

# Modeliranje reluktantnih strojeva programskim paketom ANSYS

---

Živković, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:847890>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-21**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**MODELIRANJE RELUKTANTNIH STROJEVA  
PROGRAMSKIM PAKETOM ANSYS**

**Završni rad**

**Luka Živković**

**Osijek, 2022.**

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
<b>2. ELEKTRIČNI STROJEVI.....</b>	<b>2</b>
2.1. Općenito o električnim strojevima .....	2
2.2. Općenito o reluktantnim strojevima i njihove varijacije .....	3
2.2.1. Primjeri reluktantnih sinkronih strojeva i njihove karakteristike .....	4
2.2.2. Primjeri reluktantnih strojeva za modulaciju magnetskog toka i njihove karakteristike .....	5
<b>3. POTREBNE FIZIKALNE VELIČINE .....</b>	<b>8</b>
3.1. Električne veličine .....	8
3.2. Magnetske veličine.....	10
<b>4. ANALIZA MAGNETSKIH KRUGOVA .....</b>	<b>13</b>
4.1. Osnovne formule i proračun .....	13
4.2. Određivanje relativne permeabilnosti jezgre materijala .....	19
4.3. Računanje sile u magnetskom krugu .....	23
<b>5. SOLENOID.....</b>	<b>24</b>
5.1. Tipovi solenoida .....	24
5.2. Primjene solenoida.....	25
<b>6. SIMULACIJA .....</b>	<b>26</b>
<b>7. ANSYS .....</b>	<b>32</b>
<b>8. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>33</b>

**LITERATURA.....**

**POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA .....**

**SAŽETAK .....**

**ABSTRACT .....**

**PRILOZI .....**

# 1. UVOD

Razvoj tehnologije znači razvoj za cijelu granu elektrotehnike. Razvojem tehnologije dolazimo do novih i boljih programa pomoću kojih se mogu raditi simulacije. Računalne simulacije znatno ubrzavaju proračune koji bi inače bili ekstremno vremenski zahtjevni. Jedan od tih programa je Ansys Maxwell. Pomoću Maxwella možemo jako brzo i jednostavno raditi simulacije u trodimenzionalnom prostoru. Temelj Maxwella su Maxwellove jednačbe. Mogućnosti programa Maxwell su ogromne i njegova primjena je široka.

## 1.1. Zadatak završnog rada

U završnom radu potrebno je izložiti fizikalne osnove i modele kojima je opisan rad reluktantnih strojeva. Opisati poznatije izvedbe reluktantnih strojeva (motora i aktuatora). Opisati njihove karakteristike i područja primjene. U dogovoru s mentorom odabrati primjere za modeliranje i analizu. Korištenjem programskog paketa ansys potrebno je modelirati rad, sile i zakretne momente odabranih reluktantnih strojeva. Prema mogućnostima rezultate simulacije provjeriti empirijskim, aproksimativnim analitičkim izrazima ili mjerenjem. Izlaganje je potrebno poduprijeti izračunima, simulacijama, grafičkim prikazima i shemama.

## 2. ELEKTRIČNI STROJEVI

### 2.1. Općenito o električnim strojevima

Električni strojevi omogućuju pretvaranje električne energije (snage) u mehaničku energiju (snagu) kada rade u motorskom načinu rada, i obrnuto u generatorskom načinu rada [1]. Ova dvostruka pretvorba energije omogućuje skladištenje energije u obliku magnetske energije smještene uglavnom u zračnom razmaku između statorskih (fiksno dio) i rotorskih (pokretni dio) dijelova te u trajnim magnetima (ako ih ima). Energija je sposobnost zatvorenog sustava da proizvede mehanički (korisni) rad [1]. U industriji stalno pokušavamo kontrolirati količinu potrošene energije kako bi smo došli do bolje produktivnosti i kako bi smo sačuvali što više energije za proizvode ili usluge koje nudimo. Za strojeve je jako bitna kontrola temperature i samog kretanja strojeva. Glavni oblici energije su mehanička (kinetička i potencijalna), toplinska, elektromagnetska (i elektrostatička) i elektrokemijska [1]. Prema zakonu očuvanja energije, energija se ne može stvoriti ili nestati, već se samo pretvarati iz jednog oblika u drugi [1]. Osim toga, svaki oblik energije ima svoje temeljne zakone koji upravljaju njenom pretvorbom i kontrolom, što je otkriveno raznim eksperimentima tijekom posljednja tri stoljeća. Pretvorba energije počinje s primarnim izvorom što mogu biti npr. fosilna goriva, solarna energija, energija vjetra, vode, geotermalna energija, itd...

U procesu pretvorbe energije električni strojevi se koriste za proizvodnju električne energije, koja je vrlo fleksibilna u transportu i prilično čista (ekološki), te omogućuje brzu digitalnu kontrolu [1]. Električni strojevi nisu uključeni samo u pretvorbi solarne fotonaponske energije (manje od 1% ukupne). Električni strojevi su sveprisutni: postoji jedan u svakom digitalnom satu, tri (zvučnik, mikروفon i pokretač zvona) u mobilnom telefonu, deset ili više u bilo kojoj kući (za razne uređaje) i u automobilima te stotine u vlakovima, tramvajima, sustavima podzemne željeznice, brodovima, zrakoplovima i svemirskim misijama. Ekstremno su bitni u većini industrijskih procesa koji podrazumijevaju kontrolu pokreta za proizvodnju svih predmeta koji doprinose našem materijalnom blagostanju. Postojeći električni strojevi (bazirani na tehnologijama koje su započele oko 1830. godine), generatori i motori, budući da su reverzibilni, mogu se klasificirati po principu rada u tri glavne (standardne) kategorije [1]:

- Strojevi s četkicama i komutatorom (fiksno magnetsko polje)
- Indukcijski (pokretno magnetsko polje) strojevi
- AC strojevi
- DC i AC (sinkroni) strojevi s magnetskim poljem

Svaka od ovih kategorija strojeva ima svoje prednosti i mane. Razvoj visokoenergetskih permanentnih magneta u posljednjim desetljećima—temeljen na sinteriranom samarij-kobaltnom magnetu (do 300°C) i neodimijskom magnetu (do 120°C), s trajnim gustoćama magnetskog toka iznad 1,1 T i koercitivnim silama od oko (i više) 900 kA/m (permeabilnosti  $\mu_{rec} = 1,05\text{--}1,07 \mu_0$  pri čemu je  $\mu_0$  zračna magnetska permeabilnost:  $\mu_0 = 1,256 \times 10^{-6}$  H/m), koji su sposobni za veliko skladištenje magnetske energije u iznosima od 210 do 250 kJ/m<sup>3</sup>, doveli su do ogromnog napretka u visokoučinkovitim električnim generatorima i motorima, kako u linijskom pokretanju tako i pri promjenjivoj brzini (sa statičkom kontrolom pretvarača snage) električnih pogona [1].

## **2.2. Općenito o reluktantnim strojevima i njihove varijacije**

Kada vlastiti (i međuinaktivitet, ako postoji) inaktivitet ovisi o položaju osi rotora, čak i u odsutnost permanentnog magneta (ili istosmjerne pobude na rotoru ili statoru), stroj se naziva reluktantnim i sposoban je proizvesti zakretni moment jer, implicitno, magnetska energija (koenergija) varira s položajem rotora [1]. Reluktantnom stroju mogu pomoći permanentni magneti kako bi došao do boljih performansi, budući da će potrebna energija za magnetiziranje permanentnih magneta biti višestruko zamijenjena gubitcima u bakru u sustavu istosmjerne uzbude tokom radnog vijek stroja. Svi reluktanti strojevi koji su izumljeni u zadnja dva desetljeća se mogu klasificirati u dvije kategorije [1]:

- Reluktantni sinkroni strojevi
- Reluktantni strojevi za modulaciju magnetskog toka

Reluktantni sinkroni strojevi imaju jednoliko urezanu jezgru statora s raspoređenim namotima spojenim u dva (razdvojena faza), tri ili više faza, napajani sa sinusoidnim strujama koje proizvode, u osnovi, pokretnu magnetomotorsku silu [1]. Reluktancija ili magnetski otpor je promjenjiv zbog rotora. Rotor s promjenjivim magnetskim otporom može biti ugrađen u nekoliko konfiguracija [1]:

- S pravilnim slojevima i koncentriranom ili distribuiranom magnetskom anizotropijom
- S aksijalno-laminiranim stupovima s prolaznim vratilom i nepropusnom osovinom

### 2.2.1. Primjeri reluktantnih sinkronih strojeva i njihove karakteristike

Velika magnetska anizotropija (diferencijal induktivnosti magnetizacije) u dvije ortogonalne osi potrebna je za visoku/konkurentnu gustoću momenta, dok je za prihvatljivi faktor snage potreban visoki omjer isturenosti  $(L_{dm} + L_{sl})/(L_{qm} + L_{sl}) = L_d/L_q$ , a time i širi raspon brzine konstantne snage [1]. Prvi reluktantni sinkroni strojevi, koji su koristili istaknute (standardne) polove rotora, imaju nizak ukupni omjer isturenosti  $L_d/L_q \approx 1.8-2.5$ , ali njihova jednostavnost i robusnost rotora pokazali su se praktičnim, uglavnom u aplikacijama male snage (osobito velikih brzina) [1].

Višestruki rotori s barijerom magnetskog toka koji koriste uobičajene laminacije, predložene u kasnim 1950-ima, nedavno su prihvaćeni u industrijskim pogonima do snage od 500 kW u pogonima s promjenjivom brzinom, s 1,5% – 3% većom učinkovitošću od induksijskih motora s istim statorom i s faktorom snage manjim za 8%–10% [1].

Aksijalno laminirani anizotropni rotor još uvijek se smatra manje praktičnim (osim ako je izvedba daleko važnija od početnih troškova i troškova materijala i izrade) jer strujni harmonici magnetskog polja osi statora stvaraju dodatne gubitke u navedenom rotoru [1].

Dok je drugi problem riješen korištenjem tankih proreza (tri do četiri po cijeloj aksijalnoj duljini rotora), prvi problem još uvijek koči njegovu komercijalizaciju.

Reluktantni sinkroni strojevi se također mogu koristiti kao strojevi s linijskim startom (konstantnom brzinom), međutim kavez mora biti dodan na rotor za asinkrono pokretanje. Veća učinkovitost u suvremenim reluktantnim sinkronim strojevima s linijskim pokretanjem (split-faznim i trofaznim) je trenutni cilj, osobito uz pomoć permanentnih magneta (čak i feritnih) od induksijskih motora, ali držanjem početne struje jako niskom [1].

Reluktantni sinkroni strojevi su općenito opremljeni s raspoređenim namotima u statoru za stvaranje veće magnetske anizotropije [1]. Svi reluktantni sinkroni strojevi rade sa sinusoidnim strujama statora. Za promjenjivu brzinu, primjenjuje se kontrola torzije. Reluktantni sinkroni strojevi imaju niži faktor kada rade s promjenjivom brzinom.

Istosmjerni višefazni reluktantni strojevi bez četkica uvedeni su krajem dvadesetog stoljeća i nedavno su oživjeli kada je tolerancija kvarova postala važno praktično pitanje i dosegnute su višefazne inverterske tehnologije. Topologija stroja izvire iz invertnog (zamjenjujućeg)



statora s rotorom lišenog istosmjerne pobude i s četkicama pomaknutim na rubove polova, s mehaničkim komutatorom zamijenjenim s inverterskom kontrolom bipolarnih dvorazinskih struja ravnog vrha [1].

Komutirani reluktancijski strojevi sadrže jednostruku (ili dvostruku) laminiranu jezgru statora. U utorima statora se nalaze zavojnice namotane na zupce ili dijametralne (raspodijeljene) zavojnice. Laminirana jezgra rotora pokazuje istaknute ili raspodijeljene polove anizotropije. Komutirani reluktancijski strojevi imaju robusnu strukturu i nisu skupi, a imaju visoku učinkovitost (da odgovaraju čak i standardima za automobilsku vuču) [1]. Međutim, napajaju se istosmjernom strujom, s jednom ili dvije aktivne faze time stvarajući velik induktivitet.

Primjeri upotrebe reluktantnih motora: signalni uređaji, kontrolni uređaji, automatski regulatori, uređaji za snimanje, satovi, tele pisari, gramofoni, analogna električna brojila, neki dizajni perilica rublja, mehanizmi pogona upravljačke šipke nuklearnih reaktora, električna vozila, električni alati kao što su bušilice, strugovi i tračne pile.

