

Modeliranje i analiza reluktantnog induktivnog senzora zakreta korištenjem FEM alata

Horvat, David

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:200:223413>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni studij

**MODELIRANJE I ANALIZA RELUKTANTNOG
INDUKTIVNOG SENZORA ZAKRETA
KORIŠTENJEM FEM ALATA**

Diplomski rad

David Horvat

Osijek, 2023. godina

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. DIPLOMSKI ZADATAK	2
2. PRIMJENA I IZVEDBE INDUKTIVNIH SENZORA	3
2.1. SENZOR VRTLOŽNIH STRUJA	4
2.2. HALL SENZOR	6
2.3. MAGNETOREZISTIVNI SENZORI	8
2.4. REZOLVERI	15
3. IZVEDBA I MODEL RELUKTANTNOG INDUKTIVNOG SENZORA ZAKRETA	19
3.1. REZOLVER SA SINUSNOM PROMJENOM DULJINE ZRAČNOG RASPORA	21
3.2. REZOLVER SA SINUSNOM PROMJENOM POVRŠINE SPREGE	24
3.2.1. <i>Rezolver radijalnog toka</i>	24
3.2.2. <i>Rezolver aksijalnog toka (Disk type variable reluctance resolver)</i>	28
4. OPTIMIZACIJA RELUKTANTNOG INDUKTIVNOG SENZORA ZAKRETA	31
4.1. IMPLEMENTACIJA ALATA ZA NUMERIČKE METODE (FEMM)	32
4.2. METAHEURISTIČKA OPTIMIZACIJA	36
4.3. REZULTATI	45
5. ZAKLJUČAK	52
LITERATURA	53
SAŽETAK	56
ABSTRACT	57
ŽIVOTOPIS	58
PRILOZI	59

1. UVOD

Mjerenje zakreta električnog motora je važno zbog različitih razloga. Mjerenje zakreta omogućava određivanje učinkovitosti motora i provjeru je li motor u skladu sa svojim projektiranim specifikacijama. Također se može koristiti za otklanjanje problema s motorom ili otkrivanje potrebe za održavanjem.

Postoji nekoliko načina za mjerenje zakreta električnog motora. Korištenje enkodera je jedan od tih načina. Enkoder se temelji na pretvorbi rotacijskog kretanja motora u digitalne signale. Optički enkoderi koriste laserski izvor i fotoćeliju za mjerenje promjena u svjetlosti i pretvaranje istih u električne signale. Elektromagnetski enkoderi mjere promjene u magnetnom polju za mjerenje rotacije, dok kapacitivni mjere promjene u električnom polju za određivanje rotacije. Postoje i mehanički senzori koji koriste mehaničke interakcije za mjerenje rotacije. Odabir odgovarajućeg senzora ovisit će o specifikacijama motora i zahtjevima aplikacije.

Senzori za mjerenje zakreta električnog motora su vrlo bitni jer omogućavaju određivanje brzine i smjera rotacije motora. Oni se mogu koristiti u različitim aplikacijama, uključujući kontrolu brzine i pozicioniranja, te kao dio sustava za održavanje i dijagnostiku.

Jedna od vrsta senzora koja nije navedena dosad, a bitna je za ovaj rad, je reluktantni senzor zakreta. Jedan od ove vrste senzora će biti detaljnije obrađen i proučen u ovom radu primjenom FEM analize, no nešto više o FEM analizi u nastavku poglavlja. Reluktantni senzor se temelji na principu promjene otpora u magnetnom polju. Reluktantni senzori kuta zakreta su precizni i osjetljivi na male promjene u položaju, te se često koriste u industriji i vozilima.

FEM analiza (analiza konačnih elemenata) je važna za simulaciju jer omogućava precizno predviđanje ponašanja sustava pod različitim opterećenjima i uvjetima rada. Ova tehnika se koristi za modeliranje i simulaciju struktura i sustava, uključujući i senzore za mjerenje zakreta. Koristeći FEM analizu, moguće je optimizirati dizajn senzora. Osim toga, FEM analiza može pomoći u otkrivanju potencijalnih problema i nedostataka u dizajnu senzora prije nego što se oni pojave u stvarnom radu, što može smanjiti vrijeme i troškove održavanja i popravka. Ukratko, FEM analiza je važna za simulaciju reluktantnih senzora za mjerenje zakreta električnog motora jer omogućava precizno predviđanje ponašanja sustava i optimiziranje dizajna za bolju

učinkovitost i pouzdanost što je važno za različite aplikacije, od vozila do industrijskih procesa, te je ključno za uspješno funkcioniranje mnogih sustava i uređaja.

Cilj ovog rada je dati prikaz kako se ovakvi senzori izrađuju i simuliraju u FEM alatima, te dati pregled upotrebe i izvedbe induktivnih senzora zakreta na temelju dostupne literature. Primjer izvedbe senzora bit će uzet iz literature, modelirat ćemo 2D geometrijski model senzora te obaviti optimiranje oblika rotora senzora pomoću FEM simulacije i metaheurističkog optimizatora. Na 2D modelu optimirane izvedbe senzora, provest ćemo simulacije i proračune promjena induktiviteta senzora ovisno o kutu zakreta. Na kraju samog rada, bit će dan komentar i zaključak na temelju rezultata simulacija.

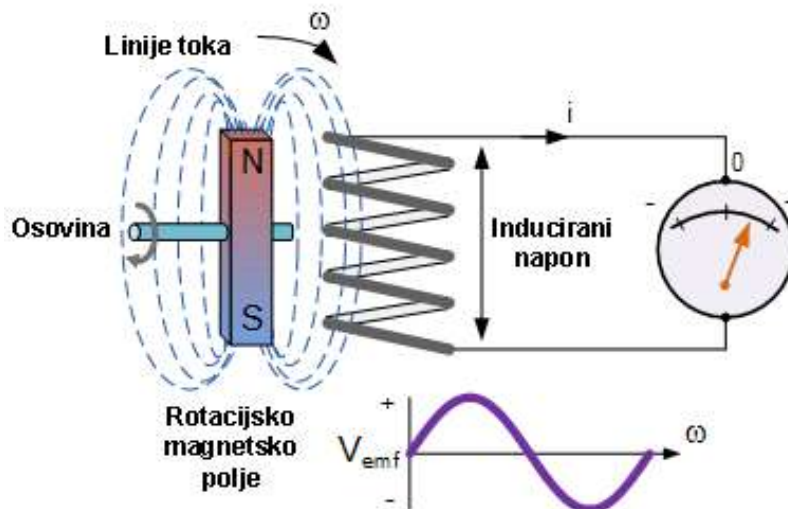
1.1. Diplomski zadatak

U okviru ovog diplomskog rada potrebno je odraditi optimizaciju reluktantnog senzora zakreta motora, odnosno rezolvera, korištenjem jednog od algoritama metaheurističke optimizacije u kombinaciji sa skriptiranjem u Pythonu te simuliranjem u Femm-u.

2. PRIMJENA I IZVEDBE INDUKTIVNIH SENZORA

Kako bismo uopće započeli ikakav razgovor o induktivnim sensorima, moramo shvatiti pojam elektromagnetske indukcije.

Elektromagnetska indukcija je fenomen koji je otkrio Michael Faraday 1830. godine. Ukratko, Faraday je otkrio da promjena u relativnom položaju između zavojnice i magnetskog polja inducira napon na zavojnici koji tjera struju kroz samu zavojnicu. Inducirana struja je takvog smjera da stvara magnetsko polje koje se protivi promjeni inicijalnog magnetskog polja. [1]



Slika 2.1. Prikaz mjerenog napona nastalog uslijed elektromagnetske indukcije [1]

Jačina induciranog napona ovisi o broju namota zavojnice, brzini promijene relativnog položaja između zavojnice i magnetskog polja te o jačini samog magnetskog polja.

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2-1)$$

Induktivni senzori zakreta su uređaji koji rade na principu elektromagnetske indukcije. Ovi senzori stvaraju vlastito magnetsko polje te mjere promjene u istom, a promjene nastaju kada se ciljani objekt, a to je najčešće osovina, kreće kroz samo magnetsko polje. Senzor se sastoji od zavojnice koja je zaslužna za stvaranje magnetskog polja i sklopa koji mjeri promjene u istom. Sklop koji

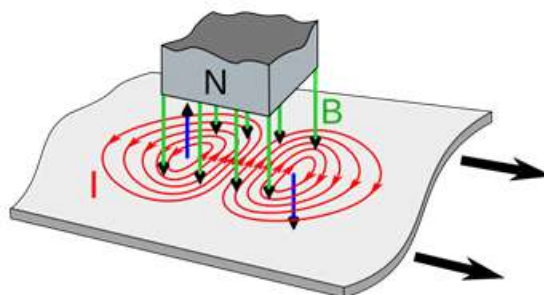
mjeri promjene u magnetskom polju zapravo mjeri napon koji promjene magnetskog polja induciraju. Jačina induciranog napona je proporcionalna promjeni položaja ciljanog objekta. Postoje različiti načini na kojima se elektromagnetska indukcija može iskoristiti za mjerenje zakreta, stoga postoje i različite izvedbe senzora koji rade na ovom principu. Neke od izvedbi senzora zakreta koji su objašnjeni u nastavku ovog poglavlja su :

- Senzor vrtložnih struja
- Hall senzor
- Magnetorezistivni senzor
- Rezolveri

2.1. Senzor vrtložnih struja

Senzor vrtložnih struja za svoj rad koristi magnetsko polje velike frekvencije. Magnetsko polje je generirano protokom struje velike frekvencije koja teče zavojnicom u glavi senzora. Brze promjene u magnetskom polju u okolnim vodljivim objektima induciraju vrtložne struje. [2]

Vrtložne struje su struje koje teku zatvorenim petljama u vodljivim plohama koje su postavljene tako da postoji magnetski tok koji prolazi kroz njih, a nastaju kao posljedica elektromagnetske indukcije. [2]



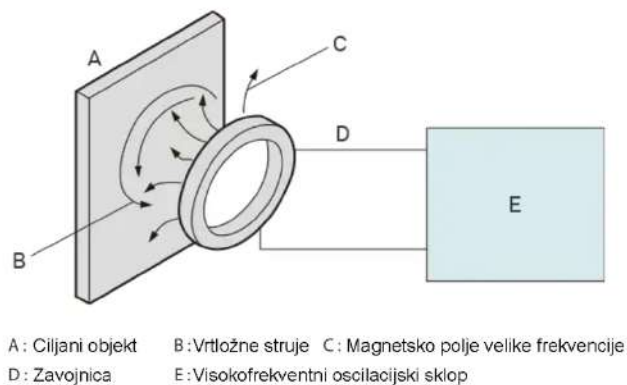
Slika 2.2. Prikaz stvaranja vrtložnih struja u metalnoj plohi uslijed elektromagnetske indukcije [2]

Nastale vrtložne struje generiraju vlastito magnetsko polje koje se opire promijeni inicijalnog magnetskog polja što utječe na frekvenciju istog, a to na kraju rezultira promjenom impedancije

samog senzora. Senzor mjeri promijene u impedanciji, a time ima i informaciju o položaju ciljanog objekta u odnosu na senzor. [2]

$$Z_L = j\omega L \quad (2-2)$$

Formula (2-2) prikazuje odnos frekvencije i impedancije. Svaka zavojnica, uz induktivnost, također ima otpornost i kapacitivnost zbog čega sama impedancija zavojnice ima kompleksniji oblik od prikazanog formulom, no za potrebne objašnjenja, otpornost i kapacitivnost (realne) zavojnice su zanemareni.



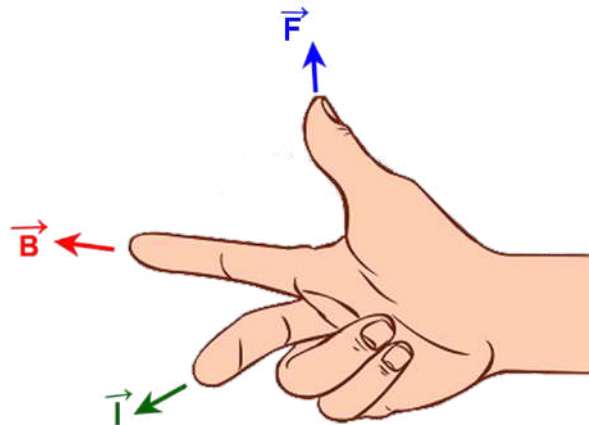
Slika 2.3. Prikaz senzora vrtložnih struja [3]



Slika 2.4. Primjer sustava za mjerenje pozicije vrtložnim strujama – CMS 785 [4]

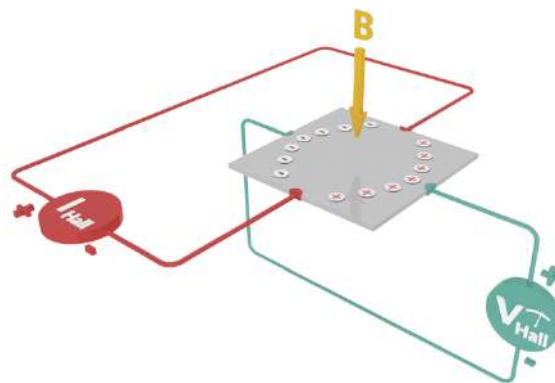
2.2. Hall senzor

Hall senzor je tip induktivnog senzora koji radi na principu Hallovog efekta. Hall efekt je otkrio E. H. Hall 1879. godine. To je pojava razlike potencijala na vodiču koji se nalazi u magnetskom polju te kojim teče struja. Naime, kako se elektroni kreću u magnetskom polju, na njih djeluje magnetska sila čiji smjer možemo utvrditi primjenom pravila desne ruke (slika 2.5.). [5]



Slika 2.5. Pravilo desne ruke [6]

Usljed djelovanja magnetske sile, elektroni se pomiču prema jednoj strani vodiča što rezultira separacijom naboja što stvara razliku potencijala. Nastala razlika potencijala se naziva "Hallov napon". Također, uslijed separacije naboja nastaje električno polje i električna sila te se putanja elektrona ustaljuje na mjestu gdje se magnetska i električna sila poništavaju (slika 2.6.). [5]



Slika 2.6. Prikaz separacije naboja (razlike potencijala) uslijed Hallovog efekta [7]

Što se tiče izlaza senzora, razlikujemo Hall senzore sa analognim i digitalnim izlazom. Senzore sa analognim izlazom nazivamo još i linearnim. Njihov izlazni signal dolazi direktno iz operacijskog pojačala. Izlazni Hallov napon je prikazan formulom (2-3).

$$U_H = R_H \left(\frac{I}{t} \times B \right) \quad (2-3)$$

U formuli za Hallov napon (2-3), R_H predstavlja koeficijent Hallovog efekta, a t predstavlja debljinu senzora izraženu u milimetrima. [8]

Senzori s digitalnim izlazom imaju Schmittov okidač sa ugrađenom histerezom priključen na izlaz operacijskog pojačala. Ugrađena histereza eliminira bilo kakve oscilacije izlaznog signala. Kada magnetski tok kroz Hallov senzor nadmaši određenu predefiniranu vrijednost, izlaz senzora se uključuje. [8]

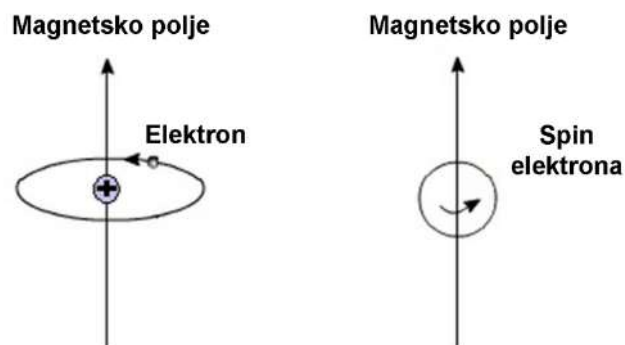


Slika 2.7. Primjer Hallovog senzora – 55140 [9]

2.3. Magnetorezistivni senzori

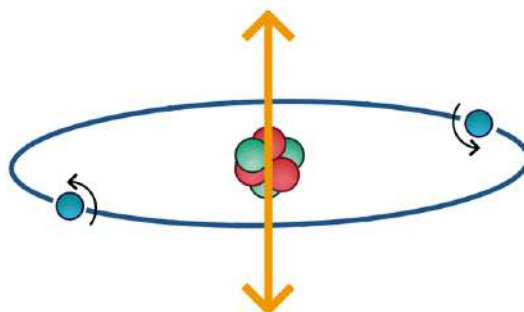
Prije no što počnemo sa objašnjavanjem pojedinih vrsta magnetorezistivnih senzora, treba naglasiti kako svi oni rade na principu magnetizacije materijala pa je dobro objasniti što je zapravo magnetizacija.

Kao što znamo, materijali u prirodi se sastoje od mnoštva atoma koji imaju svoju jezgru i elektronski omotač. Elektroni putuju po kružnim putanjama oko jezgre i također se rotiraju oko svoje osi što nazivamo spin elektrona. Spin elektrona generira magnetsko polje čiji smjer možemo odrediti pravilom desne ruke (slika 2.8.). [10]



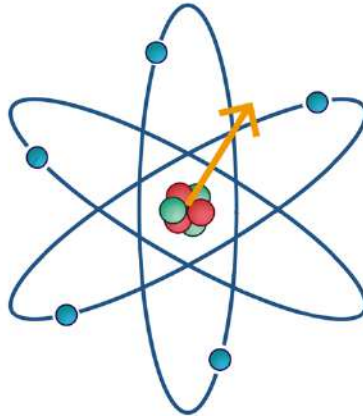
Slika 2.8. Prikaz nastalih magnetskih polja uslijed spina elektrona [10]

Elektroni mogu biti upareni ili neupareni. U slučaju uparenih elektrona, međusobni spinovi su takvi da generiraju polja suprotnih smjerova te se ona poništavaju (slika 2.9.).



