Beskolektorski istosmjerni motori

Čakanić, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:488896

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-21**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

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

Sveučilišni studij

BESKOLEKTORSKI ISTOSMJERNI MOTORI

Završni rad

Karlo Čakanić

Osijek, 2021.

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 13.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime studenta:	Karlo Čakanić
Studij, smjer:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4500, 23.07.2018.
OIB studenta:	74252816120
Mentor:	Doc. dr. sc. Vedrana Jerković Štil
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Beskolektorski istosmjerni motori
Znanstvena grana rada:	**Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)**
Predložena ocjena završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene mentora:	13.09.2021.
Datum potvrde ocjene Odbora:	22.09.2021.

Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

FERIT
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 22.09.2021.

Ime i prezime studenta:	Karlo Čakanić
Studij:	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4500, 23.07.2018.
Turnitin podudaranje [%]:	2%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**: Beskolektorski istosmjerni motori**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Vedrana Jerković Štil

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.
Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

SADRŽAJ

1. UVOD *1*

1.1. Zadatak završnog rada **1**

2. TEMELJ RADA ELEKTROMOTORA *2*

2.1. Elektromagnetska indukcija **2**

2.2. Sila na vodič u magnetskom polju **3**

2.3. Magnetsko polje kroz zavojnicu **4**

3. PRINCIP RADA ISTOSMJERNIH MOTORA *5*

4. GRAĐA BESKOLEKTORSKOG ISTOSMJERNOG MOTORA *8*

4.1. Mehanički dijelovi **10**

4.2. Kontroler **11**

4.2.1 H-mosni spoj 13

4.2.2 Mosni spoj 15

4.2.3 Optički senzori 16

4.2.4 Detekcija položaja Hallovim senzorom 17

4.3. Izvedbe **20**

4.3.1 Vanjski rotor 20

4.3.2 Unutarnji rotor 21

5. PRIMJENA *22*

5.1. Vozila **22**

5.2. Servopogoni **24**

5.3. Ostale primjene **25**

ZAKLJUČAK *26*

LITERATURA *27*

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA *28*

POPIS KORIŠTENIH KRATICA *29*

SAŽETAK *30*

ABSTRACT *31*

ŽIVOTOPIS *32*

1. UVOD

Motori su strojevi koji proizvode mehanički rad korištenjem različitih vrsta energije, tako se strojevi koji koriste električnu energiju nazivaju elektromotorima. Razne vrste motora nalaze se oko nas u svakodnevnom životu a da se to ni ne primijeti. Istosmjerni beskolektorski motori su motori manjih dimenzija pokretani vremenski nepromjenjivom strujom. Za razliku od motora kojima pogon ovisi o promjenjivom magnetskom polju uzrokovano promjenjivom strujom, istosmjerni motori koriste permanentne magnete koji u kombinaciji sa magnetskim poljem uzrokovano istosmjernom strujom uzrokuju zakret rotora motora. Zbog nedostatka kolektora i četkica te zbog korištenja istosmjerne struje, ova vrsta motora obavezno sadrži kontroler kojim se pokreće i regulira brzina vrtnje motora. Ova vrsta motora ima svoje prednosti i mane. Jedna od prednosti je mogućnost preciznog kontroliranja brzine vrtnje motora kontrolerom, dok je nedostatak ugrađeni kontroler koji dodatno podiže cijenu beskolektorskim istosmjernim motorima. Motori pokretani izmjeničnim strujama i višefazni motori nemaju potrebu za korištenje neke vrste regulatora ukoliko to nije zahtijevano od strane pogona. Istosmjerni motori u svom sastavu imaju kolektor i četkice koji služe kako bi se doveo poticaj na uzbudne namote u pravom trenutku te kako bi se motor zarotirao i kako bi se održao moment motora dok izmjenične i višefazne motore pokreće izmjenično magnetsko polje stvoreno od strane izmjenične struje kojim se kombinacijom faza može ostvariti okretno magnetsko polje. Regulator beskolektorskog motora zamjenjuje četkice i kolektor ali služi u istu svrhu, kako bi se pravi signal doveo do namota gdje je to potrebno u pravom vremenskom trenutku. Beskolektorski motori su izvedeni u dva oblika, beskolektorski motori sa unutarnjim i beskolektorski motori sa vanjskim rotorom. Neovisno o izvedbi rotora principi rada oba tipa motora su isti, što će biti detaljnije opisano kasnije u radu. Uz princip rada i izvedbe beskolektorskih istosmjernih motora proučiti će se detaljnije i njegove prednosti i nedostatci te će primjeri pokazati njihovo okvirno područje uporabe.

1.1. Zadatak završnog rada

Opisati način rada beskolektorskih istosmjernih motora. Navesti izvedbe beskolektorskih istosmjernih motora. Dati primjere primjene beskolektorskih istosmjernih motora.

2. TEMELJ RADA ELEKTROMOTORA

Kao što mu ime kaže osnova za rad elektromotora je električna energija. Električni stroj se koristi kako bi se električna energija pretvorila u mehaničku i obratno. Današnja tehnologija pruža prijenos električne energije i na teško dostupna mjesta što je omogućilo vrlo široku uporabu električnih strojeva koji su preuzeli značajan dio mehaničkoga rada te olakšali i poboljšali čovjeku životne uvjete. Ovisno o pretvorbi razlikuju se motori i generatori. Generator koristi vanjsku mehaničku energiju koju prima preko osovine kako bi generirao električnu energiju. Motor je stroj koji električnu energiju dobivenu sa izvora električne energije (Električna mreža, akumulator) pretvara u mehaničku kao zakret osovine [1]. Ovisno o vrsti struje koja ulazi ili izlazi sa stezaljki stroja razlikujemo strojeve istosmjerne i izmjenične struje. Rad električnih motora i generatora je temeljen na tri fizikalne pojave:

- Elektromagnetska indukcija
- Sila na vodič protjecan strujom u magnetskom polju
- Zakon protjecanja

Elektromagnetska indukcija i pojava sile na vodič koji je protjecan strujom u magnetskom polju su bitne za pretvorbu mehaničke i električne energije dok zakon protjecanja povezuje struju i magnetske veličine [2].

2.1. Elektromagnetska indukcija

Elektromagnetska indukcija je pojava kod koje dolazi do stvaranja odnosno induciranja napona u zavojima vodiča koji obuhvaćaju magnetski tok. To se postiže promjenom magnetskog polja Φ u blizini mirujućeg vodiča ili gibanjem vodiča kroz mirujuće magnetsko polje. Ova pojava je izrečena *Faradayevim* zakonom [3]. Smjer induciranog napona određuje Lenzovo pravilo. Tada je napon e induciran u vodiču:

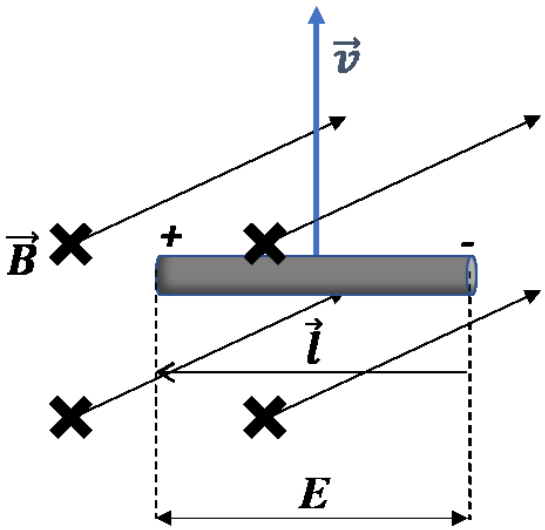
$$e = -N\frac{d\Phi}{dt} \tag{2.1.}$$

Gdje je: N – broj zavoja vodiča u ili oko magnetskoga polja.

Prema izrazu (2.1.) vidimo kako se napon mijenja ovisno o broju zavoja gdje se napon zavojnice poveća za N puta. Također iz derivacije vidimo kako je napon razmjeran promjeni magnetskog toka Φ u jedinici vremena t. Smjer induciranog napona može se odrediti pravilom desne ruke gdje se ispružena ruka orijentira tako da magnetske silnice ulaze u dlan a palac pokazuje smjer u kojem se kreče vodič na koji djeluje magnetsko polje. Tada ispruženi prsti pokazuju smjer djelovanja

induciranog napona [2]. Ako umjesno silnica polja i smjera gibanja vodiča uzmemo u obzir vektore (slika 2.1) koji su međusobno okomiti napon E induciran u vodiču je jednak umnošku vektora brzine v i vektora indukcije B što množi duljinu vodiča l [1].

$$E = (v \times B) \cdot l \tag{2.2.}$$



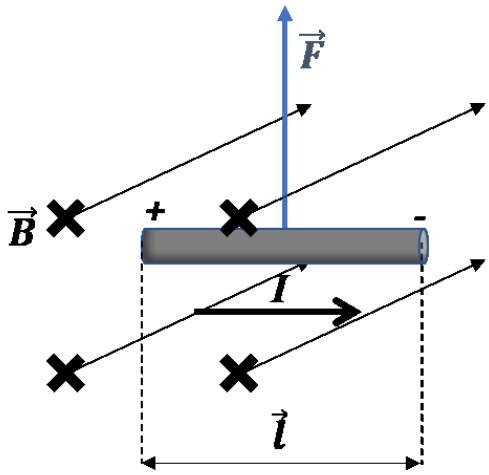
Sl. 2.1. Inducirani napon u vodiču koji prolazi magnetskim poljem

2.2. Sila na vodič u magnetskom polju

Sila $\vec{F}$ djeluje na vodič $\vec{l}$ kojim protječe struja I koji se nalazi u magnetnom polju $\vec{B}$ [2]. Vektori su okomiti jedni prema drugima stoga se sila F može odrediti pravilom desne ruke ili pravilom tri prsta. Kod pravila tri prsta palac pokazuje smjer gibanja pozitivnih nosilaca naboja (smjer protjecanja struje), kažiprst pokazuje smjer silnica magnetskog polja a srednji prst pokazuje smjer u kojem djeluje sila F [3]. Izraz za računanje vektora sile $\vec{F}$ glasi:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \tag{2.3.}$$

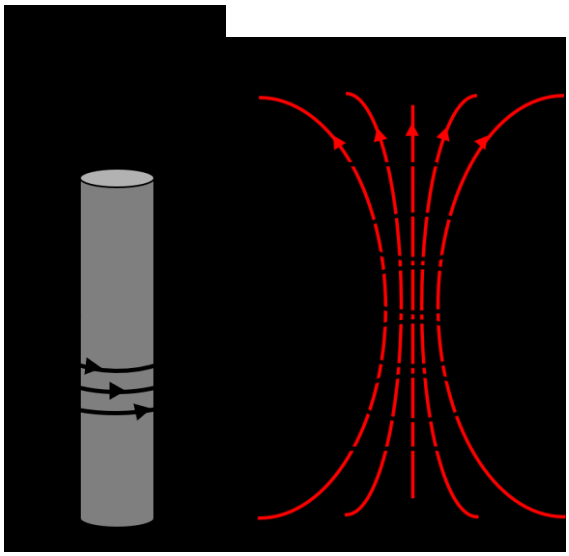
Djelovanje sile u smjeru puta znači ostvarivanje mehaničkoga rada [2]. Slika 2.2. grafički prikazuje odnos vektora te smjer u kojem djeluje sila kada se vodič nalazi u određenom magnetskom polju i njime teče struja I.