### **2.2.2. Primjeri reluktantnih strojeva za modulaciju magnetskog toka i njihove karakteristike**

Za reluktantne strojeve s modulacijom magnetskog toka bitna su tri dijela [1]:

- uzbuda
- modulator magnetskog toka
- armatura

Najmanje jedan dio treba biti fiksiran (armatura), dok se jedan ili oba druga mogu rotirati. Zakretni moment koji se pojavljuje u takvim strojevima, može se iskoristiti za niske/umjerene brzine. Svi reluktantni strojevi za modulaciju magnetskog toka zahtijevaju potpunu (ili djelomičnu) kontrolu pretvarača snage za rad pri promjenjivoj brzini, a niti jedan nema kavez na rotoru [1]. Najbitnija karakteristika reluktantnog motora za modulaciju magnetskog toka je doprinos nultog i prvog harmonika zračnog rasporeda (proizvedenog modulatorom toka varijabilne reaktancije) interakciji između uzбудnika (općenito s permanentnim magnetima) i armature statora [1]. Povećanje zakretnog momenta (magnetski efekt zupčanika), je glavna prednost reluktantnih strojeva za modulaciju magnetskog toka.

Vernierov stroj je stroj gdje moduliranje magnetskog toka obavljaju otvoreni utori i zupci statora [1]. Dva polna namota statora dovode do povećanja gustoće momenta aktivnog dijela stroja, ali podrazumijevaju dugi kraj spojnih svitaka kako bi se zadržao faktor snage u razumnim granicama.

Postoje reluktantni strojevi s permanentnim magnetima na statoru jer su neki rotori dosta robusni te smještanje permanentnih magneta na statora omogućuje lakšu mehaničku zaštitu i brže hlađenje istih magneta [1]. Imaju nižu učinkovitost pri malim brzinama (zbog gubitaka istosmjerne pobude), ali prihvatljivu učinkovitost tijekom slabljenja magnetskog toka.

Reluktantni strojevi s preokretom magnetskog toka koriste se zbog brže i lakše proizvodnje.

Električni stroj poprečnog magnetskog toka/reluktancije je razvijen u nastojanju da se odvoji dizajn magnetskog kruga (jezgre) i električnog kruga (namota) [1]. Kod ovog stroja kružna fazna zavojnica se postavlja na tri jednofazna stroja postavljena u nizu na vratilo. Obodni svitak obuhvaća sve polove statora, koji su jednaki broju pari polova rotora. Električni stroj poprečnog magnetskog toka/reluktancije s permanentnim magnetima ima veliku gustoću momenta za male nagibe polova za mehaničke zračne raspore od 1-2 mm [1]. Osigurava bolju upotrebu permanentnih magneta, ali dovodi do veće reakcije armature (a time i veće induktivnosti stroja), što podrazumijeva niži faktor snage ili višu regulaciju napona kao autonomni generator.

Reluktantni električni stroj s dvostrukim statorskim namotom bez četkica ima rotor s promjenjivim otporom s istaknutim polovima integriranim u jednoliku jezgru statora koja sadrži dva distribuirana trofazna namota izmjenične struje različitih parova polova [1].

Reluktantni strojevi s magnetskim pogonom koriste magnetski pogon s dva rotora radi povećanja zakretnog momenta [1]. To se postiže s magnetskim zupčanicima. Ostali reluktantni strojevi za modulaciju magnetskog toka koriste jedan rotor gdje je ulogu modulatora magnetskog toka imao stator ili sam rotor. Postoji mnogo topologija koje odgovaraju ovoj denominaciji, a nedavno je predloženo kako se mehanički zupčanci u pogonima s vrlo malim brzinama, s određenom gustoćom zakretnog momenta mogu maknuti. Permanentni magneti su prisutni na statorskim polovima i na rotorima velike brzine. Vanjski rotor je integriran sa statorom koji sadrži permanentne magnete i izmjenični namot koji ima šest zavojnica kao u tipičnom reluktantnom električnom stroju s preokretom toka [1]. Ovdje je

zakretni moment rezultat interakcije između magnetskog polja permanentnih magneta rotora velike brzine i magnetskog polja permanentnih magneta statora kako je modulirano modulatorom magnetskog toka i statorskim namotima [1].

### 3. POTREBNE FIZIKALNE VELIČINE

Kako bi smo mogli raditi s magnetskim krugovima moramo poznavati neke veličine koje su bitne za ponašanje samih magnetskih krugova. U ovom poglavlju će biti objašnjene neke veličine koje će biti potrebne za proračun.

Veličina koju pokušavamo izračunati je sila. Sila je vektorska fizikalna veličina [2]. Opisuje promjene oblika i strukture tijela pod bilo kojim utjecajem [2]. Oznaka je  $F$ . Mjerna jedinica je njutn,  $N$ .

#### 3.1. Električne veličine

Električno polje je električno svojstvo povezano sa svakom točkom u prostoru kada je naboj prisutan u bilo kojem obliku [3]. Veličina i smjer električnog polja izraženi su određenom vrijednošću, koja se naziva jakost električnog polja ili intenzitet električnog polja ili jednostavno električno polje [3]. Poznavanje vrijednosti električnog polja u nekoj točki, bez ikakvog specifičnog znanja o tome što je stvorilo polje, sve je što je potrebno da se odredi što će se dogoditi s električnim nabojima blizu te određene točke [3]. Oznaka intenziteta električnog polja je  $E$ . Mjerna jedinica je volt po metru,  $V/m$ .

Gustoća električnog toka mjera je jakosti električnog polja generiranog slobodnim električnim nabojem, što odgovara broju električnih linija sile koje prolaze kroz određeno područje [4]. Gustoća električnog toka je količina toka koja prolazi kroz definirano područje koje je okomito na smjer toka [4]. Oznaka gustoće električnog toka je  $D$ . Mjerna jedinica je kulon po metru kvadratnom,  $C/m^2$ .

Električna struja je tok nabijenih čestica, kao što su elektroni ili ioni, koji se kreću kroz električni vodič ili prostor [2]. Pokretne čestice nazivaju se nositelji naboja, što može biti jedna od nekoliko vrsta čestica, ovisno o vodiču [5]. U električnim krugovima nositelji naboja često su elektroni koji se kreću kroz žicu [5]. U poluvodičima to mogu biti elektroni ili šupljine [5]. U elektrolitu su nositelji naboja ioni, dok su u plazmi, ioniziranom plinu, ioni i elektroni [5]. Oznaka električne struje je  $I$ . Mjerna jedinica je amper,  $A$ .

Napon, razlika električnog potencijala, električni tlak ili električna napetost je razlika u električnom potencijalu između dviju točaka, koja je u statičkom električnom polju definirana kao rad potreban po jedinici naboja za pomicanje ispitnog naboja između dviju točaka [5]. Oznaka napona je U. Mjerna jedinica je volt, V.

Električni otpor je svojstvo materijala da se opire prolasku električne struje [2]. Ovisi o vrsti materijala kao i njegovim dimenzijama [6]. Oznaka električnog otpora je R. Mjerna jedinica je ohm,  $\Omega$ .

Električna vodljivost je recipročna veličina električnom otporu, koja mjeri lakoću s kojom električna struja prolazi [2]. Isto kao i otpor ovisi o vrsti materijala i o njegovim dimenzijama. Oznaka električne vodljivosti je G. Mjerna jedinica je simens, S.

Gustoća električne struje je količina električne struje koja putuje po jedinici površine poprečnog presjeka [2]. Što je više struje u vodiču, veća će biti i gustoća struje. Oznaka gustoće električne struje je J. Mjerna jedinica je amper po četvornom metru,  $A/m^2$ .

Gustoća električnog naboja je mjera električnog naboja po jedinici površine ili po jedinici volumena tijela ili polja [2]. Gustoća naboja nam govori koliko je naboja pohranjeno u određenom polju. Gustoća naboja može se odrediti u smislu volumena, površine ili duljine. Oznaka je  $\rho$ . Mjerna jedinica je kulon po metru kvadrantom,  $C/m^2$ .

Električna polarizacija je blagi relativni pomak pozitivnog i negativnog električnog naboja u suprotnim smjerovima unutar izolatora, ili dielektrika, induciran vanjskim električnim poljem [7]. Polarizacija se događa kada električno polje izobliči negativni oblak elektrona oko pozitivnih atomskih jezgri u smjeru suprotnom polju. Oznaka je P. Mjerna jedinica je kulon po metru kvadratnom,  $C/m^2$ .

Električna vodljivost materijala je mjera lakoće kojom električni naboj ili toplina mogu proći kroz materijal [2]. Vodič je materijal koji daje vrlo mali otpor protoku električne struje ili toplinske energije [2]. Materijali se dijele na metale, poluvodiče i izolatore [8]. Oznaka električne vodljivosti materijala je  $\sigma$ . Mjerna jedinica je simens pometru, S/m.

### 3.2. Magnetske veličine

Magnetomotorska sila, također poznata kao magnetski potencijal, svojstvo je određenih tvari ili pojava koje izazivaju magnetsko polje [9]. Magnetomotorska sila je analogna elektromotornoj sili ili naponu u električnim krugovima [9]. Oznaka magnetomotorske sile je  $\Theta$ . Mjerna jedinica je amper po metru, A/m.

Magnetski tok je mjerenje ukupnog magnetskog polja koje prolazi kroz određeno područje [2]. To je koristan alat za pomoć pri opisivanju učinaka magnetske sile na nešto što zauzima određeno područje. Mjerenje magnetskog toka vezano je za odabrano područje. Možemo odabrati da područje napravimo bilo koje veličine i orijentiramo ga na bilo koji način u odnosu na magnetsko polje. Magnetski tok je analogan intenzitetu električne struje u strujnim krugovima [2]. Oznaka magnetskog toka je  $\Phi$ . Mjerna jedinica je veber, Wb.

Magnetska reluktancija ili magnetski otpor (eng. *reluctance*) je koncept koji se koristi u analizi magnetskih krugova [2]. Definira se kao omjer magnetomotorske sile i magnetskog toka [2]. Suprotstavlja se magnetskom toku, a ovisi o geometriji i sastavu objekta. Magnetski otpor u magnetskom krugu analogan je električnom otporu u električnom krugu jer se električni otpor suprotstavlja prolasku električne struje koja je analogna magnetskom toku [2]. Definicija magnetske reluktancije u tom je pogledu analogna Ohmovom zakonu [2]. Međutim, magnetski tok koji prolazi kroz reluktanciju ne dovodi do rasipanja topline kao što je to slučaj sa strujom kroz otpor [2]. Stoga se analogija ne može koristiti za modeliranje protoka energije u sustavima u kojima energija prelazi između magnetske i električne domene. Alternativna analogija modelu reluktancije koji ispravno predstavlja tokove energije je model girator-kondenzator [2]. Oznaka magnetskog otpora je  $R$ , a mjerna jedinica je inverzni henri,  $H^{-1}$ .

Magnetska induktivnost (induktivna magnetska reaktancija) analogija je induktivnosti u električnom krugu. Magnetska potencijalna energija koju održava magnetska induktivnost varira s učestalošću oscilacija u električnim poljima [10]. Prosječna snaga u određenom razdoblju jednaka je nuli. Zbog svoje ovisnosti o frekvenciji, magnetska induktivnost je uglavnom vidljiva u magnetskim krugovima koji rade na vrlo i/ili ultra visokim frekvencijama [11]. Pojam magnetske induktivnosti koristi se u analizi i proračunu ponašanja kruga u modelu girator-kondenzator na način analogan induktivnosti u električnim krugovima [11]. Magnetska prigušnica može predstavljati električni kondenzator. Kapacitivnost šanta u

električnom krugu, kao što je kapacitivnost unutar namota, može se predstaviti kao serijski induktivitet u magnetskom krugu [11]. Oznaka magnetske induktivnosti je  $L_m$ . Mjerna jedinica je inverzni om,  $\Omega^{-1}$ .

U elektromagnetizmu je magnetska vodljivost (eng. *permeance*) je inverzna magnetskom otporu [2]. U magnetskom krugu magnetska vodljivost je mjera količine magnetskog toka za određeni broj strujnih zavoja. Magnetski krug gotovo djeluje kao da je magnetski tok vođen, stoga je propusnost veća za velike presjeke materijala i manja za manje presjeke. Ovaj koncept je analogan električnoj vodljivosti u električnom krugu [2]. Oznaka za magnetsku vodljivost je  $P$ . Mjerna jedinica je henri, H.

Jedna od definicija magnetske indukcije je da je magnetska indukcija indukcija magnetizma u tijelu kada se nalazi u magnetskom polju ili u magnetskom toku kojeg stvara magnetomotorska sila [2]. Druga definicija kaže da je magnetska indukcija umnožak magnetske permeabilnosti nekog medija s intenzitetom magnetskog polja u njemu [2]. Drugi naziv za magnetsku indukciju je gustoća magnetskog toka. Oznaka magnetske indukcije je  $B$ . Mjerna jedinica je tesla, T.

