

# Parametarska simulacija elektromagnetskog polja generatora sa permeanentnim magnetima u FEM simulacijskom alatu

---

Hečimović, Ines

Master's thesis / Diplomski 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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:558285>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-21**

*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**

**PARAMETARSKA SIMULACIJA  
ELEKTROMAGNETSKOG POLJA GENERATORA S  
PERMANENTNIM MAGNETIMA U FEM  
SIMULACIJSKOM ALATU**

**Diplomski rad**

**Ines Hečimović**

**Osijek, 2022.**

---

**SADRŽAJ**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. UVOD .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Zadatak diplomskog rada .....  | 1         |
| <b>2. SINKRONI GENERATORI S PERMANENTNIM MAGNETIMA .....</b>                    | <b>2</b>  |
| 2.1. Klasifikacija sinkronih generatora.....                                    | 2         |
| 2.2. Konstrukcija sinkronih generatora s permanentnim magnetima .....           | 6         |
| 2.3. Parazitski efekti.....   | 14        |
| <b>3. FEMM PROGRAMSKI PAKET .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>4. MODELIRANJE SINKRONOG GENERATORA S PERMANENTNIM MAGNETIMA .....</b>       | <b>19</b> |
| <b>5. SIMULIRANJE MODELA SINKRONOG GENERATORA S PERMANENTNIM MAGNETIMA.....</b> | <b>25</b> |
| 5.1. Simulacija promjene duljine promjera statora .....                         | 26        |
| 5.2. Simulacija promjene duljine polumjera rotora .....                         | 31        |
| 5.3. Simulacija promjene širine jarma stroja .....                              | 36        |
| 5.4. Simulacija promjene visine utora statora .....                             | 41        |
| 5.5. Simulacija promjene širine zuba statora .....                              | 43        |
| 5.6. Simulacija promjene visine magneta rotora.....                             | 46        |
| 5.7. Simulacija promjene kuta magneta rotora.....                               | 50        |
| 5.8. Simulacija promjene širine zračnog raspورا.....                            | 53        |
| 5.9. Usporedba rezultata svih simulacija .....                                  | 55        |
| <b>6. ZAKLJUČAK.....</b>  | <b>57</b> |
| <b>LITERATURA .....</b>   | <b>59</b> |
| <b>POPIS KORIŠTENIH SIMBOLA I OZNAKA .....</b>                                  | <b>61</b> |
| <b>SAŽETAK.....</b>   | <b>63</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>   | <b>63</b> |
| <b>ŽIVOTOPIS.....</b>   | <b>64</b> |

---

## 1. UVOD

U diplomskom radu detaljno je prezentiran postupak izrade modela sinkronog generatora s permanentnim magnetima u programskom alatu FEMM, koji služi za simuliranje i izračun elektromagnetskih polja numeričkim metodama. Model je konstruiran parametarski korištenjem programskog jezika python, koji je s FEMM-om povezan pomoću pyFEMM sučelja. Na konstruiranom modelu sinkronog generatora s permanentnim magnetima obavljene su parametarske simulacije promjene dimenzijskih parametara, te su prikazani rezultati simulacija za promjenu svakog parametra. Utjecaj promjene parametara na performanse stroja prikazan je grafički i numerički preko izračuna ukupne harmonijske distorzije signala magnetske indukcije.

Korištenje računalnih alata koji su zasnovani na izračunu i simulaciji elektromagnetskih polja primjenom numeričkih metoda, omogućava konstruiranje realističnijih modela električnih uređaja u usporedbi s modeliranjem električnih uređaja preko nadomjesnih shema. Postoje brojni programski alati koji to omogućuju kao što su Ansys Maxwell, Agros2D, COMSOL Multiphysic i slično. FEMM je odabran radi jednostavnosti korištenja i mogućnosti povezivanja s python kodom.

Sadržaj diplomskog rada grupiran je u poglavlja u kojima su objašnjeni i prezentirani princip rada i konstrukcijski dijelovi sinkronih generatora s permanentnim magnetima, prikazane mogućnosti i značajke FEMM simulacijskog alata, detaljno opisane realizacije pojedinih konstrukcijskih dijelova stroja i dodjeljivanje zadanih svojstava, prikazani rezultati simulacija i analiza dobivenih podataka.

### 1.1. Zadatak diplomskog rada

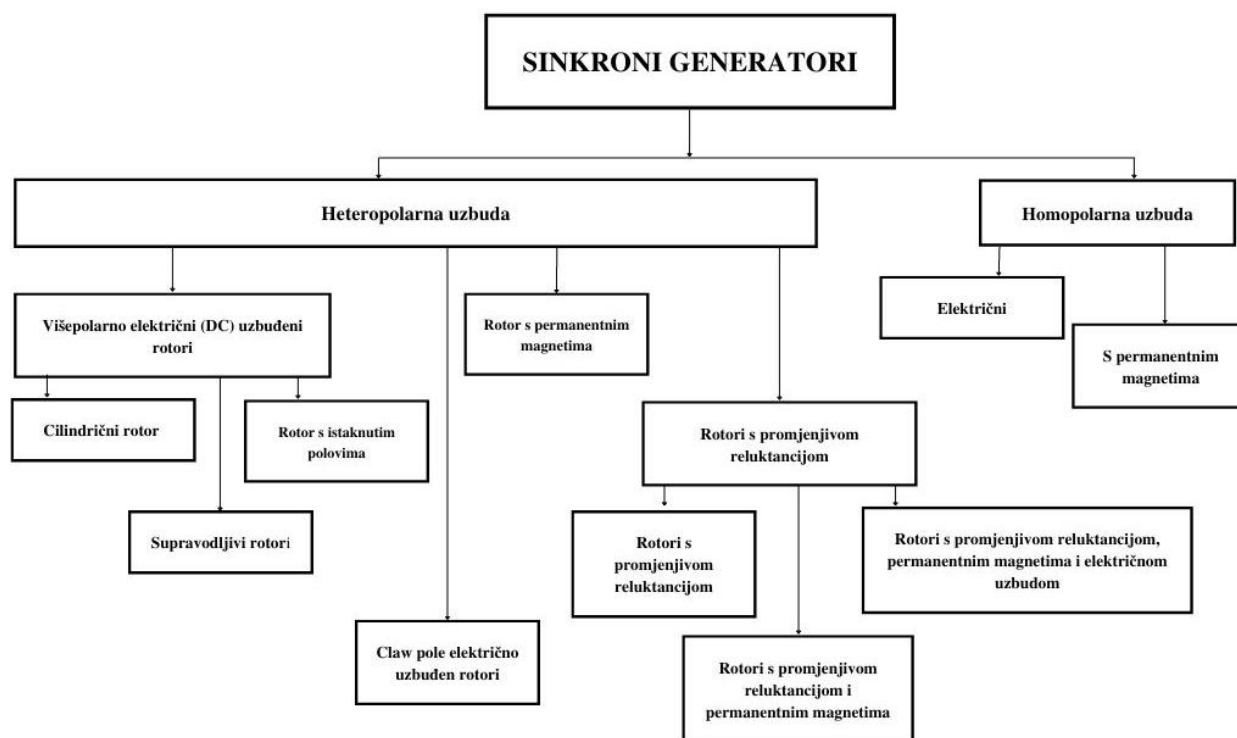
U radu je potrebno prikazati postupak izrade modela generatora s permanentnim magnetima namijenjenog za korištenje u bioplinskim elektranama u nekom FEM simulacijskom alatu (preporuka FEMM ili ANSYS Maxwell). Za izrađeni model generatora obaviti parametarske simulacije mijenjajući neke od dimenzija geometrije stroja u odabranom FEM alatu.

## 2. SINKRONI GENERATORI S PERMANENTNIM MAGNETIMA

Izmjenični strojevi rade na principu okretnog magnetskog polja – proces pretvorbe električne energije u mehaničku energiju, i obrnuto, odvija se pomoću magnetskog polja, te se dijele na asinkrone i sinkrone strojeve. U sinkrone strojeve pripadaju motori i generatori kod kojih je brzina vrtnje rotora jednaka brzini vrtnje magnetskog polja u rasporu. Sinkroni strojevi koriste se najčešće kao generatori, te se nazivaju još i alternatori.

### 2.1. Klasifikacija sinkronih generatora

Osnovni dijelovi svakog stroja su stator i rotor. Stator je nepomični dio stroja, te je karakteriziran laminiranom jezgrom koja sadrži jednoliko raspoređene utore, u koje se postavljaju višefazni namoti protjecani izmjeničnom strujom. Detaljnija konstrukcija bit će opisana u idućem potpoglavlju. Kategorizacija sinkronih generatora, kao što je prikazano na slici 2.1., temelji se na izvedbi rotora [1].



*Slika 2.1. Klasifikacija sinkronih generatora prema konstrukciji rotora [1]*

Heteropolarni sinkroni strojevi podrazumijevaju strojeve koji sadrže uzbuđu na rotoru, a rotori se prema tipu uzbuđe dijele se na rotore s uzbuđnim namotom, rotore s permanentnim magnetima, rotore s promjenjivom reluktancijom i eng. *claw pole* rotore [1].

Kod izvedbi rotora s uzbuđnim namotom kojim protječe istosmjerna struja, razlikuju se rotori s neistaknutim i istaknutim polovima. Rotori s neistaknutim polovima nazivaju se još i cilindrični rotori, imaju distribuiranu uzbuđu i konstruiraju se s dva ili četiri pola za velike brzine ili turbogeneratore. Rotori s istaknutim polovima imaju koncentriranu uzbuđu, te se izvode s četiri ili više polova za niske brzine ili hidrogeneratore [1]. Istaknuti polovi uzrokuju nejednolik zračni raspored što rezultira različitim reluktancijama u uzdužnoj i poprečnoj osi stroja. Utoru u koje se stavljaju kratkospojeni štapovi za realizaciju prigušnog kaveza nalaze se u polnoj papuči. Svrha prigušnog kaveza je prigušenje inverznog protjecanja i njihanja stroja, te omogućavanje asinkronog zaleta stroju [2]. Uobičajeni načini dovođenja istosmjerne struje uzbuđnom krugu na rotoru su pomoću vanjskog istosmjernog izvora i pomoću istosmjernog izvora koji je izravno montiran na osovinu sinkronog generatora (beskontaktna uzbuđa). Napajanje pomoću vanjskog istosmjernog izvora omogućeno je četkicama i kliznim kolutima, te se koriste za proizvodnju toka kod manjih sinkronih strojeva. Beskontaktna uzbuđa koristi se za napajanje uzbuđnom istosmjernom strujom većih sinkronih strojeva, a sastavljena je od malog sinkronog generatora (uzbuđnika) montiranog na osovinu i ispravljača. Uzbuđni namot uzbuđnika smješten je na statoru, a armaturni namot na rotoru. Uzbuđna struja sinkronog stroja regulira se regulacijom uzbuđne struje uzbuđnika. [2]. Supravodljivi sinkroni generatori sadrže statorski trofazni namot i rotor s uzbuđnim namotima od supravodljivih materijala. Supravodljivi materijali proizvode jače uzbuđno magnetsko polje što rezultira povećavanjem gustoćom snage i momenta [3].

Reluktantni sinkroni generatori konstruirani su s lameliranim rotorom bez uzbuđnih namota. Zakretni moment proizvodi se težnjom rotora da se poravna s tokom koji proizvodi stator. Primjenjivi su za proizvodnju energije pomoću vjetra, a prednosti uključuju robusnu, jeftinu i jednostavnu izvedbu sa smanjenim gubicima u bakru i niskim zahtjevima održavanja [4].

Claw pole generatori sadrže rotor s „kandžastim“ polovima i uzbuđnim namotom u obliku prstena, čime se omogućava magnetiziranje svih polova istodobno. Uz klasičnu izvedbu statora, sadrže još diodni most i regulator napona. Diodni most služi za ispravljanje generirane statorske struje, a izlazni napon se održava konstantnim reguliranjem uzbuđne struje. Smjer magnetskog tok je trodimenzionalan, u rotoru je aksijalan i radijalan, a u statoru tangencijalan. Najefikasniju primjenu imaju u automobilima [1].

Homopolarne sinkrone strojeve karakterizira postavljanje istosmjerne uzbude, uz trofazne izmjenične namote, na stator. Uzbuda može biti izvedena u obliku elektromagneta ili permanentnih magneta. Konstrukcijska izvedba homopolarnih strojeva omogućava dostupnost i statičnost priključaka uzbudnih i armaturnih namota, uklanjanje četkica i kliznih kolutova, te mogućnost kontroliranja uzbudne struje što rezultira smanjivanjem gubitaka snage u pogonima s konstantnom brzinom vrtnje. Kao generatori primjenjuju se u vagonima vlakova, brodovima, zrakoplovima, automobilima i slično [5].

U generatorskom režimu rada, rotor sinkronog stroja stvara magnetsko polje nakon što ga se uzbuđi istosmjernom strujom ili se samouzbuđi, zatim se kreće mehanički vrtjeti konstantnom brzinom pomoću pogonskog stroja, te se magnetsko polje rotora kreće rotirati. Okretno magnetsko polje rotora presijeca namote statora, te se u njima induciraju elektromotorne sile, koje su vremenski pomaknute za  $120^\circ$  zbog prostornog rasporeda namota statora. Nakon što se generator optereti, statorom poteku struje koje stvaraju rotirajuće magnetsko polje. Brzina okretnog magnetskog polja statora ( $n_s$ ) jednaka je brzini vrtnje rotora sinkronih strojeva ( $n$ ), a karakterizirana je frekvencijom izmjeničnog napajanja ( $f$ ) i brojem pari polova sinkronog stroja ( $p$ ). Brzina okretnog magnetskog polja statora naziva se sinkrona brzina. Frekvencija izmjeničnog napajanja jednaka je frekvenciji napona i struja u statoru. Odnos između spomenutih veličina iskazan je izrazom 2-1:

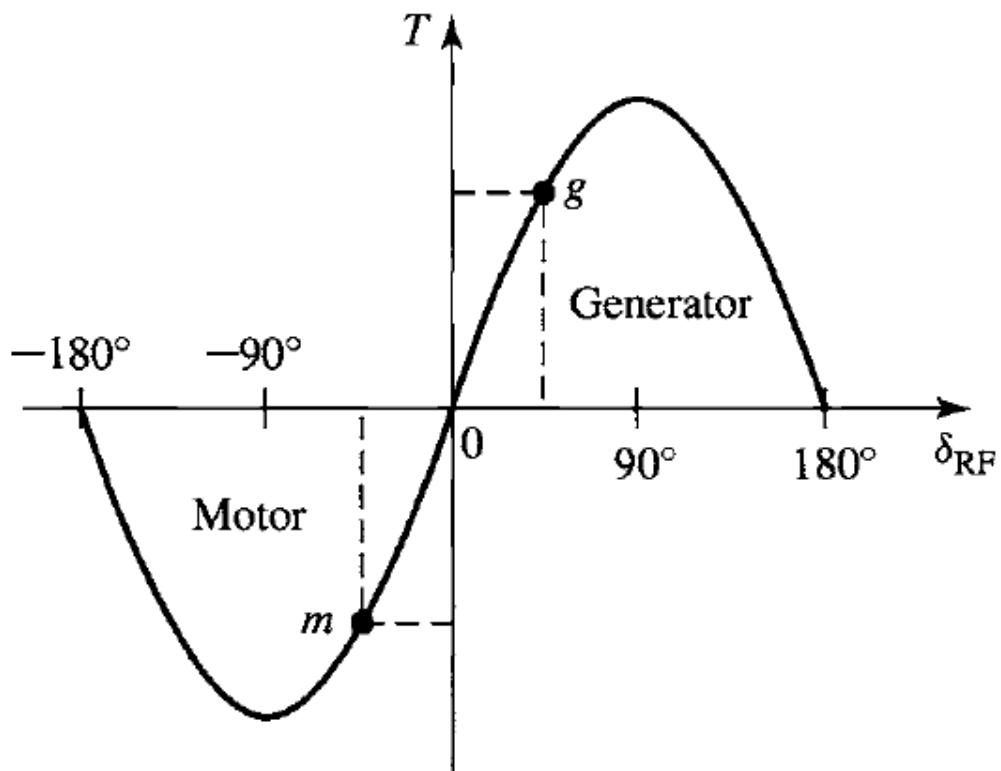
$$n = n_s = \frac{60f}{p} \quad (2-1)$$

Elektromehanički moment sinkronog stroja prikazan je sljedećim izrazom 2-2, a ovisi o broju pari polova ( $p$ ), rezultatnom toku zračnog rasporeda po polu ( $\phi_R$ ), protjecanju uzbudnog namota ( $\Theta_f$ ) i električnom faznom kutu između magnetskih osi  $\phi_R$  i  $\Theta_f$ :

$$T = \frac{\pi}{2} p^2 \phi_R \Theta_f \sin(\delta_{RF}) \quad (2-2)$$

Na smjer vrtnje rotora utječe moment pogonskog stroja, a elektromehanički moment djeluje u suprotnom smjeru, odnosno suprotstavlja se mehaničkom momentu na osovini. U stacionarnom stanju elektromehanički moment i mehanički moment razvijen na osovini su izjednačeni, te se

generator nalazi u sinkronizmu. Promjenom mehaničkog momenta na osovini, mijenja se kut opterećenja, te slijedi dinamička promjena procesa prilagodbe koja zahtjeva promjenu brzine vrtnje rotora do sljedećeg uspostavljenog stacionarnog stanja. Kut opterećenja za generatorski rad je pozitivan, a područje stabilnog rada je  $0 < \delta_{RF} < \frac{\pi}{2}$ . Povećavanje mehaničkog momenta iznad maksimalne vrijednosti kuta opterećenja rezultirat će ispadom iz sinkronizma. Na slici 2.2. prikazan je krivulja ovisnosti elektromehaničkog momenta o kutu opterećenja, pri čemu se protjecanje rotora i rezultatni tok zračnog raspora smatraju konstantnim [6].



*Slika 2.2. Prikaz krivulje ovisnosti elektromehaničkog momenta o kutu opterećenja [6]*



## 2.2. Konstrukcija sinkronih generatora s permanentnim magnetima

Sinkroni generatori s permanentnim magnetima su generatori kod kojih se umjesto elektromagneta (uzbudnog namota) na rotoru nalaze permanentni magneti, a stator najčešće čine tri namota prostorno pomaknuti za  $120^\circ$ . Permanentni magneti stvaraju magnetsko polje, koje se rotira kada se osovina generatora vrti pod utjecajem pogonskog sustava. Okretno magnetsko polje rotora presijeca namote statora u kojima se, prema Faradayevom zakonu, inducira napon. Kada se stator spoji na trošilo (mrežu), zatvara se strujni krug što rezultira protjecanjem struje kroz namote statora. Budući da je struja koja protječe kroz namote višefazna, stvara se okretno magnetsko polje statora. Magnetsko polje statora rotira se jednakom frekvencijom kao rotor, a izlazni napon proporcionalan je brzini vrtnje rotora. Primjenom magnetske uzbude (samouzbuđe) gubi se mogućnost kontrole uzbudnog polja, ali smanjuje se broj potrebnih dijelova kao što su izvor uzbudnog napona i struje, kliznokolutni prsteni i četkice, te uzbudni namot i eliminiraju se gubici u bakru (uzbudnog namota).

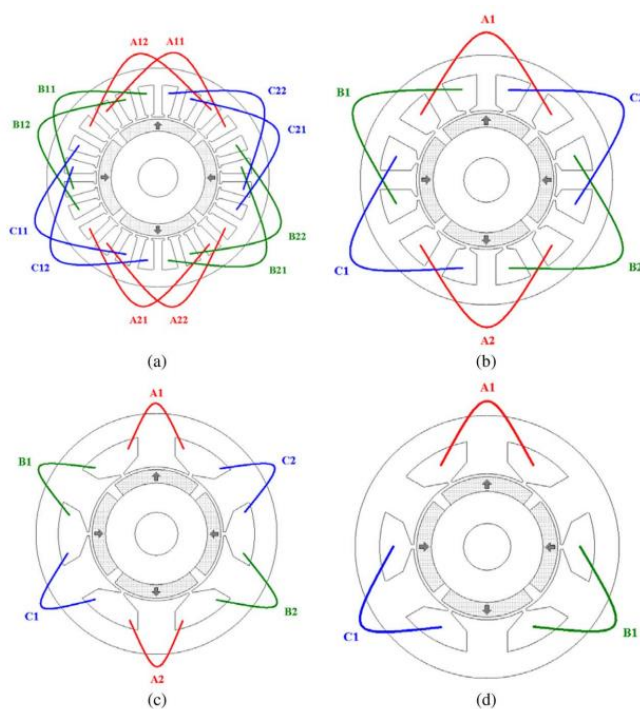
Stator sinkronih strojeva je nepokretni dio stroja, sastavljen je od kućišta, jezgre i statorskog namota. Konstrukcijska izvedba statora je slična za sve vrste sinkronih strojeva, te se najčešće razlikuje u veličini odnosno u duljini i promjeru statora, zbog razlike u broju pari polova [2].

Kućište je vanjski dio stroja, izrađen od čelika, koji služi za potporu i zaštitu jezgre statora i namota, te sadrži sustav za hlađenje stroja. Kućište ima oblik šupljeg valjka i ima noge ili prirubnice za montažu na temelj.

Jezgra statora ili statorski paket predstavlja magnetski krug statora sinkronog stroja, te je izolirana površinskim premazom kojim se smanjuju vrtložne struje i gubitke histereze. Sastavljena je od prstenastih i međusobno izoliranih magnetskih limova, koji se slažu paralelno na način da tvore paket limova. Uobičajene debljine limova su debljine 0.35, 0.5 ili 0.63 mm, a materijal izrade je električni čelik, odnosno legura željeza s dodatkom silicija. U svakom limu, s unutarnje strane prstenova, izrezani su utori, koji su simetrično raspoređeni po njegovom presjeku. Tipični oblici statorskih utora (s vodičima) sinkronog stroja su poluzatvoreni, poluotvoreni i otvoreni. Slaganjem pojedinačnih limova jedan na drugi oblikuju se utori uzduž jezgre statora, te se u njih postavlja namot [2]. Moguća je izvedba statora bez utora, čime se postiže minimalan eng. *cogging torque*. Izvedba s utorima pogodna je za zahtjeve visokog izlaznog momenta, a izvedba bez utora kada se zahtjevaju niski gubici u rotoru i vrlo male dimenzije stroja. Važan parametar pri konstrukciji statora je omjer ispune utora, koji se definira kao postotak volumena koji zauzimaju vodiči namota

u odnosu na ukupni raspoloživi volumen utora. Omjer ispune utora mora biti što veći kako bi se smanjili gubici u bakru [7].

Statorski ili armaturni namot je namot sinkronog stroja u kojemu se inducira napon pod utjecajem magnetskog toka. Armaturni namot je višefazni (najčešće trofazni) u zvijezda spoju, te je simetrično raspoređen u utorima po obodu stroja. Serijski vezani svici sastavljeni od jednog ili više zavoja čine namot svake faze. Namoti su izrađeni od bakra, a mogu se preklapati ili biti odvojeni. Namoti koji se preklapaju mogu biti izvedeni kao koncentrirani ili distribuirani, a namoti koji se ne preklapaju izvode se isključivo kao koncentrirani. Zavoji u izvedbi koncentriranog namota smješteni su u jednom utoru oko pola, čime je omogućeno postizanje iznosa magnetskog polja većeg nego kod izvedbe distribuiranog namota, ali nesinusnog karaktera što rezultira pojavom harmonika [7]. Kod izvedbe koncentriranog namota koji se ne preklapa, namoti su bolje termički i fizički odvojene u odnosu na distribuirani namot, što smanjuje rizik međufaznog kratkog spoja u slučaju oštećenja izolacije namota [8]. Kod izvedbe distribuiranog namota vodiči su smješteni u više utora ispod jednog pola, te imaju sinusnu raspodjelu protjecanja u zračnom rasporu. U odnosu na koncentrirani namot, imaju veće gubitke u bakru. Na slici 2.3. prikazane su različite izvedbe statorskih namota.

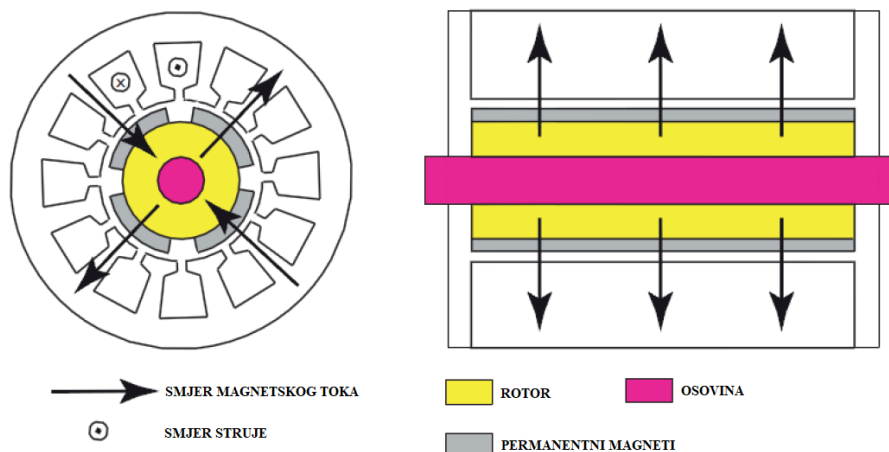


**Slika 2.3.** Prikaz različitih izvedbi statorskog namota: a) distribuirani preklapajući namot, b) koncentrirani preklapajući namot, c) dvoslojni koncentrirani namot koji se ne preklapa, d) jednoslojni koncentrirani namot koji se ne preklapa [8]

Izvedbe sinkronih generatora s permanentnim magnetima mogu se uvelike razlikovati, ali glavne podjele su prema smjeru toka, smještaju rotora i položaju permanentnih magneta.

