

Projektiranje i izrada upravljačkog sklopa sinkronog stroja s permanentnim magnetima

Erjavac, Frane

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:874719>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

**PROJEKTIRANJE I IZRADA UPRAVLJAČKOG SKLOPA
SINKRONOG STROJA S PERMANENTNIM MAGNETIMA**

Rijeka, srpanj 2024.

Frane Erjavac

0069092651

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

**PROJEKTIRANJE I IZRADA UPRAVLJAČKOG SKLOPA
SINKRONOG STROJA S PERMANENTNIM MAGNETIMA**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Rene Prenc

Rijeka, srpanj 2024.

Frane Erjavac

Rijeka, 16.03.2024.

Zavod: Zavod za elektroenergetiku
Predmet: Električni strojevi

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Frane Erjavac (0069092651)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike (1030)
Zadatak: **Projektiranje i izrada upravljačkog sklopa sinkronog stroja s permanentnim magnetima / Design and manufacturing of the control circuit for a permanent magnet synchronous machine**

Opis zadatka:

U radu će se analizirati konstrukcija i princip rada sinkronih motora s permanentnim magnetima i njihovog upravljačkog sklopa. Izvršit će se uporedba raznih izvedbi PMSM i upravljačkih sklopova te odabir stroja i pripadnog načina upravljanja koji daje najveću efikasnost i najmanje troškove izrade. Definirat će se glavni dijelovi trofaznog izmjenjivača. Električne sheme će se izraditi u programu Altium, a potom će uslijediti odabir komponenata. Zatim ide testiranje ispravnosti i analiza rada sklopa na prototipnoj pločici te izrada tiskane pločice u programu Altium. Cilj je na što jednostavniji način objasniti osnovni princip rada složenog upravljačkog sklopa PMSM na primjeru izrade istog i pokazati njegove prednosti nad ostalim električnim strojevima.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
izv. prof. dr. sc. Rene Prenc

Komentor:
dr. sc. Michele Rojnić

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:
prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADBI RADA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno koristeći se znanjima stečenim tokom studija uz pomoć mentora i služeći se navedenom literaturom.



Frane Erjavac

ZAHVALA

Zahvaljujem svom mentoru izv. prof. dr. sc. Rene Prencu i komentoru dr. sc. Micheleu Rojniću na savjetima i vodstvu pri izradi rada te omogućenom laboratoriju na Fakultetu i opremi za analizu rada.

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su bili velika podrška protekle tri godine studiranja.

SADRŽAJ

| | |
|---|-----------|
| 1. Uvod..... | 2 |
| 2. Sinkroni stroj s permanentnim magnetima..... | 3 |
| 2.1. Općenito o sinkronim strojevima | 3 |
| 2.2. Konstrukcija PMSM-a..... | 6 |
| 2.2.1. Građa statora | 6 |
| 2.2.2. Građa rotora | 10 |
| 3. Upravljački sklop sinkronog stroja s permanentnim magnetima | 14 |
| 3.1. Energetski krug | 14 |
| 3.2. Upravljački krug..... | 18 |
| 3.2.1. Algoritmi upravljanja..... | 19 |
| 3.3. Princip rada upravljačkog sklopa | 22 |
| 4. Projektiranje upravljačkog sklopa..... | 24 |
| 4.1. Silazni pretvarač napona | 25 |
| 4.2. Energetski dio sklopa..... | 27 |
| 4.3. Upravljački dio sklopa..... | 29 |
| 4.4. Sklop za očitavanje signala povratne EMS | 32 |
| 5. Izrada upravljačkog sklopa..... | 34 |
| 5.1. Dizajn tiskane pločice..... | 34 |
| 5.2. Lemljenje komponenata i montiranje hladnjaka | 37 |
| 6. Analiza rada sklopa..... | 39 |
| 6.1. Valni oblik upravljačkog signala | 40 |
| 6.2. Valni oblik izlaznog napona i struje | 42 |
| 7. Zaključak | 45 |
| 8. Popis literature..... | 46 |
| 9. Popis slika | 48 |
| 10. Popis tablica | 50 |
| 11. Popis oznaka i kratica | 51 |
| Sažetak / Abstract | 52 |

1. Uvod

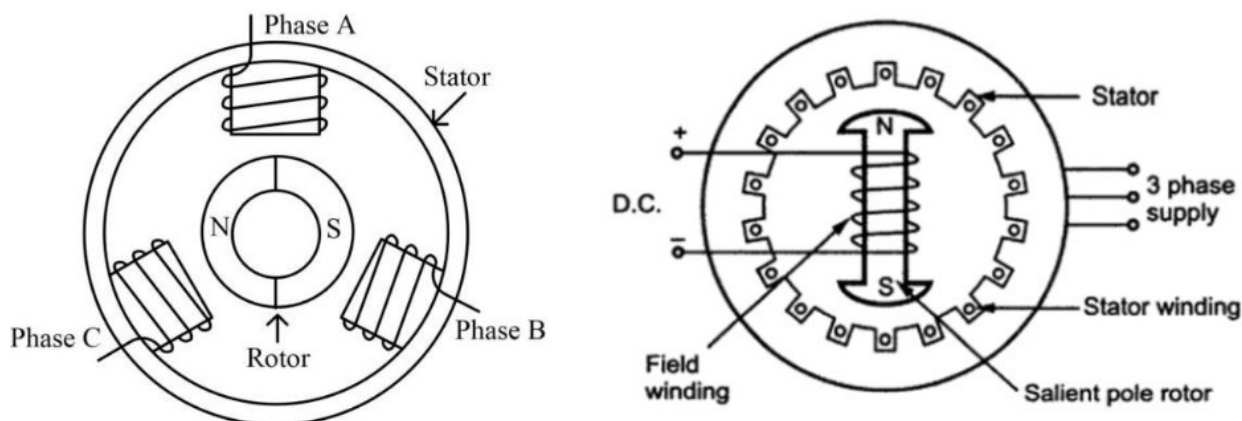
Naglim napretkom tehnologije zadnja dva desetljeća počinje revolucija električnih strojeva zbog sve veće potražnje, želje za zamjenom i unaprijeđenjem dosadašnjih strojeva. Električni stroj može raditi kao motor pri čemu se vrši pretvorba električne energije iz mreže ili akumulatora u korisnu mehaničku energiju kojom se obavlja neki rad. Isto tako, električni stroj može raditi kao generator pri čemu se mijenja smjer toka energije pa je tada ulazna energija mehanička, a izlazna električna koja se vraća u mrežu ili se obavlja punjenje akumulatora i sl. Usporedno s pogonskim sustavima na fosilna goriva sa stupnjem korisnosti $\eta = 15 - 35\%$, električni stroj je puno učinkovitiji ($\eta = 80 - 98\%$) zbog značajno manjih toplinskih gubitaka. U industrijskim postrojenjima gdje je vrlo lako dovesti električnu energiju do izvršnih elemenata odavno se koriste isključivo električni strojevi, dok se u električnim vozilima (automobilima, kamionima, motociklima, letjelicama) električna energija dobija iz baterijskih sustava. No, za isti volumen goriva i baterijskih ćelija, višestruko se više energije može dobiti iz goriva. Drugim rječima, gorivo ima veću gustoću energije (12.5 kWh/kg za benzin i 0.35 kWh/kg za današnje Li-ion baterije).

Međutim, kako bi sve to imalo smisla vrlo je važno optimizirati upravljanje električnim strojevima. Dosadašnji sustavi s asinkronim te kolektorskim DC strojevima su se pokazali vrlo jednostavnim za upravljanje i ne zahjevaju veliku pažnju, ali razvitkom brzih poluvodičkih sklopki i upravljačkih mikroprocesora sve se više koriste frekvencijski pretvarači, izmjenjivači i slični sklopovi. Sinkroni strojevi pokazali su se kao najbolja opcija za VFD pogone zbog najveće gustoće snage i momenta, odnosno u vrlo mali prostor može se smjestiti vrlo snažan električni stroj, što dovodi do uštede materijala i prostora. Također, prednost takvog pogona je ugladna regulacija brzine i razvijanje momenta od nulte do nazivne brzine vrtnje. U početku su takvi sustavi bili skupi i složeni za izradu zbog kompliciranih algoritama upravljanja, no danas su našli primjenu u svakom segmentu života, od alata i kućanskih aparata do raznih električnih vozila i fotonaponskih sustava. U ovom će se radu odvijati kompletna realizacija takvog sklopa za upravljanje BLDC motorom koji je isto tip sinkronog motora s permanentnim magnetima i koristi se najčešće u dronovima, kućanskim aparatima i lakim električnim vozilima. Cilj rada je na što jednostavniji način prikazati inače vrlo kompleksan sklop, ali isto tako učiniti da bude potpuno funkcionalan i pouzdan.

2. Sinkroni motori s permanentnim magnetima

2.1. Općenito o sinkronim strojevima

Sinkroni električni strojevi, za razliku od asinkronih, rotiraju sinkronom brzinom jer nema pojave klizanja, odnosno razlike u brzini vrtnje okretnog magnetskog polja statorskih namotaja i rotora, po čemu su dobili ime. Kod asinkronih strojeva, rotor je izrađen od međusobno izoliranih dinamo limova u kojima su ugrađeni kratkospojni prsteni gdje dolazi do induciranja napona te posljedično i pojave sile na vodič protjecan strujom u magnetskom polju. Rezultat je vrtnja rotora, ali uvijek manjom brzinom od okretnog magnetskog polja ($\omega_s > \omega_n$). Što je ta razlika veća, veći su i gubici koji se manifestiraju u obliku topline u bakrenim namotajima i željeznoj jezgri. Kod sinkronih strojeva, na rotoru se nalazi uzбудni namot ili kruta uzbuđa permanentnim magnetima. Pošto uzbudni namot cijelo vrijeme rotira, potrebno je osigurati dovod istosmjernog napona na rotor, što se najčešće izvodi kliznim prstencima i četkicama. To donosi drugi problem jer se četkice s vremenom troše i potrebno ih je mijenjati. Zbog toga, umjesto uzbudnog namota, mogu se smjestiti permanentni magneti koji imaju istu funkciju. Takvi se motori nazivaju sinkroni motori s permanentnim magnetima (PMSM) i najpogodniji su za elektroničko upravljanje promjenom frekvencije. Na slici 2.1. prikazana je usporedba klasičnih trofaznih sinkronih motora s trofaznim PMSM motorima.

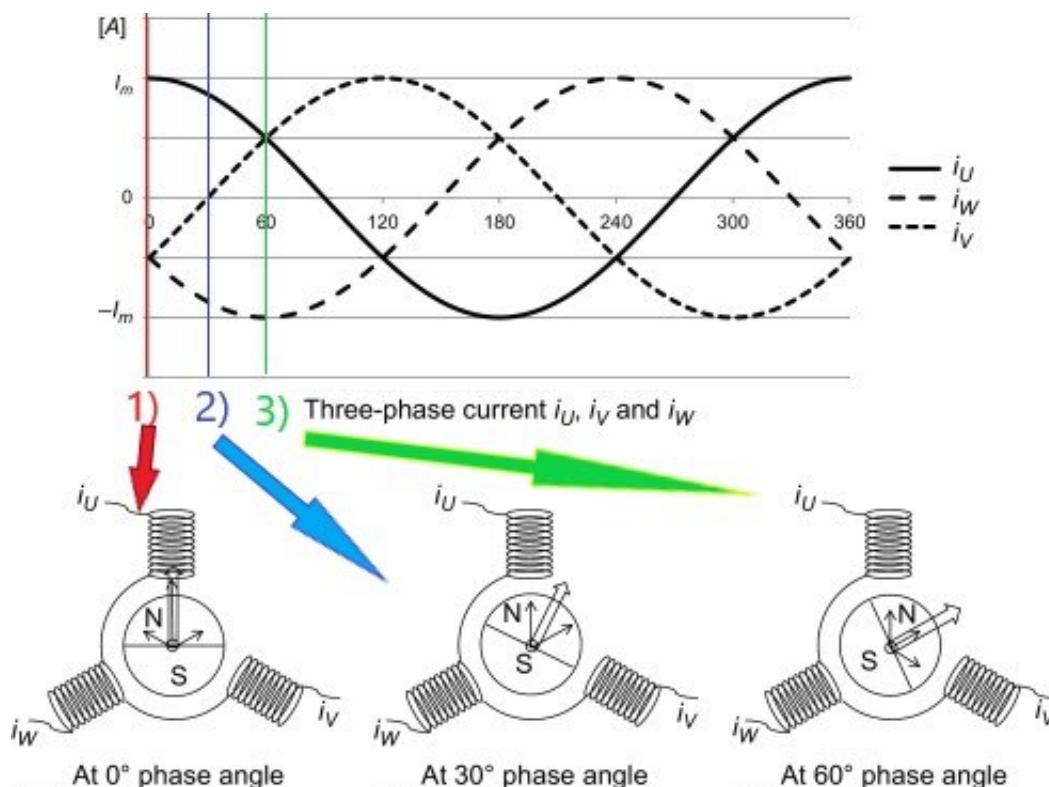


Slika 2.1. Usporedba sinkronog motora s krutom uzbuđom i uzbudnim namotom [1]

Može se primjetiti da razlike u statorskom namotu nema, već je glavna razlika u tome što PMSM nema fizičkog kontakta s rotorom za razliku od tipičnih sinkronih strojeva. Permanentni magneti su najčešće feritni (željezni oksid) ili neodimijski (NdFe). Feritni su puno otporniji na vanjske utjecaje, temperaturu i demagnetizaciju, no neodimijski mogu imati i do 10 puta veću silu privlačenja od feritnih magneta istog volumena pa se iz tog razloga češće upotrebljavaju.

Iako te dvije inačice sinkronih strojeva imaju male konstrukcijske razlike, princip rada je identičan. To su najčešće trofazni strojevi koji imaju tri prostorno pomaknuta fazna namota za 120° . Dovođenjem trofaznog izmjeničnog napona poteku struje koje stvaraju promjenjivo okretno magnetsko polje. Te su struje također fazno pomaknute za 120° . Magnetsko polje statora prolazi kroz zračni raspor (prostor između rotora i statora) te se interakcijom s uzбудnim magnetskim poljem rotora javlja privlačna ili odbojna sila. Pošto je polje promjenjivo, rotor će se vrtjeti i to uvijek jednakom brzinom kao i OMP. Zbog toga je iskoristivost veća od ostalih vrsta strojeva i primjenjiv je za veliki raspon snaga.

Na slici 2.2. može se vidjeti valni oblik trofaznog sinusnog napona koji se dovodi na statorski namot. Ako se gledaju amplitude napona u prvom trenutku (označeno crvenom crtom), prevladavati će jedna od faza što će rezultirati privlačenjem uzбудnog polja na namot te faze. U drugom trenutku (označeno plavom crtom) rotor se zakreće jer drugoj fazi raste amplituda (u negativno), a prvoj fazi pada. U trećem trenutku označenim zelenom crtom, druga faza dostiže maksimalnu vrijednost te se južni pol uzbuđuje sa statorom. Daljnjom promjenom napona po sinusoidi se ostvaruje konstantna vrtnja rotora. Ovaj primjer je pojednostavljen jer na statoru može biti mnogo više utora pojedine faze te na rotoru može biti mnogo više magnetskih polova u vidu namotaja ili permanentnih magneta.



Slika 2.2. Valni oblik trofaznog napona i promjena položaja rotora [2]

Može se primjetiti da brzina vrtnje ovisi o frekvenciji napona koji se dovodi na stator. Konvencionalni sinkroni strojevi s kliznim koljutima najčešće se koriste na stalnim frekvencijama mreže od 50/60 Hz pa su time ograničeni. Također, brzina vrtnje obrnuto je proporcionalna broju pari polova uzbude. Što je veći broj pari polova, sinkrona brzina je manja pa je klasična regulacija brzine vrtnje i razvijenog momenta ograničena tim parametrima.

Brzina vrtnje sinkronog stroja se računa prema izrazu:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (2.1.)$$

gdje je:

n_s – sinkrona brzina stroja

f – frekvencija napona statora

p – broj pari polova rotora

Međutim, za pokretanje PMSM-a nije dovoljno samo priključiti bilo koji napon i frekvenciju na statorski namot. Tu nastupa elektronička regulacija s promjenjivom frekvencijom i amplitudom napona. Postoje razni složeni i manje složeni algoritmi upravljanja, no svi se baziraju na principu pretvorbe istosmjernog napona u trofazni izmjenični napon koji je potreban za stvaranje OMP-a. Takav se sklop naziva izmjenjivač (engl. inverter) i koristi ultra brze poluvodičke sklopke (najčešće MOSFET ili IGBT) koje uklapaju namot na viši ili niži potencijal. Time se mijenja smjer magnetskog polja, a pravilnim redoslijedom uklapanja može se ostvariti sinusoidalni valni oblik struje kroz namot statora. Uklapanje se vrši pod visokim frekvencijama od 20 do 100 kHz i promjenjivom duljinom trajanja signala tehnikom pulsno-širinske modulacije (PWM). Važno je napomenuti da to nije frekvencija izlaznog napona, već frekvencija uključivanja i isključivanja poluvodičkih sklopki.

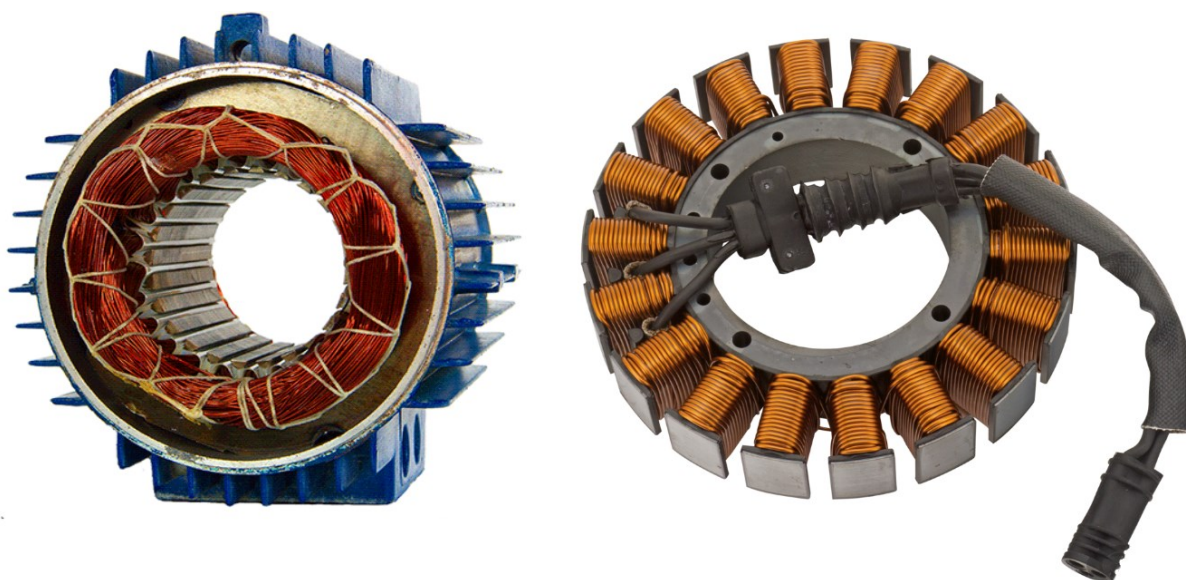
Prednosti upravljanja promjenom frekvencije: veći raspon upotrebljivosti stroja, veći raspon brzine i razvijenog okretnog momenta, maksimalan moment od nulte brzine, visoka efikasnost

Mane upravljanja promjenom frekvencije: visoka cijena sustava, složeni algoritmi upravljanja, potreban snažan mikroprocesor

2.2. Konstrukcija PMSM-a

2.2.1. Građa statora

Stator sinkronog stroja gotovo je identičan statoru asinkronih strojeva. Sastoji se od željezne jezgre, načinjene od tankih, međusobno izoliranih dinamo limova debljine od 0.1 do 0.35 mm. To se čini radi smanjenja vrtložnih struja koje stvaraju neželjene gubitke u obliku topline. Što su limovi tanji, smanjuje se poprečni presjek vodiča i jakost inducirane struje u jezgri pa su posljedično i gubici u željezu manji. Glavna funkcija željezne jezgre je provođenje magnetskog toka sa statora kroz zračni raspor na rotor. Stator se može razlikovati ovisno o smjeru i orijentaciji provođenja toka pa ih se dijeli na strojeve s radijalnim ili aksijalnim tokom. Strojeve s radijalnim tokom dijelimo na statore s vanjskim i unutarnjim rotorom (slika 2.3.).



Slika 2.3. Stator s unutarnjim rotorom i s vanjskim rotorom [3]

Na slici su prikazani sami statori bez rotora i ostalih aktivnih dijelova. Može se primjetiti da su kod statora s unutarnjim rotorom (engl. inrunner) utori za namotaje usmjereni izvana prema unutra gdje se nalazi rotorski paket, dok su kod statora s vanjskim rotorom (engl. outrunner) utori usmjereni “prema van”. U praksi je češća izvedba s unutarnjim rotorom, pogotovo kod strojeva srednjih i većih snaga zbog toga što je rotirajući dio oklopljen u kućištu stroja čineći ga sigurnijim za upotrebu i otpornijim na vanjske utjecaje. Ovakva je izvedba prisutna kod svih vrsta električnih strojeva.

Stator s vanjskim rotorom se najčešće koristi u jednostavnijim sinkronim strojevima, kao što je istosmjerni motor bez četkica (BLDC). Primjenu ima u dronovima, kućanskim aparatima i lakim električnim vozilima kao što su romobili, mopedi i motocikli gdje je stator pričvršćen za karoseriju, a rotor s permanentnim magnetima je uklopljen u obod kotača.

