	14.4939



Slika 2.133 Transformator čija je širina glavnih prozora smanjena za 60 mm

Promjena visine namota pretežito utječe na vrijednosti dobivene pokusom kratkog spoja. Naime, povećanjem i smanjenjem visine VN i NN namota, povećava se i napon kratkog spoja i vrijednost ulančenog magnetskog toka. Ove dvije vrijednosti brže rastu prilikom smanjenja visine namota, nego kod njihovog povećanja. Što se tiče gubitaka u željezu i struje magnetiziranja, iznosi se pretjerano ne razlikuju od početnih.

Povećanjem i smanjenjem visine prozora transformatora automatski se povećavala/smanjivala i visina jezgre u glavnom presjeku transformatora. Vidljive su velike promjene u sva četiri navedena parametra koja se proučavaju.

Velike se fluktuacije u iznosu gubitaka u željezu te struje magnetiziranja mogu uočiti prilikom smanjenja/povećanja širine glavnih prozora transformatora. Vrijednosti ulančenog magnetskog toka i napona kratkog spoja ne razlikuju se toliko od inicijalnih vrijednosti.

Najveće se razlike u struji magnetiziranja i gubitcima u željezu mogu uočiti prilikom smanjenja širine jarma. Gubici su narasli za 134%, dok se struja magnetiziranja povećala otprilike 250 puta. Naime, budući da kroz jaram prolazi magnetski tok, smanjenjem njegove širine smanjuje se područje minimalne reluktancije (željezo jezgre je visoko permeabilno), što dovodi do povećanja gubitaka te viših iznosa struja. Vrijednosti napona kratkog spoja i ulančenog magnetskog toka ostale su približno jednake.

Zaključak

Energetski transformator ključan je element elektroenergetskog sustava. Njegovo projektiranje zahtjeva posebnu pažnju, pretežito prilikom obuhvaćanja svih zahtjeva naručitelja. U fazi projektiranja računaju se parametri nadomjesne sheme transformatora. Ukupne gubitke u transformatoru i napon kratkog spoja potrebno je odrediti pokusima praznog hoda i kratkog spoja.

U uvjetima kratkog spoja, javljaju se elektromagnetske sile koje djeluju na namote i mogu negativno utjecati na njegovu cjelovitost. Prilikom utjecaja radijalnih sila dolazi do izvijanja, a kod aksijalnih sila do izvrtanja vodiča namota. Radi toga je poželjno odrediti njihove iznose i grafički prikazati područja koja su obuhvaćena njihovim djelovanjem.

U ovom je radu opisan postupak modeliranja 2D modela trofaznog peterostupnog energetskog transformatora u programskom sučelju MATLAB, automatizirano povezivanje s programskim sučeljem MagNet te izvršavanje simulacija praznog hoda i kratkog spoja radi izračuna parametara nadomjesne sheme transformatora. Određene su sile u kratkom spoju te njihovi maksimalni iznosi za svaki dio svitka transformatora. Provedena je analiza promjene geometrijskih parametara i parametara namota te njihov utjecaj na elektromagnetske izračune.

U simulacijama je korištena dvodimenzionalna metoda konačnih elemenata. Sve navedeno je potkrijepljeno opisima, slikama te tabličnim i grafičkim prikazima.

Literatura

- [1] Žarko, D., Ćučić, B. *Transformatori u teoriji i praksi*, 1. izdanje. Zagreb: Graphis d.o.o., 2020.
- [2] Kulkarni, S.V., Khaperde, S. A. *Transformer Engineering - Design, Technology and Diagnostics*, 2. izdanje, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2013.
- [3] Žarko, D., Stipetić, S. *Metoda konačnih elemenata: teorija i praktične primjene u elektrostrojarstvu*, prezentacija iz kolegija Računalno modeliranje električnih strojeva, FER (2023./2024.). Poveznica: fer.unizg/RMES_MKE_2023_2024_P1.pdf; pristupljeno 12. lipnja 2024.
- [4] Harish, A., *Finite Element Method – What Is It? FEM and FEA Explained*, Simscale blog, (14. ožujka 2024.). Poveznica: <https://www.simscale.com/blog/what-is-finite-element-method/>; pristupljeno 9. lipnja 2024.
- [5] Žarko, D., *Osnovna teorija transformatora*, prezentacija iz kolegija Generatori i transformatori, FER (2022./2023.). Poveznica: fer.unizg/GiT_2022_2023_Transformatori_1.pdf; pristupljeno 25. svibnja 2024.
- [6] Dawood, K, Komurgoz, G., Isik, F. *Computation of the Axial and Radial forces in the Windings of the Power Transformer*, The 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA), Elazig, Turkey (2019), IEEE Xplore; Poveznica: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8911132>; pristupljeno 10. lipnja 2024.
- [7] Filipović-Grčić, B., Beus, M., Havelka, J. *Elektroenergetski sustavi 1 – Proračun struja kratkog spoja*, prezentacija iz kolegija Elektroenergetski sustavi 1, FER (2024.). Poveznica: fer.unizg./EES1%20predavanje%205.pdf; pristupljeno 7. lipnja 2024.