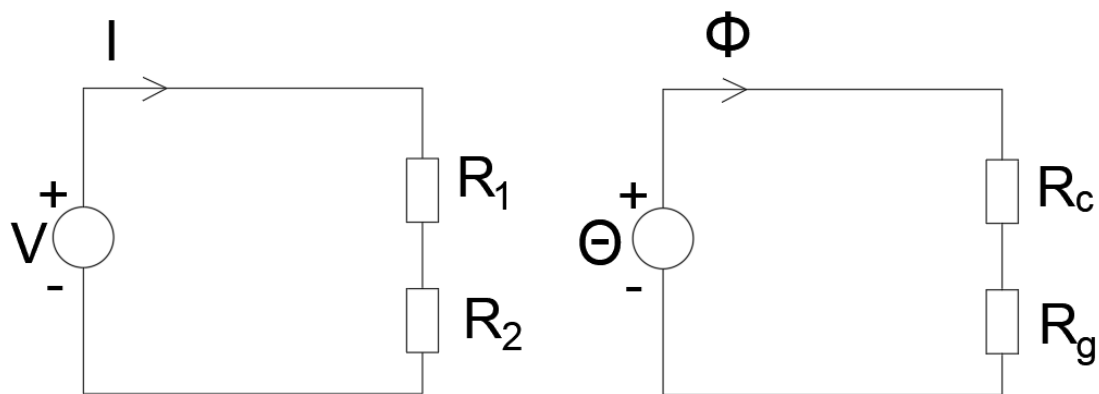
Intenzitet magnetskog polja je dio magnetskog polja u materijalu koji proizlazi iz vanjske struje i nije svojstven samom materijalu [2]. Intenzitet magnetskog polja se može smatrati magnetskim poljem proizvedenim protokom struje u žicama [2]. Oznaka intenziteta magnetskog polja je  $H$ . Mjerna jedinica je amper po metru, A/m.

Magnetizacija je posljedica sklonosti atomskih komponenti materije da se ponašaju kao magnetski dipoli [2]. Magnetizacija je zbroj dva dijela: magnetizacije zbog magnetske polarizacije prisutne u materijalu i inducirane polarizacije. Oznaka magnetizacije je  $M$ . Mjerna jedinica je amper po metru, A/m.

Permeabilnost je mjera magnetizacije koju materijal dobiva kao odgovor na primijenjeno magnetsko polje [2]. Oznaka permeabilnosti je  $\mu$ . Mjerna jedinica je henri po metru, H/m. Permeabilnost slobodnog prostora je  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  henrija po metru.

Permitivnost je mjera električne polariziranosti dielektrika [2]. Materijal s visokom permitivnošću više se polarizira na primijenjeno električno polje nego materijal s niskom permitivnošću, čime se pohranjuje više energije u materijalu [2]. U elektrostatici, permitivnost igra važnu ulogu u određivanju kapacitivnosti kondenzatora [2]. Oznaka permitivnosti je  $\epsilon$ . Mjerna jedinica je farad po metru, F/m. Permitivnost vakuuma je  $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  F/m.

Veza magnetskog toka je povezivanje magnetskog polja s vodičima namota kada magnetsko polje prolazi kroz petlje namota, izraženo preko neke vrijednosti. To je u biti alternativni izraz za ukupni magnetski tok koja se koristi radi praktičnosti u inženjerskim primjenama. Oznaka je  $\lambda$ . Mjerna jedinica je broj webera po namotu, Wb/N.



**Slika 3.1** Kvalitetan prikaz spomenutih analogija između električnih i elektromagnetskih veličina. Lijevi crtež prikazuje analogiju strujnog kruga, a na desni analogiju elektromagnetskog kruga.



## 4. ANALIZA MAGNETSKIH KRUGOVA

### 4.1. Osnovne formule i proračun

Magnetski krug je zatvoreni magnetski tok u elektromagnetskim napravama i uređajima ili u onima sa stalnim magnetima (npr. generatori, motori, transformatori) [12]. Ostvaruje se pomoću feromagnetskih konstrukcijskih dijelova, koje ponekad razdvajaju uski zračni raspori. Za konstrukciju magnetskog kruga primjenjuju se materijali s velikom magnetskom permeabilnošću, najčešće različite željezne slitine.

Kompletno, detaljno rješenje za magnetska polja u većini praktičnih situacija inženjerskog interesa uključuje rješavanje Maxwellovih jednadžbi uz razne konstitutivne odnose koji opisuju svojstva materijala [13]. Cilj je napraviti detaljnu analizu elektromagnetskih krugova.

Amperov kružni zakon [13]:

$$\Delta \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.1)$$

Gaussov zakon magnetizma [13]:

$$\nabla \cdot \vec{H} = \vec{J}_m \quad (4.2)$$

Faradayev zakon indukcije [13]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.3)$$

Gaussov teorem magnetskog toka [13]:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.4)$$

Međutim, ovaj skup jednažbi polja nije potpun. Da bi se riješile jednažbe, treba razmotriti tri dodatne jednažbe koje opisuju svojstva materijala. One daju konstitutivne odnose koji upotpunjuju skup jednažbi [13]:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (4.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P} \quad (4.6)$$

$$\vec{J} = \sigma\vec{E} \quad (4.7)$$

Iako su u praksi točna rješenja često nedostižna, razne pojednostavljujuće pretpostavke dopuštaju postizanje korisnih inženjerskih rješenja.

Počinjemo s pretpostavkom da su, za sustave obrađene u ovom radu, frekvencije i uključene veličine takve da se izraz struje pomaka u Maxwelllovoj jednažbi može zanemariti [13]. Izraz za struju pomaka objašnjava magnetska polja koja se stvaraju u prostoru vremenski promjenjivim električnim poljima i povezan je s elektromagnetskim zračenjem.

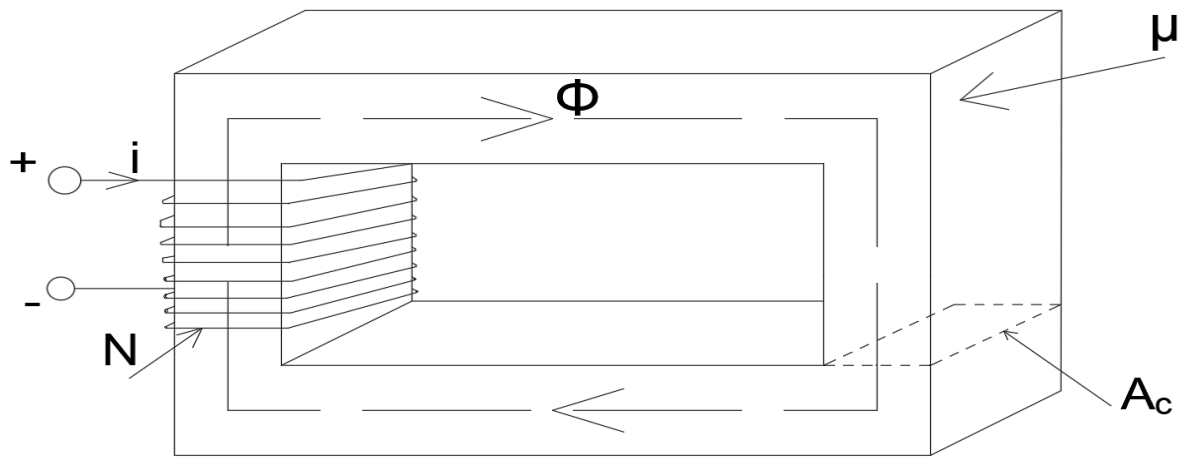
Zanemarivanje spomenutog izraza za struju pomaka rezultira magneto-kvazistatskim oblikom relevantne Maxwelllove jednažbe koja povezuje magnetska polja sa strujama koje ih proizvode [12]:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (4.8)$$

$$\oint_V \vec{B} \cdot d\vec{V} = 0 \quad (4.9)$$

Jednažba (4.8) kaže da je linijski integral tangencijalne komponente intenziteta magnetskog polja  $H$  oko zatvorene konture  $C$  jednak ukupnoj struji prolazeći kroz bilo koju površinu  $S$  koja povezuje tu konturu. Iz jednažbe (4.8) vidimo da je izvor  $H$  gustoća struje  $J$ . Jednažba (4.9) kaže da je gustoća magnetskog toka  $B$  očuvana, tj. da neto tok ne ulazi ili ne izlazi iz zatvorene površine (ekvivalentno govoreći da ne postoje monopolni izvori naboja magnetskih polja).

Od ovih jednadžbi vidimo da se veličine magnetskog polja mogu odrediti samo iz trenutne vrijednosti struja izvora i vremenske varijacije magnetskog polja slijede izravno iz vremenskih varijacija izvora [12].



**Slika 4.1** Jednostavan magnetski krug kod kojeg vidimo smjer kretanja magnetskog toka kroz željeznu jezgru

Magnetski tok  $\Phi$  koji prelazi površinu  $S$  je površinski integral normale komponente  $B$  tako da vrijedi [12]:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{a} \quad (4.10)$$

Za sliku 4.1 vrijednost magnetskog toka se svede na puno jednostavniju skalarnu jednadžbu [12]:

$$\Phi_C = B_C A_C, \quad (4.11)$$

$B_C$  predstavlja magnetsku gustoću toka unutar jezgre, a  $A_C$  poprečni presjek jezgre.

Odnos između magnetomotorske sile koja djeluje na magnetski krug i intenziteta magnetskog polja u tom krugu je [12]:

$$\Theta = Ni = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (4.12)$$

Za sliku 4.1 vrijedi:

$$\Theta = Ni = H_C l_C, \quad (4.13)$$

$H_C$  predstavlja jakost magnetskog polja jezgre, a  $l_C$  predstavlja dužinu same jezgre.

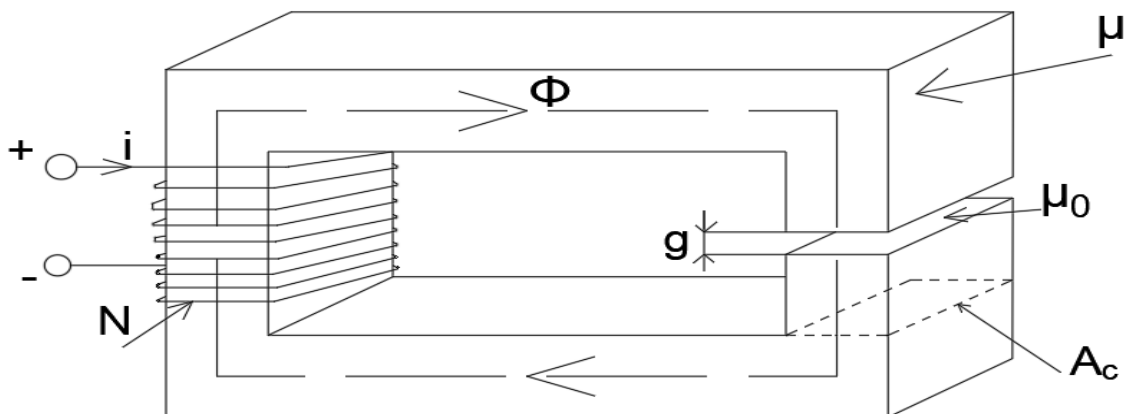
Odnos između intenziteta magnetskog polja  $H$  i gustoće magnetskog toka  $B$  je svojstvo materijala u kojem postoji magnetsko polje. Uobičajeno je pretpostaviti linearni odnos tako da vrijedi [12]:

$$B = \mu H, \quad (4.14)$$

Ukupna permeabilnost je umnožak permeabilnosti zračnog raspورا i permeabilnosti određenog materijala koja se dobije testiranjem [12]:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (4.15)$$

Permeabilnost određenog materijala ima značajnu ulogu na petlju histerezu samih materijala. Zbog toga je jako bitan podatak za našu analizu. Ostatak postupka za traženje relativne permeabilnosti biti će objašnjen nakon što dođemo do izraza potrebnih za računanje magnetskog toka i reluktancije.



Slika 4.2 Magnetski krug sa zračnim rasporom

Magnetska gustoća je različita unutar materijala jezgre i zračnog raspora, za magnetsku gustoću jezgre vrijedi [12]:

$$B_C = \frac{\Phi}{A_C} \quad (4.16)$$

Za magnetsku gustoću zračnog raspora vrijedi [12]:

$$B_g = \frac{\Phi}{A_g} \quad (4.17)$$

$A_C$  i  $A_g$  predstavljaju poprečne presjeke jezgre i zračnog raspora.

Kada se u obzir uzme zračni raspor formula za elektromagnetsku silu je [12]:

$$\Theta = H_C l_C + H_g g \quad (4.18)$$

$H_C$  i  $H_g$  su intenziteti magnetskih polja što jezgre što zračnog raspora, a  $g$  je dužina zračnog raspora. Ako se u obzir uzme odnos između magnetske gustoće i intenziteta magnetskog polja formula se svede na [12]:

$$\Theta = \frac{B_C}{\mu} l_C + \frac{B_g}{\mu_0} g \quad (4.19)$$

Daljnijim korištenjem već spomenutih odnosa između magnetskog toka i gustoće magnetskog toka dođemo do formule [12]:

$$\Theta = \Phi \left( \frac{l_C}{\mu A_C} + \frac{g}{\mu_0 A_g} \right) \quad (4.20)$$

Izrazi koji se množe s tokom u ovoj jednadžbi poznati su kao reluktancija R jezgre i zračnog raspora. Prvi dio izraza unutar zagrade se odnosi na reluktanciju u željeznoj jezgri  $R_c$ , a drugi dio na reluktanciju zračnog raspora  $R_g$ , tako da vrijedi [12]:

$$R_c = \frac{l_c}{\mu A_c} \quad (4.21)$$

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (4.22)$$

Formula za magnetomotorsku silu zatim dobije jako jednostavan oblik sa samo tri parametra [12]:

$$\Theta = \Phi(R_c + R_g) \quad (4.23)$$

Zbroj  $R_c$  i  $R_g$  predstavlja ukupnu reluktanciju, tj.  $R$ .

