

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

**Aksijalni motor s permanentnim
magnetima temeljen na tehnologiji
tiskanih pločica**

Stjepan Borak

Zagreb, lipanj 2022.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za elektrostrojarstvo i automatizaciju na Fakultetu elektrotehnike i računarstva pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Stjepana Stipetića i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2021./2022.

SADRŽAJ

| | |
|--|-----------|
| Popis slika | iv |
| 1. Uvod | 1 |
| 2. PCB motori | 5 |
| 2.1. Tržišno dostupni PCB motori | 5 |
| 2.2. Pregled tehnologije PCB statora | 7 |
| 3. Projekt stroja | 9 |
| 3.1. Zahtjevi i ograničenja | 9 |
| 3.2. Usporedba namota pomoću simulacija metodom konačnih elemenata . | 10 |
| 3.3. Dimenzioniranje konačnog prijedloga stroja | 14 |
| 3.4. Tehnološka izrade tiskane pločice | 17 |
| 3.5. Mehanički dizajn motora i izgrađeni prototip | 22 |
| 4. Rezultati | 25 |
| 5. Zaključak | 29 |
| 6. Zahvala | 30 |
| Bibliografija | 31 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| 1.1. Žiroskop | 2 |
| 1.2. <i>Gimbal</i> | 3 |
| 1.3. <i>Gimbal</i> motor s radijalnim tokom, površinskim magnetima i vanjskim rotorom | 3 |
| 2.1. ECM familija proizvoda | 5 |
| 2.2. Višestatorski dizajn | 6 |
| 2.3. Koncentrirani spiralni namot | 7 |
| 2.4. Raspodijeljeni radijalni namot | 8 |
| 3.1. Simple FOC shield | 9 |
| 3.2. Model stroja s koncentriranim namotom | 11 |
| 3.3. Model simuliranog stroja s koncentriranim namotom | 11 |
| 3.4. Inducirani naponi koncentriranog namota | 12 |
| 3.5. Model stroja s distribuiranim namotom | 12 |
| 3.6. Parcijalni model simuliranog stroja s distribuiranim namotom | 13 |
| 3.7. Inducirani naponi distribuiranog stroja | 14 |
| 3.8. Model stroja sa šest slojeva vodiča | 15 |
| 3.9. Model parcijalnog segmentiranog pola | 15 |
| 3.10. Inducirani naponi konačnog dizajna | 16 |
| 3.11. Moment stroja na 3A | 17 |
| 3.12. Tiskana ploča s komponentama | 18 |
| 3.13. Povezivanje slojeva tiskane pločice | 18 |
| 3.14. Tiskana pločica s namotom 1 | 20 |
| 3.15. Tiskana pločica s namotom 2 | 20 |
| 3.16. Tiskana pločica 1 | 21 |
| 3.17. Tiskana pločica 2 | 22 |
| 3.18. Model postava | 23 |

| | |
|---|----|
| 3.19. Rotor sa segmentiranim polovima | 23 |
| 3.20. Nosač postava | 24 |
| 3.21. Sklopljeni postav | 24 |
| 4.1. Inducirani napon na 207 min^{-1} | 25 |
| 4.2. Inducirani napon na 750 min^{-1} | 26 |
| 4.3. Inducirani napon na 990 min^{-1} | 26 |
| 4.4. Ubrzavanje motora po rampi | 27 |
| 4.5. Arduino Mega s FOC shieldom | 28 |
| 4.6. Fazna struja statora u praznom hodu pri 25% nazivnog motorskog opterećenja | 28 |

1. Uvod

Povijest električnih strojeva otkriva da su prvi električni strojevi bili s aksijalnim tokom (eng. *axial flux machine*). Prvi takav stroj izumio je Michael Faraday 1831. godine. Nedugo nakon izuma aksijalnog stroja, 1837. godine Thomas Davenport polaže pravo na prvi patent za izum električnog stroja s radijalnim tokom (eng. *radial flux machine*) te su takvi strojevi ubrzo zaživjeli kao glavna konfiguracija električnih strojeva, što je tipično i za današnje vrijeme. Električni strojevi s aksijalnim tokom su, kao i danas, imali mnogo mana te se mogu raščlaniti na sljedeće glavne probleme [1]:

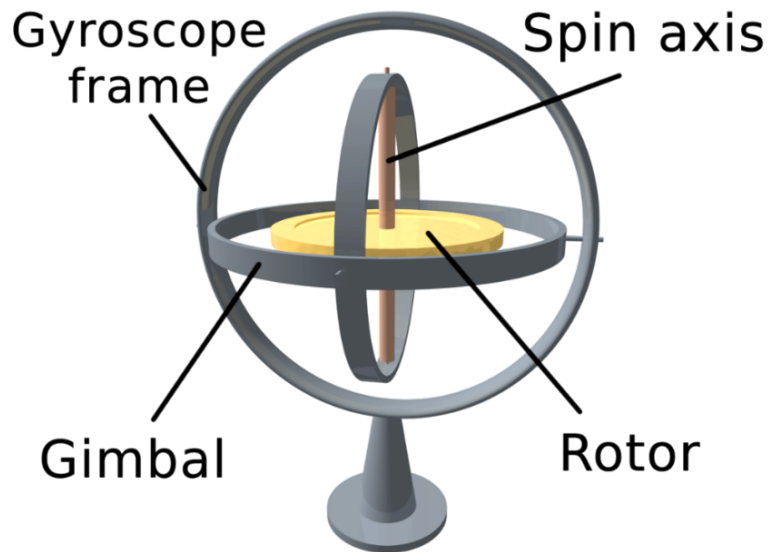
- jaka aksijalna magnetska sila privlačenja između statora i rotora
- težina proizvodnje lameliranih jezgri statora
- skupa proizvodnja lameliranih jezgri
- vrlo teško sklapanje stroja i održavanje konstantnog zračnog rasporeda

Napretkom tehnologije proizvodnja i upotreba takvih strojeva postala je sve češća, pogotovo u auto-moto primjenama zbog svojih nadmoćnih elektromagnetskih karakteristika u usporedbi sa strojevima s radijalnim tokom.

Jedna od najnovijih tehnologija koja se javlja kod proizvodnje strojeva s aksijalnim tokom je izrada statorskog paketa tehnologijom izrade tiskanih pločica (eng. *printed circuit board* ili PCB). Ovom novom tehnologijom moguće je drastično smanjiti aksijalnu dimenziju stroja kao i poboljšati karakteristike stroja na vrlo visokim brzinama vrtnje. Takvi strojevi počinju pronalaziti primjenu u određenim područjima gdje je aksijalna dimenzija ograničena i gdje nema zahtjeva na visok moment stroja pri malim brzinama vrtnje. Neke od obećavajućih primjena ovakvih strojeva su avioindustrija i svemirska industrija.

U ovome radu pokazan je razvoj aksijalnog stroja s permanentnim magnetima (AFPM – eng. *axial flux permanent magnet motor*) pomoću tehnologije tiskanih pločica: od simulacije od izrade i testiranja. Potencijalno ovakav motor može biti primijenjen kao tzv. *gimbal* motor.

Riječ *gimbal* dolazi iz engleskog jezika, a označava kardanski prsten koji je pri-



Slika 1.1: Žiroskop

kazan na slici 1.1 [2]. Kardanski prsten je zakretni oslonac koji omogućuje rotaciju objekta oko osi, a koristi se kod konstrukcije žiroskopa [3].

Gimbal se kao riječ odnedavno pogrešno koristi za uređaje koji se koriste kao stabilizatori fotoaparata i kamera te koriste žiroskopski efekt [4]. Jedan takav uređaj prikazan je slikom 1.2 [5]. Točniji naziv za takve uređaje je žiroskop koji koristi tri nezavisna *gimbala* ili kardana koji omogućuju okretanje uređaja nezavisno u tri osi. Zbog korištenja električnih motora u takvim uređajima, i sam je tip motora dobio takav naziv – *gimbal motor*.

Gimbal motori su specijalna vrsta trofaznih motora s permanentnim magnetima koje karakterizira razmjerno velik broj zavoja. Zbog velikog broja zavoja takvi motori imaju visok otpor namota koji seže do iznosa većih od 10Ω , ali i razmjerno veliki induktivitet [6].

Gimbal motori koriste se u *gimbal* uređajima zbog vrlo glatkih kretnji koje omogućuju precizno stabiliziranje svake osi te im je potrebna mala ulazna struja da proizvedu potreban moment u usporedbi s klasičnim motorima. Jedan takav motor prikazan je slikom 1.3 u RFPM izvedbi [7]. Takav RFPM stroj točnije se naziva RFPM s površinski montiranim magnetima ili RFPM SPM.

U pravilu su *gimbal* motori konstruirani tako da imaju rotor koji rotira izvana dok se stator nalazi s unutarnje strane. Naziv za takav tip RFPM SPM stroja je *outrunner* motor zbog vanjskog rotirajućeg rotora.

Motori s vanjskim rotorom koriste se u primjenama gdje je potreban velik moment na niskoj brzini vrtnje iz nekoliko razloga. Naspram klasičnih strojeva s unutarnjim



Slika 1.2: *Gimbal*



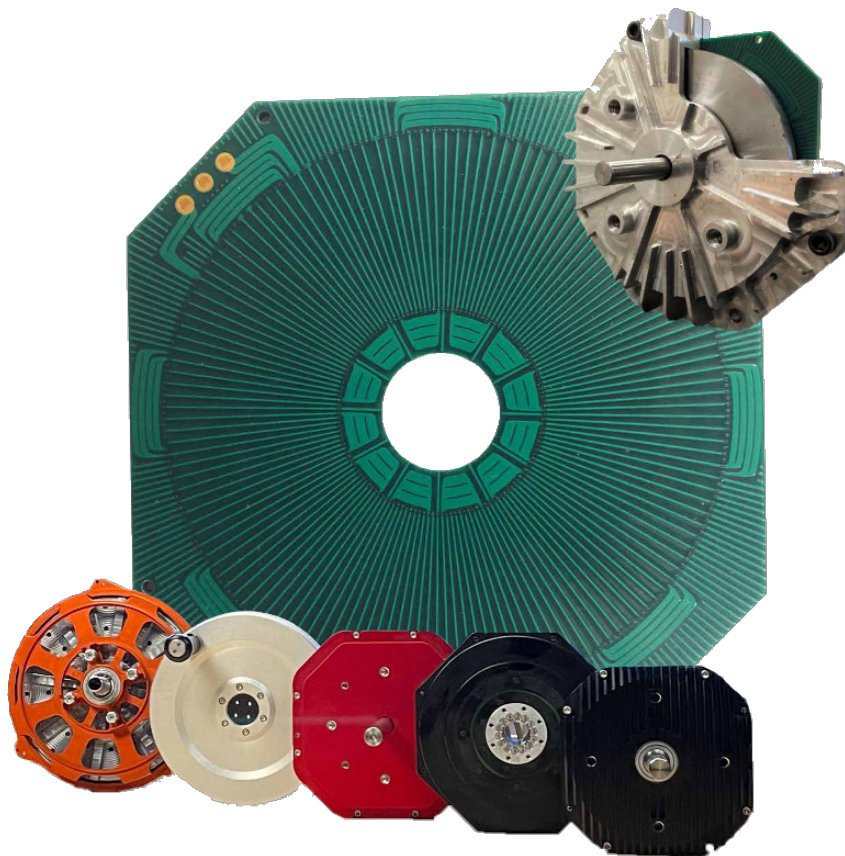
Slika 1.3: *Gimbal* motor s radijalnim tokom, površinskim magnetima i vanjskim rotorom

rotorom, stroj s vanjskim rotorom istih vanjskih dimenzija ima veći moment zbog većeg promjera statora [8]. Drugi faktor koji je bitan kod izbora takvih strojeva je K_v faktor ili naponska konstanta stroja. K_v faktor označava koliko okretaja u sekundi ili koliko okretaja u minuti motor može ostvariti u praznom hodu po jednom voltu ulaznog napona. Tipični *outrunner* motori imaju manji K_v faktor što znači da će se sporije rotirati naspram klasičnog motora, gledajući po jednom voltu ulaznog napona. Zbog navedenih karakteristika, takvi motori su idealni u primjenama gdje je potreban veliki moment na niskoj brzini vrtnje.