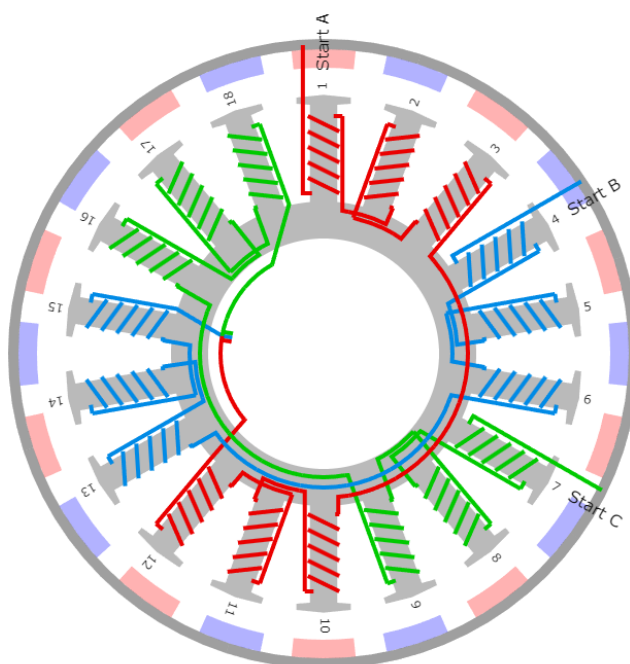
Broj utora statora utječe na performanse motora na način da se za veći broj pari polova može razviti veći elektromagnetski moment ali je i maksimalna brzina manja. Razlog je taj da ako povećamo broj utora, tj. elektromagneta koji su uključeni u isto vrijeme, ostvariti će se veća privlačna sila prema rotoru. Iz fizike je poznato da je moment jednak sili pomnoženoj s duljinom kraka pa se povećanjem sile povećava i moment. Kada bi sa tim motorom željeli zadržati jednaku brzinu kao i stroj s manjim brojem pari polova, trebalo bi povećati frekvenciju uklapanja što ujedno povećava i efektivnu vrijednost napona napajanja.

Statorski paket još sadrži i namote koji su smješteni oko prethodno spomenutih željeznih utora odnosno polova. Time se čini zavojnica ili elektromagnet koja protokom struje stvara magnetsko polje. Kako bi se pojačao utjecaj tog polja i inducirani napon, stavlja se veći broj zavoja i više paralelno spojenih žica kako bi se dobio veći poprečni presjek. Ti namoti moraju biti međusobno izolirani pa su zbog toga premazani lakom visoke probojne čvrstoće. Također, vodiči moraju biti električki izolirani od željezne jezgre, ali poželjno je da su fizički što je moguće bliže kako bi se stvorilo jače magnetsko polje. Zbog toga, između namota i jezgre se smještaju tanki papirnati izolacijski materijali bazirani na PVC-u, s velikom električnom i toplinskom otpornošću. Namotaji su u praksi gotovo isključivo napravljeni od bakrene ili aluminijske žice. Aluminij je lakši i jeftiniji, ali bakar je za oko 60% bolji vodič električne struje pa se stoga i češće koristi, bez obzira na malo veću cijenu. Postoje dvije vrste namotaja u električnim strojevima: koncentrirani i distribuirani. Na slici 2.4. prikazan je stator manjeg BLDC motora s koncentriranim namotima.



Slika 2.4. – Stator s koncentriranim namotima [4]

Sa slike 2.4. je vidljivo da je kod koncentriranog tipa namota na svakom utoru namotan jedan svitak. U ovom slučaju postoji 18 utora, 6 po svakoj fazi. Prednost ovakvog namota je ta što je jednostavan za izradu i više je bakra koji aktivno sudjeluje u stvaranju magnetskog toka. Za BLDC motore može se odrediti shema namatanja i preko raznih programa tako da se upiše broj polova statora, broj polova magneta te odabir spoja u zvijezdu ili u trokut i program će izbaciti redoslijed i smjer namatanja. Na slici 2.5. prikazana je shema namatanja BLDC motora sa 18 polova statora te 10 pari polova površinski montiranih magneta. Krajevi namota spojeni su u jednu točku što znači da je stator u zvijezda spoju.



Slika 2.5. – Shema namatanja BLDC motora s koncentriranim namotima [5]

Mana koncentriranih namota je valni oblik povratne elektromotorne sile jer se ne može postići potpuno sinusoidalni oblik, što znači da će stroj, u usporedbi s distribuiranim namotom imati malo veće gubitke, grublji rad i pojačani zvuk. Valni oblik je trapezoidalni pa se javlja utjecaj harmonika viših redova i pojavljuju se blage oscilacije u razvijenom momentu motora. Izuzev toga, koncentrirani namot ima gotovo jednake performanse kao distribuirani namot pa se zato najčešće koristi za motore manjih do srednjih snaga gdje nesinusoidalni oblik napona nema veliki utjecaj smetnje.

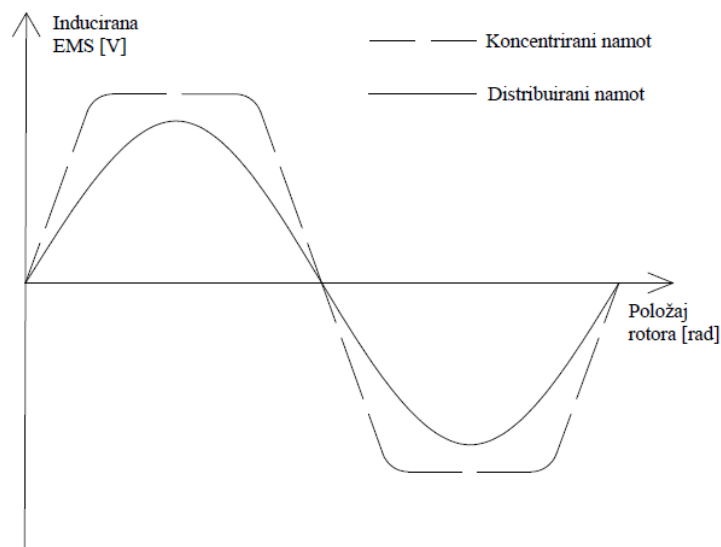
Drugi tip namota je puno češći distribuirani namot prikazan na slici 2.6. Kao i koncentrirani namot, ima 3 fizički razmaknuta namota za 120° , ali ovdje kroz jedan utor prolaze namoti više faza. Svitci su pravilno raspoređeni, odnosno distribuirani po svakom polu statora po čemu je i dobiven naziv.



Slika 2.6. – Distribuirani namot [6]

Na slici 2.6. je prikazan dio namota statora PMSM-a snage 110 kW iz električnog automobila. Može se primjetiti da se u namotu jedne faze koristi više paralelnih vodiča radi provođenja većih jakosti struja. Prednosti distribuiranih namota su: učinkovitiji i tiši rad stroja te sinusoidalniji oblik povratne EMS. Mana distribuiranih namota je ta što se oko oboda statora nalazi višak bakra koji ne sudjeluje u stvaranju magnetskog toka i namatanje je kompleksnije od koncentriranog namota. Međutim, ne pojavljuje se utjecaj viših harmonika pa se koriste gdje je potrebna velika učinkovitost i ugladeni rad. Bolja je i momentna karakteristika jer nema osciliranja i propadanja razvijenog momenta.

To je posebno važno u električnim vozilima gdje nije poželjno imati propad momenta prilikom ubrzavanja. Na slici 2.7. prikazana je usporedba valnih oblika povratne elektromotorne sile za distribuirani i koncentrirani namot.



Slika 2.7. – Valni oblici povratne EMS za koncentrirani i distribuirani namot

2.2.1. Građa rotora

Usporedno s ostalim električnim strojevima, sinkroni strojevi s permanentnim magnetima se konstrukcijski najviše razlikuju u rotorskom paketu. Ovisno o izvedbi rotora, mijenja se fizikalna slika stvaranja elektromagnetskog momenta. Kod asinkronih motora s kaveznom rotorom, inducirane struje u kratkospojnim vodičima stvaraju obodnu silu na rotor koji se posljedično rotira. Iako su dovoljno dobri za većinu primjena, kod takvih motora se javlja klizanje što uzrokuje smanjenje efikasnosti. U DC strojevima rotor sadrži armaturni namot na kojeg se dovodi napajanje preko kolektora po kojem klizu grafitne četkice. Uslijed trenja i iskrenja dolazi do zagrijavanja što isto smanjuje efikasnost. Isti se problem javlja u klasičnim sinkronim strojevima s uzbudnim namotom na rotoru, ali je eliminirano neželjeno klizanje.

Zbog toga, umjesto uzbudnog namota se koriste permanentni magneti. Time se maknula potreba za dovođenjem struje na rotirajući dio četkicama, a magneti imaju istu ulogu kao i uzbudni namot: stvaranje konstantnog magnetskog toka. Najzastupljeniji tipovi magneta su feritni i neodimijski. Feritni magneti sadrže oko 80% željezovog oksida (FeO) i drugih primjesa po čemu su dobili ime te ih karakterizira manja cijena i visoka otpornost na demagnetizaciju i vanjske utjecaje. Drugi tip magneta za električne strojeve su neodimijski (NdFeB). Karakterizira ih značajno veća koercitivna sila ili sila privlačenja (> 10x više od feritnih za isti volumen), veća cijena, te manja otpornost na koroziju i temperaturu. Prednosti i mane pojedinog magnetskog materijala nalazi se u tablici 2.1.

Tablica 2.1. Prednosti i mane magnetskih materijala rotora

| | Prednosti | Mane |
|--|---|--|
| Feritni magneti (Fe_2O_3 + primjese) | <ul style="list-style-type: none">- Otpornost na visoke temperature- Otpornost na koroziju- Ne gubi magnetska svojstva (ako se pravilno koristi)- Niža cijena- Otporniji na pucanje | <ul style="list-style-type: none">- Slabija sila privlačenja- Može izgubiti magnetska svojstva uslijed djelovanja snažnog vanjskog magnetskog polja |
| Neodimijski magneti (NdFeB) | <ul style="list-style-type: none">- Najveća sila privlačenja (do 10 puta veća od feritnih)- Omogućuje smanjenje volumena mag. materijala u stroju | <ul style="list-style-type: none">- Veća cijena- Potrebno prekriti površinu magneta zaštitnim premazom- Manji temperaturni raspon uporabljivosti |

Neodimijski magneti do 80°C zadržavaju sva nazivna svojstva, ali ako su izloženi temperaturama većim od maksimalne uporabljive, sila privlačenja postaje slabija i postoji rizik od gubitka magnetskih svojstava. Zbog toga se kod primjena s većim nazivnim snagama rotor mora hladiti zrakom ili nekim drugim rashladnim fluidom. Bez obzira na mane NdFeB magneti, puno se više koriste jer za istu masu i volumen omogućuju razvijanje višestruko većeg elektromagnetskog momenta. Postoji više različitih vrsta rotora s permanentnim magnetima, a razlikuju se po mehaničkom rasporedu magneti te fizikalnoj slici stvaranja okretnog momenta. Dvije su najzastupljenije inačice rotora: SPM (površinski montirani permanentni magneti) i IPM (magnetni uklopljeni u unutrašnjost rotora).

SPM strojevi imaju permanentne magnete učvršćene na površini rotora te se oslanjaju isključivo na privlačnu silu tih magneti za stvaranje momenta. Mana takvog rotora je što je maksimalna brzina ograničena zbog slabije mehaničke konstrukcije, a njihova je prednost jednostavna izrada i široka primjenjivost. U ovom radu će se za testiranje sklopa koristiti BLDC motor s ovakvim tipom rotora. Ovakve rotore karakterizira trapezoidalna povratna elektromotorna sila pa se uglavnom ne primjenjuju za velike snage gdje bi utjecaj viših harmonika bio prevelik. Na slici 2.8. prikazan je SPM rotor s NdFeB magnetima, bez osovine i ostalih mehaničkih dijelova.



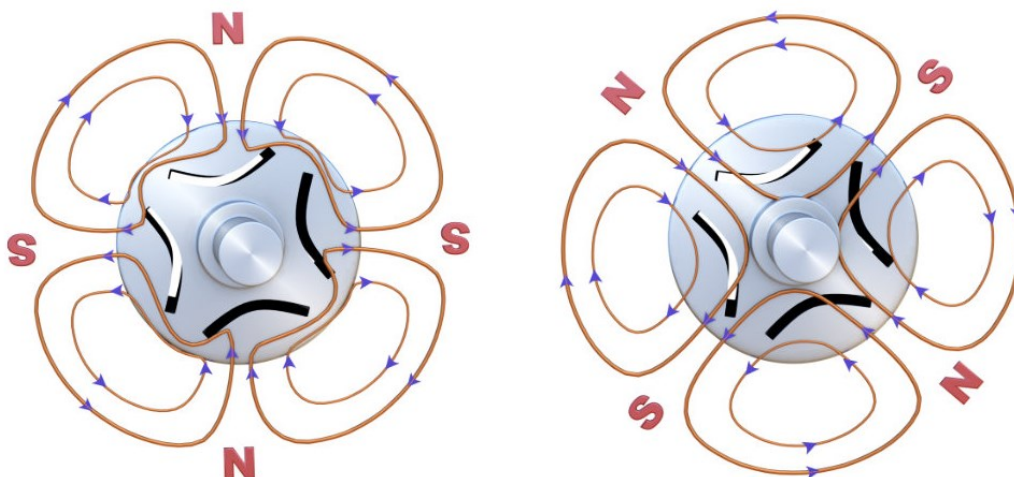
Slika 2.8. – Rotor sinkronog stroja s površinski montiranim permanentnim magnetima [7]

Druga vrsta rotora je rotor s unutrašnjim permanentnim magnetima (IPM). Razlikuje se od SPM-a po tome što su magneti smješteni unutar rotora, po određenom rasporedu i prikazan je na slici 2.9. To omogućuje veće brzine vrtnje jer nema rizika od odljepljivanja magneti s površine zbog centrifugalnih sila. Međutim, glavna razlika je način razvijanja momenta jer kod IPM rotora osim permanentne uzbude postoji i komponenta momenta dobivena reluktancijom.



Slika 2.9. – Rotor IPMSM stroja iz električnog vozila [8]

Reluktancija ili magnetski otpor je otpor nekog materijala promjeni magnetskog polja. Željezo ima vrlo malu, a zrak, aluminij, bakar i neodimij vrlo veliku reluktanciju. To se svojstvo može iskoristiti kod vrtnje rotora gdje će magnetski tok uvijek ići putem najmanjeg opterećenja. Kada rotorski “pol” nije usklađen sa statorskim magnetskim poljem, rotor se okreće sve dok ne dođe u stacionarni položaj. Kada se rotor uskladi s poljem, potrebno je promijeniti korak komutacije statora te tako mijenjati korake kako bi se dobio konstantni okretni moment. Kao što je prethodno spomenuto, u rotoru su smješteni i permanentni magneti koji također doprinose razvijanju momenta, pogotovo kod pokretanja rotora iz stajanja. S lijeve strane slike 2.10. prikazan je položaj rotora kada okretno magnetsko polje nije usklađeno s polovima rotora, pri čemu se razvija moment koji tjera rotor u položaj pri kojem će biti usklađen s OMP-om. Na desnoj strani slike prikazano je stanje u kojem magnetski tok ide putem najmanjeg otpora pri čemu nema razvijenog momenta. [9]



Slika 2.10. – Prikaz interakcije magnetskog toka u sinkro-reluktantnom motoru [10]

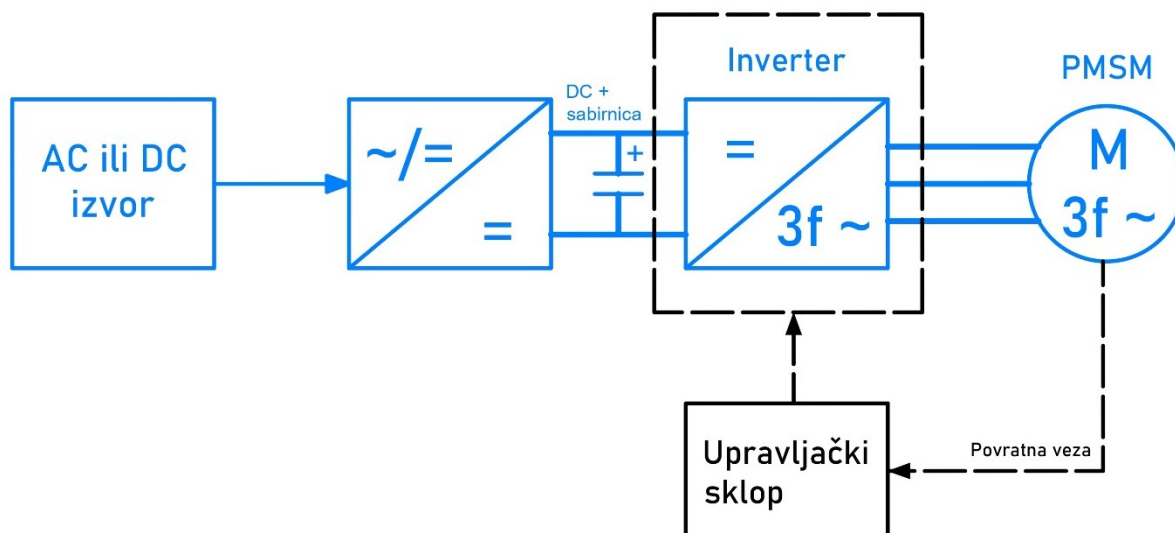
Još jedna važna pojava kod SPM motora su induktiviteti d-osi L_d i q-osi L_q (engl. *d-axis and q-axis inductance*), odnosno njihov odnos čiji je naziv magnetska saliencija (engl. *saliency*). Pojednostavljeno, induktivitet d-osi ili direktne osi L_d je induktivitet nastao protokom magnetskog toka koji se zatvara kroz magnetske polove, dok je induktivitet q-osi L_q nastao protokom toka kroz željeznu jezgru između magneta i uvijek električki prethodi d-osi za 90° . Pošto je permeabilnost permanentnih magneta vrlo mala, više željeza „sudjeluje“ u magnetskom toku q-osi stoga je $L_q > L_d$. Smjer direktne osi je smjer glavnog magnetskog toka, a smjer q-osi je smjer razvijanja okretnog momenta. Bitno je imati što veći L_q kako bi saliencija ($L_q - L_d$), a posljedično i okretni moment bio što veći.

Kod SPM motora, magneti su ugrađeni na površinu rotora pa ovise skoro isključivo o snazi permanentnih magneta, stoga je saliencija ograničena ($L_q \approx L_d$). IPM motori imaju magnete implementirane duboko u unutrašnjosti rotora što omogućuje puno veći L_q od L_d i zato ima sposobnost stvaranja magnetskog i reluktantnog momenta. Kod projektiranja sklopa za motore s unutrašnjim magnetima, važno je uzeti to u obzir te implementirati u algoritme upravljanja pomoću raznih parametara. Radi jednostavnosti, u ovom će se radu koristiti motor s površinskim permanentnim magnetima, čineći softverski dio puno jednostavnijim i jeftinijim za izradu.

3. Upravljački sklop sinkronog stroja s permanentnim magnetima

3.1. Energetski krug

Usporedno s ostalim električnim strojevima poput indukcijskih motora ili istosmjernim kolektorskim strojevima koji većinom rade i bez energetskih pretvarača za upravljanje, kod sinkronih strojeva s permanentnim magnetima je takva vrsta upravljanja obavezna. To daje i brojne prednosti kao što su: precizna regulacija brzine vrtnje, razvijanje maksimalnog okretnog momenta od nulte do nazivne brzine te visoka učinkovitost stroja pri širokom rasponu upotrebljivosti. Takav se sklop naziva izmjenjivač (engl. *inverter*) te pretvara električnu energiju jednog oblika u električnu energiju promijenjivog napona i frekvencije. Postoje i ostale komponente upravljačkog sustava, no izmjenjivač je najvažniji. Na slici 3.1. shematski je prikazan upravljački sustav s glavnim dijelovima.

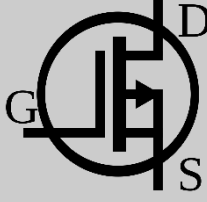
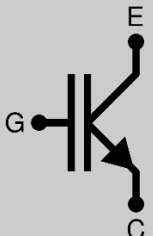


Slika 3.1. – Shematski prikaz upravljačkog sustava

Plavom je bojom označena svaka komponenta u energetskom dijelu sklopa, a crnom je označen signalni sklop. Energetski dio podrazumijeva dijelove sklopa gdje teku velike struje i vlada visoki napon, odnosno maksimalni napon tog sustava. U energetskom se dijelu odvija pretvorba energije, stoga je važno projektirati vodiče, energetske sklopke i ostale dijelove da budu pouzdani. Kao što je moguće vidjeti na slici 3.1., neovisno o tome imamo li AC ili DC izvor, moramo ga pretvoriti u istosmjerni napon na DC + sabirnici. U slučaju da imamo na ulazu izmjenični napon (npr. postrojenje u tvornici), mora ga se pretvoriti u istosmjerni napon pomoću punovalnog ispravljača, a u slučaju da imamo DC izvor kao što je slučaj u električnim vozilima, taj se početni ispravljač može zanemariti.

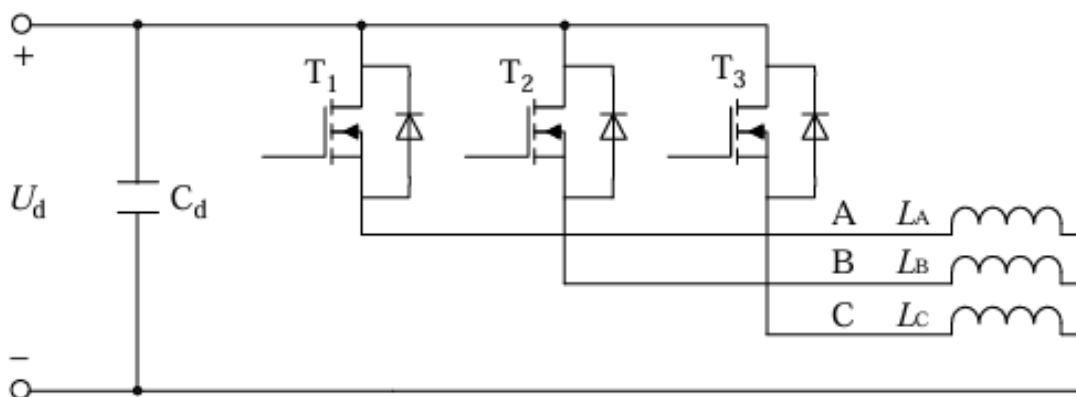
Zatim se taj napon dovodi na izmjenjivač gdje se DC napon na ulazu pretvara u trofazni izmjenični signal promjenjive frekvencije i amplitude koji napaja sinkroni stroj. Ta se pretvorba vrši pomoću elektroničkih sklopki: MOSFET i/ili IGBT. Obje imaju istu funkciju i vrlo su slične ali se razlikuju po primjeni (za veće ili manje snage). Te se poluvodičke sklopke mogu usporediti s mehaničkim relejem jer se ponašaju kao normalno otvoreni kontakt koji se zatvara dovodenjem niskonaponskog upravljačkog signala. Isti bi se sklop teoretski mogao napraviti s relejima, ali dolazi do problema iskrenja kontakta kod uklapanja, sporiji je odziv, nepouzdan za visoke frekvencije uklapanja. Kod poluvodičkih sklopki nema pomičnih dijelova i može se pouzdano uključivati i isključivati frekvencijom i do nekoliko MHz. U tablici 3.1. nalazi se usporedba MOSFET-a i IGBT-a.