Ako se zatim izraz podjeli s reluktancijom konačni izraz za magnetski tok je [12]:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R} \quad (4.24)$$

Magnetska vodljivost  $P$  je recipročna vrijednost reluktanciji te je dana izrazom [12]:

$$P = \frac{1}{R} \quad (4.25)$$

## 4.2. Određivanje relativne permeabilnosti jezgre materijala

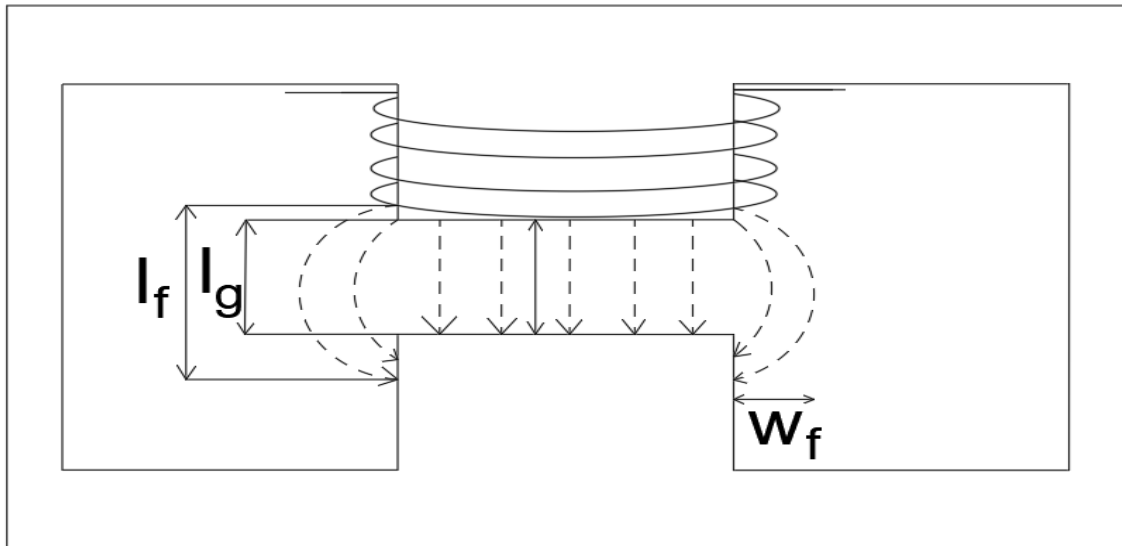
Vrijednost relativne permeabilnosti se u analizi prvotno pretpostavlja s nekom konstantnom vrijednošću [14]. U slučaju da je beskonačna, magnetski otpor će iznositi 0 [15]. Jedna od stvari koje moramo uzeti u obzir je obrubni magnetski tok koje nam može stvoriti probleme u proračunu jer ga se inače ne uzima u obzir prilikom računanja. Obrubni magnetski tok je pojava kod koje se magnetski tok koji teče u magnetskoj jezgri širi (ili izlazi na rub) u okolni medij, na primjer u blizini zračnog raspora [14]. Nagomilavanje toka usko je povezano s obrubnim magnetskim tokom, a curenje toka obično tretira kao drugačija pojava. Zbog obrubnog magnetskog toka povećava se efektivna površina zračnog raspora i time se smanjuje gustoća magnetskog toka u zračnom rasporu. Što je zračni razmak duži, to je obrubni magnetski tok veći i obrnuto. Zračni raspori se postavljaju u strukture magnetske jezgre iz sljedećih važnih razloga: da bi se podržala visoka magnetomotorna sila, da bi se smanjio nagib B–H krivulje, što povećava intenzitet polja zasićenja, i kako bi se izbjeglo zasićenje jezgre u zbog struja velikih amplituda [14]. Relativna permeabilnost jezgre i duljina zračnog raspora dva su glavna parametra koja uzrokuju veliku induktivnu toleranciju (ili električnu toleranciju) [14]. Vrijednosti električnih veličina moraju imati određenu toleranciju kako bi svi uređaji radili kako treba. Vrijednosti se ne smiju kretati u velikim rasponima nego s određenom tolerancijom.

Tipična tolerancija koju je odredio proizvođač za relativnu permeabilnost je 25% za induktore snage, 20% za širokopoljasne i radio-frekventne filtre, pa čak 30% za linearne filtre koji se koriste u raznim sensorima [14]. Tolerancija dužine zračnog raspora varira zbog nepreciznosti u procesu proizvodnje jezgre i iznosi do 5% njene nominalne vrijednosti [14]. Zato moramo obratiti pažnju na ova dva parametra. U ovom dijelu ćemo relativnu permeabilnost jezgre označavati s  $\mu_{rc}$ , a relativnu permeabilnost cijelog magnetskog kruga, koja se može nazivati i efektivna relativna permeabilnost, označavamo s  $\mu_{re}$ . Duljina zračnog raspora je  $l_g$ .

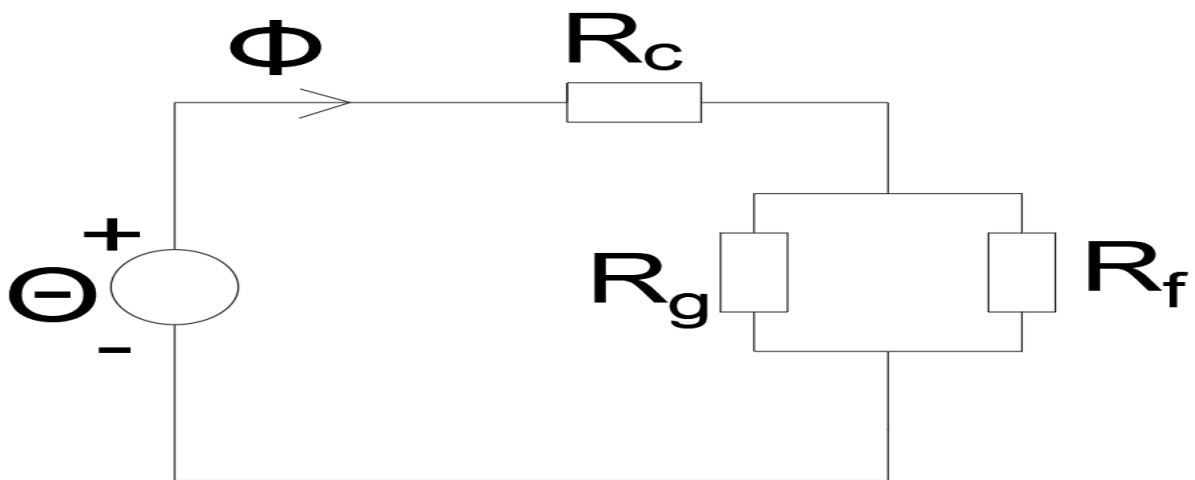
Izraz za efektivnu relativnu permeabilnost je [14]:

$$\mu_{re} = \frac{\mu_{rc}}{1 + \mu_{rc} \left( \frac{l_g}{l_c} \right)} \quad (4.26)$$

Efektivna relativna permeabilnost se smanjuje s povećanjem duljine zračnog raspورا. Efektivna relativna permeabilnost s povećanjem dužine zračnog raspورا opada brže kada ima jezgru visoke relativne permeabilnosti u usporedbi s jezgrama s niskom relativnom permeabilnosti. Još uvijek nismo u obzir uzeli obrubni magnetski tok.



Slika 4.3 Prikaz kretanja obrubnog magnetskog toka po širini  $w_f$



Slika 4.4 Ekvivalentni magnetski krug koji uključuje reluktanciju obrubnog magnetskog toka

Učinak obrubnog magnetskog toka modeliran je kao komponenta reluktancije paralelno s otporom zračnog raspورا. Površina poprečnog presjeka zračnog raspورا na kojem djeluje obrubni magnetski tok je  $A_f$ , duljina magnetskog obrubnog toka je  $l_f$ , a širina obrubnog magnetskog toka je  $w_f$ . Volumen područja kroz koje prolazi obrubni magnetski tok naziva se  $\alpha$ .



Za taj volumen vrijedi [14]:

$$\alpha = \frac{w_f}{l_g} \quad (4.27)$$

Reluktancija zračnog raspora kroz koji prolazi obrubni magnetski tok je [14]:

$$R_f = \frac{l_f}{\mu_0 A_f} \quad (4.28)$$

Obrubni magnetski tok zato mijenja formulu za ukupnu magnetsku reluktanciju [14]:

$$R = \frac{l_c}{\mu_{rc} \mu_0 A_c} \left(1 + \frac{\mu_{rc} l_g}{F_f l_c}\right) \quad (4.29)$$

U formuli za ukupnu reluktanciju kada uzimamo u obzir obrubni magnetski tok javlja nam se faktor obrubnog magnetskog toka  $F_f$ , a on iznosi [14]:

$$F_f = \frac{4\alpha l_g (D_c + \alpha l_g)}{D_c^2} \quad (4.30)$$

$D_c$  predstavlja promjer za jezgre kružnog presjeka i širinu za jezgre kvadratnog ili pravokutnog presjeka. Faktora relativne duljine zračnog raspora je [14]:

$$\gamma = \frac{l_g}{l_c} \quad (4.31)$$

S tim pretpostavkama faktor obrubnog magnetskog toka možemo zapisati kao [14]:

$$F_f = \frac{4\alpha \gamma l_c (D_c + \alpha \gamma l_c)}{D_c^2} \quad (4.32)$$

Efektivna relativna permeabilnost kada uključimo obrubni magnetski tok i faktor obrubnog magnetskog toka može se zapisati kao [14]:

$$\mu_{ref} = \frac{\mu_{rc}}{1 + \frac{\mu_{rc} D_c^2}{4\alpha l_c (D_c + \alpha \gamma l_c)}} \quad (4.33)$$

Obrubni magnetski tok i magnetski tok u zračnom rasporu imaju suprotne učinke na efektivnu permeabilnost. Prvi povećava efektivnu relativnu permeabilnost dok ga drugi smanjuje. Zračni raspor značajno smanjuje utjecaj relativne permeabilnosti jezgre na efektivnu relativnu permeabilnost. Utjecaj je veći za jezgre visoke relativne permeabilnosti za razliku od onih s niskom relativnom permeabilnošću.

### 4.3. Računanje sile u magnetskom krugu

Računanje sile u magnetskom krugu je najbitniji korak. Izraz za računanje sile dobijemo preko energije u krugu. Ukupna energija u krugu [16]:

$$W_f = \sum_{j=1}^J \int_{\lambda_{j,0}}^{\lambda_{j,f}} i_j d\lambda_j - \int_{x_0}^{x_f} F_e dx \quad (4.34)$$

Izraz za ukupnu energiju se derivira [16]:

$$dW_f = \sum_{j=1}^J i_j d\lambda_j - F_e dx \quad (4.35)$$

$\lambda$  predstavlja vezu magnetskog toka te pomoću te veze zapisujemo derivaciju energije [16]:

$$dW_f = \sum_{j=1}^J \frac{\partial W_f(\lambda, x)}{\partial \lambda_j} d\lambda_j + \frac{\partial W_f(\lambda, x)}{\partial x} dx \quad (4.36)$$

Ako izjednačimo izraze (4.35) i (4.36) dobijemo [16]:

$$\sum_{j=1}^J i_j d\lambda_j - F_e dx = \sum_{j=1}^J \frac{\partial W_f(\lambda, x)}{\partial \lambda_j} d\lambda_j + \frac{\partial W_f(\lambda, x)}{\partial x} dx \quad (4.37)$$

Konačno iz te jednakosti možemo dobiti formulu za silu u magnetskom krugu [16]:

$$F_e = - \frac{\partial W_f(\lambda, x)}{\partial x} \quad (4.38)$$

## 5. SOLENOID

Električna struja koja teče kroz namotanu žicu stvara magnetsko polje. Kada se ova žica namota oko feromagnetskog ili ferimagnetskog materijala, stvara se magnet poznat kao elektromagnet [17]. Budući da se magnetsko polje stvara sve dok struja izlazi iz žice, elektromagnet ima privremeni magnetski učinak. Kada se struja smanji na nulu, neće biti magnetskog učinka. Solenoid je naprava koja se sastoji od elektromagneta i pomične metalne jezgre podržane oprugom [18]. Prolaskom električne struje kroz elektromagnet, željezna jezgra mu se privlači zbog djelovanja magnetskog polja. Kada struja ne teče jezgra se vraća se u početni položaj. Solenoid je vrsta elektromagnetskog uređaja koji pretvara električnu energiju u mehaničku energiju [17].