2. PCB motori

2.1. Tržišno dostupni PCB motori

Tehnologija PCB statora relativno je nova tehnologija te je dostupnost takvih strojeva ograničena. Primjeri strojeva s aksijalnim tokom u izvedbi s tiskanim pločicama su npr. [9] i [10]. Kolokvijalno, takvi strojevi nazivaju se PCB strojevi.



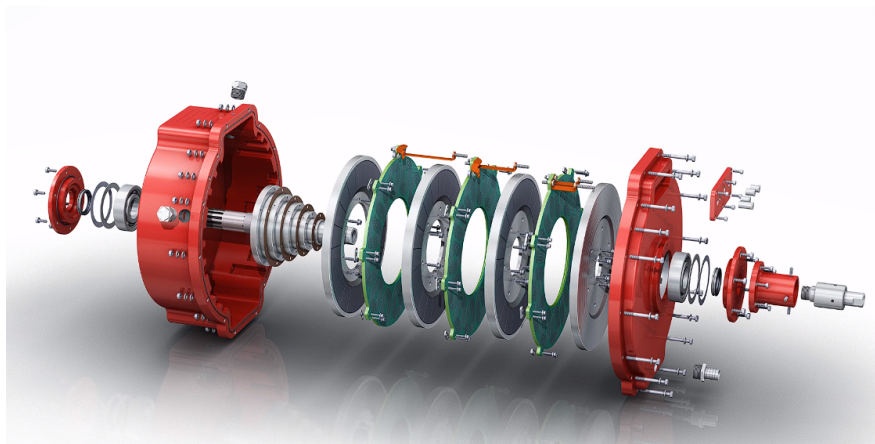
Slika 2.1: ECM familija proizvoda

ECM PCB stator je poduzeće koja razvija strojeve s aksijalnim tokom za širok spektar aplikacija kao što su autonomna vozila, elektromobilnost, industrijski klima-uređaji (eng. *Heating, Ventilation and Air Conditioning* ili HVAC), brodska propulzija

i druge [11]. ECM-ova studija izvedivosti korištenja tehnologije tiskanih pločica za pomorske HVAC sustave pokazala je da su strojevi s tiskanim pločicama ne samo pogodni, nego da su i bolje prilagođeni toj primjeni od klasičnih radijalnih motora [12]. Na velikim teretnim brodovima i kod vojnih plovila, masa motora i generatora čini velik udio u ukupnoj masi plovila. Smanjenjem mase tih komponenata moguće je smanjiti otpor plovila u vodi, smanjuje se potrošnja goriva, a s njime i mogući doseg plovila. Uz to, ukupna potrošnja goriva i emisija stakleničkih plinova se smanjuje.

Poduzeće ECM PCB stator predstavlja na svojim mrežnim stranicama motor s aksijalnim tokom u tehnologiji tiskanih pločica kao pogon HVAC sustava na plovilu [12]. Pokazano je da je aksijalni motor s aksijalnim tokom u izvedbi s tiskanim pločicama 60 % lakši s 4,1 % boljom učinkovitošću i s istom snagom kao i klasični motor korišten na HVAC sustavu. Također ukupni volumen stroja je manji nego kod klasičnog motora.

Kataloški dostupni PCB strojevi dostupni su u nekoliko izvedbi ovisno o primjeni. Jedna od izvedbi stroja je više-statorski dizajn (eng. *multi-stator design*).



Slika 2.2: Višestatorski dizajn

Višestatorski dizajn stroja korišten je uglavnom u auto-moto primjeni kao što su automobili, motori, bicikli s električnim pogonom i drugi [11]. Najčešće su korišteni kao propulzijski motori, ali se koriste kao i motori za pomoćne pogone u automobilima. Višestatorska izvedba omogućuje povećanje snage stroja i momenta s razmjerno malim povećanjem volumena, odnosno razmjerno malim povećanjem aksijalne duljine stroja.

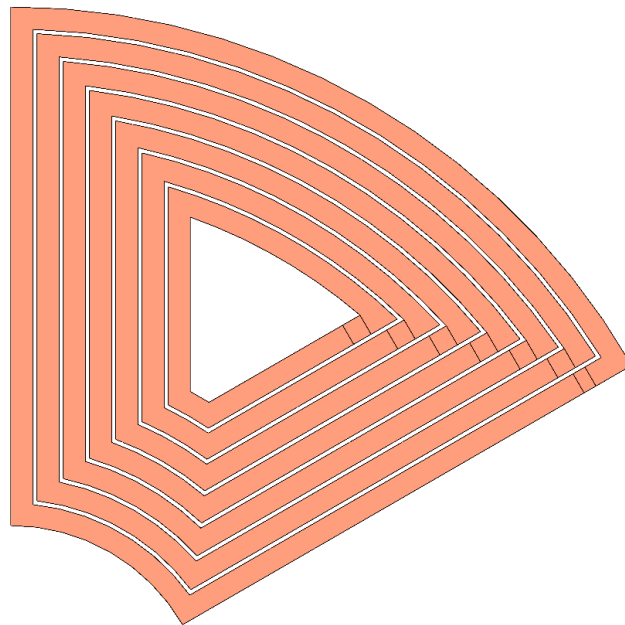
Trenutno na tržištu nema PCB strojeva koji se koriste kao *gimbal* motori i to je glavna motivacija ovog rada.

2.2. Pregled tehnologije PCB statora

Općenito, statori AFPM strojeva, ovisno o primjeni i radnom okruženju, mogu imati feromagnetske jezgre koje se koriste zbog malog magnetskog otpora u usporedbi sa zrakom. Također statori mogu biti dizajnirani bez feromagnetske jezgre i bez utora u statoru. Struktura statora bez feromagnetske jezgre je zanimljiv odabir jer ne samo što značajno smanjuje težinu stroja, nego i eliminira nepoželjne karakteristike kao što je pulsirajući moment i gubitci u željezu.

Dizajn s PCB statorom privlačan je kandidat kao predstavnik strojeva bez jezgre i utora [13, 14, 15, 16, 17]. Planarna struktura namota i tanki dizajn PCB statora AFPM strojeva čini ih primjerenim kandidatima kod primjena koje zahtijevaju aksijalno „tanak“ dizajn kao što su primjene u kućanstvu i primjene kod pogonskih motora tvrdih diskova, čitača digitalnih video diskova [13],[14] itd. Najveći izazov kod dizajniranja PCB statora je topologija namota stroja koja utječe na inducirani napon i na moment stroja. U usporedbi sa strojeva s feromagnetskom jezgrom, namot i svitci su postavljeni planarno što dodatno otežava postizanje zadovoljavajućih rezultata.

Postojeća literatura koja se fokusira na PCB AFPM strojeve uglavnom spominje spiralne ili romboidne namote [13],[14].

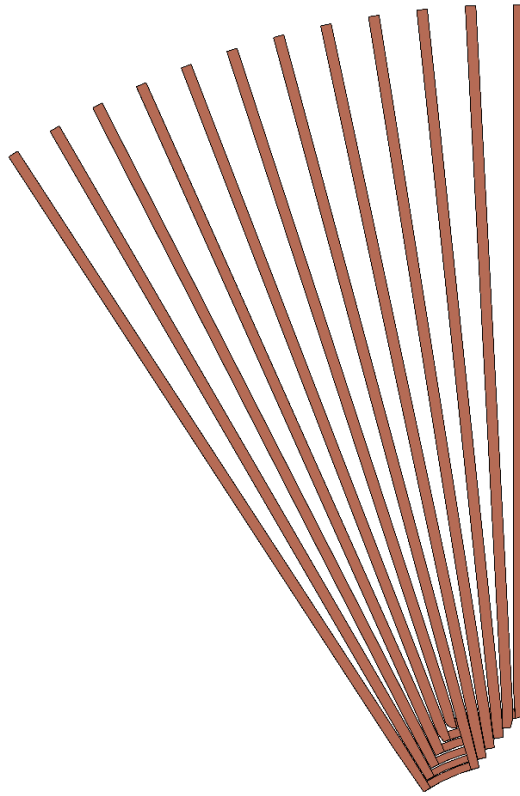


Slika 2.3: Koncentrirani spiralni namot

Međutim, kao što se može vidjeti na slici 2.3, spiralni namot problematičan je zbog kratkih aktivnih vodiča koji se smanjuju prema centru spiralnog vodiča. Također,

ova topologija inherentno ima povećane gubitke u bakru zbog neučinkovite upotrebe površine tiskane pločice u području glava namota [18].

Kako bi se ublažio utjecaj spomenutih problema, predložen je radijalni valoviti tip namota koji bolje iskorištava površinu statora i smanjuje gubitke u namotima [13].



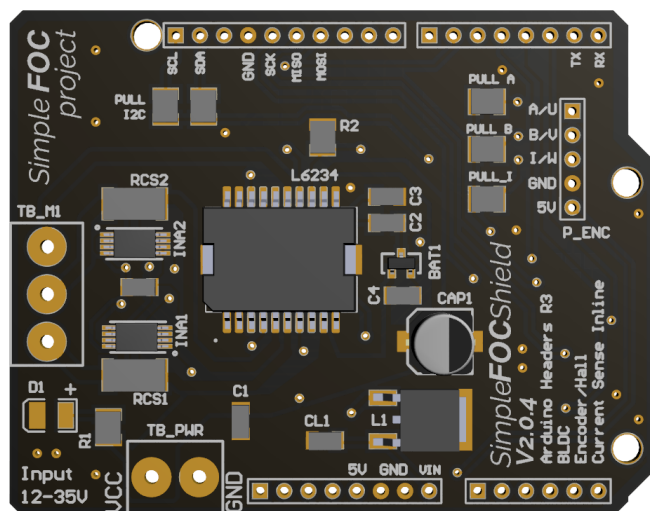
Slika 2.4: Raspodijeljeni radijalni namot

Nasuprot učinkovitijeg korištenja površine statora i manjih gubitaka, valoviti namot je vrlo problematično tehnološki izvesti. Kod valovitog namota vodiči se spajaju preko nekoliko utorskih koraka stroja. Kako bi se riješio taj problem, valoviti namot koristi više slojeva tiskane pločice pri spajanju vodiče faze u seriju. Korištenjem više slojeva tiskane pločice u kojem nema aktivnih namota nego služe samo za spajanje, smanjuje se iskoristivost ukupnog volumena stroja i povećava se kompleksnost izrade.