Sl. 2.2. Sila na vodič protjecan strujom u magnetskom polju

2.3. Magnetsko polje kroz zavojnicu

Oko ravnog vodiča kojim teče struja se stvara magnetsko polje. Magnetsko polje moguće je odrediti pravilom desne ruke prema slici 2.3. a) gdje palac pokazuje smjer protjecanja struje a savinuti prsti silnice magnetskog polja. Kod namotanog vodiča (zavojnice) magnetsko polje se stvara unutar zavojnice te izvire iz jednog kraja a uvire u suprotan kraj. Prema slici 2.3. b) moguće je uočiti kako se sada savinutim prstima pokazuje smjer struje prema tome kako su namoti orijentirani a palac pokazuje smjer magnetskog polja. Ako se unutar zavojnice umetne jezgra, ta jezgra u trenutku protjecanja struje kroz zavojnicu postaje elektromagnet, ovisno o vrsti jezgre ona može ostati magnetizirana i nakon prestanka toka struje kroz zavojnicu.

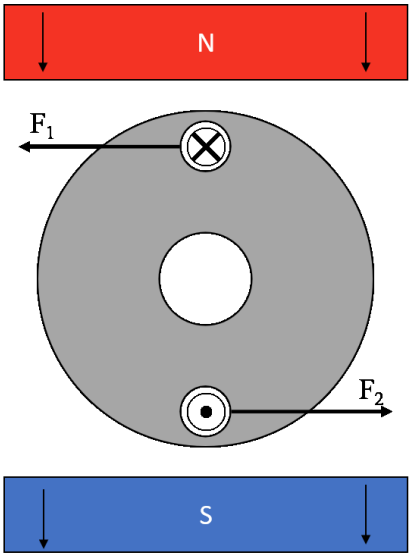


a) *b)*

Sl. 2.3. Magnetsko polje: a) oko ravnog vodiča, b) oko zakrivljenog vodiča

3. PRINCIP RADA ISTOSMJERNIH MOTORA

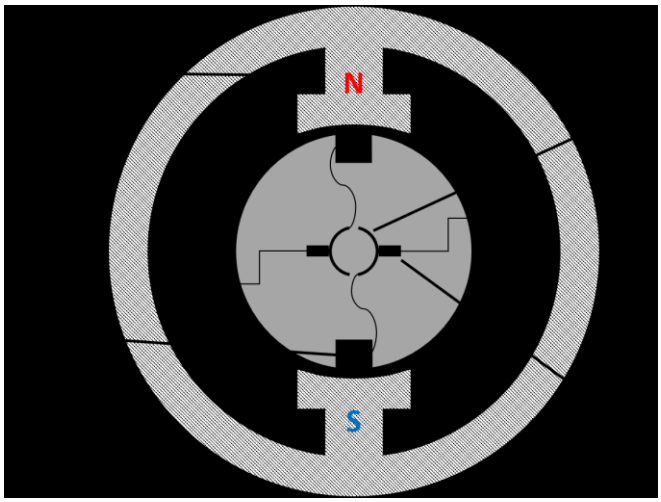
Kako bi se postigao mehanički rad koriste se prethodno navedeni zakoni i pojave. Svaki motor se sastoji od stacionarnog djela zvanog stator i od pokretnog djela zvanog rotor. Ovisno o vrsti izvedbe motora postoje oni sa vanjskim i oni sa unutarnjim rotorom koji su češći. Korištenjem prethodno navedenih zakona motorima se pridružuju namoti koji stvaraju magnetska polja. Kako bi se postigla rotacija jedno magnetsko polje miruje te prati drugo, okretno magnetsko polje. Slika 3.1. prikazuje sile koje djeluju na rotor pri prolasku struje kroz petlju koja se nalazi u magnetskom polju.



Sl. 3.1. Osnova rada elektromotora

Na primjeru sa slike vidimo kako je uzbudni namot zamijenjen s permanentnim magnetom. Kod korištenja permanentnih magneta bolji rezultati i veća učinkovitost se postižu sa magnetima veće gustoće magnetskog polja. Bitna prednost kod zamjene uzbudnog namota permanentnim magnetima je uklanjanje potrebe za dodatnim izvorom električne energije. Permanentni magneti se koriste onda kada nema potrebe za promjenom magnetskog toka što armaturni namoti pružaju [4]. Sa slike 3.1. je vidljivo kako sile F_1 i F_2 djeluju u suprotnim smjerovima što je rezultat protjecanja struje svitka u različitim smjerovima kroz magnetsko polje. Prolaskom struje kroz svitak stvara se magnetsko polje unutar svitka te se privlače različiti polovi statora i rotora. Djelovanje sila F_1 i F_2 uzrokuje zakretanje rotora u smjeru suprotno od kazaljke na satu. Rotacija se zaustavlja nakon zakreta od 90°, ili ako je moment bio dovoljno velik da rotor prođe 90° sile F_1 i F_2 djeluju tako da vraćaju rotor u ravnotežni položaj do njegovog ustaljivanja [3]. U ravnotežnom

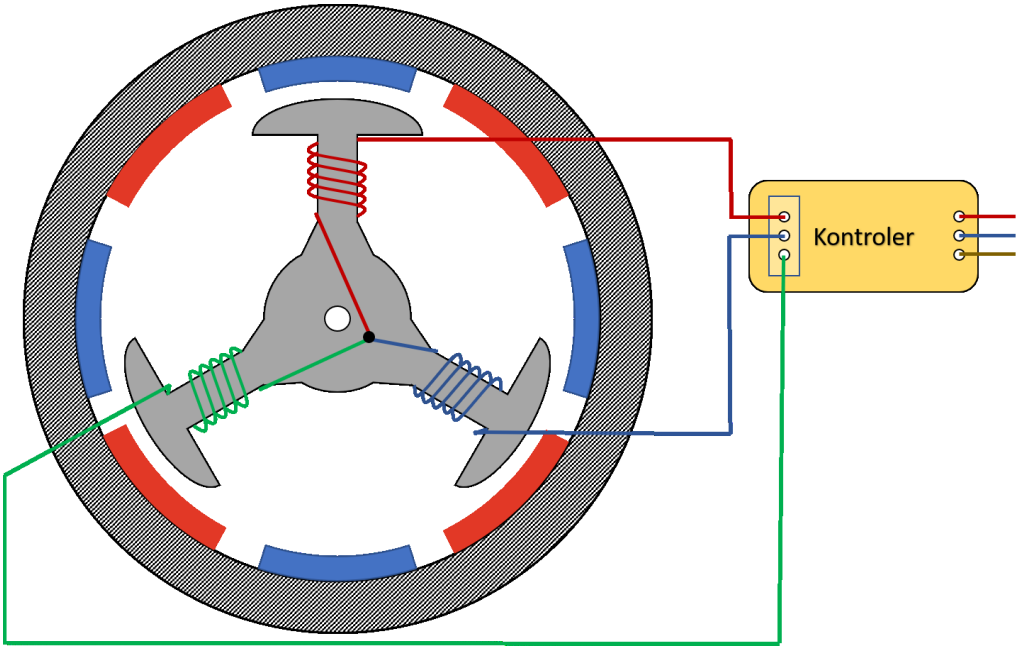
položaju magnetsko polje unutar svitka je orijentirano tako da je sjeverni polaritet poravnan sa južnim polaritetom permanentnog magneta i obrnuto vrijedi za južni polaritet magnetskog polja svitka. Rotacija od 90° ne pruža gotovo nikakvu iskoristivost. Kako bi se omogućila daljnja rotacija u trenutku prolaska rotora kroz ravnotežno stanje pod djelovanjem momenta, potrebno je obrnuti smjer prolaska struje. Tu se javlja problem koji se rješava dodavanjem komutatora na priključke svitka rotora. Komutator ili kolektor je uređaj koji omogućuje promjenu toka struje kroz svitak i sastoji se od međusobno izoliranih lamela (vodljivih pločica) koje dolaze u kontakt sa takozvanim četkicama. Četkice su fiksni potrošni kontakti obično načinjeni od grafita koje kližu po kolektoru te se preko četkica dovodi električna struja na kolektor. Namoti rotora su spojeni na kolektor gdje je svaki kraj svitka spojen na jednu pločicu kolektora. Stoga ovisno o broju nezavisnih namota na rotoru kolektor sadrži po dvije pločice na koje se spajaju krajevi namotaja. Kolektor je u stalnom kontaktu sa četkicama. Četkice i kolektor se koriste kada je potrebno opskrbiti namote na rotirajućim dijelovima motora električnom strujom te služe kao vrsta prekidača. Kolektor kao dio rotora zakreče svoj položaj te se svojom rotacijom izmjenjuju lamele kolektora koje dolaze u kontakt sa četkicama [3]. Primjer takve izvedbe spoja moguće je vidjeti na slici 3.2. gdje 1. predstavlja uzbudni namot, 2. armaturni namoti, 3. kolektor te 4. predstavlja četkice. Većina istosmjernih motora koristi kolektor i četkice kako bi se postigao stalan kontakt i protok električne energije kroz namote.



Sl. 3.2. Pojednostavljeni prikaz motora sa kolektorom i četkicama

Istosmjerna struja se dovodi na stacionarne dijelove dok se na rotirajućim dijelovima nalaze uzbudni namoti ili permanentni magneti pozicionirani tako da im je jedna vrsta pola (sjeverni ili južni pol) usmjerena prema stacionarnom djelu gdje se nalaze namoti. Polovi su naizmjenično

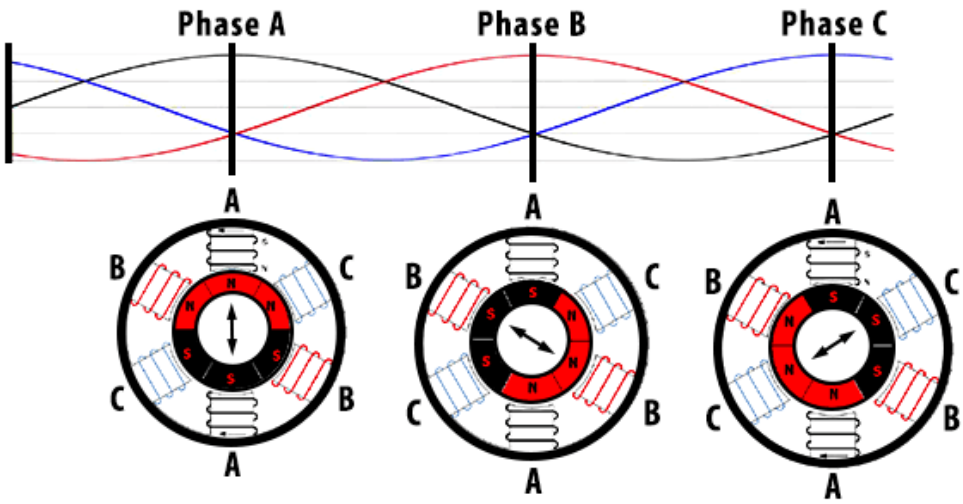
složeni u krugu ili je sami rotor izrađen od permanentnog magneta. Stator motora čine nekoliko različitih namota, čiji broj ovisi o izvedbi motora, koji su aktivni u različitim vremenskim trenutcima. Beskolektorski istosmjerni motori za razliku od kolektorskih motora nemaju četkice ni kolektor. Ulogu kolektora i četkica što su mehanički dijelovi preuzima elektronika. Pošto se radi o istosmjernoj struji određenom vrstom kolektora postiže se strujna promjenjivost što je potrebno za okretno magnetsko polje. Kontroler određuje brzinu vrtnje motora te prati položaj u kojemu se nalazi rotor. Sa izvora istosmjerne struje dovodi se poticaj do uređaja za upravljanje motorom. Na slici 3.3. moguće je vidjeti presjek beskolektorskog istosmjernog motora. Uočljiva je razlika u nedostatku kolektora i četkica. Njih je zamijenio kontroler koji je spojen na vanjski izvor napajanja. Kontroler sa druge strane ima priključke koji vode do svakog od namotaja na statoru. Pošto su armaturni namoti na statoru nema potrebe za komutatorom. Rotor je u ovom slučaju vanjski dio na kojem se nalaze naizmjenično poslagani permanentni magneti. Okretno magnetno polje koje stvara kontroler je u vezi sa fiksnim poljem permanentnih magneta te za sobom pokreče vanjski dio odnosno rotor. Kontroler simulira trofazan sustav struja; u slučaju na slici trofazni armaturni namot spojen je u spoju zvijezda što je moguće vidjeti u spoju plave zelene i crvene žice.