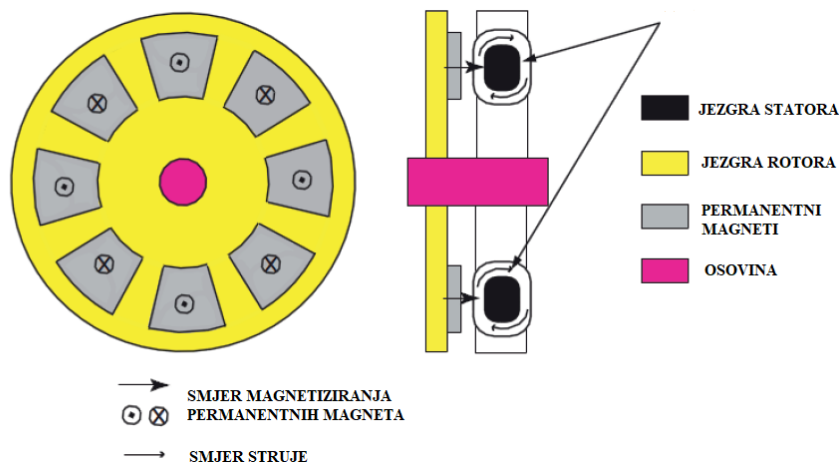
Prema smjeru uzbuđnog toka s obzirom na os rotacije razlikuju se sinkroni generatori s permanentnim magnetima s radijalnim (eng. *radial flux*), aksijalnim (eng. *axial flux*) i poprečnim smjerom (eng. *transverse flux*) [8].

Radijalan smjer toka odnosi se na tok generiran duž polumjera stroja odnosno tok koji se stvara okomito na smjer rotacije. Radijalni strojevi predstavljaju uobičajeni tip strojeva. Troškovi proizvodnje su manji u odnosu na strojeve s aksijalnim tokom, te im izvedba omogućava fleksibilno skaliranje (veće snage stroja postižu se povećavanjem duljine stroja). Koriste se za propulziju brodova, u robotici i vjetroelektranama [8].



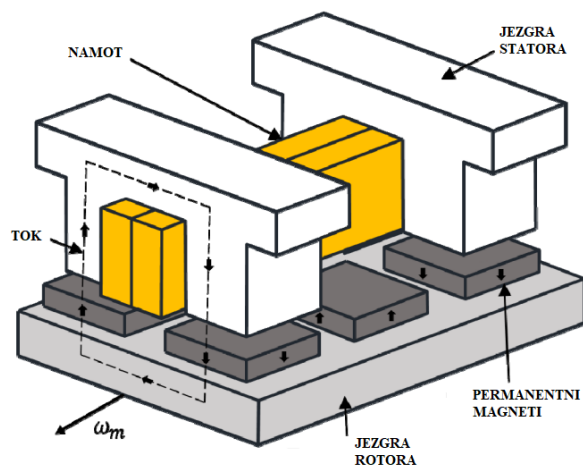
*Slika 2.4. Prikaz poprečnog presjeka sinkronog generatora s permanentnim magnetima s radijalnim smjerom toka [8]*

Aksijalan smjer toka predstavlja smjer generiranog toka koji je paralelan s osovinom tj. smjerom rotacije. Sinkroni generatori s permanentnim magnetima i aksijalnim smjerom toka, manji su i teži u odnosu na sinkrone generatore s permanentnim magnetima i radijalnim smjerom toka. Prednost u odnosu na strojeve s radijalnim tokom je veća gustoća snage, a za poboljšanje karakteristika izrađuju se u izvedbi s dva statora između kojih se nalazi rotor i izvedbi dva rotora između kojih se nalazi stator [8]. Primjenjuju se u sustavima pretvorbe energije vjetroturbina s izravnom spregom, u automobilskoj industriji i kao visokofrekvencijski generatori [9].



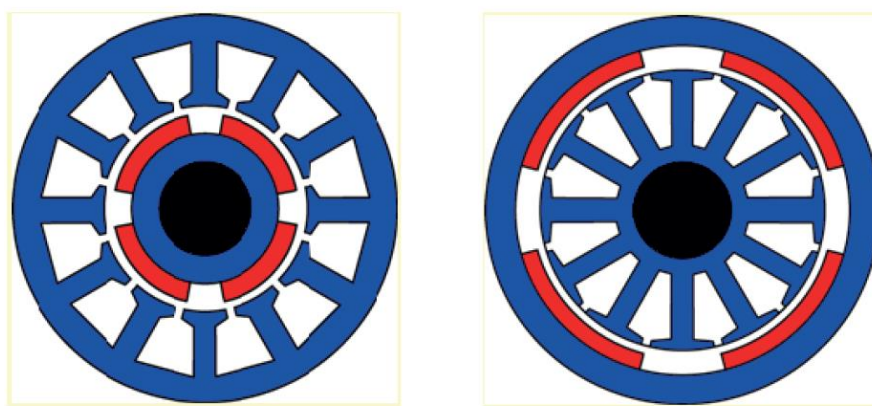
*Slika 2.5. Prikaz poprečnog presjeka sinkronog generatora s permanentnim magnetima s aksijalnim smjerom toka [8]*

Poprečan smjer toka omogućen je konstrukcijom koja omogućuje trodimenzionalni smjer magnetskog toka – tok prolazi aksijalno kroz stator, obodno kroz rotor i radijalno kroz zračni raspor [10]. Na rotoru su pričvršćeni permanentni magneti koji su naizmjenično polarizirani, te su međusobno odvojeni. Stator se sastoji od statorske jezgre i namota. Jezgra statora sastoji se od naslaga feromagnetskog željeza s utorima u sredini, koji služi za smještaj namota jedne faze. Svaku fazu čine magnetski krug i armaturni namot koji su odvojeni, a za proizvodnju višefaznog toka spaja se nekoliko jedinica. Izvedbom je omogućeno da su električna i magnetska opterećenja u stroju duž različitih ravnina, što rezultira većom gustoćom snage, ali i kompliciranijim dizajnom i proizvodnjom [11]. Ostali nedostaci uključuju visok rasipni tok koji uzrokuje niski faktor snage i slaba mehanička konstrukcija uzrokovana brojem dijelova. Moguće primjene su vjetroelektrane, hibridna vozila i brodski pogon [8].



*Slika 2.6. Prikaz dijela tipičnog sinkronog generatora s permanentnim magnetima s poprečnim smjerom toka [8]*

Materijal izrade rotora je najčešće isti kao i stator kako bi se olakšala izrada [12]. Važan parametar pri dizajnu rotora je omjer duljine i promjera ( $L/D$ ), te za sinkrone generatore s permanentnim magnetima treba iznositi 1-3 [12]. Rotor sinkronih generatora s permanentnim magnetima može biti vanjski ili unutarnji. Vanjski rotor okružuje stator, a permanentni magneti su uobičajeno smješteni na unutarnjem obodu. U ovoj izvedbi rotor ima veći promjer od statora. Prednosti izvedbe su veći broj polova za isti razmak između polova i bolje hlađenje magneti, a primjenjuju se za manje turbine s horizontalnom osovinom za vjetroelektrane. Češće korištena izvedba rotora je unutarnja, odnosno izvedba u kojoj je stator blizu kućištu gdje je omogućeno bolje hlađenje [7]. Obje izvedbe prikazane su na slici 2.7.

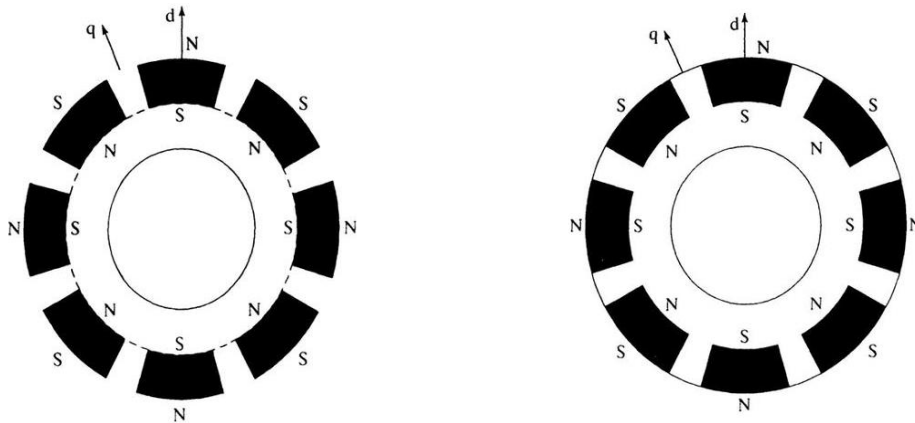


**Slika 2.7.** Prikaz smještaja rotora – unutarnji (lijevo) i vanjski (desno) [8]

Položaj permanentnih magneti može biti montiran na površinu rotora (eng. *surface mounted*), umetnuti na površinu rotora (eng. *surface inset*) i unutarnji (eng. *interior*) [8].

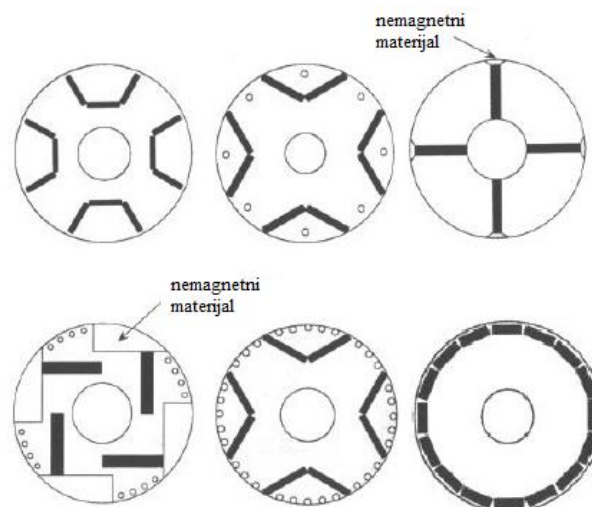
Kod sinkronih generatora s montiranim površinskim permanentnim magnetima najčešći smjer magnetiziranja magneti je u radijalnom smjeru, te su zalijepljeni i/ili fiksirani zavojem od staklenog vlakna na površinu rotora. Ukupni moment čini samo moment magneti, budući da su  $d$  i  $q$  komponenta induktiviteta približno jednake. Imaju vrlo jednostavnu konstrukciju rotora. Ne koriste u primjenama u kojima se zahtjeva veliki raspon brzina vrtnje.

Izvedba sinkronih generatora s permanentnim magnetima umetnutim na površinu rotora modifikacija je prethodne metode, pri čemu su područja između permanentnih magneti na jarmu rotora ispunjena polovima od mekog željeza. Ukupni moment sastavljen je od momenta magneti i momenta reluktancije, te je gustoća momenta veća u odnosu na verziju s površinski montiranim magnetima, ali zbog većeg rasipnog toka, faktor snage je manji. Permanentni magneti magnetiziraju se radijalno [8]. Obje izvedbe prikazane su na slici 2.8.



**Slika 2.8.** Izvedba rotora sinkronih generatora s permanentnim magnetima montiranim na površinu (lijevo) i s umetnutim na površinu (desno) [8]

Konstrukcija rotora sinkronih generatora s unutarnjim (potopljenim) permanentnim magnetima predstavlja izvedbu gdje su permanentni magneti postavljeni unutar rotora, te može biti izvedena na brojne načine, od kojih su neki mogući prikazani na slici 2.9. Zbog nedostatka električnog čelika na mjestima na kojima su postavljeni magneti, induktivnost će biti promjenjiva duž oboda. Magnetni mogu biti magnetizirani u obodnom i radijalnom smjeru, moguće je korištenje slabih permanentnih magneta, omogućena je magnetska zaštita od kratkog spoja u neispravnim uvjetima koja je omogućena željeznim mostovima između magneta koji sprječavaju dolazak demagnetizirajućeg polja do magneta. Ovaj tip konstrukcije pogodan je za velike brzine. Nedostaci uključuju kompliciran proces postavljanja magneta u unutrašnjost, visok rasipni tok koji smanjuje faktor snage i učinkovitost. Kako bi se izbjeglo zasićenje potrebno je pažljivo izabrati debljinu željeznih mostova između magneta [8].



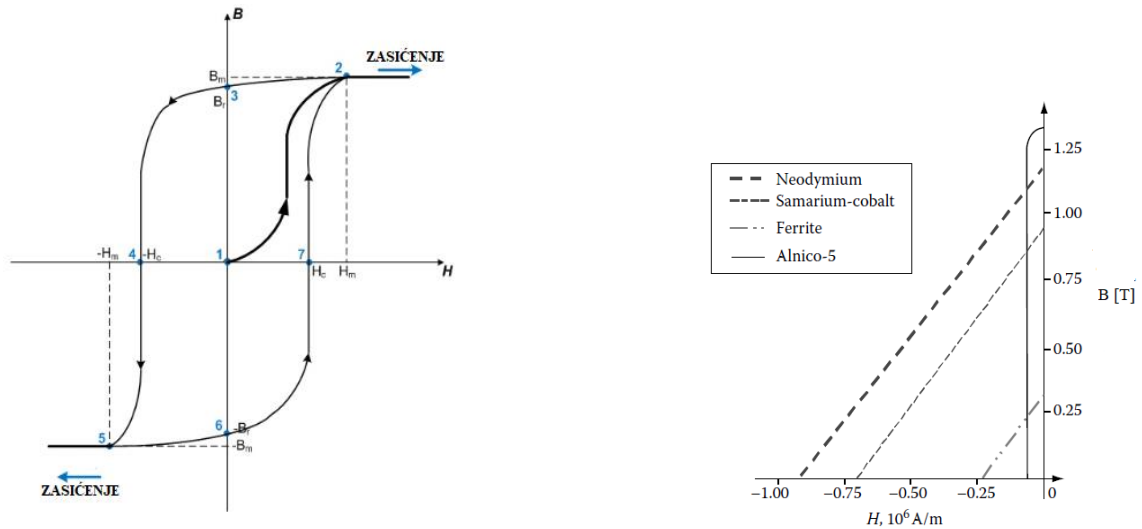
**Slika 2.9.** Prikaz različitih izvedbi sinkronog generatora s unutarnjim magnetima [8]

Permanentni magneti su obrađeni tvrdi feromagnetični materijali u čijoj se strukturi stvara magnetsko polje. Atomi koji okružuju jezgre atoma feromagnetskih materijala prirodno proizvode slabo magnetsko polje. Magnetske domene su skupine atoma koje imaju sposobnost orijentacije u određenom smjeru, pritom svaka pojedinačna domena ima sjeverni i južni pol. U nemagnetiziranom stanju magnetske domene međusobno se poništavaju budući da su orijentirane u nasumičnim položajima. Za izradu permanentnog magneta, feromagnetski materijal se zagrijava na vrlo visokim temperaturama, te je pritom izložen utjecaju jakog magnetskog polja. Magnetsko polje uzrokuje zakretanje magnetskih domena u materijalu sa smjerom vanjskog magnetskog polja (magnetizacija) do trenutka magnetskog zasićenja materijala u kojem su sve domene poravnate u istom smjeru. Zatim slijedi hlađenje pri kojem domene ostaju na istom položaju. Nakon uklanjanja vanjskog magnetskog polja, tvrdi feromagnetični materijali zadržavaju većinu svojih domena poravnatim te time tvore permanentni magnet [13].

Krivulja magnetiziranja (histereza) prikazana je na slici 2.10. U točki 1 započinje prvo magnetiziranje materijala, povećanjem jakosti vanjskog narinutog magnetskog polja raste magnetska indukcija do točke maksimalne indukcije i maksimalne jakosti polja. Daljnje povećavanje narinutog magnetskog polja dovodi materijal u zasićenje. Slijedi uklanjanje ili smanjivanje vanjskog magnetskog polja, pri čemu se uočava da se vrijednost magnetske indukcije ne mijenja po istoj krivulji nego od točke 2 do točke 3. U točki 3 postiže se vrijednost magnetske indukcije koja se naziva remanencija ( $B_r$ ). Remanentna indukcija predstavlja mjeru magnetizma koji je preostao u magnetu, a uzrokovan je zadržavanjem magnetskih domena u položaju koji je uspostavljen pri magnetizaciji umjesto da se vrate u početni položaj. U točki 3 započinje proces demagnetiziranja, u kojem se materijalu dovodi magnetsko polje suprotnog smjera. U točki 4 postiže se vrijednost jakosti magnetskog polja koja se naziva koercitivnost ( $H_C$ ), te je u toj točki magnet potpuno demagnetiziran. Iznos koercitivne jakosti magnetskog polja označava mjeru vanjskog magnetskog polja koju je potrebno dovesti da bi se magnet demagnetizirao. Proces ponovnog magnetiziranja (u suprotnu stranu) započinje u točki 4, te traje do točke 5 u kojoj se ponovo postižu maksimalne vrijednosti magnetske indukcije i jakosti magnetskog polja, nakon koji nema smisla povećavati uzbudu. Smanjivanje vanjskog magnetskog polja ponovo slijedi između točaka 5 i 6, s time da se u točki 6 postiže negativni maksimum remanentne indukcije, te je potrebno narinuti uzbudu u suprotnom smjeru (ovog puta u pozitivnom) kako bi se magnet potpuno demagnetizirao, što se postiže u točki 7. Nakon koje slijedi iduća magnetizacija. Demagnetiziranje permanentnih magneta javlja se uslijed porasta temperature u stroju, te može biti djelomično i potpuno. Djelomična demagnetizacija podrazumijeva slabljenje magnetskih

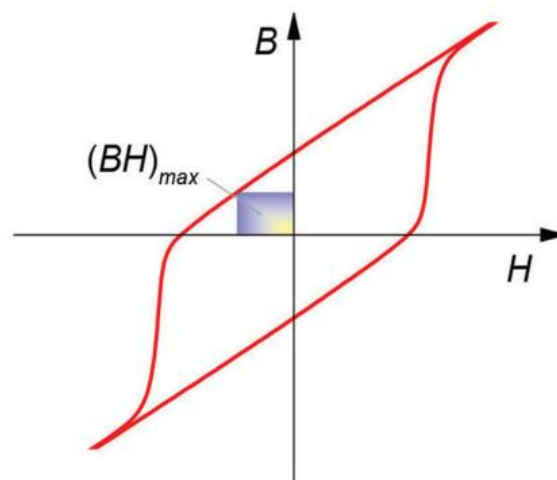


svojstava, koje se uobičajeno javlja tijekom kratkog spoja kad su neki dijelovi magneta izloženi magnetskim poljima u suprotnom smjeru. Potpuna demagnetizacija označava gubitak magnetskih svojstava, te se zahtjeva remagnetiziranje, koje u nekim slučajevima nije moguće, te je potrebna zamjena rotora. Kako bi se spriječilo demagnetiziranje potrebno je vršiti nadzor i analizu temperature stroja [8].



**Slika 2.10.** Krivulja magnetiziranja (lijevo) [14], krivulja demagnetiziranja različitih permanentnih magneta (desno) [15]

Najčešće korišteni permanentni magneti su neodymium (NdFeB), samarium-cobalt (SmCo), ferrite (Fe) i alnico (AlNiCo), te su njihove krivulje demagnetiziranja prikazane na slici 2.10. Navedeni permanentni magneti, osim alnico-a, imaju linearnu krivulju demagnetiziranja.



**Slika 2.11.** Prikaz područja najveće gustoće magnetske energije na histerezi [16]



Maksimalna gustoća magnetske energije ( $BH_{\max}$ ) je važan parametar pri odabiru permanentnih magneta, a označava snagu permanentnog magneta. Mjerna jedinica je  $\text{kJ/m}^3$  ili MGOe. Radna točka strojeva s permanentnim magnetima trebala bi se nalaziti u području najveće gustoće magnetske energije, kao što je prikazano na slici 2.11.

### 2.3. Parazitski efekti

Gubici u sinkronim strojevima s permanentnim magnetima mogu se svrstati u dvije skupine – normalni i dodatni („zalutali“) gubici. Neovisno o izvoru gubitaka, gubici uzrokuju porast temperature u stroju. Porast temperature utječe na radne performanse i vijek trajanja stroja, a ovisi o opterećenju stroja. Na nižim ili srednjim brzinama, neki od gubitaka objašnjenih u nastavku su zanemarivi ili nisu toliko značajni kao kod primjene na visokim brzinama.

Normalni gubici mogu se predvidjeti i izračunati pri izradi stroja, a uključuju gubitke u statoru i mehaničke gubitke. Gubitke u statoru čine gubici u bakru i gubici u željezu, te čine najveći udio gubitaka. Gubici u bakru namota statora rezultat su porasta temperature prolaskom struje kroz namote armature. Gubici u željezu statora sastavljeni su od gubitaka uzrokovani histerezom i gubitaka uzrokovanim vrtložnim strujama, a nastaju zbog vremenskih varijacija u gustoći magnetskog toka (magnetske indukcije) u jezgri. Histerezni gubici uzrokovani su magnetskim svojstvima feromagnetskih materijala u vremenski promjenjivom magnetskom polju, a proporcionalni su umnošku konstante gustoće histereznih gubitaka, frekvencije i maksimalnoj amplitudi magnetske indukcije na potenciju Steinmetzove konstante. Vrtložne struje induciraju se zbog vremenske promjene magnetske indukcije odnosno (ulančanog) magnetskog toka unutar jezgre statora, te stvaraju gubitke na temelju Ohmovog zakona. Gubici vrtložnih struja ovise o električnim svojstvima materijala i brzini promjene magnetske indukcije, a proporcionalni su kvadratu umnoška frekvencije i magnetske indukcije, te se manifestiraju u zubima i jarmu statora [15]. Za procjenu gubitaka jezgre statora, u analitičkim proračunima se koriste rezultati iz Epsteinovih testova u kojima se materijali izlažu različitim iznosima magnetske indukcije, te se mjere gubici u željezu. Gubici u jezgri statora smanjuju se laminiranjem jezgre. Mehanički gubici obuhvaćaju gubitke koji su uzrokovani mehaničkim trenjem zraka i površine rotora i gubitke u ležajevima [8].

Dodatni gubici dijele se na gubitke u praznom hodu i gubitke pod opterećenjem. Gubici u praznom hodu nastaju promjenom magnetske vodljivosti, a gubici opterećenja zbog promjene rasipnog toka. Uzročnici najvećeg udjela dodatnih gubitaka su vrtložne struje. Harmonici uzrokuju pojavu

vtložnih struja u metalnim dijelovima stroja, a na stvaranje dodatnih gubitaka posebno su osjetljivi namoti statora, jezgra rotora i permanentni magneti. Nesinusoidalna raspodjela namota, istaknutost polova, te utjecaj utora rezultiraju pojavom prostornih harmonika, a vremenske harmonike stvaraju uređaji energetske elektronike koji služe za upravljanje strojevima. U namotima statora, uzrok dodatnih gubitaka (izmjenični gubici bakra) manifestiraju se kao skin efekt (eng. *skin effect*) i efekt blizine (eng. *proximity effect*) koji dovode do porasta nejednoliko raspoređene gustoće struje u namotima, što dovodi do smanjenja efektivnog presjeka vodiča, većih iznosa otpora i gubitaka. Harmonici u jezgri rotora uzrokovani su utjecajem utora, a njihova pojava rezultira iskrivljenjem magnetskog toka u rotoru. Budući da je efektivni zračni raspor u sinkronim strojevima s permanentnim magnetima velik, ovi gubici nisu značajni. U permanentnim magnetima, pri velikim brzinama i visokim frekvencijama, određene kombinacije broja utora i polova uzrokovat će pojavu prostornih harmonika, koji uzrokuju gubitke vrtložnih struja. Metode za smanjenje dodatnih gubitaka uključuju povećanje duljine zračnog raspora, segmentaciju magneta ili korištenje magnetskih klinova [8].

### 3. FEMM PROGRAMSKI PAKET

FEMM (eng. *Finite element method magnetics*) predstavlja skup programa otvorenog koda za dvodimenzionalno rješavanje niskofrekventnih elektromagnetskih problema u planarnom i osnosimetričnom prostoru korištenjem analize konačnih elemenata (eng. *Finite element analysis*, FEA). Analiza konačnih elemenata je proces izrade izračuna i modela, te simuliranja za predviđanje i razumijevanje ponašanja nekog objekta u zadanim uvjetima korištenjem metode konačnih elemenata (eng. *Finite element method*, FEM). Metoda konačnih elemenata je numerička metoda rješavanja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi u ovisnosti o prostornim varijablama, a temelji se na prostornom diskretiziranju strukture nekog objekta na konačne elemente koji su međusobno povezani u čvorovima. FEMM je nastao 2004. godine, a njegov autor je David Meeker. Primjena programskog paketa očituje se u rješavanju linearnih i nelinearnih harmonijskih magnetskih i magnetostatskih problema, linearnih elektrostatskih problema i problema protoka topline u stacionarnom stanju na različitim područjima kao što su elektrotehnika, medicina, fizika, robotika, astronomija i svemirsko inženjerstvo [17].

Dijelovi FEMM-a su:

- korisničko sučelje (femm.exe),
- triangle.exe i
- različiti programi za rješavanje problema (fkern.exe, belasolv.exe, hsolv.exe, csolv.exe).