Tablica 3.1. – Usporedba energetskih poluvodičkih sklopki

| | MOSFET | IGBT |
|---|---|---|
| Napon uklapanja | Niski napon (do 400V) | Visoki napon (>1200V) |
| Dinamički otpor (r_d) | Oko 15 – 30 mΩ | 7 – 14 mΩ |
| Maksimalna frekvencija uklapanja | 800 kHz – 1 MHz | 20 – 40 kHz |
| Vrijeme isključivanja (t_{off}) | Manje | Veće |
| Primjena | Izmjenjivači ventilatora, kompresora i motora manjih snaga DC-DC pretvarači, UPS uređaji, SMPS | Izmjenjivači motora većih snaga (električna vozila), energetski pretvarači većih opterećenja, indukcijske ploče za grijanje |
| Cijena | Jeftiniji | Skuplji |
| Simbol |  |  |

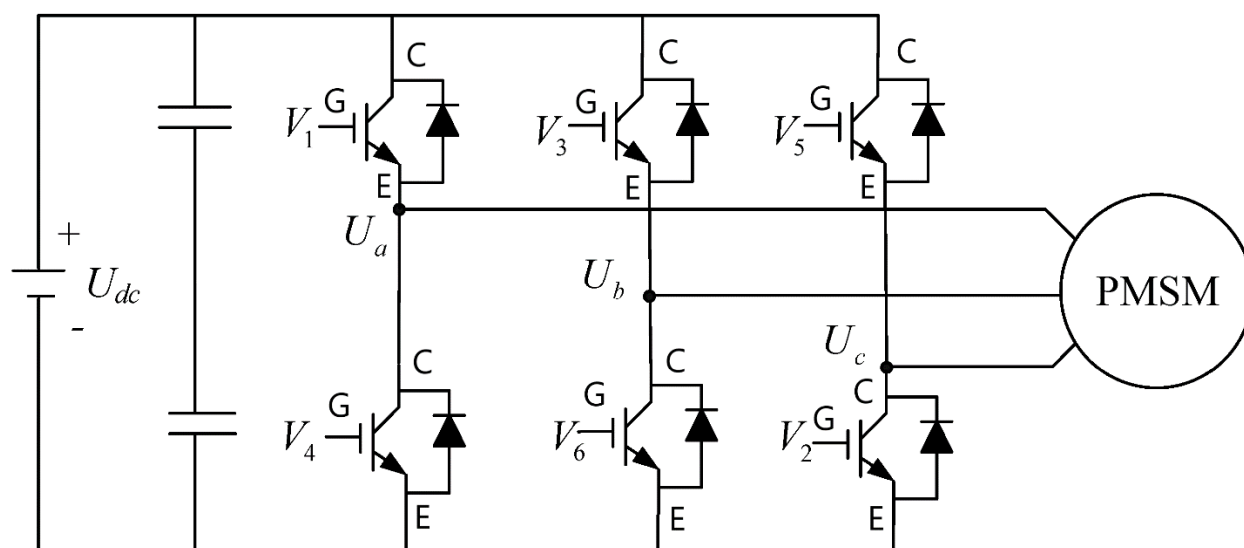
MOSFET ili metal-oksidi poluvodič tranzistor s efektom polja je poluvodička komponenta koja se najviše koristi kao sklopka za visoke frekvencije. Sadrži tri izvoda: vrata (engl. gate) ili upravljačka elektroda, te drain i source izvodi. MOS tranzistor je naponski upravljan što znači da ako dovedemo pozitivan napon na gate izvod, zatvorit će se kontakti drain i source (U_{gs} je tipično od 3-15 V). Pozitivan napon na upravljačkoj elektrodi će privući elektrone te stvoriti kanal između D i S izvoda kroz koji može poteći struja. MOSFET-e dijelimo na dvije vrste ovisno o nosiocima naboja u kanalu, stoga mogu biti P ili N-kanalni. Pošto je pokretljivost elektrona veća od šupljina, energetski MOS tranzistori su u pravilu uvijek N-kanalni. IGBT ili bipolarni tranzistor s izoliranim vratima je poluvodička komponenta koja ima karakteristike N-kanalnog MOSFET-a i PNP bipolarnog tranzistora. Kao i MOSFET, sastoji se od tri izvoda: vrata (engl. gate, upravljačka elektroda), kolektor i emiter. Princip rada je gotovo isti kao i kod MOSFET-a, a prednost IGBT-a je dinamički otpor u uključenom stanju koji je vrlo mali, što mu omogućuje provođenje velikih struja.

U izmjenjivačima za strojeve s permanentnim magnetima postoji više različitih konfiguracija energetske sklopke koje se koriste ovisno o potrebama snage i cijene pogona. Dvije su najzastupljenije konfiguracije: polumosna i punomosna. Polumosna konfiguracija (slika 3.2.) moguća je samo za PMSM spojen u zvijezdu gdje imamo tri fazna priključka i kraj svakog namota (zvjezdaste). Zajednička se točka spaja na referentnu točku, odnosno negativan polaritet napona izvora, a pojedina faza se uključuje putem pripadajuće sklopke. U tom slučaju sklop ima samo 3 energetske sklopke pa je smanjena kompleksnost i cijena sklopa. Mana takve konfiguracije je ta što imamo samo 3 koraka komutacije pa svaka sklopka provodi struju 120° u ciklusu. Posljedica su velike oscilacije i impulsi razvijenog momenta, stoga se ovaj spoj koristi za male BLDC motore gdje nema velikih tereta. [11]



Slika 3.2. – Polumosna konfiguracija trofaznog izmjenjivača [11]

Druga i najzastupljenija konfiguracija je punomosni spoj (slika 3.3.). U ovom spoju koriste se po dvije sklopke po svakoj fazi, ukupno 6 te se može upariti sa motorom u spoju zvijezda ili trokut.

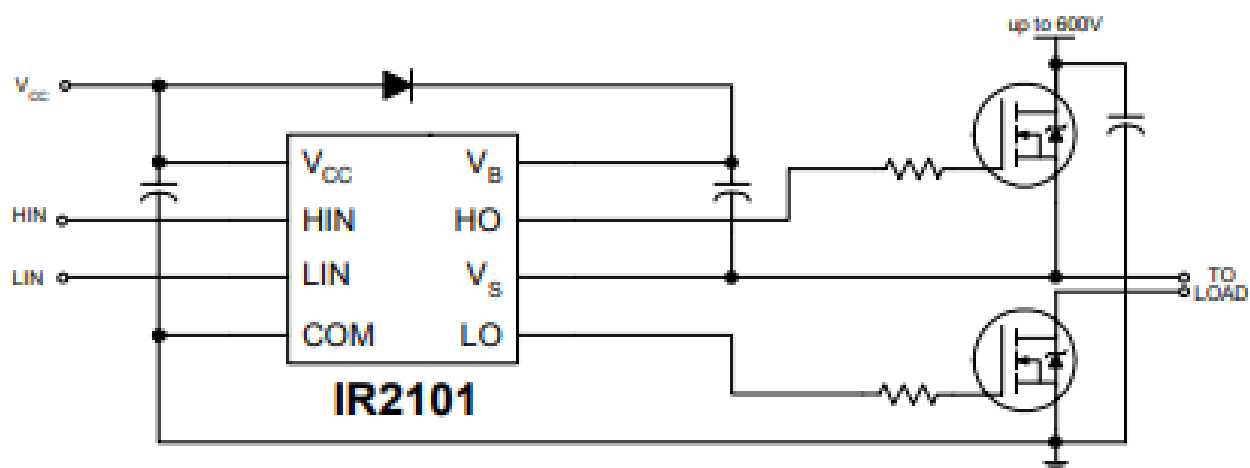


Slika 3.3. – Punomosni spoj trofaznog izmjenjivača [12]

Na slici 3.3. je prikazana shema trofaznog punomosnog invertera s IGBT sklopkama. Spoj se sastoji od 3 polunosna spoja s 2 tranzistora po svakoj fazi. V_1 , V_3 i V_5 su na izvodu kolektora spojeni na viši potencijal (engl. high side), a V_2 , V_4 i V_6 su na izvodu emitera spojeni na referentni ili nulti potencijal (engl. low side). Dva tranzistora iste faze rade komplementarno, tj. ako je upaljen gornji tranzistor, ne smije biti upaljen i donji jer bi tako kratko spojili izvor. Vrijeme isključivanja IGBT-a/MOSFET-a duže je od vremena uključivanja pa zato mora postojati određena vremenska odgoda prije nego li se uključi idući korak. Također, ako upalimo dva tranzistora spojena na isti potencijal, neće poteći struja kroz statorski namot jer nema razlike potencijala. Kod ovakvog spoja istovremeno rade dvije sklopke, npr. upaljeni su V_1 i V_6 , u tom slučaju struja teče kroz V_1 , zatim ulazi u motor kroz fazu “A” i izlazi kroz fazu “B” te se kroz V_6 vraća u negativni pol izvora napona. U tom ciklusu je rotor napravio jedan korak te se putem povratnih veza (sa ili bez senzora) mijenja korak komutacije sve dok ne napravimo jedan okret. Kod velikih induktivnih tereta, kao što je PMSM, pri isključivanju sklopke struja ne može nastaviti teći kroz tranzistore pa se samoinducira impuls vrlo visokog napona koji može trajno uništiti tranzistor. Zbog toga, u tranzistor je ugrađena poredna ili antiparalelna dioda koja omogućuje tok struje kada je tranzistor isključen.

3.2. Upravljački krug

Upravljački krug sklopa za upravljanje PMSM-om obuhvaća sve one komponente koje rade na niskonaponskoj razini. Sastoji se od centralne upravljačke jedinice (CPU, procesor), MOSFET/IGBT drivera i povratne veze (senzori i ostali upravljački signali). CPU je zadužen za obradu signala povratnih veza te nakon obrade šalje signal driverima za paljenje pojedinih sklopki. Ti signali su visokih frekvencija, stoga je važno odabrati CPU koji to može podržati. Driver za poluvodičke sklopke je sklop koji signal iz CPU-a na ulazu (3.3-5V) šalje prema upravljačkim elektrodama MOSFET-a/IGBT-a i pritom povećava napon kako bi se osiguralo potpuno uključivanje sklopke. Također, na taj način energetska komponenta nije izravno povezana s osjetljivim komponentama pa u slučaju zakazivanja neće oštetiti procesor. Na slici 3.4. prikazana je tipična shema primjene MOSFET gate drivera.



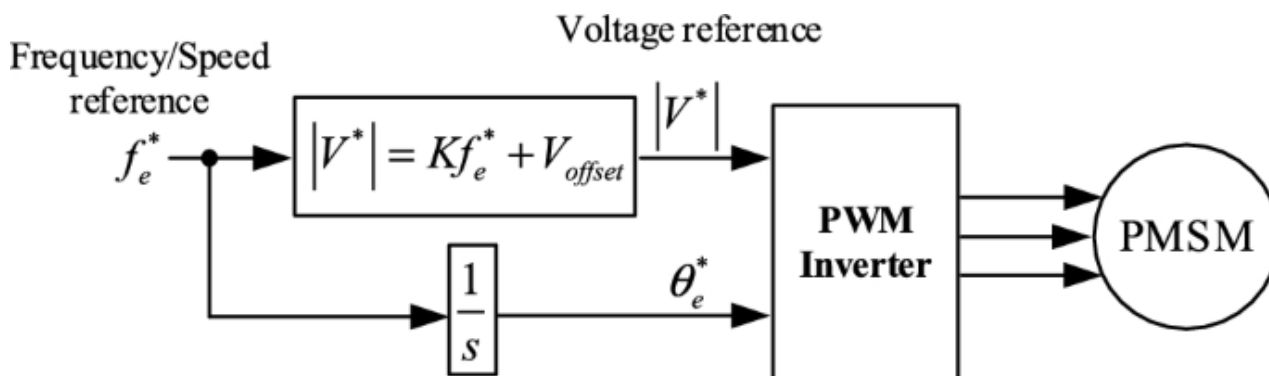
Slika 3.4. – Shema tipične primjene IR2101 gate drivera, International Rectifier [13]

V_{cc} označava napon napajanja koji tipično iznosi 12 ili 24 VDC. HIN i LIN su ulazni signali od CPU-a kojima se pali gornji i donji MOSFET, s time da ne mogu biti upaljena oba u isto vrijeme jer bi pritom došlo do izravnog kratkog spoja izvora napajanja. HO i LO su izlazni signali koje preko otpornika spajamo na gate tranzistora. Kondenzator spojen između V_b i V_s služi za generiranje impulsa napona na izlazu, osiguravajući uključivanje sklopki. Za upravljanje sklopkama koristi se pulsno-širinska modulacija (engl. PWM, *pulse width modulation*) pomoću koje se regulira vrijeme uključenog i isključenog stanja. Omjer uključenog stanja i ukupnog vremena jedne periode naziva se radni ciklus (engl. *duty cycle*). Većim radnim ciklusom na izlazu se ostvaruje veća amplituda napona. Budući da želimo replicirati sinusni valni oblik putem pravokutnog signala, koristimo dvije komplementarne sklopke kojima se mijenja radni ciklus.

3.2.1. Algoritmi upravljanja

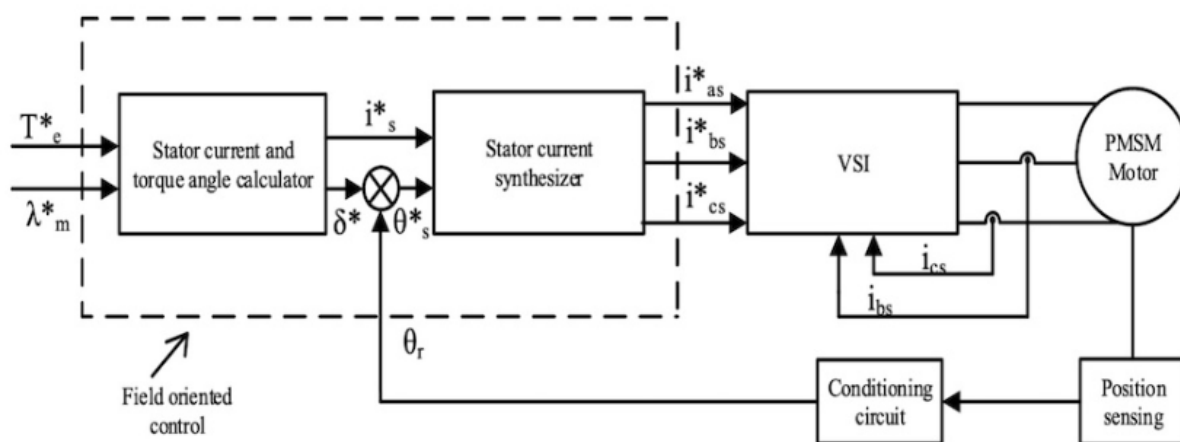
Za upravljanje sinkronim motorima s permanentnim magnetima mora postojati povratna veza o poziciji rotora jer motor ne bi radio s direktnim priključkom na mrežu ili slično. Načini na koje se dođe do informacije o relativnoj poziciji rotora mogu biti sa sensorima ili bez. Ako je poznata pozicija rotora, zna se i u kojim trenucima se mora mijenjati stanje uključenih i isključenih poluvodičkih sklopki kako bi dobili optimalnu rotaciju bez trzaja i smetnji. Vrijednosti koje želimo regulirati su brzina vrtnje i moment stroja. Ovisno o konstrukciji statora i pripadnoj povratnoj EMS, upravljanje može biti sinusoidalno ili trapezoidalno. Kao što je prethodno spomenuto, sinusoidalni motori imaju puno ugrađeniji rad i tipično se projektiraju za veće snage, dok su trapezoidalni motori jednostavnije građe i koriste se za manje snage gdje utjecaj harmonika višeg reda nije posebno važan. Sinusoidalno upravljanje se dijeli na skalarno i vektorsko.

Skalarno upravljanje je tipično za frekvencijske pretvarače asinkronih motora, ali je primjenjivo i na PMSM. Bazira se na jednostavnom principu održavanja omjera napona i frekvencije konstantnim ($U/f = \text{konst.}$). Povećanjem napona i frekvencije u isto vrijeme održava se magnetski tok u jezgri konstantnim, a povećava se brzina vrtnje. Mane skalarnog upravljanja su osjetljivost na promjenu tereta i nemogućnost upravljanja momentom. Međutim, prednosti su jednostavna izvedba i mala cijena. Blokovski prikaz skalarnog upravljanja vidljiv je na slici 3.5.



Slika 3.5. – Blok shema skalarnog upravljanja PMSM-om [14]

Vektorsko upravljanje puno je složenije ali i najčešće korišteno u praksi zbog visoke učinkovitosti. Temelji se na mjerenju magnituda struja i napona svih faza te se ti podaci obrađuju kako bi se dobili vektori napona i struja te pozicija magnetskog toka u ovisnosti na rotor. Poljno orijentirano upravljanje (FOC, engl. field oriented control) i direktno upravljanje momentom (DTC, engl. direct torque control) dva su tipa vektorskog upravljanja. Kod FOC upravljanja mjere se dvije komponente magnetskog toka, statorska komponenta dobivena iz mjerenih statorskih struja te magnetski tok rotora dobiven iz pozicijskog senzora (Hall senzor, rezolver, enkoder). Kut između tih dviju vektora predstavlja kut upravljanja (Θ) čijim upravljanjem možemo direktno utjecati na brzinu vrtnje i moment, neovisno o promjeni tereta. Na slici 3.5. prikazana je blok shema FOC upravljanja PMSM-om.



Slika 3.6. – Blok shema FOC upravljanja PMSM-om [15]

FOC upravljanje omogućuje maksimalni moment motora na velikom rasponu brzina, čak i pri 0 o/min. Da bi se sve to uspješno realiziralo, potrebni su složeni aritmetički i logički algoritmi, što zahtjeva vrlo snažan procesor. Drugi tip vektorskog upravljanja je direktno upravljanje momentom (DTC). DTC-om se brzina vrtnje regulira promjenom razvijenog momenta i magnetskog toka, za razliku od FOC-a gdje se reguliraju statorske struje, DTC algoritam procjenjuje moment i magnetski tok pomoću struja i pozicije rotora. Zatim se iz tih podataka generira PWM signal za izmjenjivač koji daje motoru određenu vrijednost napona statora. DTC je malo jednostavnije izvedbe od FOC-a, ali ima i malo veće oscilacije struje i okretnog momenta.

Dosadašnji spomenuti algoritmi upravljanja namjenjeni su za motore sa sinusoidalnom povratnom elektromotornom silom. S druge strane, postoji i algoritam za motore s trapezoidalnim valnim oblikom povratne EMS. U ovom radu će se raditi s ovakvim načinom upravljanja zbog toga što je cilj napraviti efikasan sklop za upravljanje PMSM-om koji je inače vrlo kompleksan, na što jednostavniji način. Trapezoidalno upravljanje dobiva signal povratne veze iz neke vrste senzora ili iz mjerenja vrijednosti povratne EMS u fazi koja nije uključena (“lebdi”). Mana trapezoidalnog upravljanja motora bez fizičkih senzora je ta što se rotor mora okretati kako bi dobili inducirani povratni napon u namotu statora, stoga ne može imati veliki okretni moment pri pokretanju iz nule. U tom slučaju, treba postojati unaprijed određeni ciklus za pokretanje kako bi se rotor krenuo vrtjeti, da bi posljedično dobili signal povratne veze i nastavio se vrtjeti normalno. Uz senzore, poznata je pozicija rotora pa je lakše odrediti koje namote treba uključiti u kojem trenutku. Detaljniji opis principa rada trapezoidalnog upravljanja obradit će se u sljedećem potpoglavlju. U tablici 3.2. prikazani su načini upravljanja PMSM-om te njihove prednosti i mane.