Sl. 3.3. Pojednostavljeni prikaz beskolektorskog istosmjernog motora

4. GRAĐA BESKOLEKTORSKOG ISTOSMJERNOG MOTORA

Beskolektorski istosmjerni motor, zvan još i BLDC (eng. *Brushless Direct Current*) sastoji se kao i svaki motor i električni stroj od statora i rotora. Razlika je u tome, kao što je i ranije navedeno, što ne koristi četkice i kolektor kako mu ime nalaže već mu je potreban dodatan dio koji kontrolira njegov rad. BLDC motori su spoj istosmjernih i sinkronih motora. Smatra se istosmjernim pošto kao napajanje zahtjeva istosmjeran izvor napajanja. Namoti su jednoliko raspoređeni te kroz njih prolazi regulirani pravokutni ili trapezoidni signal što dovodi do sličnosti sa sinkronim motorima. Sinkroni motori su pokretani izmjeničnim strujama te kroz njihove posebno projektirane armaturne namote na statorima teče izmjenična struja koja zbog izvedbe namota stvara okretno magnetsko polje. Okretno magnetsko polje zatim utječe na rotor te ga povlači za sobom što je vidljivo na slici 4.1. Faze trofaznog sustava su međusobno pomaknute za 120° što omogućuje sekvencijsku izmjenu pozitivnih i negativnih poluperioda na namotima. Okretno magnetsko polje zatim inducira električnu struju u rotoru koje stvara vlastito mirujuće magnetsko polje koje je vučeno za rotirajućim. Ovdje se javlja pojava zvana klizanje koja uzrokuje kašnjenje rotora. Kašnjenje je uzrokovano indukcijom, kada bi se polja poravnala ne bi bilo indukcije niti rotiranja [5].



Sl. 4.1. Princip rada sinkronih motora [5]

Isti slučaj je i kod beskolektorskih istosmjernih motora gdje se okretno magnetsko polje postiže određenim regulatorima te nastalo magnetsko polje uzrokuje zakretni moment koji rotira permanentne magnete rotora. Za četkicama i kolektorom nema potrebe pošto motor umjesto uzbudnih namota i elektromagneta sadrži permanentne magnete. Ovisno o položaju rotora na

određene elektroničke sklopke se dovodi impuls te one propuštaju struju kroz namote na statoru. Namoti na statoru kojima protječe struja stvaraju okretno magnetsko polje koje privlači magnet statora suprotnog polariteta a odbija magnet statora istog polariteta te se na tom principu ostvaruje zakretni moment. Rotacija motora prestaje kada se vektori magnetskog polja rotora i magnetskog polja statora poravnaju. Odnosno magneti rotora i statora su orijentirani suprotnim polaritetima. Kako se to ne bi dogodilo inducirano magnetsko polje statora uvijek prethodi magnetskom polju rotora te na rotor i dalje djeluje okretni moment. Moment motora će biti veći što je kut između vektora magnetskog polja statora i magnetskog polja rotora bliži 90°. Okretni moment M je određen strujom statora I_s. Stoga za beskolektorski istosmjerni motor vrijedi izraz:

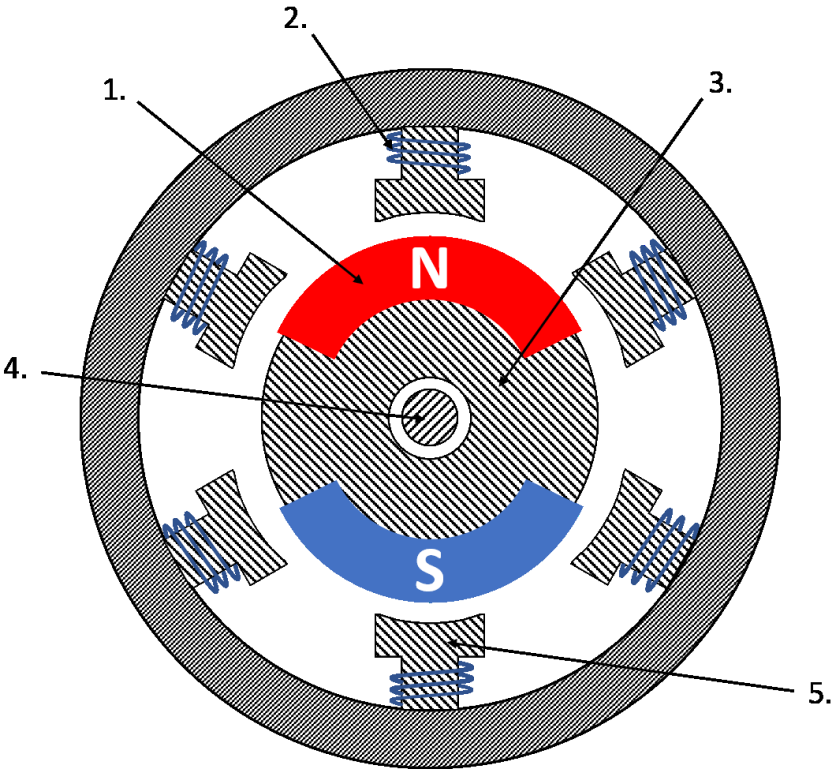
$$M = k_M \cdot I_s \tag{4.1.}$$

Pri čemu je k_M konstanta momenta motora [3]. Prednosti ovakve izvedbe istosmjernog motora su razne. Uklanjanjem četkica i kolektora uklanja se iskrenje koje nastaje pri kontaktu četkica i rotirajućih lamela kolektora čime se prevenira dodatan rizik od izbijanja požara. Mehanički komutator stvara dodatno trenje što nije slučaj kod beskolektorskih motora koji imaju bolje performanse čemu pridonosi i mogućnost kontrole brzine i položaja vanjskim signalima odnosno elektroničkim komutatorom. Time se također eliminira potreba za čestim održavanjem što ujedno smanjuje troškove održavanja pošto se četkice vremenom ciljano troše te im se smanjuje vijek trajanja. Kada se četkice potroše potrebno ih je zamijeniti što donosi dodatne troškove. Gubitkom četkica smanjuje se buka pri radu stoga istosmjerne beskolektorske motore odlikuje tihi rad. Permanentni magneti rotora ne stvaraju dodatan izvor topline kao što je slučaj kod elektromagneta što pospješuje održavanje temperature motora i ne zahtjeva dodatna hlađenja. Kontroler omogućuje visoku preciznost upravljanja brzinom sa širokim rasponom brzine vrtnje čak i u opterećenom stanju te pruža stabilnost rada precizno održavajući konstantnu brzinu vrtnje. Beskolektorski motori iz tog razloga imaju veliki udio u primjeni u medicini i robotici. Za razliku od ostalih motora koji razvijaju maksimalan moment samo pri određenim brzinama BLDC motori mogu postići maksimalan okretni moment u bilo kojem periodu rada [6]. Rotor koji se koristi elektromagnetima ili motori sa komutatorom zauzimaju više prostora stoga beskolektorski istosmjerni motori imaju manje dimenzije te im je samim time smanjena masa u odnosu na veličinu. Učinkovitost im je oko 90% jer koriste minimalnu količinu struje u neopterećenom stanju te u kratkom vremenu mogu postići velike brzine vrtnje. Mogućnost kontrole motora doprinosi velikoj učinkovitosti beskolektorskih istosmjernih motora. Elektronički komutator je dodatan dio koji je potreban za rad BLDC motora, iako donosi brojne prednosti podiže cijenu samih motora

što je jedan od nedostataka beskolektorskih istosmjernih motora. Ovisno o izvedbi BLDC motor može sadržavati ugrađeni elektronički komutator ali ako komutator nije ugrađen potrebni su dodatni troškovi i vrijeme za nabavu dodatnoga komutatora. Dodatna mana BLDC motora je njihovo spajanje. Ako je riječ o vanjskom komutatoru moguće su greške kod spajanja zbog većeg broja izvoda koji uključuju izvode napajanja kao i izvode za upravljanje i kontrolu.

4.1. Mehanički dijelovi

Rotor i stator motora nemaju znatne razlike u odnosu na ostale vrste motora. Bitna razlika je način upravljanja motorom. Na slici 4.1. moguće je vidjeti presjek BLDC motora te se mogu uočiti njegovi glavni mehanički dijelovi, ne uključujući elektronički komutator. Ovisno o izvedbi motor može imati rotor koji je smješten na vanjskoj strani.



Sl. 4.1. Presjek i dijelovi BLDC motora.