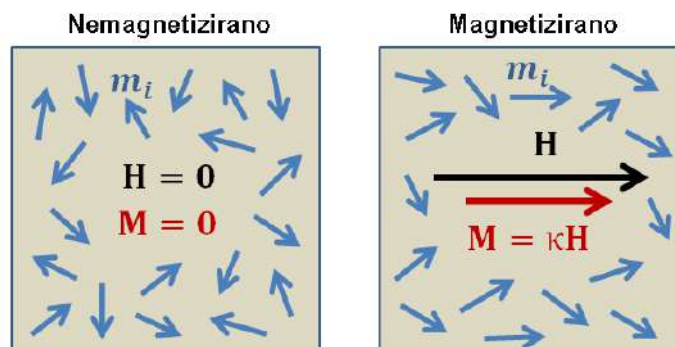
Slika 2.9. Prikaz poništavanja magnetskih polja (narančaste strelice) sparenih elektrona atoma [11]

Kada atom ima jedan neupareni elektron, njegovo magnetsko polje uslijed spina se ne poništava i rezultatno magnetsko polje atoma je različito od 0 te takav atom možemo promatrati kao dipol (slika 2.10.).



Slika 2.10. Prikaz nastalog rezultatnog magnetskog polja uslijed elektronske strukture [11]

Magnetska polja ovakvih atoma su nasumično orijentirana, stoga je unutar samog materijala rezultatno magnetsko polje i dalje jednako 0. Kada se takav materijal postavi u vanjsko magnetsko polje, magnetska polja njegovih atoma se orijentiraju u smjeru vanjskog polja što rezultira unutarnjim magnetskim poljem različitim od 0. Ova pojava povećanja unutarnjeg magnetskog polja se zove magnetizacija, a materijal možemo smatrati magnetiziranim. Magnetizaciju označavamo sa slovom M (slika 2.11.).



Slika 2.11. Prikaz nastale magnetizacije M uslijed vanjskog magnetskog polja H [12]

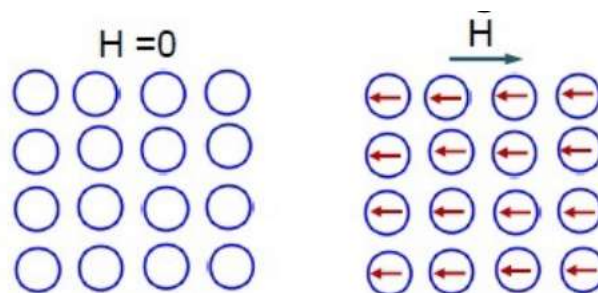
Magnetizacija je magnetski moment po jedinici volumena, a mjerna jedinica je A/m. Uslijed magnetizacije, dolazi do povećanja magnetske indukcije u materijalu, a nju možemo prikazati formulom (2-4) gdje je H jakost vanjskog magnetskog polja, a μ_0 permeabilnost. Permeabilnost je mjera koliko se određeni materijal može magnetizirati. [10]

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (2-4)$$

S obzirom na smjerove magnetskih polja unutar materijala, razlikujem tri vrste materijala :

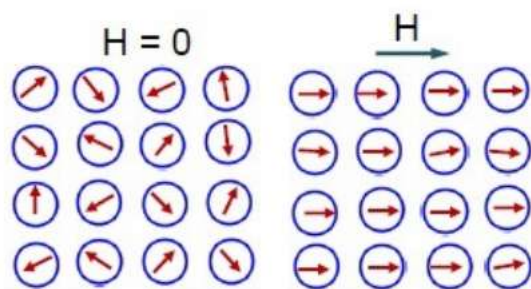
- Dijamagnetici
- Paramagnetici
- Feromagnetici

Dijamagnetici u sebi razvijaju slabi magnetizam samo u slučaju kada na njih djeluje vanjsko magnetsko polje. Kada na dijamagnetike djeluje vanjsko polje, unutarnja magnetska polja su usmjerena u suprotnome smjeru u odnosu na vanjsko polje (slika 2.12.). Najpoznatiji primjeri ovakvih materijala su bakar i cink. [10]



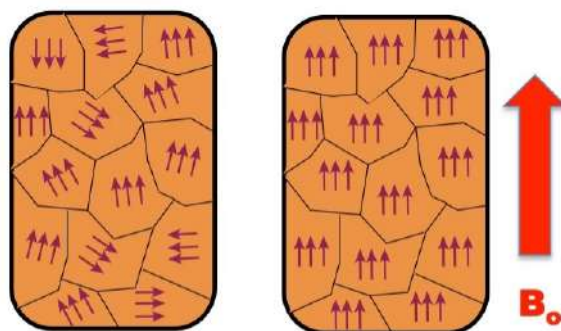
Slika 2.12. Prikaz smjera djelovanja unutarnjeg magnetskog polja dijamagnetika uslijed djelovanja vanjskog magnetskog polja [10]

Paramagnetici su materijali čiji atomi imaju jedan neupareni elektron te u njima postoje unutarnja magnetska polja, no njihovi smjerovi magnetskih polja su nasumični, stoga je rezultatno magnetsko polje jednako 0. Tek nakon što na paramagnetik djeluje vanjsko magnetsko polje, unutarnja magnetska polja se orijentiraju u istom smjeru kao vanjsko polje i magnetizacija se postiže (slika 2.13.). Najpoznatiji primjeri ovakvih materijala su aluminij i krom. [10]



Slika 2.13. Prikaz smjera djelovanja unutarnjeg magnetskog polja paramagentika uslijed djelovanja vanjskog magnetskog polja [10]

Feromagnetici su materijali čiji atomi imaju jedan ili više neuparenih elektrona, stoga imaju trajno unutarnje magnetsko polje bez djelovanja vanjskog magnetskog polja. Atomi feromagnetika se dijele na skupine s obzirom na smjer djelovanja magnetskog polja atoma, a takve skupine nazivamo domene (slika 2.14).



Slika 2.14. Prikaz domena feromagnetika prije i tijekom djelovanja vanjskog magnetskog polja [10]

Materijal se sastoji od više domena sa svojim magnetskim poljima, a budući da su ti smjerovi nasumični, resultantno magnetsko polje jednako je 0. Kada na feromagnetik djelujemo vanjskim magnetskim poljem, smjerovi magnetskih polja domena se orijentiraju u smjeru vanjskog magnetskog polja i postiže se magnetizacija. Najpoznatiji primjeri ovakvih materijala su željezo, kobalt i nikal.

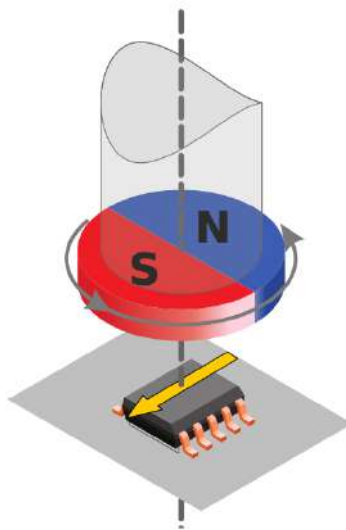
Magnetizaciju je moguće postići do određene granice kada nastupa zasićenje. Nakon točke zasićenja, magnetizacija ne raste bez obzira koliko pojačali jakost vanjskog magnetskog polja. [10]

Magnetorezistivni senzori mjere poziciju detektiranjem promjena otpora kao odgovor na promjene u magnetskom polju. Točnije, magnetorezistivni senzori rade na principu magnetorezistivnosti. Magnetorezistivnost je ovisnost električne otpornosti o magnetizaciji. Naime, kao što smo već spomenuli, pri magnetiziranju materijala, atomi i njihovi elektroni se preusmjere u smjeru vanjskog magnetskog polja. Pri tome, elektroni su "zaključani" u jednu poziciju te je broj slobodnih elektrona značajno smanjen. To rezultira smanjenjem mogućih putova za protok električne struje uslijed čega raste otpor.

Magnetorezistivni senzori se prema tipu dijele na :

- AMR (*Anisotropic Magnetoresistive*)
- GMR (*Giant Magnetoresistive*)
- TMR (*Tunnel Magnetoresistance*)

Ono što je zajedničko svim magnetorezistivnim sensorima je to da je za njihovo mjerenje potreban permanentni magnet koji u sebi nosi informaciju o poziciji rotora. Glavna razlika senzora je komponenta magnetskog polja na koju se određeni tip senzora oslanja za mjerenje. Permanentni magneti su postavljeni na kraj osovine u neposrednoj blizini samog senzora (slika 2.15.).

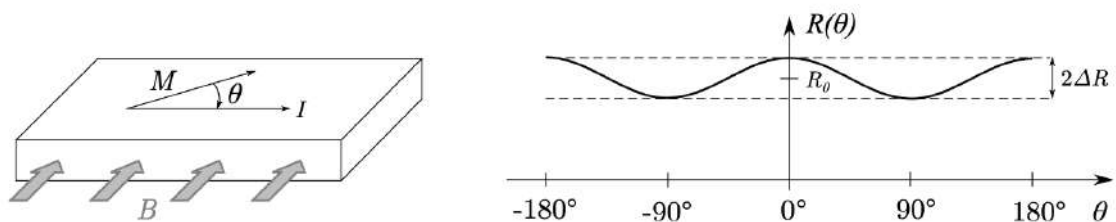


Slika 2.15. Prikaz postavke permanentnog magneta i senzora [13]

AMR senzori se koriste za mjerenje jačine i smjera magnetskog polja. AMR senzor se sastoji od tankog filma izrađenog od feromagnetskog materijala, najčešće je to slitina nikla i željeza. Film je oblikovan u niz paralelnih žica koje su postavljene okomito u odnosu na smjer magnetskog polja koje se mjeri. Kada se narine magnetsko polje na žice, magnetska polja unutar domena materijala se orijentiraju u smjeru vanjskog polja i električna otpornost žica se mijenja. Ovisnost otpora filma o smjeru magnetizacije prikazana je formulom (2-5).

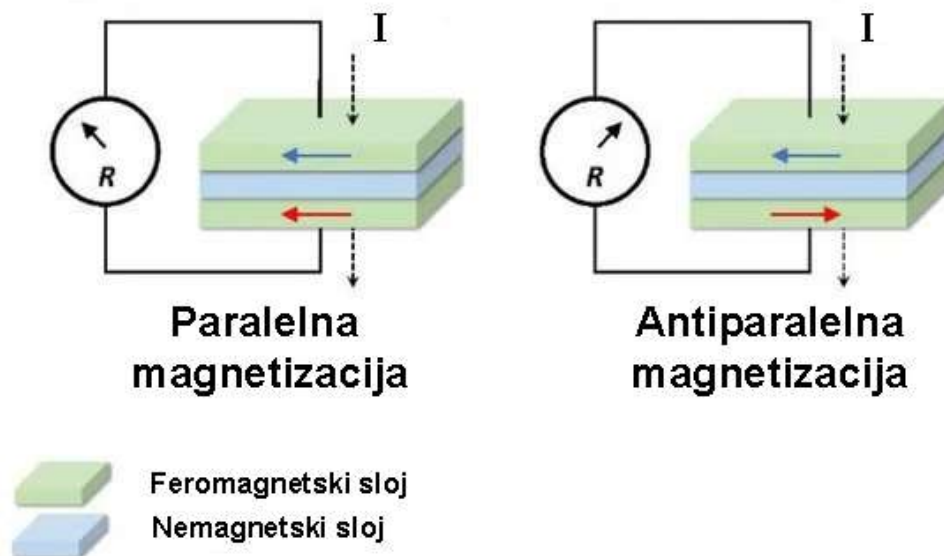
$$R(\theta) = R_0 + \Delta R \cos^2 \theta = R_0 \left(1 + \frac{\Delta R}{R} \cos^2 \theta\right) \quad (2-5)$$

S obzirom da u formuli postoji član \cos^2 , otpor AMR senzora tijekom jedne mehaničke revolucije može biti prikazan kosinusnom krivuljom čiji je period duplo kraći od perioda revolucije (slika 2.16.). [13]



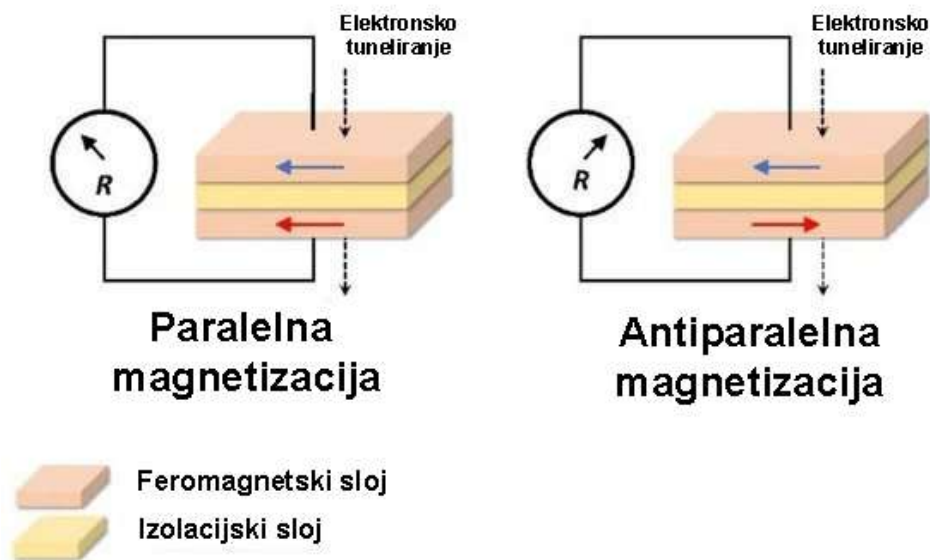
Slika 2.16. Prikaz promjene otpora AMR senzora tijekom jedne mehaničke revolucije [13]

GMR senzori se obično koriste za čitanje podataka sa tvrdih diskova, koriste se kao biosenzori te u mikroelektromehaničkim sustavima. Oni se sastoje od više slojeva feromagnetskog materijala i nemagnetskog materijala koji su poslagani naizmjenice (slika 2.17.). Otpor GMR senzora ovisi o smjeru magnetizacije feromagnetskih slojeva pa tako u slučaju kada su magnetizacije slojeva paralelne, senzor ima najmanji otpor, a kada su antiparalelne, senzor postiže najveći otpor. [13]



Slika 2.17. Ovisnost otpora o postavkama magnetizacije slojeva GMR senzora [14]

TMR senzor je tip senzora koji radi na principu magnetorezistivnog tunelskog efekta. Senzor se sastoji od tankog izolacijskog sloja koji se nalazi između dvije feromagnetske elektrode (slika 2.18.). Kada se senzor nalazi u magnetskom polju, unutarnje magnetsko polje elektroda se preusmjeri što utječe na vjerojatnost da će doći do elektronskog tuneliranja kroz izolacijski sloj što krajnje utječe na otpor samog senzora. Promjena otpora je proporcionalna jakosti magnetskog polja. Ključni faktor za utvrđivanje učinka senzora je debljina i kvaliteta izolacijskog sloja. Izolacijski sloj mora biti dovoljno tanak da može doći do proboja elektrona (tuneliranja), ali ne pretanak da sloj postane potpuno vodljiv. Također, vrlo je bitno da sloj nema nečistoća jer iste uzrokuju struje curenja čime se smanjuje točnost senzora.



Slika 2.18. Ovisnost otpora o postavkama magnetizacije slojeva TRM senzora [14]

Sva tri tipa MR senzora (AMR, GMR, TMR) su pouzdan i učinkovit način mjerenja položaja te predstavljaju dobru alternativu drugim tehnologijama senzora položaja poput optičkih i induktivnih senzora. Međutim, osjetljivi su na promjene temperature te mogu zahtijevati dodatnu temperaturnu kompenzaciju.

2.4. Rezolveri

Rezolveri su senzori zakreta koji su u principu rotirajući transformatori te se ovakva vrsta senzora najviše koristi u svrhu mjerenja pozicije rotora. Rezolveri se sastoje od primarnog i dva sekundarna namota.

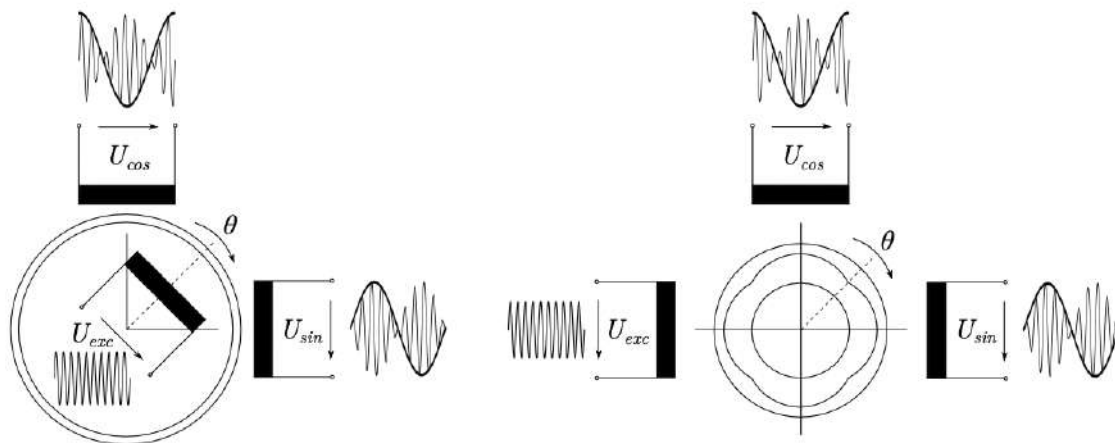
Rezolveri se, s obzirom na izvedbu, dijele na dvije vrste :

- WF (*Wound Field*) rezolver
- VR (*Variable Reluctance*) rezolver

WF rezolver ima primarni namot na rotoru i pobuđen je frekvencijom od nekoliko kHz. Sekundarni namoti su smješteni na statoru okomito jedan na drugi te daju sinusne i kosinusne izlazne signale s obzirom na položaj osovine. Ova izvedba ima nekoliko nedostataka budući da je

potrebno pobuđivati rotor, povećava se aksijalna duljina i sami proces proizvodnje se dodatno komplicira.