3. Projekt stroja

3.1. Zahtjevi i ograničenja

Prilikom dizajniranja stroja potrebno je obratiti pažnju na nekoliko ključnih varijabli. Osim elektromagnetskih i mehaničkih zahtjeva koje stroj mora postići potrebno je uzeti u obzir i vanjska ograničenja koja dolaze od upravljačkog i energetskog sustava. Kao upravljački sustav stroja odabran je projekt otvorenog koda *SimpleFOCproject*. *SimpleFOCproject* nudi rješenje temeljeno na otvorenom protokolu za upravljanje beskolektorskih motora, odnosno motora s permanentnim magnetima. Izvedbeni oblik pločice je tzv. *arduino shield* [19].



Slika 3.1: Simple FOC shield

Pločica može biti napajana iz izvora napona naponske razine između 12 i 24 V s maksimalno dozvoljenim naponom od 35 V i maksimalno dozvoljenom ulaznom strujom od 5 A. Maksimalna izlazna snaga iznosi 120 W. Također, preporučeni minimalni otpor upravljanog stroja mora biti veći od 10 Ω .

Zahtjev koji stroj mora ispuniti je minimalan moment koji stvara na niskim brzinama vrtnje. Najmanji moment koji stroj mora proizvesti iznosi 20 mNm.

Stroj je potrebno dizajnirati tako da proizvede dovoljno momenta te da pri tome ostane u granicama mogućnosti upravljačkog sustava.

3.2. Usporedba namota pomoću simulacija metodom konačnih elemenata

Kako bi se usporedio koncentrirani spiralni i raspodijeljeni radijalni namot, napravljen je 3D model strojeva pomoću programskog paketa *Solidworks* koji je podvrgnut proračunu metodom konačnih elemenata u programskom paketu *Simcenter Magnet*. Cilj simulacije ovih dvaju strojeva je usporedba valnih oblika napona i njegove efektivne vrijednosti. Inducirani napon stroja trebao bi biti što veći na zadanoj brzini kako bi se mogao upotrijebiti planirani upravljački sustav te kako bi ulazna struja za postizanje zadanog momenta bila što manja. Strojevi imaju određene parametre jednake, a parametri koji su dani u tablici 3.1.

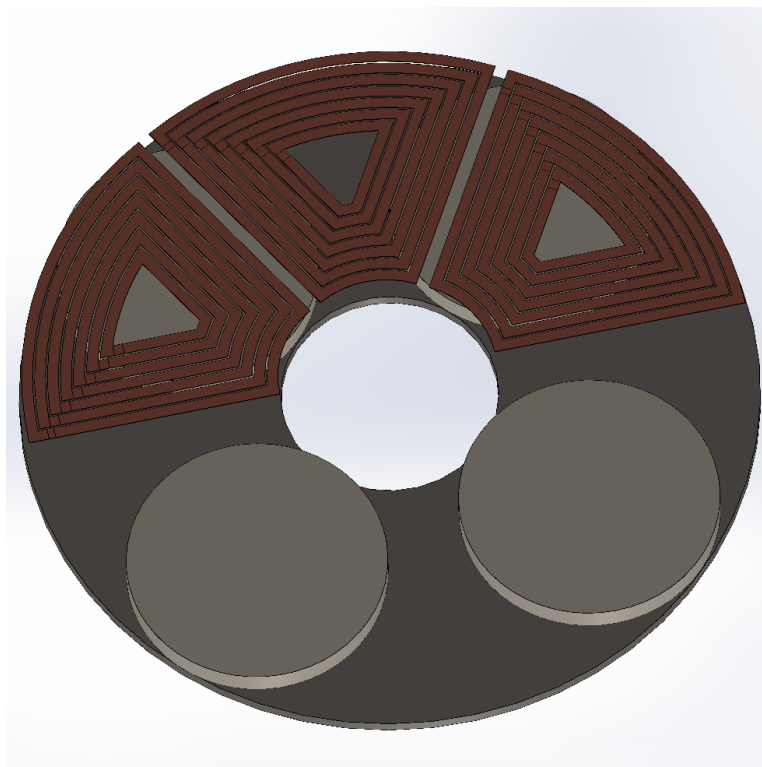
Tablica 3.1: Zajednički parametri analiziranih strojeva

| Parametar | Opis | Vrijednost |
|-------------|----------------------------|-----------------------|
| D_{out} | vanjski promjer | 90 mm |
| D_{in} | unutarnji promjer | 24 mm |
| h_{pm} | debljina magneta | 2 mm |
| h_{trace} | debljina vodiča | 0.1 mm |
| δ | visina zračnog raspora | 1 mm |
| n | brzina vrtnje u simulaciji | 200 min ⁻¹ |
| m | broj faza | 3 |

Strojevi s koncentriranim namotom imaju broj utora po polu po fazi jednak 0.5, a broj utora po polu i po fazi može se izraziti kao:

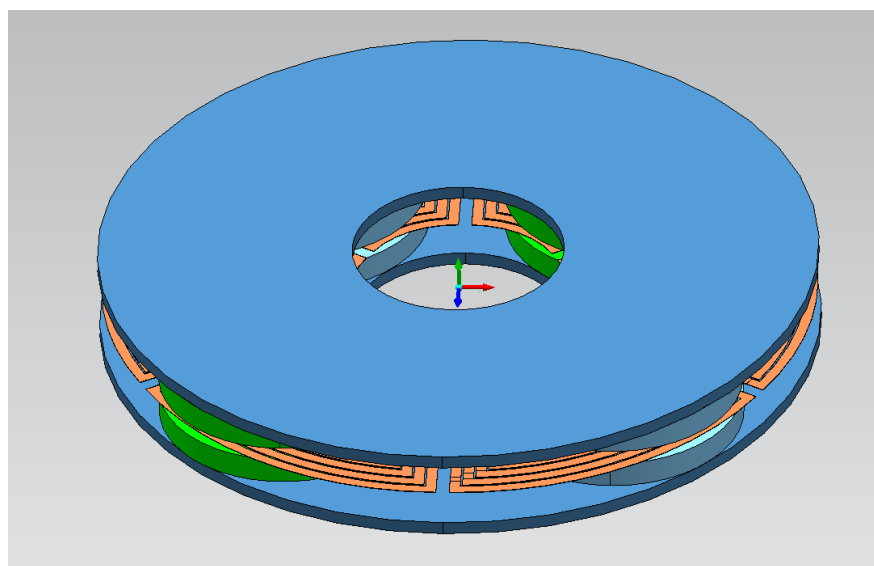
$$q = \frac{N}{2pm} \quad (3.1)$$

gdje je N broj utora, m broj faza i p broj pari polova. U ovom slučaju odabran je stroj sa šest utora i četiri pola, odnosno dva para polova.

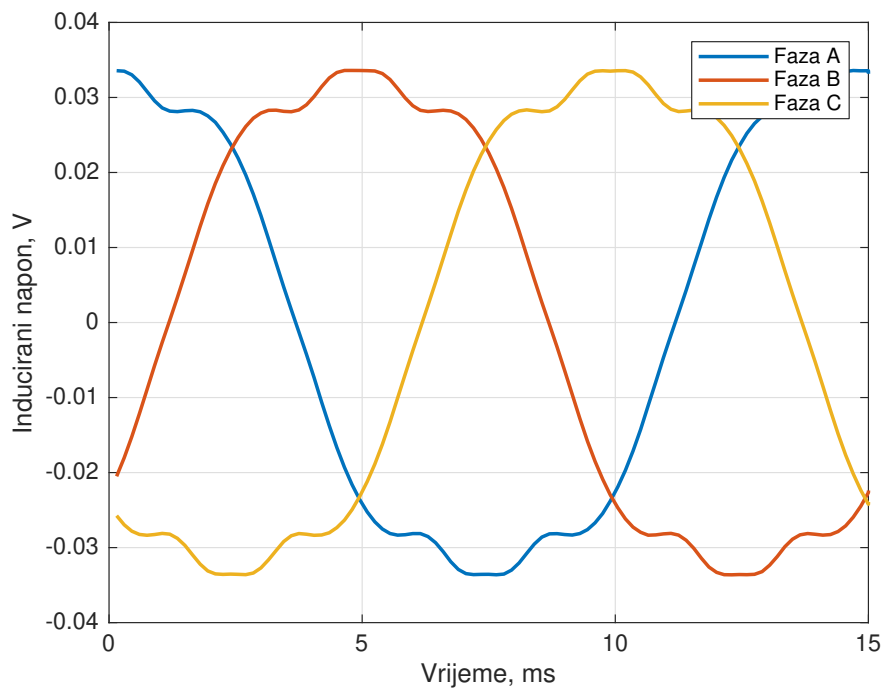


Slika 3.2: Model stroja s koncentriranim namotom

Model se sastoji od dva rotora s po četiri magnetna svaki i od šest spiralnih svitaka. Slika 3.2 prikazuje jedan rotor i tri svitka zbog preglednosti. Zavoji u svitku su ne-jednakih veličina, smješteni spiralno jedan unutar drugoga i spojeni u seriju. Stroj je simuliran u režimu praznog hoda te su izmjereni inducirani naponi faza.

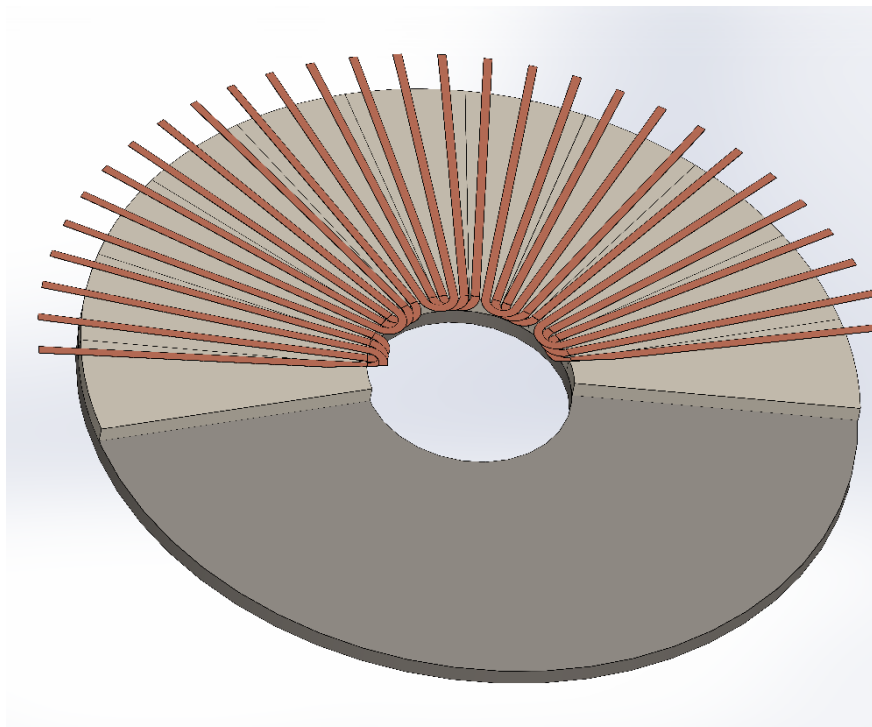


Slika 3.3: Model simuliranog stroja s koncentriranim namotom



Slika 3.4: Inducirani naponi koncentriranog namota

Efektivna vrijednost induciranog faznog napon stroja iznosi $0,025 \text{ V}$ pri 200 min^{-1} .
 Za simulaciju raspodijeljenog namota odabran je stroj sa 120 utora i 20 polova, odnosno s 10 pari polova.