1. Permanentni magneti naizmjence polarizirani

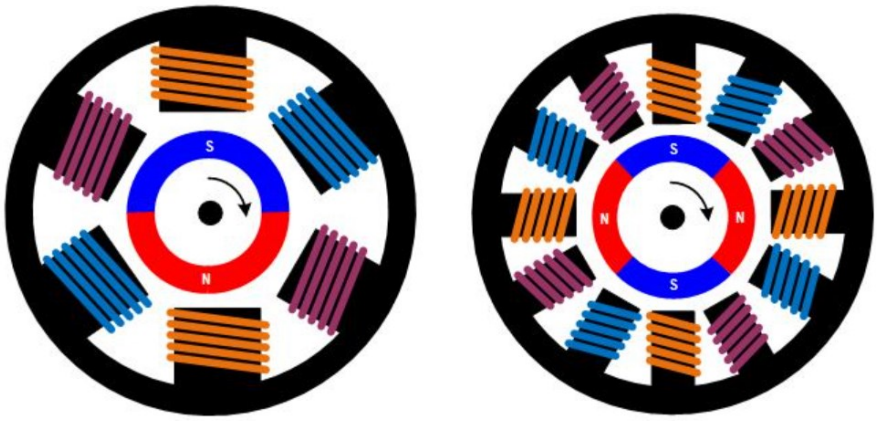
2. Namoti statora protjecani strujom

3. Rotor na kojemu su raspoređeni permanentni magneti

4. Osovina na koju je pričvršćen rotor

5. Elektromagneti sa poljem u ovisnosti o jačini protjecane struje

Rotoru, pošto je građen od permanentnih magneta, nije potrebno dovoditi napajanje za stvaranje magnetskog polja. Stator motora sadrži svitke koji signale dobivaju sa kontrolera. Ovisno o izvedbama razlikuju se motori koji su upravljani trofaznim signalom, dvofaznim, oni upravljani monofaznim signalom. Najčešća izvedba beskolektorskih istosmjernih motora su oni upravljani trofaznim signalom. Minimalni broj armaturnih namota ovisi o fazama sustava upravljanja. Tako kod sustava upravljanja trofaznim signalom motor ima minimalno 3 pola, ovisno o izvedbi motor može sadržavati i više pari polova što može povećati njegovu učinkovitost. Broj polova motora može također povećati stabilnost rada motora ali veći broj polova odnosno svitaka zahtjeva kompleksniji elektronički komutator. Motori manjih snaga imaju minimalno 2 pola koja su neophodna za pravilan rad motora [7]. Povećanjem broja pari polova motora povećava se i broj permanentnih magneta na statoru što se može vidjeti sa slike 4.2. Tako se za 2 para polova može koristiti jedan dvopolni permanentni magnet dok se za četveropolne koristi permanentni magnet sa 2 para polova pošto bi permanentni magnet sa jednim parom polova bio nedovoljan [8].



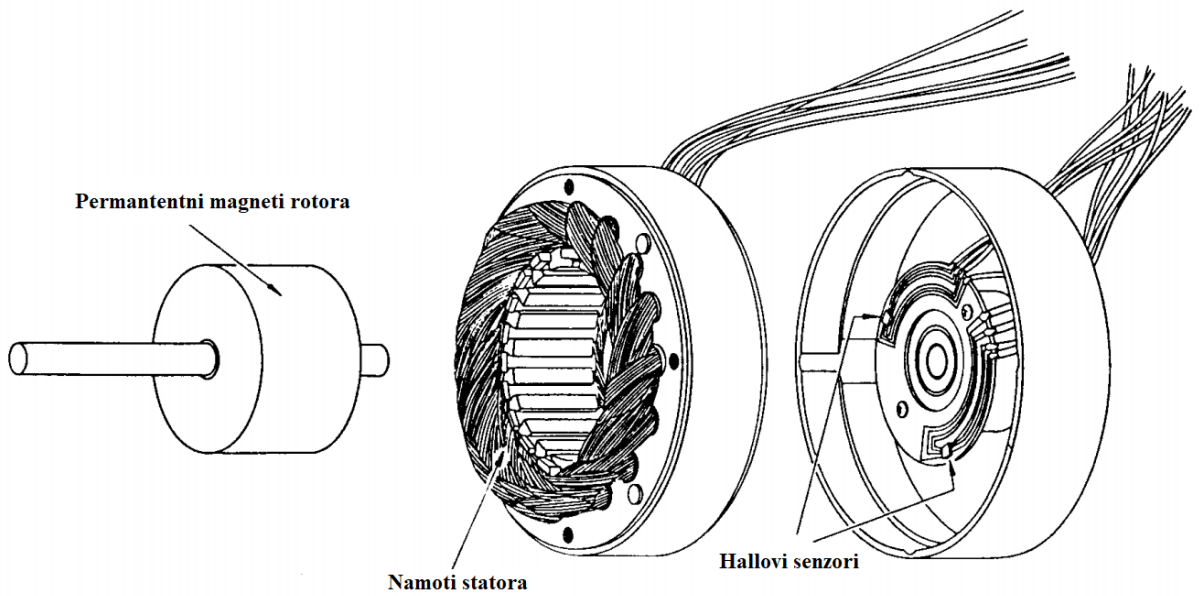
Sl. 4.2. lijevo: 2-polna izvedba, desno: 4-polna izvedba [8]

Namoti BLDC motora mogu međusobno biti spojeni u zvijezdu ili trokut spoj. U praksi češće se koristi zvijezda spoj namota BLDC motora.

4.2. Kontroler

Potrebno promjenjivo magnetsko polje odnosno promjenjiva struja koja stvara to polje je neophodna za pravilan rad motora. Kolektorskim motorima kolektor služi kao mehanički izmjenjivač (u slučaju generatora kolektor služi kao ispravljač) ili kontroler koji za različite vremenske trenutke propušta struju različitim namotima. Beskolektorski istosmjerni motor zbog nedostatka kolektora koristi tranzistore koji reguliraju propuštanje struje u namote motora [1]. Izostavljanje mehaničkog komutatora i četkica koje ostvaruju kontakt sa kolektorom gubi se problem habanja i potreba zamjene potrošnih dijelova kod kolektorskih motora. Zadaća kontrolera

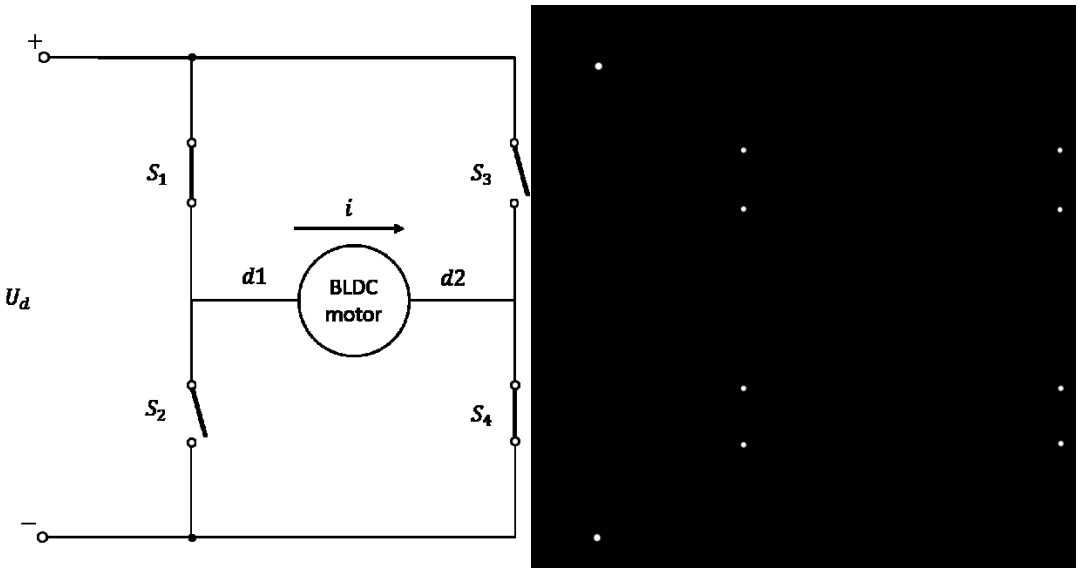
je u pravim vremenskim trenutcima, odnosno u željenim položajima rotora propustiti struju kroz zadani namot [3]. Iako se motor napaja istosmjernom strujom, pri radu motora kroz namote statora teče izmjenična struja ali je njihov zbroj u svakom trenutku istosmjerna vrijednost [4], Ovisno o izvedbi motora odnosno je li riječ o trofaznom ili monofaznom motoru. Kada je riječ o monofaznom motoru često se koristi H-mosni spoj za upravljanje aktivnim namotima statora beskolektorskog istosmjernog motora, Dok se za trofazne izvedbe koristi mosni spoj. Vrijeme uključenosti rada elektroničkih sklopki u dva prethodno navedena spoja regulira se pulsno-širinskom modulacijom. Pulsno-širinskom modulacijom se ograničava snaga tako što se dovedeni signal isječe na više manjih dijelova. Ovakva kontrola omogućuje ograničavanje brzine vrtnje i ograničavanje struje pri startu motora. Spojevi za regulaciju struje kroz namote dobivaju signale za propuštanje od kontrolera koji regulira poslane signale koristeći se Hallovim senzorima ili pomoću optoelektroničkog sistema. Struktura motora sa smještajem Hallovih senzora može se vidjeti na slici 4.3. Uz permanentne magnete rotora koji služe za okretanje rotora, motor na rotoru može imati i dodatne parove permanentnih magneta koji služe samo kako bi Hallovi senzori radili ispravno. Broj potrebnih senzora koji se koristi ovisi o broju polova motora. Kontroler informacije pribavlja od senzora pozicije, odnosno davača položaja i na temelju toga upravljačkim signalima određuje vrijeme trajanja i vremenski trenutak, kada je rotor u određenom željenom položaju, vođenja ventila (tranzistora). Kontroler radi sa vrlo malim strujama koje su potrebne MOSFET tranzistorima za funkcije uklapanja i isklapanja [9].



Sl. 4.3. Struktura motora sa prikazom položaja Hallovih senzora[10]