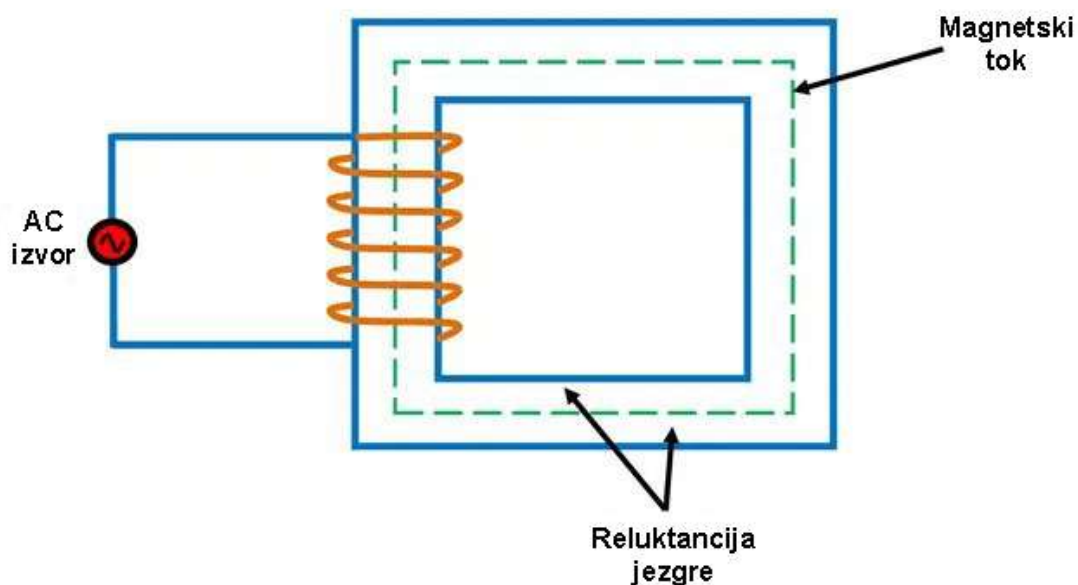
Za razliku od WF rezolvera, VR rezolver ima primarni i oba sekundarna namota na statoru što za prednost ima kraću aksijalnu duljinu, jednostavniju izvedbu i veću otpornost na termopraturne napore i distorzije u vanjskom polju. Baš zbog ovih prednosti, ovaj tip senzora se preferira nad WL tipom. Slika 2.18. prikazuje razliku strukture WF i VR rezolvera. [13]



Slika 2.18. Usporedba strukture WF rezolvera (lijevo) i VR rezolvera (desno) [13]

Bitna razlika između ova dva tipa rezolvera je u zračnom rasporu. WF rezolver je dizajniran tako da ima konstantan zračni raspor što rezultira sinusoidalni izlazni signal zbog sinusoidalnog rasporeda namota. Kod VR rezolvera, namoti su ravnomjerno raspoređeni, a izlazni sinusoidalni signal je rezultat sinusoidalnog toka kroz zračni raspor. O ovome nešto više u nastavku poglavlja.

Prije no što dublje zaronimo u teoriju VR rezolvera, treba objasniti pojam reluktancije koja se nalazi u samoj srži ove vrste senzora. Reluktancija se može nazivati još i magnetskim otporom. Točnije, reluktancija je svojstvo magnetskog kruga da se opire stvaranju magnetskog toka (slika 2.19.).



Slika 2.19. Prikaz magnetskog kruga [15]

Reluktancija je proporcionalna duljini magnetskog kruga, a obrnuto proporcionalna površini presjeka vodiča. To je skalarna veličina, a prikazana je formulom (2-6).

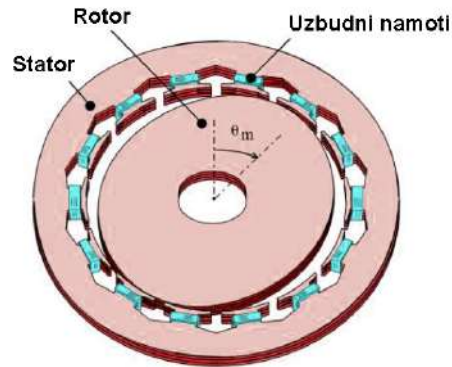
$$S = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \quad (2-6)$$

U formuli (2-6), l predstavlja duljinu kruga, A površinu presjeka vodiča, μ_0 je permeabilnost vakuma dok je μ_r relativna permeabilnost. [15]

VR rezolveri su senzori koji upravo rade na principu promjenjive reluktancije čijim mjerenjem utvrđuju položaj rotora. Rotor i stator rezolvera zajedno sa zračnim rasporedom čine magnetski krug. Stator rezolvera ima feromagnetsku jezgru te se na njemu nalaze namoti dok rotor također ima feromagnetsku jezgru, a oblikovan je tako da njegovim rotiranjem dolazi do promjene duljine zračnog raspora ili u površini sprege što uzrokuje promjenu u reluktanciji (slika 2.19.). Promjene u reluktanciji induciraju napone u sekundarnim namotima (sinusni i kosinusni). [16]

Električna nula definirana je kao položaj rotora u odnosu na stator u kojem postoji minimalna amplituda napona na sinusnom namotu i najveća amplituda napona na kosinusnom namotu kada je uzбудni namot pobuđen nazivnim naponom.

Položaj ili kut rotora određenog trenutka je arc tan izlaznog napona sinusnog namota podijeljen s izlazom kosinusnog namota.



Slika 2.19. Prikaz strukture jedne od izvedbi VR rezolvera [16]

Velika prednost VR rezolvera je ta da su otporni na temperaturu, vlagu, vibracije zbog čega su pogodni za nezahvalna industrijska okruženja. VR rezolveri također imaju brzi odziv, a uz to su jednostavni i jeftini za proizvodnju. Detaljnije o VR rezolveru u sljedećem poglavlju.

3. IZVEDBA I MODEL RELUKTANTNOG INDUKTIVNOG SENZORA ZAKRETA

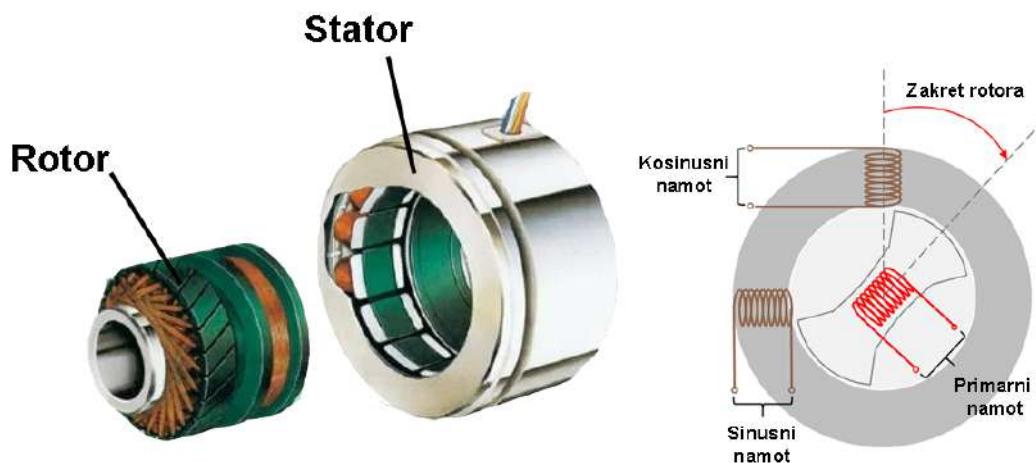
U sustavima visokih performansi, ono što postavlja temelje za vektorsko upravljanje pogonima su upravo signali visoke preciznosti i razlučivosti, a upravo se, među raznim vrstama senzora, rezolveri i optički enkoderi nameću kao najbolje opcije za navedene zahtjeve. Kao što je već rečeno, ovaj rad se bavi rezolverima, točnije rezolverima promjenjive reluktancije, stoga će u nastavku ovog poglavlja biti dan detaljan prikaz strukture VR rezolvera te matematički model istog. [18]

Rezolveri promjenjive reluktancije se obično koriste u automobilskoj industriji, a njihova upotreba u nekim drugim industrijama poput avioindustrije i vojne industrije je dosad bila značajno limitirana budući da su konvencionalne izvedbe ove vrste senzora imale manjak preciznosti. Međutim, novije generacije VR rezolvera ostvaruju značajan napredak u preciznosti te se sve više koriste i u ostalim industrijama osim automobilske. [18]

Kao što je već rečeno, osim rezolvera postoje neka druga rješenja kada postoji zahtjev za preciznim informacijama o poziciji rotora kao što su optički enkoderi te moguće i potencimetri. No međutim, u usporedbi sa rezolverima, performanse enkodera pate kada su prisutne vibracije, krhotine i veliki temperaturni naponi. Potencimetri su vrlo laki za implementiranje i korištenje, no budući da se za svoj rad oslanjaju na četkice koje stružu po pokretnim kontaktima, imaju veliki problem sa pouzdanošću, odnosno vijek trajanja im je smanjen zbog habanja.

S druge strane, rezolveri ne ovise o pokretnim električnim kontaktima za pouzdanost signala i ne pokazuju značajno starenje ili promjene u radu zbog ekstremnih temperatura ili vibracija.

Osim toga, konvencionalni rezolveri daju podatke o položaju rotora visoke točnosti i velike razlučivosti. Sastoje se od statora, rotora i sklopa transformatora te svaki sadrži svoje namote, a struktura konvencionalnog rezolvera je prikazana na slici 3.1. [19]



Slika 3.1. Prikaz strukture konvencionalnog rezolvera [20]

Usprkos tome, konvencionalni rezolveri su komplicirani za proizvodnju i stoga su radno intenzivni i skupi. Nadalje, u većim konvencionalnim rezolverima, primijećeno je da se transformatori raslojavaju i teško ih je preraditi ili zamijeniti. Visoka cijena i složenost proizvodnje konvencionalnih rezolvera doveli su do razvoja rezolvera s promjenjivom reluktancijom.

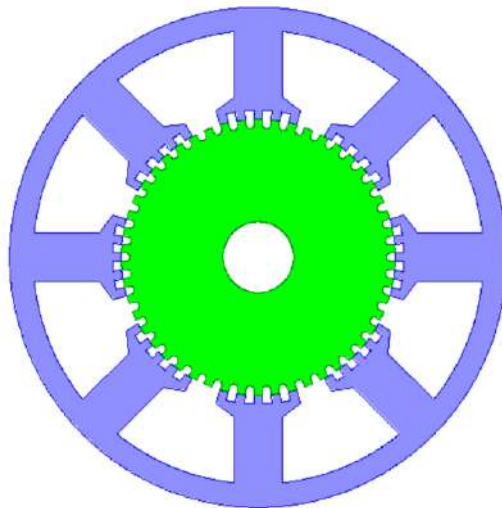
Kako bi se uklonila navedena ograničenja konvencionalnih rezolvera te osiguralo jedno rješenje za senzore položaja rotora, predstavljene su nove generacije senzora. One imaju jednostavnu strukturu, kompaktnu veličinu, vioku pouzdanost te se lako montiraju. Nove generacije VR rezolvera izravno koriste efekte istaknutih polova sa samo jednostavnim uzorcima namota statora. Integracijom ovakvog rezolvera kompaktne veličine i jednostavne strukture izravno u motore, mehanička veza sklona rezonanciji i uzrokovana nelinearnost mogu se eliminirati, a cijeli sustav postaje pouzdaniji. Noviji i napredniji dizajn, odnosno struktura nove generacije VR rezolvera je prikazana u nastavku poglavlja. [19]

Najveća razlika između konvencionalnih rezolvera i rezolvera novih generacija jest ta da su kod novijih generacija rezolvera na statoru sva tri namota. Razvijanje novih generacija VR rezolvera je dovelo do toga da postoje dvije glavne vrste takvih. Prva vrsta radi na principu sinusne promjene duljine zračnog rasporeda između statora i rotora. Ovakva izvedba rezolvera rješava kompliciranost namota konvencionalnih rezolvera pametnim rasporedom svih namota na statoru rezolvera.

Daljnijim razvijanjem ove vrste rezolvera je dovela do više podizvedbi i dizajnova, a razlikuju se po rasporedu namota i oblicima rotora. [21]

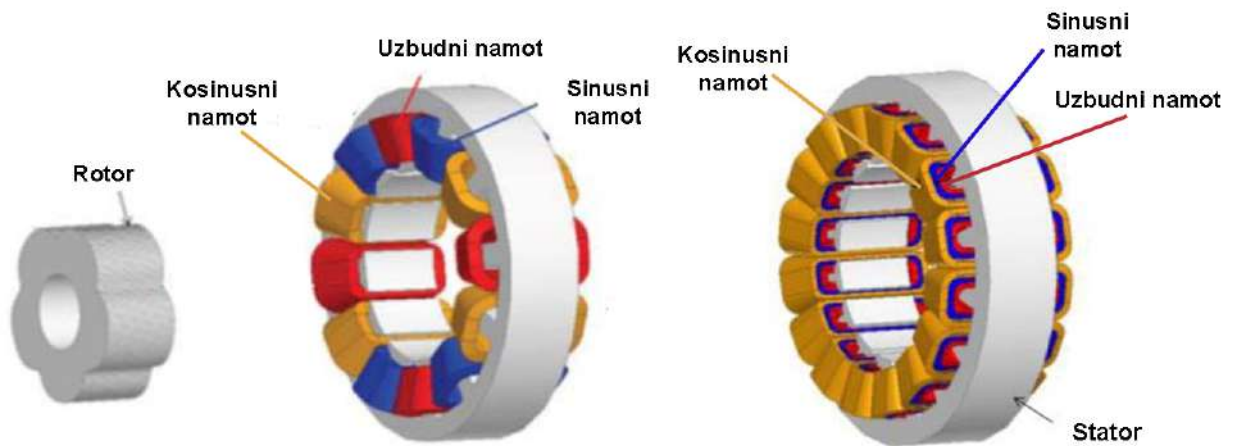
3.1. Rezolver sa sinusnom promjenom duljine zračnog raspora

Najranija izvedba ovakvog rezolvera ima rotor sa zubima (slika 3.1.). Kod ovakvog rezolvera, kako bi se zajamčila visoka preciznost, broj zubaca rotora mora biti velik, a uz to pažljivo treba razmotriti i geometriju zuba kao što su omjeri širine zuba i razmaka zuba te omjeri dubine utora i razmaka zuba. Troškovi proizvodnje su visoki, a performanse je teško osigurati, tako da je ova vrsta rezolvera ubrzo izašla iz upotrebe. [21]



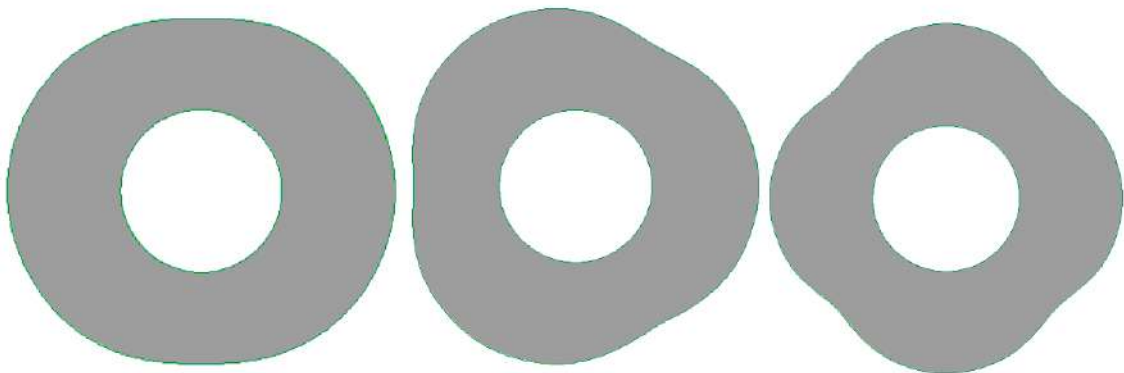
Slika 3.1. Prikaz VR rezolvera sa nazubljenim rotorom [22]

S obzirom na raspored namora, rezolveri mogu imati preklapajući (koncentrirani) i nepreklapajući (distribuirani) raspored namota (slika 3.2).