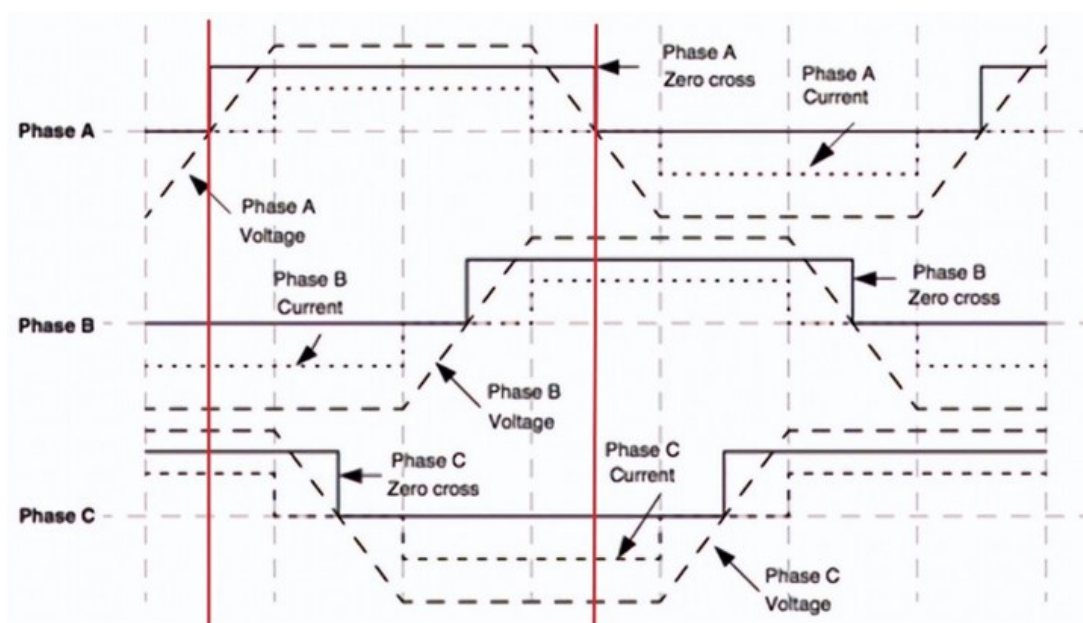
Tablica 3.2. – Algoritmi upravljanja PMSM-om

| <i>Vrsta upravljanja</i> | | Prednosti | Mane | |
|--------------------------|-------------|--|--|---|
| Sinusoidalno | Skalarno | Jednostavna izvedba | Promjenom tereta nije moguće održati brzinu vrtnje | |
| | Vektorsko | Poljno orijentirano upravljanje (FOC) | Veliki raspon upotrebljivosti, precizna regulacija brzine vrtnje i momenta, izvedba sa ili bez senzora pozicije rotora | Potrebna jaka upravljačka jedinica, složeni algoritmi upravljanja |
| | | Izravno upravljanje momentom (DTC) | Relativno jednostavna izvedba, dobre dinamičke performanse | Povišene oscilacije okretnog momenta i struje |
| Trapezoidalno | Sa senzorom | Jednostavna i pouzdana izvedba | Potrebni Hallovi senzori, oscilacije okretnog momenta | |
| | Bez senzora | Jednostavna izvedba, ne zahtjeva senzore | Otežano pokretanje motora, oscilacije okretnog momenta | |

3.3. Princip rada upravljačkog sklopa

U ovom radu će se za upravljanje motorom koristiti trapezoidalni kontrolni algoritam, međutim princip rada je sličan za sve vrste upravljanja. Energetski dio je načinjen punovalnim spojem 6 poluvodičkih sklopki, čiji se upravljački signal dobija iz gate drivera. Kako bi znali koje namote treba uključiti u određenom trenutku, nužno je znati poziciju rotora. Tu povratnu informaciju možemo dobiti signalom fizičkog senzora ili određivanje pozicije rotora mjerenjem naponskih signala statorskih namota.

Pošto želimo što jednostavniji sklop, za signal povratne veze koristit će se metoda mjerenja napona povratne EMS. U trofaznom motoru, kada su u nekom trenutku uključene dvije od tri faze, (npr. namot faze “A” spojen je na pozitivan pol, a namot faze “B” na negativan pol napajanja) rotor na kojemu se nalaze permanentni magneti stvaraju promjenjivo magnetsko polje. Tada se u trećoj fazi, koja nije spojena na potencijal, inducira napon koji zovemo povratna elektromotorna sila (engl. *back EMF*). Vrijednost povratne EMS je proporcionalna položaju magnetna naspram statorskih namota. Ona će rasti i postići maksimalnu vrijednost kada je sjeverni pol magnetna točno poravnat sa statorskim zubcem. Daljnom rotacijom EMS pada sve dok ne prođe sredinu dvaju zubaca iste faze. Tada moramo promijeniti stanje sklopki i preći na idući korak jer bi se u protivnom rotor zaustavio u jednom položaju. Za svaki prolaz bilo koje faze kroz 0V iz negativnog u pozitivno i obratno mijenja se stanje sklopki. Valni oblici povratne EMS s naznačenim prolascima signala kroz nulu (engl. *zero cross*) prikazani su na slici 3.7.

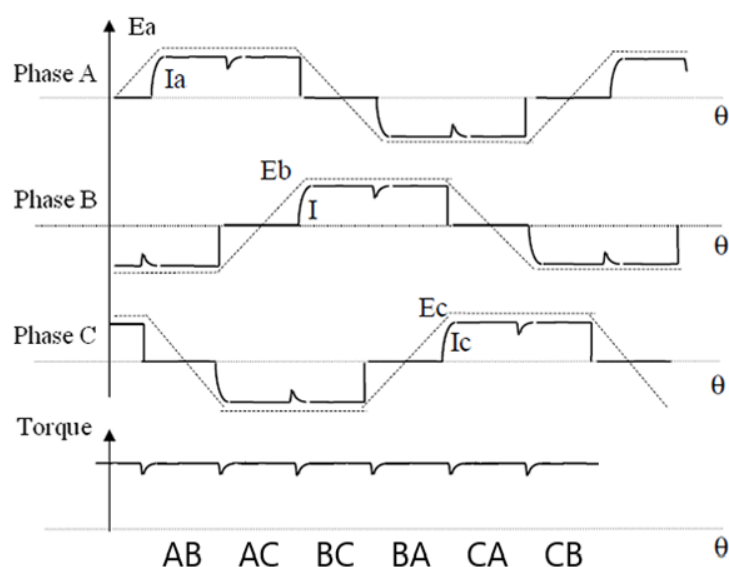


Slika 3.7. – Signali povratne elektromotorne sile BLDC motora [16]

Kod šest-koračne sekvence paljenja sklopki postoje komutacija 120° ili 180° . Za ovaj se sklop koristi komutacija od 120° gdje je svaka sklopka, kada se upali, upaljena 120 električkih stupnjeva. Za to koristimo 6 tranzistora gdje su T1,T2 i T3 (AH, BH,CH) tzv. “*high-side*” tranzistori, spojeni na viši potencijal a T4, T5 i T6 (AL,BL,CL) su “*low-side*” tranzistori, spojeni na referentnu točku, tj. negativan pol izvora. U praksi se uključivanje high-side tranzistora radi na visokim frekvencijama kako bi se struja ograničila i poprimila približno sinusni oblik. Tehnika kojom se to postiže je PWM te će biti prikazana u sljedećim poglavljima. U tablici 3.3. prikazana je sekvenca paljenja sklopki za šest-koračnu komutaciju od 120° , a pripadni valni oblici struje i povratne EMS za pojedina stanja sklopki su prikazani na slici 3.8. Napomena: faza koja u nekom trenutku nije spojena niti na jedan potencijal, označena je sa 0 u tablici. Tada se za promjenu stanja upaljenih sklopki gleda povratna EMS te faze, odnosno prolaz njene trenutne vrijednosti kroz nulu.

Tablica 3.3 – Šest-koračna komutacija BLDC motora

| Interval ($^\circ$) | Upaljeni tranzistori | Polariteti faza (A B C) |
|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| 0 – 60 | T1,T5 (AH,BL) – “AB” | (+ - 0) |
| 60 – 120 | T1,T6 (AH,CL) – “AC” | (+ 0 -) |
| 120 – 180 | T2,T6 (BH,CL) – “BC” | (0 + -) |
| 180 – 240 | T2,T4 (BH,AL) – “BA” | (- + 0) |
| 240 – 300 | T3,T4 (CH,AL) – “CA” | (- 0 +) |
| 300 – 360 | T3,T5 (CH,BL) – “CB” | (0 - +) |



Slika 3.8. – Valni oblici struja i povratne EMS i pripadna stanja sklopki [17]

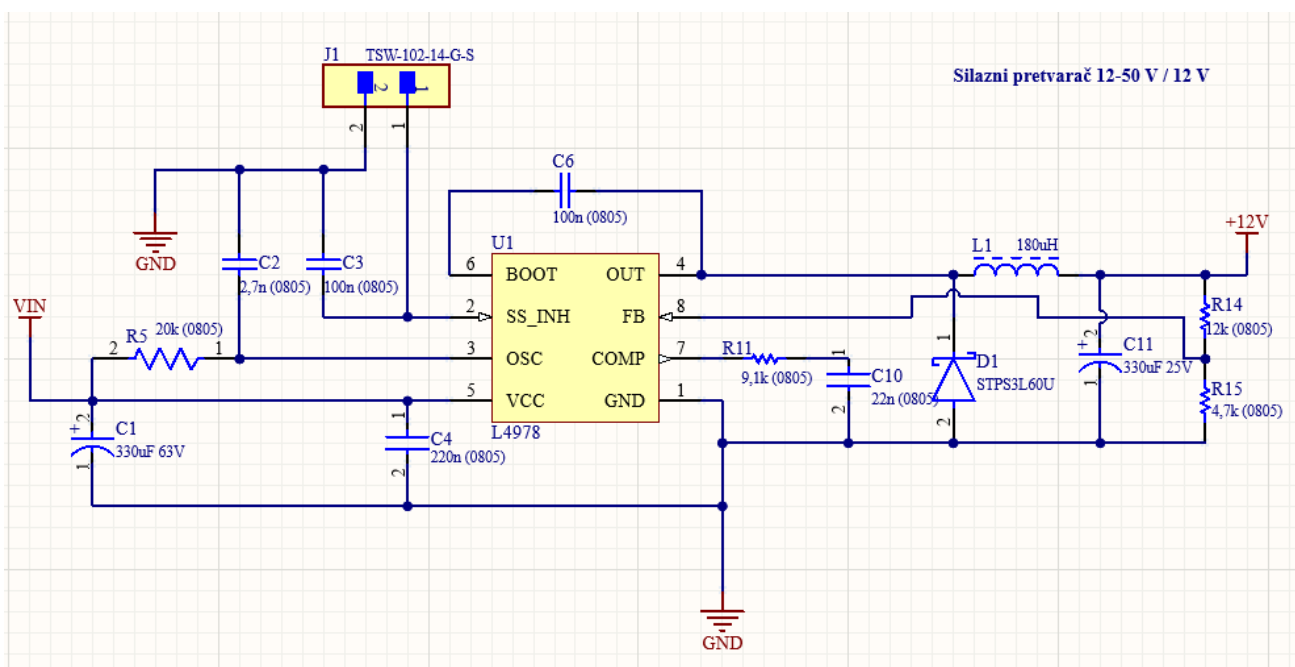
4. Projektiranje upravljačkog sklopa

Prije same izrade upravljačkog sklopa potrebno je odrediti maksimalne iznose napona i struja kojim će sklop biti opterećen. Sklop koji će se izraditi koristit će za demonstraciju upravljanja PMSM motorima manjih snaga za dronove i električne romobile maksimalne snage 500 W. Želimo da je raspon ulaznog istosmjernog napona od 12 – 50 V što je i tipično za takve motore. Maksimalna jakost struje koja će se javljati u sklopu je ≈ 15 A. Sve komponente u energetskom krugu moraju biti odabrane prema tim parametrima, a obzirom na velike struje, mora se uzeti u obzir grijanje poluvodičkih sklopki pa je potrebno i dodati sustav odvodnje topline. Nadalje, pošto za napajanje upravljačke jedinice, komparatora i gate drivera trebamo osigurati fiksni napon neovisno o ulaznom naponu, potrebno je izraditi silazni pretvarač (engl. buck converter) koji će, neovisno o vrijednosti ulaznog napona, pretvoriti u konstantni iznos od 12 V na izlazu iz pretvarača. Međutim potrebno je osigurati napon od 5 V za napajanje CPU-a i ostalih niskonaponskih komponenti za što će se koristiti linearni regulator napona 12/5 V.

Sve ostale nužne komponente biraju se prema preporuci proizvođača, iz tehničkih listova komponenata (engl. datasheet). Kako bi se olakšalo montiranje i lemljenje komponenata na pločicu, ali u isto vrijeme smanjila veličina i cijena, komponente koje ne provode veliku struju biti će SMD izvedbe, a ostali dijelovi s više pinova (npr. kontrolna jedinica, komparator, gate driveri, čip silaznog pretvarača i dr.) bit će THT izvedbe zbog lakšeg lemljenja na tiskanu pločicu. Glavni vodovi izvora napajanja, kao i tri žice za napajanje motora lemit će se direktno na pločicu, stoga je potrebno napraviti prostor za rupe kroz koje će se provući i lemiti žice. Treba voditi računa i o rasporedu komponenata na ploči. Jedan od zahtjeva je da je svih šest tranzistora okrenuto u istom smjeru u nizu kako bi se mogli montirati na zajednički aluminijski hladnjak. Još jedan mehanički zahtjev je smanjenje veličine pločice tako da se komponente slažu što bliže gdje god je moguće. Shema sklopa kao i dizajn tiskane pločice će se izraditi u profesionalnom programu za izradu tiskanih pločica Altium, dok će se pločica naručiti u 5 komada preko internetske stranice “JLCPCB”.

4.1. Silazni pretvarač napona

Za realizaciju silaznog pretvarača može se koristiti tipična shema s tranzistorom i zavojnicom kao spremnik energije te neki upravljački sklop za održavanje fiksnog izlaznog napona, međutim na taj bi način imali previše nepotrebnih komponenti i sam sklop bi postao kompliciraniji i skuplji. Umjesto korištenja diskretnih komponenti, postoje i razni integrirani krugovi koji jednom komponentom zamjenjuju puno njih. Odabrani integrirani krug u ovom sklopu je L4978, proizvođača STMicroelectronics. Sadrži integrirani MOSFET te sve potrebne pinove povratne veze, soft-start mogućnost koja osigurava da kod paljenja sklopa nema skokova izlaznog napona, pin za odabir frekvencije rada i mogućnost gašenja sklopa spajanjem SS_INH pina na GND. Na slici 4.1. prikazana je shema silaznog pretvarača s L4978 čipom i ostalim nužnim komponentama odabranim prema preporuci u tehničkom listu, izrađena u programu Altium.



Slika 4.1. – Shema silaznog pretvarača 12-50 V / 12 V

Ulazni raspon napona čipa je $V_{CC} = 3.3 - 58 V$, međutim kako je izlazni napon namješten na 12 V putem otpornika R_{14} i R_{15} (slika 4.2.), na ulaz se mora dovesti minimalno ta vrijednost. Otpornikom $R_5 = 20 k\Omega$ i kondenzatorom $C_2 = 2.7 nF$ frekvencija rada je namještena na 100 kHz. Vrijednost induktiviteta zavojnice $L_1 = 180 \mu H$ veći je od preporučenih $126 \mu H$ radi smanjenja pulzacija struje. Također, dodan je konektor J1 u shemu koji omogućuje gašenje sklopa kada se njegovi pinovi spoje.

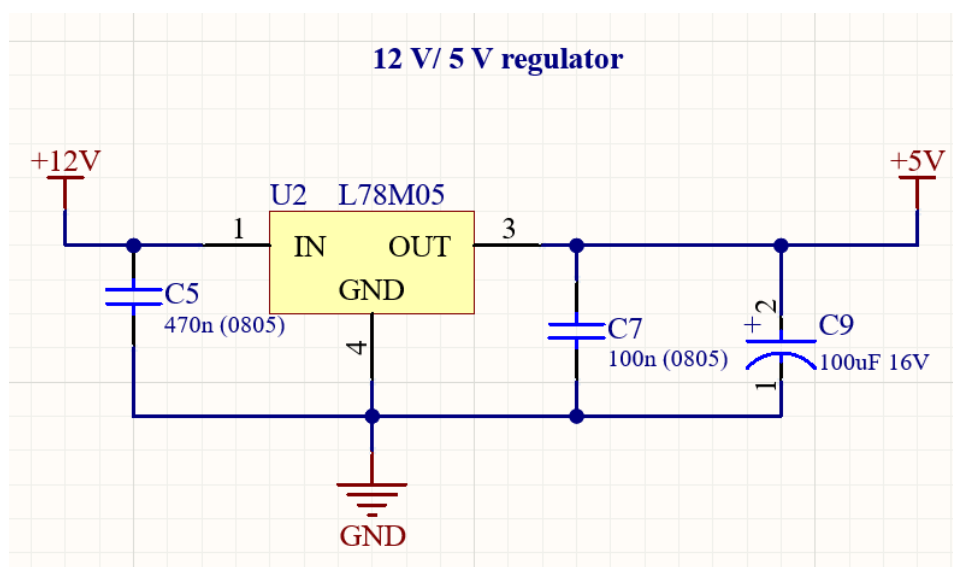
L4978

| $V_o(V)$ | $R_3(K\Omega)$ | $R_4(K\Omega)$ |
|----------|----------------|----------------|
| 3.3 | 0 | |
| 5.1 | 2.7 | 4.7 |
| 12 | 12 | 4.7 |
| 15 | 16 | 4.7 |
| 18 | 20 | 4.7 |
| 24 | 30 | 4.7 |

Slika 4.2. – Vrijednost izlaznog napona (V_o) ovisno o vrijednostima R_3 i R_4 [18]

Može se primjetiti da za vrijednosti otpornika $R_3 = 12\text{ k}\Omega$ i $R_4 = 4.7\text{ k}\Omega$ na izlazu dobije napon od 12 V. Središnja točka tog djelitelja napona spaja se na pin povratne veze FB. Dioda D1 je brza Schottky dioda, odabrana prema preporuci iz datasheeta te služi tome da omogući tok struje kada je unutarnji tranzistor ugašen, dioda je SMB izvedbe i može provesti maksimalnu struju od 3 A. Kondenzator C_6 spojen između pinova BOOT i OUT služi za upravljanje unutarnjih tranzistora. Kondenzator C_1 je veliki elektrolitski kondenzator koji služi kao spremnik energije i osigurava stabilan ulazni napon, a C_{11} je izlazni elektrolitski kondenzator koji ima zadaću stabiliziranja napona na izlazu. Ostale su komponente dodane prema shemi tipične primjene iz tehničkog lista.

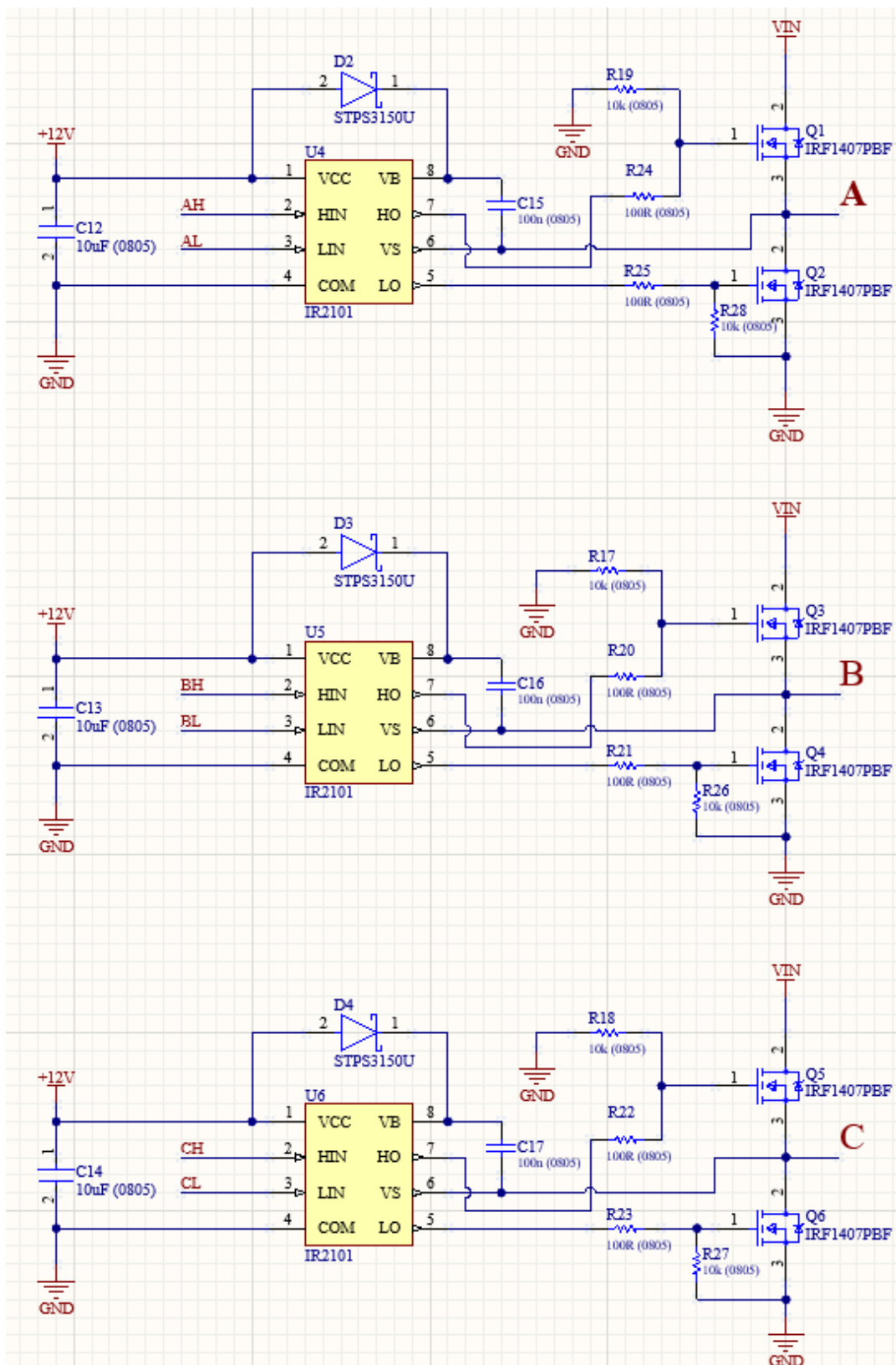
Nakon dobijanja 12 V, potrebno je osigurati 5 V za mikrokontroler i ostale komponente. To će se realizirati sa L7805 integriranim krugom s 3 izvoda: ulaz, GND i izlaz. Još su potrebna i tri kondenzatora za stabilizaciju napona čije su vrijednosti odabrane prema preporuci iz datasheeta (slika 4.3.).



Slika 4.3. – Shema regulatora napona 12 / 5 V

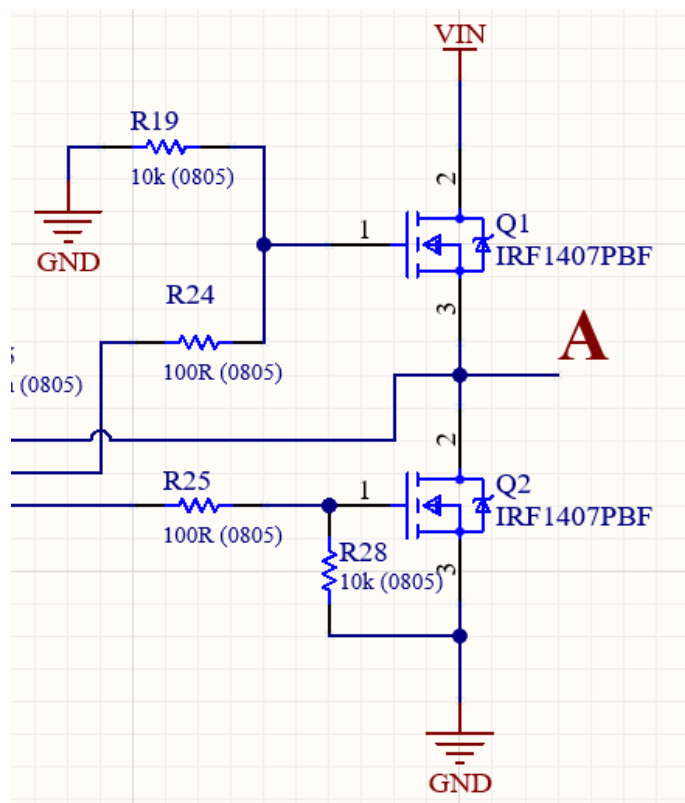
4.2. Energetski dio sklopa

Na slici 4.4. nalazi se shema punomosne konfiguracije sa šest IRF1407 MOSFET tranzistora, proizvođača International Rectifier.