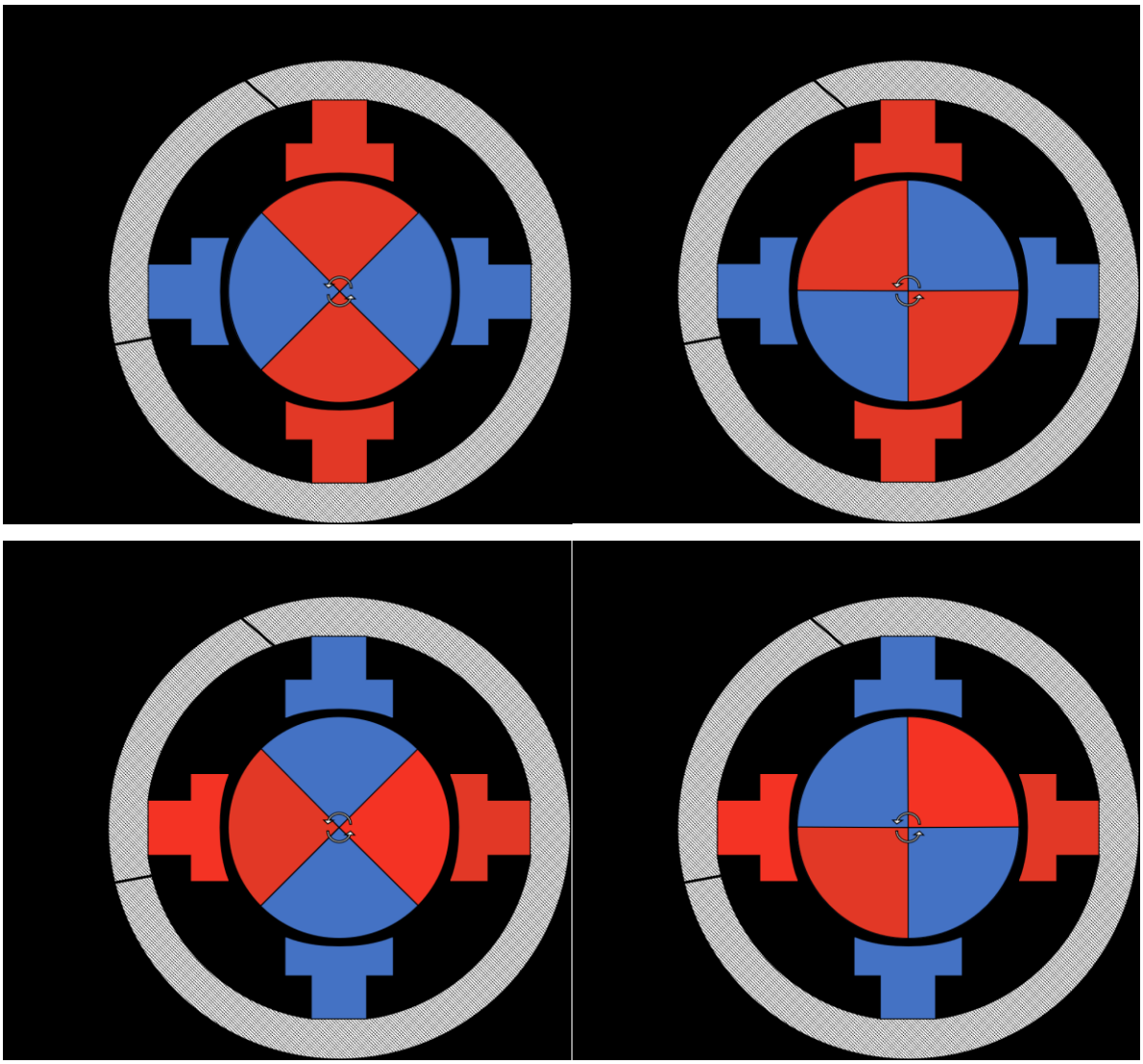
4.2.1 H-mosni spoj

Kao što je ranije navedeno H-mosni spoj služi za pokretanje i upravljanje jednofaznim BLDC motorima. Naziva se H-mosni spoj zbog svog izgleda gdje su 4 ventila okomito a motor je spojen horizontalno između dva para ventila, što se može vidjeti na Slici 4.4. koja prikazuje konfiguraciju spoja motora i upravljačkog dijela. Zbog jednostavnosti na slici su MOSFET tranzistori prikazani sklopkama. Upravljački dio sadrži elektroničke sklopke odnosno ventile koji ovise o primjeni motora odnosno njegovoj snazi. U praksi se najčešće koriste MOSFET tranzistori zbog svojih karakteristika koje mu daju mogućnost provođenja jačih struja.



Sl. 4.4. H-mosni spoj s BLDC motorom. Lijevo: uključene sklopke S1 i S4, desno: uključene sklopke S2 i S3

Na prethodnoj slici možemo vidjeti kako se mijenja smjer struje kroz motor u 2 različita uklopljena trenutka. Priključci motora su označeni sa d1 i d2 kako bi se na sljedećoj slici moglo zaključiti o smjeru struje kroz namote motora. Slika 4.5. prikazuje kako prolazak struje kroz motor utječe na njegovu rotaciju te se ne toj slici može uočiti princip rada motora upravljanog H-mosnim spojem.

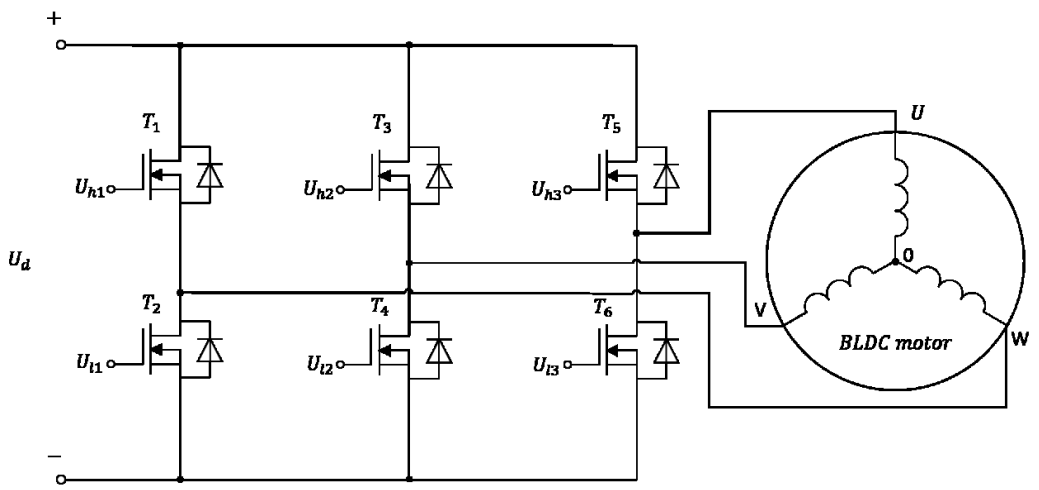


Sl. 4.5. gore lijevo: A položaj, gore desno: B položaj, dolje lijevo C položaj , dolje desno: D položaj

Motor je pokrenut u položaju A kada su uključene sklopke S1 i S4, nakon čega zakretni moment djeluje na rotor te on započinje vrtnju. Bitno je primijetiti kako smjer prolaska struje armaturnim namotima utječe na polaritet magnetskoga polja statora. U položaju B su i dalje uključene sklopke S1 i S4 te se rotor bliži stanju mirovanja. Netom prije položaja C kontroler daje signale na sklopke S2 i S3 pri čemu se mijenja smjer struje kroz motor odnosno kroz armaturne namote. Sada su se promijenili polariteti elektromagneta te rotor nastavlja sa vrtnjom. Položaj D prikazuje kako se rotor opet bliži stanju mirovanja ali prije nego dospije u taj položaj kontroler ponovno šalje signale sklopkama S1 i S4 te se rotacija nastavlja odnosno prelazi u položaj A. Kontroler pomoću Hallove sonde koja se nalazi na statoru motora prepoznaje položaj rotora te na temelju podataka upravlja elektroničkim sklopkama odnosno tranzistorima [11].

4.2.2 Mosni spoj

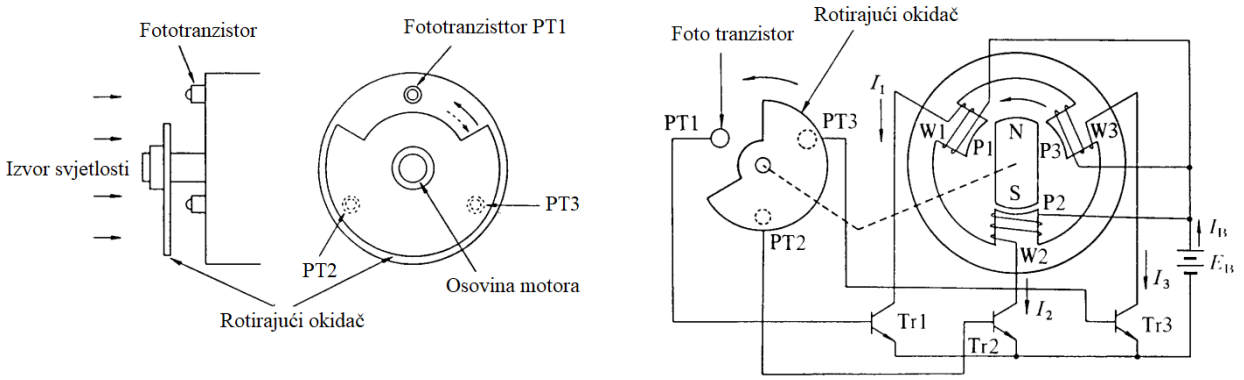
Preko mosnog spoja napajaju se trofazni beskolektorski istosmjerni motori. Sastavljen je od šest elektroničkih sklopki, najčešće MOSFET tranzistora. U spoju 3 gornja MOSFET-a služe za dovod signala dok 3 donja MOSFET-a služe za odvod signala odnosno propuštanje struje kroz armaturne namote statora. Ovisno o vrsti upravljanja istovremeno mogu propuštati 2 ili 3 MOSFET-a. Isključivo jedan gornji uvijek propušta ulaznu struju dok ovisno o izvedbi, jedan ili dva donja propuštaju struju koja izlazi iz motora te se zatvara strujni krug. Kod istovremenog propuštanja tri tranzistora povećava se učinkovitost motora pošto se u tom slučaju na statoru pojavljuje jedno dodatno magnetsko polje. U ovakvom mosnom spoju se vrijeme uključivanja tranzistora postavlja uvijek tako da tranzistori iste grane rade protutaktno. Povezivanje mosnog spoja sa BLDC motorom moguće je vidjeti na slici 4.6. gdje U,V,W predstavljaju faze motora, T_1-T_6 tranzistore upravljačkog djela i $U_{h,l}$ predstavljaju upravljačke signale. Diode spojene paralelno sa MOSFET-ima služe kao prevencija od prenapona kako ne bi došlo do oštećenja tranzistora uslijed komutacije, odnosno uklapanja i isklapanja. Smjer vrtnje BLDC motora se ne mijenja promjenom polariteta struje na vanjskim priključnicama. To bi rezultiralo otvorenim krugom ili kvarom zbog načina izvedbe mosnog spoja. Ostale vrste motora se obično pokreću u suprotnu stranu tako što im se zamjene priključci te se dobije suprotan smjer okretnog magnetskog polja. Beskolektorski istosmjerni motori za suprotan smjer vrtnje koriste elektronički kontroler koji promjeni slijed uključivanja tranzistora tako da se na namotima okretno magnetsko polje rotira u suprotnom smjeru. Tako da nema potrebe za zamjenom priključaka napajanja.