Slika 3.2. Prikaz različitih struktura VR rezolvera sa sinusnim promjenom duljine zračnog raspora s obzirom na raspored namota [21]

Kao što je već rečeno, postoje i različiti oblici rotora, odnosno rotor može imati više istaknutih polova pa se tako razlikuju po svome obliku (slika 3.3.). Sinusna promjena duljine zračnog raspora je postignuta upravo zbog oblika rotora koji svojim rotiranjem mijenja duljinu zračnog raspora. Porastom broja polova, raste i točnost rezolvera, no s time raste i cijena samog rezolvera. [22]



Slika 3.3. Prikaz različitih oblika rotora VR rezolvera sa sinusnom promjenom duljine zračnog raspora [22]

Kao što samo ime skupine rezolvera kaže, duljina zračnog raspora se mijenja sinusoidalno te ona može biti iskazana kao:

$$g_i = \frac{g_{min}}{\cos(\theta + (i-1)\frac{2\pi}{N_T})} \quad (3-1)$$

Uzbuda je također sinusna te se ona izražava kao :

$$V_{uz} = V \sin(\omega t) \quad (3-2)$$

gdje je V amplituda uzbude, a ω je frekvencija koja je jednaka $2\pi f$. Struja uzbudnog namota je izračena kao :

$$I_{uz} = \frac{V}{\sqrt{R_{uz}^2 + \omega_{UZ}^2 L_{uz}^2}} \sin(\omega t - \tan^{-1}(\frac{\omega L_{uz}}{R_{uz}})) \quad (3-3)$$

Međuindukcije sinusnog i kosinusnog svitka sa uzbudnim su jednake :

$$M_{uz-sin} = M \sin(P\theta) \quad (3-4)$$

$$M_{uz-cos} = M \cos(P\theta) \quad (3-5)$$

Inducirani naponi u sinusnom i kosinusnom namotu se na kraju izražavaju izrazima (3-7), odnosno (3-8).

$$\lambda_{sin} = M_{uz-sin} I_{uz} \quad (3-5)$$

$$\lambda_{cos} = M_{uz-cos} I_{uz} \quad (3-6)$$

$$V_{sin} = \frac{V}{\sqrt{R_{uz}^2 + \omega_{UZ}^2 L_{uz}^2}} M \omega \left[P \frac{d\theta}{dt} \cos(P\theta) \sin(\omega t - \varphi) + \sin(P\theta) \cos(\omega t - \varphi) \right] \quad (3-7)$$

$$V_{cos} = \frac{V}{\sqrt{R_{uz}^2 + \omega_{UZ}^2 L_{uz}^2}} M \omega \left[P \frac{d\theta}{dt} \sin(P\theta) \sin(\omega t - \varphi) + \cos(P\theta) \cos(\omega t - \varphi) \right] \quad (3-8)$$

Signalni namoti rezolvera su spojeni na RDC pretvarač (*Resolved-to-Digital Converter*) koji pretvara analogni signal iz namota u digitalni. RDC očitava amplitude induciranih napona računa poziciju rotora korištenjem izraza (3-9). [23]

$$\theta_{izrač} = \tan^{-1} \left(\frac{V_{sin}}{V_{cos}} \right) \quad (3-9)$$

Glavna mana ovakvog rezolvera jest osjetljivost na nepravilnosti izrade, odnosno greške koje nastaju prilikom proizvodnje bitno utječu na performanse rezolvera. Naime, kako rezolver radi na principu promijene duljine zračnog raspora, tako svako odstupanje rotora od centralne osi daje netočne informacije. Upravo zbog ovoga, ovakav rezolver se ne može koristiti u slučajevima kada postoji zahtjev za visokom preciznošću. [21]

3.2. Rezolver sa sinusnom promjenom površine sprege

Druga vrsta novijih rezolvera radi na principu sinusne promjene površine sprege između rotora i statora. Promjena površine sprege se događa rotiranjem rotora koji ima karakterističnu strukturu koja mu to omogućava. Najznačajnije vrste ovog rezolvera su :

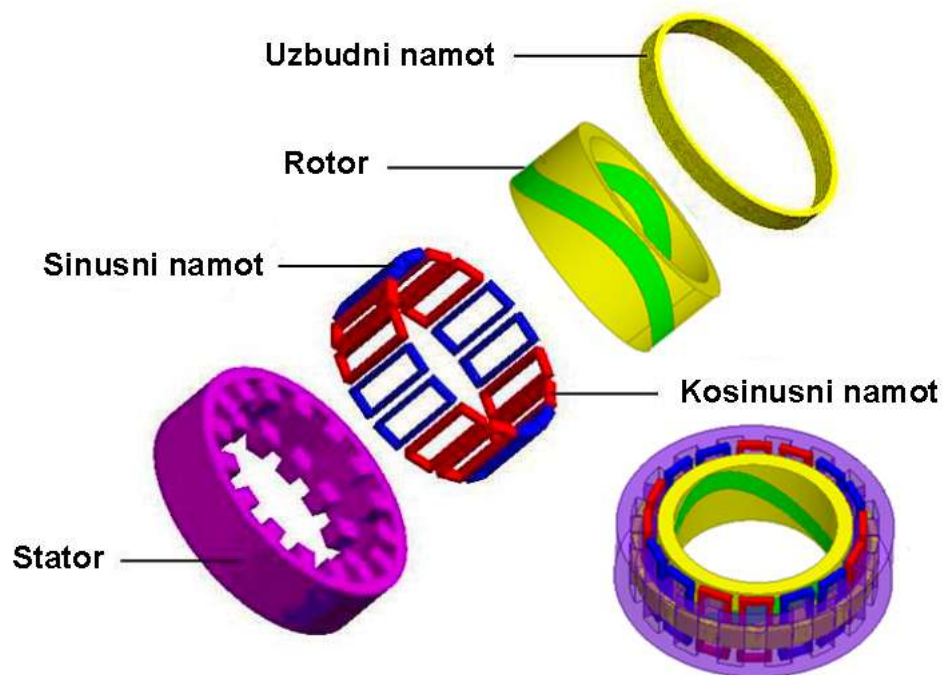
- Rezolver radijalnog toka
- Rezolver aksijalnog toka (*Disk Type Variable Reluctance Resolver*)

Nešto više o pojedinoj vrsti u nastavku poglavlja.

3.2.1. Rezolver radijalnog toka

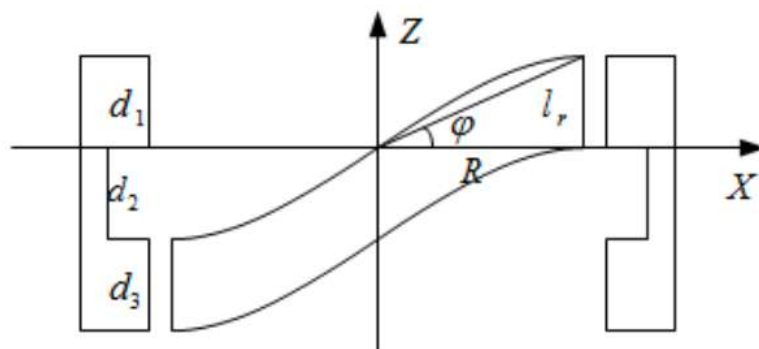
Stator ovakvog rezolvera ima tri dijela: gornji dio, srednji dio i donji dio. Uzbudni namot je smješten u utoru između gornjeg i donjeg dijela, odnosno u srednjem dijelu statora. Na slici 3.4. je prikaz strukture ovakve vrste rezolvera te je na njoj primjer rezolvera koji ima 8 polova koje ćemo označiti sa slovom P. N nasuprotnih zubiju gornjeg i donjeg dijela statora čine jednu grupu (za ovaj primjer N=2) pa je tako na statoru 8PN zubiju na gornjem i donjem djelu, a oni su raspoređeni u 8P grupa. Namoti dviju faza su raspoređeni intervalno tako da se jedna faza namata spiralno oko zubiju jedne grupe, a namoti iste grupe su povezani u seriju. Rotor je cilindričnog oblika te se sastoji od nemagnetnog (potpornog) dijela i feromagnetnog dijela koji se po obodu

rotora prožima u obliku sinusa, odnosno kosinusa (na slici 3.4. označeno sa zelenom bojom) te se njegovim rotiranjem postiže sinusna, odnosno kosinusna promjena površine sprege. [24]



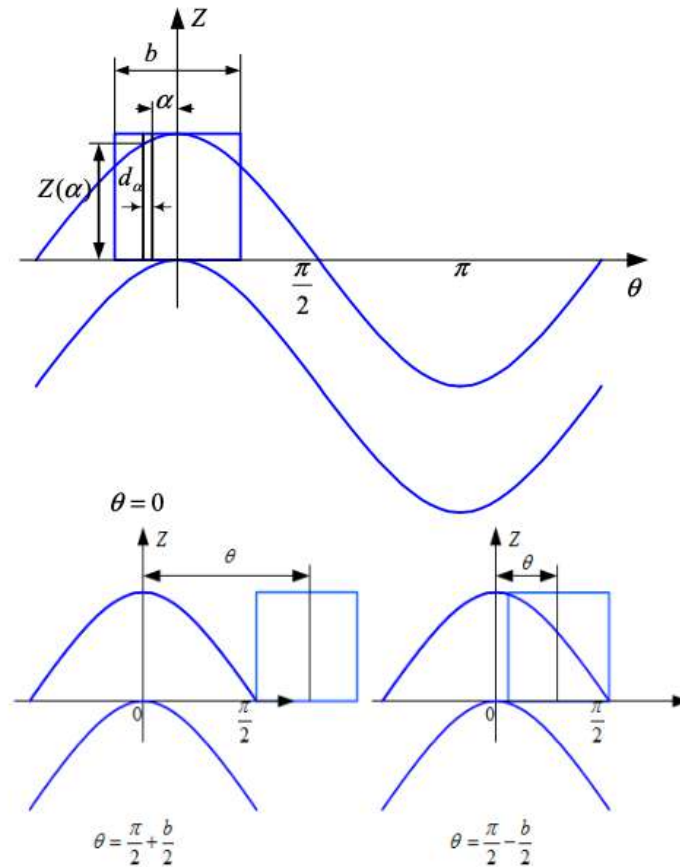
Slika 3.4. Prikaz strukture VR rezolvera sa sinusnom promjenom površine sprege [24]

Da bismo lakše shvatili sam princip rada ove vrste rezolvera, pogledajmo prikaz presjeka rezolvera prikazanim na slici 3.5.



Slika 3.5. Prikaz presjeka VR rezolvera sa sinusnom promjenom površine sprege [24]

Na slici 3.4., duljine d_1 , d_2 , d_3 i l_r su jednake. Duljine označene sa slovom d su duljine gornjeg, srednjeg i donjeg dijela statora dok je l_r debljina feromagnetnog dijela rotora. Sada kada nam je jasnije u kojem su prostornom odnosu zubi statora sa feromagnetnim rotorom, možemo pogledati sliku 3.6. na kojoj se vidi odnos rotora i pojedinog zuba iz perspektive pojedinog zuba, a na toj slici ćemo temeljiti i sami matematički model. [24]



Slika 3.6. Prikaz odnosa zuba statora i feromagnetnog rotora [24]

Korištenjem računske metode, možemo dobiti jednadžbe koje prikazuju odnos kuta zakreta rotora i površine sprege :

$$S_{gornji} = R \int Z(\alpha) d\alpha = \begin{cases} R \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} R \tan \varphi \cos(\theta + \alpha) d\alpha = 2R^2 \tan \varphi \sin\left(\frac{b}{2}\right) \cos \theta, & 0 < \theta < \frac{\pi}{2} - \frac{b}{2} \\ \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{\pi}{2} - \theta} R \tan \varphi \cos(\theta + \alpha) d\alpha = R^2 \tan \varphi \left[1 - \sin\left(\theta - \frac{b}{2}\right) \right], & \frac{\pi}{2} - \frac{b}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} + \frac{b}{2} \\ 0, & \frac{\pi}{2} + \frac{b}{2} < \theta < \pi \end{cases} \quad (3-10)$$

$$S_{donji} = R \int Z(\alpha) d\alpha = \begin{cases} 0, & \pi \leq \theta < \frac{\pi}{2} - \frac{b}{2} \\ \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{\pi}{2} - \theta} R \tan \varphi \cos(\theta + \alpha) d\alpha = R^2 \tan \varphi \left[1 - \sin\left(\theta - \frac{b}{2}\right) \right], & \frac{\pi}{2} - \frac{b}{2} < \theta < \frac{\pi}{2} + \frac{b}{2} \\ R \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} R \tan \varphi \cos(\theta + \alpha) d\alpha = 2R^2 \tan \varphi \sin\left(\frac{b}{2}\right) \cos \theta, & \frac{\pi}{2} + \frac{b}{2} < \theta \leq \pi \end{cases} \quad (3-11)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{l_s}{R}\right) \quad (3-12)$$

U prikazanim jednadžbama, prosječna duljina zračnog raspora je označena sa R , b je širina pojedinog zuba statora, θ je kut zakreta rotora, a φ (slika 3.5.) je kut nagiba feromagnetnog rotora. Zbrajanjem izraza (3-10) i (3-11) dobivamo ukupnu površinu sprege jednog para polova rotora :

$$S = S_{gornji} + S_{donji} = 2R^2 \tan \varphi \sin\left(\frac{b}{2}\right) \cos \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (3-13)$$

Površina sprege P-polnog rezolvera je :

$$S = PR^2 \tan \varphi \sin\left(\frac{b}{2}\right) \cos \theta = K \cos \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \pi \quad (3-14)$$

gdje je $K = PR^2 \tan \varphi \sin\left(\frac{b}{2}\right)$. Jendadžzba (3-14) pokazuje da je površina sprege sinusna funkcija koja ovisi o kutu zakreta rotora θ .

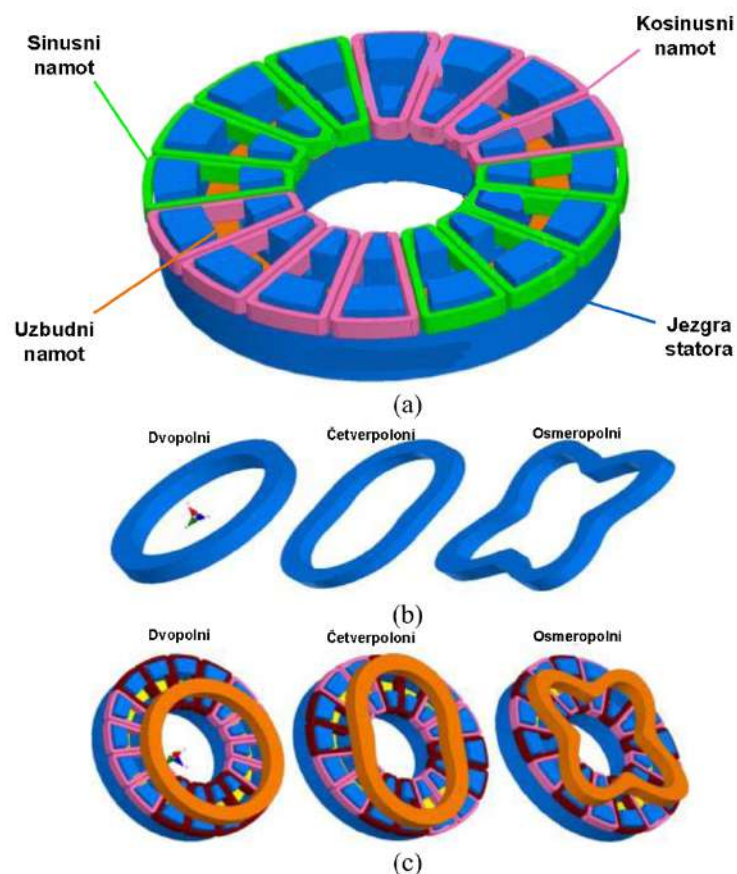
Budući da inducirani napon u signalnim svitcima direktno ovisi o magnetskom toku kroz njih, a koji također direktno ovisi o površini koju magnetske silnice presijecaju, jasno je da će inducirani naponi biti sinusni, odnosno kosinusni budući da površina sprege ima sinusnu promjenu. [24]

Na ovakvu vrstu rezolvera odstupanja od centralne osi rotacije nemaju značajan utjecaj, no nepravilnosti u obliku samog rotora mogu značajnije utjecati na performanse. Nepravilnosti u obliku rotora su rezultat grešaka u proizvodnji koje su, nažalost, neizbježne. [21]

3.2.2. Rezolver aksijalnog toka (*Disk type variable reluctance resolver*)

Bitno kod DTVR-a jest to da njegova izvedba rješava probleme koji nastaju zbog nepravilnosti oblika rotora.

DTVR rezolver ima strukturu jednog statora/jednog rotora u obliku diska. Kao što je prikazano na slici 3.7.a. Stator ima 16 radijalno užlijebljenih utora koji sadrže signalne namote (kosinusni i sinusni) i periferni utor u sredini jezgre koji sadrži uzбудni namot. Princip raspored namota je isti kao i kod rezolvera prikazanog u prijašnjem potpoglavlju te sami raspored najviše ovisi o broju polova statora. Rotor ima jednostavnu strukturu bez namota. 2-polni, 4-polni i 8-polni rotori prikazani su na slici 3.7.b, a sastavljeni DTVR rezolveri prikazani su na slici 3.7.c. [21]



Slika 3.7. Prikaz rasporeda namota DTVR rezolvera (a), oblika rotora DTVR rezolvera s obzirom na broj polova (b), sastavljenih DTVR rezolvera s obzirom na broj polova rotora (c) [21]

Ako pretpostavimo da je uzbuda sinusna, možemo izraziti napon uzbude:

$$V_{uz} = V \cos(\omega t) \quad (3-15)$$

gdje je V amplituda uzbuđenog napona. Struja se onda može računati izrazom :

$$I_{uz} = \frac{V}{\sqrt{R_{uz}^2 + L_{uz}^2 \omega^2}} \cos \left(\omega t - \arctan \left(\frac{L_{uz} \omega}{R_{uz}} \right) \right) \quad (3-16)$$

gdje je su R_{uz} i L_{uz} otpor, odnosno induktivitet uzbude. Uzbuđni magnetski tok se može računati tako da se pomnože magnetomotorna sila uzbude i permeabilnost zračnog raspورا (Λ):

$$\phi_{uz} = \Lambda \times \mathfrak{F}_{uz} = \mu_0 \frac{S}{\delta} \times \mathfrak{F}_{uz} = \mu_0 \frac{S}{\delta} \times N_{uz} I_{uz} \quad (3-17)$$

gdje je δ duljina zračnog raspورا, N_{uz} je broj namota uzbuđenog svitka, S je površina sprege, a njen iznos pod i -tim zubom statora se može računati izrazom (3-18).

$$S_i = K \cos \left(p\theta + (i-1)p \times \frac{2\pi}{Z} \right) \quad (3-18)$$

K predstavlja geometrijske parametre rezolvera, a p je broj pari polova. Magnetski tok koji prolazi i -tim zub statora je izražen kao :

$$\phi_i = \Lambda_i \times \mathfrak{F}_{uz,i} = \mu_0 \frac{K}{\delta} \cos \left(p\theta + (i-1)p \times \frac{2\pi}{Z} \right) \frac{\mathfrak{F}_{uz}}{Z_s} \quad (3-19)$$

te su ulančani tokovi signalnih namota jednaki izrazima (3-20) i (3-21).

$$\Psi_1 = \sum_{i=1,5,9,13} N_i \times \phi_i - \sum_{i=3,7,11,15} N_i \times \phi_i \quad (3-20)$$

$$\Psi_2 = \sum_{i=2,6,10,14} N_i \times \phi_i - \sum_{i=4,8,12,16} N_i \times \phi_i \quad (3-21)$$

Ako izraz (3-19) uvrstimo u izraze (3-20) i (3-21) uz pretpostavku $N_i = N$, ulančani tokovi se onda mogu izraziti kao :

$$\psi_1 = \frac{8N\mu_0K}{Z_s\delta} N_{uz}I_{uz}\cos(p\theta) \quad (3-22)$$

$$\psi_2 = \frac{8N\mu_0K}{Z_s\delta} N_{uz}I_{uz}\sin(p\theta) \quad (3-23)$$

Ako izraz (3-16) uvrstimo u izraze (3-22) i (3-23), dobijemo :

$$\psi_1 = \xi \cos(p\theta) \cos(\omega t - \sigma) \quad (3-24)$$

$$\psi_2 = \xi \sin(p\theta) \cos(\omega t - \sigma) \quad (3-25)$$

gdje vrijedi :

$$\xi = \frac{8N\mu_0K}{Z_s\delta} \sqrt{\frac{N_{uz}V}{\sqrt{R_{uz}^2 + L_{uz}^2\omega^2}}} \quad (3-26)$$

$$\sigma = \arctan \frac{L_{uz}\omega}{R_{uz}} \quad (3-27)$$

Na kraju se mogu izraziti inducirani naponi u signalnim namotima :

$$V_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = \xi\omega \cos(p\theta) \sin(\omega t - \sigma) \quad (3-28)$$

$$V_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = \xi\omega \sin(p\theta) \sin(\omega t - \sigma) \quad (3-29)$$

te se zakret rotora može računati izrazom :

$$\theta = \frac{1}{p} \tan^{-1} \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (3-30)$$

4. Optimizacija reluktantnog induktivnog senzora zakreta

Nadovezujući se na teorijske temelje postavljene u prethodnim poglavljima, ovo poglavlje zadubljuje se u praktičnu realizaciju i optimizaciju rezolvera varijabilne reluktancije koristeći sinergiju metode konačnih elemenata (FEMM), programiranja u Pythonu i optimizacijskog algoritma diferencijalne evolucije. Integracijom elektromagnetske simulacije, računalnog skriptiranja i naprednih optimizacijskih tehnika, ovo poglavlje iznosi na vidjelo opipljive rezultate ovog istraživanja, pokazujući učinkovitost predložene metodologije u poboljšanju performansi VR rezolvera.