Slika 4.4. – Shema punomosne konfiguracije s IRF1407 tranzistorima

Na slici 4.4. prikazana je shema koja sadrži i jedan dio upravljačkog sklopa, a uvećana shema energetskog kruga polumosne konfiguracije za jednu fazu prikazana je na slici 4.5.

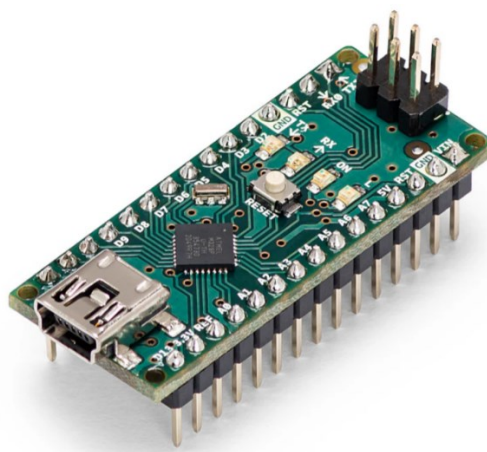


Slika 4.5. – Polumosna konfiguracija MOSFET-a za jednu fazu

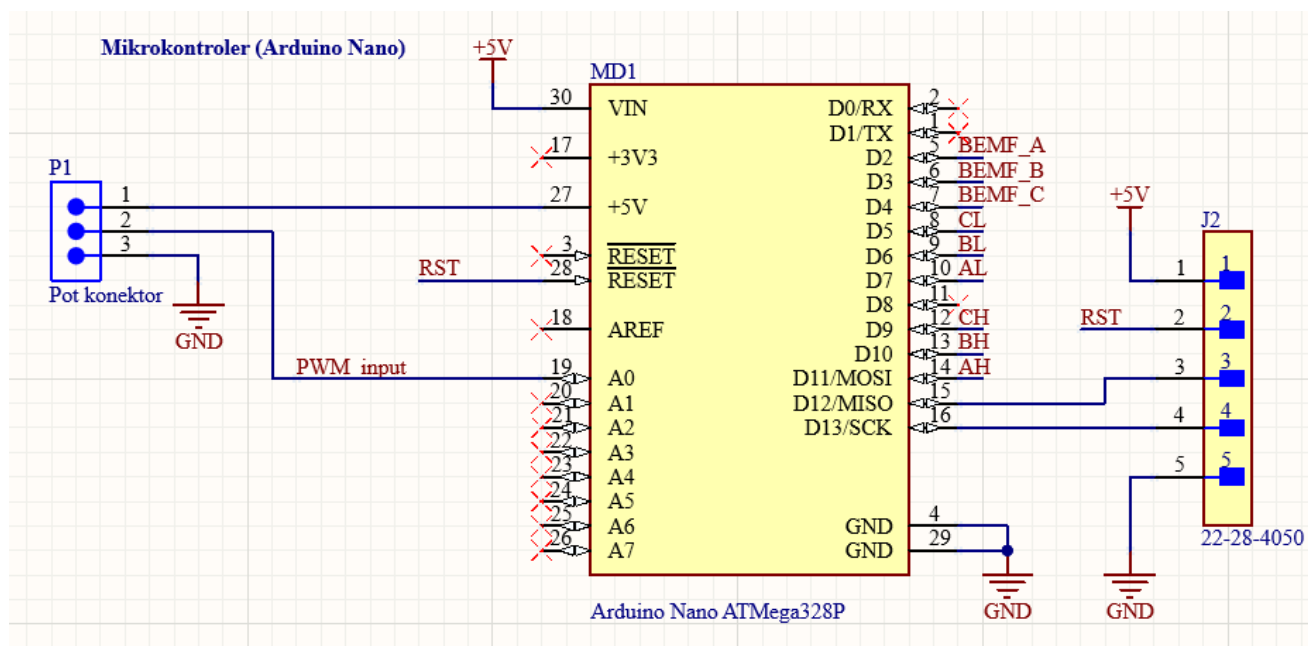
Glavna komponenta energetskog kruga je N-kanalni MOSFET IRF1407 s vrlo malim dinamičkim otporom između izvoda drain i source ($R_{DS(on)} = 0.0078 \Omega$) što omogućuje provođenje velikih struja ($I_{DS(25^\circ C)} = 130 A$). Maksimalni napon koji se može dovesti na upravljačku elektrodu je $U_{GS} = \pm 20 V$, što je više nego 12 V kojim će se upravljati sklopke u ovom sklopu. Maksimalni napon uklapanja iznosi 75 V (u ovom sklopu maksimalni napon napajanja je 50 V što osigurava sigurni rad MOSFET-a). U sklopu tranzistora nalazi se poredna dioda između D i S izvoda te služi za zaštitu od visokonaponskih impulsa iz statorskih namotaja koje mogu trajno uništiti tranzistor. Otpornici R_{19} i R_{28} služe za jamčenje isključenja tranzistora kada na upravljačkoj elektrodi nije prisutan signal. Budući da na gate izvodu postoji određeni paraziti kapacitet, MOSFET će vrlo kratko ostati upaljen nakon nestanka signala iz mikrokontrolera ($t_{off} = 150 ns$). Spomenuti otpornici prazne taj kapacitet i skraćuju vrijeme gašenja. Otpornici R_{24} i R_{25} spojeni su na gate tranzistora te služe za ograničenje struje u upravljačkom krugu gate drivera. Središnja točka između dvaju tranzistora je izvod jedne faze prema motoru.

4.3. Upravljački dio sklopa

Upravljački ili logički dio sklopa zadužen je za obradu signala povratne veze te uključivanje i isključivanje energetske sklopke. Najvažniji dio svakog upravljačkog sklopa je centralna upravljačka jedinica (CPU) ili procesor. Radi jednostavnosti izrade i programiranja CPU-a, odabran je open-source mikrokontroler Arduino Nano sa ATmega328P mikroprocesorom (slika 4.6.). Sadrži 28 pinova od kojih su 8 analognih ulazno/izlaznih pinova i 12 digitalnih ulazno/izlaznih pinova, što je više nego dovoljno za potrebe ovog rada. Također prednost je i lako mijenjanje koda spajanjem na računalo putem USB-a i olakšano montiranje na glavnu tiskanu pločicu. Ovo otvara puno prostora za razvijanje koda i poboljšanje rada sklopa brzim korekcijama softvera. Shema spajanja Arduino mikrokontrolera s ostatkom sklopa prikazano je na slici 4.7.

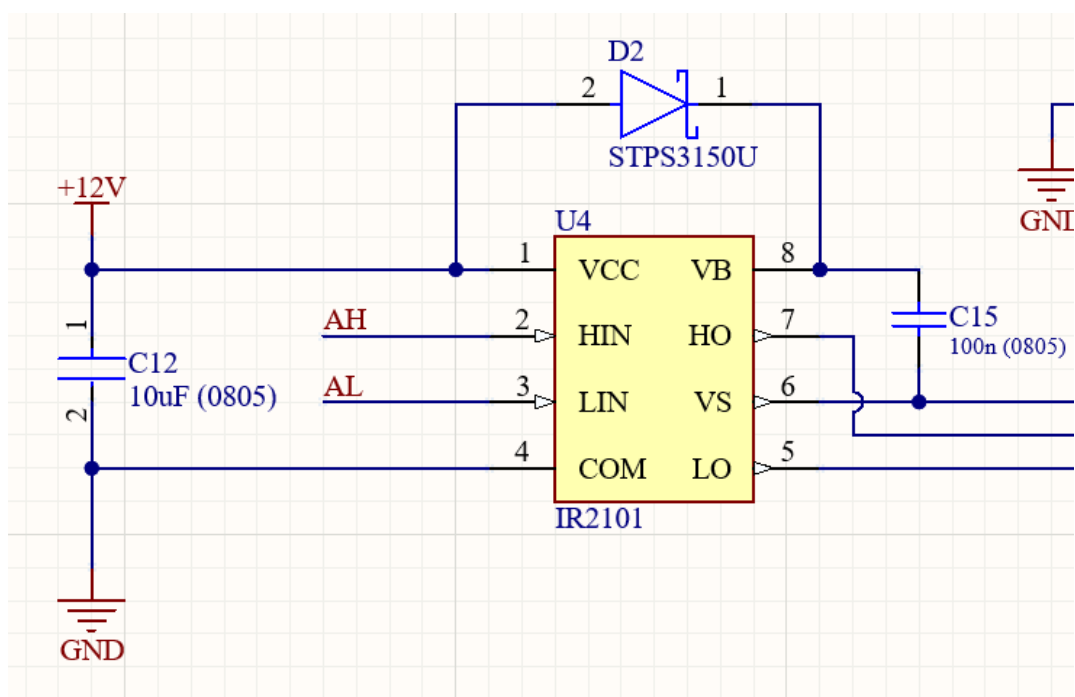


Slika 4.6. – Arduino Nano razvojna pločica s ATmega328 mikroprocesorom [19]



Slika 4.7. – Shema spajanja mikrokontrolera Arduino Nano

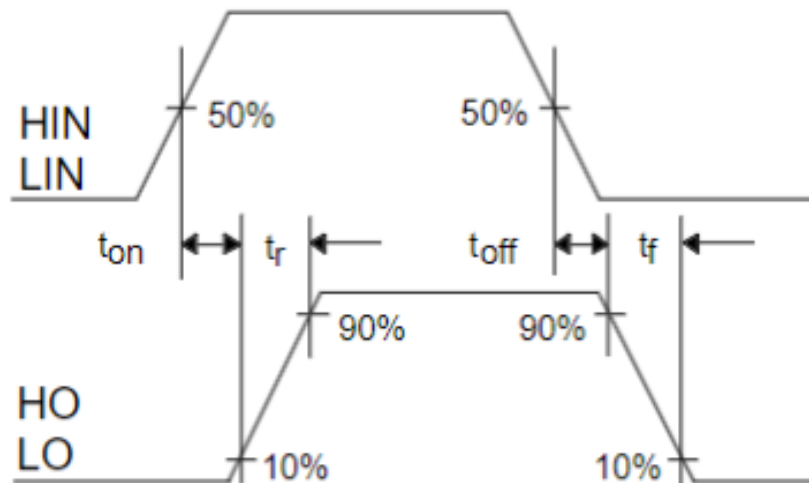
Napajanje se dovodi na VIN (5V iz regulatora napona), a GND se spaja na referentni potencijal. Od analognih ulaza koristi se samo A0 koji služi za očitavanje signala potencijometra koji daje procesoru naponski signal (0-5V) kojim se mijenja frekvencija uklapanja sklopki, odnosno regulira se brzina vrtnje. Digitalni pinovi D5, D6, D7, D9, D10, D11 su izlazi za signale gate drivera kojim upravljamo paljenjem MOSFET-a. Prikaz signala kojim upravljamo gate driverom za jednu fazu nalaze se na slici 4.8. Pinovi D2, D3 i D4 su ulazni digitalni signali povratne veze od komparatora (Detaljnije o tom dijelu sklopa u sljedećem potpoglavlju). Pinovi RST, D12 i D13 se ne koriste, ali su spojeni na konektor J1 te se u slučaju potrebe za još jedan digitalni izlaz/ulaz mogu omogućiti u kodu. Ostali pinovi koji se ne koriste označeni su sa "X" što programu govori da se kod izrade pločice na taj pin ne spaja ništa.



Slika 4.8. – Shema spajanja IR2101 gate drivera

Na VCC dovodimo napajanje od 12 V te će taj napon biti prisutan na HO (high-output) i LO (low-output) izlazima kada na HIN (high-input) i LIN (low-input) dovedemo signal iz Arduino mikrokontrolera (slika 4.7.). Kondenzator C12 služi za stabiliziranje napona napajanja u slučaju oscilacija. Dioda D2 je brza Schottky dioda kojom se puni kondenzator C15 kada je uključen donji MOSFET (LO), a C15 služi za stvaranje impulsa napona za uključenje gornjeg MOSFET-a (HO). Punjenje tog kondenzatora mora biti veoma brzo jer se stanja sklopki mijenjaju visokim frekvencijama. Shema je jednaka za sve tri faze.

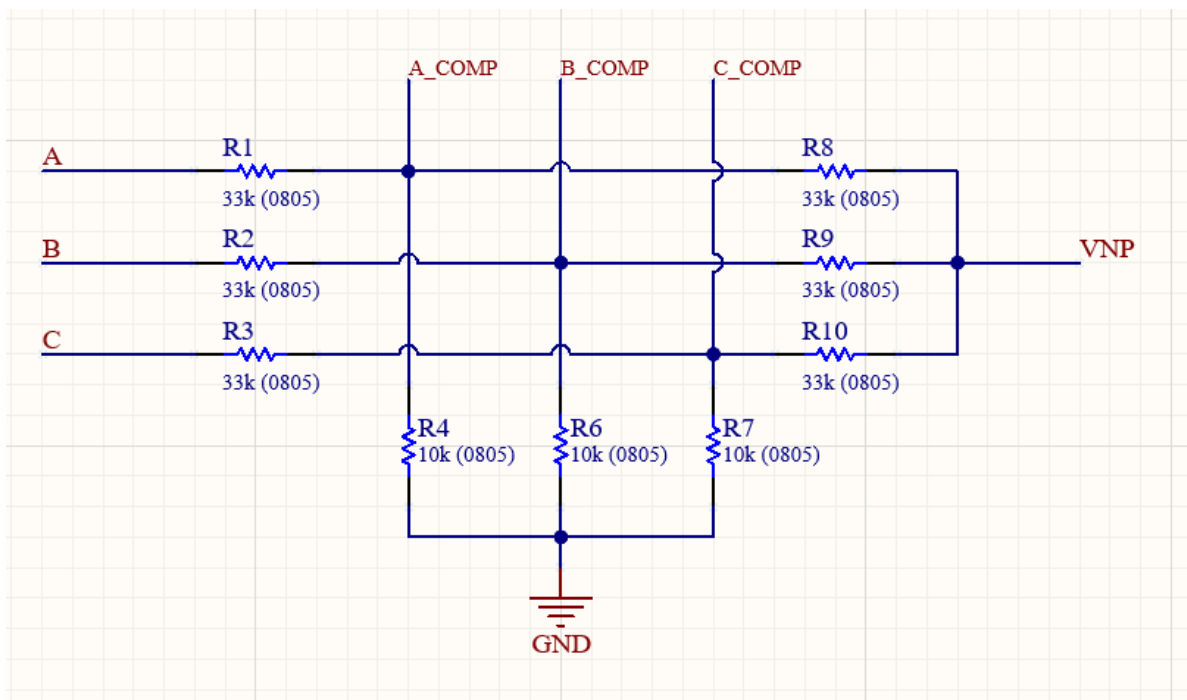
Kada gate driver dobije signal na ulazu, izlaz neće trenutno poprimiti vrijednost od 12 V, već postoji određena odgoda koja u pravilu nije poželjna, ali može biti i prednost. Isto vrijedi i za isključivanje sklopki, nestankom signala na ulazu, na izlazu signal neće trenutno nestati. IR2101 ima vrijeme uključenja signala $t_{on} = 130 \text{ ns}$, a vrijeme isključenja signala $t_{off} = 90 \text{ ns}$. (slika 4.9.). Ipak je poželjno imati neko vrijeme uključenja i isključenja zbog osiguravanja da se MOSFET isključi u potpunosti jer, kao što je prethodno spomenuto, u protivnom može doći do kratkog spoja izvora napajanja.



Slika 4.9. – Vrijeme uključenja (t_{on}) i isključenja (t_{off}) [13]

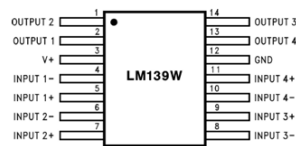
4.4. Sklop za očitavanje signala povratne EMS

Još jedan važan dio sustava je sklop za očitavanje signala povratne elektromotorne sile motora. Sklop služi kao povratna veza procesoru te mu “govori” poziciju rotora, a temeljem tih informacija, procesor određuje koje energetske sklopke treba upaliti da bi se rotor nastavio okretati. Izvodi triju faza spojeni su prvo na otpornički djelitelj napona jer se vrtnjom rotora inducira napon koji je puno veći od maksimalnih dozvoljenih vrijednosti za upravljački sklop (slika 4.10.).



Slika 4.10. – Djelitelji napona sklopa povratne veze

Iz slike 4.10. vidljivo je da su priključci tri faze motora spojene na otpornike $R_1, R_2, R_3 = 33\text{ k}\Omega$ i $R_4, R_6, R_7 = 10\text{ k}\Omega$, koji su spojeni na referentnu točku. Signal povratne veze nakon djelitelja napona označen je sa A_COMP, B_COMP i C_COMP te ga dovodimo na ulaze komparatora. Međutim, te signale ne uspoređujemo s referentnim potencijalom (GND) već moramo stvoriti virtualnu neutralnu točku. Zovemo ju virtualna jer je motor spojen u zvijezdu, ali nije fizički izvučen četvrti vod već je napravljen spajanjem triju faza preko dodatnih otpornika $R_8, R_9, R_{10} = 33\text{ k}\Omega$. Krajevi tih otpornika su spojeni u jednu točku označenu s VNP. Te signale dovodimo na komparator. Za ovaj sklop izabran je LM339N integrirani krug proizvođača Texas Instruments koji sadrži četiri komparatora u jednom kućištu, ima 14 pinova i podržava napon napajanja do 36 V. Opis pinova LM339N integriranog kruga prikazan je u slici 4.11.

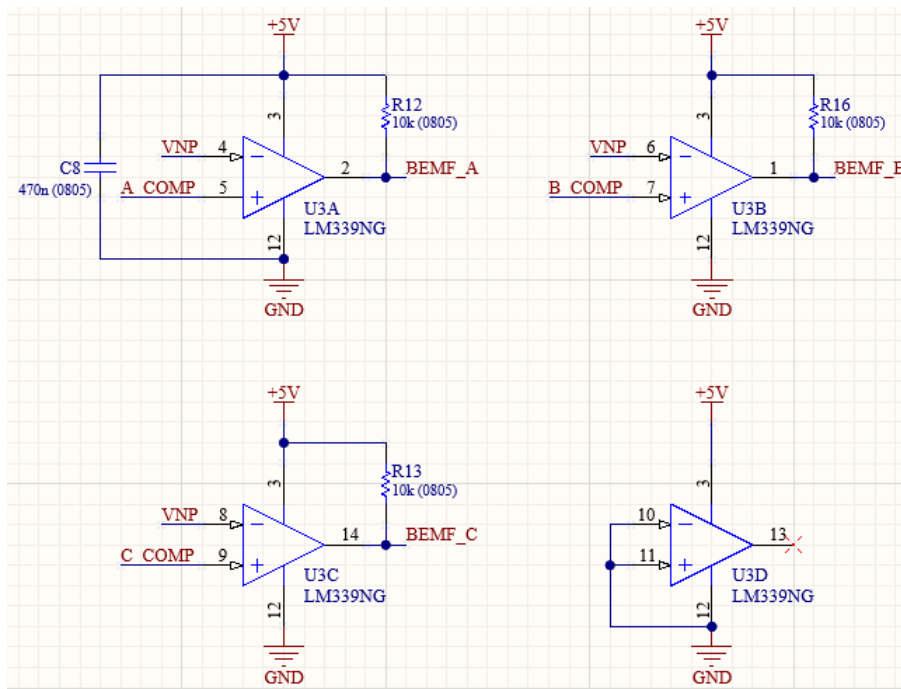


Pin Functions

| PIN NO. | NAME | I/O | DESCRIPTION |
|---------|---------|-----|-------------------------------|
| | | | |
| 1 | OUTPUT2 | O | Output, Channel 2 |
| 2 | OUTPUT1 | O | Output, Channel 1 |
| 3 | V+ | P | Positive Supply |
| 4 | INPUT1- | I | Inverting Input, Channel 1 |
| 5 | INPUT1+ | I | Noninverting Input, Channel 1 |
| 6 | INPUT2- | I | Inverting Input, Channel 2 |
| 7 | INPUT2+ | I | Noninverting Input, Channel 2 |
| 8 | INPUT3- | I | Inverting Input, Channel 3 |
| 9 | INPUT3+ | I | Noninverting Input, Channel 3 |
| 10 | INPUT4- | I | Inverting Input, Channel 4 |
| 11 | INPUT4+ | I | Noninverting Input, Channel 4 |
| 12 | GND | P | Ground |
| 13 | OUTPUT4 | O | Output, Channel 4 |
| 14 | OUTPUT3 | O | Output, Channel 3 |

Slika 4.11. – Opis pinova LM339N integriranog kruga [20]

Napajanje od 5V se dovodi na pin V+, a GND se spaja na referentni potencijal. Može se primjetiti da svaki kanal (komparator) ima invertirajući i neinvertirajući ulaz. Npr. ukoliko je napon na neinvertirajućem ulazu (INPUT1+) veći od onog na invertirajućem (INPUT1-), izlaz prvog kanala (OUTPUT1) će biti u stanju logičke jedinice (5V). U slučaju ovog sklopa, potrebna su samo tri komparatora, a onaj koji se ne koristi je kratko spojen na ulazu. U shemi na slici 4.12. vidljivo je da je na sva tri komparatora virtualna nula spojena na invertirajući ulaz, a signali povratne EMS pojedinih faza na neinvertirajući ulaz. Otpornici $R_{12}, R_{16}, R_{13} = 10\text{ k}\Omega$ su “pull-up” otpornici koji služe za osiguravanje logičkog stanja izlaza kada nije prisutan signal, a kondenzator C_8 je “spremnik energije” u slučaju oscilacija napona napajanja.