Sl. 4.5. mosni spoj priključen na BLDC

4.2.3 Optički senzori

Optički senzori kao detekcija zakreta su korišteni u početcima te su zamijenjeni Hallovim senzorima kako se tehnologija razvijala, stoga većina novo proizvedenih BLDC motora koristi Hallove senzore. Optički senzor je vrsta fotoosjetljivog senzora koji daje signal na svjetlosni poticaj. U praksi su se koristili fototranzistori kao detekcija položaja. Slika 4.6. prikazuje pojednostavljenu strukturu BLDC motora sa trofaznim namotima te princip rada senzora. Kao izvor svjetlosti, koji je potreban za ispravan rad, moguće je koristiti prirodnu dnevnu svjetlost što je nepouzdano zbog nepredvidljivih događaja, stoga se koristio umjetan izvor svjetlosti kako bi motor mogao ispravno raditi. Optički senzori su postavljeni na jednakim razmacima, u ovom slučaju kod trofaznog motora sa 3 senzora pomaknuti su za 120° međusobno. Između senzora i izvora svjetla postavljen je rotirajući okidač pričvršćen na osovinu motora. Rotirajući okidač je izveden kao disk sa otvorom za propuštanje svjetla. Pošto je pričvršćen na osovinu u svakom trenutku se okreće brzinom rotora što dopušta senzorima da rade ispravno neovisno o brzini motora. Može se vidjeti kako se u ovom slučaju po jedan fototranzistor izlaže svjetlu te se signal šalje do elektroničke sklopke koja tada jednom namotu propušta prolazak struje. U slučaju na slici je aktivan fototranzistor PT1 što otvara elektroničku sklopku Tr1 koja zatvara strujni krug te propušta struju kroz namot W1. Smjer te smjer prolaska struje kroz namotaje generira južni pol na istaknutom polu te privlači sjeverni N pol permanentnog magneta rotora. To nadalje uzrokuje zakret rotirajućeg okidača što rezultira pokrivanjem fototranzistora PT1 i otkrivanjem PT2. Tada trazistor Tr1 isklapa te kroz namote W1 ne teče struja. Izlaganjem PT2 fototranzistora svjetlu uzrokuje uklapanje Tr2 odnosno namoti W2 magnetiziraju istaknuti pol te se rotacija nastavlja. Sljedeći otkriven bi bio PT3 koji rezultira uklapanjem Tr3 i slijed uklapanja i isklapanja se nastavlja. Na istom principu rade motori sa više polova i više fotoosjetljivih tranzistora. Povećanjem broja polova povećava se i složenost upravljačkog dijela



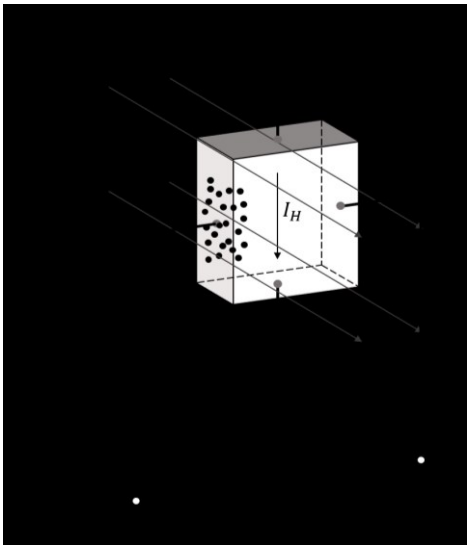
Sl. 4.6. Princip rada optičkih senzora [10]

4.2.4 Detekcija položaja Hallovim senzorom

Kao što mu ime ukazuje Hallov senzor radi na principu Hallovog efekta. Halov efekt je nazvan po Edwinu H. Hallu koji je taj efekt otkrio. Hallov efekt je pojava koja je vezana za vodiče i poluvodičke elemente. Na vodljivu ploču debljine d priključen je izvor napajanja na 2 paralelne strane. Kroz ploču protječe struja jakosti I_H. Ako tu vodljivu pločicu postavimo u magnetsko polje jačine B tako da su smjer prolaska struje i silnice magnetskog polja okomiti jedan na drugo, tada se u vodljivoj pločici poprečno stvara električno polje jakosti E_H okomito na smjer toka struje i silnice magnetskog polja i glasi:

$$E_H = \frac{R_H \cdot I_H \cdot B}{d} \tag{4.1.}$$

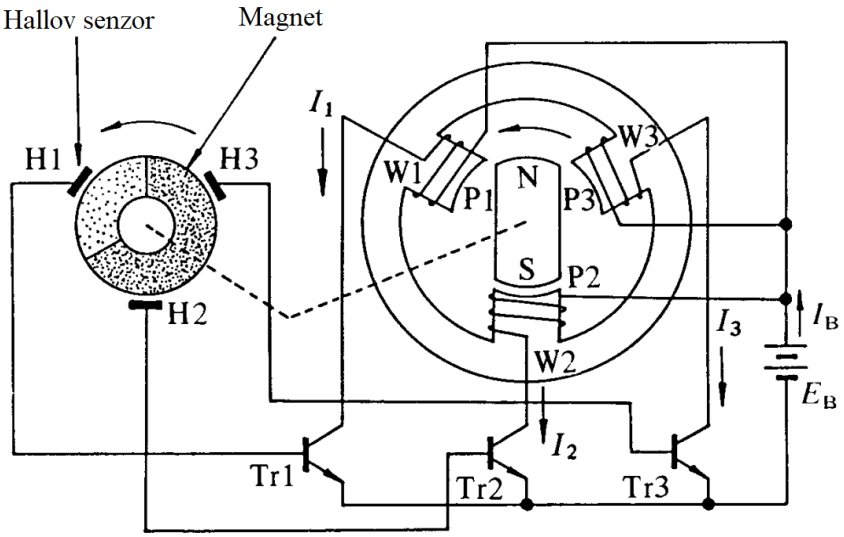
R_H predstavlja Hallovu konstantu. Stranu gdje će se pojaviti niži potencijal moguće je odrediti pravilom tri prsta gdje palac pokazuje smjer struje, kažiprst silnice magnetskog polja te srednji prst pokazuje stranu nižeg potencijala odnosno stranu gdje će se nakupiti negativni naboji pod utjecajem magnetskog polja. Na slici 4.7. Moguće je vidjeti primjer Hallovog efekta te princip rada Hallovih senzora.



Sl. 4.7. Hallov efekt

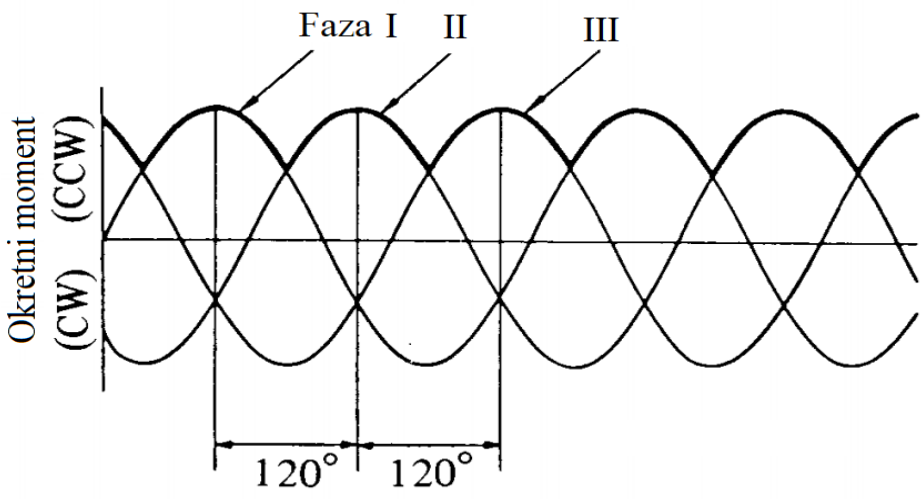
Vidljivo je kako se elektroni nakupe na jednoj strani te je moguće očitati iznos napona E_H. Kada bi se magnetsko polje okrenulo u suprotnom smjeru tada bi se i elektroni nakupljali na suprotnu stranu. Očitani napon bi tada promijenio predznak ali u istim uvjetima bi mu iznos ostao jednak. Taj efekt omogućuje detekciju položaja beskolektorskih istosmjernih motora. Hallovi senzori su postavljeni na stator blizu rotorskih permanentnih magneta. Prolaskom određenog pola, bilo to južni ili sjeverni, pored Hallovog senzora u njemu se generira napon koji se daje kontroleru kako

bi kontroler zatim u pravom trenutku aktivirao zadani namot. Jednim Hallovim senzorom moguće je upravljati sa dvije elektroničke sklopke. Ovisno prođe li pored Hallovog senzora sjeverni ili južni pol on generira pozitivan ili negativan referentni napon. Ovisno o predznaku generiranog napona upravlja jednim od dva tranzistora. Na slici 4.8. Moguće je vidjeti princip povezivanja Hallovih senzora i trofaznog BLDC motora. Tri Hallova senzora ravnomjerno su raspoređena i stacionirana oko permanentnih magneta rotora. Međusobno su pomaknuti za 120° kao i istaknuti polovi te njihovi namoti.



Sl. 4.8. Upravljanje namotima Hallovim senzorima [10]

Hallovi senzori reagiraju ne onda kada je rotor poravnat sa senzorom već tada kada je magnetsko polje kroz taj senzor veće nego kroz prethodni senzor. Tada trenutni senzor preuzima uklapanje dok prethodni isklopi tranzistor. Tako se može postići najveći zakretni moment. Magnetski tok kroz Hallov senzor ima sinusni oblik što je moguće vidjeti na slici 4.7. Valni oblik podsjeća na trofazni sustav čemu je uzrok pomak senzora jednog od drugog za 120°. CCW (eng. *Counter* clockwise) predstavlja zakret u smjeru suprotnog od kazaljke na satu dok CW (eng. Clockwise) predstavlja smjer kazaljke na satu. Podebljana linija predstavlja maksimalan zakretni moment koji motor postiže. Kao što je navedeno faza 2 se uključuje tek u trenutku kada magnetni tok na njoj bude veći od onog koji djeluje na Hallov senzor koji upravlja fazom 1. Isto vrijedi i za treću fazu te se ponavlja rotacija i aktivacija Hallovih senzore a samim time i aktivacija armaturnih namota statora koji su prethodno označeni sa W1, W2 i W3.



Sl. 4.7. Zakretni moment rotora [10]

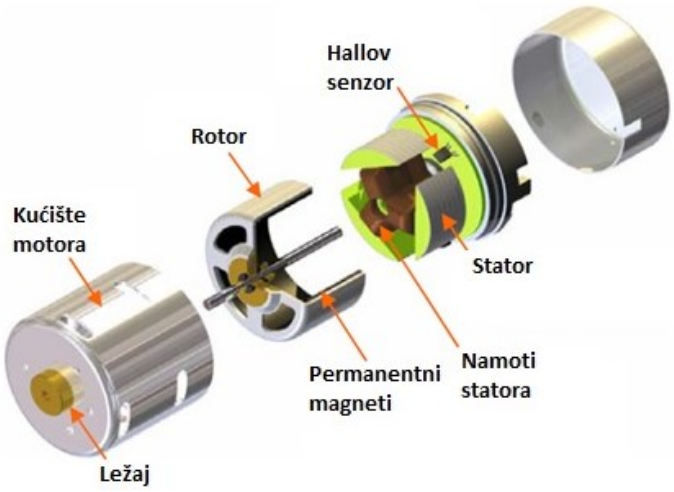
Iz valnog oblika je moguće vidjeti da je smjer rotacije moguće promijeniti. Kada valni oblik prelazi ispod x-osi tada Hallovi senzori reagiraju na suprotan magnetski pol, što, kako je ranije rečeno, utječe na predznak napona koji se generira u Hallovim senzorima. Kada valni oblik siječe x-os rotor je zakrenut u odnosu na senzor tako da senzorom ne prolazi magnetsko polje. U trenutku netom prije nego što siječe x-os rotor djeluje jednom vrstom pola dok u trenutku netom nakon prolaska kroz x-os magnet djeluje na senzor suprotnim polaritetom. Prema izvedbi sa tri tranzistora kao što je prethodno bio slučaj nije moguće promijeniti smjer struje kroz namote. Ovakav spoj, kao što je vidljivo propušta signale samo u jednom smjeru. Kod korištenja mosnog spoja moguće je promijeniti smjer struje kroz svaki namot jer se u spoju koriste šest tranzistora. Kroz njih struja također prolazi samo u jednom smjeru ali ovisno o kombinaciji uklopljenih tranzistora moguće je kroz sve namote promijeniti smjer prolaska struje. To rezultira promjenom magnetskog pola. Takav tip izvedbe upravljačkog dijela nudi bolje upravljanje te jači zakretni moment. Promjena smjera prolaska struje kroz namote omogućuje da suprotni namoti motora budu različito polarizirani gdje je kod izvedbe sa tri tranzistora istovremeno aktivan jedan namot odnosno aktivan je jedan pol. Povećavanjem broja pari polova statora povećava se i potreba za većim brojem senzora. Kao i u slučaju kod optičkih senzora to zahtjeva kompleksniju izvedbu regulatora što automatski podiže njegovu cijenu. Hallovi senzori ne moraju biti spojeni direktno na tranzistore. Za veće i kompleksnije izvedbe Hallovi senzori su spojeni na kontrolere koji dopuštaju daljnje upravljanje motorom. Tada kontroler od strane Hallovih senzora dobiva povratnu informaciju te na temelju toga određuje najbolju kombinaciju aktivnih namota kojima se postižu najbolji rezultati.