Ovaj dio rada se odvija u 3 faze :

- Implementacija alata za numeričke metode (femm)
- Provođenje metaheurističke optimizacije
- Analiza dobivenih rezultata

Faza praktične implementacije podrazumijeva prevođenje teorijskih koncepata u funkcionalni kod. To uključuje stvaranje Python skripti odgovornih za generiranje FEMM modela rezolvera, definiranje parametara simulacije, provođenje elektromagnetskih analiza i izdvajanje relevantnih izlaznih podataka. Integracija simulacijskih mogućnosti FEMM-a s računalnim mogućnostima Pythona postavlja temelje za daljnje pokušaje optimizacije.

Algoritam diferencijalne evolucije, odabran zbog svoje sposobnosti rješavanja složenih i nelinearnih optimizacijskih problema, služi kao optimizacijski mehanizam za poboljšanje parametara dizajna rezolvera. Ova se faza usredotočuje na praktičnu provedbu gore navedene metodologije, ističući korake poduzete da se teorijski koncepti transformiraju u izvršni kod i simulacije.

Što se rezultata tiče, očekuje se da će kulminacija praktične implementacije i optimizacije dati rezultate koji pokazuju učinkovitost predložene metodologije. Ovi ishodi uključuju optimizirane parametre dizajna, poboljšane metrike performansi kao što su točnost i osjetljivost i komparativnu analizu između početnog i optimiziranog dizajna rezolvera. Dodatno, uvidi dobiveni procesom optimizacije mogli bi doprinijeti širem području dizajna i optimizacije elektromehaničkih sustava.

4.1. Implementacija alata za numeričke metode (Femm)

Analiza konačnih elemenata je računalna tehnika koja se koristi za rješavanje složenih inženjerskih i fizičkih problema podjelom domene na manje elemente kojima se može upravljati. Ovi elementi, međusobno povezani u čvorovima, omogućuju aproksimaciju kontinuiranih sustava numeričkim metodama. U našem kontekstu, analiza konačnih elemenata omogućuje modeliranje i analizu elektromagnetskog ponašanja rezolvera varijabilne reluktance i njegove interakcije s geometrijskim varijacijama. Diskretizacijom strukture rezolvera u konačne elemente, analiza omogućuje duboko razumijevanje njegovih elektromagnetskih fenomena, čime se olakšavaju pokušaji optimizacije.

Programski paket Femm je *open source* alat koji stoji kao moćan i naširoko korišten softver za elektromagnetsku simulaciju. Nudi svestranu platformu za simulaciju širokog spektra elektromagnetskih uređaja, uključujući motore, transformatore i induktore. Sposobnost Femm-a da se nosi s prijelaznim i stacionarnim elektromagnetskim fenomenima čini ga neprocjenjivim alatom za istraživanje zamršenih interakcija unutar rezolvera.

Kroz Femm-ovo intuitivno grafičko korisničko sučelje, istraživači mogu konstruirati i analizirati elektromagnetske modele, stječući uvid u distribuciju toka, napone i magnetska polja.

U području elektromagnetskih simulacija, ručno postavljanje modela i analiza mogu oduzimati puno vremena, posebno kada se radi o iterativnim procesima optimizacije.

Femm-ove mogućnosti skriptiranja, dostupne u Pythonu i MATLAB-u, omogućuju istraživačima da automatiziraju simulacije, definiraju geometrije i izvlače rezultate.

Skriptiranje omogućuje istraživačima da brzo ponavljaju, manipuliraju složenim modelima bez napora i učinkovito izvršavaju optimizacijske algoritme. Automatizirajući zadatke simulacije, skriptiranje transformira proces optimizacije iz ručnog poduhvata u algoritamsko istraživanje vođeno podacima.

Za potrebe ovog rada, automatizacija je implementirana korištenjem programskog jezika Python koji nudi mnoštvo korisnih biblioteka ne samo za interakciju s Femm alatom kao što je `pyfem`, već i za obradu rezultata kao što su `numpy` i `math` biblioteke.

Korištenejm pyfemm biblioteke je napisana skripta za generiranje geometrije senzora kao i za provedbu simulacija, dok je za provođenje optimizacije korištena biblioteka scipy koja nudi više metaheurističkih metoda, a odabrana je "differential_evolution" metoda, odnosno metoda diferencijalne evolucije.

Pyfemm nudi sve opcije crtanja geometrije što su dostupna i u samom gafičkom sučelju Femm programa, stoga je načina za crtanje geometrije bezbroj. Bez obzira na algoritam za crtanje, dobra praksa je razdvojiti cijeli algoritam u više manjih dijelova zbog lakše preinake algoritma uslijed problema koji su neizbježni.

Kod ovog rada je razdvojen u sljedeću strukturu:

- main.py
- problem
 - objective_function.py
 - constraints.py
 - problem_base.py
 - ◆ windings
 - cos_windings.py
 - sin_windings.py
 - excitation_windings.py
 - windings.py
 - ◆ geometry
 - parameters.py
 - materials.py
 - rotor.py
 - stator.py

Svaka od datoteka i mapa ima svoju svrhu, a detaljan kod se nalazi u prilogu.

Kao što se može vidjeti, kod je detaljno razdvojen na što više manjih dijelova, a sve sa svrhom lakšeg otklanjanja grešaka jer tijekom provedbi simulacija nastaju određeni problemi na pojedinim dijelovima geometrije te je ovakvim pristupom puno lakše otkriti izvor greške, a time i riješiti istu.

Korisna stvar za imati je i datoteku (nije naveden u strukturi), odnosno funkciju koja samo crta geometriju, a prima vektor kao ulaz. To je korisno zato što tijekom izvršavanja simulacija nastaju nenadane greške te ako napišemo kod koji u slučaju greške isprinta vektor, taj isti vektor možemo ubaciti u našu funkciju koja će nacrtati senzor (bez provedbi simulacija) te lako možemo vidjeti gdje je u geometriji problem. Nakon otklanjanja greške, možemo ponovno pokrenuti simulacije.

Najčešći problemi koji se javljaju su problem nenadanog preklapanja geometrije ili nedovršavanja geometrije na nekim mjestima, a rješavanje ovih problema je samo stvar pravilnog pravilnog crtanja i računanja u skripti.

Prvi korak prije crtanja geometrije je definirati sve parametre koji su fiksni i koji se tiču samih postavki Femm problema. Tako su na početku u datoteci "problem_base.py" definirani parametri kao što su :

- frekvencija
- struja
- napon
- aksijalna duljina
- mjerna jedinica

Također, u istoj datoteci su namještene postavke koje nije loše uzeti u obzir budući da se time smanjuje vrijeme simuliranja, to su metode pyfemm biblioteke:

- `hideconsole()`
- `hidepointprops()`
- `openfemm(1)`

Navedene metode služe za sprječavanje podizanja prozora konzole, svojstava te cijelog grafičkog sučelja prilikom pokretanja iteracije (`openfemm()` metoda sa brojem 1 kao ulazom ne podiže grafičko sučelje). [26]

Za predefinirane vrijednosti kao uzor uzet je već postojeći rezolver iz kataloga [27] : 11BRW - 300-M. S obzirom na odabrani rezolver, predefinirane vrijednosti su prikazane u tablici 4.1.

.

Tablica 4.1. Predefinirane vrijednosti struje i napona rezolvera

I	$8.3 \cdot 10^{-3}$ mA
U	10 V
n	1500 rpm

Navedeni rezolver radi na frekvenciji od 5000 Hz, no frekvencija cjelokupnog problema u Femm-u je postavljena na 0 Hz. Razlog tome je činjenica da Femm za određeni trenutak, danu struju tretira kao fazor, a ne kao trenutnu vrijednost, stoga ne bismo simulirali ono što zapravo želimo. Zbog toga je korištenjem numpy biblioteke generiran valni oblik struje frekvencije 5000 Hz te je uzeto 6 vrijednosti trenutne struje za određene trenutke pa je rezolver simuliran u tim trenucima (s odgovarajućom strujom za dani trenutak) što je popraćeno odgovarajućim zakretima rotora.

Vremenski i kutni koraci su izračunati iz brzine vrtnje za koju je odabrani rezolver predviđen te uz postavku da će se rezolver simulirati kroz 6 trenutaka tijekom kojih se rotor mora zakrenuti za 45 stupnjeva. Izračun je prikazan sljedećim formulama :

$$T = \frac{1}{f} \quad (4-1)$$

$$f = \frac{n}{60} \quad (4-2)$$

$$T = \frac{60}{1500} = 0.04 \text{ s} \quad (4-3)$$

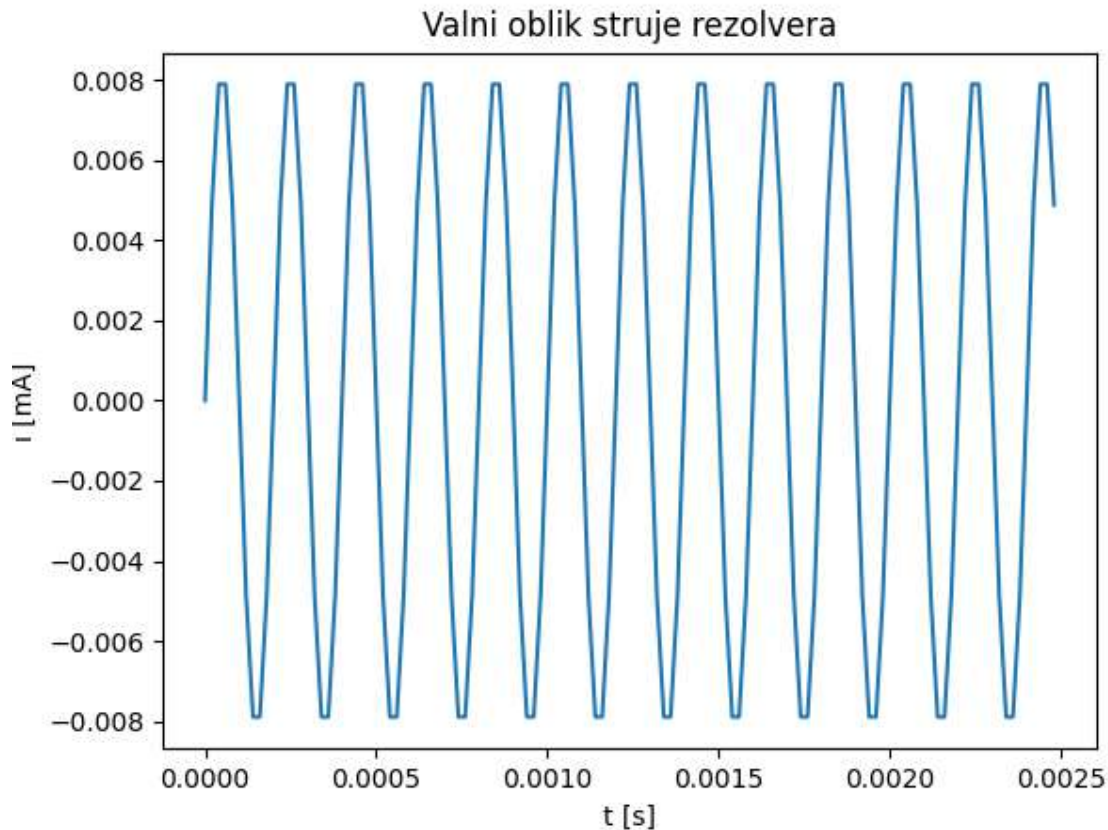
$$t_{45^\circ} = \frac{T}{8} = 0.005 \text{ s} \quad (4-4)$$

$$\text{vremenski korak} = \frac{t_{45^\circ}}{6} = 0.00083 \text{ s} \quad (4-5)$$

$$\text{kutni korak} = \frac{45}{6} = 7.5^\circ \quad (4-6)$$

gdje je T vremenski period, f frekvencija rotacije rotora, a t_{45° predstavlja vrijeme potrebno da se rotor zakrene za 45 stupnjeva. Dijeljenjem kuta od 45 stupnjeva kao i vrijeme potrebno za toliki zakret sa 6, dobivamo kutni i vremenski korak.

Prikaz valnog oblika struje se može vidjeti na slici 4.1.



Slika 4.1. Valni oblik struje rezolvera

4.2. Metaheuristička optimizacija

Metaheuristička optimizacija je snažan pristup rješavanju složenih problema iz stvarnog svijeta gdje su resursi ograničeni, a ciljevi sukobljeni. Ovi izazovi optimizacije postoje u raznim područjima, a najviše se manifestiraju u inženjstvu i ekonomiji. Metaheuristički algoritmi pružaju rješenje rješavanjem nelinearnih i multimodalnih funkcija, koje su teške za tradicionalne metode zbog svoje složenosti.

Problemi optimizacije uključuju minimiziranje ili maksimiziranje funkcija uz pridržavanje ograničenja koja su predstavljena linearnim i nelinearnim funkcijama. Linearno programiranje obrađuje linearne funkcije, dok metaheuristička optimizacija obrađuje zamršenije nelinearne slučajeve.

Općenito, problem metaheurističke optimizacije može biti zapisan kao :

$$\text{minimize } f_1(\mathbf{x}), \dots, f_i(\mathbf{x}), \dots, f_I(\mathbf{x}), \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d) \quad (4-7)$$

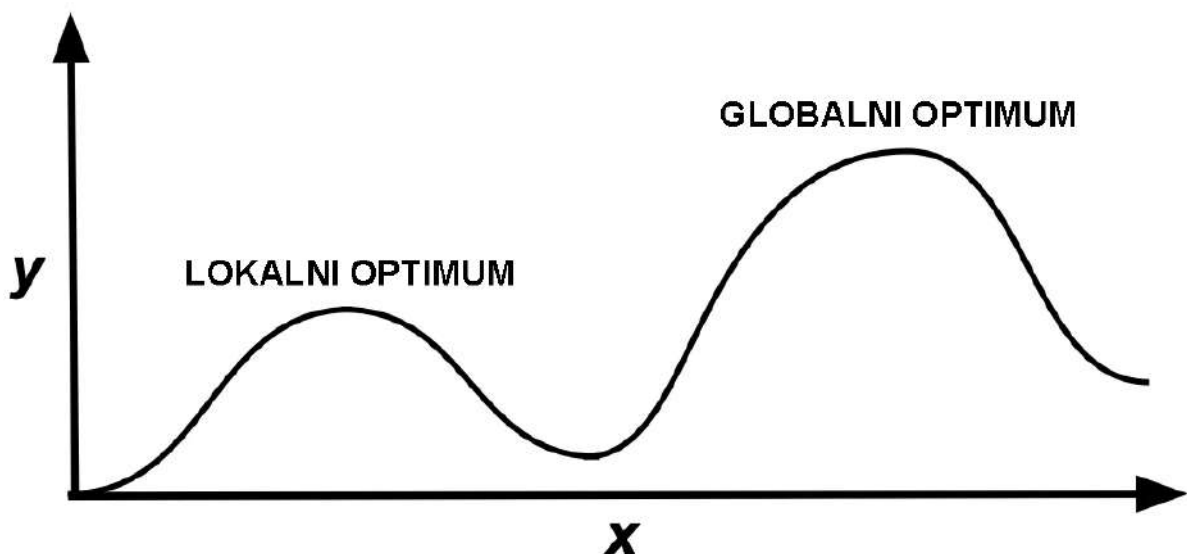
koji podliježe :

$$h_j(\mathbf{x}) = 0, (j=1, 2, \dots, J) \quad (4-8)$$

$$g_k(\mathbf{x}) \leq 0, (k=1, 2, \dots, K) \quad (4-9)$$

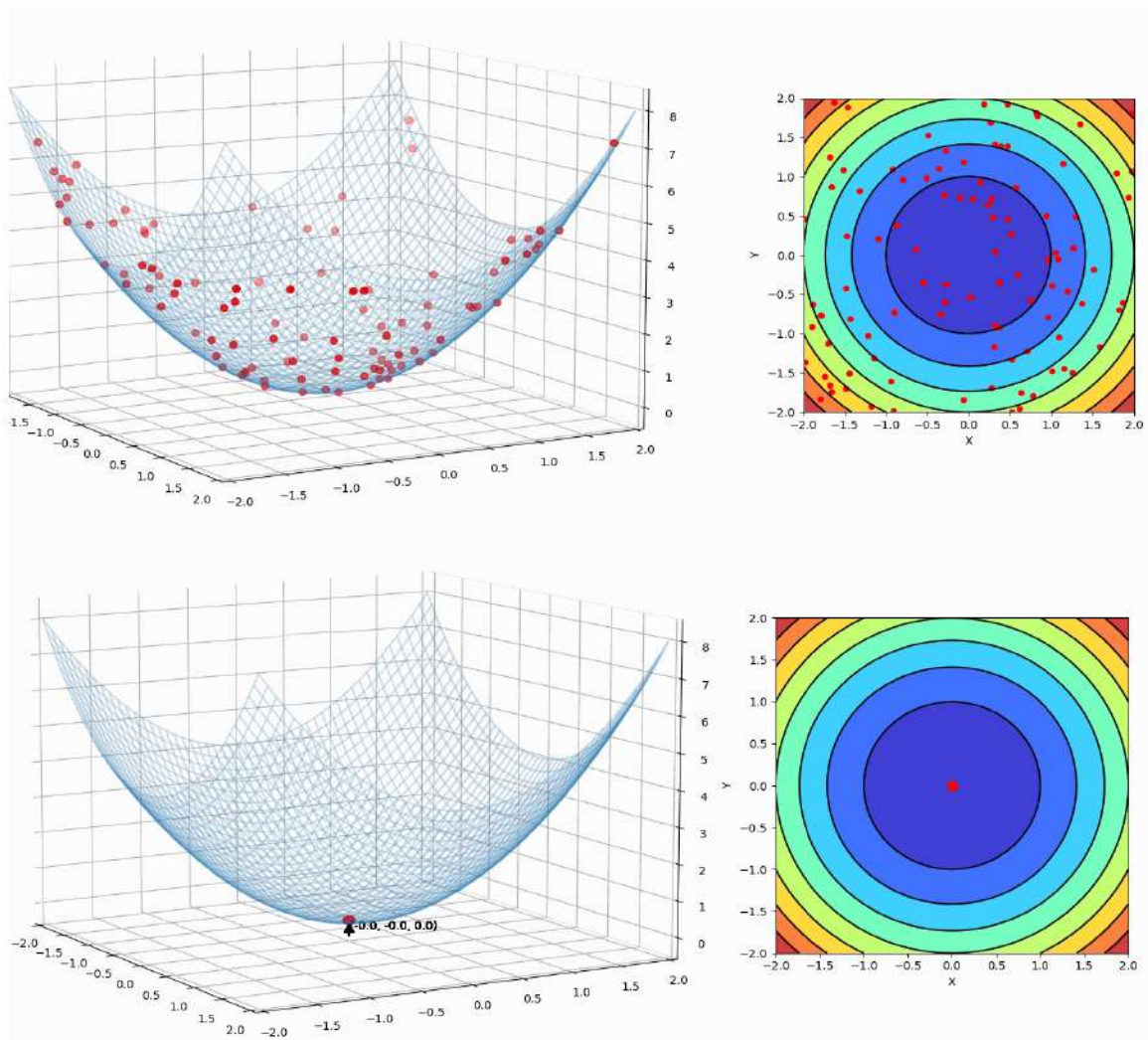
gdje su $f_1 \dots f_I$ funkcije cilja, a h_j i g_k ograničenja jednakosti, odnosno nejednakosti. U slučaju kada je $I=1$, to se naziva optimizacija s jednim ciljem. Kada je $I \geq 2$, to postaje problem s više ciljeva čija se strategija rješavanja razlikuje od one za jedan cilj. Ovaj rad implementira funkciju s jednim ciljem. [28]