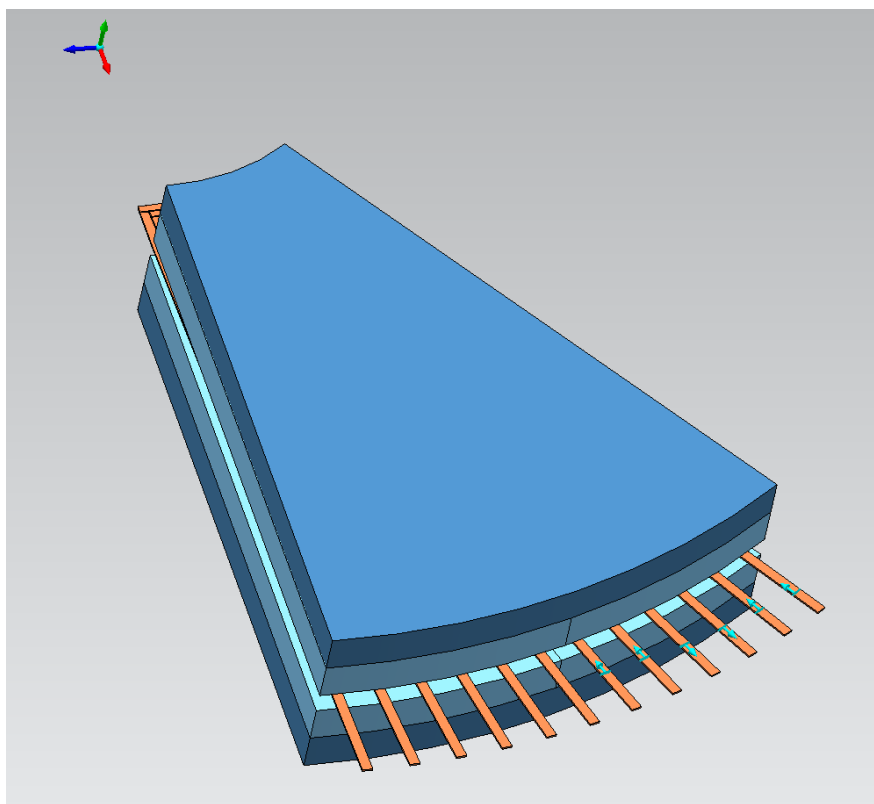


Slika 3.5: Model stroja s distribuiranim namotom

Broj utora po polu po fazi ovog stroja iznosi:

$$q = \frac{N}{2pm} = \frac{120}{20} = 2 \quad (3.2)$$

Za razliku od stroja s koncentriranim namotom, napravljen je parcijalni model 1/10 stroja s raspodijeljenim namotom. Razlog tome je višestruko smanjivanje vremena izvođenja simulacije. Parcijalni model stroja moguće je izraditi zbog činjenice da je stroj periodičan, tj. da se elektromagnetska slika stroja periodički ponavlja svaka dva pola.

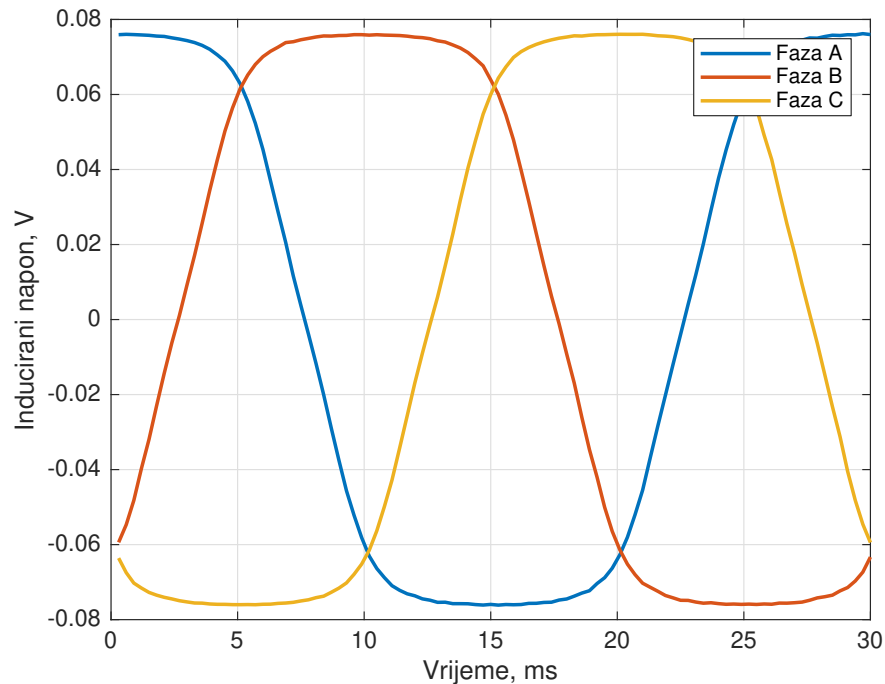


Slika 3.6: Parcijalni model simuliranog stroja s distribuiranim namotom

Krajevi vodiča stroja na obodu nisu spojeni iz dva razloga. Prvi razlog je lakše i jednostavnije postavljanje modela stroja i priprema za simulaciju koja postoji zbog ograničenja korištenog programskog paketa. Zbog prirode raspodijeljenih namota, moguće je spojiti krajeve vodiča na više načina. Konačni prijedlog sheme namatanja, odnosno spajanja krajeva vodiča je izvršen prilikom dizajna tiskane pločice. Za potrebe simulacija namot je virtualno spojen u serijski zvijezda spoj.

Efektivna vrijednost inducirano napona stroja s raspodijeljenim namotom u ovom modelu iznosi 0,057 V kao što je vidljivo na grafu. Budući da je simulirana

samo 1/10 stroja, tada se ukupni inducirani napon mora izračunati uzimajući periodičnost i spoj namota u obzir. U ovom slučaju vodiči faza su svi spojeni u seriju pa se napon množi s 10. Efektivna vrijednost induciranoeg faznog napon cijelog stroja iznosi 0,57 V.



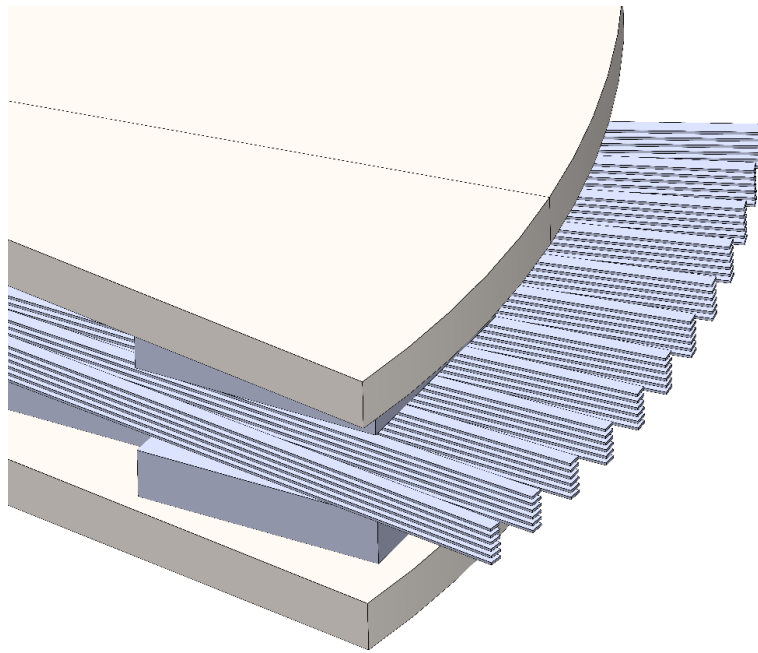
Slika 3.7: Inducirani naponi distribuiranog stroja

Vršna vrijednost induciranoeg napona mora biti dovoljno velika kako bi upravljački sustav mogao kontrolirati stroj na niskoj brzini vrtnje stoga je stroj s raspodijeljenim namotom odabran kao kandidat za daljnje promatranje.

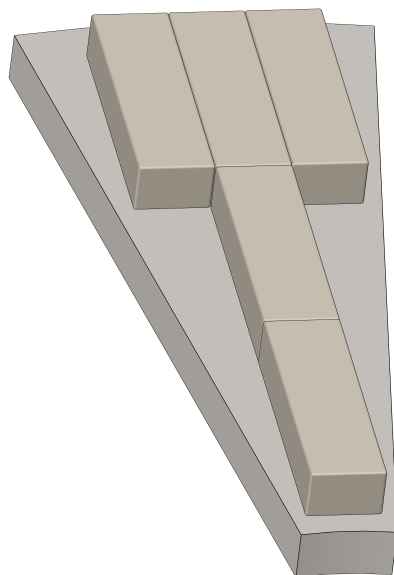
3.3. Dimenzioniranje konačnog prijedloga stroja

Kako bi se napon dodatno povećao na istoj brzini vrtnje, potrebno je namot stroja napraviti s više zavoja. To je moguće izvesti uz dodatak planarnih slojeva vodiča koji su serijski povezani s prethodnim slojevima. Broj mogućih slojeva ograničen je tehnološkim mogućnostima proizvodnje tiskane pločice. Zadovoljavajući inducirani napon uz poštivanje prethodnog uvjeta rezultirao je strojem koji ima šest slojeva vodiča.

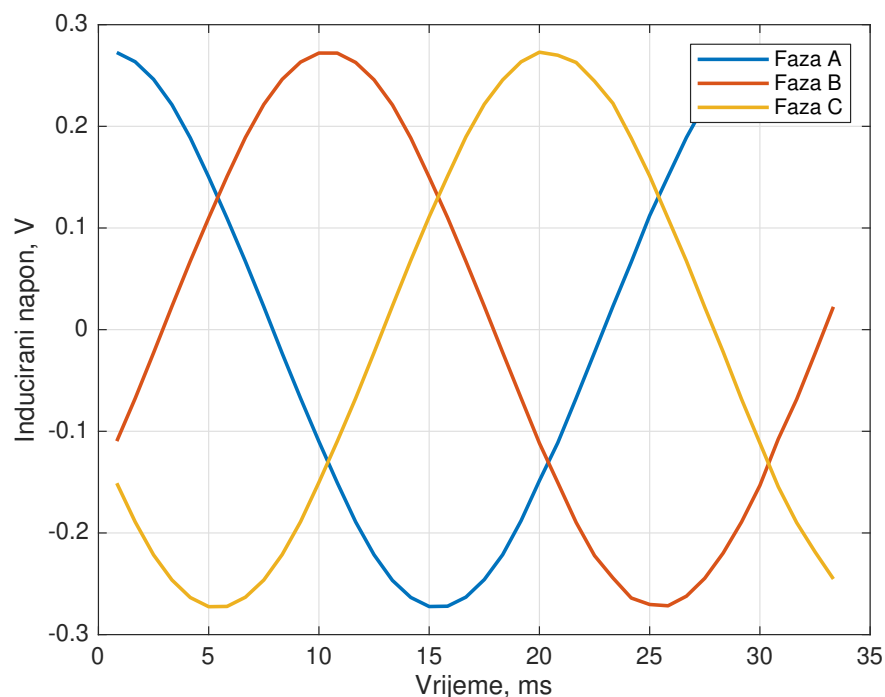
Uz dodavanje dodatnih slojeva vodiča promijenjena je i geometrija magneta na rotorima. Odabrani su kataloški dostupni neodimijski magneti N45H. Kako bi se prostor na kojim su magneti maksimalno iskoristio i kako bi se smanjili gubitci u magnetima, jedan pol stroja sastoji se od pet magneta.