4.3. Izvedbe

Beskolektorski istosmjerni motori izvode se kao motori koji imaju rotor sa vanjske strane (eng. *Outrunner*) te motori koji imaju rotor smješten unutar kućišta (eng. Inrunner). Izvedba motora se odabire ovisno o njegovoj namjerni. Ako usporedimo ove dvije izvedbe motora iste snage tada motori sa unutarnjim rotorom imaju veću brzinu po jedinici napona dok motori sa vanjskim rotorom imaju veći zakretni moment.

4.3.1 Vanjski rotor

Beskolektorski istosmjerni motori sa vanjskim rotorom su motori na čijoj se osovini rotira vanjski dio motora, dok je središnji dio motora stator sa armaturnim namotima. Ovakvu izvedbu često koriste motori manjih snaga koji se koriste u računalnoj industriji za aktivno hlađenje komponenata. Rotor motora može ujedno služiti i kao vanjsko kućište. Tada se osovina spaja izravno na kućište koje sa unutarnje strane ima permanentne magnete. Na slici 5.1. je vidljivo kako je osovina pričvršćena na rotor te prolazi kroz kućište motora, u tom slučaju kućište motora ne rotira oko svoje osi. BLDC sa ovim tipom izvedbe je idealan za tu primjenu pošto je računalni sustav zasnovan na istosmjernoj struji i elektroničkim komponentama. Na veći vanjski dio lako je rasporediti lopatice ventilatora. Slika 5.1. prikazuje strukturu beskolektorskog istosmjernog motora koji ima rotor sa vanjske strane.

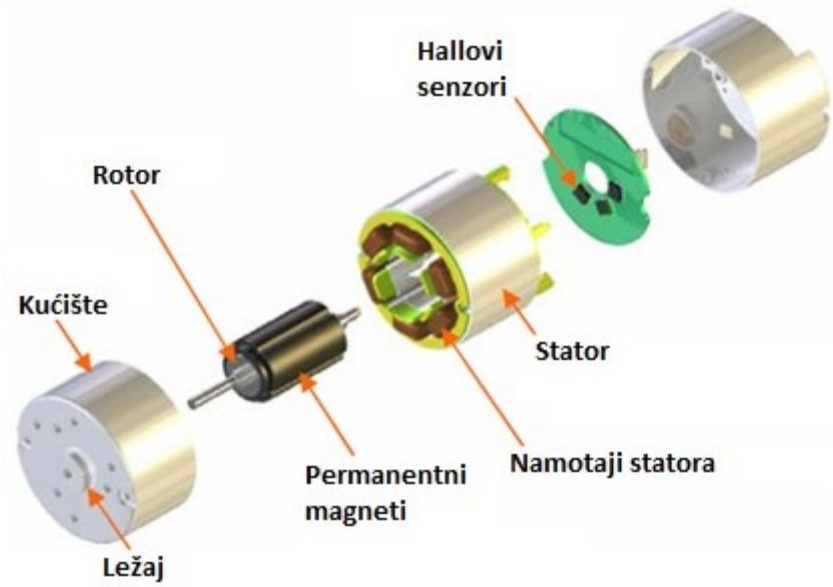


Sl. 4.8. Građa BLDC motora sa vanjskim rotorom [12]

Moguće je uočiti kako je Hallov senzor smješten između 2 namota. U ovom slučaju motor sadrži tri Hallova senzora, po jedan između namotaja. Oni detektiraju položaj ovisno o aktivnim namotajima statora. Rotacija vanjskog dijela također pomaže u odvođenju topline sa unutarnjih armaturnih namota.

4.3.2 Unutarnji rotor

Beskolektorski istosmjerni motori sa unutarnjim rotorom su građom sličniji ostalim vrstama motora. Ovdje se magneti nalaze na unutarnjoj strani pričvršćeni za osovinu motora. Većina BLDC motora većih snaga koristi ovaj tip izvedbe pošto je osovinu lakše zakrenuti. BLDC sa vanjskim rotorom je nezahvalan za velike snage pošto rotor tada ima puno veći promjer te se time povećava i sama masa rotora. Problem se tako rješava stavljanjem permanentnih magneta na samu osovinu. Slika 5.2. prikazuje građu motora sa unutarnjim rotorom. Rotor se nalazi u središtu motora pričvršćen za ležaj koji mu omogućuje rotaciju. Oko rotora se mogu vidjeti istaknuti polovi te njihovi namotaji.



Sl. 4.9. Građa BLDC motora sa unutarnjim rotorom [12]

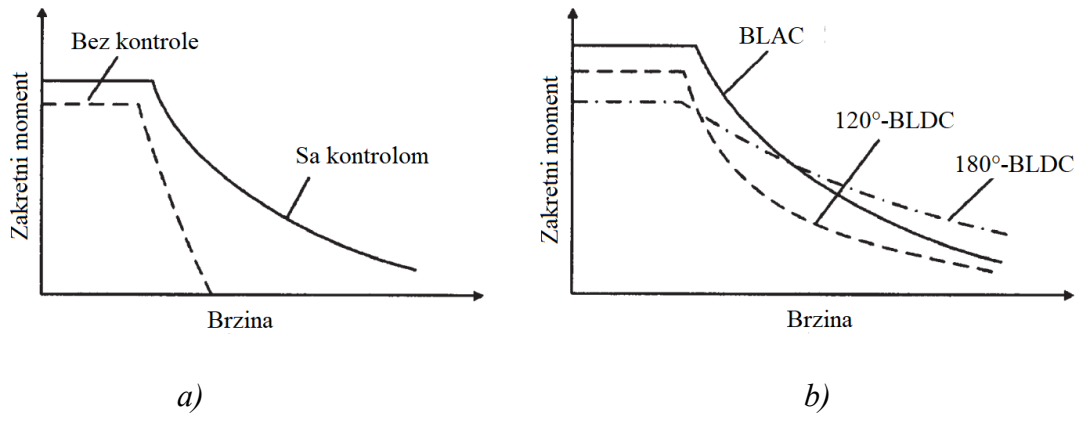
Prema izvedbi namotaja i broju Hallovih senzora može se zaključiti kako je riječ o trofaznoj izvedbi ovog motora koja ima 2 para polova. Osovina motora ne završava na ležaju već prolazi kroz ležaj. To omogućuje korištenje motora kao što je slučaj i kod ostalih motora. Zbog stacionarnog vanjskog dijela motor je lako montirati te ga je moguće pričvrstiti za kućište ili za dodatne nosače. To nije slučaj kod motora sa vanjskim rotorom jer je potrebno paziti na vanjske rotirajuće dijelove što ponekad zahtjeva posebnu izvedbu nosača. Hlađenje ove vrste motora odvija se preko kućišta kondukcijom od namota do vanjske stjenke motora te se zatim toplina prenosi vanjštini.

5. PRIMJENA

Zbog svojih iznimnih prednosti beskolektorski istosmjerni motori su svoju svrhu pronašli u raznim primjenama. Za razliku od drugih motora njihova cijena je veća ali to nadomještaju svojom iskoristivošću koja može doseći visokih 90%. Uz to kompaktniji su i lakši te im je lako upravljati brzinom. Uz upravljanje brzinom imaju velik raspon brzine vrtnje te je moguće upravljati njihovim položajem zbog čega se primjenjuju u servo pogonima. Istosmjerni motori se koriste ondje gdje nema pristupa izmjeničnoj struji te kada je potrebno koristiti motore malih dimenzija odnosno snaga. Najčešća takva primjena je u računalu gdje je aktivno hlađenje pokretano istosmjernim beskolektorskim motorima koji se napajaju istosmjernom strujom izravno sa matične ploče koja radi isključivo sa nepromjenjivom strujom. Primjenu nalaze i u okruženjima visokog rizika zbog svoje prednosti odsustva mehaničkog komutatora koji stvara opasnost od izbijanja požara.

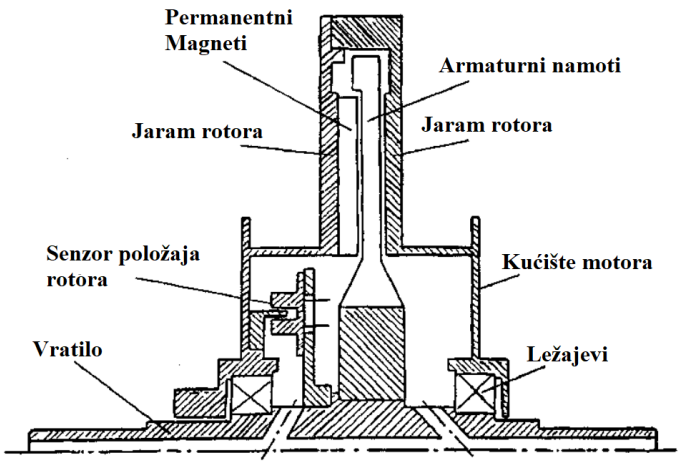
5.1. Vozila

U današnje vrijeme sve se više rješenja traži kako bi se smanjilo onečišćenje okoliša. Tako se proizvodi sve više električnih vozila koja nemaju toliki utjecaj na okoliš kao vozila sa unutarnjim sagorijevanjem. Ovisno o izvedbi vozila i o željenim performansama motor može biti ugrađen u podvozje auta. Takva izvedba prenosi okretni moment na osovinu zadnjih prednjih ili sva četiri kotača. Ova izvedba zahtjeva veće snage motora pošto se jednim pogonom pokreću potrebni kotači. Drugi tip izvedbe je motor koji se nalazi u svakom od kotača (eng. In-wheel drive). To može također biti ovisno o pogonu, na prednjim, zadnjim ili na sva četiri kotača. Tada je riječ o motorima manjih snaga i dimenzija. Takva izvedba donosi bolje performanse automobila pošto je pojedini motor zadužen za pogon samo jednog kotača. Vozila za normalnu vožnju u svim uvjetima zahtijevaju širok raspon brzine. Uz to zahtjeva i održavanje više brzine održavajući konstantnu snagu. Slika 5.1. a) prikazuje kako se povećanjem brzine smanjuje okretni moment. Izražajnije smanjenje momenta je vidljivo kada nema kontrole. Kontrolom se postiže bolji zakretni moment motora povećanjem brzine. Slika 5.1. b) prikazuje kako beskolektorski izmjenični motor (BLAC) ima bolje performanse u slučaju upravljanja BLDC motorom sa dva faze i 120° pomaka između faza, što nije slučaj kod BLDC motora sa tri faze koji pri većim brzinama postiže veći zakretni moment. [13].