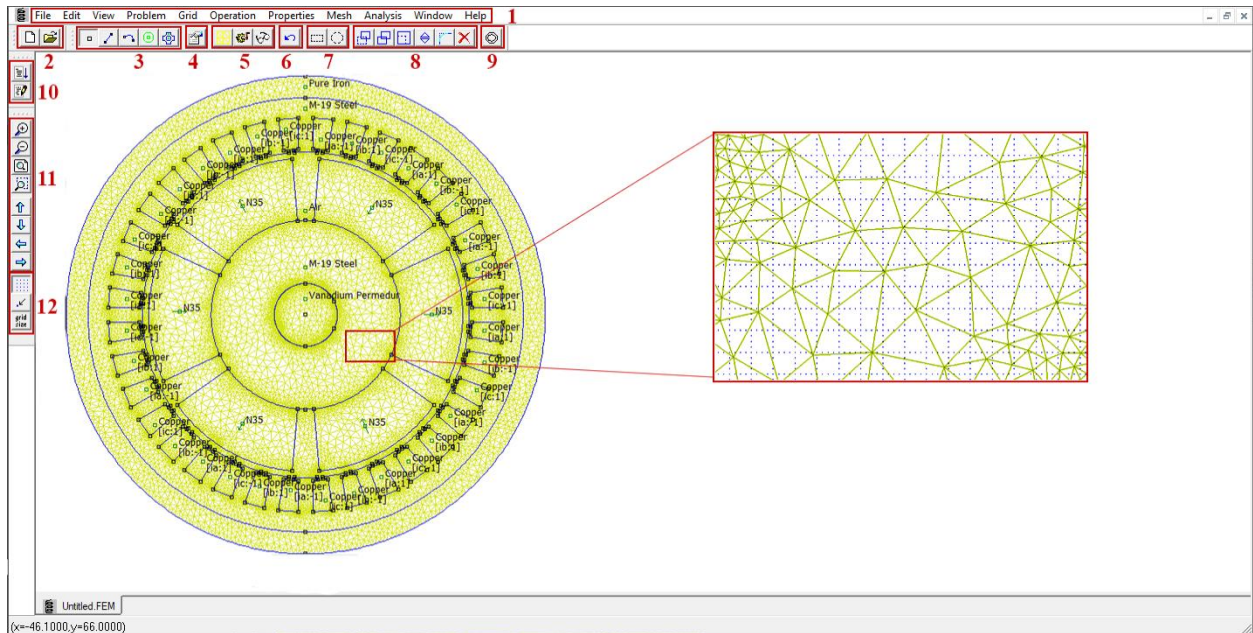
Korisničko sučelje (eng. *interactive shell*) je program koji služi kao pretprocesor sučelja s više dokumenata i postprocesor za rješavanje problema uz integrirani programski jezik Lua. Sastavljeno je od magnetskog, elektrostatskog i pretprocesora protoka topline, te magnetskog, elektrostatskog i postprocesora protoka topline. Sučelje omogućava odabir problema (magnetski, elektrostatski, protok topline ili protok struje), definiranje prostora problema (planarni ili osnosimetrični tip problema, odabir mjernih jedinica, frekvencije, dubine rješavanja, postavljanje točnosti solvera i slično), crtanje geometrije problema, definiranje materijala, njihovih svojstava i rubnih uvjeta, uvoz DXF datoteka iz drugih CAD programa, prikazivanje grafičkih rezultata pomoću boja i kontura, te ostale mogućnosti. Na slici 3.1. označene su funkcije pretprocesorskog dijela korisničkog sučelja na magnetskom problemu. Oznakom 1 označene su sve mogućnosti u FEMM-u, a ostalim oznakama na alatnim trakama označeni su prečaci najčešće korištenih opcija. Oznaka 2 prikazuje prečace za kreiranje novog dokumenta ili otvaranje postojećeg. Odabir načina crtanja (čvor, segment ili luk), te pridruživanje materijala i izvora polja (ukoliko postoji)

označenom području, te grupiranje odabranih područja prikazani su oznakom 3. Oznaka 4 otvara prozor za promjenu svojstava označenog dijela geometrije. Oznakom 5 označeni su prečaci za stvaranje mreže u prostoru problema, analiziranje modela i pregled rezultata. Prečac za poništavanje zadnje izvršene operacije označen je oznakom 6. Prečaci označeni oznakom 7 omogućuju kružni ili pravokutni izbor dijela geometrije. Oznakom 8 označeni su prečaci koji služe za ubrzavanje procesa crtanja (rotiranje, transliranje, kopiranje, pomicanje, skaliranje, zrcaljenje, stvaranje radijusa i brisanje označenih dijelova). Definiranje rubnog područja omogućeno je prečacem s oznakom 9. Oznakom 10 označeni su otvaranje postojeće Lua skripte i otvaranje prozora za pisanje skripte. Prečaci za manipulaciju prikaza označeni su oznakom 11, a prečaci za manipulaciju koordinatnom mrežom oznakom 12. Na slici 3.2. prikazane su funkcije postprocesorskog dijela korisničkog sučelja. Oznakom 1 označeni su prečaci za analizu koji omogućuju prikaz vrijednosti određenih veličina u proizvoljno odabranim točkama, definiranje proizvoljnih kontura u području rješenja za koje se mogu izraditi grafički prikazi određenih veličina, te odabir proizvoljnih područja za koje se žele izračunati integrali površine ili volumena. Oznakom 2 označeni su prečaci za izradu grafova ili integriranje po odabranim konturama, te prozor s prikazom veličina definiranih krugova u odabranom problemu. Oznakom 3 označeni su prečaci za izradu i izgled grafičkih prikaza [17].

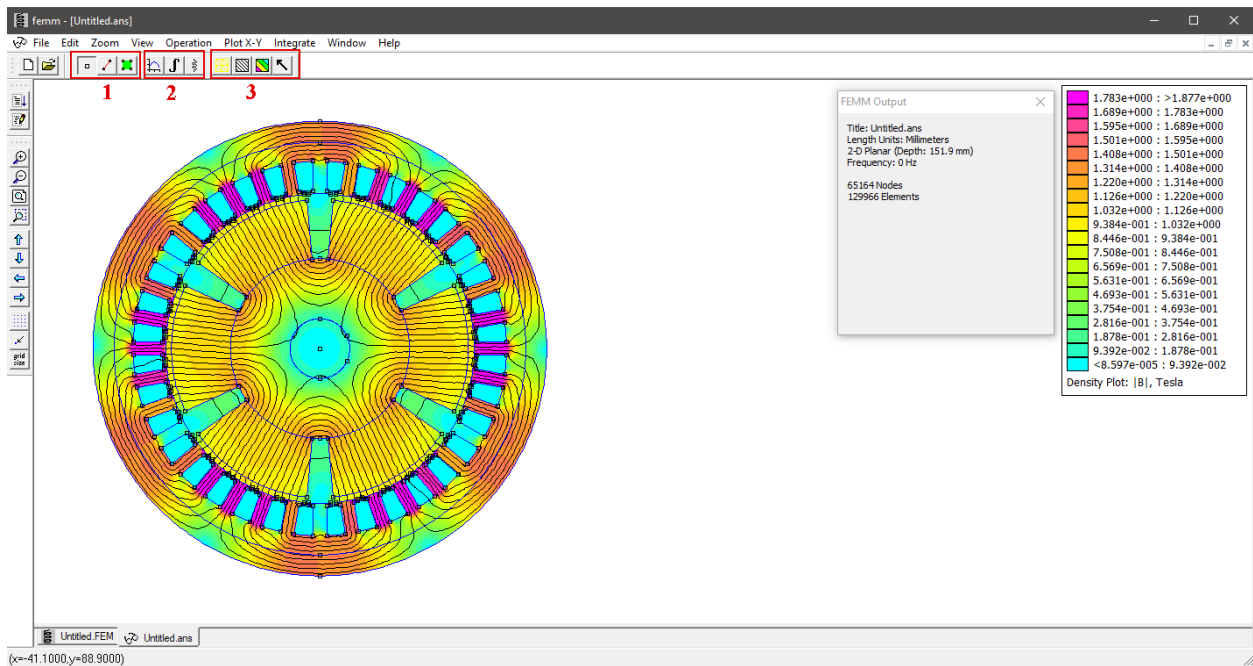
Triangle.exe program omogućava segmentiranje područja problema na velik broj trokuta kao dio analize konačnih elemenata. Vrijednost potencijala svakog trokuta procjenjuje se linearnom interpolacijom vrijednosti na vrhovima trokuta. Na slici 3.1. prikazana je kreirana mreža konačnih elemenata u području problema (pretprocesorski dio) [17].

Programi za rješavanje problema (eng. *solvers*) služe za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koristeći skupove datoteka podataka koje opisuju zadani problem. Rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi omogućava dobivanje vrijednosti polja u prostoru rješenja. Za magnetske probleme koristi se *fkern.exe*, za elektrostatske *belasolv.exe*, za probleme s protokom topline *hsolv.exe*, a za probleme protoka struje *csolv.exe*. Pri rješavanju diferencijalnih jednadžbi kod magnetskih problema ignorira se struja pomaka, a pri rješavanju elektrostatskih problema zanemaruje se magnetsko polje [17].

Model u ovom diplomskom radu napravljen je pomoću python koda koji se povezuje s FEMM-om. Python sučelje za FEMM naziva se *pyFEMM*. Komunikacija je omogućena pomoću ActiveX servera korištenjem modula *win32com*. Sintaksa *pyFEMM*-a veoma je slična postojećem Lua skriptiranju, a detaljan popis i opis svih naredbi mogu se pronaći na stranici FEMM-a [18].



*Slika 3.1. Prikaz pretprocesorskog dijela korisničkog sučelja i kreirane mreže segmentiranog područja problema u FEMM-u*



*Slika 3.2. Prikaz postprocesorskog dijela korisničkog sučelja i primjer grafičkog prikaza u FEMM-u*

## 4. MODELIRANJE SINKRONOG GENERATORA S PERMANENTNIM MAGNETIMA

Model sinkronog generatora s permanentnim magnetima izrađen je prema podacima iz tablice 4.1 [12]. Modelirani generator je trofazan, stator sadrži 36 trapezoidnih utora, a rotor je izveden kao unutarnji sa šest permanentnih magneta postavljenim na površinu rotora. Namijenjen je za primjenu pri visokim brzinama.

**Tablica 4.1.** Podaci o dimenzijama sinkronog generatora s permanentnim magnetima

| PARAMETAR                                    | OZNAKA | IZNOS  | MJERNA JEDINICA |
|--|--------|--------|-----------------|
| Promjer stroja                               | d      | 139.70 | mm              |
| Aktivna duljina stroja                       | -      | 151.90 | mm              |
| Polumjer rotora                              | rr     | 30.40  | m               |
| Širina jarma statora                         | sy     | 7.09   | mm              |
| Širina utora statora<br>(srednja vrijednost) | sw     | 4.17   | mm              |
| Visina utora statora                         | sh     | 10.00  | mm              |
| Širina zuba statora                          | tw     | 4.61   | mm              |
| Broj utora statora                           | ns     | 36.00  | -               |
| Visina magneta rotora                        | mh     | 20.00  | mm              |
| Kut magneta                                  | ma     | 50.00  | degm            |
| Širina zračnog raspora                       | ag     | 2.00   | mm              |
| Broj pari polova rotora                      | rp     | 3.00   | -               |

Izrada modela sinkronog generatora s permanentnim magnetima započela je otvaranjem integriranog razvojnog okruženja Spyder, te instalacijom pyFEMM-a naredbom `pip install pyfemm`, te učitavanjem pyFEMM modula naredbom `import femm`. Otvaranje FEMM-a izvršava se naredbom `femm.openfemm()`, nakon koje slijedi otvaranje novog dokumenta naredbom `femm.newdocument(0)`, te definiranje problema naredbom `femm.mi_probdef(freq, units, type, precision, depth, minangle, (acsolver))`. Parametar `freq` odnosi se na odabir željene frekvencije, te u ovom slučaju iznosi 0 Hz. `Units` se odnosi na mjernu jedinicu duljine, te može biti izražena u

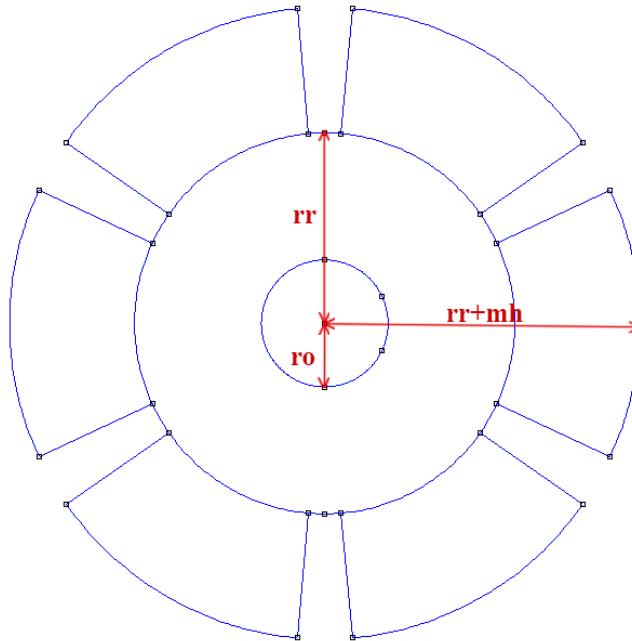
inčima, milimetrima, centimetrima, milima, metrima i mikrometrima. Za definiranje prostora problema, koji može biti planarni ili osnosimetrični, služi parametar *type*. Parametar *precision* odnosi se na željenu preciznost programa za rješavanje problema. *Depth* definira dubinu problema za dvodimenzionalne planarne geometrije, te je za ovaj slučaj dubina je jednaka aktivnoj duljini stroja. Parametar *minangle* predstavlja minimalno ograničenje kuta koje se prosljeđuje generatoru mreže, te uobičajeno iznosi 30°. Zadnji parametar *acsolver* nije obavezno definirati, a odnosi se na definiranje solvera koji će se koristiti za probleme s izmjeničnom strujom. Krajnji oblik naredbe za definiranje problema glasi *femm.mi\_probdef(0, 'millimeters', 'planar', 1.e-8, 0.1519\*1000, 30)*.

Crtanje geometrije modela sinkronog generatora omogućeno je naredbama:

- *femm.mi\_drawarc(x1, y1, x2, y2, angle, maxseg)* – dodavanje čvorova na zadanim koordinatama, te crtanje luka koji pod zadanim kutem i zadanim brojem diskretizacija povezuje te čvorove
- *femm.mi\_addnode(x, y)* – dodavanje novog čvora na zadanim koordinatama
- *femm.mi\_selectnode(x, y)* – označavanje čvora koji je najbliži zadanim koordinatama
- *femm.mi\_copyrotate2(bx, by, angle, copies, editaction)* – kopiranje i rotiranje označenih dijelova (čvorova, linija, block labela, segmenata luka ili grupa objekata) za zadani kut i broj kopija u odnosu na baznu točku orijentacije
- *femm.mi\_deleteselectednodes()* – brisanje označenih čvorova
- *femm.mi\_addarc(x1, y1, x2, y2, angle, maxseg)* – dodavanje luka od čvora najbližeg (x1,y1) do čvora najbližeg (x2, y2) pod zadanim kutem i zadanim brojem diskretizacija
- *femm.mi\_addsegment(x1, y1, x2, y2)* – dodavanje linije od čvora najbližeg (x1,y1) do čvora najbližeg (x2, y2)
- *femm.mi\_selectsegment(x, y)* – označavanje linijskog segmenta koji je najbliži zadanim koordinatama
- *femm.mi\_deleteselectedsegments()* – brisanje označenih linijskih segmenata
- *femm.mi\_selectarcsegment(x, y)* – označavanje segmenta luka koji je najbliži zadanim koordinatama

Crtanje geometrije kruga rotora, kruga osovine i vanjskog kruga statora omogućeno je naredbom *femm.mi\_drawarc(x1, y1, x2, y2, angle, maxseg)*. Za x-koordinate uzete su vrijednosti ishodišta (0), a za y-koordinate vrijednosti pripadajućih polumjera u pozitivnom i negativnom smjeru y-osi. Zadani iznos kuta luka je 180°, a broj diskretizacija iznosi 1.

Prvi korak izrade geometrije permanentnih magneta je dodavanje čvora (*femm.mi\_addnode(x, y)*), čija je x-koordinata jednaka zbroju udaljenosti polumjera rotora i visine magneta ( $rr+mh$ ), a y-koordinata je 0. Dodani čvor je označen (*femm.mi\_selectnode(x,y)*), te je rotiran (*femm.mi\_copyrotate2(bx, by, angle, copies, editaction)*) za iznos polovine kuta magneta u pozitivnom i negativnom smjeru ( $\pm ma/2$ ), time su stvorena dva čvora međusobno udaljena iznosom kuta magneta. Čvor koji se služio za stvaranje dva nova čvora, ponovno je označen i obrisan (*femm.mi\_deleteselectednodes()*), a dodani čvorovi su međusobno spojeni lukom (*femm.mi\_addarc(x1, y1, x2, y2, angle, maxseg)*). Za spajanje luka magneta s ostatkom rotora, dodana su dva linijska segmenta (*femm.mi\_addsegment(x1, y1, x2, y2)*), koja spajaju čvorove s ishodištem. Dijelovi linijskih segmenata koji presijecaju krug osovine i krug rotora su označeni (*femm.mi\_selectsegment(x, y)*) i obrisani (*femm.mi\_deleteselectedsegments()*). Luk i linijski segmenti koji povezuju luk s rotorom su označeni (*femm.mi\_selectarcsegment(x, y)*, *femm.mi\_selectsegment(x, y)*), te su kopirani u pet primjera i rotirani za zbroj kuta magneta i razmaka između dva magneta, te je time završena geometrija rotora koja je prikazana na slici 4.1.



**Slika 4.1.** Prikaz nacrtane geometrije rotora s osovinom

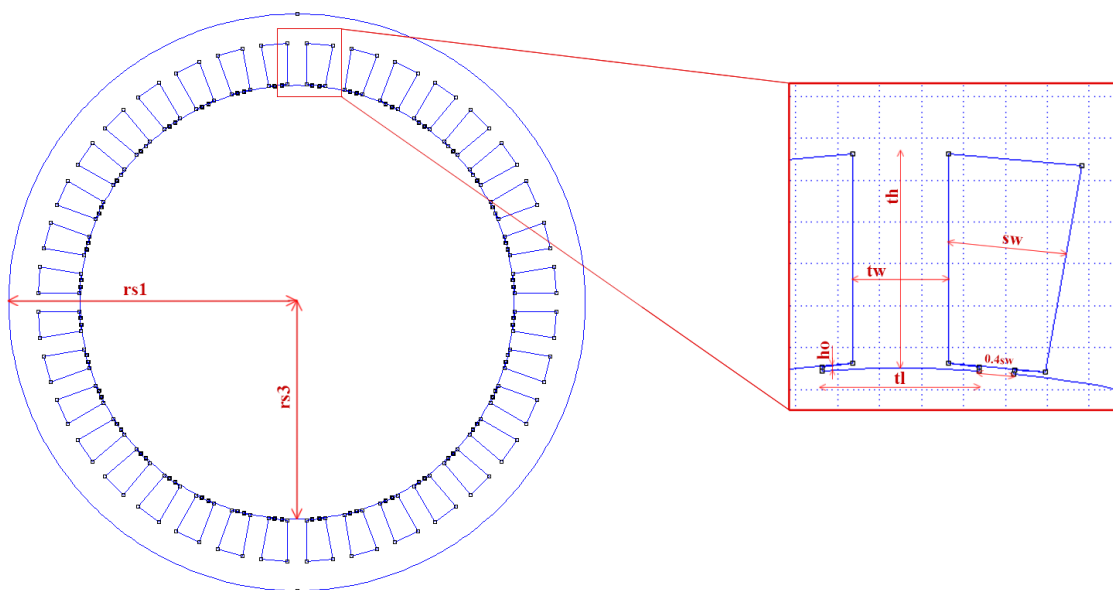
Izrada statorskog dijela geometrije temelji se izradi zubi statora, a za „crtanje“ je potrebno izračunati dodatne veličine, čiji su izrazi za izračun prikazani u tablici 4.2. Najprije se dodaju čvorovi s koordinatama  $(\pm tw/2, rs1-sy)$ ,  $(\pm tw/2, rs1-sy-sh)$ ,  $(\pm tw/2\pm td, rs1-sy-th)$  i  $(\pm tw/2\pm td, rs1-sy-sh-ho/2)$ . Zatim se dodaje luk koji spaja čvorove  $(\pm tw/2\pm td, rs1-sy-th)$  pod kutem  $\alpha$ , a ostali čvorovi povežu se međusobno linijama. Luk se označi, te se kopira i rotira za  $10^\circ$  (kutna duljina



kao zbroj kuta zuba statora i kuta utora) u 35 kopija, te slijedi označavanje svih segmenata i njihovo rotiranje i kopiranje u 35 primjera svih  $10^\circ$ . Time je izrada zubi završena, a nakon međusobnog povezivanja zubi i zatvaranja utora koji predstavljaju postavljene namote, završena je geometrija statora prikazana na slici 4.2.

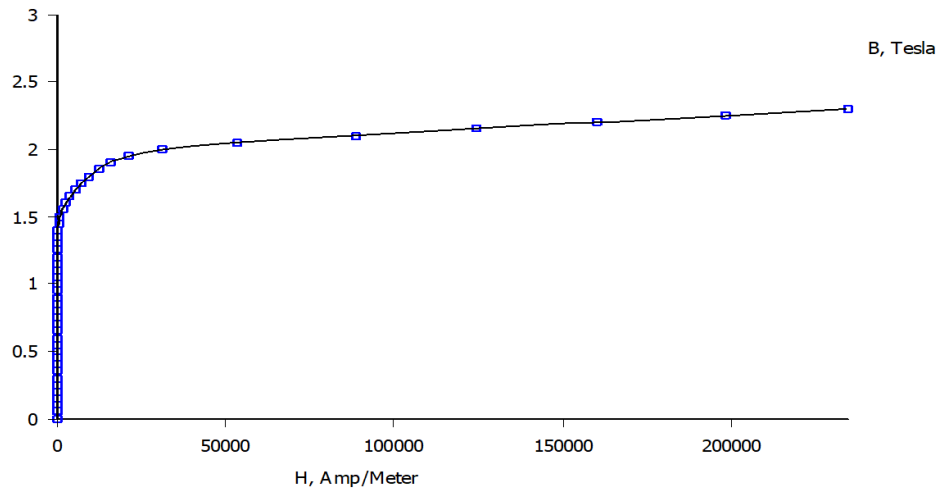
**Tablica 4.2.** Izračun veličina potrebnih za crtanje geometrije

| PARAMETAR                               | IZRAČUN  | MJERNA JEDINICA |
|---|--|-----------------|
| Polumjer osovine                        | $r_o = \frac{1}{3} r_r$  | mm              |
| Polumjer vanjskog kruga statora         | $r_{s1} = \frac{d}{2}$   | mm              |
| Udaljenost od ishodišta do zuba statora | $r_{s3} = r_r + m_h + a_g$                                     | mm              |
| Širina vrha zuba statora                | $t_l = \frac{2\pi \cdot r_{s3} - n_s \cdot 0.4 \cdot s_w}{36}$ | mm              |
| Visina vrha zuba                        | $h_o = t_h - s_h$  | mm              |
| Visina zuba statora                     | $t_h = r_{s1} - s_y - r_{s3}$                                  | mm              |
| Kut zuba statora                        | $\alpha = \frac{360^\circ \cdot t_l}{2\pi \cdot r_{s3}}$       | deg             |



**Slika 4.2.** Prikaz nacrtane geometrije statora

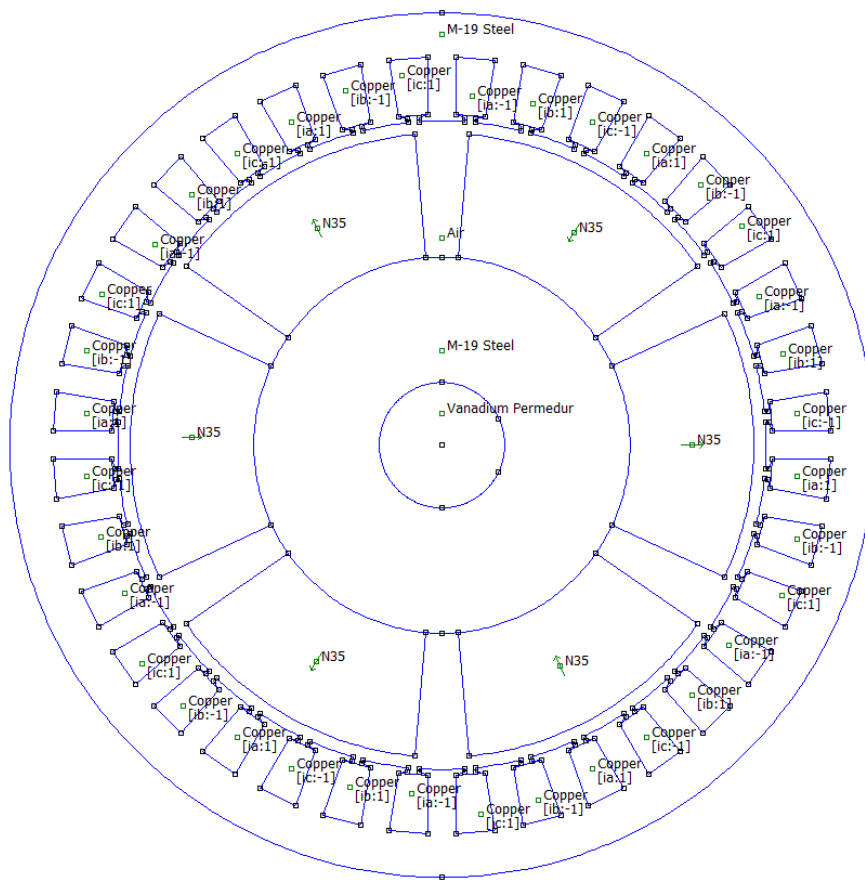
Naredba `femm.mi_fetmaterial('materialname')` omogućava uvoz zadanog materijala iz FEMM-ove biblioteke materijala. Korištena je za uvoz M-19 čelika (materijal izrade jezgre statora i rotora), bakra (materijal izrade namota), neodimija (materijal izrade permanentnih magneta), zraka (materijal zračnog raspora) i legure vanadija (materijal izrade osovine). Prikaz BH karakteristike M-19 čelika, koji predstavlja materijal izrade jezgre statora i rotora, nalazi se na slici 4.3.