Slika 3.8: Model stroja sa šest slojeva vodiča



Slika 3.9: Model parcijalnog segmentiranog pola



Slika 3.10: Inducirani naponi konačnog dizajna

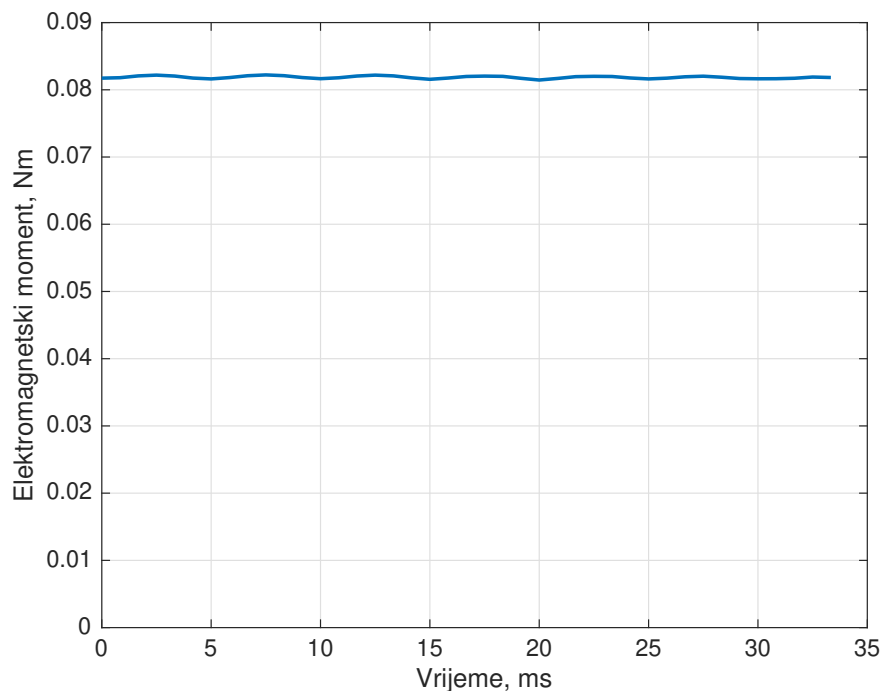
Inducirani fazni napon parcijalnog modela stroja (1/10) stroja sa šest slojeva iznosi 0,156 V. inducirani fazni napon cijelog stroja stoga iznosi 1,56 V dok linijska vrijednost induciraniog napona iznosi 2,7 V.

Upravljačka elektronika ima mogućnost upravljanja pozicije stroja bez senzora položaja uz pomoć mjerenja linijske struje. Da bi se postiglo upravljanje bez senzora položaja potrebno je ograničiti struju koja ulazi u stroj na 3 A.

Srednja vrijednost momenta parcijalnog modela stroja iznosi 0,082 Nm odnosno 0.82 Nm skalirana na cijeli stroj. Valovitost momenta iznosi 0,4 %. Vrijednost momenta zadovoljava postavljene minimalni zahtjev na stroj.

Korištenjem naponskih i strujnih vrijednosti dobivenih simulacijom stroja pod teretom moguće je dobiti otpor konačnog prijedloga dizajna stroja. Linijski otpor stroja iznosi 9Ω što je niže od postavljenog zahtjeva, ali numerički model ne uzima u obzir spojeve na između vodiča što znači da će krajnji otpor stroja biti viši. Analitičkim proračunom dobivena je vrijednost linijskog otpora od $10,2 \Omega$ te on u obzir uzima spojeve između vodiča.

Induktivitet stroja određen je u $d-q$ sustavu. Induktivitet stroja važan je parametar sa strane upravljanja stroja. Ako je induktivitet stroja relativno malen, stavlja se veći teret na upravljačku elektroniku. Numeričkim proračunom dobivena je vrijednost induktiviteta u uzdužnoj osi L_d od $110,4 \mu\text{H}$ dok je ta vrijednost u poprečnoj osi L_q



Slika 3.11: Moment stroja na 3A

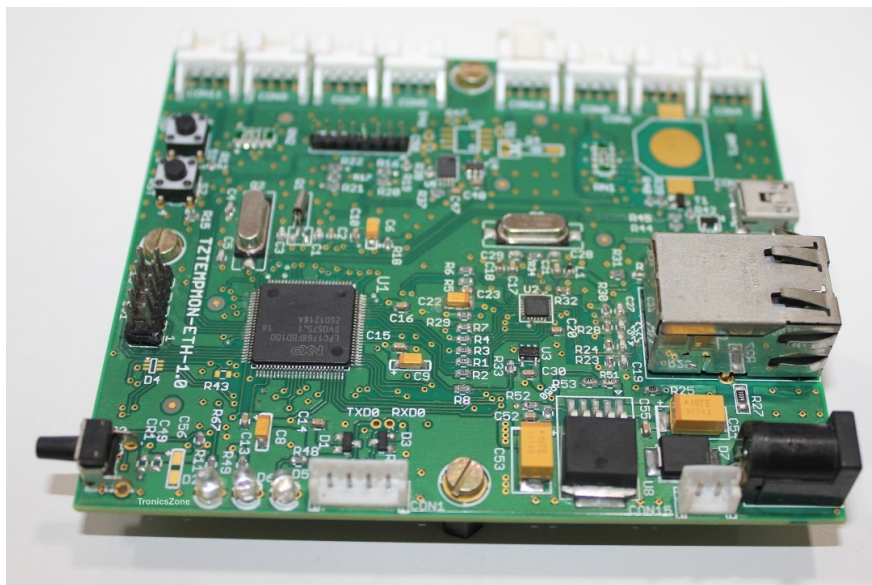
107,9 μH . Vrijednosti induktiviteta su u očekivanim i zadovoljavajućim granicama i time što su bliske potvrđuju da je ovo stroj s površinskim magnetima.

3.4. Tehnološka izrade tiskane pločice

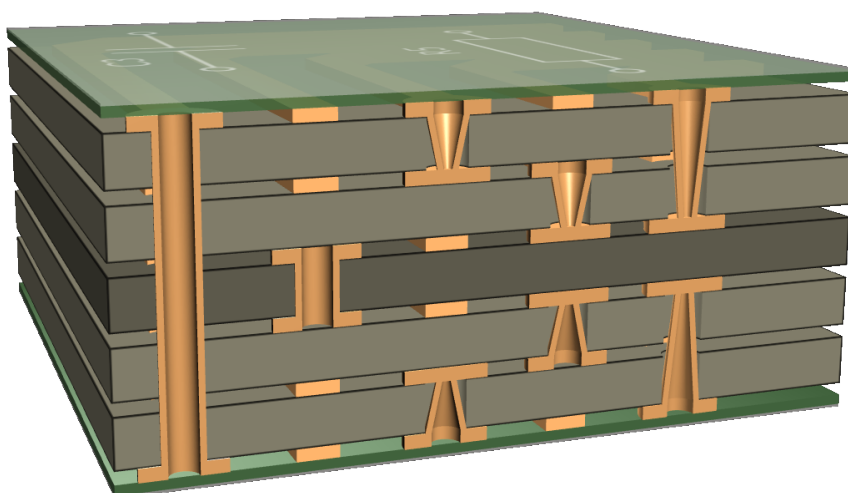
Proizvodnja i upotreba tiskanih pločica široko je rasprostranjena u današnjoj industriji. Tiskane pločice koriste se u svim elektroničkim uređajima u nekom obliku. U posljednjih nekoliko godina dostupnost izrade tiskanih pločica raste te je dostupna sve većem broju krajnjih kupaca. Također dostupna je izrada tehnološki sve kompleksnijih pločica.

Kod tipične tiskane pločice, komponente koje čine tiskanu pločicu funkcionalnom nalaze se na gornjoj i donjoj površini pločice. Tiskana pločica služi kao kompaktni medij za povezivanje komponenata i njihovu fiksaciju u proizvoljnom obliku pločice.

Tiskane pločice mogu biti napravljene od raznih materijala. Najčešće korišteni materijal kod proizvodnje tiskanih pločica je vrsta staklenih vlakana, poznata kao i FR4 [20]. Staklena vlakna nude dobru stabilnost pod utjecajem promjena temperature, ne raspadaju se s vremenom, a sam materijal nije suviše skup. Ploče od staklenih vlakana pokrivene su tankim slojem bakra, najčešće s obje strane, a željeni vodiči se na ploči dobivaju procesom jetkanja. Jetkane ploče od staklenih vlakana tada se mogu,



Slika 3.12: Tiskana ploča s komponentama



Slika 3.13: Povezivanje slojeva tiskane pločice

ovisno o dizajnu, složiti u stog (eng. *stack*) te se vodiči mogu povezati takozvanom „viom“ (eng. *via*).

Vrsta *via* koja će se koristiti kod spajanja slojeva ovisi o tome kako ona povezuje slojeve i gdje se nalazi u stogu. *Vie* korištene kod dizajniranja statora su:

- *Through hole via*
- *Blind via*
- *Buried via*

Vrste *via* pokazane su slikom 3.13. *Through hole via* označava *viu* koja prolazi kroz cijelu debljinu pločice, Takve *vie* korištene su kod povezivanja dva vanjska sloja

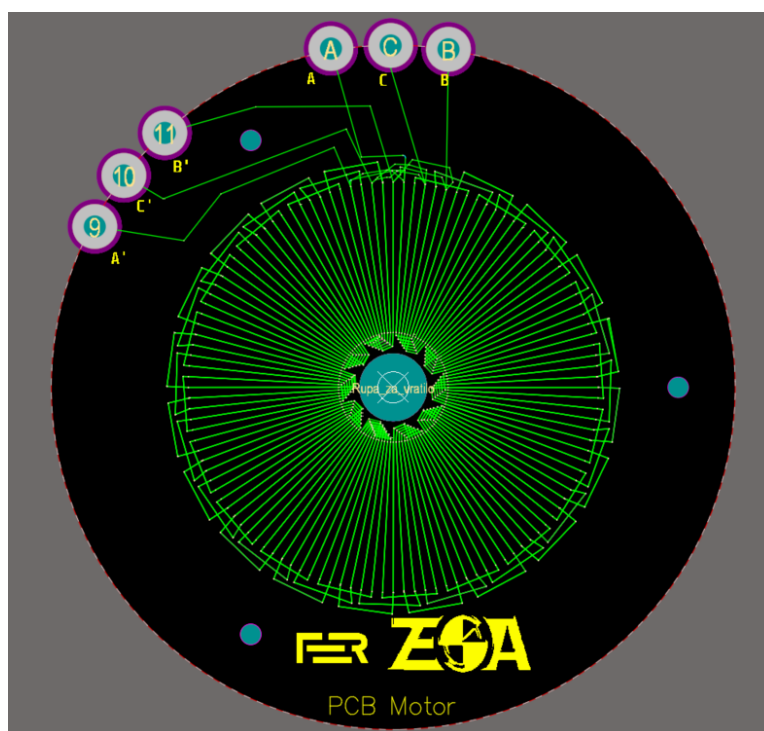
pločice ili češće kod povezivanja svih slojeva na zajednički signal kao što je uzemljenje. U ovome dizajnu *through hole via* korištena je za stvaranje rubnih kontaktnih terminala budući da slojevi ne dijele zajednički signal tj. u ovome slučaju zajednički potencijal. Drugi tip *via* korištene kod dizajniranja su *blind via*. *Blind via* spajaju površinski sloj s bio kojim unutarnjim slojem. Kod dizajniranja tiskane pločice te *via* korištene su prilikom povezivanja prva dva odnosno zadnja dva sloja. Konačno zadnji tip korištene *via* je *buried via* koja povezuje bilo koja dva unutarnja sloja tiskane pločice.