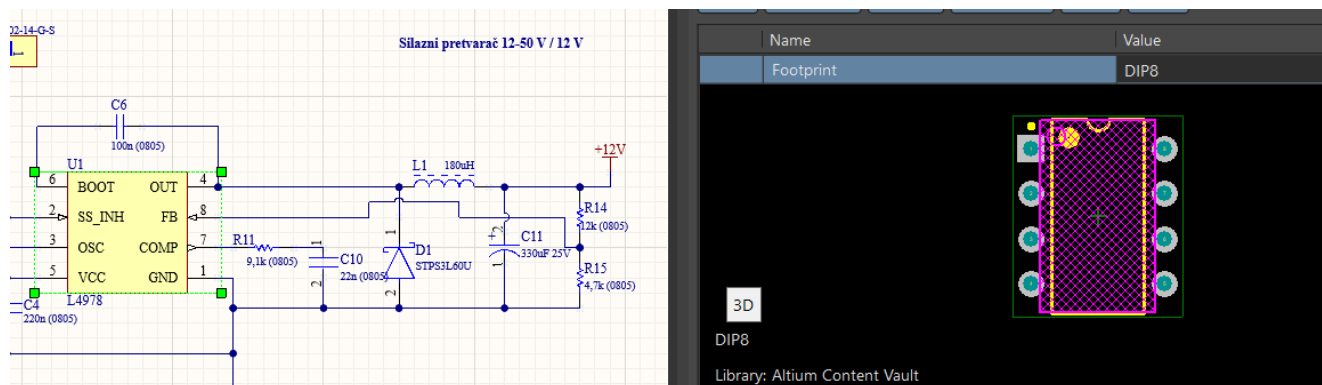


Slika 4.12. – Shema spajanja LM339 komparatora

5. Izrada upravljačkog sklopa

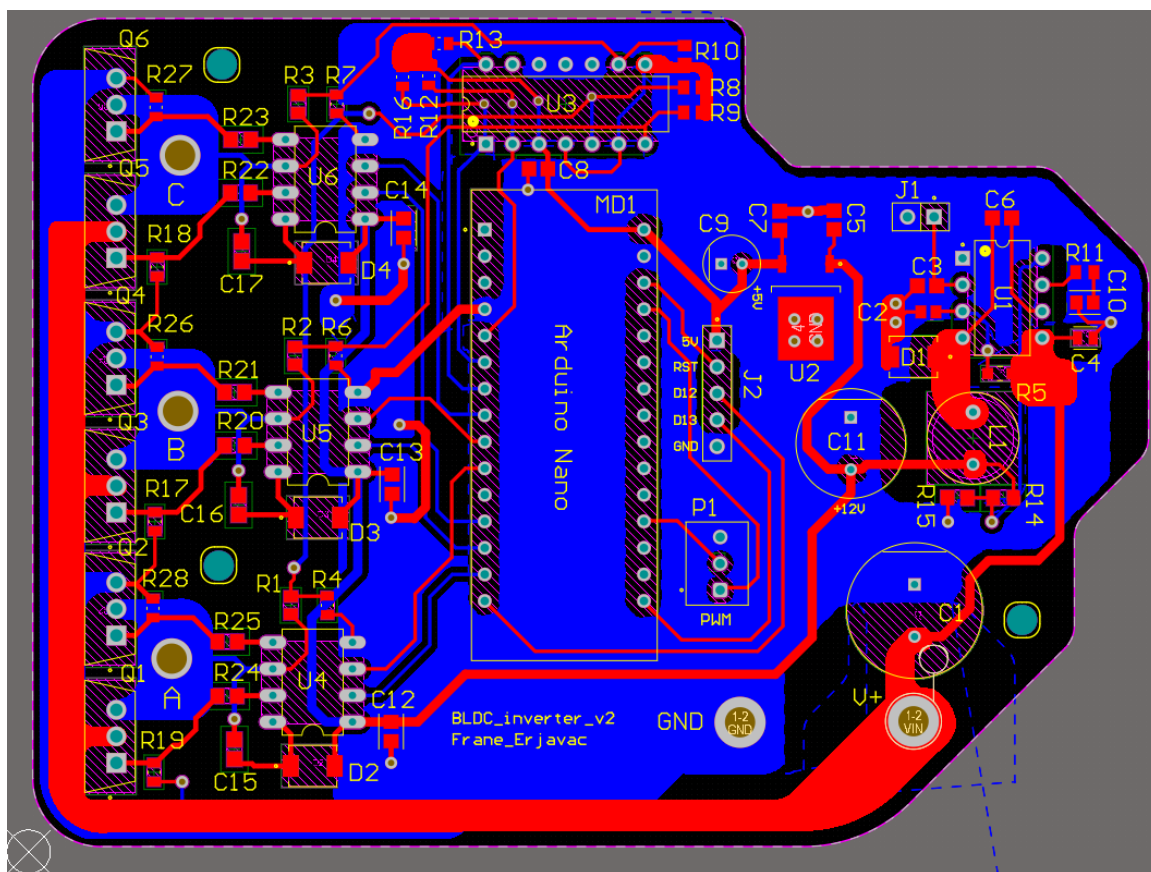
5.1. Dizajn tiskane pločice

Nakon izrade sheme sklopa i odabira komponenata u programu Altium, slijedi raspoređivanje i spajanje vodova na tiskanoj pločici. U programu postoji opcija biranja komponenti prema točnom nazivu i sadrži dvodimenzionalne i trodimenzionalne modele dijelova što je neophodno za izradu pločice. 2D model sadrži točne informacije o izgledu i veličini baze za lemljenje, veličini rupe za bušenje, razmaku rupa. Kako bi se mogla izraditi podloga tiskane pločice, svaka komponenta mora imati pripadajući 2D model (slika 5.1.).



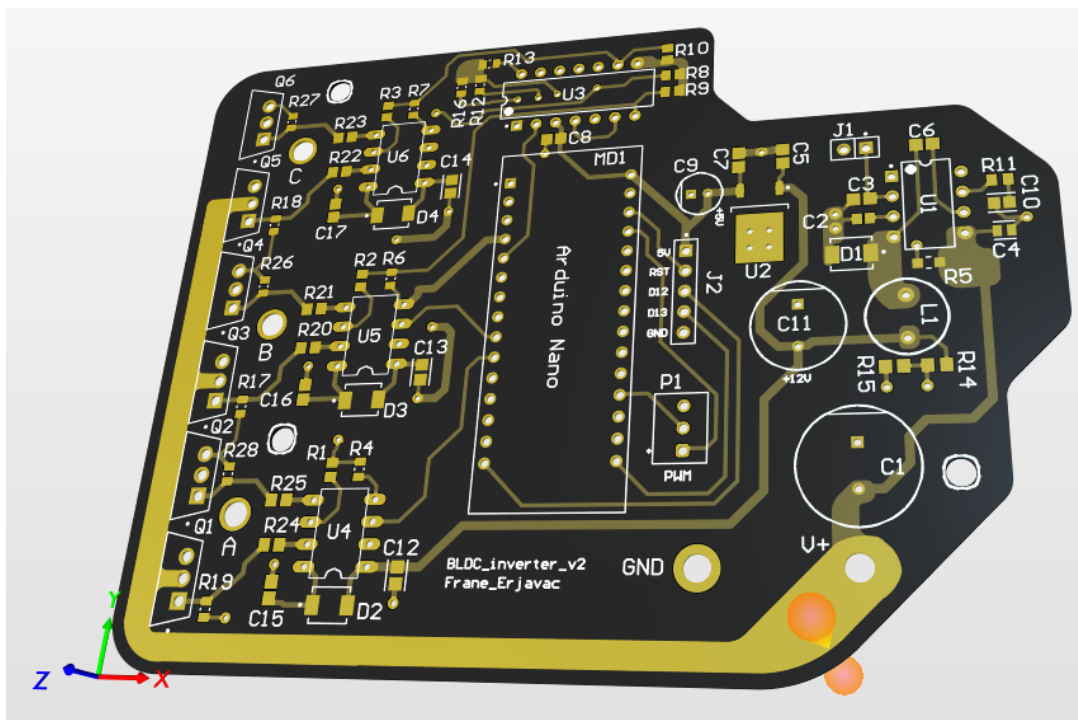
Slika 5.1. – L4978 integrirani krug i njegov 2D model

Nakon potvrde od strane programa da nema grešaka u spojevima, shema spoja se pretvara u 2D dizajn gdje se komponente moraju fizički razmjestiti na pločicu na način da ih se smješta što bliže, radi smanjenja veličine pločice, ali u isto vrijeme treba ostaviti dovoljno prostora kako bi se olakšalo lemljenje dijelova i osiguralo bolje hlađenje energetske sklopke. Kod spajanja komponenti, važno je odabrati odgovarajuću debljinu otiska. Kod spojeva signalnih vodova mikrokontrolera, komparatora i gate drivera koriste se tanki vodovi (0.45 – 1 mm) jer kroz njih ne teku velike struje. Međutim, za glavne energetske vodove kojima teku velike struje motora važno je napraviti široke otiske (≥ 5 mm). Na tim vodovima uklonjena je stop maska kako bi se moglo natopiti lemom jer na taj način povećavamo poprečni presjek voda. Nadalje, svi energetske vodovi moraju biti što kraći i uz što manje “zavoja”. Na pločici se nalaze dvije strane, na gornjoj se nalaze svi dijelovi i leme se površinski-montirane (SMD) komponente. Na donjoj se strani ne nalaze komponente, ali obuhvaća lemne točke za THT komponente i ostale vodove. Na donjoj je strani prisutna ploha referentnog potencijala što je preporučljivo imati za lakše povezivanje gornje i donje strane pločice. Važno je definirati i minimalne razmake između vodova i potrebno je o tome voditi računa pri izradi pločice jer program ne dozvoljava spajanje vodova ukoliko je razmak premali. Prikaz gotove tiskane pločice u programu Altium nalazi se na slici 5.2.

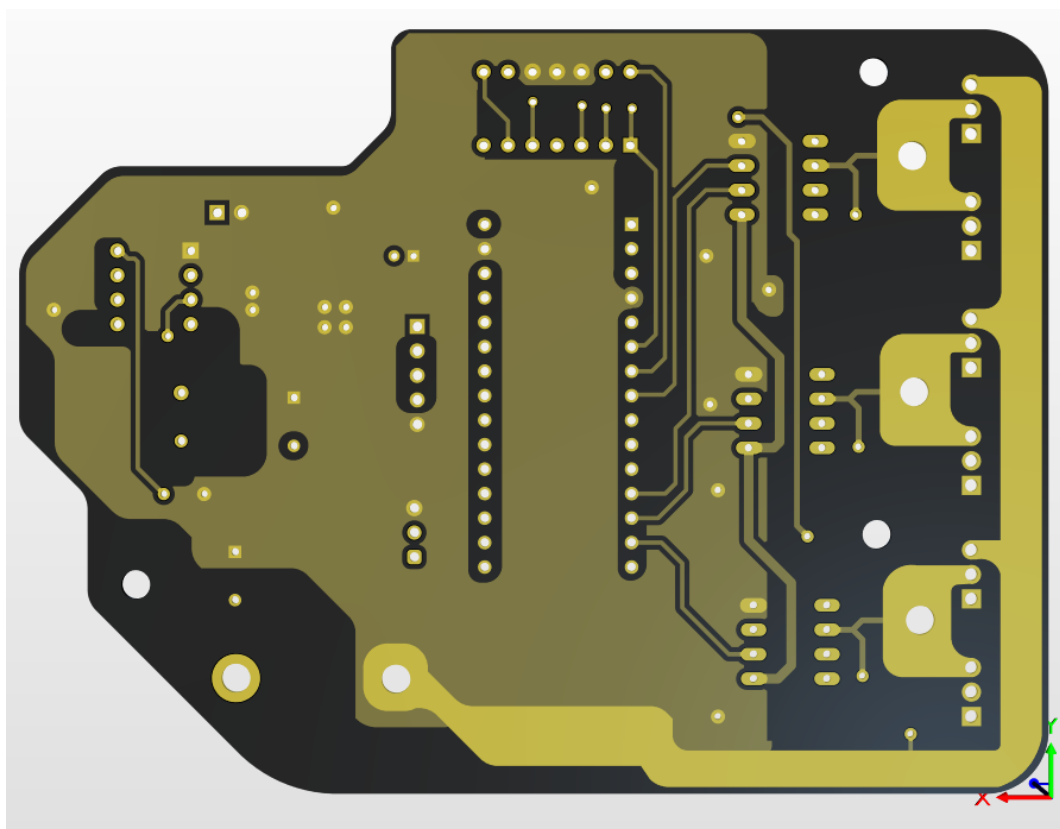


Slika 5.2. – 2D prikaz gotove tiskane pločice

Na slici 5.2. crvenom bojom su označeni svi vodovi koji se nalaze na gornjoj strani pločice, a plavom bojom su označeni vodovi na donjoj strani. Vidljiva je velika ploha referentnog potencijala (GND) koja se prostire skoro po cijeloj površini donje strane pločice. Za priključke motora i izvora napajanja izbušene su rupe kroz koje se leme žice velikog presjeka (6 mm^2). Također, stavljene su i dodatne tri rupe za montiranje pločice na tvrdu podlogu ili kućište. S desne strane nalaze se + i – priključci, silazni pretvarač i regulator napona. U središtu pločice nalazi se “mozak” sklopa, Arduino Nano mikrokontroler i LM339N komparator. S lijeve strane nalaze se tri gate drivera kojima se upravljaju MOSFET sklopke, poredane u niz kako bi se na njih mogao montirati aluminijski hladnjak. Na slikama 5.3. i 5.4. prikazani su 3D modeli obje strane tiskane pločice. Mogu se primjetiti energetske vodove bez stop maske (svjetlija boja).



Slika 5.3. – 3D prikaz gornje strane tiskane pločice



Slika 5.4. – 3D prikaz donje strane tiskane pločice

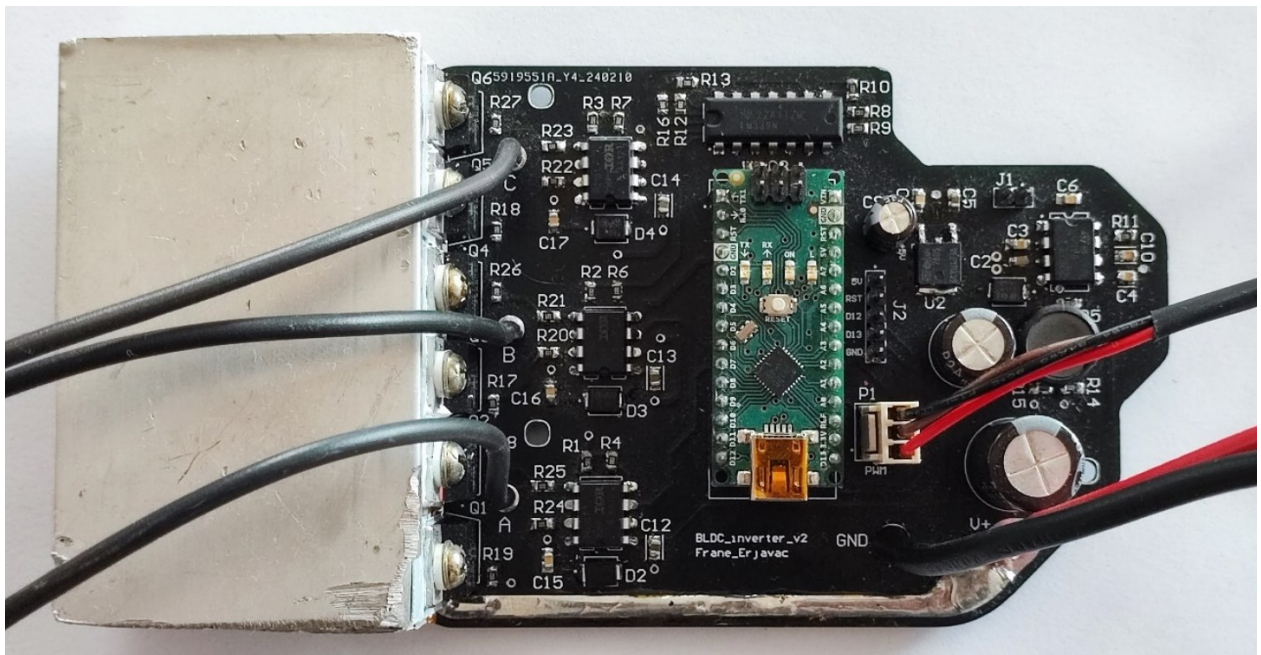
5.2. Lemljenje komponenata i montiranje hladnjaka

Nakon izrade sheme i modela tiskane pločice u programu Altium, potrebno je izraditi pločicu, nabaviti potrebne komponente i zalemiti ih na pločicu. Popis svih elektroničkih komponenti sklopa prikazan je na slici 5.5.

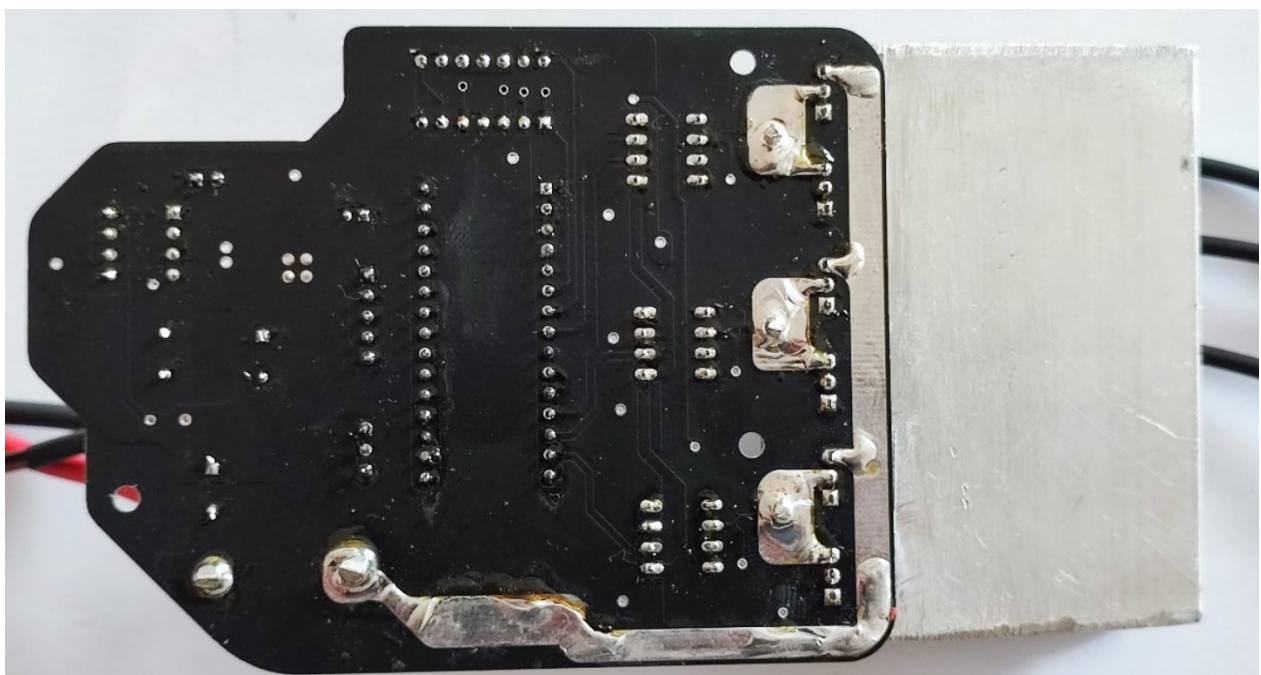
| | Comment | Description | Designator | Footprint | LibRef | Quantity |
|----|---------------------|---|--------------------------|---------------------|--------------------|----------|
| 1 | 330uF 63V | Aluminum Electrolytic Capacitors (Radial Lead... | C1 | FP-RAD-TH-D_12_5... | CMP-05427-00177... | 1 |
| 2 | 2.7n (0805) | | C2 | CAPC2013X94X50L... | CMP-2007-04155-1 | 1 |
| 3 | 100n (0805) | | C3, C6, C7, C15, C1... | CAPC2013X94X50... | CMP-1036-04427-2 | 6 |
| 4 | 220n (0805) | CAP CER 0.22UF 100V 10% X7R 0805 | C4 | FP-C0805C-DN-MFG | CMP-2007-03262-2 | 1 |
| 5 | 470n (0805) | | C5, C8 | CAPC2013X140X50... | CMP-2007-03309-1 | 2 |
| 6 | 100uF 16V | Aluminum Electrolytic Capacitors (Radial Lead... | C9 | FP-RAD-TH-D_5_0... | CMP-05427-00094... | 1 |
| 7 | 22n (0805) | General Purpose Ceramic Capacitor, 0805, 22... | C10 | FP-0805-L_2_01_0... | CMP-1036-04076-3 | 1 |
| 8 | 330uF 25V | Aluminum Electrolytic Capacitors (Radial Lead... | C11 | FP-RAD-TH-D_10_0... | CMP-05427-00111... | 1 |
| 9 | 10uF (0805) | CL21 Series 0805 10uF 25V ±10% Tolerance X... | C12, C13, C14 | FP-CL21-IPC_A | CMP-13271-00297... | 3 |
| 10 | STPS3L60U | DIODE SCHOTTKY 60V 3A SMB | D1 | FP-SMB-MFG | CMP-12187-00002... | 1 |
| 11 | STPS3150U | DIODE SCHOTTKY 150V 3A SMB | D2, D3, D4 | FP-SMB-MFG | CMP-12187-00002... | 3 |
| 12 | TSW-102-14-G-S | CONN HEADER VERT 2POS 2.54MM | J1 | FP-TSW-102-14-G-... | CMP-02766-00174... | 1 |
| 13 | 22-28-4050 | 22-28-4050 KK® 254 Breakaway Header, Vert... | J2 | FP-22-28-4050-MFG | CMP-00257-00278... | 1 |
| 14 | 180uH | Power Inductor, 180 uH +/- 10%, 0.7 A, -40 t... | L1 | COIL-RFB0807-2_V | CMP-0924-00025-1 | 1 |
| 15 | Arduino Nano ATM... | ARDUINO NANO ATMEGA328 EVAL BRD | MD1 | FP-A000005-MFG | CMP-189986-0000... | 1 |
| 16 | Pot. konektor | | P1 | 61900311121 | CMP-1502-00585-2 | 1 |
| 17 | IRF1407PBF | MOSFET N-CH 75V 130A TO-220AB | Q1, Q2, Q3, Q4, Q5... | FP-PG-TO220-3-M... | CMP-32901-00050... | 6 |
| 18 | 33k (0805) | | R1, R2, R3, R8, R9, R... | RESC2013X60X40N... | CMP-2001-00630-1 | 6 |
| 19 | 10k (0805) | Chip Resistor, 10 KOhm, +/- 1%, 0.125 W, -55... | R4, R6, R7, R12, R1... | RESC2013X60X35N... | CMP-1659-00013-4 | 12 |
| 20 | 20k (0805) | RES 20K OHM 0.1% 1/8W 0805 | R5 | FP-ERA6A-MFG | CMP-2001-00610-2 | 1 |
| 21 | 9.1k (0805) | | R11 | RESC2013X70X40N... | CMP-2001-00577-1 | 1 |
| 22 | 12k (0805) | | R14 | RESC2013X70X40... | CMP-2001-00513-1 | 1 |
| 23 | 4.7k (0805) | | R15 | RESC2013X60X40... | CMP-2001-00644-1 | 1 |
| 24 | 100R (0805) | | R20, R21, R22, R23,... | RESC2013X60X40... | CMP-2001-00580-1 | 6 |
| 25 | L4978 | 2A, Step-down switching regulator, 8-Pin DIP | U1 | DIP8 | CMP-0240-00001-1 | 1 |
| 26 | L78M05 | Positive Voltage Regulator, 5V, 3-Pin DPAK, Ta... | U2 | TO-252_L | CMP-0244-00178-1 | 1 |
| 27 | LM339NG | Single Supply Quad Comparators, 0 to 70 deg... | U3 | ONSC-PDIP-14-64... | CMP-1305-00007-1 | 1 |
| 28 | IR2101 | Half-Bridge Gate Driver IC Non-Inverting 8-P... | U4, U5, U6 | DIL08 | IR2101 | 3 |