**Slika 4.3.** Prikaz BH karakteristike materijala jezgre statora i rotora

Svim konstruktivnim dijelovima stroja najprije su dodane oznake pojedinog bloka naredbom `femm.mi_addblocklabel(x, y)`. Dodjeljivanje zadanih materijala pojedinim blokovima omogućeno je naredbom `femm.mi_setblockprop('blockname', automesh, meshsize, 'incircuit', magdir, group, turns)`. Naziv bloka kojim se dodjeljuje pojedini materijal definiran je parametrom `blockname`. Parametar `automesh` odnosi se na ručno ili automatsko postavljanje gustoće mreže, a `meshsize` na veličinu mreže obuhvaćenu označenim blokom. Parametar `incircuit` definira kojem krugu pripada određeni blok, npr. u ovom slučaju odnosi se na definiranje struje koja prolazi kroz pojedini namot (ia, ib, ic). Smjer magnetiziranja definiran kutem, definira se pomoću parametra `magdir`. Ukoliko odabrani blok pripada grupi, broj pripadajuće grupe definira se parametrom `group`. Parametar `turns` odnosi se na broj zavoja. Namotima se dodjeljuju pripadne struje koje protječu kroz njih, što je omogućeno naredbom `femm.mi_addcircprop('circuitname', i, circuittype)`. Parametar `circuitname` odnosi se na naziv kruga, parametar `i` na definiranje iznosa struje, a `circuittype` na spoj kruga (serijski ili paralelni). Zadnji korak izrade modela je dodavanje i definiranje rubnog uvjeta naredbom `femm.mi_addboundprop('propname', A0, A1, A2, Phi, Mu, Sig, c0, c1, BdryFormat, ia, oa)`. Navedeni parametri naredbe služe za odabir rubnog uvjeta, a način definiranja željeznog rubnog uvjeta objašnjen je u priručniku pyFEMM-a. Dodani rubni uvjet dodjeljuje se pripadnom objektu, koji je u ovom slučaju vanjski krug statora naredbom `femm.mi_setarcsegmentprop(maxsegdeg,`

'proprname', hide, group). Time je završena izrada modela sinkronog generatora s permanentnim magnetima, koji je prikazan na slici 4.4., te model spreman za simulaciju i analizu.



Slika 4.4. Prikaz modela sinkronog generatora s permanentnim magnetima

## 5. SIMULIRANJE MODELA SINKRONOG GENERATORA S PERMANENTNIM MAGNETIMA

Zadatak diplomskog rada je prikazati utjecaj dimenzijskih parametara sinkronog generatora s permanentnim magnetima na sinusnu raspodjelu magnetske indukcije po obodu zračnog raspora preko provjere harmonijskog sastava. U tablici 5.1. prikazani su parametri koji se mijenjaju, njihove početne vrijednosti i iznos koraka promjene. Parametarska simulacija provođena je u pet koraka. Za svaki korak promjene pojedinog parametra nacrtana je krivulja na sredini zračnog raspora, te je pomoću naredbe `femm.mo_makeplot(PlotType,NumPoints,Filename,FileFormat)` generiran grafički prikaz ovisnosti magnetske indukcije svakog koraka pojedinog parametra o udaljenosti po obodu. Također, pomoću python naredbi izvedena je Fourierova transformacija signala magnetske indukcije, te izrađen grafički prikaz spektralnog sastava pri čemu su amplitude pojedinih harmonika prikazane u postotku prvog harmonika, te je izračunata ukupna harmonijska distorzija signala (THD) za svaki korak parametarske simulacije prema izrazu:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n \neq 1} B(n)^2}{B(1)^2}} \quad (5-1)$$

pri čemu je  $B(n)$  amplituda magnetske indukcije  $n$ -tog harmonika, a  $B(1)$  amplituda magnetske indukcije osnovnog harmonika.

*Tablica 5.1. Pregled simulacija*

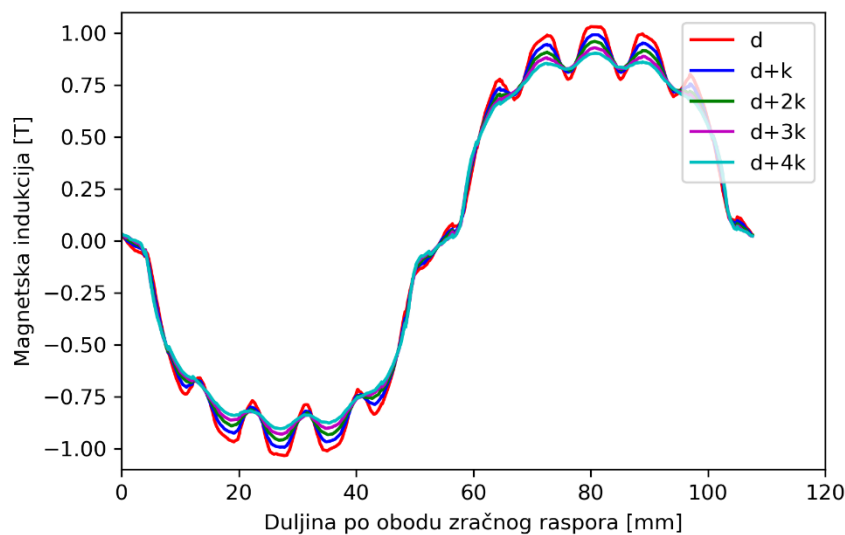
| Redni broj simulacije | Parametar              | Početna vrijednost parametra | Iznos koraka | Mjerna jedinica |
|-----------------------|------------------------|------------------------------|--------------|-----------------|
| 1.                    | Promjer stroja         | 139.70                       | 1.00         | mm              |
| 2.                    | Polumjer rotora        | 30.40                        | 1.00         | mm              |
| 3.                    | Širina jarma statora   | 7.09                         | 1.00         | mm              |
| 4.                    | Visina utora statora   | 10.00                        | 1.00         | mm              |
| 5.                    | Širina zuba statora    | 4.17                         | 0.50         | mm              |
| 6.                    | Visina magneta         | 20.00                        | 1.00         | mm              |
| 7.                    | Kut magneta            | 50.00                        | 4.5          | deg             |
| 8.                    | Širina zračnog raspora | 2.00                         | 0.20         | mm              |

## 5.1. Simulacija promjene duljine promjera statora

### Promjena duljine promjera statora fiksiranjem visine zuba statora

Na slici 5.1. nalazi se grafički prikaz oblika krivulje magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni duljine promjera statora za različite vrijednosti uz nepromjenjivu visinu zuba statora. Na slici se primjećuje da se porastom duljine promjera statora dubina ripple-ova i amplituda magnetske indukcije smanjuju, te krivulje više nalikuju sinusoidi u odnosu na početnu geometriju. Najveće povećanje promjera statora („d+4k“), uzrokuje pad amplitude magnetske indukcije za 15% u odnosu na amplitudu magnetske indukcije za slučaj početne geometrije („d“).

Iz tablice 5.2. uočava se da najmanji iznos harmonijske distorzije signala ima valni oblik krivulje „d+3k“, ali i ostali valni oblici imaju manje iznose THD-a u odnosu na iznos valnog oblika početne geometrije, čiji je THD najveći. Najmanji iznos THD-a je 17% manji od najvećeg iznosa THD-a.

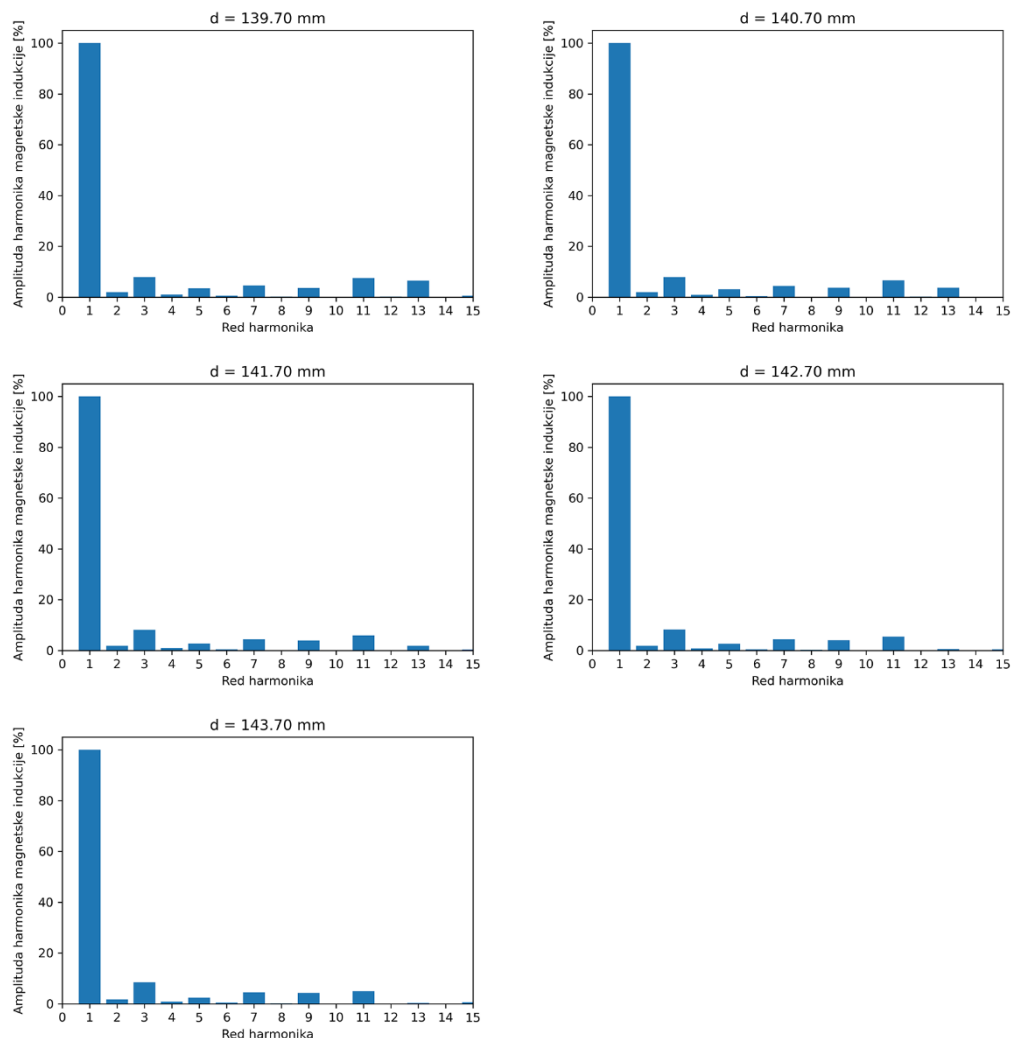


*Slika 5.1. Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni promjera statora*

*Tablica 5.2. Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije*

| Korak | Iznos promjera stroja [mm] | THD [%] |
|-------|----------------------------|---------|
| d     | 139.70                     | 14.76   |
| d+k   | 140.70                     | 13.14   |
| d+2k  | 141.70                     | 12.42   |
| d+3k  | 142.70                     | 12.23   |
| d+4k  | 143.70                     | 12.25   |

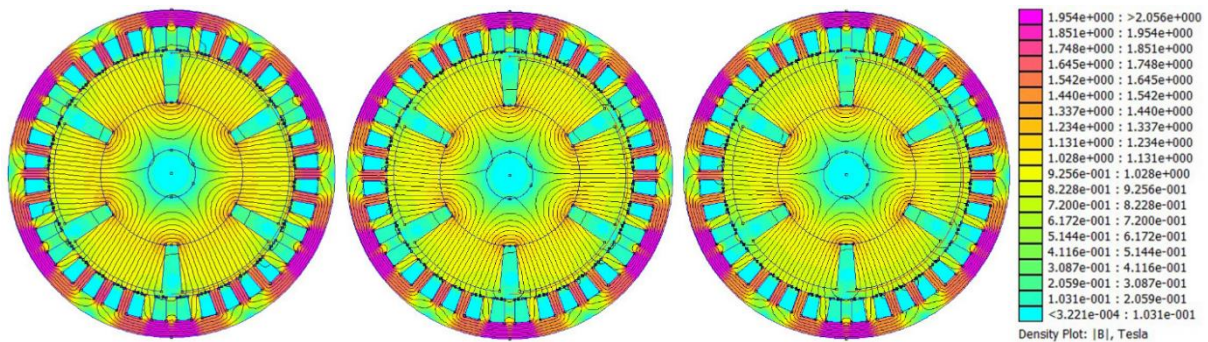
Na slici 5.2. prikazan je spektralni sastav valnog oblika magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora za pojedini parametar, a vrijednosti iznosa amplituda iskazane su u odnosu na osnovni harmonik. Na slici je vidljivo da prema amplitudama za sve korake parametarske simulacije dominiraju neparni harmonici. Porastom promjera statora amplituda 9. harmonika se povećava, amplitude 5., 11. i 13. harmonika se smanjuju, a amplitude 3. i 7. harmonika se ne mijenjaju. Od parnih harmonika najveću vrijednost ima 2. harmonik s amplitudom oko 2%. U harmonijskom sastavu početne geometrije ( $d=139.70$  mm) dominiraju 3. i 11. harmonik s istim amplitudama oko 8%, slijedi ih 13. harmonik s amplitudom oko 6%, a ostali harmonici (5., 7. i 9.) imaju amplitudu manju od 5%. U harmonijskim sastavima svih povećanja promjera dominira 3. harmonik s amplitudom 8%, a ostali harmonici imaju amplitude manje od 5%.



*Slika 5.2. Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni promjera statora*

Na slici 5.3. nalazi se grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije za različite vrijednosti promjera stroja. Promjena promjera statora generatora rezultira promjenom širine

zračnog raspora - porastom promjera, raste širina zračnog raspora. Može se primijetiti da zubi statora koji se nalaze u prostoru između permanentnih magneta nisu protjecani magnetskim tokom, a u zubima koji su protjecani magnetskim tokovima dvaju magneta, magnetska indukcija je većeg iznosa jer se tokovi zbrajaju. Porastom promjera stroja, povećava se duljina puta koji magnetski tok mora prijeći, odnosno raste reluktancija zračnog raspora što rezultira smanjenjem magnetske indukcije u zubima statora.

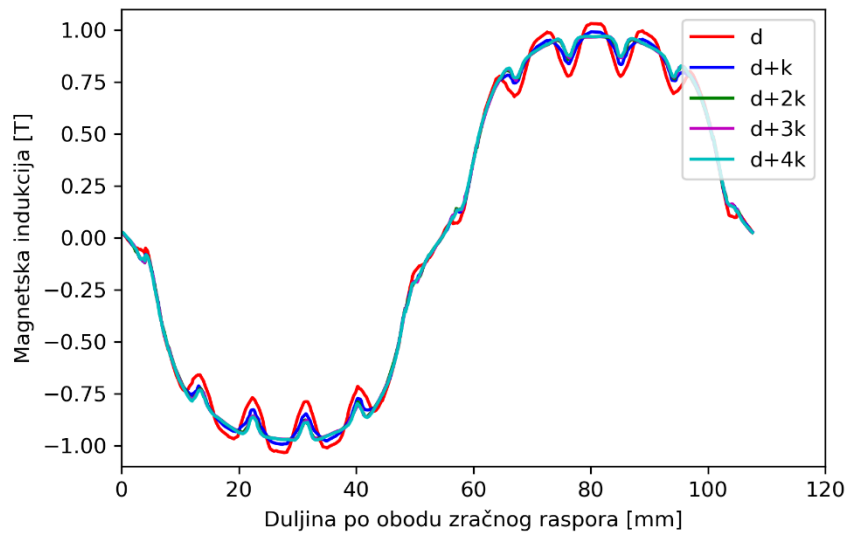


*Slika 5.3. Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti promjera statora: „d“ (lijevo), „d+2k“ (sredina) i „d+4k“ (desno)*

#### Promjena duljine promjera statora fiksiranjem širine zračnog raspora

Na slici 5.4. nalazi se grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni promjera stroja za različite vrijednosti uz nepromijenjenu širinu zračnog raspora. Na slici se najviše uočavaju tri krivulje – „d“, „d+k“ i „d+4k“. Primjećuje se da porastom promjera statora, kao i u prvom slučaju, smanjuje se dubina ripple-ova i amplituda magnetske indukcije. Međutim, amplituda magnetske indukcije u ovom slučaju za najveće povećanje promjera („d+4k“), smanjena je 5% u odnosu na amplitudu valnog oblika magnetske indukcije početne geometrije.

Sukladno tome, povećanje promjera statora rezultira smanjenjem ukupne harmonijske distorzije signala, kao što je prikazano u tablici 5.3. Najveći iznos THD-a ponovo posjeduje valni oblik magnetske indukcije početne geometrije, a najmanji iznos valni oblik krivulja „d+2k“. Najmanji iznos THD-a je 21% manji od najvećeg iznosa THD-a. Međutim najmanji iznos THD-a za slučaj promjene promjera statora fiksiranjem visine zuba statora iznosio je 12.23%, a u ovom slučaju (u kojem se fiksira širina zračnog raspora) iznosi 11.66%. Generalno, za iste iznose povećanja promjera stroja, iznosi THD-a su manji u slučaju fiksiranja širine zračnog raspora.



*Slika 5.4. Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni promjera statora*

*Tablica 5.3. Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije*

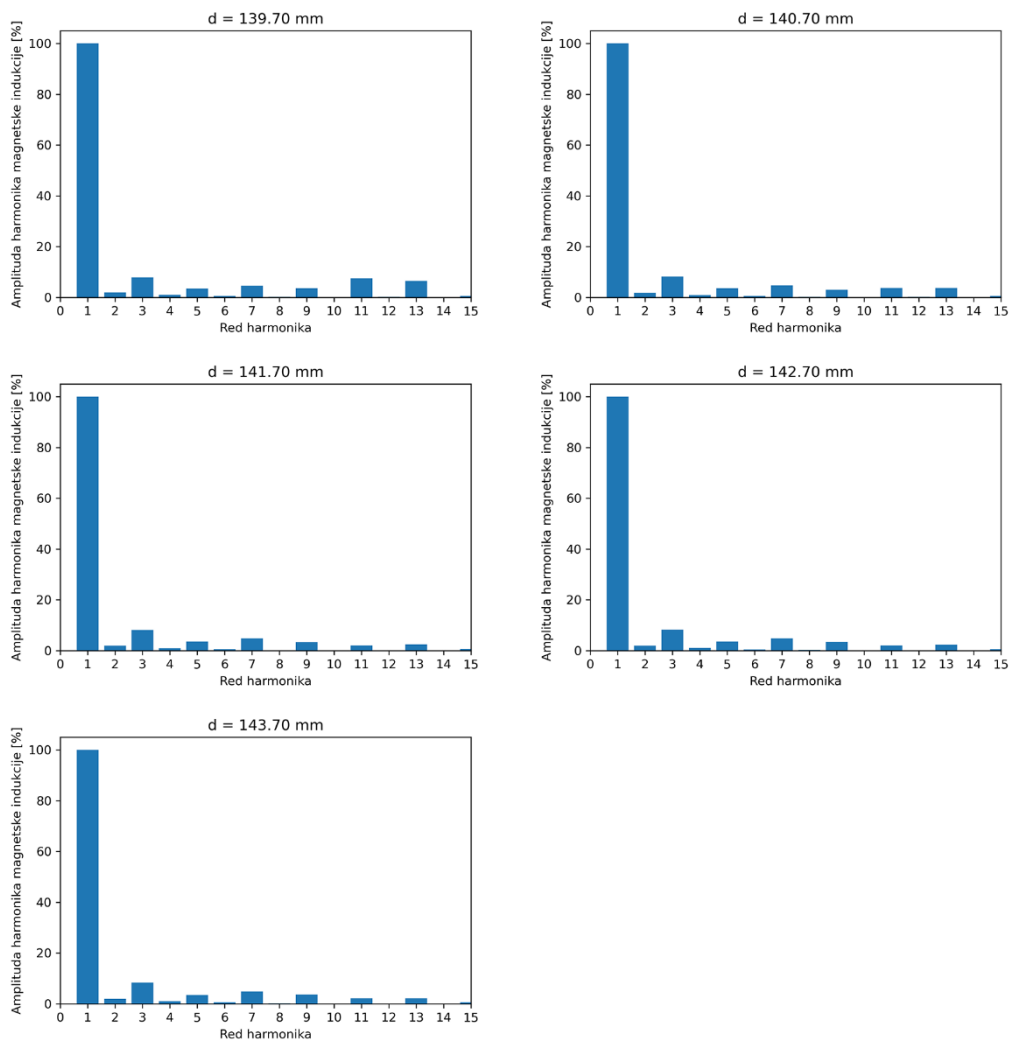
| Korak | Iznos promjera stroja [mm] | THD [%] |
|-------|----------------------------|---------|
| d     | 139.70                     | 14.76   |
| d+k   | 140.70                     | 12.27   |
| d+2k  | 141.70                     | 11.66   |
| d+3k  | 142.70                     | 11.74   |
| d+4k  | 143.70                     | 11.82   |

Na slici 5.5. prikazan je spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni duljine promjera statora. Iz slike je vidljivo da amplitude 3. i 9. harmonika rastu, amplitude 5. i 7. harmonika nisu promijenjene, a amplitude 11. i 13. harmonika opadaju porastom promjera u odnosu na amplitude harmonijskog sastava početne geometrije. Harmonijski sastav valnog oblika početne geometrije detaljno je opisan u prethodnom slučaju i uvijek je isti neovisno o promjeni parametara, stoga u nastavku neće biti opisan. U harmonijskim sastavima valnih oblika povećanja promjera dominira 3. harmonik s amplitudom 8-9%, a amplitude ostalih harmonika manje su od 5%, te se najviše ističe 7. harmonik.

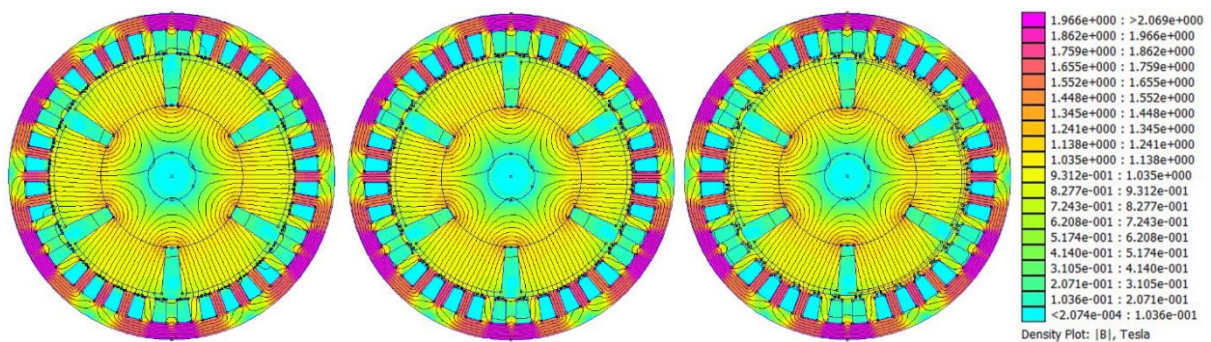
Slika 5.6. prikazuje raspodjelu skalarnog polja magnetske indukcije u sinkronom generatoru s permanentnim magnetima za različite vrijednosti promjera statora. Porastom promjera statora,



povećava se visina zubi statora. Na slici nije vidljiva značajna razlika u raspodjeli skalarnog polja magnetske indukcije, što odgovara malom smanjenju amplitude magnetske indukcije na slici 5.4.



*Slika 5.5. Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni promjera statora*

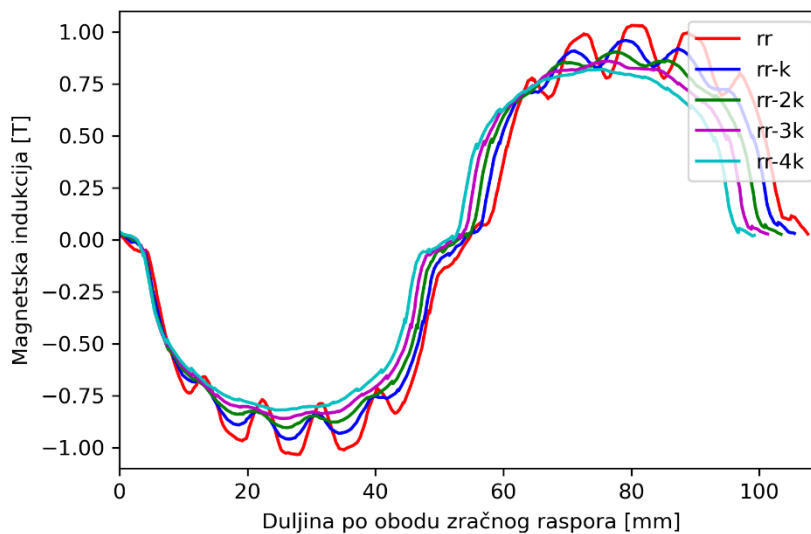


*Slika 5.6. Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti promjera statora: „d“ (lijevo), „d+2k“ (sredina) i „d+4k“ (desno)*

## 5.2. Simulacija promjene duljine polumjera rotora

### Promjena duljine polumjera rotora fiksiranjem visine zuba statora

Slika 5.7. prikazuje valne oblike magnetske indukcije po obodu zračnog raspora za promjenu polumjera rotora. Vidljivo je da promjena polumjera rotora sinkronog generatora s permanentnim magnetima utječe na izgladivanje signala, smanjivanje amplitude magnetske indukcije. Razlog pomaka između krivulja je smanjenje opsega kruga po kojem je linija za prikupljanje podataka o magnetskoj indukciji nacrtana. Amplituda magnetske indukcije za najveće smanjenje polumjera je približno 22% manja u odnosu na amplitudu magnetske indukcije početne geometrije.