### 5.1. Tipovi solenoida

AC laminirani solenoid je vrsta solenoida koja ima vrlo visoku početnu silu privlačenja i vrlo kratko vrijeme zatvaranja zračnog raspóra [17]. Izrađuje se od lameliranog metala ili izoliranih tankih limova koji su pojedinačni i sastavljeni.

DC solenoid C okvira je solenoid koji je konstruiran na način da oko zavojnice ima slovo 'C' poput poklopca okvira [17]. Ova vrsta se široko koristi u automatima za igre.

DC solenoid D okvira je solenoid koji ima zavojnicu koja je s dvije strane prekrivena s dva 'D' okvira [17]. Ovaj tip se općenito koristi u aplikacijama za napajanje izmjeničnom strujom.

Linearni solenoid ima slobodno pokretnu čeličnu ili željeznu šipku koja se naziva klip unutar zavojnice okruglog cilindričnog oblika [17]. Željezna šipka se slobodno kreće unutra ili izvan cilindrične zavojnice ovisno o primijenjenoj struji.

Rotacijski solenoid je posebna vrsta solenoida gdje se magnetska sila pretvara u rotacijsku silu ili rotacijsko gibanje [17]. Sastoji se od armaturne jezgre postavljene na ravni disk. Kada se osigura struja, armatura se privlači prema statoru i ravni disk se okreće.

## 5.2. Primjene solenoida

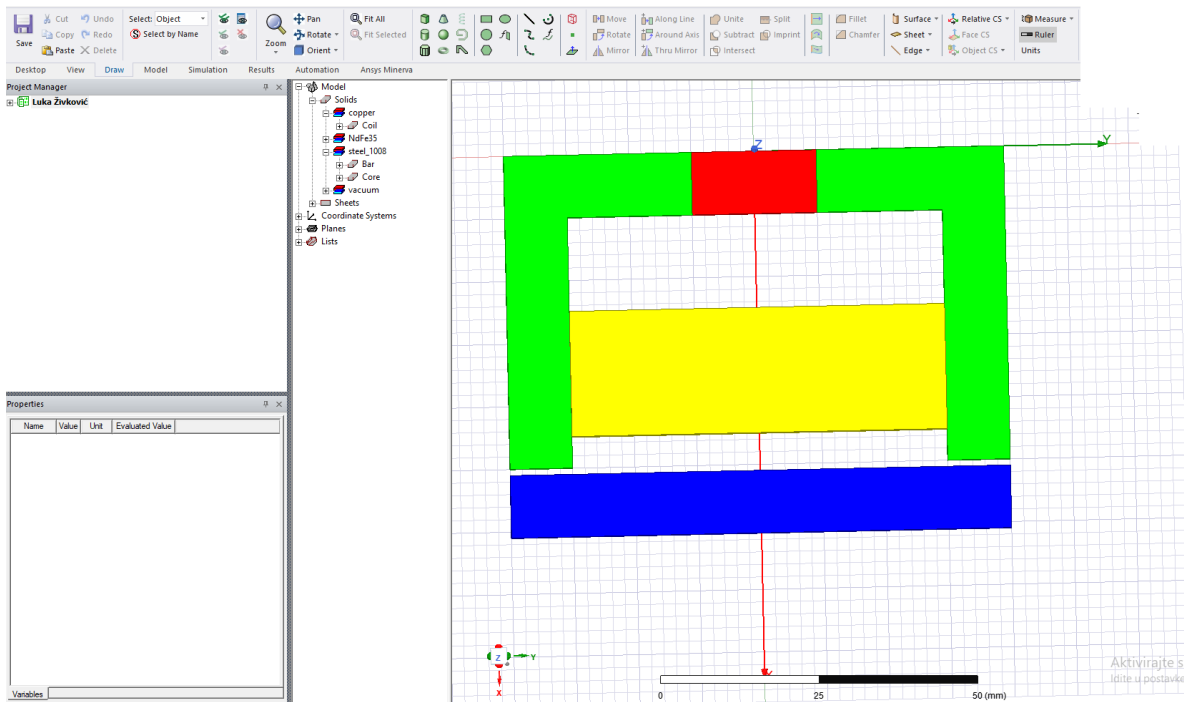
Solenoidni ventil- elektromagnetski ventil je jednostavan uređaj u kojem se solenoid koristi za kontrolu i regulaciju protoka tekućine [17]. Ima zavojnicu sa slobodnim pokretnim klipom ili željeznu šipku s oprugom unutar sebe [17]. Kada napajamo zavojnicu, klip se pomiče iz svog položaja zbog magnetske privlačnosti, a kada prekinemo napajanje zavojnice, klip se vraća u prvobitni položaj uz pomoć opruge. Čim klip dođe na put tekućine koja teče, njezin protok prestaje.

Solenoidna brava- ovdje koristimo kretanje solenoidnog klipa za mehanizam za zaključavanje i otključavanje [17]. Ove solenoidne brave se široko koriste u elektroničkim i biometrijskim bravama koje se temelje na lozinki [17]. Sastoji se od snažnog metalnog klipa koji se može pomicati. Kada se zavojnica magnetizira zbog električnog polja, klip se pomiče kako bi izvršio mehanizam za zaključavanje i otključavanje.

U sustavu paljenja automobila, solenoid je zaslužan za pokretanje armature, što omogućuje završetak kruga koji pali vaš motor [17]. Nakon što pustite ključ i on se udalji od "početnog" položaja, solenoid se deaktivira, armatura se vraća u prethodni položaj, prekidajući strujni krug. Na ovaj način, paljenje vašeg automobila prestaje pokušavati pokrenuti motor, jer on već radi.

## 6. SIMULACIJA

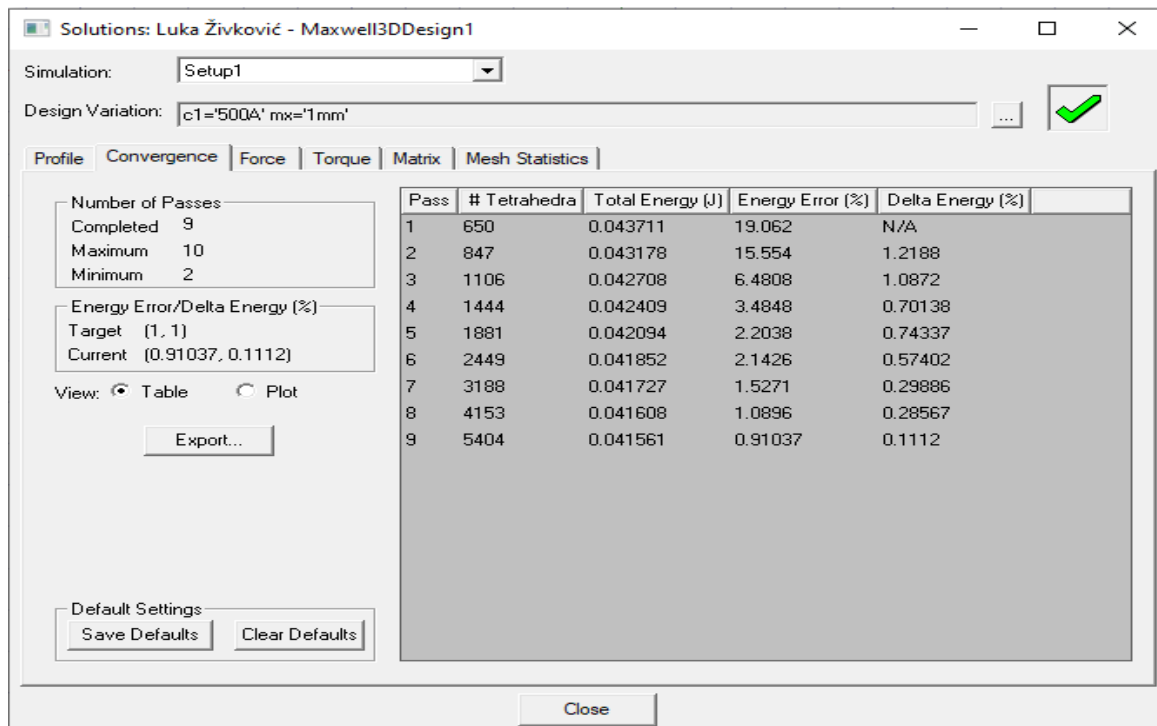
U simulaciji pomoću programa Ansys Maxwell računamo magnetsku silu određenog magnetskog kruga.



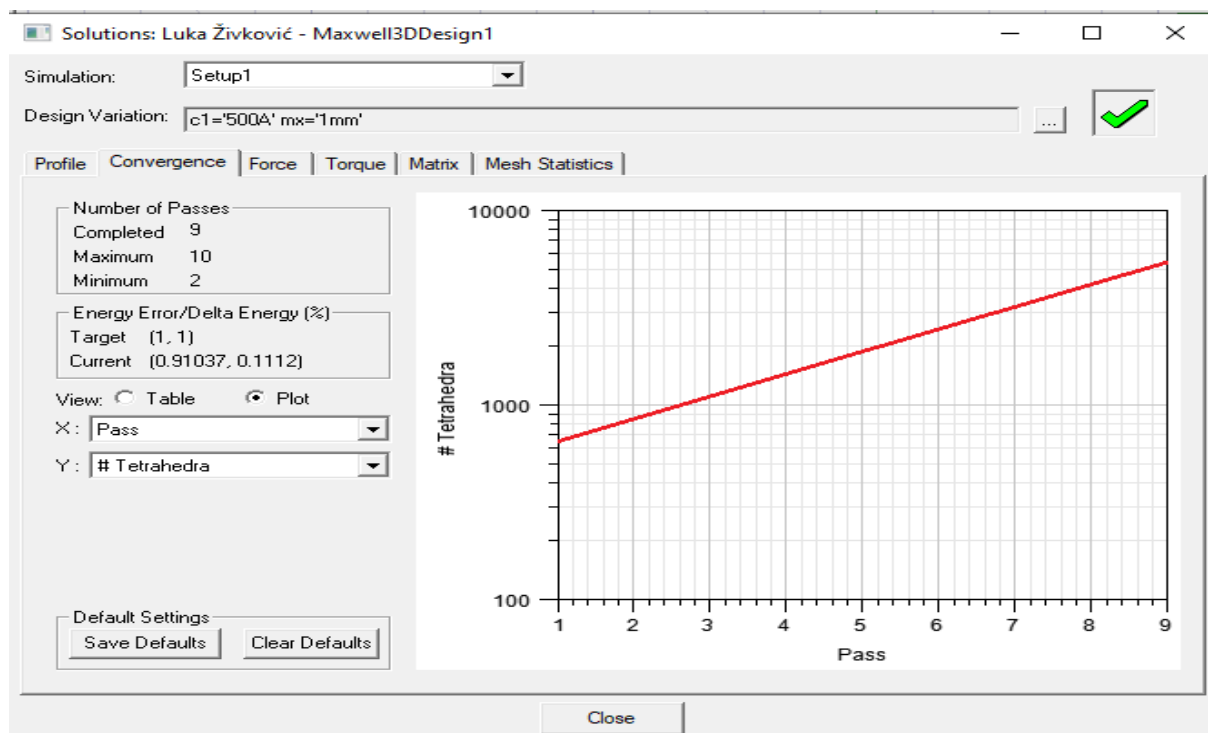
**Slika 6.1** Magnetski krug u simulaciji

Na slici 6.1 vidimo konstrukciju magnetskog kruga iz simulacije. Čelična jezgra (zeleno) odvojena je od čelične poluge (plavo) zračnim rasporom. Magnet (crveno) se nalazi na gornjem dijelu čelične jezgre, a namoti (žuto) se nalaze donjem dijelu čelične jezgre.