Osim na tip, *via* se mogu podijeliti i po količini iskorištenog bakra pa tako postoje dvije vrste *via*. Prvi tip koji je uobičajeno korišten naziva se samo *via*. Te *via* se izrađuju tako da se mikro svrdlom naprave provrti do potrebne dubine te se zatim zidovi provrta oblože bakrom. Dodatno se pobakrena *via* može ispuniti smolom ili punim bakrom ovisno o potrebi. Druga vrsta *via* je takozvana *mikrovia* ili μ *via*. *Mikrovia* se izrađuje pomoću lasera kod *via* koje imaju mali promjer. μ *via* karakterizira konusni oblik koji je vidljiv na slici 3.13. Te se *via* također mogu ispuniti bakrom ili smolom. U ovome dizajnu korištene su μ *via* zbog gustoće spojeva koji se nalazi na unutarnjem obodu stroja koji su vidljivi na slikama 3.14 i 3.15. Obične *via* korištene su prilikom dizajniranja terminala. Sve *via* su dodatno ispunjene bakrom.

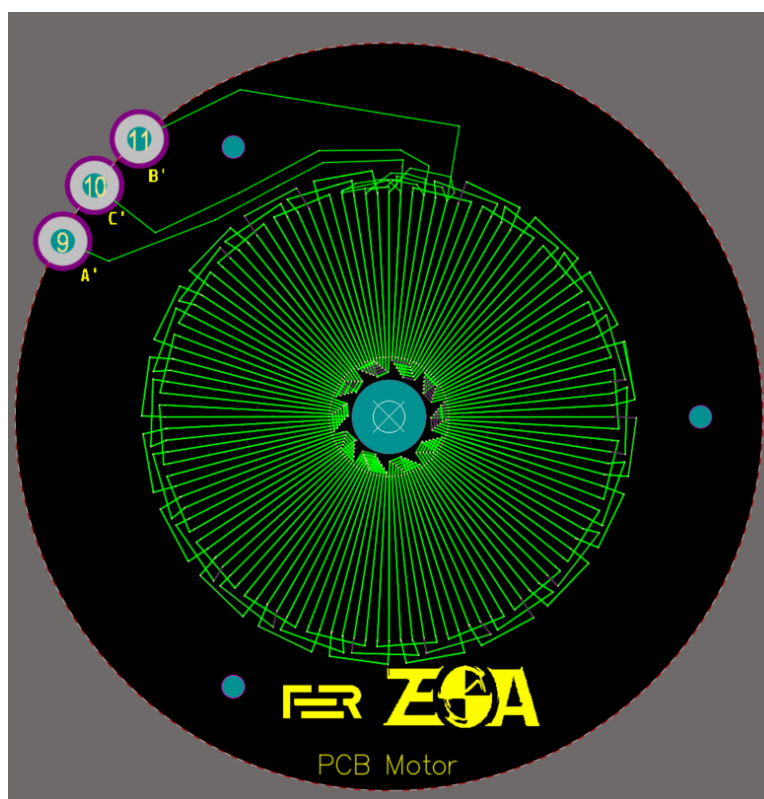
Na kraju, na gornjoj i donjoj površini tiskane pločice nalazi se takozvani *overlay* na kojem se mogu i uobičajeno se rade natpisi odnosno označen je smještaj svih komponenti. Stator projektiran u tehnologiji tiskanih pločica, sam po sebi, ne sadrži komponente na gornjoj i donjoj strani pločice. U ovome slučaju *overlay* sadrži natpise terminala kao i logotipe fakulteta i zavoda te naziv tiskane pločice što je vidljivo na slikama 3.14 i 3.15. Vodiči na pločici (eng. *traces*) spojeni su tako da tvore projektirani raspodijeljeni namot. Nakon razmatranja dostupne tehnologije, odlučeno je da vodiči namota budu spojeni u valoviti tip raspodijeljenog namota.

Zbog planarnog dizajna namota nije moguće spojiti vodiče iste faze u jednom sloju. Zbog toga je korišten jedan redundantni sloj koji služi kao poveznica između vodiča istih faza. Konačni broj slojeva namota koji se mora proizvesti iznosi dvanaest zbog jednog dodatnog redundantnog sloja po svakom od aktivnih slojeva. Zbog tehnološke nemogućnosti izrade takvog dizajna, odlučeno je da se izrade dvije tiskane pločice s po šest slojeva. Prva pločica sadrži dva para terminala koji služe kao ulazni i izlazni terminali. Izlazni terminali (označeni s ') na slici 3.14 spajaju se na drugu pločicu koja ima jedan par terminala i na kojoj se nalazi zvjezdište namota.

Parametri dizajnirane tiskane pločice dani su u tablici 3.2.



Slika 3.14: Tiskana pločica s namotom 1



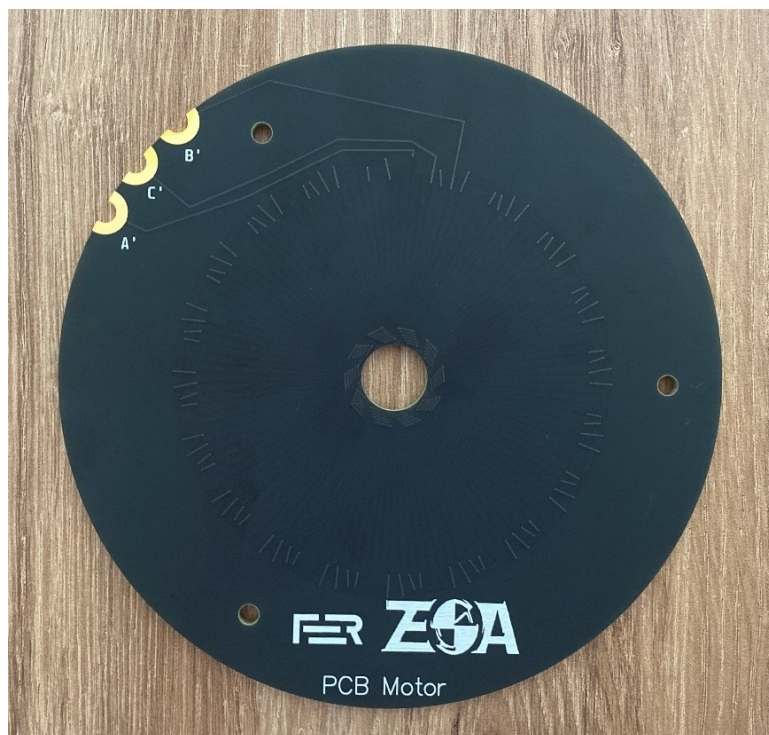
Slika 3.15: Tiskana pločica s namotom 2

Tablica 3.2: Parametri tiskane pločice

| | |
|--|-------------------|
| Promjer | 150 mm |
| Tip tiskane pločice | HDI |
| Broj slojeva | 6 |
| Debljina | 4 mm |
| Materijal | Tg170 FR4 |
| Minimalan razmak | 3 mil = 0.0762 mm |
| Minimalna širina vodiča | 3 mil = 0.0762 mm |
| Minimalni promjer prolaznih rupa (uključujući vie) | 0.15 mm |
| Konačna masa bakra po sloju | 28 g |



Slika 3.16: Tiskana pločica 1



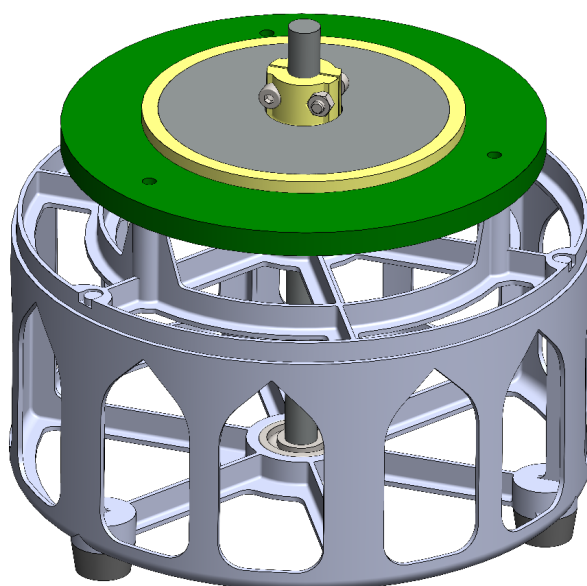
Slika 3.17: Tiskana pločica 2

3.5. Mehanički dizajn motora i izgrađeni prototip

Mehanički model postava izrađen je tako da se minimizira teret nad tiskanim pločicama. Vratilo stroja je uležišteno i centrirano uz pomoć dvodijelnog nosača stroja koje se izradilo uz pomoć tehnologije 3D ispisa. Materijal korišten prilikom izrade je polietilen tereftalat glikol odnosno PETG koji je uobičajeni materijal kod izrade komponenata tehnologijom 3D ispisa. Materijal je odabran zbog svoje mehaničke čvrstoće i lakoće korištenja prilikom printanja. Temperatura mlaznice kod printanja iznosi između 220 i 240 °C, a temperatura podloge iznosi između 80 i 90 °C. Komponente su izrađene s visinom sloja od 0,15 mm s mlaznicom promjera 0,4 mm. Nosači rotora su pričvršćeni za vratilo te se tako osigurala duljina zračnog raspora. Vratilo slobodno prolazi kroz tiskane pločice i ne vrši silu ni u jednom smjeru na tiskane pločice.

Kako bi se nosač postava dodatno osigurao, ugrađene su gumene podloške na dno nosača koje su učvršćene samouvrtanim vijcima. Skup od dvije tiskane pločice, prikazan zelenom bojom, poravnat je s rupama za učvršćivanje na nosaču te je osiguran samouvrtanim vijcima. Provrti na tiskanim pločicama postavljeni su tako da centriraju pločice te da poravnaju terminale na tiskanim pločicama koji služe za povezivanje dva dijela statora.

Rotori stroja sastoje se od feromagnetske jezgre, kućišta rotora te permanentnih



Slika 3.18: Model postava



Slika 3.19: Rotor sa segmentiranim polovima

magneta koji su postavljeni u rotore s naizmjenično variranim polovima sjever - jug, jug – sjever. Na slici 3.19 prikazan je rotor, a polaritet magneta je označen crnim flomasterom.