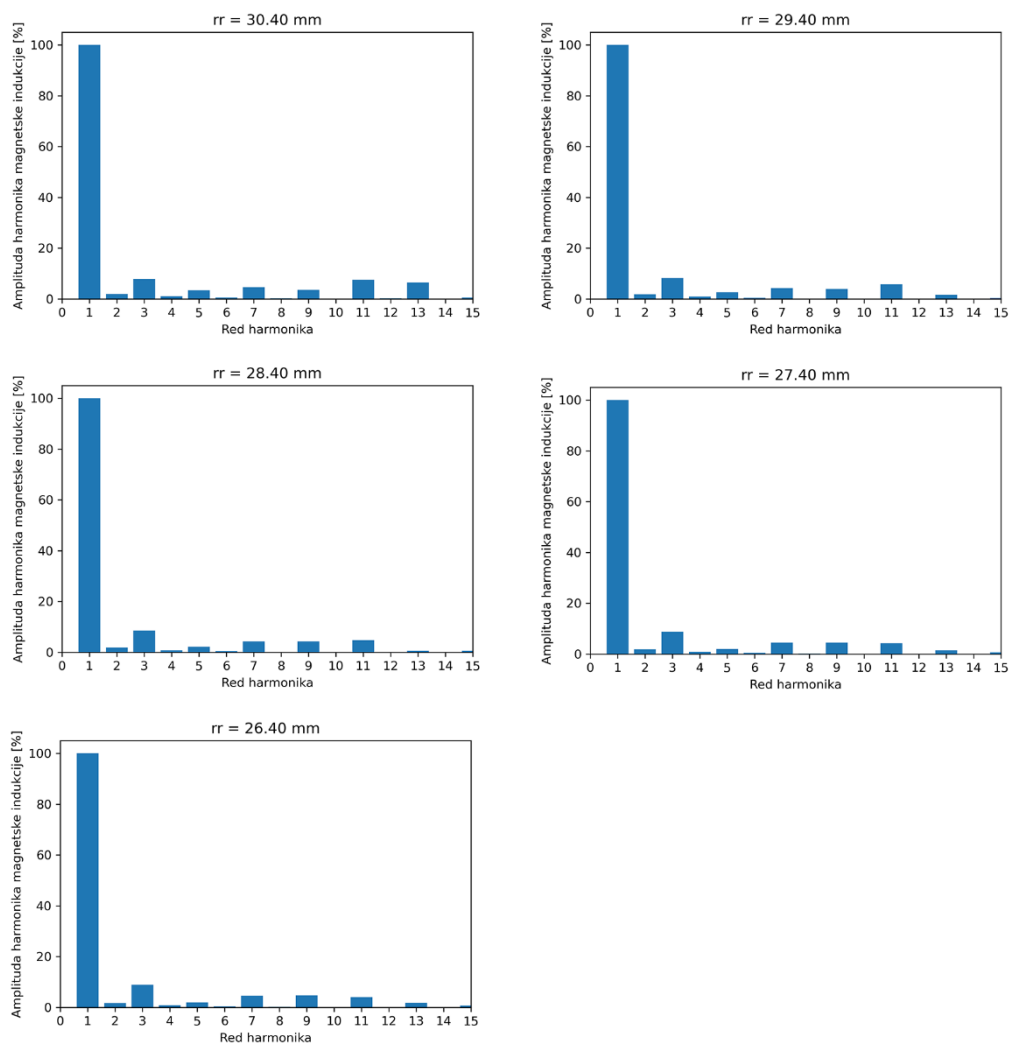
*Slika 5.7. Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni polumjera rotora*

Iz iznosa THD-a, koji su prikazani u tablici 5.4., vidljivo je da harmonijski sastav varira za svaku promjenu polumjera. Najmanji iznos THD-a ima krivulja s promjenom polumjera „rr-2k“, a najveći iznos THD-a je u slučaju početne geometrije, odnosno njihov omjer daje razliku smanjenja iznosa THD-a za 18%.

Na slici 5.8. prikazani su harmonijski sastavi magnetske indukcije pri različitim promjenama dimenzija polumjera rotora. Kao i prethodnoj simulaciji dominiraju neparni harmonici. Smanjenjem polumjera rotora, smanjuju se amplitude 5., 11. i 13. harmonika, amplituda 7. harmonika ostaje nepromijenjena, a amplitude 3., 9. harmonika povećavaju se u odnosu na amplitude spektralnog sastava početne geometrije. U spektralnim sastavima valnih oblika smanjenja polumjera rotora, dominantan je 3. harmonik s amplitudom 8-9% ovisno o iznosu polumjera rotora.

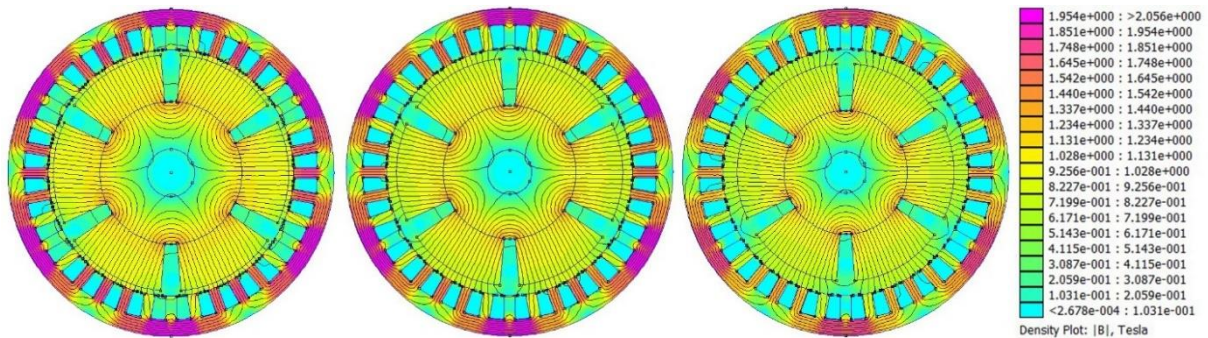
**Tablica 5.4.** Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije

| Korak | Iznos polumjera rotora [mm] | THD [%] |
|-------|-----------------------------|---------|
| rr    | 30.40                       | 14.76   |
| rr-k  | 29.40                       | 13.35   |
| rr-2k | 28.40                       | 12.14   |
| rr-3k | 27.40                       | 12.33   |
| rr-4k | 26.40                       | 12.51   |

**Slika 5.8.** Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni polumjera rotora

Slika 5.9. prikazuje raspodjelu skalarnog polja magnetske indukcije za različite vrijednosti polumjera rotora. Promjena dimenzija radijusa rotora utječe na promjenu dimenzija širine zračnog raspora – ukoliko se polumjer rotora smanjuje, širina zračnog raspora se povećava. Budući da

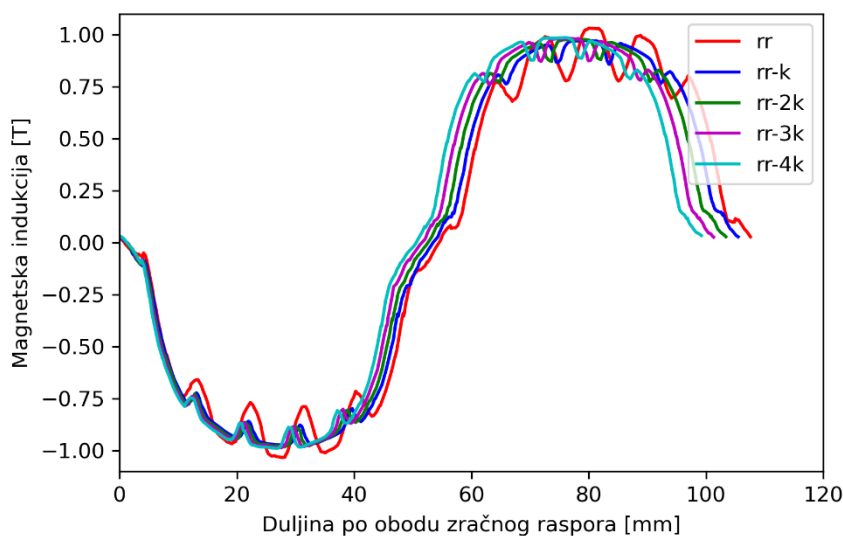
zmanjenje polumjera rotora rezultira povećanjem širine zračnog raspora, povećava se put koji magnetski tok treba proći kako bi zatvorio petlju, što uzrokuje smanjenje magnetske indukcije u statoru sinkronog generatora s permanentnim magnetima.



*Slika 5.9. Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti polumjera rotora: „rr“ (lijevo), „rr-2k“ (sredina) i „rr-4k“ (desno)*

#### Promjena duljine polumjera rotora fiksiranjem širine zračnog raspora

Slika 5.10. prikazuje valni oblik magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora za promjenu polumjera rotora. Smanjenjem polumjera rotora, smanjuju se amplituda magnetske indukcije i dubina ripple-ova, a valni oblici su međusobno pomaknuti zbog smanjenja opsega kruga po kojem je linija za prikupljanje podataka o magnetskoj indukciji nacrtana. Amplituda magnetske indukcije za najveće smanjenje polumjera rotora („rr-4k“) je približno 5% manja u odnosu na amplitudu valnog oblika magnetske indukcije početne geometrije.



*Slika 5.10. Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni polumjera rotora*

Iz iznosa THD-a, koji su prikazani u tablici 5.5., vidljivo je da sve promjene smanjenja polumjera rotora uzrokuje smanjenje THD-a u odnosu na THD početne geometrije. Najmanji iznos THD-a ima krivulja s promjenom polumjera „rr-k“, a najveći iznos THD-a je u slučaju početne geometrije. Najmanji iznos THD-a je 20% manji od najvećeg iznosa THD-a. U slučaju fiksiranja širine zračnog raspora, za iste promjene smanjenja polumjera rotora, iznosi THD-a su manji u odnosu na slučaj fiksiranja visine zuba statora.

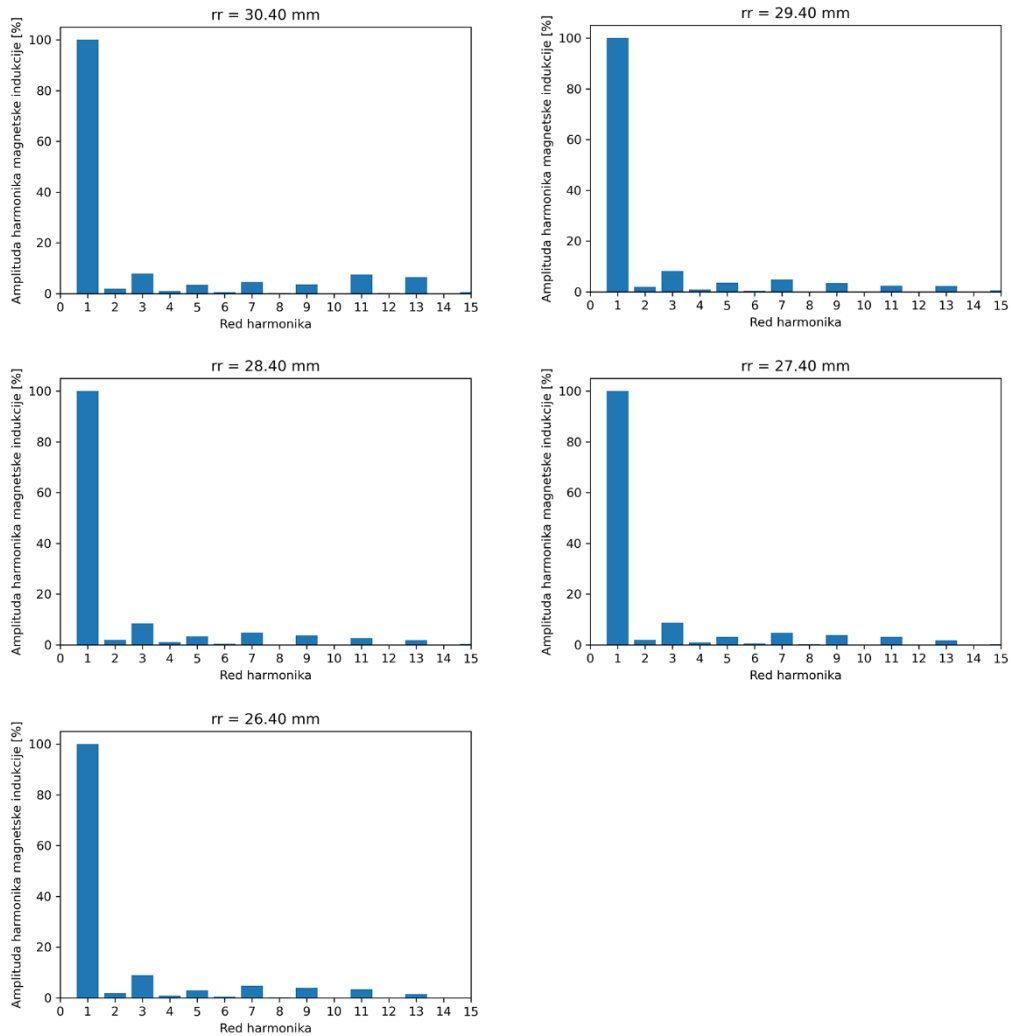
*Tablica 5.5. Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije*

| Korak | Iznos polumjera rotora [mm] | THD [%] |
|-------|-----------------------------|---------|
| rr    | 30.40                       | 14.76   |
| rr-k  | 29.40                       | 11.74   |
| rr-2k | 28.40                       | 11.87   |
| rr-3k | 27.40                       | 12.13   |
| rr-4k | 26.40                       | 12.77   |

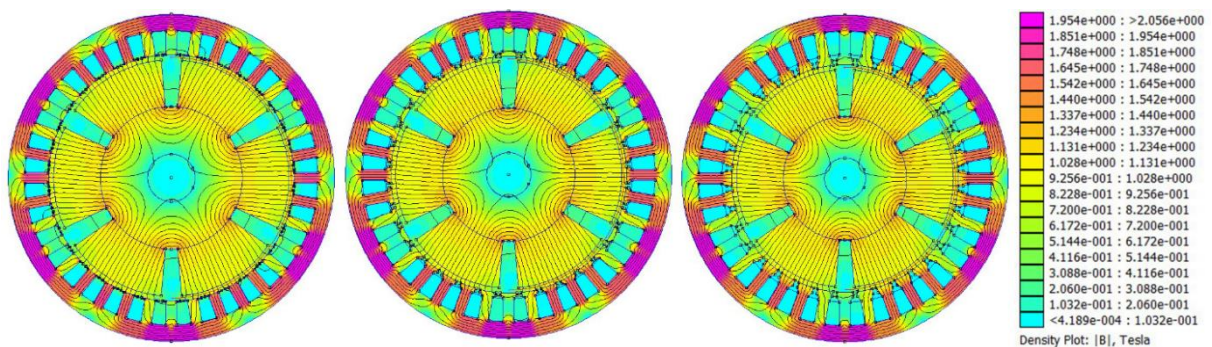
Na slici 5.11. prikazani su spektralni sastavi magnetske indukcije pri različitim promjenama dimenzija polumjera rotora. Smanjenjem polumjera rotora smanjuju se amplitude 5., 11. i 13. harmonika, dok se amplitude 3., 7. i 9. povećavaju u odnosu na amplitude harmonijskog sastava početne geometrije. U spektralnim sastavima valnih oblika smanjenja polumjera rotora dominira 3. harmonik s amplitudama približno 8.5-10%, a od ostalih harmonika po amplitudi najviše se ističe 7. harmonik.

Slika 5.12. prikazuje raspodjelu skalarnog polja magnetske indukcije u sinkronom generatoru s permanentnim magnetima za različite vrijednosti polumjera rotora. Promjena polumjera rotora uzrokuje promjenu visine zuba statora – smanjenjem polumjera rotora, visina zuba statora raste. Povećanje visine zuba statora uzrokuje povećanje puta koji magnetski tok treba proći kako bi zatvorio petlju, što uzrokuje smanjenje magnetske indukcije u zubima statora.





Slika 5.11. Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni polumjera rotora



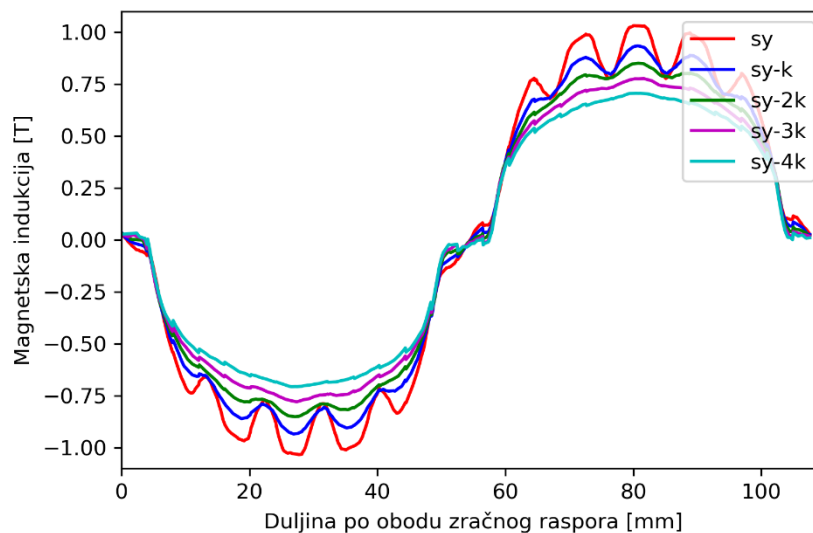
Slika 5.12. Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti polumjera rotora: „ $rr$ “ (lijevo), „ $rr-2k$ “ (sredina) i „ $rr-4k$ “ (desno)

### 5.3. Simulacija promjene širine jarma stroja

#### Promjena širine jarma stroja fiksiranjem visine zuba statora

Slika 5.13. prikazuje magnetsku indukciju po obodu zračnog raspora pri promjeni širine jarma sinkronog generatora s permanentnim magnetima uz fiksiranu visinu zuba statora. Sa slike vidljivo je smanjenje dubine ripple-ova i amplitude magnetske indukcije povećanjem smanjenja jarma statora u odnosu na početnu geometriju. Amplituda magnetske indukcije signala „sy-4k“ je približno 35% manja od amplitude signala „sy“.

Najveće izobličenje signala uočava se kod krivulje početne geometrije „sy“, što odgovara najvećem iznosu THD-a prikazanom u tablici 5.6. Najmanji iznos harmonijske distorzije signala posjeduje krivulja „sy-2k“, te je približno 25% manji u odnosu na iznos THD-a početne geometrije.

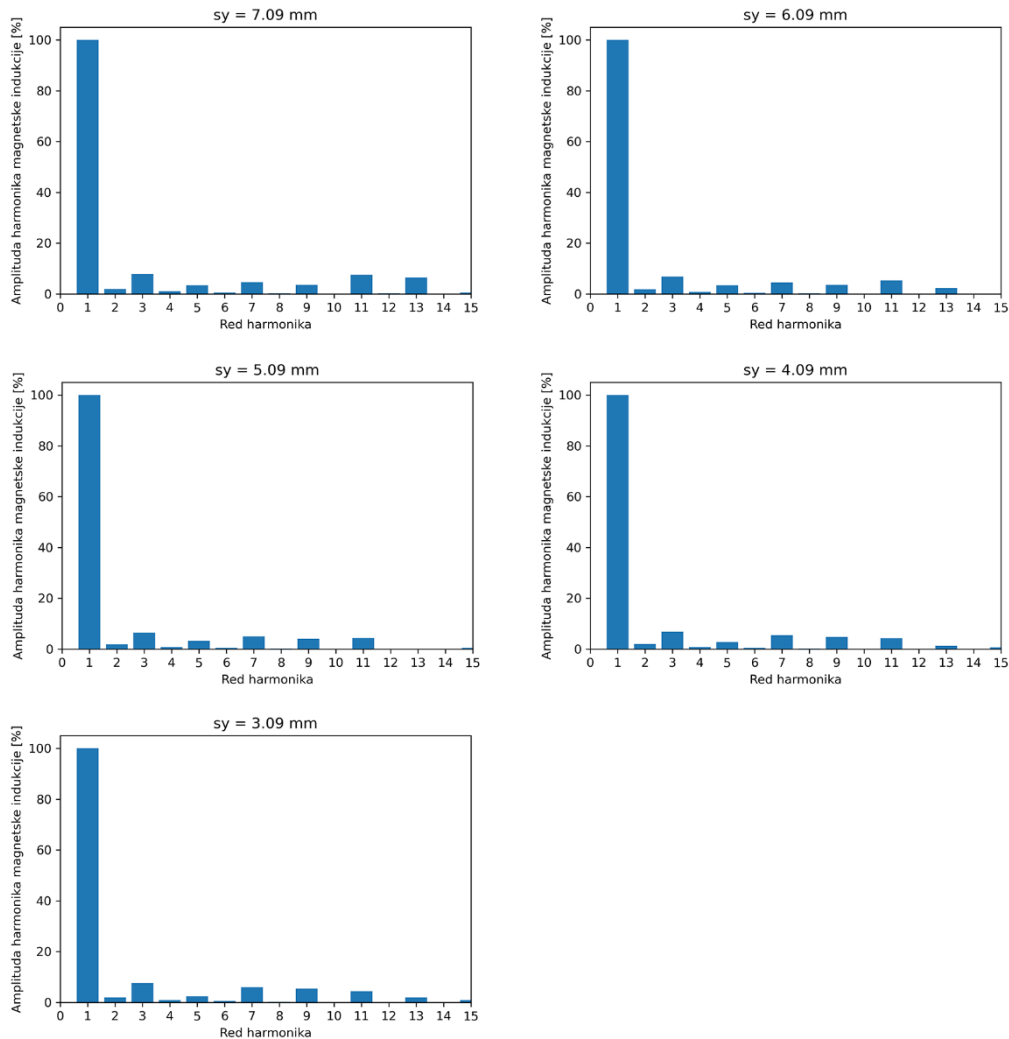


*Slika 5.13. Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni širine jarma statora*

*Tablica 5.6. Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije*

| Korak | Iznos širine jarma statora [mm] | THD [%] |
|-------|---------------------------------|---------|
| sy    | 7.09                            | 14.76   |
| sy-k  | 6.09                            | 11.61   |
| sy-2k | 5.09                            | 11.14   |
| sy-3k | 4.09                            | 11.78   |
| sy-4k | 3.09                            | 12.98   |

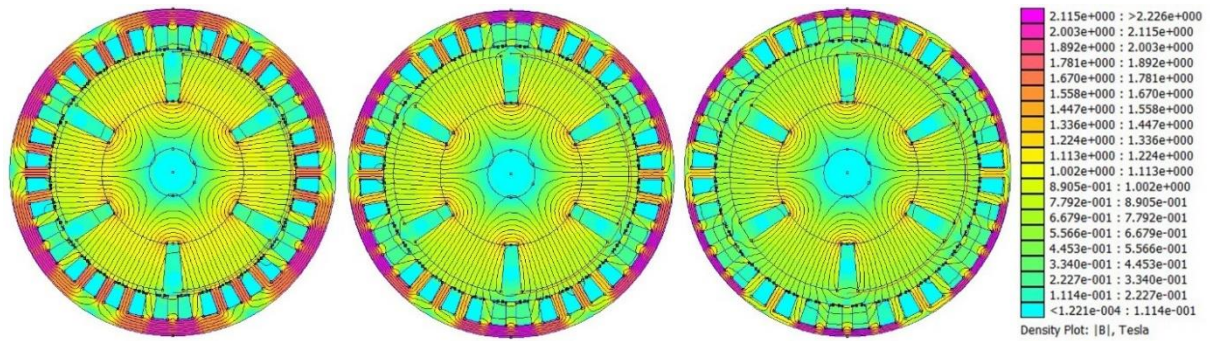
Slika 5.14. prikazuje harmonijski sastav valnih oblika magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora za svaku promjenu širine jarma statora. Smanjenje širine jarma statora uzrokuje smanjenje amplituda 5., 11. i 13. harmonika, a amplitude 3., 7. i 9. harmonika rastu u odnosu na amplitude spektralnog sastava početne geometrije. U spektralnim sastavima smanjenja širine jarma dominira 3. harmonik s amplitudama 6.5-7.5%.



**Slika 5.14.** Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni širine jarma statora

Na slici 5.15. prikazana je distribucija skalarnog polja magnetske indukcije u sinkronom generatoru s permanentnim magnetima za različite vrijednosti širine jarma. Promjena širine jarma uzrokuje promjenu zračnog raspora – smanjenjem širine jarma, povećava se širina zračnog raspora, što rezultira opadanjem magnetske indukcije. Međutim, smanjenjem širine jarma, smanjuje se površina jarma, što rezultira povećanjem magnetske indukcije u samom jarmu, budući da magnetska indukcija ovisi o toku i površini kroz koju tok prolazi.