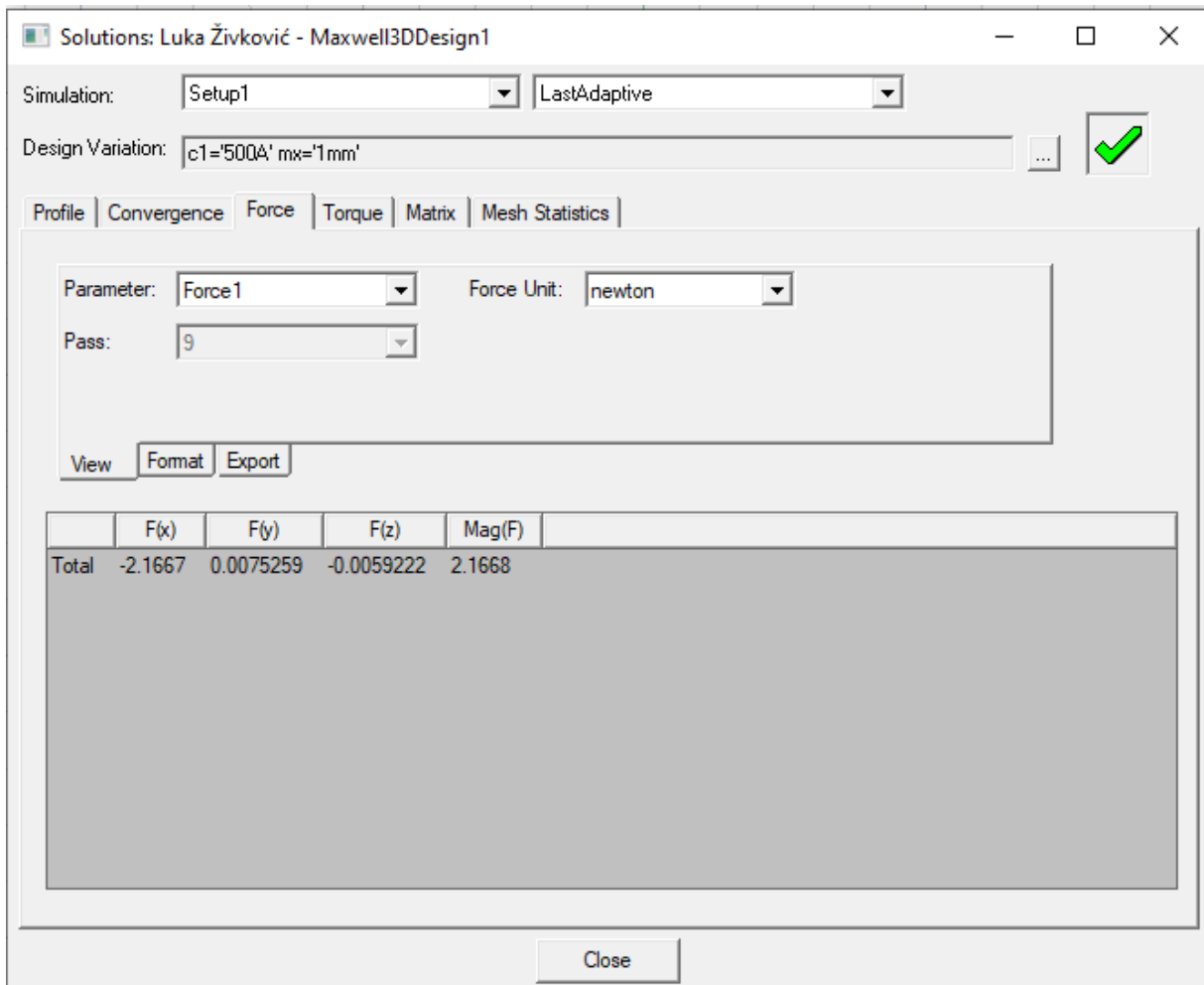


Slika 6.3 Konvergencija nakon analize parametara (tablica)

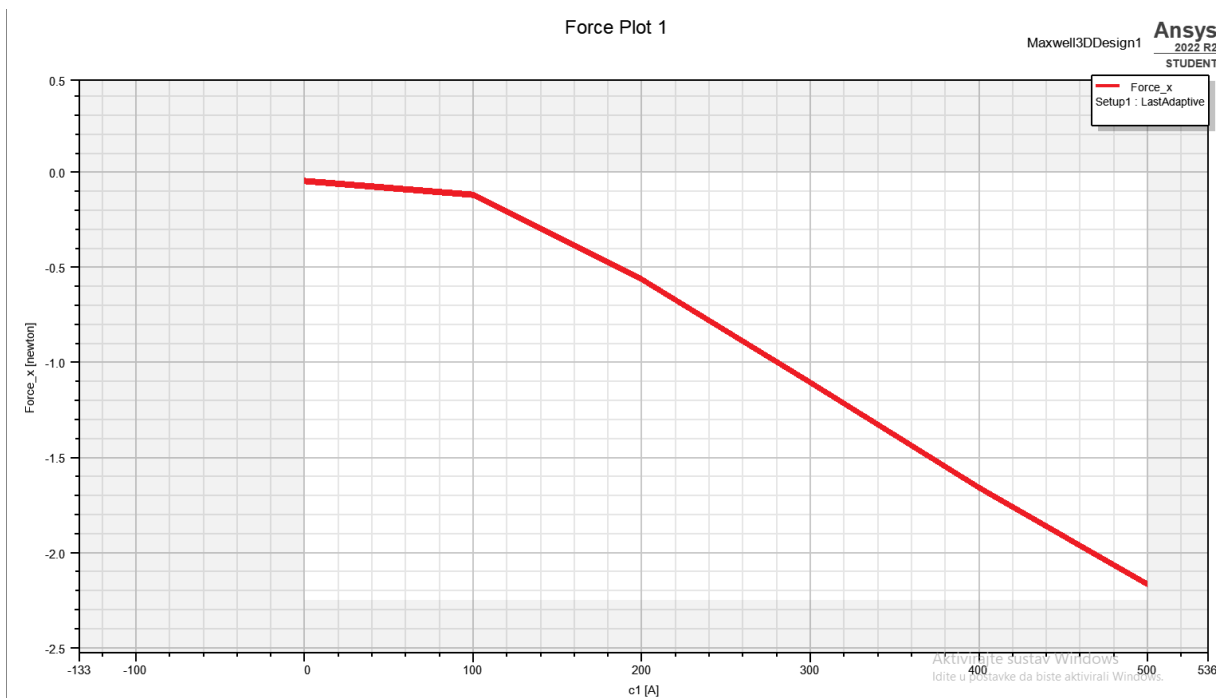


Slika 6.4 Konvergencija nakon analize parametara (graf)

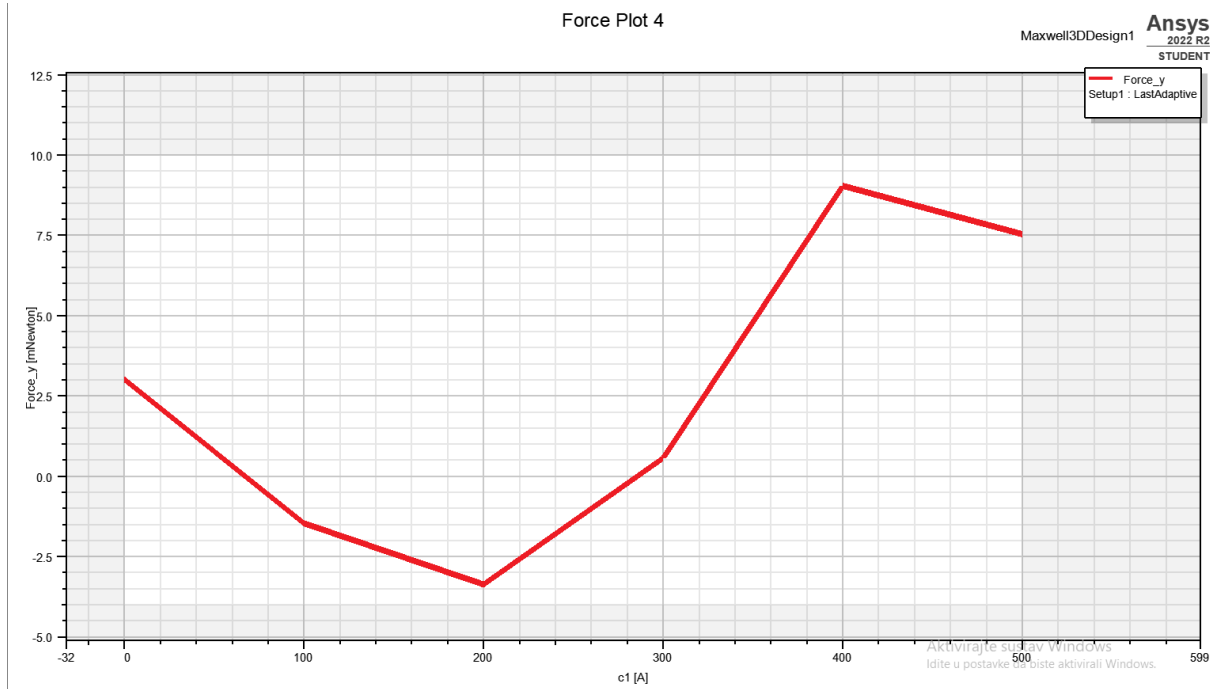




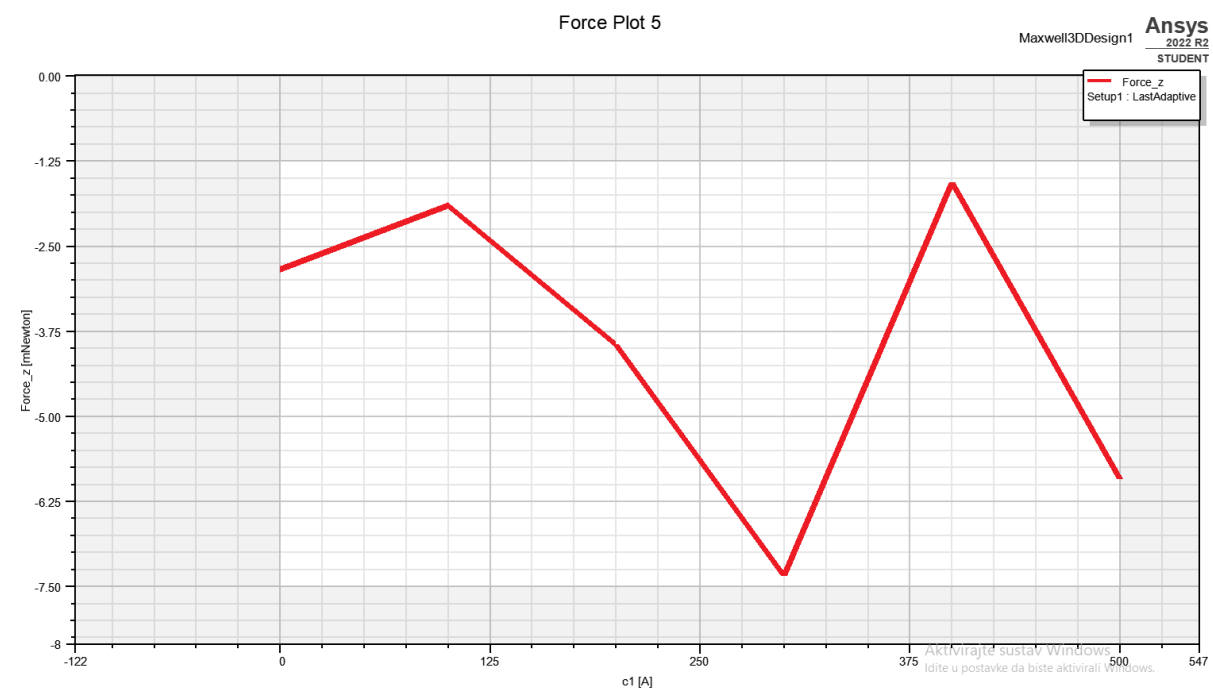
Slika 6.5 Sile koje djeluju prema osima nakon analize parametara



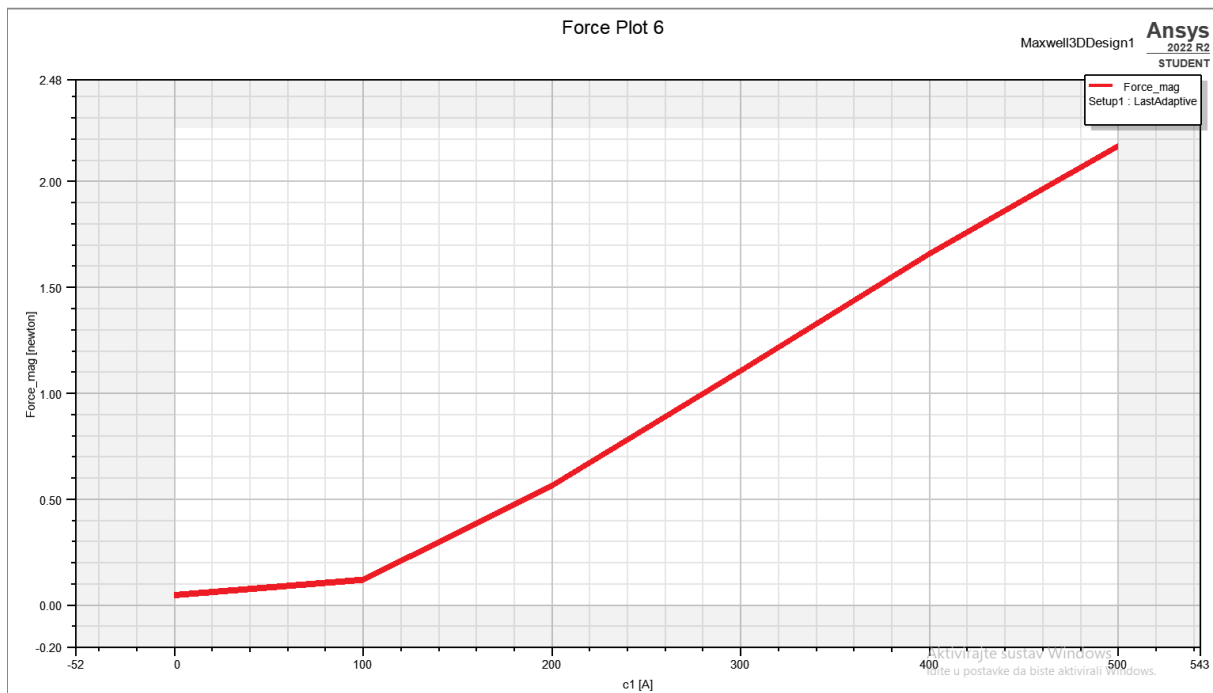
Slika 6.6 Sila koja djeluje prema x osi nakon analize parametara



**Slika 6.7** Sila koja djeluje prema y osi nakon analize parametara



**Slika 6.8** Sila koja djeluje prema z osi nakon analize parametara



**Slika 6.9** Ukupna magnetska sila nakon analize parametara

Na slici 6.2 možemo vidjeti ukupnu energiju u magnetskom krugu te pogrešku u izračunu prilikom analize. Pogreška se smanjuje postupno iz iteracije u iteraciju. Slika 6.5 prikazuje nam vrijednosti sila magnetskom kruga. Na narednim slikama 6.6, 6.6, 6.7 i 6.9 vidimo grafičke prikaze navedenih sila.