Postoji više algoritama optimizacije, a odabir odgovarajućeg algoritma za određeni problem je bitan kako bi optimizacija bila što efikasnija. Postoji više podjela algoritama, pa se tako algoritmi mogu dijeliti s obzirom na to je li gradijent funkcije u središtu promatranja ili ne. Gradijentni algoritmi poput *Hill climbing* algoritma se oslanjaju na izvedene informacije i obično su vrlo efikasni, dok se negradijentni algoritmi oslanjaju samo na vrijednosti funkcije te su vrlo dobro rješenje kada su u pitanju diskontinuirane funkcije. Primjer rješenja ovakvog algoritma je prikazan na slici 4.2. [28]



Slika 4.2. Prikaz optimizacije *Hill climbing* algoritmom [29]

Još jedna od podjela algoritama jest na algoritme koji se temelje na putanji i one koji se temelje na populaciji. *Hill climbing* algoritam, osim što se smatra gradijentnim, je i algoritam temeljen na putanji. Takav algoritam radi sa jednim po jednim rješenjem te povlači putanju kako iteracije napreduju. Iteracije se ponavljaju dok se ne pronađe lokalni optimum. S druge strane, algoritam koji se temelji na populaciji npr. algoritam optimizacije roja čestica (*particle swarm optimization* ili PSO) radi sa više jedinki koje međusobno interagiraju te se povlači više putanja istovremeno. Svaka jedinka ima informaciju o vlastitom najboljem rješenju te o najboljem rješenju u roju. Jedinka kroz iteracije mijenja vlastite parametre sve dok se ne pronađe globalni optimum u multidimenzionalnom vektorskom prostoru. Primjer rješenja ovakvog algoritma je prikazan na slici 4.3. [30]



Slika 4.3. Prikaz optimizacije roja čestica konveksne funkcije [31]

Algoritme također možemo dijeliti na determinističke i stohastične. Deterministički algoritmi rade na potpuno nenasumičan način, stoga svaki put kada bismo pokrenuli takav algoritam s istom početnom točkom, dobili bismo isto rješenje. *Hill climbing* algoritam je također dobar primjer ovakve vrste algoritama. Stohastički algoritmi su algoritmi koji imaju nasumičnu prirodu rada te svako pokretanje algoritma rezultira drugačijim rješenjem. Dobar primjer stohastičnog algoritma jest upravo diferencijalna evolucija, algoritam koji je korišten za optimizaciju reluktantnog rezolvera u ovom radu. [28]

Uz već spomenute algoritme diferencijalne evolucije, PSO i *Hill climbing* algoritma, neki od najkorištenijih algoritama su :

- Algoritam simuliranog kaljenja (eng. *Simulated annealing*)
- Genetski algoritmi (eng. *Genetic algorithms*)
- Pčelinji algoritmi (eng. *Bee algorithms*)
- Algoritam optimizacije kolonijom mrava (eng. *Ant colony optimization*)
- Algoritam tabu pretrage (eng. *Tabu search*)
- Algoritam harmonijske pretrage (eng. *Harmony search*)
- Algoritam krijesnica (eng. *Firefly algorithm*)
- *Cuckoo search*

Kao što je već rečeno više puta tijekom rada, odabrani algoritam za optimizaciju rezolvera u ovom radu jest diferencijalna evolucija, stoga nije loše ponešto reći o ideju navedenog algoritma prije nego što zaronimo u praktičnu upotrebu istog.

Diferencijalna evolucija je algoritam koji se temelji na vektorima. Diferencijalna evolucija radi sa svim komponentama, odnosno dimenzijama danog joj vektora. Za d-dimenzionalni problem optimizacije s d parametara, generira se populacija od n vektora rješenja x_i , ($i=1,2,\dots,n$). Za svako rješenje x_i u bilo kojoj generaciji t koristimo zapis :

$$x_i^t = (x_{1,i}^t, x_{2,i}^t, \dots, x_{d,i}^t) \quad (4-10)$$

Ovaj vektor je ekvivalent kromosomu u genetskoj mutaciji. [28]

Diferencijalna evolucija se vrši na populaciji mogućih rješenja, odnosno jedinki :

$$P_G = (x_{1,G}, \dots, x_{NP,G}), \quad G = 0, \dots, G_{MAX} \quad (4-11)$$

gdje vrijedi :

$$x_{i,G} = \{x_{1,i,G}, \dots, x_{D,i,G}\}, \quad i = 1, 2, \dots, NP; G = 0, \dots, G_{MAX} \quad (4-12)$$

gdje i označava populaciju, D parametre, a G generaciju kojoj populacija pripada. [28]

Diferencijalna evolucija sastoji se od tri glavna koraka: mutacije, rekombinacije i selekcije.

Mutacija se vrši tako da se za svaki vektor x_i izaberu tri različita vektora $x_{r1,G}$, $x_{r2,G}$, $x_{r3,G}$, a zatim generira takozvani vektor donora sljedećom shemom mutacije

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F(x_{r2,G} - x_{r3,G}), \quad r1, r2, r3 \in [1, 2, \dots, NP]; \quad r1 \neq r2 \neq r3 \quad (4-13)$$

gdje je $v_{i,G+1}$ vektor donor, a F mutacijski faktor. Mutacijski faktor je konstanta na intervalu $[0, 2]$, a on kontrolira brzinu i robusnost potrage rješenja. Manja vrijednost mutacijskog vektora povećava vjerojatnost konvergencije, ali povećava i rizik zaustavljanja u lokalnom ekstremu. [32]

Rekombinacija je faza koja uključuje uspješna rješenja od prijašnje generacije, a sama faza se odvija tako da se generira probni vektor $u_{i,G+1}$ koji nastaje po sljedećoj shemi :

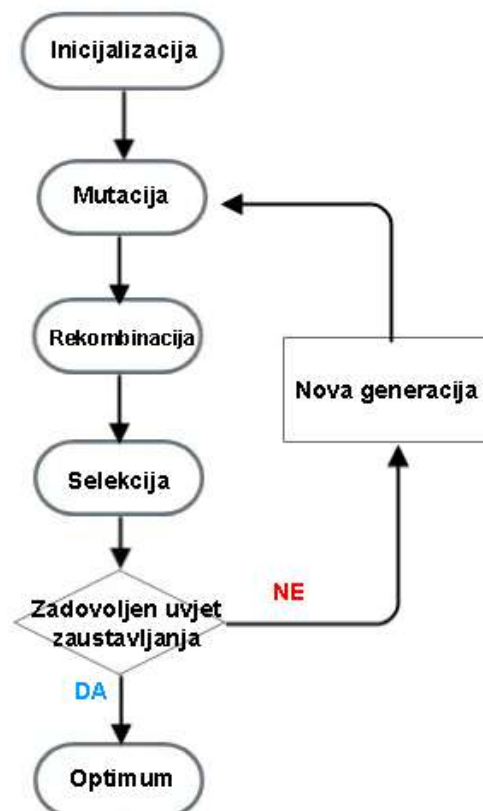
$$u_{i,G+1} = \begin{cases} v_{i,G+1}, & rand_{i,j} \leq CR \cap j = I_{rand} \\ x_{i,G}, & rand_{i,j} > CR \cap j \neq I_{rand} \end{cases} \quad (4-14)$$

Probni vektor (eng. trial vector) $u_{i,G+1}$ nastaje od elemenata ciljnog vektora $x_{i,G}$ i elemenata donorskog vektora $v_{i,G+1}$. I_{rand} predstavlja slučajno odabran broj iz intervala $[1, 2, \dots, D]$. CR je konstanta na intervalu $[0, 1]$ koja predstavlja vjerojatnost križanja. Parametar vektora $u_{i,G+1}$ s indeksom $j = I_{rand}$ će biti jednak $v_{i,G+1}$. I_{rand} uvijek osigurava različitost $u_{i,G+1}$ i $x_{i,G}$ i onda kada je CR jednak nuli. Elementi donorskog vektora ulaze u probni vektor s vjerojatnošću CR . [32]

Tijekom selekcije ciljni vektor $x_{i,G}$ se uspoređuje s probnim vektorom $v_{i,G+1}$, te onaj s većom dobrotom (tj. manjom funkcijskom vrijednosti) prolazi u sljedeću generaciju.

$$x_{i,G+1} = \begin{cases} u_{i,G+1}, & f(u_{i,G+1}) \leq f(x_{i,G}), \quad i = 1, 2, \dots, NP \\ x_{i,G}, & \text{inače} \end{cases} \quad (4-15)$$

Mutiranje, rekombinacija i selekcija se nastavljaju sve dok nije zadovoljen neki uvjet zaustavljanja, koji je najčešće broj generacija ili dovoljno dobra vrijednost funkcije cijene. U uvjetu zaustavljanja algoritma zadaje se potrebna točnost rezultata ili sigurnost ispravnosti rezultata. Npr. veći broj generacija poboljšava ispravnost rezultata, ali potrebno vrijeme izvršavanja algoritma se produljuje. Shematski prikaz algoritma diferencijalne evolucije je prikazan na slici 4.4. [32]



Slika 4.4. Shematski prikaz algoritma diferencijalne evolucije [33]

Kako bi diferencijalna evolucija bila pravilno implementirana, potrebno je definirati funkciju cilja. U slučaju ovog rada, funkcija cilja se sastoji od generiranja geometrije, odnosno modela rezolvera za dani vektor i provedbe simulacije za generirani model. Funkcija vraća relevantne rezultate simulacije pomoću kojih diferencijalna evolucija napreduje.

S obzirom da se ovdje radi o optimizaciji rezolvera, kao rezultat funkcije cilja vraćamo induktivitet koji Femm računa na kraju svake simulacije. Razlog tome jest taj što je induktivitet usko vezan za razlučivost rezolvera. Zaključno tome, što je veći induktivitet rezolvera to je razlučivost istog veća, a time i točnost.

Potrebne vrijednosti rezultata se mogu dobiti nakon provedbe simulacije korištenjem pyfemm metodom "mo_getcircuitproperties(<ime_strujnog_kruha>)" koja vraća 1x3 matricu rezultata. Iz matrice se može izvaditi vrijednost ulančanog toka (indeks 2) i struje strujnog kruga (indeks 0) te dijeljenjem te dvije vrijednosti dobivamo induktivitet (4-16).

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (4-16)$$

Budući da radimo rotaciju rotora u 6 koraka, za svaki korak skripta računa zasebnu vrijednost induktiviteta. Sve vrijednosti se spremaju u jednu matricu te se na kraju računa prosječna vrijednost iste.

Budući da diferencijalna evolucija radi na tome da pronade što manje rješenje funkcije cilja, funkcija umjesto prosječnog induktiviteta, vraća njegov inverz.

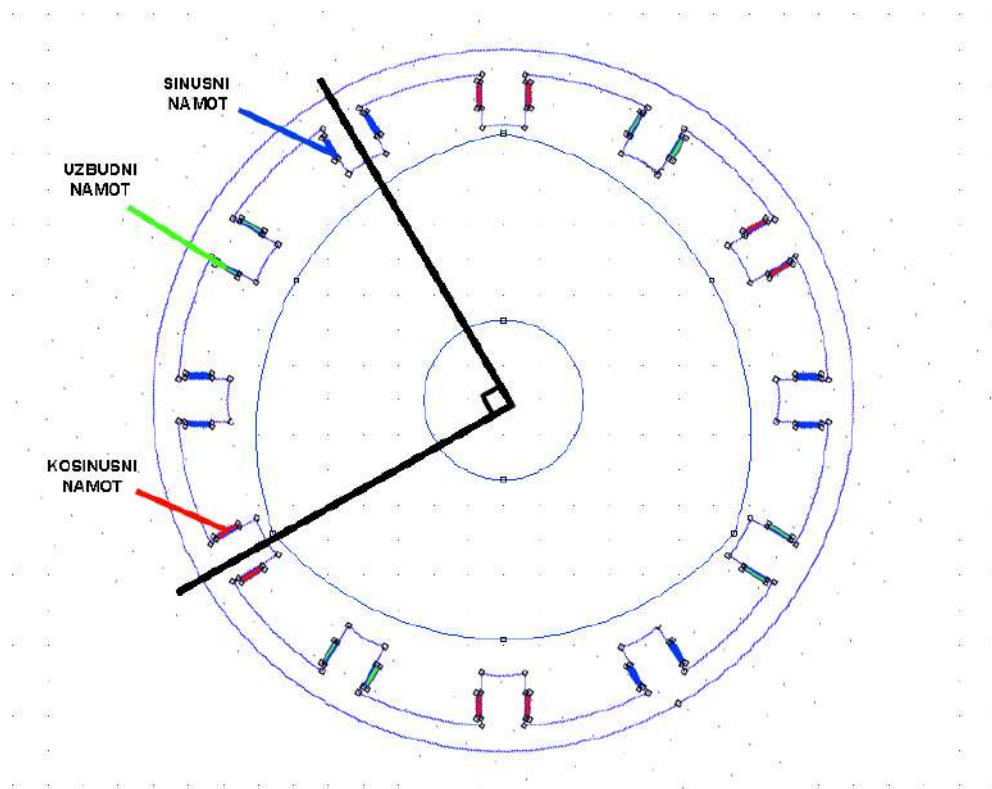
Algoritam diferencijalne evolucije se radi korištenjem metode "Scipy" biblioteke "differential_evolution", no prije pozivanja metode, potrebno je definirati granice za svaku dimenziju vektora. Granice se definiraju korištenjem objekta "Bounds" koji kao ulaz prima matricu donjih granica te matricu gornjih granica dimenzija vektora. Granice za vrijednosti vektora su uzete po uzoru na mnoštvo radova koji se bave ovom vrstom rezolvera te se iste mogu vidjeti u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Prikaz granica za svaku dimenziju rezolvera u mm

Dimenzija	Granice [donja granica, gornja granica]
Vanjski promjer statora	[50, 180]
Debljina jarma statora	[5, 10]
Duljina pola statora	[5, 15]
Duljina zračnog raspora	[2, 5]
Broj polova rotora	[-0.5, 4.5]

Na temelju ovih dimenzija računate su ostale dimenzije poput optimalnog kuta pola rotora s obzirom na broj polova, te kut pola statora s obzirom na same dimenzije statora.

Budući da je za ovaj rad odlučeno modelirati rezolver sa distribuiranim namotima, a kao što je već spomenuto, namoti moraju biti međusobno pod 90° , broj polova statora je postavljen fiksno na 12 (slika 4.5.). Postoje rezolveri i sa 24 polova na statoru, no nisu toliko učestali poput onih sa 12, stoga je ta opcija zanemarena. Također, postoje rezolveri čije su dimenzije manje, odnosno veće od onih navedenih u tablici 4.2., no također nisu toliko učestale pa su zanemarene.



Slika 4.5. Prikaz raspodjele polova i namota statora

U tablici 4.2. se može primijetiti da su granice za broj polova rotora definirane na neuobičajen način, odnosno neke vrijednosti nisu realne. Razlog tome jest taj što diferencijalna evolucija ne radi sa diskretnim vrijednostima, stoga je polove bilo potrebno definirati na ovaj način. Ova vrijednost vektora zapravo predstavlja indeks u odgovarajućoj matrici polova. Naime skripta bi uzela ove vrijednosti, zaokružila ih na najbliži cijeli broj te bi se taj broj koristio kao indeks matrice polova rotora. Matrica polova rotora je [2, 3, 4, 5, 6].

Valja napomenuti da je bitno granice za indeks postaviti 0.5 manje za donju te 0.5 više za gornju kako bi za svaki indeks bila jednaka vjerojatnost da će ga algoritam odabrati.