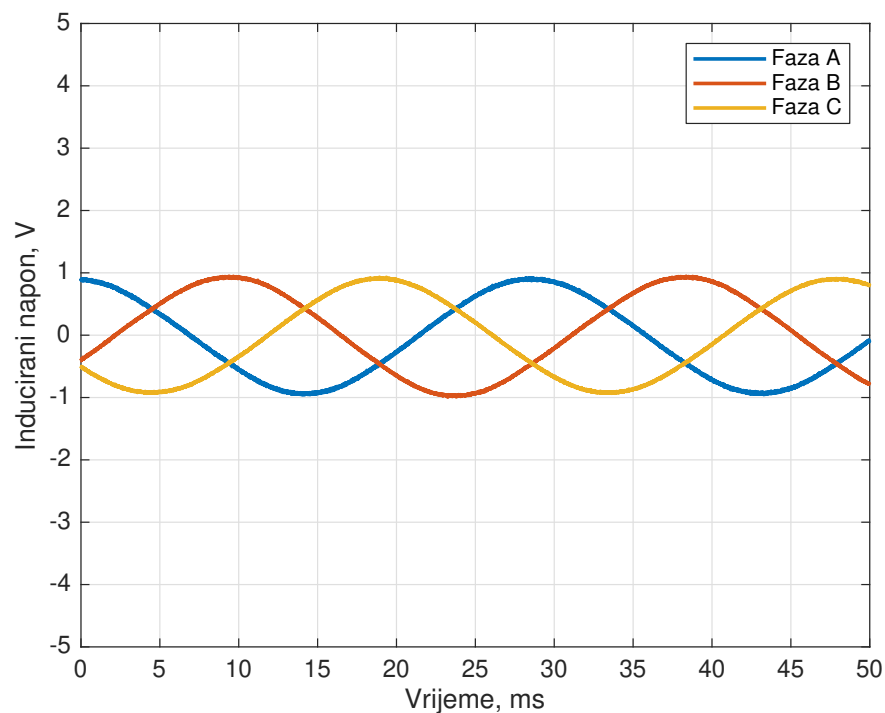
Slika 3.20: Nosač postava



Slika 3.21: Sklopljeni postav

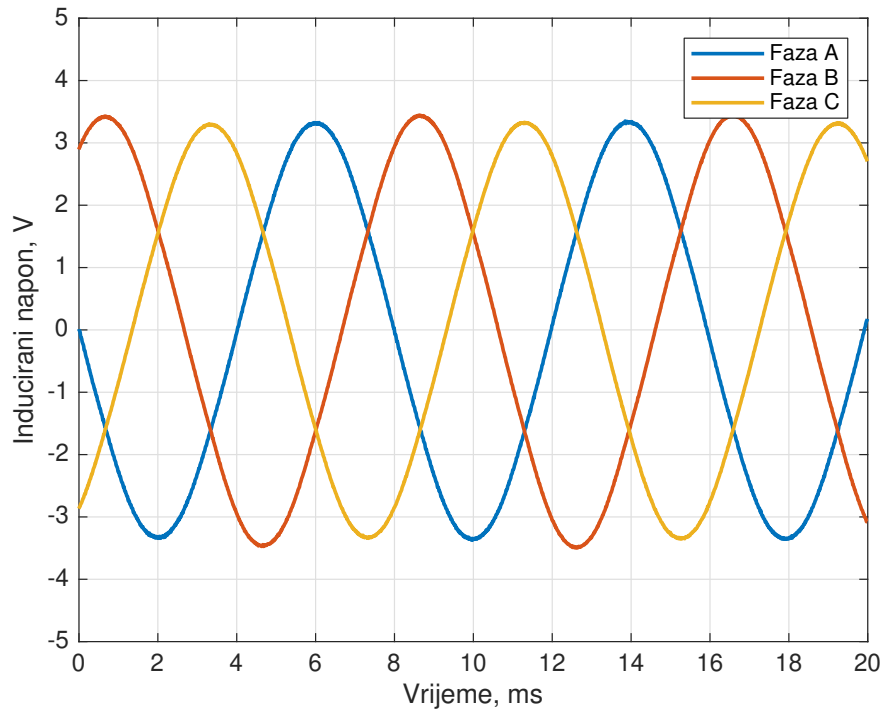
4. Rezultati

Motor je prvo ispitan u generatorskom praznom hodu. Generatorski prazni hod je ostvaren tako da je motor pokretan vanjskim izvorom vrtnje (akumulatorskom bušilicom), a kao rezultat su akvizicijskim sustavom snimljeni valni oblici induciranih napona. Rezultati testiranja dani su slikama 4.1, 4.2, 4.3. Na svim slikama vrijedi da inducirani naponi svih faza imaju istu frekvenciju i amplitudu te su faze međusobno pomaknute za 120 električnih stupnjeva što ukazuje na simetričan trofazni sustav.

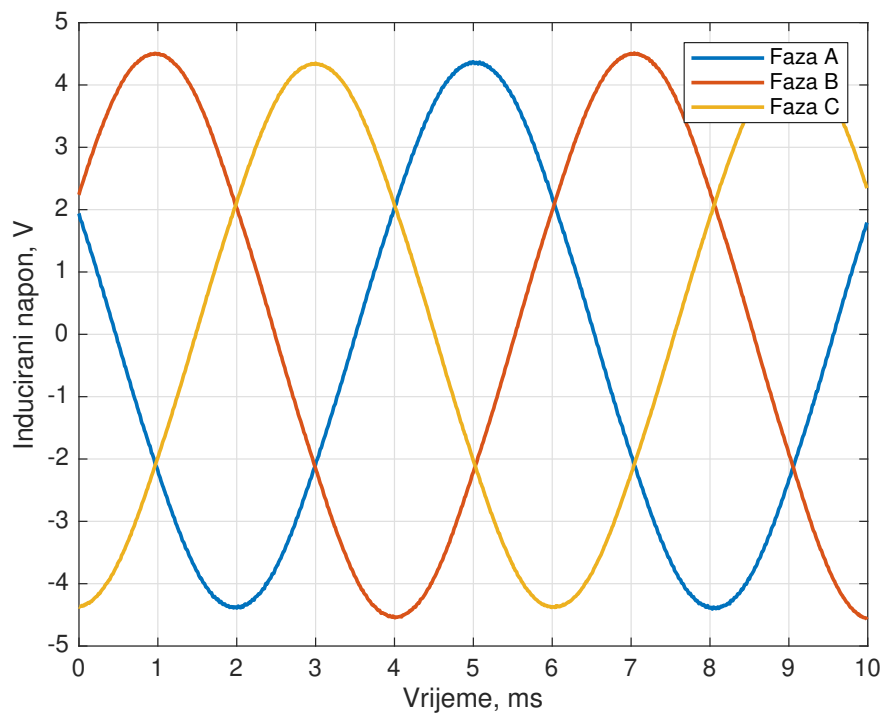


Slika 4.1: Inducirani napon na 207 min^{-1}

Kako bi se stroj mogao pokrenuti u motorskom režimu rada, korištena je razvojna pločica Arduino Mega 2560 i *SimpleFOCshield* s postavom pokazanim na slici 4.5. Arduino Mega se napaja je iz USB-B priključka preko prijenosnog računala dok se FOCshield napaja iz vanjskog izvora napona. Vanjski izvor napona dakle služi kao DC napon invertera (FOCshield). Strujni limit izvora iznosi 1 A, dok je napon izvora



Slika 4.2: Inducirani napon na 750 min⁻¹



Slika 4.3: Inducirani napon na 990 min⁻¹

podešen na 12 V. Korišten je Arduino *integrated development environment* (IDE) kako bi se potrebne biblioteke mogle učitati u Arduino Mega razvojnu pločicu koja kontrolira *simple FOC shield*. Biblioteke sadrže značajke kao što je raspored *pinova*, pozive na odgovarajuće datoteke koje sadrže skup naredbi itd. Za potrebe upravljanja strojem u motorskom režimu rada napisan je dio koda koji motor ubrzava iz stacionarnog položaja do nazivne brzine od 200 min^{-1} ili približno 21 rad/s . Motor po rampi ubrzava svakih 50 ms korakom od $0,05 \text{ rad/s}$. Dio koda vidljiv je na slici 4.4.

```
// Open loop motor control example
#include <SimpleFOC.h>

BLDCMotor motor = BLDCMotor(10);
BLCDriver3PWM driver = BLCDriver3PWM(9, 5, 6, 8);

//target variable
int i=0;
float target_velocity = 1;
unsigned long StartTime = millis();
unsigned long CurrentTime = millis();

// instantiate the commander
Commander command = Commander(Serial);
void doTarget(char* cmd) { command.scalar(&target_velocity, cmd); }
void doLimit(char* cmd) { command.scalar(&motor.voltage_limit, cmd); }

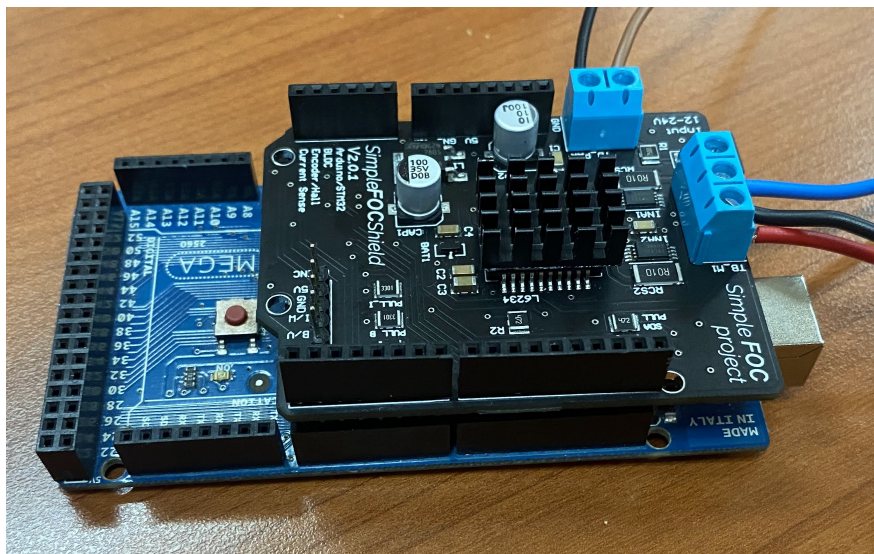
void setup() {

    driver.voltage_power_supply = 12;
    driver.voltage_limit = 12;
    driver.init();
    motor.linkDriver(&driver);
    motor.voltage_limit = 12; // [V]
    motor.controller = MotionControlType::velocity_openloop;
    motor.init();
    command.add('T', doTarget, "target velocity");
    command.add('L', doLimit, "voltage limit");
    Serial.begin(115200);
    Serial.println("Motor ready!");
    Serial.println("Set target velocity [rad/s]");
    _delay(1000);
}

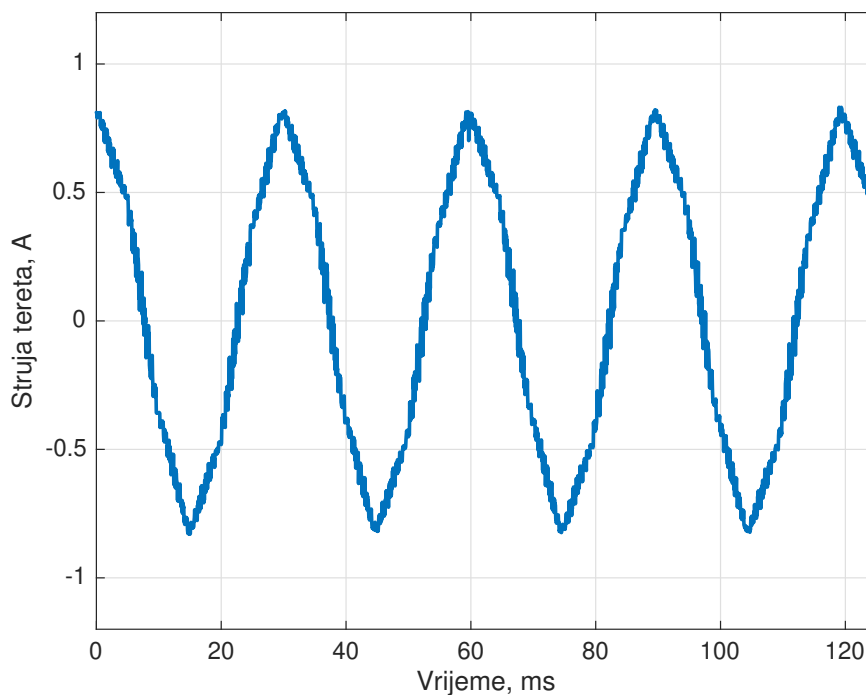
void loop() {

    CurrentTime = millis();
    if (target_velocity<=(float)21.0 && ((CurrentTime - StartTime) > 50))
    {
        target_velocity=target_velocity+0.05;
        StartTime = millis();
    }
    motor.move(target_velocity);
    command.run();
}
```