## 7. ANSYS

Program koji koristimo naziva se Ansys. Ansys je paket opće namjene za modeliranje konačnih elemenata za numeričko rješavanje širokog spektra mehaničkih problema. Ovi problemi uključuju statičku/dinamičku, strukturnu analizu, probleme prijenosa topline i tekućine, kao i akustičke i elektromagnetske probleme. Pomoću Ansys-a a inženjeri imaju mogućnost istraživanja i predviđanja kako će proizvodi raditi – ili neće raditi – u stvarnom svijetu. Možemo dobiti uvid u rad nepoznatih procesa te tako odrediti isplati li ih se uopće raditi. Ansys nije pretjerano težak za koristiti što je jako bitno za učenje mladih inženjera.

## 8. ZAKLJUČAK

Rad započinje s opisom poznatijih izvedbi reluktantnih strojeva. Poznavanjem izvedbi reluktantnih strojeva možemo doći do zaključka koje su jednostavnije te jednu od njih uzeti sa simulaciju. Detaljno su opisane električne i magnetske veličine koje je neophodno znati za izradu simulacije.

Sve veličine su potrebne kako bi smo došli do izračuna magnetske sile u magnetskom krugu koji je korišten u simulaciji. Dijele se na električne i magnetske koje su često analogne jedna drugoj.

Kod analize magnetskih krugova zapisane su formule koje bi se koristile kod analitičkog postupka izračuna magnetske sile u magnetskom krugu, ali i Maxwellove jednačbe koje su teorijski temelj za program Maxwell.

Kod same simulacije vidimo da je program Maxwell ekstremno jednostavan za uporabu i da jako brzo daje poželjne rezultate. Dobiveni rezultate su prikazani brojčano i grafički. Korištenjem računalnih programa, kao što je Maxwell, možemo puno brže doći do rješenja nekog projekta koje je ujedno i točnije nego što bi uspjeli sami analitičkom metodom. Možemo utvrditi kako je korištenje računalnih programa efikasnije i preciznije nego ručno računanje te kako bi se njihovo promicanje i mogućnosti korištenja trebale drastično povećati u budućnosti.

## LITERATURA

- [1] Boldea, I., & Tutelea, L. (2018). Reluctance electric machines: design and control. CRC Press.
- [2] "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr, 2017.
- [3] McAllister, W. Electric field :  
url: <https://www.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-electrostatics/ee-electric-force-and-electric-field/a/ee-electric-field>  
(17.09.2022.)
- [4] Ellingson, S. W. (2018). *Electromagnetics, Volume 1*. VT Publishing.
- [5] Kruz, V. (1969). *Tehnička fizika: za tehničke škole*. Školska knjiga.
- [6] 4.3 Električni otpor:  
url: [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abc6f535c3b5254/html/7571\\_Elektricni\\_otpor.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abc6f535c3b5254/html/7571_Elektricni_otpor.html)  
(17.09.2022)
- [7] SUPEK, I. (1966). *Nova fizika*. Zagreb: Školska knjiga.
- [8] Ogorelec, Z. (1985). *Praktikum iz fizike cvrstog stanja*, 1. dio.
- [9] Što je magnetomotorna sila, Hopkinsov zakon:  
url: <https://hr.icndoit.com/spravochnik/electroteh/2318-magnitodvizhuschaya-sila-zakon-gopkinsona.html>  
(17.09.2022)

[10] 6.3 Energija magnetskog polja:

url: [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abc6f535c3b5254/html/7587\\_Energija\\_magnetskog\\_polja.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/452e1469-e362-4711-abc6f535c3b5254/html/7587_Energija_magnetskog_polja.html)  
(17.09.2022)

[11] Štih, Ž., & Trkulja, B. (2010). Elektromagnetska polja–magnetostatika. FER, Zagreb.

[12] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Umans, S. D., & James, B. (2003). *Electric machinery* (Vol. 5, pp. 178-179). New York: McGRAW-hill.

[13] Kremers, M. F. J., Paulides, J. J. H., Janssen, J. L. G., & Lomonova, E. A. (2014, May). Analytical 3-D force calculation of a transverse flux machine. In *Proc. 11th Int. Conf. Modeling Simulation Electr. Mach., Converters Syst.(ElectrIMACS)* (pp. 220-225).

[14] Ayachit, A., & Kazimierczuk, M. K. (2017). Sensitivity of effective relative permeability for gapped magnetic cores with fringing effect. *IET Circuits, Devices & Systems*, 11(3), 209-215.

[15] Žarko, D., Ban, D., & Klarić, R. (2005). Finite element approach to calculation of parameters of an interior permanent magnet motor. *Automatika*, 46(3-4), 113-122.

[16] Sudhoff, S. D. (2021). *Power magnetic devices: a multi-objective design approach*. John Wiley & Sons.

[17] What Is Solenoid And How It Works?:

url: <https://www.electronicshobby.com/technology-trends/learn-electronics/solenoid-basics-working>  
(29.06.2022.)

[18] How Does a Solenoid Work?:

url: <https://www.electricsolenoidvalves.com/blog/how-does-a-solenoid-work/>  
(29.06.2022.)

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA

Tablica 8.1 Popis korištenih oznaka i simbola

Naziv	Oznaka	Mjerna jedinica
Intenzitet električnog polja	$E$	$V/m$
Intenzitet magnetskog polja	$H$	$A/m$
Intenzitet magnetskog polja jezgre	$H_c$	$A/m$
Intenzitet magnetskog polja zračnog raspora	$H_g$	$A/m$
Gustoća električnog toka	$D$	$C/m^2$
Gustoća magnetskog toka	$B$	$T$
Gustoća magnetskog toka jezgre	$B_c$	$T$
Gustoća magnetskog toka zračnog raspora	$B_g$	$T$
Električna struja	$I$	$A$
Magnetski tok	$\Phi$	$Wb$
Magnetski tok jezgre	$\Phi_c$	$Wb$
Napon	$U$	$V$
Magnetomotorska sila	$\Theta$	$A/m$
Električni otpor	$R$	$\Omega$
Magnetski otpor	$R$	$H^{-1}$
Magnetski otpor jezgre	$R_c$	$H^{-1}$
Magnetski otpor zračnog raspora	$R_g$	$H^{-1}$
Magnetski otpor zračnog raspora s obrubnim magnetskim tokom	$R_f$	$H^{-1}$
Električna vodljivost	$G$	$S$
Magnetska vodljivost	$P$	$H$
Gustoća električne struje	$J$	$A/m^2$
Gustoća električnog naboja	$\rho_e$	$C/m^2$



**Tablica 8.1** Popis korištenih oznaka i simbol- nastavak

Električna polarizacija	P	C/m <sup>2</sup>
Električna vodljivost materijala	$\sigma$	S/m
Magnetska induktivnost	L <sub>m</sub>	$\Omega^{-1}$
Magnetizacija	M	A/m
Permeabilnost	$\mu$	H/m
Permeabilnost jezgre	$\mu_r$	H/m
Permeabilnost zraka	$\mu_0$	H/m
Permitivnost	$\epsilon$	F/m
Permitivnost vakuuma	$\epsilon_0$	F/m
Poprečni presjek jezgre	A <sub>c</sub>	m <sup>2</sup>
Poprečni presjek zračnog raspora	A <sub>g</sub>	m <sup>2</sup>
Poprečni presjek na kojem djeluje obrubni magnetski tok	A <sub>f</sub>	m <sup>2</sup>
Broj namota	N	-
Dužina jezgre	l <sub>c</sub>	m
Dužina zračnog raspora	g, l <sub>g</sub>	m
Duljina kojom djeluje obrubni magnetski tok	l <sub>f</sub>	m
Volumen područja u kojem djeluje obrubni magnetski tok	$\alpha$	m <sup>3</sup>
Širina po kojoj djeluje obrubni magnetski tok	w <sub>f</sub>	m
Faktor obrubnog magnetskog toka F <sub>f</sub>	F <sub>f</sub>	-
Faktor relativne duljine zračnog raspora	$\gamma$	-
Veza magnetskog toka	$\lambda$	Wb-N
Energija	W <sub>f</sub>	J
Sila	F <sub>e</sub>	N

## SAŽETAK

Završni rad počinje s opisom električnih motora te navodi detaljnu listu nekih izvedbi reluktantnih motora. Zatim imamo listu potrebnih magnetskih i električnih veličina, koje su detaljno objašnjene. Nakon toga dolaze formule koje su potrebne za analitički postupak računanja sile u magnetskom krugu. Opisan je solenoid i odrađena je simulacija u programu Ansys Maxwell. Opisan je sam program Ansys, a rezultati simulacije su prikazani grafički i računski.

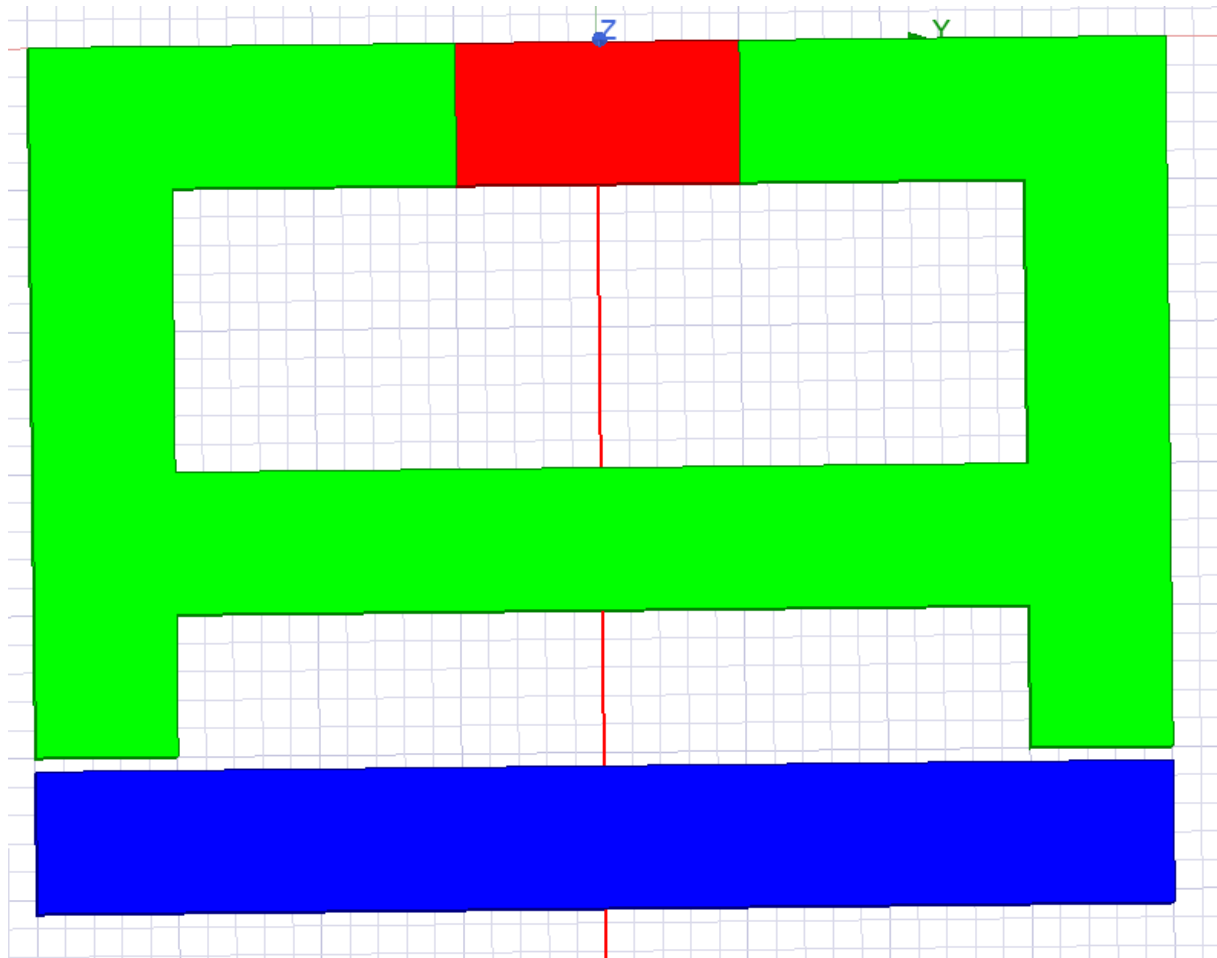
**Ključne riječi:** Ansys Maxwell, magnetski krug, reluktancija, reluktantni stroj, simulacija.