Nakon definiranja granica, ostaje jedino za definirati postavke same diferencijalne evolucije. Scipy diferencijalna evolucija dozvoljava namještanja mnoštvo parametara o čemu se može pročitati u dokumentaciji [34], no za potrebe ovog rada, definiran su parametri:

- `maxiter = 30` – broj iteracija
- `popsize = 5` – veličina populacije
- `polish=False` – sprječava dodatno "poliranje" najboljeg rješenja, korišteno jer smanjuje duljinu trajanja ukupnog simuliranja
- `tol=0.001` – podešena tolerancija za konvergenciju sa zadane (0.01) na finiju (0.001) kako bi se spriječilo završavanje simulacija prije nego što je dosegnut `maxiter` broj iteracija
- `updating='deferred'` – parametar koji omogućava da se najbolje rješenje po generaciji ažurira samo jednom
- `disp=True` - omogućava da se nakon svake generacije ispiše rezultat funkcije cilja

Na kraju je još u kod je dodana metoda koja rezultate diferencijalne evolucije sprema u .txt datoteku na disk kako bismo bili sigurni da rezultati neće biti izgubljeni.

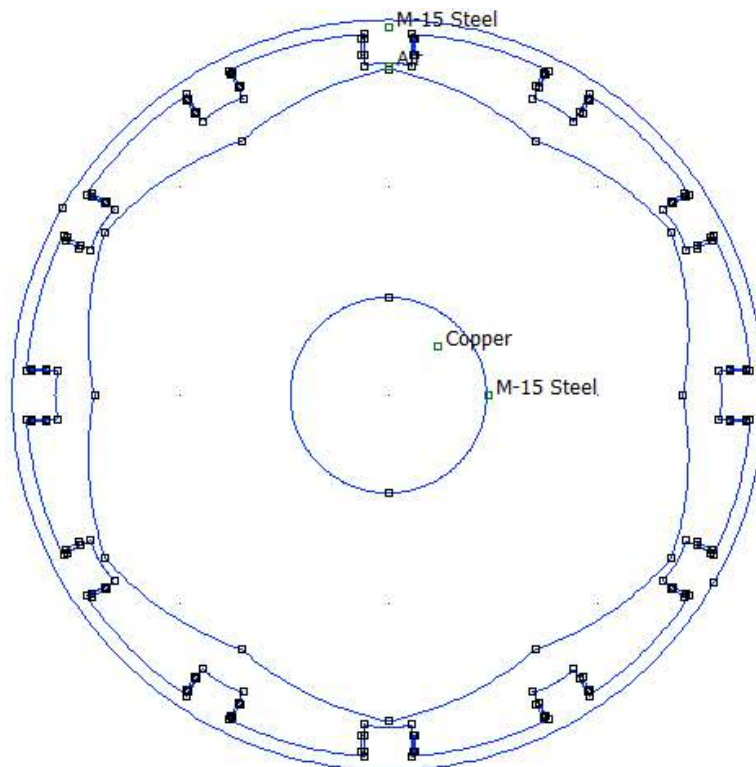
4.3. Rezultati

Izvođenje simulacija je ukupno trajalo gotovo 18 sati, tijekom kojeg je proces optimizacije dao optimalni vektor rješenja [179, 6.613, 14.98, 2.022 3.504], no valja napomenuti da zadnji element u vektoru rješenja zapravo predstavlja indeks u matrici broja polova rotora, stoga će u ovom slučaju rotor imati 6 polova. Dimenzije optimalnog senzora se mogu vidjeti u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Dimenzije optimalnog senzora

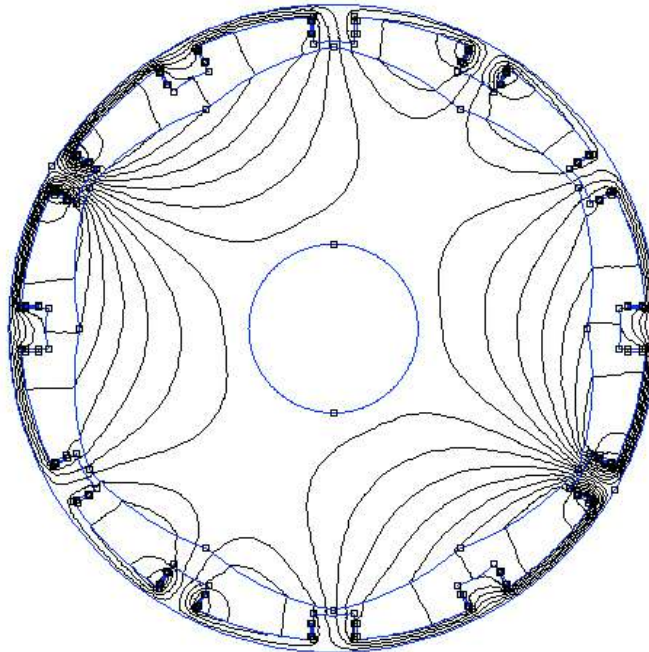
Dimenzija	Vrijednost [mm]
Promjer statora	179
Debljina jarma	6,661
Duljina pola statora	14,98
Duljina zračnog raspora	2,022
Broj polova rotora	6

Prikaz dobivene geometrije u 2D-u se može vidjeti na slici 4.6.

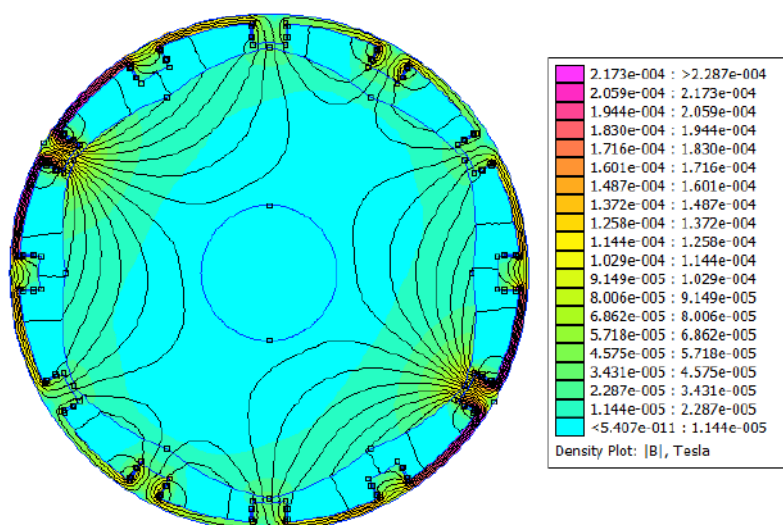


Slika 4.6. Prikaz geometrije optimalnog senzora

Budući da je funkcija cilja maksimizacija induktiviteta, a induktivitet je veći što je magnetski otpor manji na putanji silnice, ima smisla da je optimizacija konvergirala u ovakvo rješenje budući da ovakav rotor nudi upravo to. Na slikama 4.7. i 4.8. je prikazana magnetska indukcija senzora u trenutku kada struja uzbudnog namota iznosi 0.0083 mA.

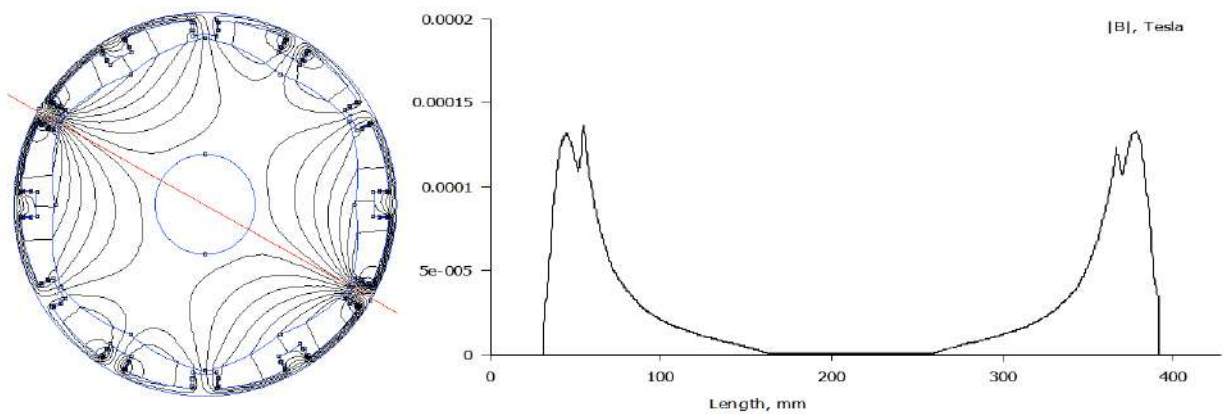


Slika 4.7. Prikaz magnetske indukcije (silnice) optimalnog senzora pri struji uzbudnog namota od 0.0083 mA

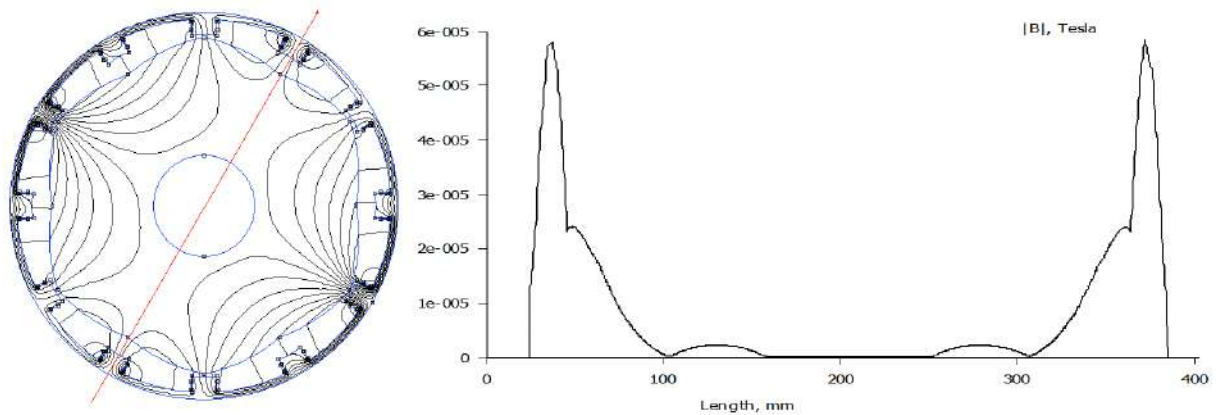


Slika 4.8. Prikaz magnetske indukcije (gradijent boja) optimalnog senzora pri struji uzbudnog namota od 0.0083 mA

Femm nudi razne načine prikaza rezultata. Jedna od opcija je opcija prikaza raspodjele određene vrijednosti duž određene linije. Slike 4.9 i 4.10. daju prikaz raspodjele magnetske indukcije duž dva različita pravca koja leže u smjeru promjera senzora (označena crvenom bojom).

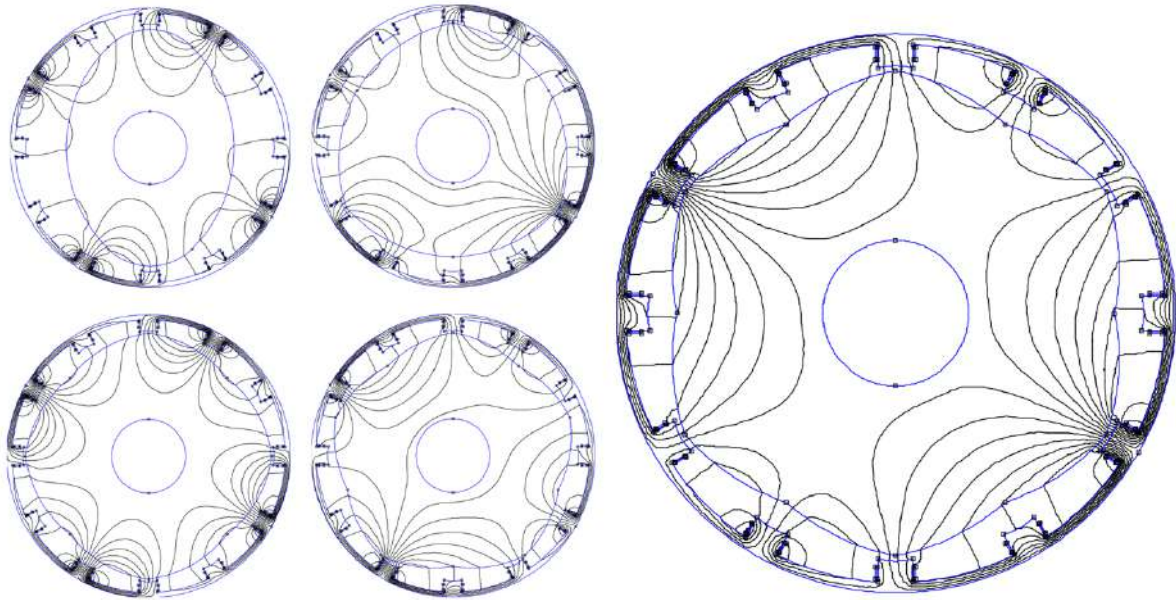


Slika 4.9. Prikaz raspodjele magnetske indukcije duž promjera senzora (pri struji uzbuđnog namota od 0.0083 mA)



Slika 4.10. Prikaz raspodjele magnetske indukcije duž promjera senzora (pri struji uzbuđnog namota od 0.0083 mA)

Na slici 4.11. se može vidjeti usporedba magnetskog polja za sve vrste rotora, također u trenutku kada struja uzbuđnog namota iznosi 0.0083 mA.



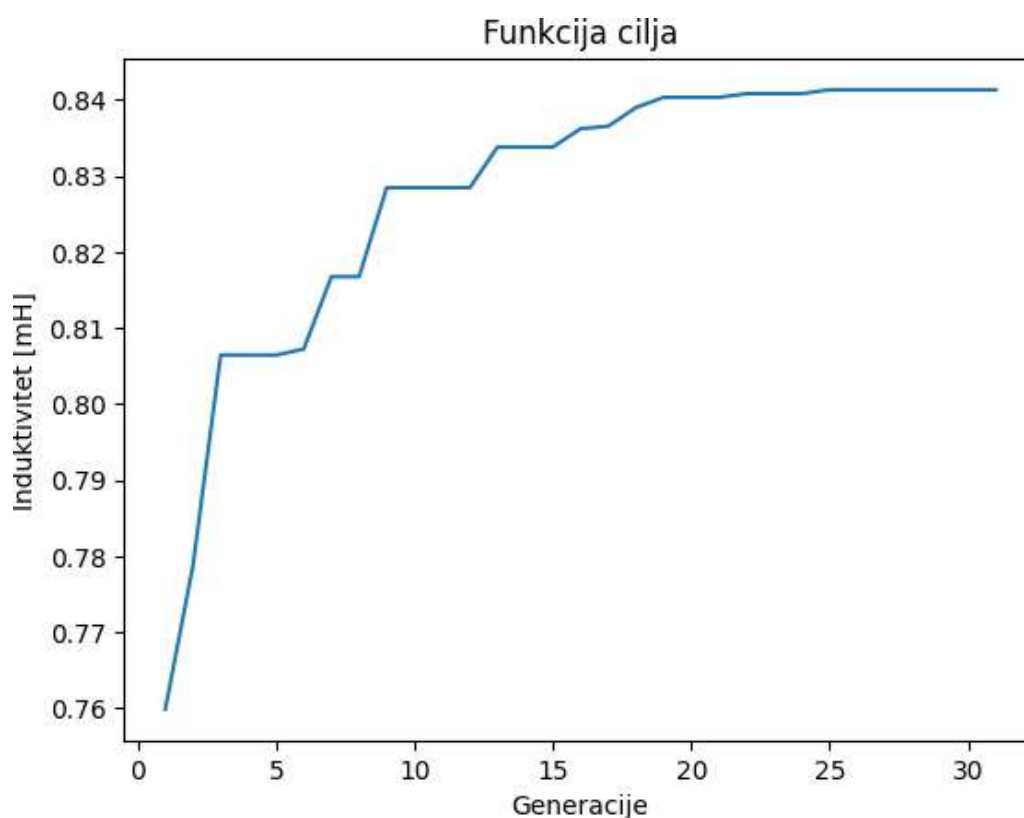
Slika 4.11. Usporedba magnetskog polja senzora s obzirom na broj polova rotora pri struji uzbuđnog namota od 0.0083 mA

Na slici je vidljivo da su rotori sa 5 i 6 polova poprilično slični kada je u pitanju gustoća silnica što objašnjava rješenje koje je optimizacija dala, odnosno objašnjava zadnji element vektora rješenja 3.504 što je na samoj granici odluke između rotora sa 5 i 6 polova.

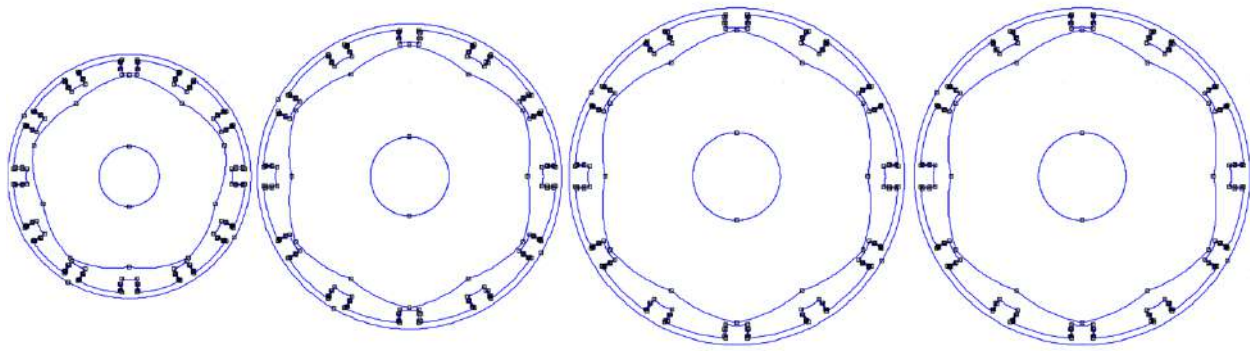
Induktivitet senzora koji je postignut je 0.84 mH što je realna vrijednost. Evoluciju dimenzija i induktiviteta senzora se može vidjeti u tablici 4.4, a grafički prikaz evolucije je prikazan na slici 4.12.