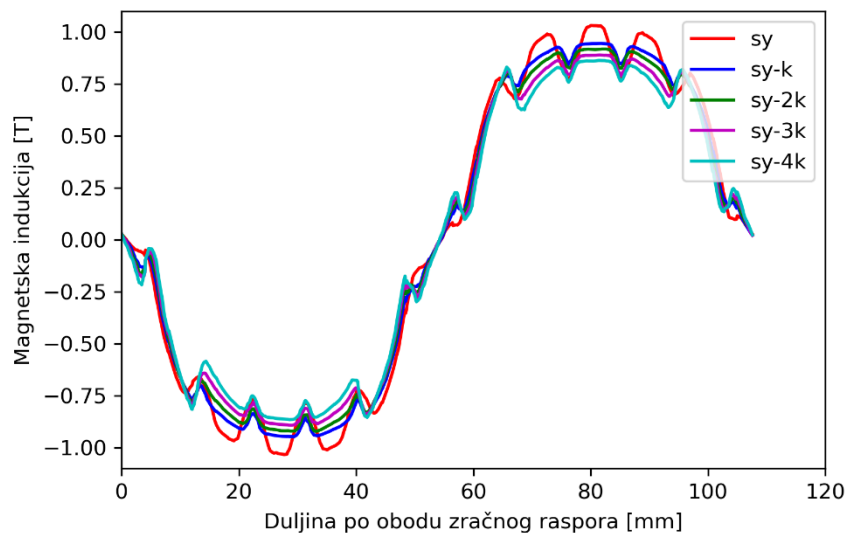




**Slika 5.15.** Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti širine jarma statora: „sy“ (lijevo), „sy-2k“ (sredina) i „sy-4k“ (desno)

#### Promjena širine jarma stroja fiksiranjem širine zračnog raspora

Na slici 5.16. prikazani su valni oblici magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora za različite vrijednosti širine jarma uz nepromjenjiv iznos širine zračnog raspora. Smanjenje širine jarma statora rezultira smanjenjem amplitude magnetske indukcije i dubine ripple-ova u odnosu na valni oblik početne geometrije. Za najveće smanjenje širine jarma („sy-4k“), amplituda magnetske indukcije je približno 20% manja u odnosu na amplitudu početne geometrije.



**Slika 5.16.** Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni širine jarma statora

U tablici 5.7. prikazani su iznosi THD-a za svaku promjenu širine jarma statora. Vidljivo je da najmanji iznos ima valni oblik „sy-k“, a najveći iznos valni oblik „sy-4k“ koji je veći od iznosa

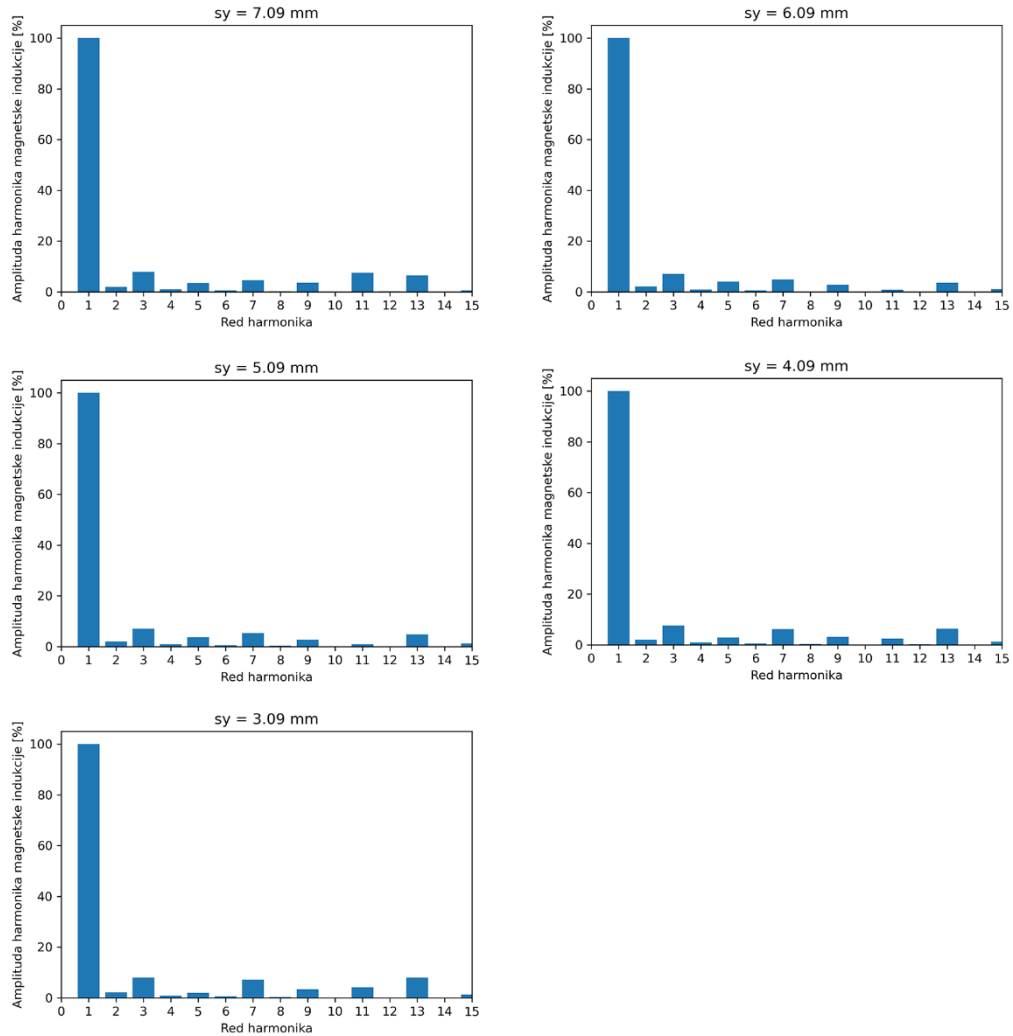
THD-a početne geometrije. Najmanji iznos THD-a je 24% manji u odnosu na iznos THD-a početne geometrije. Za iste iznose smanjenja širine jarma statora, iznosi THD-a veći su kada je fiksirana širina zračnog rasporu, nego u slučaju kada je fiksirana visina zuba statora.

**Tablica 5.7.** Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije

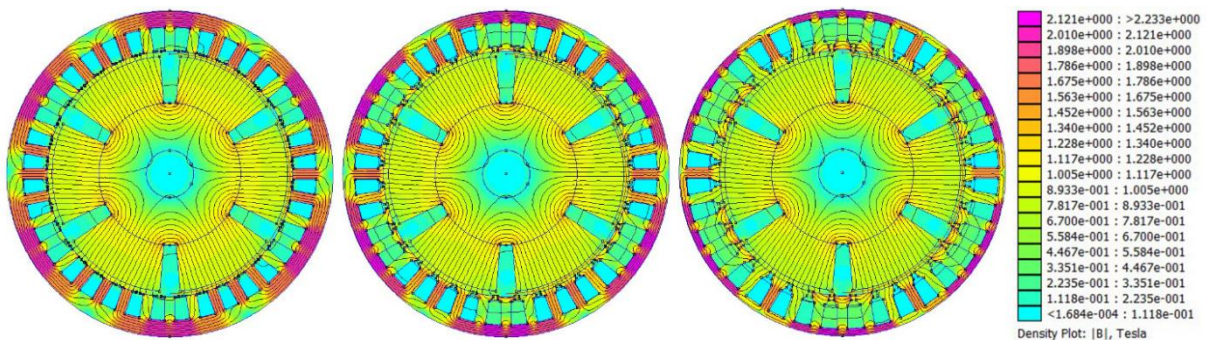
| Korak | Iznos širine jarma statora [mm] | THD [%] |
|-------|---------------------------------|---------|
| sy    | 7.09                            | 14.76   |
| sy-k  | 6.09                            | 11.16   |
| sy-2k | 5.09                            | 11.86   |
| sy-3k | 4.09                            | 13.51   |
| sy-4k | 3.09                            | 15.51   |

Slika 5.17. prikazuje spektralni sastav valnih oblika magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora za pojedine promjene širine jarma statora. Za valne oblike „sy-k“, „sy-2k“ i „sy-3k“, smanjenjem širine jarma statora, amplituda 3. harmonike se ne mijenja, amplitude 5. i 7. harmonika su veće, a amplitude 9., 11. i 13. harmonika su manje u odnosu na harmonijski sastav valnog oblika „sy“, te dominira 3. harmonik. U spektralnom sastavu valnog oblika „sy-4k“ dominiraju 3. i 13. harmonik, amplituda 7. harmonika je veća, a amplitude 5., 9. i 11. harmonika su manje u odnosu na amplitude harmonijskog sastava početne geometrije.

Slika 5.18. prikazuje raspodjelu skalarnog polja magnetske indukcije u sinkronom generatoru s permanentnim magnetima za različite vrijednosti širine jarma statora. Smanjenjem širine jarma, povećava se visina zuba statora. Na slici je vidljivo smanjenje iznosa magnetske indukcije u zubima statora porastom smanjenja širine jarma.



Slika 5.17. Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni širine jarma statora

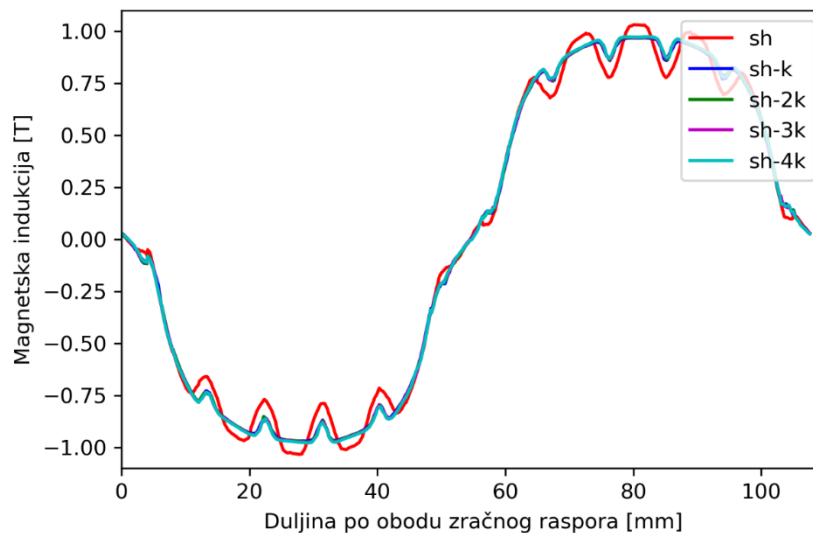


Slika 5.18. Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti širine jarma statora: „sy“ (lijevo), „sy-2k“ (sredina) i „sy-4k“ (desno)

### 5.4. Simulacija promjene visine utora statora

Slika 5.19. prikazuje raspodjelu magnetske indukcije duž oboda zračnog raspورا pri smanjenju visine utora statora, na kojoj se značajnije ističu dvije krivulje „sh“ i „sh-4k“. Smanjenje visine utora rezultira smanjenjem amplitude valnih oblika za približno 7% u odnosu na amplitudu valnog oblika početne geometrije, te izgladivanjem ripple-ova.

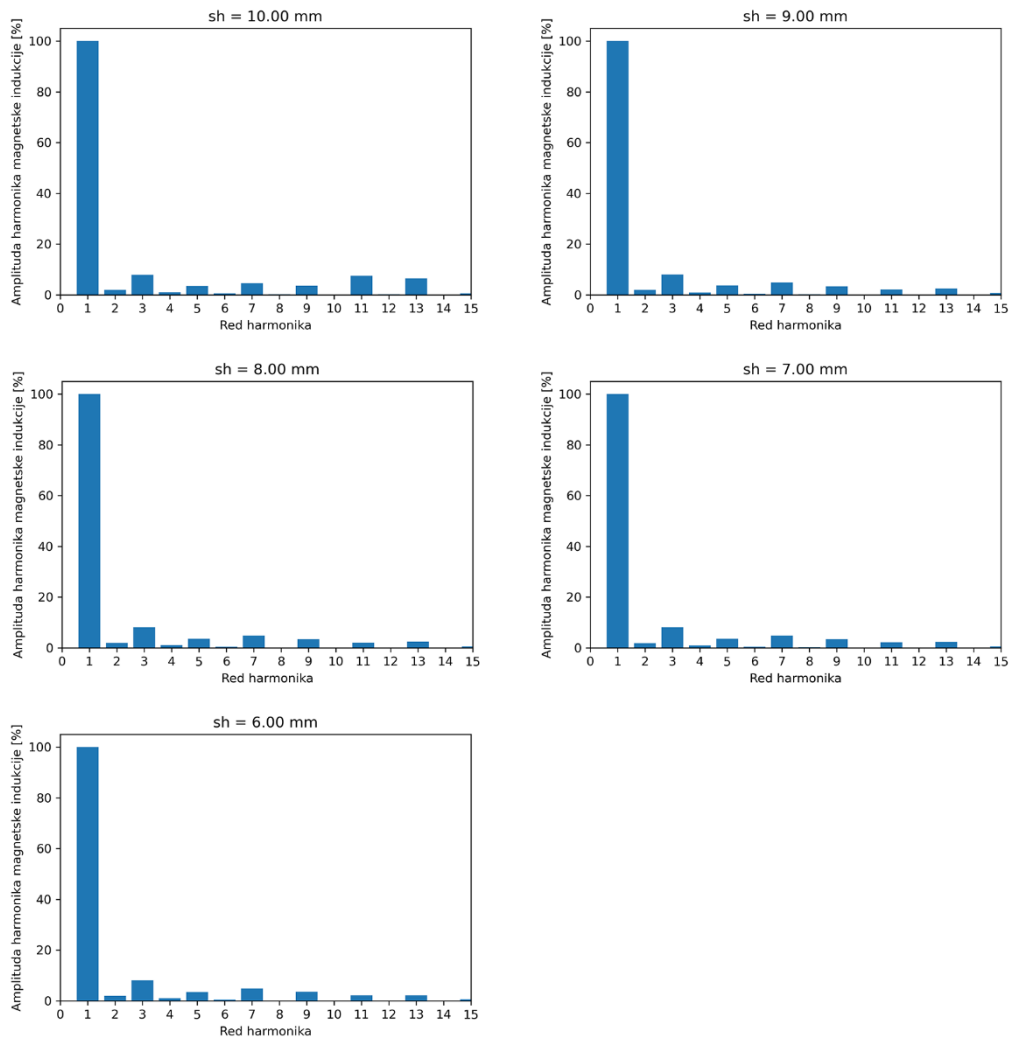
Vidljivo je da su sve krivulje, osim krivulje početne geometrije, „sadržane“ u krivulji „sh-4k“, iz čega se zaključuje da daljnje povećanje smanjenja visine utora ne rezultira boljim harmonijskim sastavom u odnosu na prvo smanjenje, što je vidljivo i u tablici 5.8. Valni oblici „sh-k“, „sh-2k“, „sh-3k“ i „sh-4k“ imaju gotovo jednake iznose harmonijskog izobličenja signala, pritom valni oblik „sh-k“ ima najmanji iznos THD-a, dok valni oblik početne geometrije ima najveći iznos. THD valnog oblika „sh-k“ je 21% manji od THD-a valnog oblika početne geometrije.



*Slika 5.19. Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspورا pri promjeni visine utora statora*

*Tablica 5.8. Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije*

| Korak | Iznos visine utora statora [mm] | THD [%] |
|-------|---------------------------------|---------|
| sh    | 10.00                           | 14.76   |
| sh-k  | 9.00                            | 11.62   |
| sh-2k | 8.00                            | 11.65   |
| sh-3k | 7.00                            | 11.67   |
| sh-4k | 6.00                            | 11.70   |

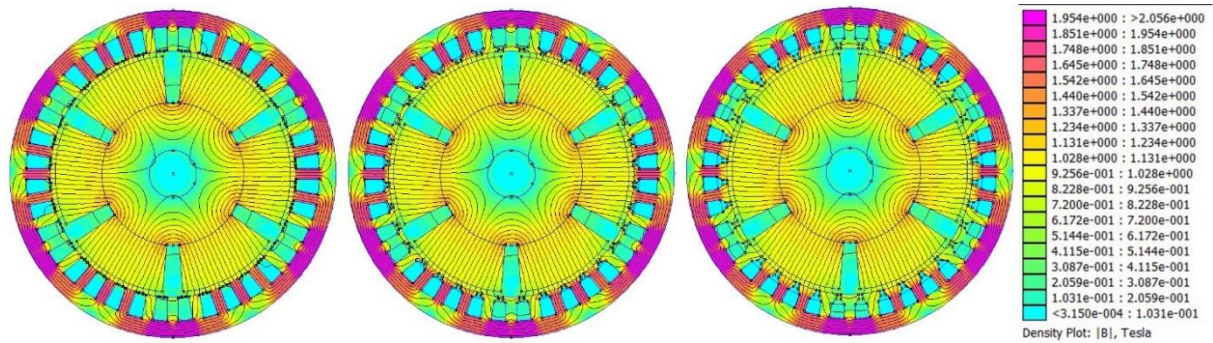


*Slika 5.20. Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni visine utora statora*

Iz harmonijskog sastava sa slike 5.20., kao i u dosadašnjim rezultatima ove simulacije, ističu se početna geometrija i sve ostale koje su gotovo identične. U slučaju spektralnog sastava početne geometrije dominiraju 3., 11., s iznosom amplitude oko 8%. U ostalim harmonijskim sastavima, dominira 3. harmonik s amplitudom oko 9%, te 5., 7. i 9. harmonici s amplitudama manjim od 5%. U odnosu na amplitude spektralnog sastava početne geometrije, smanjenjem visine utora, smanjuju se amplitude 11. i 13. harmonika, amplitude 3., 5. i 7. harmonika se povećavaju, a amplituda 9. harmonika ostaje nepromijenjena.

Na slici 5.21. prikazana je distribucija skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za početnu geometriju i za dva slučaja smanjenja visine utora statora. Smanjenjem visine utora, smanjuje se visina zuba statora, što rezultira većim iznosima magnetske indukcije u zubima statora.





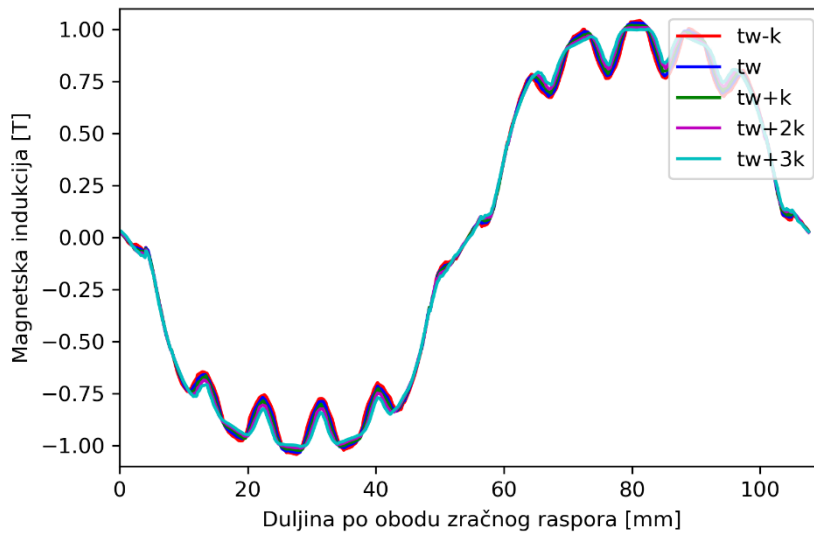
**Slika 5.21.** Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti visine utora statora: „sh“ (lijevo), „sh-2k“ (sredina) i „sh-4k“ (desno)

### 5.5. Simulacija promjene širine zuba statora

Slika 5.22. prikazuje valni oblik magnetske indukcije po obodu zračnog rasporeda sinkronog generatora s permanentnim magnetima pri promjeni širine zuba statora. Povećanje širine zuba statora, uzrokuje smanjenje širine utora, a rezultira smanjenjem dubine ripple-ova i amplitude magnetske indukcije. Amplituda najvećeg povećanja širine zuba statora manja je za 5% u odnosu na amplitudu valnog oblika početne geometrije.

Utjecaj je vidljiv i na iznosima ukupne harmonijske distorzije pojedinih signala koji se nalaze u tablici 5.9., odnosno povećanjem širine zuba statora, THD se smanjuje. Najmanji iznos THD ima valni oblik „tw+3k“ koji je 17% manji od THD-a početne geometrije, a najveći iznos posjeduje valni oblik smanjenja širine zuba statora „tw-k“.

Na slici 5.23. nalazi se spektralni sastav valnih oblika magnetske indukcije duž oboda zračnog rasporeda za različite vrijednosti širine zuba statora. Porastom širine zuba statora, iz harmonijskog sastava pojedinih signala, zaključuje se da se amplitude 3., 9., 11. i 13. harmonika smanjuju, a amplitude 5. i 7. harmonika se povećavaju u odnosu na amplitude harmonijskog sastava početne geometrije. U spektralnim sastavima, koji predstavljaju povećanje širine zuba, uočava se dominacija 3.harmonika. U slučaju smanjenja širine zuba i slučaju početne geometrije dominantni su 3. i 11. harmonici.

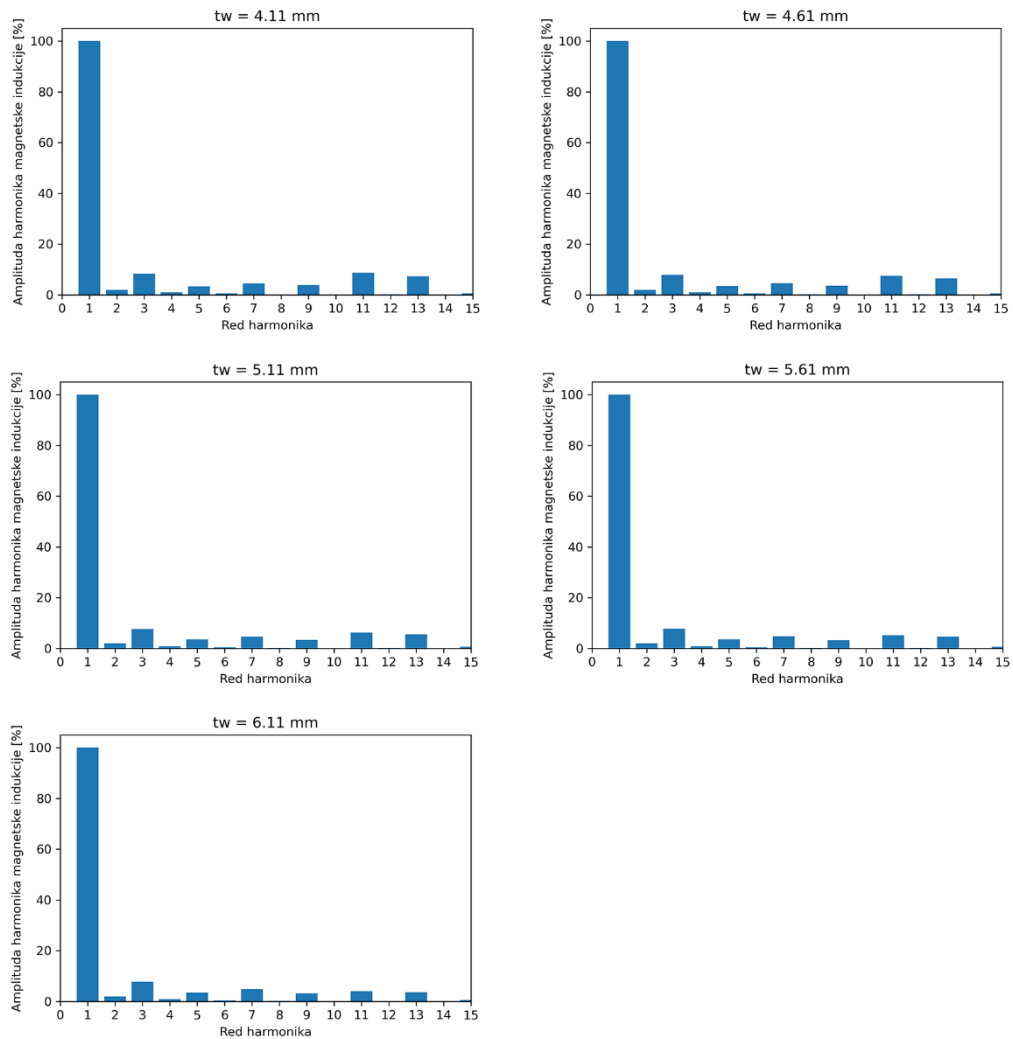


*Slika 5.22. Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni širine zuba statora*

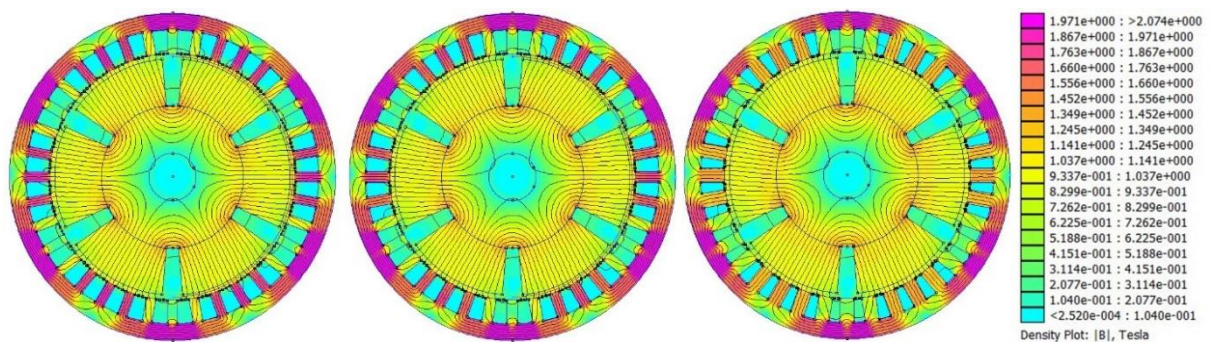
*Tablica 5.9. Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije*

| Korak | Iznos širine zuba statora [mm] | THD [%] |
|-------|--------------------------------|---------|
| tw-k  | 4.11                           | 15.93   |
| tw    | 4.61                           | 14.76   |
| tw+k  | 5.11                           | 13.73   |
| tw+2k | 5.61                           | 12.94   |
| tw+3k | 6.11                           | 12.24   |

Slika 5.24. prikazuje distribuciju skalarnog polja magnetske indukcije u sinkronom generatoru s permanentnim magnetima za različite širine zuba statora. Magnetska indukcija predstavlja omjer magnetskog toka i površine kroz koji tok prolazi. Povećanje širine zuba statora uzrokuje povećanje površine zuba, što rezultira smanjenjem magnetske indukcije u odnosu na početnu geometriju. Analogno tome, smanjenje širine zuba statora uzrokuje povećanje magnetske indukcije, budući da isti iznos toka prolazi kroz veću površinu.