## ABSTRACT

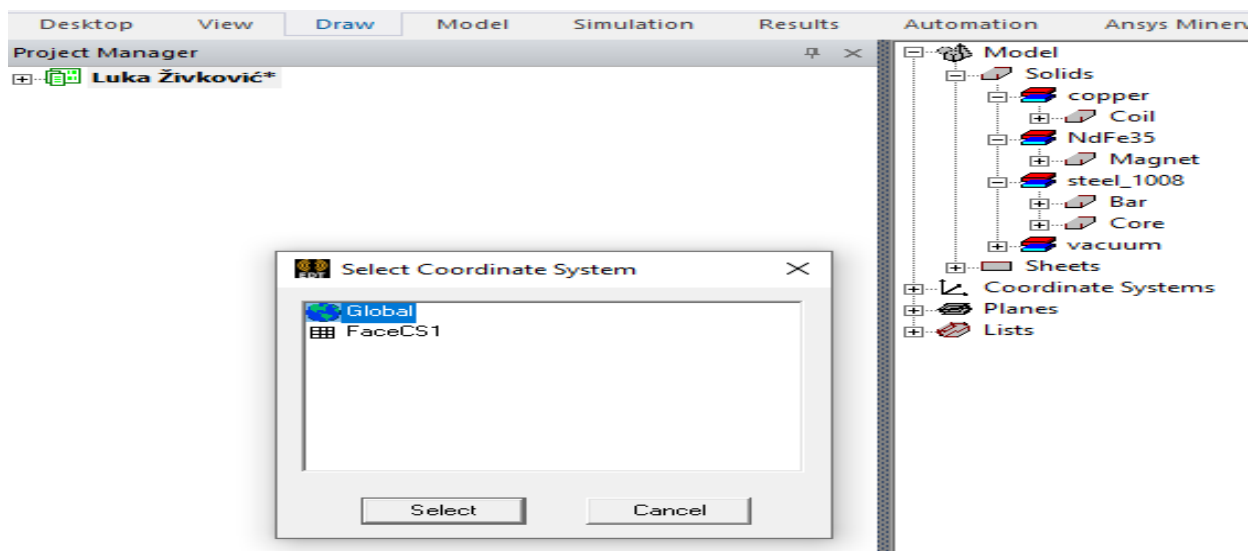
The final paper begins with a description of electric motors and provides a detailed list of some designs of reluctance motors. Then we have a list of required magnetic and electrical quantities, which are explained in detail. After that come the formulas that are necessary for the analytical procedure of calculating the force in the magnetic circuit. The solenoid was described and the simulation was performed in the Ansys Maxwell program. The Ansys program itself is described, and the simulation results are presented graphically and computationally.

**Keywords:** Ansys Maxwell, magnetic circuit, reluctance, reluctance machine, simulation.

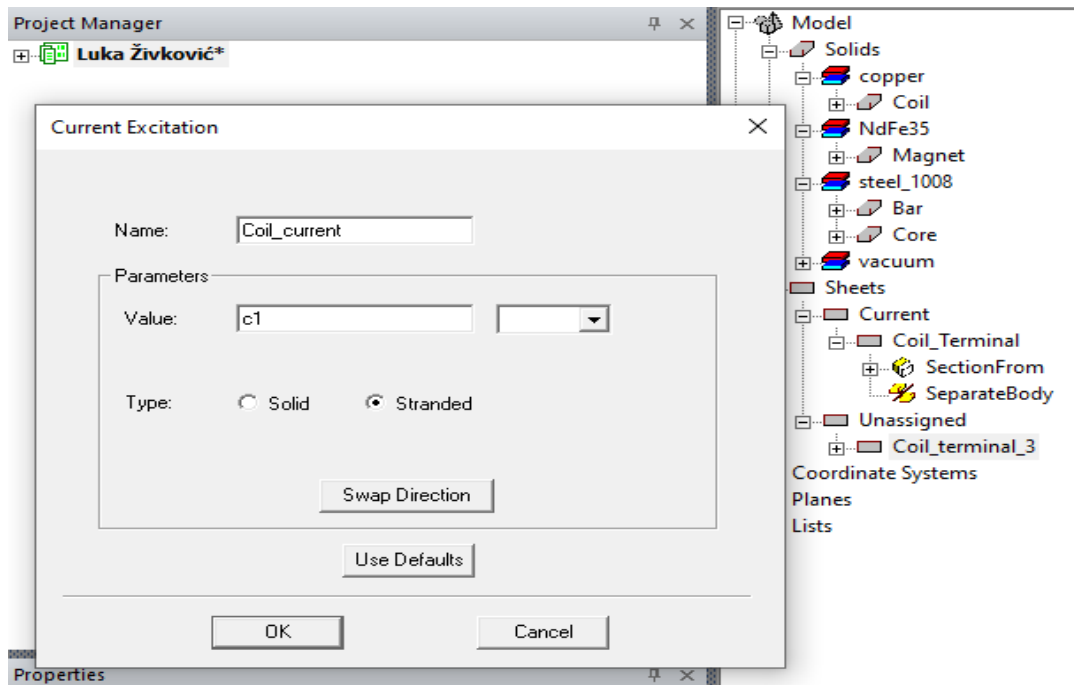
## PRILOZI



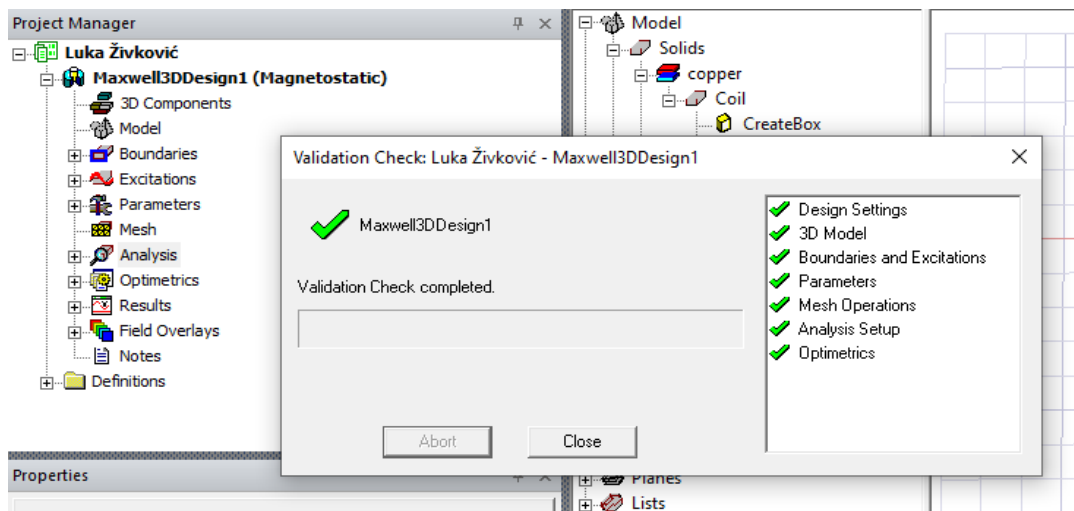
Slika P.1 Čelična jezgra (zeleno), magnet (crveno) i čelična poluga (plavo) bez namota



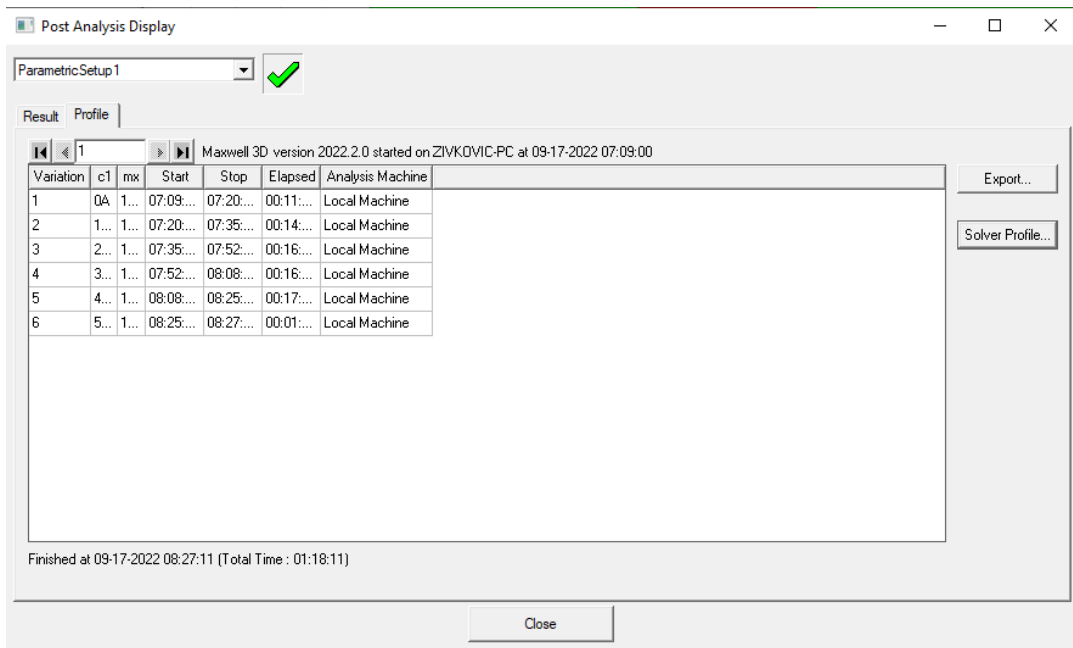
Slika P.2 Podešavanje globalnog kordinatnog sustava tijekom simulacije



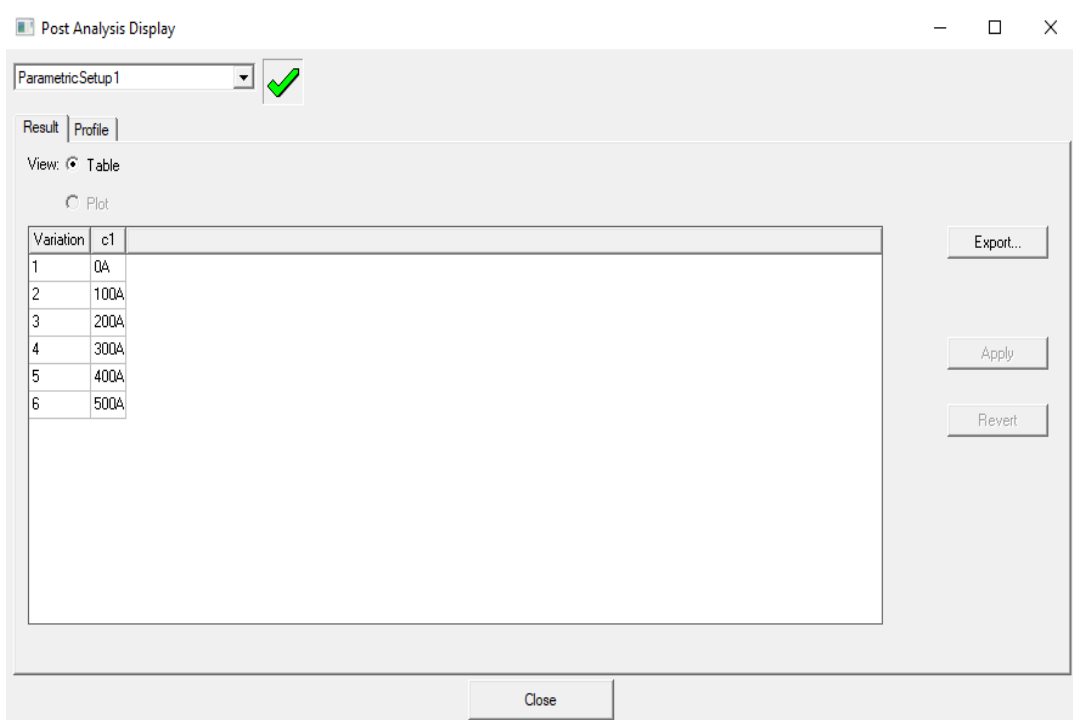
Slika P.3 Struja koja teče kroz namote



Slika P.4 Validacija prije analize parametara



Slika P.5 Trajanje analize parametara



Slika P.6 Različite vrijednosti električne struje tokom analize parametara