Tablica 4.4. Evolucija dimenzija senzora kroz generacije

Generacija	1.	10.	20.	30.
Promjer statora [mm]	130,2	162,9	179,8	179
Debljina jarma [mm]	5,974	6,359	6,712	6,661
Duljina pola statora [mm]	14,71	14,33	15	14,98
Duljina zračnog raspora [mm]	2,093	2,013	2,005	2,022
Broj polova rotora	5	6	6	6
Induktivitet [mH]	0,75901	0,82925	0,83883	0,84072

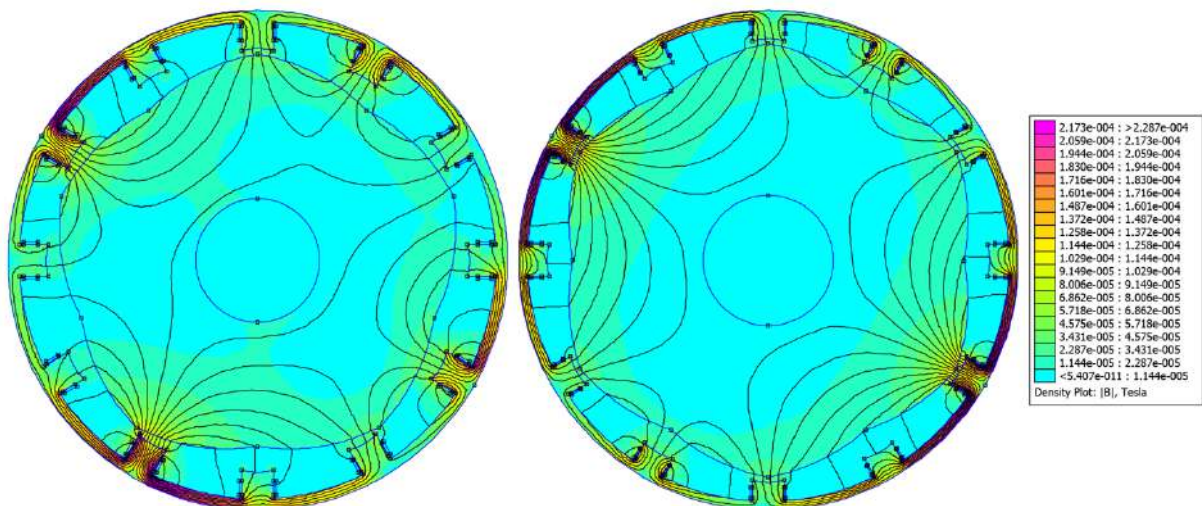


Slika 4.12. Prikaz funkcije cilja optimizacije senzora

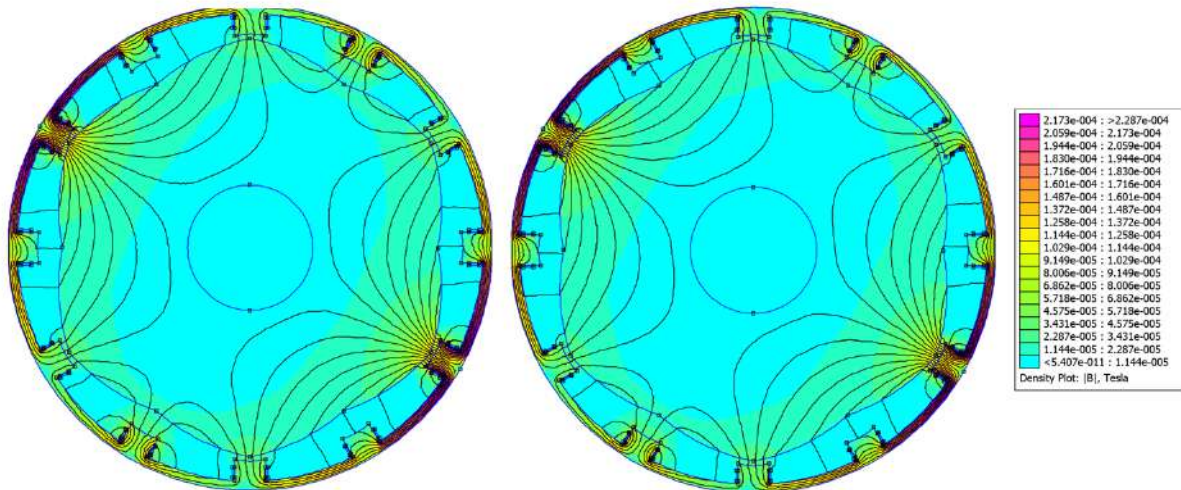


Slika 4.13. Evolucija senzora po generacijama (prikazane prva, deseta, dvadeseta i posljednja generacija s lijeva na desno)

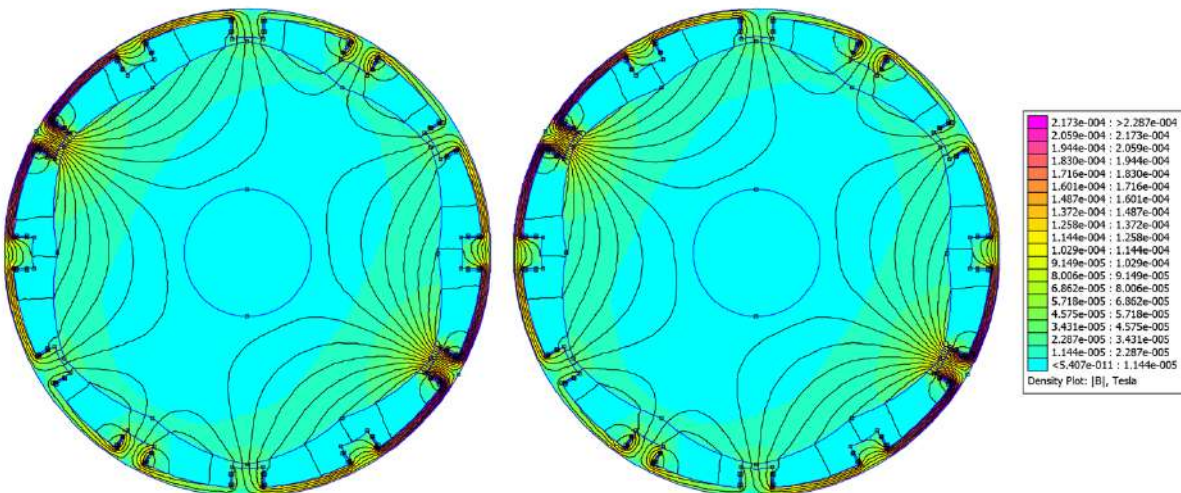
Na slici 4.13. je vidljivo da od 20. do 30. generacije nema značajnih razlika u dimenzijama pa tako nema ni velike razlike u samom induktivitetu (tablici 4.4., slika 4.12.), stoga je za očekivati da će prikaz magnetske indukcije senzora 20. i 30. generacija biti poprilično sličan. Usporedba optimalnog senzora sa svakom od generacija navedenih u tablici 4.4. se može vidjeti na slikama 4.14.-4.16.



Slika 4.14. Usporedba optimalnog senzora sa 1. generacijom senzora



Slika 4.15. Usporedba optimalnog senzora sa 10. generacijom senzora



Slika 4.16. Usporedba optimalnog senzora sa 20. generacijom senzora

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su iskorištene mogućnosti metaheurističke optimizacije korištenjem metode diferencijalne evolucije što se pokazalo kao vrlo moćan i robustan alat kada je u pitanju optimizacija. Točnije, u ovom radu je odrađena optimizacija senzora varijabilne reluktancije s ciljem postizanja optimalne geometrije senzora što je dovelo do postizanja maksimiziranja induktiviteta istog. Ako se usporede induktiviteti prve i posljednje generacije evolucije, evidentno je da nije došlo do velikog napretka u induktivitetu iz čega se može zaključiti da su već postojeći senzori iz kataloga i ostale literature optimizirani. To je bitno za napomenuti jer su se granice za dimenzije upravo temeljile na već postojećim sensorima te nije bilo za očekivati da će se pronaći značajno bolje rješenje od tih. Bez obzira na malen napredak u induktivitetu, to je jedan od dokaza da je evolucija konvergirala u realno rješenje, što se dodatno potvrđuje i realnom vrijednošću induktiviteta te realnom kombinacijom dimenzija. Postignućem optimalne geometrije slijedeći ograničenja prakse, postavljen je temelj za kompleksnije optimizacije kao i za simuliranje istog senzora u 3D-u koristeći alat kao što je Ansys. Postizanjem optimalne geometrije rezolvera te prikazom ideje i procesa optimizacije, stvorena je literatura za korištenje Femm alata i primjenu diferencijalne evolucije, ali i literatura koja objedinjuje sve bitne informacije o sensorima te detaljne informacije o rezolverima, njihovoj podjeli i principu rada.

LITERATURA

- [1] "Electromagnetic Induction", Electronics Tutorials, www.electronicstutorials.ws/electromagnetism/electromagnetic-induction.html (pristup 4.4.2023.)
- [2] Magcraft, "What are Eddy Currents?", Magcraft, 26.11.2018, www.magcraft.com/blog/what-are-eddy-currents (pristup 4.4.2023.)
- [3] Keyence Corporation, Inductive Displacement Sensors, Keyence. <https://www.keyence.com/ss/products/measure/library/type/inductive.jsp> (pristup 4.4.2023.)
- [4] SKF, Eddy Current Probe Data Sheet (Publication No. 17104-2/EN), https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d19680b8f78f-Eddy-Current-probe-datasheet--17104_2-EN_tcm_12-307989.pdf (pristup 4.4.2023.)
- [5] Nave, R. "Hall Effect." HyperPhysics Concepts, Georgia State University, n.d., <https://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/Hall.html>
- [6] Cross Product Calculator. (n.d.). Right Hand Rule for Cross Product. Retrieved April 4, 2023, from <https://crossproductcalculator.org/right-hand-rule-for-cross-product/>
- [7] Melexis. (n.d.). Hall Effect. Retrieved April 4, 2023, from <https://www.melexis.com/en/articles/hall-effect>
- [8] Electronics Tutorials. (n.d.). Hall Effect. Retrieved April 4, 2023, from <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>
- [9] Littelfuse. (n.d.). Hall-Effect Sensors. Retrieved April 4, 2023, from <https://www.littelfuse.com/products/magnetic-sensors-and-reed-switches/hall-effect-sensors/55140.aspx>
- [10] Shinoj, V. K. (2017). Magnetization in materials (CH2C01U Electric and Magnetic Phenomena, Thermodynamics and Elementary Solid State Physics, Lecture 1). Retrieved April 4, 2023, from <https://shinojvk.uccollege.edu.in/wp-content/uploads/sites/196/2017/03/Magnetic-materials.pdf>
- [11] ScienceFacts.net. "Atom Facts." ScienceFacts, n.d., <https://sciencefacts.net/atom-2.html>
- [12] GeoSci Developers. (2017). Magnetic Susceptibility. Retrieved April 4, 2023, from https://gpg.geosci.xyz/content/physical_properties/magnetics_susceptibility_duplicate.html
- [13] Gächter, J. (2017). Evaluation of rotor position sensor characteristics and impact on control quality of permanent magnet synchronous machines (Doctoral dissertation). Graz University of Technology

- [14] Fathy, A. H., Sedighizadeh, M., & Shaban, H. (2021). Modeling and simulation of a flux-switching permanent magnet motor with online position estimation using magnetic sensors. *Processes*, 9(8), 211. <https://doi.org/10.3390/pr9080211>
- [15] Electrical4U. (n.d.). Magnetic Reluctance: Definition, Unit, Formula, and Applications. Retrieved April 4, 2023, from <https://www.electrical4u.com/magnetic-reluctance/>
- [16] 911electronic. (2022, October 19). Introduction to Variable Reluctance Resolvers: How They Work and Why They Matter. Retrieved April 4, 2023, from <https://911electronic.com/introduction-to-variable-reluctance-resolvers-how-they-work-and-why-they-matter/>
- [17] Wang, Z.-L., & Kim, K.-C. (2018). A study for characteristics of variable reluctance resolver considering end slot leakage inductance and eccentricity. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 118(19), 1791-1804.
- [18] Mihai, S., Simion, A., Livadaru, L., Ghidus, G., & Malanciuc, A. (2009). FEM-Based Simulation of a Brushless Resolver. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters* (pp. 1-6). Suceava.
- [19] Leibovich, G., & Senanian, S. (2013). Development of Variable Reluctance Resolver for Position Feedback. *Proceedings of the European Space Mechanisms and Tribology Symposium, ESMATS, 2013*. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-Variable-Reluctance-Resolver-for-Leibovich-Senanian/bec5320656438f898767c37c9cffb4baf0796f58>
- [20] Devasia, Anish. "Encoders vs. Resolvers: Applications and Characteristics." *Control.com*. July 08, 2020. <https://control.com/technical-articles/encoders-vs-resolvers-applications-and-characteristics/>
- [21] Nasiri-Gheidari, Z., Alipour-Sarabi, R., Tootoonchian, F., & Zare, F. (2017). Performance Evaluation of Disk Type Variable Reluctance Resolvers. *IEEE Sensors Journal*, 17(13), 4037.
- [22] Xiao, L., & Bi, C. (2019). Optimization of Absolute Variable Reluctance Resolver with Taguchi and FEM. In *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* (pp. 1-6). University of Shanghai for Science and Technology.
- [23] Bahari, M., Nasiri-Gheidari, Z., & Tootoonchian, F. (2021). Modeling, Performance Analyzing, and Prototyping of Variable Reluctance Resolver With Toroidal Winding. *IEEE Sensors Journal*, 21(4), 4425.
- [24] Shang, J., Wang, H., & Wang, W. (2012, June). The Analysis of Multipole Axial Flux Reluctance Resolver with Sinusoidal Rotor. In *2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia* (pp. 1818-1823). IEEE.

- [25] Tootoonchian, F., & Zare, F. (2018). Performance Analysis of Disk Type Variable Reluctance Resolver under Mechanical and Electrical Faults. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 14(3), 201-209.
- [26] Meeker, D. (n.d.). pyFEMM User's Manual. FEMM. Retrieved August 13, 2023, from <https://www.femm.info/wiki/pyFEMM/manual.pdf>.
- [27] Dynapar. (n.d.). HM11/R11 Hollow Shaft Encoder. Dynapar. Retrieved August 13, 2023, from https://ecatalog.dynapar.com/downloads/HM_11_R11_DS_702922_1_.pdf
- [28] Blum, C., & Roli, A. (2008). Metaheuristic Optimization. Scholarpedia. http://www.scholarpedia.org/article/Metaheuristic_Optimization
- [29] Howell, E. (n.d.). Hill Climbing Optimization Algorithm - Simply Explained. Towards Data Science. Retrieved August 13, 2023, from <https://towardsdatascience.com/hill-climbing-optimization-algorithm-simply-explained-dbf1e1e3cf6c>
- [30] Baeldung. (2021). A Guide to Particle Swarm Optimization (PSO). Retrieved from <https://www.baeldung.com/cs/ps0>
- [31] Bhat, G. (n.d.). Particle Swarm Optimization on Convex Function. https://gbhat.com/machine_learning/ps0_convex.html
- [32] Zemris. (n.d.). Diferencijska evolucija. <http://www.zemris.fer.hr/~golub/ga/studenti/projekt2008/de/de/Diferencijska%20evolucija.pdf>
- [33] Shaji, R. (2019, August 2). Differential Evolution: What It Is and How Does It Work. Medium. https://medium.com/@reshma_shaji/differential-evolution-what-it-is-and-how-does-it-work-81d3415c2367
- [34] SciPy Community. (2021). SciPy Optimize - `scipy.optimize.differential_evolution`. In SciPy v1.7.1 Reference Guide. Retrieved from https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.differential_evolution.html

SAŽETAK

Zadatak ovog diplomskog rada bio je provesti optimizaciju reultantnog senzora zakreta motora, odnosno rezolvera varijabilne reluktancije. Optimizacija je provedena korištenjem alata za numeričke simulacije magnetskih polja Femm u kombinaciji sa skriptiranjem u Pythonu. U Pythonu je napisana skripta koja automatizira crtanje geometrije, provedbe simulacija i analize rezultata. Optimizacija se provodi korištenjem jednog od metaheurističkih optimizacijskih algoritama – diferencijalna evolucija. Na kraju je za optimalnu geometriju senzora prikazan 2D model senzora zajedno sa rezultatima simulacija.

Ključne riječi: optimizacija, rezolver, senzor, reluktancija, algoritam, diferencijalna evolucija, metaheuristički algoritam

ABSTRACT

The task of this master's thesis was to optimize the variable reluctance resolver. The optimization was carried out using the tool for numerical simulations of magnetic fields Femm in combination with scripting in Python. A script was written in Python that automates the drawing of geometry, running of simulations and the analysis of results. The optimization itself is carried out using one of the metaheuristic optimization algorithms - differential evolution. At the end, a 2D model of the sensor together with the results of the simulations is presented for the optimal geometry of the sensor.

Keywords: optimization, resolver, sensor, reluctance, algorithm, differential evolution, metaheuristic algorithm

ŽIVOTOPIS

David Horvat rođen je u Osijeku 8.7.1998. godine. Pohađao je Industrijsku elektroenergetiku na diplomskom studiju Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Tijekom diplomskog studija odlazi na 3 erasmus projekta financirana od strane Europske unije koja su se odvila u Španjolskoj, Italiji i Armeniji. Tamo stječe vrijedno iskustvo i znanja u vezi međuljudskih odnosa, komunikacije i poduzetništva. Akademski naziv sveučilišni prvostupnik (baccalaureus) inženjer elektrotehnike i informacijske tehnologije stekao je 2020. godine na FERIT-u. Prije fakultetskog obrazovanja živi u Đakovu, stoga je srednjoškolsko školovanje završio u općoj gimnaziji Antuna Gustava Matoša u Đakovu. Tijekom fakultetskog obrazovanja radno iskustvo stječe razvijajući web aplikacije u jednoj od osječkih firmi.

PRILOZI

Kompletan Python kod za optimizaciju zajedno s dokumentacijom. može pronaći na Github-u na linku :

<https://github.com/davidh16/Differential-Evolution-of-Variable-Reluctance-Resolver>