Slika 5.23. Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni širine zuba statora



Slika 5.24. Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti širine zuba statora: „tw-k“ (lijevo), „tw“ (sredina) i „tw+3k“ (desno)

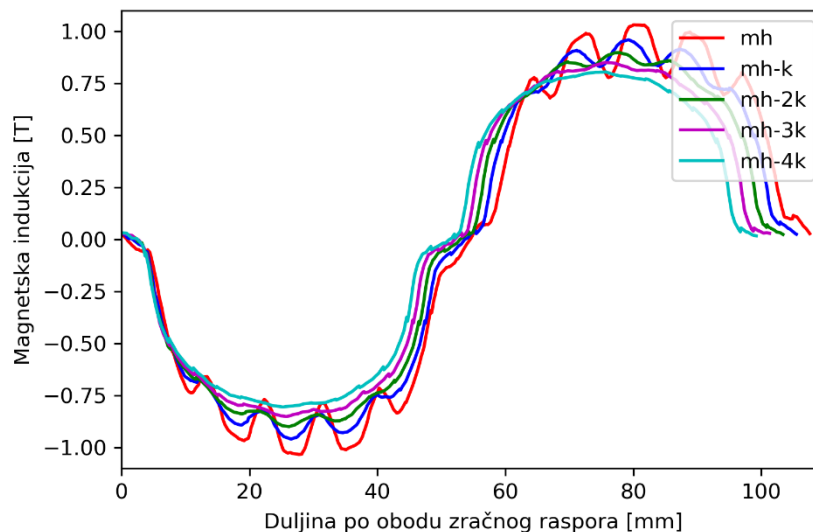


## 5.6. Simulacija promjene visine magneta rotora

### Promjena visine magneta rotora fiksiranjem visine zuba statora

Na slici 5.25. prikazan je valni oblik magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora pri smanjenju visine permanentnih magneta uz fiksiran iznos visine zuba statora. Utjecaj smanjenja visine magneta rotora vidljiv je na smanjenju amplitude magnetske indukcije i na smanjenju dubine ripple-ova. Amplituda valnog oblika „mh-4k“ je približno 25% manja od amplitude valnog oblika „mh“. Razlog pomaka između krivulja je smanjenje opsega kruga po kojem je linija za prikupljanje podataka o magnetskoj indukciji nacrtana.

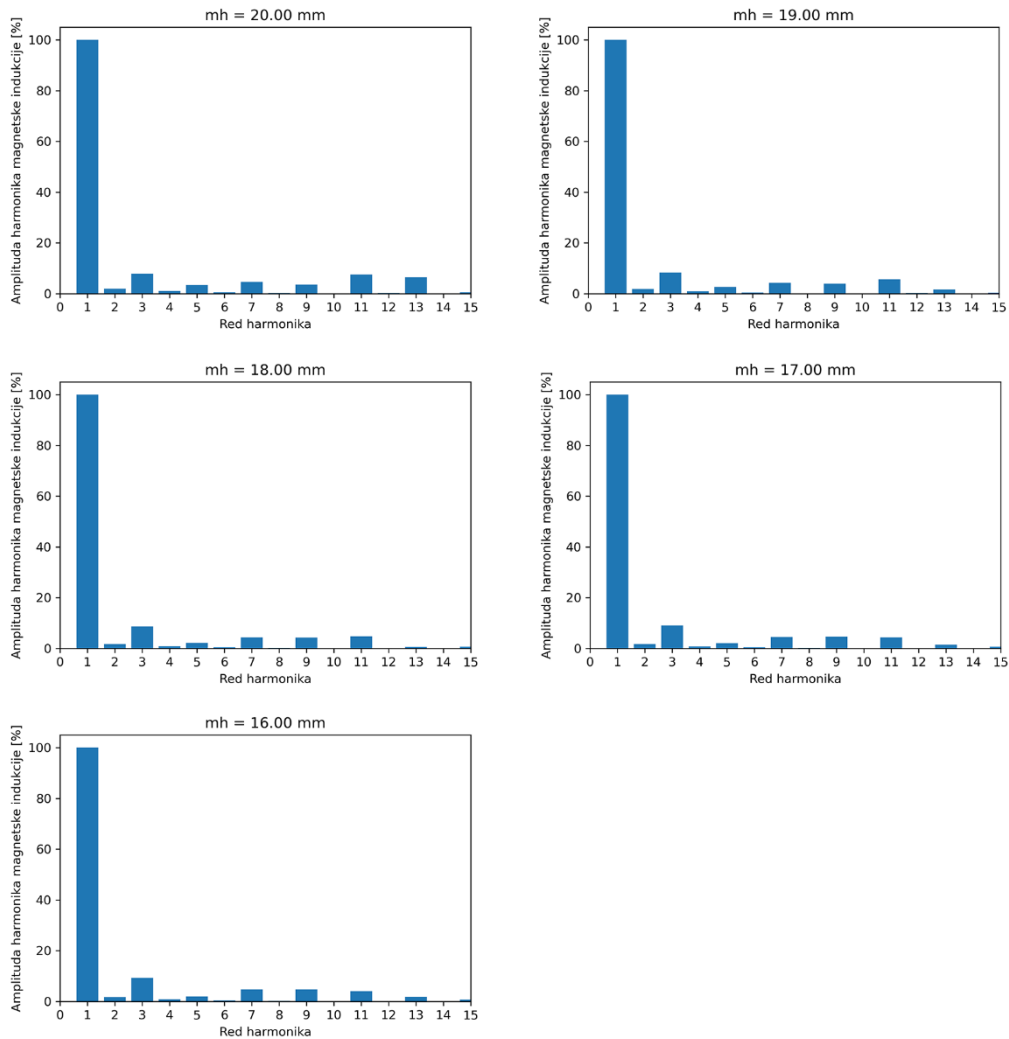
Prema tablici 5.10. najmanju harmonijsku distorziju signala ima valni oblik „mh-2k“, koja je približno 17% smanjena u odnosu na harmonijsku distorziju valnog oblika početne geometrije. Vrijednosti THD-a ostalih signala smanjene su u odnosu na THD početne geometrije.



*Slika 5.25. Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni visine permanentnih magneta*

*Tablica 5.10. Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije*

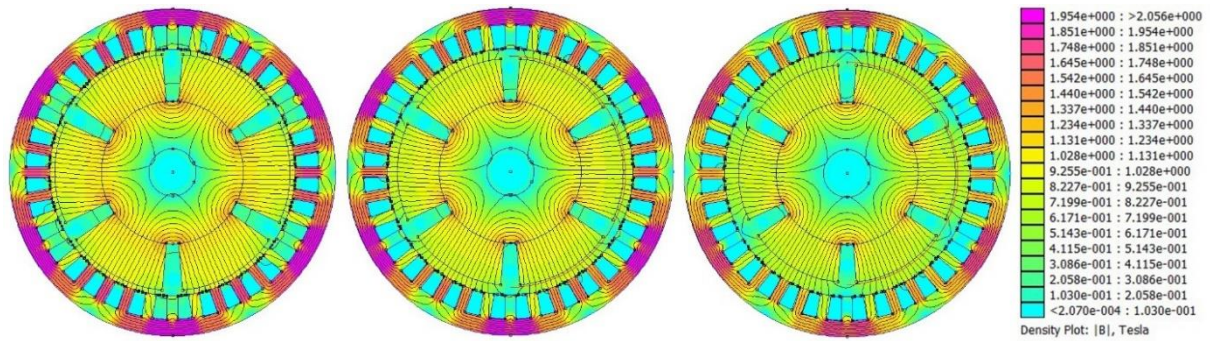
| Korak | Iznos visine magneta [mm] | THD [%] |
|-------|---------------------------|---------|
| mh    | 20.00                     | 14.76   |
| mh-k  | 19.00                     | 13.36   |
| mh-2k | 18.00                     | 12.25   |
| mh-3k | 17.00                     | 12.59   |
| mh-4k | 16.00                     | 12.80   |



**Slika 5.26.** Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni visine magneta

Slika 5.26. prikazuje harmonijske sastave valnih oblika magnetske indukcije za promjenu visine permanentnih magneta rotora. Smanjenje visine magneta rezultira smanjenjem amplituda 5., 11. i 13. harmonika, te povećavanjem amplituda 3., 7. i 9. harmonika. U harmonijskim sastavima valnih oblika sa smanjenom visinom magneta dominira 3. harmonik.

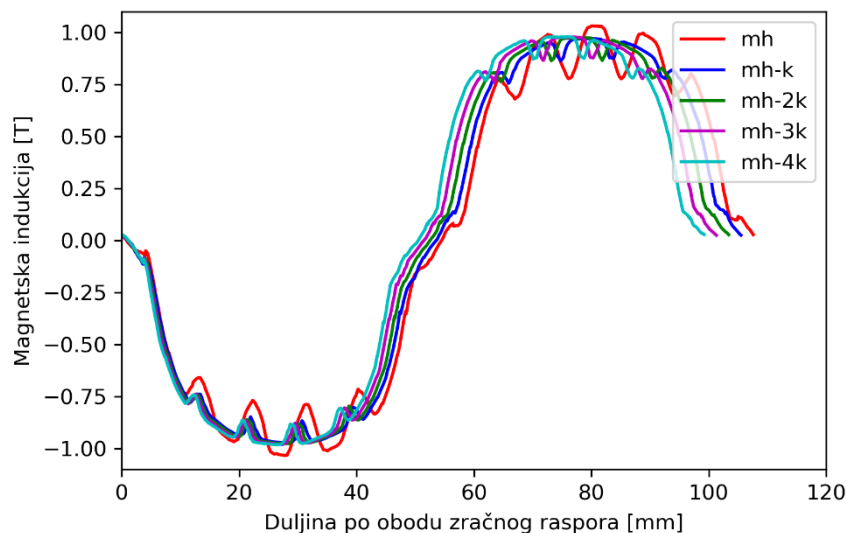
Na slici 5.27. dan je grafički prikaz raspodjele skalarnog polja magnetske indukcije za različite visine magneta, te je vidljivo da smanjenjem visine magneta, iznosi magnetske indukcije u zubima i jarmu statora opadaju, budući da se povećava širina zračnog raspora.



**Slika 5.27.** Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti visine magneta: „mh“ (lijevo), „mh-2k“ (sredina) i „mh-4k“ (desno)

#### Promjena visine magneta rotora fiksiranjem širine zračnog raspora

Na slici 5.28. prikazan je valni oblik magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora pri smanjenju visine permanentnih magneta uz fiksiran iznos širine zračnog raspora. Smanjenje visine magneta rotora uzrokuje smanjenje amplitude magnetske indukcije i dubine ripple-ova u odnosu na početnu geometriju. Amplituda valnog oblika „mh-4k“ je približno 5% manja od amplitude valnog oblika „mh“.



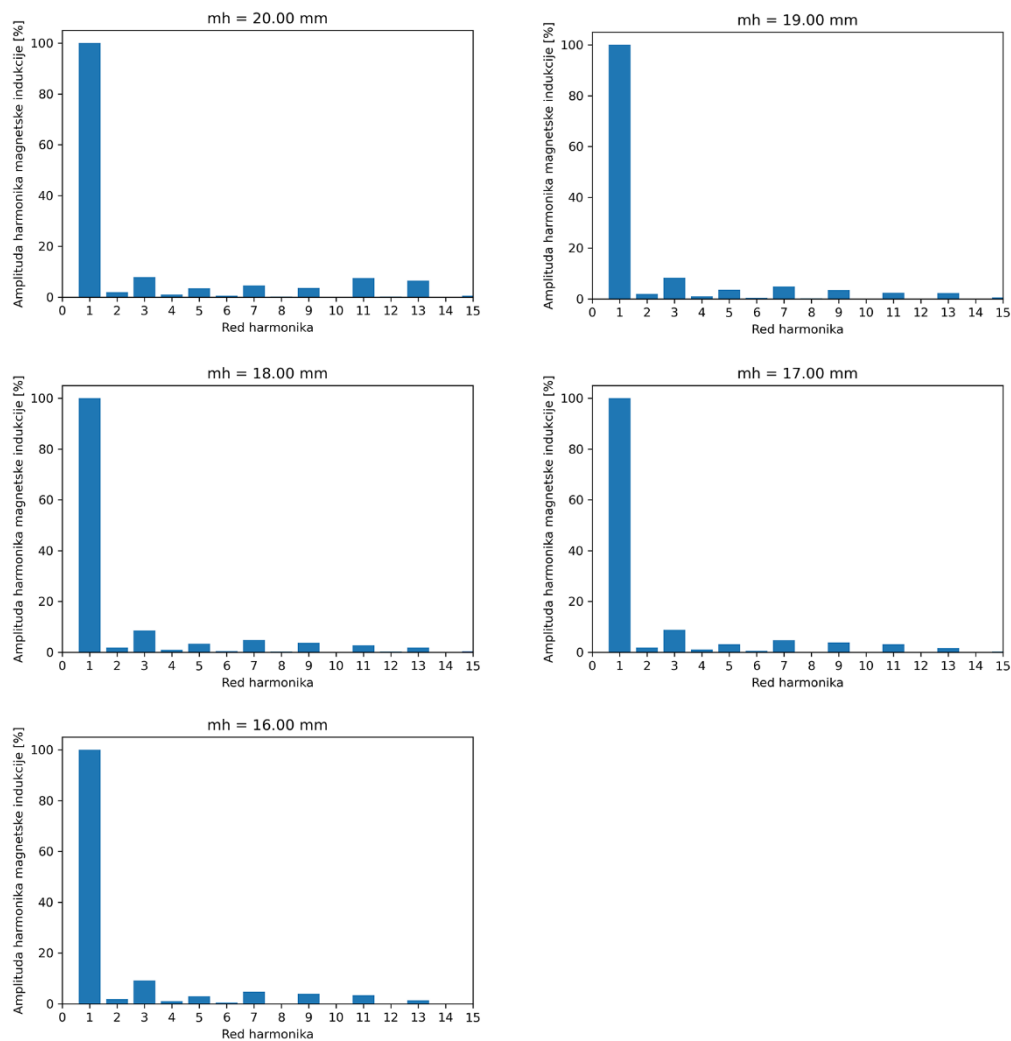
**Slika 5.28.** Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni visine permanentnih magneta

Prema tablici 5.11. najmanji iznos harmonijske distorzije signala ima valni oblik „mh-k“ koji je približno 20% manji od najvećeg iznosa harmonijske distorzije signala za valni oblik početne

geometrije. Iznosi harmonijskog izobličenja signala manji su u slučaju fiksiranja zračnog raspora, nego u slučaju fiksiranja visine zuba statora.

**Tablica 5.11.** Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije

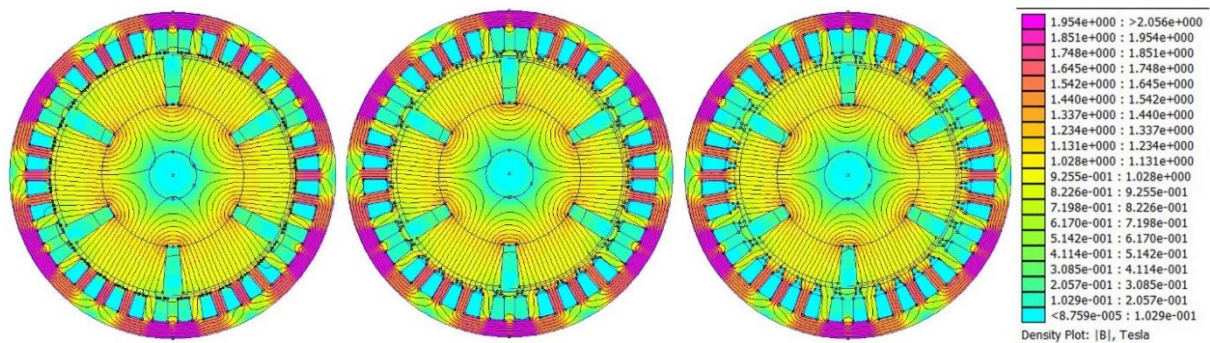
| Korak | Iznos visine magneta [mm] | THD [%] |
|-------|---------------------------|---------|
| mh    | 20.00                     | 14.76   |
| mh-k  | 19.00                     | 11.76   |
| mh-2k | 18.00                     | 12.01   |
| mh-3k | 17.00 </td <td>12.19</td> | 12.19   |
| mh-4k | 16.00                     | 12.44   |



**Slika 5.29.** Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni visine magneta

Na slici 5.26. prikazan je spektralni sastav valnih oblika magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora za različite vrijednosti visine permanentnih magneta rotora. Smanjenje visine magneta uzorkuje porast amplituda 3., 7. i 9. harmonika, te smanjenje amplituda 5., 11. i 13. harmonika.

Slika 5.30. prikazuje distribuciju skalarnog polja magnetske indukcije za različite vrijednosti visine permanentnih magneta. Smanjenje visine magneta uzrokuje povećanje visine zuba statora, što rezultira manjim iznosima magnetske indukcije u zubima statora.

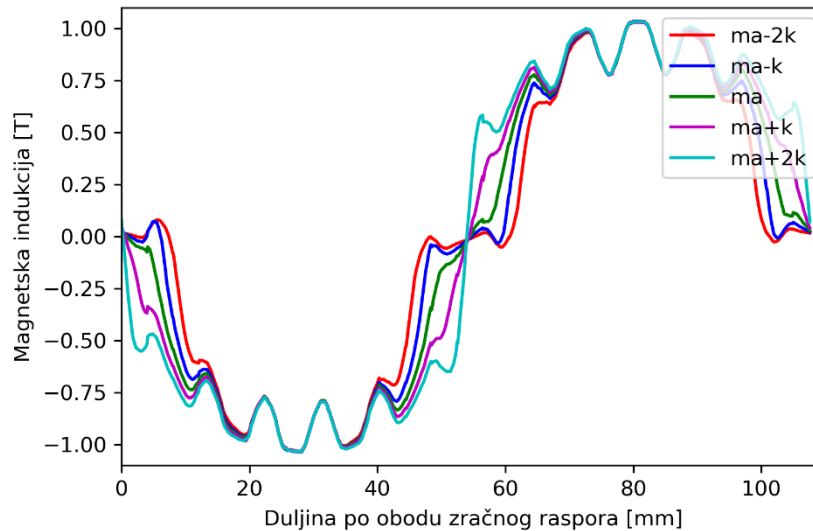


*Slika 5.30. Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti visine magneta: „mh“ (lijevo), „mh-2k“ (sredina) i „mh-4k“ (desno)*

## 5.7. Simulacija promjene kuta magneta rotora

Na slici 5.31. prikazan je valni oblik magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora pri promjeni kuta permanentnih magneta. Promjena dimenzija kuta magneta rezultira promjenom površine koju permanentni magneti zauzimaju i obuhvaćaju. Iz slike je vidljivo da promjena kuta magneta nema utjecaja na izgladivanje signala magnetske indukcije niti na iznos amplitude magnetske indukcije. Po izgledu signala, zaključuje se da optimalni oblik ima krivulja početne geometrije. Kod signala krivulje „ma-2k“ postoje „duži“ dijelovi kod kojih je vrijednost magnetske indukcije jednaka nuli, a kod signala krivulje „ma+2k“ izgled krivulje podsjeća na pravokutni signal. Povećanjem kuta magneta, povećava se efektivna vrijednost magnetske indukcije.

Prema tablici 5.12., najmanju distorziju signala magnetske indukcije ima krivulja početne geometrije („ma“), nasuprot tome krivulja „ma+2k“ ima najveći THD.



*Slika 5.31. Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni kuta permanentnih magneta*

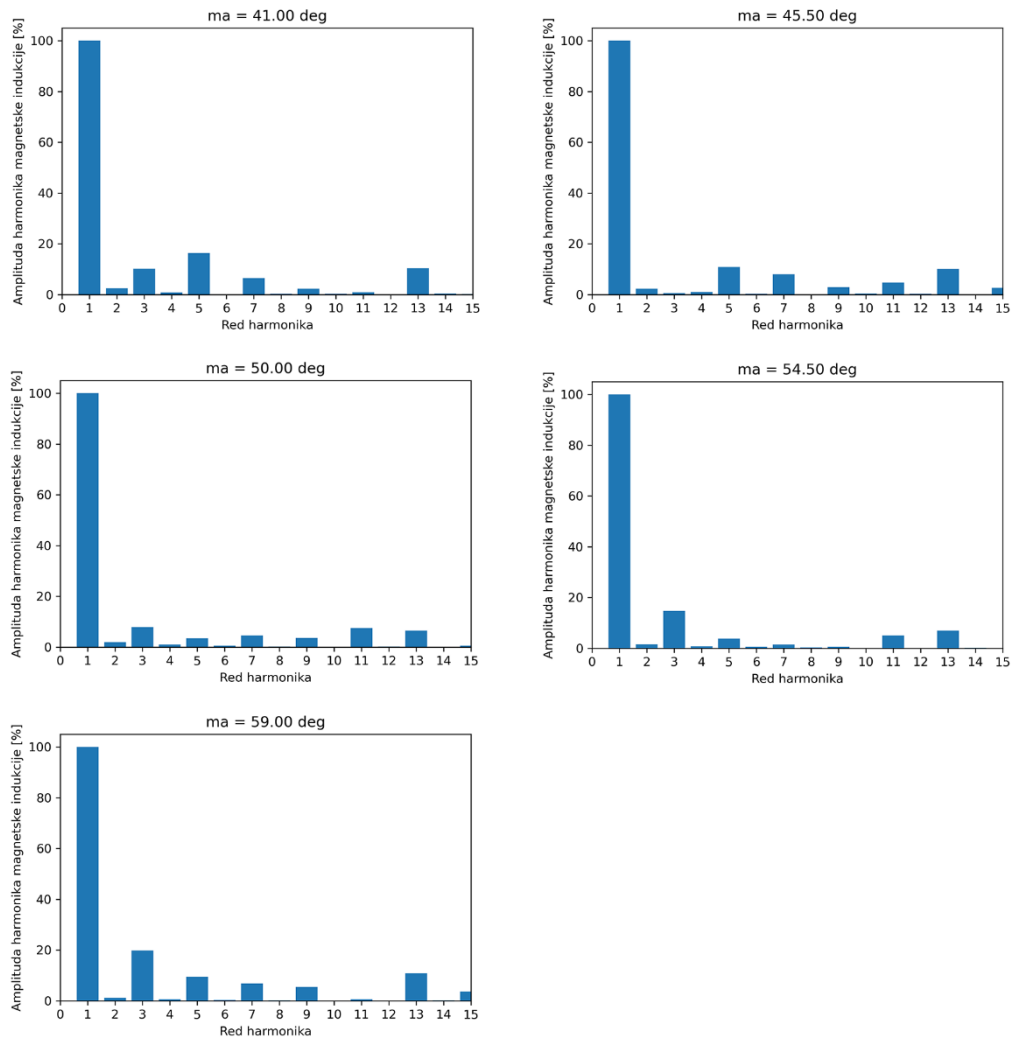
*Tablica 5.12. Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije*

| Korak | Iznos kuta magneta [deg] | THD [%] |
|-------|--------------------------|---------|
| ma-2k | 41.00                    | 23.49   |
| ma-k  | 45.50                    | 18.36   |
| ma    | 50.00                    | 14.76   |
| ma+k  | 54.50                    | 17.94   |
| ma+2k | 59.00                    | 26.59   |

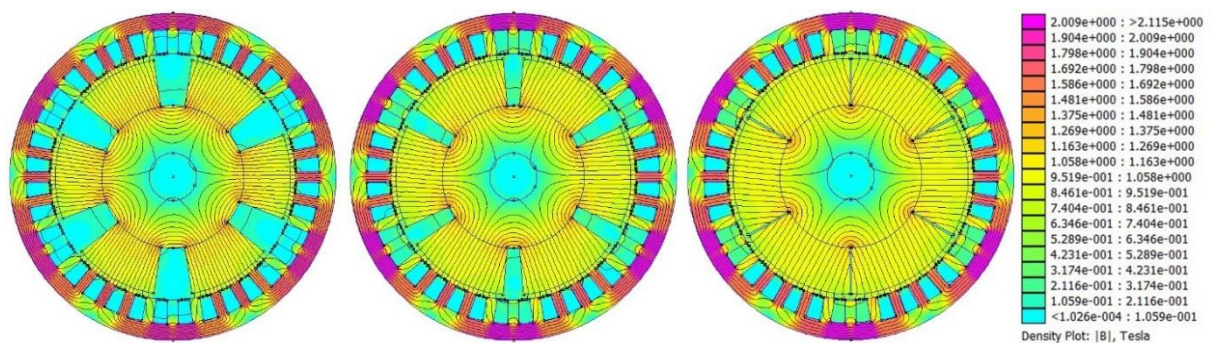
Na slici 5.32. prikazani su spektralni sastavi valnih oblika magnetske indukcije pri promjeni kuta permanentnih magneta. Za smanjenje kuta magneta, u odnosu na početnu geometriju, uočava se dominantan 5.harmonik amplituda 15% i 10%. Smanjenjem kuta magneta opada amplituda 3., 9. i 11. harmonika, a amplitude 5., 7. i 13. harmonika rastu. Kao i u ostalim simulacijama, amplitude 3. i 11. harmonika za početnu geometriju su približno jednake (oko 8%). U harmonijskim sastavima ostalih signala (u kojima se povećava kuta magneta), dominira 3. harmonik s amplitudama 15% i 20%, nakon čega po amplitudi slijedi 13.harmonik s amplitudama 6% i 10%. Porastom kuta povećava se amplituda 3., 5., 13. i 15. harmonika, a smanjuje se amplituda 7., 9. i 11. harmonika u odnosu na harmonijski sastav početne geometrije.