Slika 4.4: Ubrzavanje motora po rampi



Slika 4.5: Arduino Mega s FOC shieldom



Slika 4.6: Fazna struja statora u praznom hod u pri 25% nazivnog motorskog opterećenja

Valni oblik fazne struje dan je slikom 4.6. Valni oblik struje snimljen je uz pomoć strujnih kliješta i akvizicijskog sustava *Dewesoft Sirius*. Struja u praznom hod u koja ulazi u stroj pokriva gubitke trenja te se nalazi u očekivanom rasponu. Ostvareno opterećenje iznosi oko 25 % nazivnog motorskog opterećenja međutim ostvaruje dovoljno momenta za gimbal primjenu. Zbog ograničenja laboratorijskog postava za ostvarivanje malih tereta, nije bilo moguće ispitati motor pri nazivnom teretu.

5. Zaključak

PCB motor projektiran u ovome radu pokazuje moguću primjenu u *gimbal* sustavu. Korektnim mehaničkim dizajnom i preciznom izradom komponenata stroj je napravljen tako da ispunjava očekivanu elektromagnetsku sliku, što je provjereno testiranjem stroja u režimu praznog hoda i u motorskom režimu rada. Stroj je u izvedbi pomoću tiskanih pločica lako je serijski proizvesti u većim količinama zbog dostupne tehnologije izrade, a to može značajno smanjiti cijenu takvih strojeva. Zbog svoje kompaktne aksijalne duljine i male mase takvi strojevi su sve više poželjniji naspram klasičnih strojeva s feromagnetskom jezgrom rotora. Također zbog nedostatka feromagnetske jezgre takvi strojevi imaju razmjerno visoku učinkovitost zbog eliminiranih gubitaka u željezu. To ih čini privlačnim kandidatima za korištenje u sustavima s ograničenim volumnim i masenim resursima kao što je pomorska industrija i avioindustrija. S obzirom na korištene materijale prilikom izrade tiskane pločice, moguće je projektirati stroj kojem nije potreban hladnjak te se toplina stroja odvodi samo konvekcijom. To dodatno pojednostavljuje dizajn stroja i smanjuje njegovu cijenu. Tržišno dostupni proizvodi s malim i srednjim snagama kao što su električni romobili i dronovi postaju sve zastupljeniji, a time raste i potreba za alternativnim pogonskim rješenjem. Ono se preciznim dizajnom može pronaći u obliku strojeva s aksijalnim tokom s permanentnim magnetima izrađenima pomoću tehnologije tiskanih pločica.

6. Zahvala

Zahvaljujem se mentoru izv.prof.dr.sc. Stjepanu Stipetiću na vodstvu i uloženom trudu za ostvarivanje ovog rada. Također želio bih se zahvaliti Tomislavu Ivanišu, mag. ing. zbog ukazane pomoći kod puštanja u pogon upravljačke elektronike te Draženu Kubatoviću, dipl. ing. za rasprave i predložena poboljšanja mehaničkog dizajna. Ovaj rad je financijski podržalo poduzeće AVL-AST d.o.o. na čemu zahvaljujem direktoru g. Goranu Mirkoviću.

BIBLIOGRAFIJA

- [1] J. Gieras, R. Wang, and M. Kamper, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Springer Netherlands, 2008.
- [2] [https://bs.wikipedia.org/wiki/\\$\%\\$C5\\$\%\\$BDiroskop](https://bs.wikipedia.org/wiki/$\%$C5$\%$BDiroskop), pristup: 18.4.2022.
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/Gimbal>, pristup: 18.4.2022.
- [4] <https://www.captureguide.com/what-is-a-gimbal>, pristup: 18.4.2022.
- [5] <https://www.manfrotto.com/global/professional-3-axis-gimbal-up-to-2-2kg-mvg220/>, pristup: 18.4.2022.
- [6] J.-K. Lee, D.-H. Jung, H.-W. Kim, Y. Park, Y. G. Min, K.-C. Ko, S. Kim, W. Park, and J. Lee, "A study on design of torque motor for drone gimbal system," in *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2018, pp. 211–214.
- [7] https://www.alibaba.com/product-detail/High-Quality-Good-Price-8014-GBM8014_60796502656.html, pristup: 18.4.2022.
- [8] J. W. Sensinger, S. D. Clark, and J. F. Schorsch, "Exterior vs. interior rotors in robotic brushless motors," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, pp. 2764–2770.
- [9] <https://pcbstator.com/>, pristup: 18.4.2022.
- [10] <https://www.infinitumelectric.com/>, pristup: 18.4.2022.
- [11] <https://pcbstator.com/commercial-applications>, pristup: 18.4.2022.
- [12] https://pcbstator.com/sites/default/files/ECM_CaseStudy_Maritime_V2.pdf, pristup: 18.4.2022.

- [13] G. Jang and J. Chang, "Development of an axial-gap spindle motor for computer hard disk drives using pcb winding and dual air gaps," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 5, pp. 3297–3299, 2002.
- [14] M.-C. Tsai and L.-Y. Hsu, "Design of a miniature axial-flux spindle motor with rhomboidal pcb winding," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 10, pp. 3488–3490, 2006.
- [15] D. Gambetta and A. Ahfock, "Designing printed circuit stators for brushless permanent magnet motors," *Electric Power Applications, IET*, vol. 3, pp. 482 – 490, 10 2009.
- [16] F. Cupertino and S. Ettore, "Torque production capabilities of electrical machines with planar windings," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 2080–2085.
- [17] —, "Optimal traces arrangement in planar magnetic based slotless pmsm," in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 4656–4662.
- [18] S. Paul, M. Farshadnia, A. Pouramin, J. Fletcher, and J. Chang, "A comparative analysis of wave winding topologies and performance characteristics in ultra-thin printed circuit board axial-flux permanent magnet machine," *IET Electric Power Applications*, 05 2019.
- [19] https://simplefoc.com/#simplefoc_shiled, pristup: 20.06.2022.
- [20] https://www.electronics-notes.com/articles/constructional_techniques/printed-circuit-board-pcb/pcb-manufacturing-process.php, pristup: 22.06.2022.

Aksijalni motor s permanentnim magnetima temeljen na tehnologiji tiskanih pločica

Sažetak

U ovom radu obrađena je analiza, usporedba, projekt, izrada i testiranje aksijalnog motora s permanentnim magnetima čiji je stator izrađen u tehnologiji tiskanih pločica (tzv. PCB motor). Trenutno područje primjene ovih motora je u sustavima grijanja, ventilacije i klimatizacije (HVAC), brodskoj propulziji, fitnes opremi, medicinskim uređajima, robotici, obnovljivim izvorima energije itd. Na početku je prikazana motivacija izrade PCB motora za primjenu u gimbal sustavu i istražene su postojeće i komercijalno dostupne tehnologije. Nakon toga, korištenjem programskog paketa Solidworks izrađeni su trodimenzionalni modeli dijelova (parts) i sklopa (assembly) PCB motora sa svim bitnim elektromagnetskim značajkama (stator s namotom, rotor s magnetima). Zatim je korištenjem programskog paketa Simcenter Magnet takav trodimenzionalni model analiziran metodom konačnih elemenata. Analizirane su dvije tipične topologije za usporedbu te je jedna od njih odabrana na temelju specifičnosti odabrane namjene za tzv. gimbal sustav. Odabrana topologija iz jednog sloja tiskane pločice proširena je na potrebnih šest slojeva. Ponovno je izrađen trodimenzionalni model te su ponovno provedene simulacije. Zatim je u programskom paketu Altium Designer izrađen model tiskane pločice. Nakon toga je u programskom paketu Solidworks projektiran mehanički sklop (nosač statora, ležaji, vratilo, nosači rotora, magneti, feromagnetske jezgre rotora, odstojnici za magnete). Pojedini dijelovi su strojno izrađeni u vlastitom strojnom parku (vratilo, jezgre), naručeni (tiskane pločice, magneti, ležajevi), a ostatak je izrađen tehnologijom 3D ispisa. Konačno, napravljen je funkcionalan sklop PCB motora koji je ispitan u generatorskom praznom hodu i motorskom režimu.

Ključne riječi: PCB stator, tiskana pločica, aksijalni motor s permanentnim magnetima

Axial permanent magnet motor based on printed circuit board technology

Abstract

This work deals with the analysis, comparison, design, manufacturing, and testing of an axial permanent magnet motor with stator made in printed circuit board technology (PCB motor). The current field of application of these motors is in heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems, marine propulsion, fitness equipment, medical devices, robotics, renewable energy sources, etc. At the beginning, the motivation for making PCB motors for use in the gimbal system is presented and existing and commercially available technologies are explored. After that, using the software package Solidworks, three-dimensional models of parts and assemblies of PCB motors with all important electromagnetic features (stator with winding, rotor with magnets) were made. Then, using the software package Simcenter Magnet, such three-dimensional model was analyzed by finite element method. Two typical topologies were analyzed and one of them was selected based on the specifics of the selected application for the so-called gimbal system. The selected topology from one layer of the printed circuit board was extended to the required six layers. The three-dimensional model was redesigned, and simulations were performed again. Then a printed circuit board model was created in the Altium Designer software package. After that, a mechanical assembly (stator support, bearings, shaft, rotor supports, magnets, rotor ferromagnetic cores, magnet spacers) was designed in the Solidworks software package. Some parts are machine-made in our own machine park (shaft, cores), ordered (printed circuit boards, magnets, bearings), and the rest is made with 3D printing technology. Finally, a functional PCB motor assembly was made that was tested in generator no-load and motor mode.

Keywords: PCB stator, printed circuit board, axial permanent magnet motor