Slika 5.5. – Popis komponenti

Radi jednostavnosti izrade pločica je naručena preko interneta, čime je eliminirana kompleksnost i smanjena je cijena usporedno s ručnom izradom pločice. Zatim slijedi lemljenje komponenata na pločicu s tinol žicom (60% Sn + 40% Pb) promjera 1 mm. Kod lemljenja važno je krenuti od malih SMD komponenata (otpornika i kondenzatora), a za kraj ostaviti velike elektrolitske kondenzatore, čipove s više nožica, MOSFET-e, konektore i slično. SMD komponente je preporučljivo lemiti s puhalom na vrući zrak i pastom, a THT običnom lemlicom. Kada su sve elektroničke komponente zalemljene, potrebno je zalemiti žice za ulazni napon (crveni vodič za + pol, a crni za – pol) i tri žice koje se spajaju na BLDC motor. Pošto su struje koje će ti vodiči provoditi velike, važno je odabrati one s većim poprečnim presjekom ($2.5 - 4 \text{ mm}^2$). Također, potrebno je spojiti i potencijometar na trožični priključak. Kada su svi dijelovi zalemljeni, pričvršćuje se aluminijski hladnjak za energetske sklopke. Hladnjak sadrži i rešetke radi bolje odvodnje topline. Između hladnjaka i MOSFET-a potrebno je ugraditi izolirajuću traku i termalnu pastu radi međusobne izolacije sklopki. Gotova tiskana pločica sa zalemljenim komponentama i hladnjakom prikazana je na slikama 5.6. i 5.7.



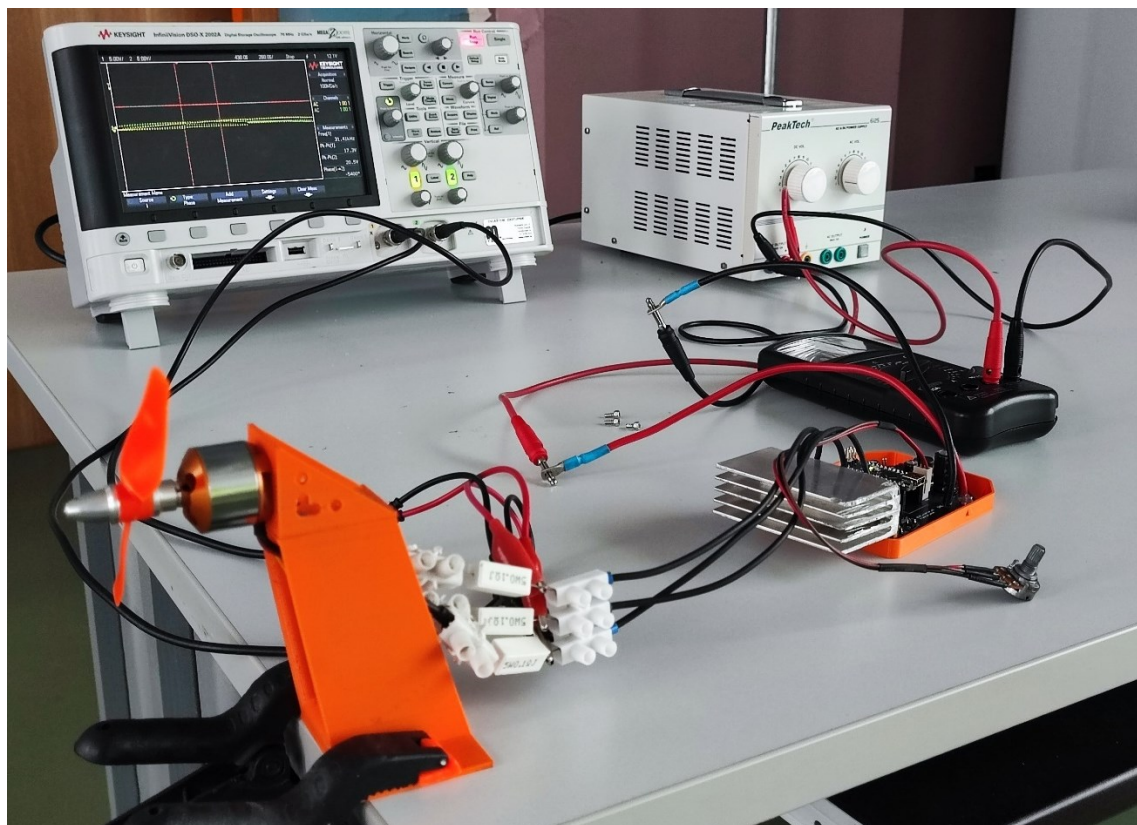
Slika 5.6. – Gornja strana gotove tiskane pločice



Slika 5.7. – Donja strana gotove tiskane pločice

6. Analiza rada sklopa

Nakon izrade tiskane pločice i zalemljivanja komponenti, potrebno je spojiti Arduino Nano na računalo i učitati programski kod u besplatnom programu “Arduino IDE”. U ovom se radu neće detaljno ulaziti u analizu programskog koda, ali važno je znati da kod radi na principu objašnjenom u poglavlju 3.3. Zatim slijedi spajanje testnog BLDC motora na sklop te spajanje izvora napajanja i osciloskopa kako bi se mogli vidjeti razni valni oblici u samom sklopu. Prikaz ispitnog stola sa spojenim upravljačkim sklopom, osciloskopom i laboratorijskim napajanjem nalazi se na slici 6.1.



Slika 6.1. - Postavljeni ispitni stol

Motor je pričvršćen na 3D printano postolje koje je pričvrćeno na stol plastičnim stegama. Također, na motor je spojen propeler koji služi kao probno opterećenje. Sklop je spojen preko laboratorijskog napajanja na napon $U_{ul} = 13 V$ te ima ograničenu maksimalnu jakost struje $I_{max} = 5 A$. Iz razloga što osciloskop može mjeriti samo napon, u seriju sa svakom fazom motora spojen je po jedan “shunt” otpornik. Na taj način mjerenjem napona na poznatom otporu (u ovom slučaju $R_s = 0.1 \Omega, 5W$) može se vrlo lako izračunati jakost struje. Nadalje, valni oblik mjerenog pada napona na shuntu zapravo je i traženi valni oblik struje.

6.1. Valni oblik upravljačkog signala

Za mjerenje upravljačkog signala jedan izvod sonde osciloskopa potrebno je spojiti na referentnu točku, odnosno negativan pol izvora napajanja, a drugi izvod se spaja na onaj signal koji želimo prikazati. Pošto korišteni sklop ima dva kanala, na zaslonu se mogu istovremeno prikazati dva signala. Na prvi kanal se spaja signal mikrokontrolera za upravljanje donjeg ili *low-side* MOSFET-a jedne faze (zeleno boja), a na drugi se spaja pojačani signal iz gate drivera (žuta boja). (slika 6.2.)



Slika 6.2. - Valni oblici upravljačkih signala

Na slici 6.2. su vidljivi pravokutni impulsi napona koji služe za upravljanje low-side sklopki. Zelenom je bojom prikazan signal mikrokontrolera (5 V), a žutom bojom je prikazan signal na izlazu gate drivera (12 V) te su međusobno u fazi. Navedeni su signali dobiveni PWM-om s radnim ciklusom (engl. *duty cycle*) od 33 % što znači da je u jednoj periodi signal uključen trećinu vremena, a ostale dvije trećine ugašen. Kod regulacije brzine vrtnje mijenja se frekvencija pulseva, a radni ciklus ostaje isti. Za veće brzine vrtnje rotora frekvencija je veća. Na slici 6.2. može se vidjeti da frekvencija pravokutnih pulseva iznosi 444 Hz. Na slici 6.3. prikazani su isti valni oblici za veću brzinu vrtnje, ujedno i veću frekvenciju uklapanja (1.38 kHz).



Slika 6.3. - Valni oblici upravljačkih signala za veću brzinu vrtnje

Na slici 6.4. prikazani su valni oblici upravljačkih signala za gornje ili *high-side* MOSFET-e. Može se primjetiti da se jedan pravokutni impuls sastoji od mnogo visokofrekventnih impulsa frekvencije $f \approx 30 \text{ kHz}$. Na taj način struja u namotu postepeno raste i tako poprimi približno sinusoidalan oblik što će se moći vidjeti u idućem potpoglavlju. Gornji valni oblik je ujedno i sličan gornjoj poluperiodi napona jedne faze.



Slika 6.4. - Valni oblici upravljačkih signala *high-side* MOSFET-a

6.2. Valni oblik izlaznog napona i struje

Za mjerenje valnog oblika napona sonde osciloskopa spajaju se između bilo koje dvije faze motora. Na slici 6.5. i 6.6. prikazani su valni oblici napona za manju i veću brzinu vrtnje.



Slika 6.5. - Valni oblik izlaznog napona jedne faze



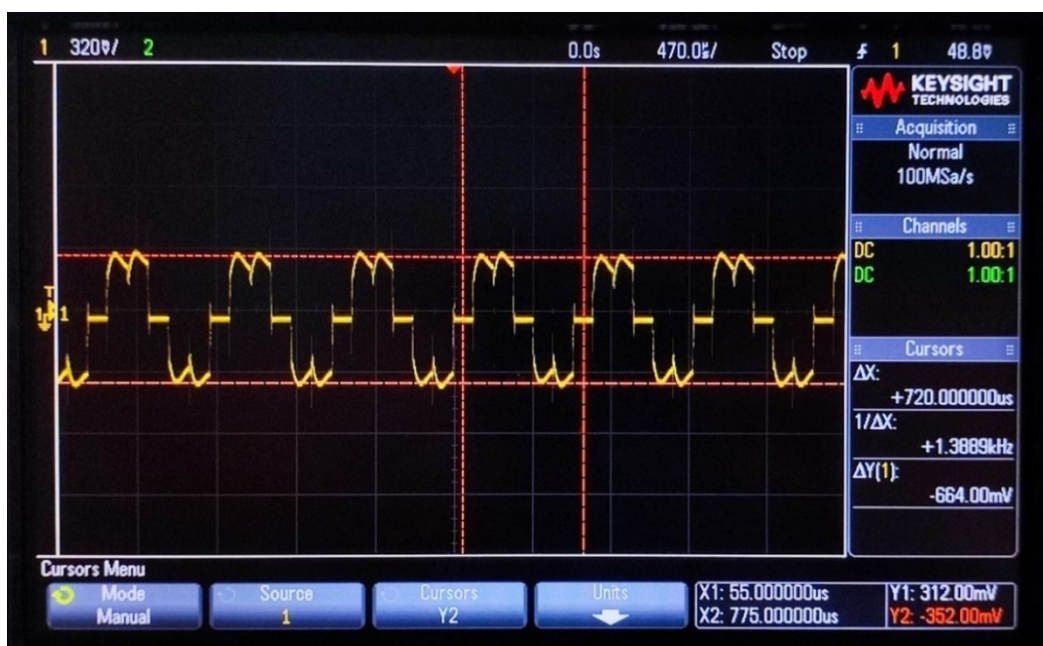
Slika 6.6. - Valni oblik izlaznog napona za veću brzinu vrtnje

Na slikama se može primjetiti da signal ima trapezoidalni oblik napona. Pri manjim brzinama vrtnje gdje je frekvencija uklapanja manja mogu se i dalje primjetiti PWM impulsi napona koji pri većim frekvencijama nestanu i signal postane “čišći”. Amplituda napona je jednaka vrijednosti izvora napajanja, što znači da je *peak-to-peak* vrijednost jednaka $V_{pp} = 24 \text{ V}$.

Za prikaz valnih oblika struje na zaslonu, potrebno je sonde osciloskopa spojiti na izvode prethodno spomenutog shunt otpornika. Valni oblici struje za manju i veću brzinu vrtnje prikazani su na slikama 6.7 i 6.8.



Slika 6.7. - Valni oblik struje



Slika 6.8. - Valni oblik struje za veću brzinu vrtnje

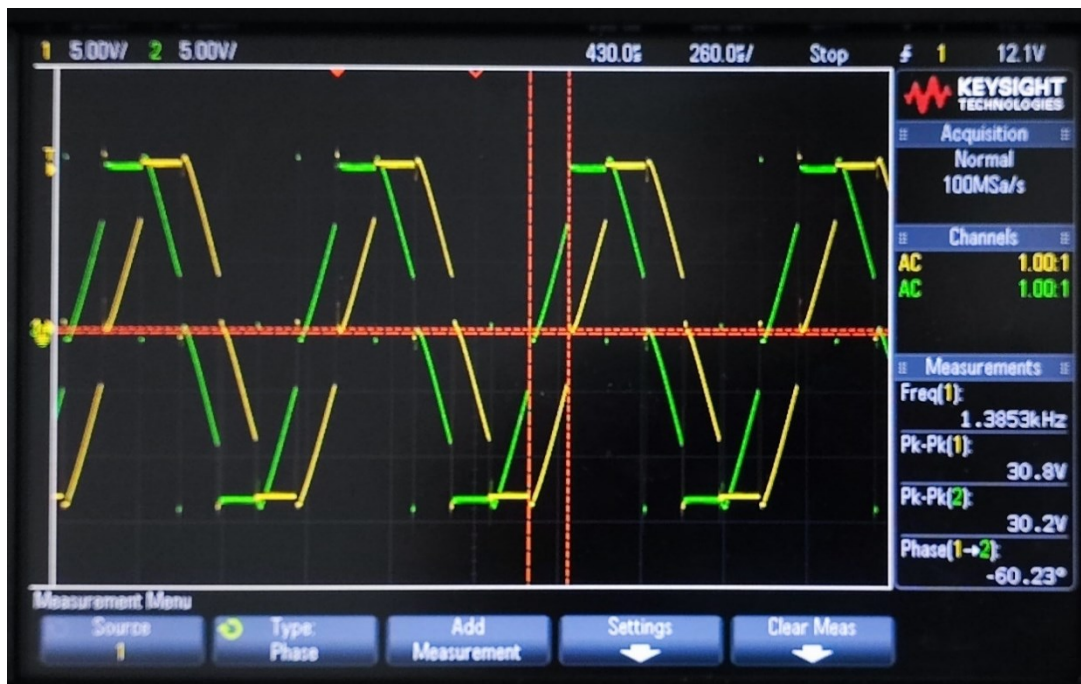
S gornjih slika je vidljivo da je valni oblik struje pri manjim brzinama pun šuma zbog visokofrekventnih impulsa kojim se uklapaju energetske sklopke. Pri većim brzinama raste i frekvencija te signal postaje približno kvazi-sinusnog oblika. Vidljiv je i “skok” struje pri maksimalnoj vrijednosti, što znači da je u tom trenutku promijenjeno stanje sklopke. Amplituda napona na shuntu je 330 mV, otpor shunta 0.1 Ω, što daje amplitudu struje $I_{max} = 3.3$ A.

Na slici 6.9. prikazani su valni oblici napona i struje na istom zaslonu. Može se vidjeti da napon (zelena krivulja) vrlo malo prethodi struji (žuta krivulja), odnosno da su blago pomaknuti od toga da budu u fazi. Iz toga se može zaključiti da motor i sklop rade vrlo efikasno.



Slika 6.9. - Valni oblici struje i napona jedne faze

Na slici 6.10. prikazani su valni oblici napona dvije faze na jednom zaslonu gdje je vidljiv fazni pomak od 60° što je i očekivano obzirom na šest-koračnu komutaciju od 120° .



Slika 6.10. - Valni oblici napona dvije faze

7. Zaključak

Izum električnog motora značajno je promijenio živote ljudi na Zemlji, a danas ga se može pronaći u gotovo svakom električnom uređaju, kao i u svakoj elektrani na svijetu. Zbog toga je vrlo važno da se pretvorba mehaničke energije u električnu, i obratno, odvija sa što manje gubitaka energije. Korištenjem današnjih PMSM strojeva, umjesto indukcijskih ili kolektorskih strojeva, zajamčena je značajno manja potrošnja energije i materijala za izradu. Iz razloga što takvi moderni strojevi zahtjevaju upravljački sklop koji može biti vrlo kompleksan, u ovom radu cilj je bio samostalno analizirati, projektirati te izraditi i ispitati takav sklop na što je moguće jednostavniji način. Prije same izrade tiskane pločice bilo je potrebno analizirati sve moguće konfiguracije sklopa te različite algoritme upravljanja. Nakon toga, odabrane su elektroničke komponente prema maksimalnim vrijednostima osnovnih parametara koji će na njima vladati. Nakon izrađenih shema pojedinih dijelova sklopa, pristupilo se dizajnu same tiskane pločice gdje je osim električkih, važno uzeti u obzir mehaničke i fizikalne zahtjeve kao što su hlađenje energetskih komponenti, lemljenje, montaža pločice na kućište i sl. Kako bi se smanjila veličina pločice, korištene su manje SMD komponente gdje god je to bilo moguće. Naravno, vrlo je važno bilo dovesti sklop na visoku razinu efikasnosti, što se u analizi sklopa pokazalo uspješnim.

Pri cijelom procesu izrade sklopa, uz korištenje postojećeg znanja steknutog na kolegijima, stekao sam veliku količinu znanja iz područja energetske i digitalne elektronike, električnih strojeva, kao i drugih grana elektrotehnike, što je uvelike pomoglo kod shvaćanja i rješavanja inženjerskih problema ovoga rada.

8. Popis literature

- [1] Erkol, H. O., “Optimized Field Oriented Control Design by Multi Objective Optimization”, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, br. 2, 56 str., Karabuk, 2019.
- [2] Kim, S-H., “Electric motor control”, Elsevier, Kangwon, 2017.
- [3] “Three phase alternator stator”, s Interneta, <https://burnoutbikes.zodiac.nl/en/05-engine-electrics/stator-rotor/three-phase-alternator-stator-1472>, 2022.
- [4] “BLDC Motor Stator Winding Services for BLDC Motor Coil Winding”, s Interneta, <https://www.made-in-china.com/showroom/jystatorrotor/product-detailkCxnoLbyZiWl/China-BLDC-Motor-Stator-Winding-Services-for-BLDC-Motor-Coil-Winding.html>, 6.12.2023.
- [5] Niessen, F., “Winding scheme calculator”, s Interneta, <https://bavaria-direct.co.za/scheme/calculator/>, 13.3.2014.
- [6] “LEAF performance tuning”, s Interneta, <https://my Nissanleaf.com/threads/leaf-performance-tuning.32505/page-2>, 10.1.2022.
- [7] “Permanent magnet rotor assembly”, s Interneta, <https://tymagnets.com/permanent-magnet-rotor-assembly/>, 28.5.2023.
- [8] Kethan, A. “IPMSynRM Motor”, s Interneta, <https://saenitk.wordpress.com/2021/10/10/ipmsynrm-motor/>, 10.10.2021.
- [9] Gaddam S, Y., “How synchronous reluctance motor work?”, s Interneta, <https://www.lesics.com/how-synchronous-reluctance-motor-work.html>, 16.12.2020.
- [10] Wang, B., Wang, J., Griffio, A., Sun, Z., Chong, E. “A fault tolerant machine drive based on permanent magnet assisted synchronous reluctance machine”, IEEE, br. 10.1109/ECCE.2016.7854677, 8 str., Sheffield, 2016.
- [11] Xia, C.L., “Permanent magnet brushless DC motor drives and controls”, John Wiley and Sons Singapore, Tianjin, 2012.
- [12] Chengming, Z., Guo, Q., Li, L., Wang, M., Wang, T., “System Efficiency Improvement for Electric Vehicles Adopting a Permanent Magnet Synchronous Motor Direct Drive System”, Energies, br. 10, 28 str., Harbin, 2017.