Sažetak

Izračun parametara peterostupnog transformatora pomoću metode konačnih elemenata

Inge Mandarić

Jedan od najbitnijih postupaka projektiranja energetskog transformatora jest njegovo modeliranje. U postupku modeliranja, određuju se vrijednosti parametara nadomjesne sheme – gubici u željezu, struja magnetiziranja, napon kratkog spoja, omski i ukupni gubici transformatora. Većinu navedenih vrijednosti nije moguće jednostavno analitički izračunati, stoga se koriste računalni alati prilagođeni za kompleksne proračune. Jedna od najpoznatijih i najpopularnijih metoda današnjice jest metoda konačnih elemenata (MKE). Opisivanjem željenog modela pomoću parcijalnih diferencijalnih jednadžbi te njihovo rješavanje računalnim programima poput MagNet-a znatno se olakšava i ubrzava proces projektiranja. Cjelokupni postupak može se automatizirati uz MATLAB programsko sučelje. Pokusi praznog hoda i kratkog spoja jednostavno se simuliraju, a podaci dohvaćaju i spremaju u strukture definirane u MATLAB-u. Time se vrijednosti dobivene simulacijama mogu lako obraditi te grafički prikazati. Simulacijom kratkog spoja pomoću FEM-a moguće je analizirati elektromagnetske sile koje djeluju na namote transformatora. Radijalne i aksijalne elektromagnetske sile izvijanjem i izvrtnjem vodiča namota stvaraju štetu pri velikim strujama kratkog spoja. Ovaj je rad obuhvatio sve navedene postupke modeliranja, koji su potkrijepljeni tabličnim i grafičkim prikazima rezultata.

Ključne riječi: energetski transformator, modeliranje, metoda konačnih elemenata, FEM, MATLAB, MagNet, pokus praznog hoda, pokus kratkog spoja, parametri nadomjesne sheme, elektromagnetske sile u kratkom spoju

Summary

Five-limb transformer parameter calculation using finite element method

Inge Mandarić

Modeling is one of the most important procedures in transformer design. In the modeling process, the parameter values of the equivalent circuit are determined, including iron losses, magnetizing current, short-circuit voltage, ohmic and total transformer losses. Most of the listed quantities cannot be easily calculated using analytical methods. Therefore, computer tools, which are created for complex calculations, are used. One of the most famous and popular methods today is the finite element method (FEM). Describing the desired model using partial differential equations and solving them with computer programs such as MagNet greatly simplifies and speeds up the design process. The entire procedure can be automated with the MATLAB programming interface. No-load and short-circuit experiments are easily simulated, and the data is retrieved and stored in structures defined in MATLAB. In this way, the values obtained from the simulations can be easily processed and displayed graphically. By simulating a short circuit using FEM, it is possible to analyze the electromagnetic forces acting on the transformer windings. Radial and axial electromagnetic forces can buckle and compress the windings, which can cause damage at high values of the short-circuit currents. This paper included all the mentioned modeling procedures, which are supported by tabular and graphical representations of the results.

Key words: power transformer, modeling, finite element method, FEM, MATLAB, MagNet, no-load test, short-circuit test, parameters of the equivalent circuit, electromagnetic forces in short-circuit

Skraćenice

Abecednim redom:

FEA	<i>Finite Element Analysis</i>	Analiza konačnih elemenata
FEM	<i>Finite Element Method</i>	vidi pod: MKE
KS	<i>Kratki spoj</i>	pokus kratkog spoja
MKE	<i>Metoda konačnih elemenata</i>	metoda za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednažbi
NN	<i>Niskonaponski</i>	niskonaponski (namot transformatora)
PDE	<i>Partial Differential Equations</i>	parcijalne diferencijalne jednažbe
PH	<i>Prazni hod</i>	pokus praznog hoda
RMS	<i>Root Mean Square</i>	efektivna vrijednost
VN	<i>Visokonaponski</i>	visokonaponski(namot transformatora)