Iz slike 5.33. vidljivo je da povećanje kuta magneta uzrokuje veće obuhvaćanje površine zubi statora magnetskim poljem, a u iznosima magnetske indukcije nema značajnije razlike.





Slika 5.32. Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni kuta permanentnih magneta

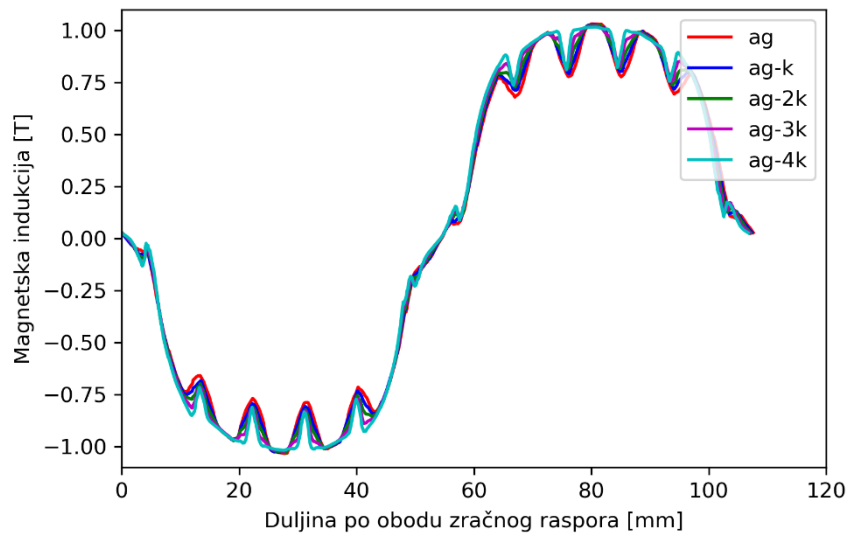


Slika 5.33. Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti kuta magneta: „ma-2k“ (lijevo), „ma“ (sredina) i „mh+2k“ (desno)

### 5.8. Simulacija promjene širine zračnog raspora

Slika 5.34. prikazuje valne oblike magnetske indukcije po obodu zračnog raspora za različite vrijednosti širine zračnog raspora. Smanjenje širine zračnog raspora rezultira manjom dubinom ripple-ova, a na amplitudu magnetske indukcije nema utjecaj.

Tablica 5.13. prikazuje iznose ukupne harmonijske distorzije signala za različite iznose širine zračnog raspora. Vidljivo je da najmanji iznos THD-a ima valnih oblik „ag-3k“, a najveći iznos ima valni oblik „ag“ koji je približno 8% veći od THD-a valnog oblika „ag-3k“.



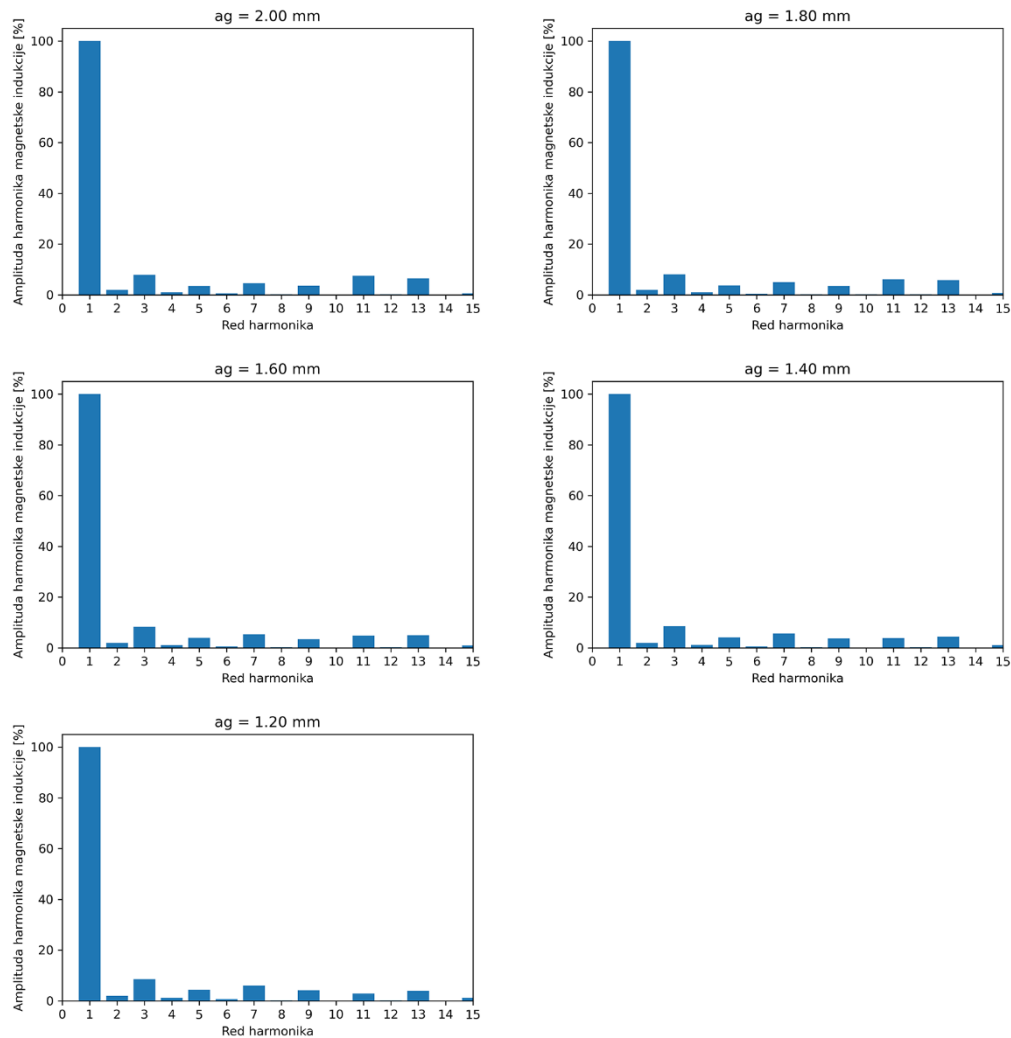
*Slika 5.34. Grafički prikaz valnog oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni širine zračnog raspora*

*Tablica 5.13. Prikaz iznosa THD-a za svaki korak parametarske simulacije*

| Korak | Iznos kuta magneta [mm] | THD [%] |
|-------|-------------------------|---------|
| ag    | 2.00                    | 14.76   |
| ag-k  | 1.80                    | 14.08   |
| ag-2k | 1.60                    | 13.70   |
| ag-3k | 1.40                    | 13.69   |
| ag-4k | 1.20                    | 14.05   |

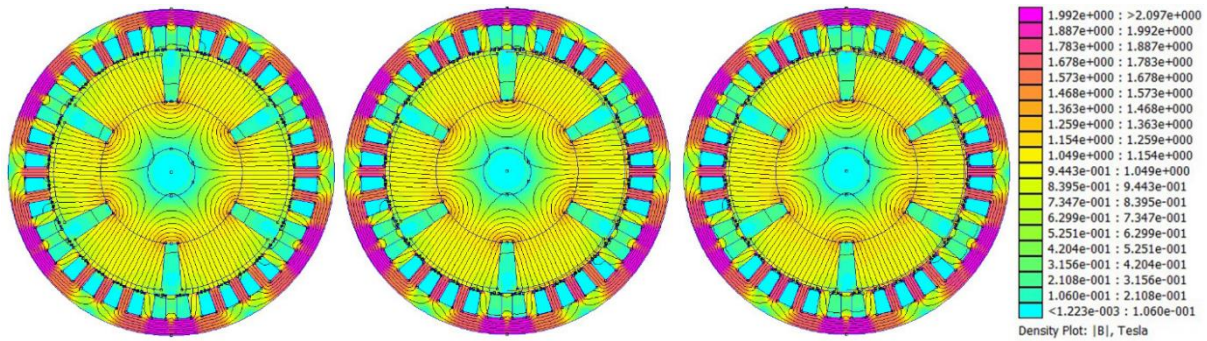


Na slici 5.35. prikazan je spektralni sastav valnih oblika magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora za različite iznose širine zračnog raspora. Smanjenjem širine zračnog raspora vidljiv je pad iznosa amplituda 11. i 13. harmonika, te porast iznosa amplituda 3., 5., 7. i 9. harmonika.



*Slika 5.35. Spektralni sastav signala magnetske indukcije pri promjeni širine zračnog raspora*

Slika 5.36. prikazuje raspodjelu skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti širine zračnog raspora. Smanjenje širine zračnog raspora uzrokuje smanjenje duljine puta koji magnetski tok mora prijeći da bi se petlja zatvorila, tj. područje s visokom reluktancijom je smanjeno. Odnosno smanjenjem širine zračnog raspora, iznosi magnetske indukcije u zubima statora se povećavaju.



*Slika 5.36. Grafički prikaz distribucije skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite vrijednosti širine zračnog raspora: „ag“ (lijevo), „ag-2k“ (sredina) i „ag-4k“ (desno)*

## 5.9. Usporedba rezultata svih simulacija

Parametarska simulacija izvodila se promjenom jednog dimenzijskog parametra, dok su ostali bili fiksirani na svoje početne vrijednosti, što je rezultiralo dimenzijskim ograničenjima pri promjeni pojedinog parametra. Svaka simulacija izvršavala se u pet koraka, a rezultati su prikazani za jedan period odnosno  $120^\circ$ . Promjene određenih dimenzijskih parametara posredno su izazvale promjene dimenzija drugih parametara kao što su povećanje širine zračnog raspora i visine zuba statora, stoga su simulacije tih parametara izvršene u dva slučaja – fiksiranjem visine zuba statora ili fiksiranjem širine zračnog raspora.

Analizom grafičkih prikaza valnih oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjeni različitih parametara, vizualno najveći utjecaj izgladivanja krivulje uočava se za promjene koje uzrokuju pad iznosa magnetske indukcije u zračnom rasporu iznosa 20-35%, kao što su smanjivanje duljine polumjera rotora i smanjivanje širine jarma statora. Međutim smanjenje magnetske indukcije rezultira smanjenjem induciranog napona. Dodatno, zaključuje se da u simulacijama promjena parametara u kojima se fiksira širina zračnog raspora iznosi amplituda magnetske indukcije manje opadaju nego u slučaju kada se za iste promjene parametara fiksira visina zuba statora. Razlog tome je što povećanje zračnog raspora uzrokuje povećanje magnetskog otpora, koji uzrokuje pad iznosa magnetske indukcije.

Iznos ukupne harmonijske distorzije za valni oblik početne geometrije iznosi 14.76%. Usporedbom iznosa ukupne harmonijske distorzije promjenom svih parametara, najveće smanjenje (približno 25%) u odnosu na THD početne geometrije je za valni oblik magnetske indukcije pri smanjenju jarma statora za 2 mm s iznosom  $THD = 11.14\%$  uz fiksiranu visinu zuba statora. Najveće povećanje iznosa THD-a uočava se za povećanje kuta magneta na iznos  $59^\circ$ . U

gotovo svim simulacijama (osim u slučaju promjene kuta magneta), pri promjenama povećavanja ili smanjivanja dimenzija zadanih parametara, postignuti su manji iznosi harmonijske distorzije signala magnetske indukcije. Analizom iznosa THD-a valnih oblika magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora, zaključuje se da u simulacijama promjena duljine promjera statora, duljine polumjera rotora i visine magneta rotora, fiksiranje širine zračnog raspora rezultira manjim iznosima THD-a nego u slučaju kada se za iste promjene parametara fiksira visina zuba statora. Fiksiranje visine zuba statora, uzrokuje promjenu (povećanje) širine zračnog raspora, što rezultira porastom magnetskog otpora. Odnosno za istu jakost magnetskog polja, manji je iznos magnetske indukcije, pa je veća vjerojatnost da generator radi u linearnom dijelu krivulje magnetiziranja, u kojem je prisutno manje harmonika u valnim oblicima.

Analizom spektralnih sastava valnih oblika magnetske indukcije po obodu zračnog raspora pri promjenama različitih parametara, primjećuje se da se povećanjem širine zračnog raspora ili visine zuba statora, iznosi amplituda 5., 11. i 13. harmonika smanjuju, a amplitude 3., 7. i 9. harmonika rastu u odnosu na amplitude spektralnog sastava početne geometrije. Pri promjenama parametara koji ne uzrokuju promjenu širine zračnog raspora ili visine zuba statora uočava se porast amplituda 5. i 7. harmonika, te pad amplituda 9., 11. i 13. harmonika u odnosu na amplitude spektralnog sastava početne geometrije.

Iz grafičkih prikaza jakosti skalarnog polja magnetske indukcije u generatoru za različite parametre primjećuje se da su pri promjenama parametara koji uzrokuju smanjenje površine kroz koju magnetski tok prolazi iznosi magnetske indukcije veći. Prema iznosima magnetske indukcije u zubima statora, zaključuje se da u svim simulacijama, sinkroni generator s permanentnim magnetima radi ili u linearnom području rada ili na koljenu krivulje magnetiziranja.

Iako pružaju manji iznos THD-a signala magnetske indukcije, promjene parametara kojima se posredno povećava širina zračnog raspora, smanjuju efikasnost generatora. Pri dizajnu sinkronog generatora s permanentnim magnetima širina zračnog raspora odabire se što je mehanički moguće manja, kako bi se smanjili iznosi rasipnog toka u zračnom rasporu. Povećanje širine zračnog raspora zahtjeva i povećanje uzbude, odnosno promjenu magneta što utječe na dimenzije i cijenu generatora. Pri promjenama parametara koje uzrokuju smanjenje površine statora, treba biti oprezan. Smanjenje površine rezultira bržim zasićenjem jezgre statora, a posljedično uzrokuje nemogućnosti postizanja maksimalnog momenta za koji je generator dizajniran.

## 6. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu provedena je statička analiza raspodjele magnetske indukcije duž zračnog raspora sinkronog generatora s permanentnim magnetima za promjenu različitih konstrukcijskih parametara. Modeliran je trofazni sinkroni generator s permanentnim magnetima postavljenim na površinu rotora, putem koda u python programskom jeziku. U simulacijskom alatu FEMM, izvršene su parametarske simulacije konstrukcijskih dimenzija sinkronog generatora s permanentnim magnetima. Iz simulacija, generirani su valni oblici raspodjele magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora za promjenu svakog parametra, kako bi se ustanovio utjecaj promjene pojedinog parametra na raspodjelu magnetske indukcije. Fourierovom transformacijom izračunatih valnih oblika magnetske indukcije, unutar python koda, dobivena je spektralna analiza valnih oblika, te je izračunata vrijednost ukupnog harmonijskog izobličenja svakog valnog oblika.

Analiziranjem utjecaja promjene pojedinog parametra, utvrđena je povezanost promjene nekih parametara na raspodjelu magnetske indukcije, što je informacija koja može pomoći pri modeliranju ovakvog tipa generatora. Promjene reluktancije (magnetskog otpora) uzrokovane su geometrijom generatora, odnosno „postojanjem“ zuba i utora na statoru i dizajnom permanentnih magneta. Na područjima gdje je širina zračnog raspora manja (kod zuba statora), reluktancija zračnog raspora je manja, a na područjima gdje je veća širina zračnog raspora (kod utora statora), reluktancija je veća. Magnetski tok obrnuto je proporcionalan reluktanciji, a proporcionalan je magnetskoj indukciji. Stoga promjene reluktancije u zračnom rasporu uzrokuju distorziju valnog oblika magnetske indukcije, što rezultira distorzijom valnog oblika induciranog napona. Odnosno u valnim oblicima pojavljuju se harmonici. Zasićenje željezne jezgre također može uzrokovati harmonike u valnim oblicima magnetske indukcije. Budući da je većina generatora spojena u zvijezda spoj, 3.harmonik i njegovi višekratnici ne predstavljaju problem jer se zbog vrste spoja ponište u linijskom naponu, iako u faznom naponu postoje. Viši harmonici uzrokuju gubitke koji su proporcionalni frekvenciji (gubici zbog skin efekta, histerezni gubici i gubici vrtložnih struja), a rezultiraju dodatnim zagrijavanjem stroja. Dizajnom generatora moguće je utjecati na smanjivanje viših harmonika. Metode smanjivanje viših harmonika odnose se na prikladan dizajn polova rotora, povećanje širine zračnog raspora, korištenjem distribuiranog namota i skraćenog namota. Na strani trošila moguće je ugraditi filtere harmonika koji najčešće smanjuju amplitude 5. i 7. harmonika. Utjecaj harmonijskog izobličenja očituje se u iznosu gubitaka sinkronog generatora s permanentnim magnetima, odnosno reflektira se na efikasnost, te je vrlo važno odabrati optimalan dizajn stroja za zadanu svrhu.

Stoga, zaključuje se da postoji mogućnost poboljšanja obrađenog modela sinkronog generatora s permanentnim magnetima sa strane spektralne analize, što je vidljivo iz rezultata nižih iznosa harmonijskih izobličenja kod nekih parametara koji su mijenjani u odnosu na početnu geometriju. Međutim, je li smanjenje harmonika ekonomski isplativo obzirom da promjene nekih parametara uzrokuju povećanje dimenzija trenutne izvedbe, odnosno poskupljuje izrada stroja. Kao dodatak radu, poželjno bi bilo odraditi analizu promjene gubitaka sinkronog generatora s permanentnim magnetima promjenom dimenzijskih parametara, kako bi se zaključila isplativost mijenjanja dimenzija.

**LITERATURA**

- [1] I. Boldea, The Electric Generators Handbook Synchronous Generators, CRC Press, Boca Raton, 2006.
- [2] I I. Mandić, V. Tomljenović, M. Pužar, Sinkroni i asinkroni električni strojevi, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb 2012.
- [3] H. Fang, J. Zhang, Design and Analysis of Superconducting Synchronous Generator for Wave Energy Conversion, 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)
- [4] S. Rana, Analysis of Self-Excited Synchronous Reluctance Generator, Electronic Theses and Dissertations. 8118, 2009.
- [5] E. Akpınar, D. Budakçı, A model of homopolar synchronous generator feeding 3-phase bridge rectifier, ELECO International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa/Turkey, 2005.
- [6] A.E. Fitzgerald, C. Kingsley, S.D. Umans, Electric Machinery, McGraw-Hill, New York, 2003.
- [7] V. Čorluka, Modeliranje sinkronog motora s unutarnjim permanentnim magnetima i koncentriranim namotom, Doktorski rad, Osijek, 2017.
- [8] N. Madani, Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis Wind Turbine, Degree project, Stockholm, Sweden 2011
- [9] D. Wu, J. Yang, T.F. Chan, C.S. Lai, X. Li, B. Yan, L.L. Lai, D. Wang, X. Gao, K. Meng, Axial-flux permanent-magnet synchronous generator with coreless armature and non-integral coil–pole ratio, IET Renew. Power Gener., 2019, Vol. 13 Iss. 2, pp. 245-252, 2018.
- [10] Electric motor design: radial vs. axial & transverse flux, url: <https://www.horizontechnology.biz/blog/electric-motor-design-radial-vs.-axial-transverse-flux> (20.08.2022.)
- [11] R. Watanabe , J.S. Shin, T. Koseki, H.J. Kim, Design of Transverse Flux Linear Synchronous Generator for Wave Energy Conversion

- [12] A. El Shahat, A. Keyhani and H. El Shewy, 400 kW Six Analytical High Speed Generator, Designs for Smart Grid Systems, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering Vol:4, No:3, 2010
- [13] Permanent Magnets, url: <https://www.first4magnets.com/permanent-magnets-i155> (20.06.2022.)
- [14] B-H Curves for Ceramic, Samarium Cobalt or Neodymium Magnets, url: <https://www.armsmag.com/news-B-H-curve-neodymium-magnets.html> (20.06.2022.)
- [15] R. Krishnan, Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives, CRC Press, Boca Raton, 2010.
- [16] X. Zhang, Heterostructures: new opportunities for functional materials, Materials Research Letters, 8:2, 49-59, DOI: [10.1080/21663831.2019.1691668](https://doi.org/10.1080/21663831.2019.1691668)
- [17] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual, 2020., url: <https://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf> (20.08.2022.)
- [18] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics: pyFEMM 0.1.3 User's Manual, 2021., url: <https://www.femm.info/wiki/pyFEMM/manual.pdf> (20.08.2022.)

## POPIS KORIŠTENIH SIMBOLA I OZNAKA

| Oznaka ili simbol | Naziv  | Mjerna jedinica |
|-------------------|--|-----------------|
| ag                | Širina zračnog raspora   | mm              |
| $\alpha$          | Kut zuba statora   | deg             |
| B(n)              | n-ti harmonik magnetske indukcije                                | T               |
| B(1)              | Osnovni harmonik signala magnetske indukcije                     | T               |
| B <sub>m</sub>    | Maksimalni iznos magnetske indukcije                             | T               |
| B <sub>r</sub>    | Remanentna indukcija   | T               |
| d                 | Promjer stroja   | mm              |
| $\delta_{RF}$     | Električni fazni kut između magnetskih osi $\phi_R$ i $\Theta_f$ | deg             |
| f                 | Frekvencija izmjeničnog napajanja                                | Hz              |
| H <sub>C</sub>    | Maksimalna vrijednost jakosti magnetskog polja                   | A/m             |
| H <sub>m</sub>    | Remanentna indukcija   | T               |
| h <sub>o</sub>    | Visina vrha zuba   | mm              |
| k                 | Iznos koraka promjene parametra                                  | mm/deg          |
| L/D               | Omjer duljine i promjera stroja                                  | -               |
| ma                | Kut magneta rotora   | deg             |
| mh                | Visina magneta rotora  | mm              |
| n                 | Brzina vrtnje rotora   | o/min           |
| n <sub>s</sub>    | Sinkrona brzina  | o/min           |
| ns                | Broj utora statora   | -               |
| p                 | Broj pari polova   | -               |
| $\phi_R$          | Rezultantan tok zračnog raspora po polu                          | Wb              |
| ro                | Polumjer osovine   | mm              |
| rp                | Broj pari polova   | -               |
| rr                | Polumjer rotora  | mm              |



|            |   |    |
|------------|---|----|
| rs1        | Polumjer vanjskog kruga statora         | mm |
| rs3        | Udaljenost od ishodišta do zuba statora | mm |
| sh         | Visina utora statora                    | mm |
| sw         | Širina utora statora                    | mm |
| sy         | Širina jarma statora                    | mm |
| T          | Elektromehanički moment                 | Nm |
| THD        | Ukupna harmonijska distorzija signala   | %  |
| th         | Visina zuba statora                     | mm |
| tl         | Širina vrha zuba statora                | mm |
| tw         | Širina zuba statora                     | mm |
| $\Theta_f$ | Protjecanje uzbuđnog namota             | A  |

## SAŽETAK

U radu je dan pregled konstrukcijskih dijelova dosadašnjih izvedbi sinkronog generatora s permanentnim magnetima. Detaljno je prezentiran proces izrade modela sinkronog generatora s permanentnim magnetima u simulacijskom alatu FEMM, preko python koda. Izvršene su parametarske simulacije promjene dimenzijskih veličina. Prikazan je utjecaj promjene pojedinačnih konstrukcijskih parametara na performanse sinkronog generatora s permanentnim magnetima preko izračuna ukupne harmonijske distorzije signala magnetske indukcije duž oboda zračnog raspora. Napravljen je grafički prikaz rezultata, te je obavljena analiza rezultata.

**Ključne riječi:** FEMM, parametarska simulacija, python, sinkroni generator s permanentnim magnetima,

## ABSTRACT

In the thesis, an overview of the structural parts of the permanent magnet synchronous generator is given. The process of creating a model of a permanent magnet synchronous generator in the simulation tool FEMM, through python code, is presented in detail. Parametric simulations of dimensional changes were performed. The influence of the change of individual design parameters on the performance of a permanent magnets synchronous generator is shown through the calculation of the total harmonic distortion of the flux density signal along the perimeter of the air gap. A graphic presentation of the results was made, and the results were analyzed.

**Key words:** FEMM, parametric simulation, python, permanent magnet synchronous generator

## ŽIVOTOPIS

Autorica ovog diplomskog rada, Ines Hečimović, studentica je na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Rođena je 20.06.1996. u Zagrebu. Osnovnu i srednju školu završila je u Kutini. Pohađala je srednju školu Tina Ujevića, smjer Opća gimnazija. Nakon završetka upisuje preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnike i informacijske tehnologije, te se na drugoj godini studija opredjeljuje za smjer Elektroenergetika. Po završetku preddiplomskog studija upisuje diplomski studij na istom fakultetu, izborni blok Industrijska elektroenergetika.

---

Potpis autora