- [13] International Rectifier, “IR 2101, High and low side driver”, s Interneta, <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68056/IR>, 23.12.2007.
- [14] Byung-Geuk, C., Hong, C., Lee, J., Lee, W-J., “Simple position sensorless V/f scalar control method for permanent-magnet synchronous motor drives”, Journal of power electronics, br. 21, str. 1020-1029, Daejeon, 2021.
- [15] Gtake, S., “Field Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motor in electric vehicles”, s Interneta, <https://evreporter.com/field-oriented-control-of-pmsm-in-ev/>, 22.8.2022.
- [16] Halvaei, A., Moghbelli, H., Vahedi, A., “A low-cost sensorless control for reduced-parts, brushless DC motor drives”, 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, br. 10.1109/ISIE.2008.4676886, str. 662-667, Cambridge, 2008.
- [17] Akin, B., Bhardwaj, M., “Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors”, Texas Instruments, Dallas, 2013.
- [18] ST Microelectronics, “L4978, 2A Step down switching regulator”, s Interneta, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l4978.pdf>, 2005.
- [19] “Arduino Nano”, s Interneta, <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>, 30.8.2021.
- [20] Texas Instruments, “LMx39-N, LM2901-N, LM3302-N Low-Power Low-Offset Voltage Quad Comparators”, s Interneta, <https://www.ti.com/product/LM339-N>, 31.12.2014.

9. Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 2.1. Usporedba sinkronog motora s krutom uzbuđom i uzbuđnim namotom..... | 3 |
| Slika 2.2. Valni oblik trofaznog napona i promjena položaja rotora | 4 |
| Slika 2.3. Stator s unutarnjim rotorom i s vanjskim rotorom | 6 |
| Slika 2.4. – Stator s koncentriranim namotima..... | 7 |
| Slika 2.5. – Shema namatanja BLDC motora s koncentriranim namotima..... | 8 |
| Slika 2.6. – Distribuirani namot | 9 |
| Slika 2.7. – Valni oblici povratne EMS za koncentrirani i distribuirani namot | 9 |
| Slika 2.8. – Rotor sinkronog stroja s površinski montiranim permanentnim magnetima | 11 |
| Slika 2.9. – Rotor IPMSM stroja iz električnog vozila | 12 |
| Slika 2.10. – Prikaz interakcije magnetskog toka u sinkro-reluktantnom motoru..... | 13 |
| Slika 3.1. – Shematski prikaz upravljačkog sustava | 14 |
| Slika 3.2. – Polumosna konfiguracija trofaznog izmjenjivača..... | 16 |
| Slika 3.3. – Punomosni spoj trofaznog izmjenjivača | 17 |
| Slika 3.4. – Shema tipične primjene IR2101 gate drivera, International Rectifier | 18 |
| Slika 3.5. – Blok shema skalarnog upravljanja PMSM-om..... | 19 |
| Slika 3.6. – Blok shema FOC upravljanja PMSM-om | 20 |
| Slika 3.7. – Signali povratne elektromotorne sile BLDC motora | 22 |
| Slika 3.8. – Valni oblici struja i povratne EMS i pripadna stanja sklopki | 23 |
| Slika 4.1. – Shema silaznog pretvarača 12-50 V / 12 V | 25 |
| Slika 4.2. – Vrijednost izlaznog napona (V_o) ovisno o vrijednostima R_3 i R_4 | 26 |
| Slika 4.3. – Shema regulatora napona 12 / 5 V | 26 |
| Slika 4.4. – Shema punomosne konfiguracije s IRF1407 tranzistorima | 27 |
| Slika 4.5. – Polumosna konfiguracija MOSFET-a za jednu fazu..... | 28 |
| Slika 4.6. – Arduino Nano razvojna pločica s ATmega328 mikroprocesorom | 29 |
| Slika 4.7. – Shema spajanja mikrokontrolera Arduino Nano..... | 29 |
| Slika 4.8. – Shema spajanja IR2101 gate drivera..... | 30 |
| Slika 4.9. – Vrijeme uključivanja (t_{on}) i isključivanja (t_{off}) | 31 |

| | |
|--|----|
| Slika 4.10. – Djelitelji napona sklopa povratne veze | 32 |
| Slika 4.11. – Opis pinova LM339N integriranog kruga | 33 |
| Slika 4.12. – Shema spajanja LM339 komparatora..... | 33 |
| Slika 5.1. – L4978 integrirani krug i njegov 2D model..... | 34 |
| Slika 5.2. – 2D prikaz gotove tiskane pločice..... | 35 |
| Slika 5.3. – 3D prikaz gornje strane tiskane pločice | 36 |
| Slika 5.4. – 3D prikaz donje strane tiskane pločice..... | 36 |
| Slika 5.5. – Popis komponenti | 37 |
| Slika 5.6. – Gornja strana gotove tiskane pločice | 38 |
| Slika 5.7. – Donja strana gotove tiskane pločice | 38 |
| Slika 6.1. – Postavljeni ispitni stol | 39 |
| Slika 6.2. – Valni oblici upravljačkih signala..... | 40 |
| Slika 6.3. – Valni oblici upravljačkih signala za veću brzinu vrtnje | 41 |
| Slika 6.4. – Valni oblici upravljačkih signala high-side MOSFET-a | 41 |
| Slika 6.5. – Valni oblik izlaznog napona jedne faze..... | 42 |
| Slika 6.6. – Valni oblik izlaznog napona za veću brzinu vrtnje | 42 |
| Slika 6.7. – Valni oblik struje..... | 43 |
| Slika 6.8. – Valni oblik struje za veću brzinu vrtnje..... | 43 |
| Slika 6.9. – Valni oblici struje i napona jedne faze | 44 |
| Slika 6.10. – Valni oblici napona dvije faze..... | 44 |

10. Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 2.1. Prednosti i mane magnetskih materijala rotora..... | 10 |
| Tablica 3.1. – Usporedba energetske poluvodičke sklopke | 15 |
| Tablica 3.2. – Algoritmi upravljanja PMSM-om..... | 21 |
| Tablica 3.3 – Šest-koračna komutacija BLDC motora | 23 |

11. Popis oznaka i kratica

AC – izmjenična struja

DC – istosmjerna struja

VFD – pogon promjenjive frekvencije

BLDC – istosmjerni motor bez četkica

PMSM – sinkroni motor s permanentnim magnetima

OMP – okretno magnetsko polje

PWM – pulsno-širinska modulacija

IGBT – bipolarni tranzistor s izoliranim uvodom

MOSFET – metal-oksidni poluvodički tranzistor s efektom polja

EMS – elektromotorna sila

SPM – površinski permanentni magneti

IPM – unutrašnji permanentni magneti

CPU – središnja upravljačka jedinica

FOC – poljno orijentirano upravljanje

DTC – direktno upravljanje okretnim momentom

SMD – komponenta za površinsku montažu

THT – komponenta za montažu kroz pločicu

GND – uzemljenje, referentni potencijal

η – stupanj korisnosti, %

n – brzina vrtnje, o/min

f – frekvencija, Hz

p – broj pari polova

L – induktivitet, H

U – napon, V

I – jakost struje, A

R – električni otpor, Ω

t – vrijeme, s

SAŽETAK

U ovom završnom radu bilo je potrebno napraviti elektronički sklop za upravljanje sinkronim strojem s permanentnim magnetima (PMSM). Prvo su se detaljno pojasnile različite izvedbe konstrukcije rotora i statora sinkronih motora. Zatim su se analizirale prednosti i mane različitih algoritama upravljanja te je odabrana najpogodnija varijanta za izradu sklopa. Nakon osnovnih proračuna za željenu nazivnu snagu sklopa, bilo je potrebno napraviti shemu u programu Altium Designer. Odabrane su elektroničke komponente za sklop koje pružaju optimalne performanse sklopa. Nadalje, izrađena je tiskana pločica prema 3D modelu napravljenom na računalu. Nakon zalemljivanja komponenti i izrade hladnjaka za energetske komponente, pristupilo se analizi rada sklopa. Cilj rada bio je izraditi vrlo složeni sklop na što jednostavniji i ekonomičniji način.

Ključne riječi: PMSM, izmjenjivač, energetska elektronika, električni strojevi

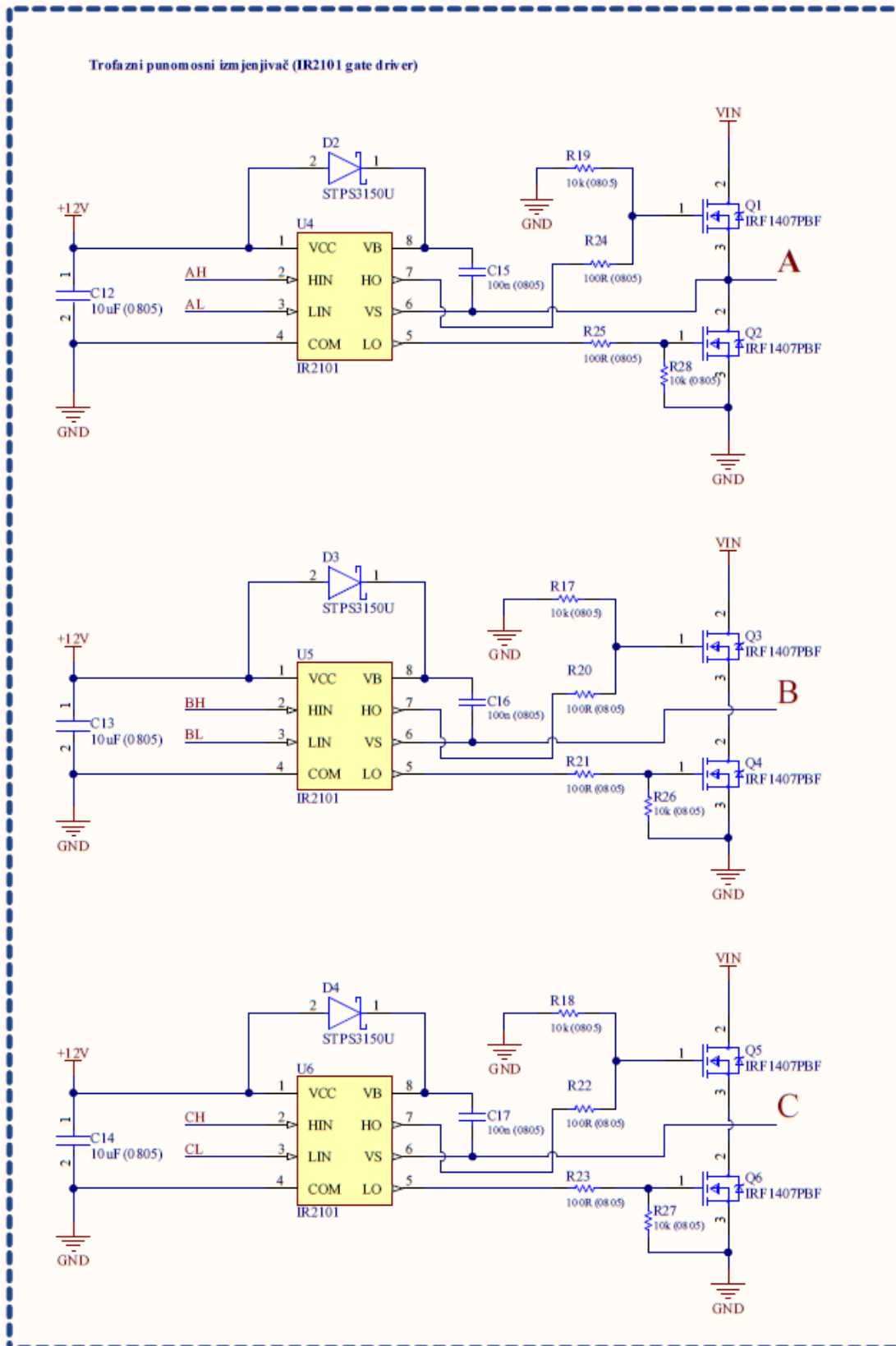
ABSTRACT

In this final work it was necessary to manufacture an electronic circuit for the control of a permanent magnet synchronous machine (PMSM). Firstly, different versions of the rotor and stator construction have been explained in detail. Then, different algorithms of control have been analyzed and the most suitable variant was chosen for this circuit. After basic calculations for the desired nominal power of the circuit, it was necessary to make a schematic in the Altium Designer software. Next, electronic components that gave the optimal performance were chosen. Afterwards, a printed circuit board was made according to the 3D model made in the computer program. After soldering the components and mounting the heatsink on the power components, the functionality of the circuit was analyzed. The goal of the work was to design and manufacture a complex circuit in the simplest and the most economical way possible.

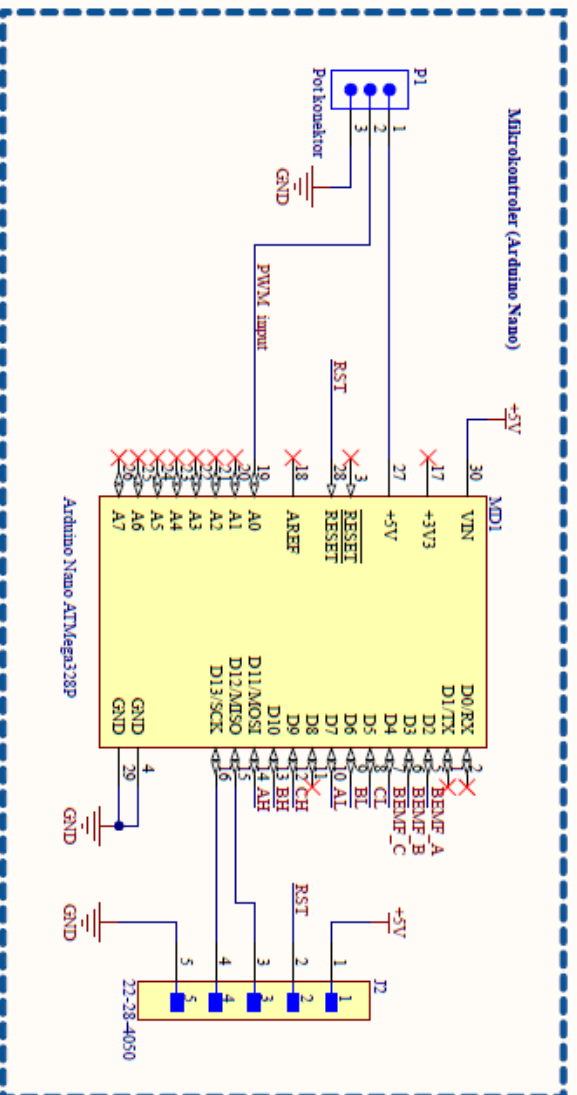
Keywords: PMSM, inverter, power electronics, electrical machines

PRILOZI

Trofazni punomosni izmenjivač (IR2101 gate driver)

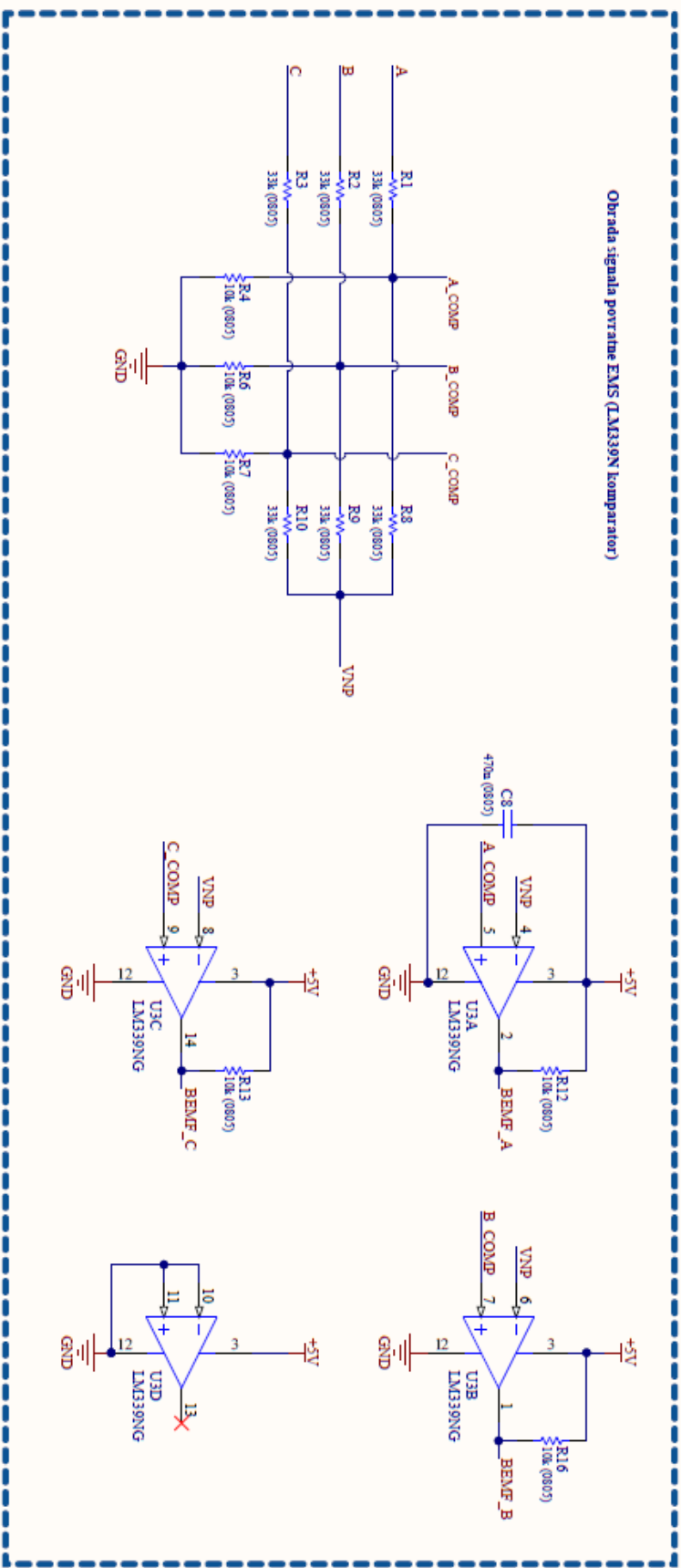


| | | |
|--------------------------|--|----------|
| Title | | |
| IR2101 gate driver sklop | | |
| Size | Number | Revision |
| A4 | | |
| Date: | 6/17/2024 | Sheet of |
| File: | C:\Users\... \BLDC_inverter_v2_FrameErija\OnSchDoc | 10 |

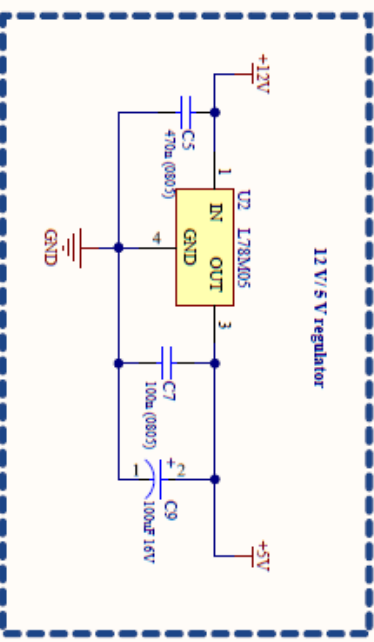
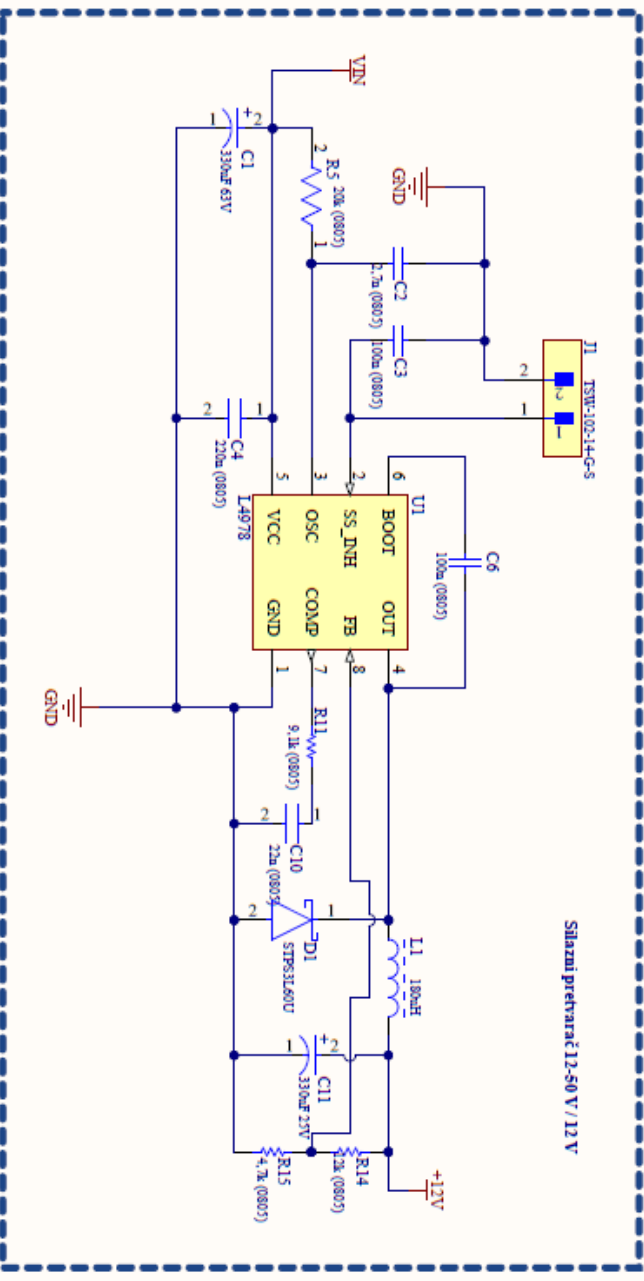


| | | | |
|-------|---|--------------|--|
| Title | | Arduino Nano | |
| Size | Number | Revision | |
| A4 | | | |
| Date | 6/17/2024 | Sheet of | |
| File | C:\Users\BLDC\Documents\Arduino\Arduino Nano\Arduino Nano.ino | 4 | |

Obrada signala porovnanje ENAS (LM339N komparator)



| | | | |
|-------|---|-------------------|--|
| Title | | LM339N komparator | |
| Size | Number | Revision | |
| A4 | | | |
| Date: | 6/17/2024 | Sheet of | |
| File: | C:\Users\..._BIDC_inverter_v2_Friedrich_Dokumente | 4 | |



| | | | |
|-------|--|--|----------|
| Title | | Silažni pretvarač 50/12 V/12V/5V regulator | |
| Size | Number | Revision | |
| A4 | | | |
| Date | 6/17/2024 | | Sheet of |
| File | C:\Users\BILDC\inverter v2\FinaErih\BrendanBAC | | 4 |