Sl. 5.1. a) Ovisnost brzine o okretnom momentu sa i bez upravljanja, b) Usporedba ovisnosti brzine o okretnom momentu [13]

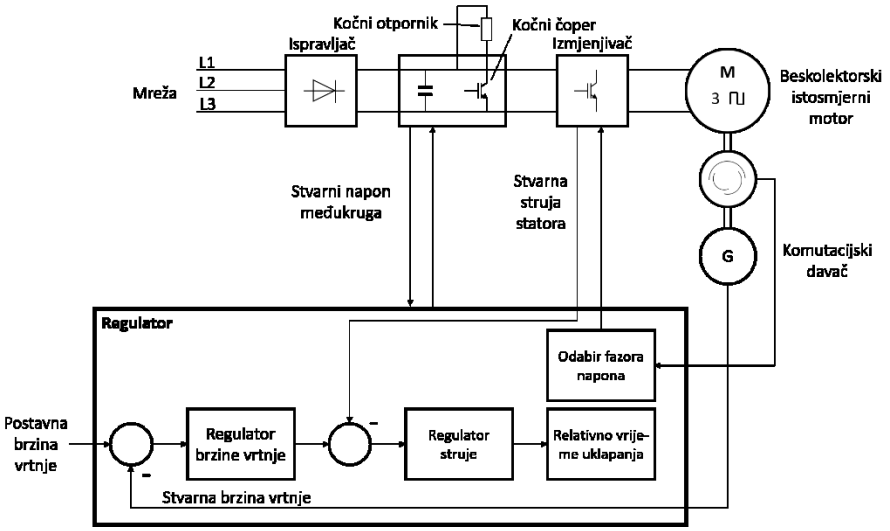
Osim električnih automobila za prijevoz danas je sve više prijevoznih sredstava postalo električno. Tako se na ulicama sve više mogu vidjeti električni bicikli, romobili, motori, pa čak i skateboard-i. Oni većinom koriste električne motore unutar kotača. Takve primjene zahtijevaju male i kompaktne izvedbe motora koje su u mogućnosti pružiti dovoljno snage za pokretanje, odnosno visoko učinkoviti motori. Slika 5.2. prikazuje građu BLDC motora koji je dizajniran za navedenu uporabu. Tip motora sa slike je motor sa vanjskim rotorom što se može primijetiti po smještaju armaturnih namota unutar motora te po smještaju permanentnih magneta unutar vanjskog djela motora [14]. Motori električnih vozila mogu koristiti kočenje kao napajanje baterija auta čime se ne gubi energija u potpunosti kao kod kočenja automobila na unutarnje sagorijevanje gdje se energija potroši na zagrijavanje diskova i kočionih pločica i ostalih okolnih dijelova. Pri kočenju motor se ponaša kao generator te tada permanentni magneti pri okretanju generiraju suprotan protok struje kroz armaturne namote koja se posebno izvedenim sklopom odvodi do baterija koje se pritom napajaju [15].



Sl. 5.2. Presjek BLDC motora unutar kotača [14]

5.2. Servopogoni

BLDC se često koriste u servopogonima zbog velikog raspona brzine vrtnje i mogućnosti precizne kontrole brzine vrtnje te položaja rotora. Regulatori servopogona koji se koriste za upravljanje beskolektorskim istosmjernim motorima vrlo su slični regulatorima koji upravljaju kolektorskim motorima. BLDC kontrolerima servopogona je dodana obrada signala kojeg prima od strane komutacijskog davača. Slika 6.1. predočava blokovsku shemu koja prikazuje spoj motora u servopogonima.



Sl. 5.1. Struktura servopogona sa BLDC motorom [3]

Sastav motora sa nekom od vrsta izmjenjivača je objašnjen ranije. U ovom servopogonu vidimo kako se po potrebi motor spaja na trofaznu mrežu preko ispravljača koji, kako mu ime kaže, ispravlja izmjeničnu struju u istosmjernu. Regulator je bitan dio servopogona jer ne samo što upravlja namotima motora te stvara potrebno rotirajuće magnetsko polje, nego sakuplja razne informacije te prema njima regulira brzinu, položaj, moment te snagu dovedenu na motor. Prema blok shemi sa slike 5.1. može se vidjeti kako se u regulator vraćaju dvije povratne veze od kojih je jedna informacija o brzini vrtnje rotora a druga struja koja teče namotima. Pomoću tih informacija dobije se mogućnost vrlo preciznog upravljanja. Motor tada ne mora rotirati konstantno, već je moguće postići da motor radi naizmjenične zakrete u jednu pa drugu stranu neovisno o kutu zakreta. Time se postiže upravljanje robotskom opremom gdje su potrebni vrlo precizni i brzi pokreti. Regulator može biti izveden kao analogan ili digitalan. Kod analognog kontrolera je informacije za povratne veze potrebno dostaviti analogno što omogućuju istosmjerni tahogeneratori. Digitalni regulatori koriste informacije komutacijskih davača u tu svrhu. Kvalitetnim motorom i kvalitetno izgrađenim regulatorom moguće je izregulirati struju za manje od 1 ms [3].

5.3. Ostale primjene

Uz navedene primjene beskolektorski istosmjerni motori su našli svrhu u svemirskim operacijama i istraživanjima. Tehnologija koja se koristi izvan zemlje mora biti otporna na ekstremne uvijete što uključuje snažan vakuum, visoko zapaljivu okolinu, veliki raspon temperatura, izloženost radijaciji te uvjetuje da uređaj ne zahtjeva često održavanje (ponekad sedam do deset godina bez nadzora). Uvjeti u svemiru zahtijevaju što veću sigurnost što nije slučaj kod kolektorskih motora. Oni zahtijevaju održavanje zbog potrošnih dijelova te stvaraju iskrenje. Primjer korištenja BLDC motora u svemiru je upravljanje momentnim kotačima i uređajima za postavljanje i pozicioniranje što zahtjeva preciznu i brzu kontrolu. Koriste se također i kao pogon solarnih panela svemirskih letjelica. To zahtjeva vrlo sporu rotaciju (jedan okret u danu) što beskolektorski istosmjerni motori omogućuju. Osim kod svemirskih letjelica BLDC motori se koriste i kod zrakoplova. Na zrakoplovima su hidraulički sustavi za upravljanje i kontrolu zamijenjeni električnim motorima. Motori sa permanentnim magnetima su se pokazali kao najprikladniji za tu primjenu. Prednosti zamjene hidrauličkog sistema BLDC motorima i kontrolerima su: smanjenje ukupne mase zrakoplova, smanjenje potrošnje goriva te samim time zagađenja, zamjena mehaničkih dijelova žičnim vezama te olakšava dijagnostiku. Važna zadaća BLDC motora je upravljanje avionom. Pokretni dijelovi krila i repa zrakoplova kao što su krilca i zakrilca upravljani su BLDC motorima što omogućuje upravljanje zrakoplovom, od skretanja i zakretanja pa sve do slijetanja i uzlijetanja [16]. Još jedno od područja široke primjene je RC (eng. Remote control) industrija. Beskolektorski istosmjerni motori masovno se primjenjuju kao glavni pogon uređaja na daljinsko upravljanje. RC vozila i dronovi koji se sve više koriste u svrhu snimanja važnih događaja i u filmskoj industriji koriste beskolektorske istosmjerne motore na koje se kod dronova pričvrsti propeler, dok se kod RC vozila sa motora moment mehanički prenosi na kotače. Osim navedenih primjena BLDC nalazi primjenu u sve više slučajeva kako se tehnologija razvija.

ZAKLJUČAK

Razvoj tehnologije je donio razne napretke, što se može vidjeti i kod električnih motora. Primjer toga je beskolektorski istosmjerni motor koji ima iznimne karakteristike. Uz njegovu kompaktnost ga odlikuje i mogućnost vrlo precizne kontrole. Za razliku od ostalih motora, BLDC motorima je potrebna određena vrsta kontrolera kako bi oni radili ispravno. To ima svoje mane i prednosti, podiže sveukupnu cijenu motora i njegovu kompleksnost ali zato omogućuje motoru široko područje uporabe. Uzbudni namoti BLDC motora zamijenjeni su permanentnim magnetima dok armaturnim namotima teku izmjenične struje čiji je zbroj svakom trenutku istosmjerna vrijednost. Motor je upravljan elektroničkim komutatorom koji je zamijenio mehanički komutator. Kontroler a time i motor su napajani sa istosmjernog izvora energije što izmjenjivač zbog potreba motora pretvara u izmjenični signal. Električni komutator dobiva informacije od detektora položaja i brzine te na temelju tih informacija upravlja armaturnim namotima. Hallovi senzori se u većini slučajeva koriste kao detekcija magnetskog polja pomoću čega se kontroleru šalju informacije potrebne za upravljanje motorom. Iako namotima protječe izmjenična struja ona nije sinusnog oblika, kao kod izmjeničnih i višefaznih strojeva, već je pravokutnog ili trapezoidnog oblika. Ovisno o primjeni motora on je upravljan jednom od navedenih vrsta kontrolera. O kontroleru ovisi učinkovitost motora, njegova brzina i moment pošto se preko njega napajaju namoti motora. Kontroler je građen od elektroničkih sklopki što su najčešće MOSFET tranzistori koji imaju mogućnost brzog uklapanja i isklapanja. Beskolektorski istosmjerni motori mogu biti izvedeni sa vanjskim i unutarnjim rotorom od kojega svaka izvedba ima svoje prednosti. Primjena motora je vrlo široka. Modernizacijom preuzimaju sve više pogonskih sustava, čemu primjer mogu biti električna prijevozna sredstva kojih je sve više i postaju pristupačniji od njihovih ne električnih prethodnika.

LITERATURA

[1] R. Wolf, Osnove električnih strojeva, Školska knjiga, Zagreb, 1989.

[2] B. Skalicki, J. Grilec, Električni strojevi i pogoni, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.

[3] J. Weidauer, Električna pogonska tehnika, Graphis, Zagreb, 2013.

[4] V. Ambrožić, P. Zajec, Električni servo pogoni, Graphis, Zagreb, 2019.

[5] https://www.kebamerica.com/blog/how-a-3-phase-ac-induction-motor-works/

[6] https://electricityshock.com/advantages-and-disadvantages-of-brushless-dc-motor/

[7] http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf

[8] https://www.monolithicpower.com/en/brushless-vs-brushed-dc-motors

[9] H.R. Hiziroglu, On the Brushless dc Motors, ELECO'99 International conference on electrical and electronics engineering, sv. E02.68, str. 35-36, Flint, Michigan 48504, 1999.

[10] T. Kenjo S. Nagamori, Permanent-Magnet and Brushless DC Motors, Clarendon Press, Oxford, 1985.

[11] J. Zhao, Y. Yu, Brushless DC Motor Fundamentals Application Note, MPS , 2011

[12] https://www.nidec.com/en/technology/capability/brushless/

[13] K.T. Chau, C.C. Chan, C. Liu, Overvew of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles, IEEE transactions on industrial electronics, sv.55, NO. 6, June 2008.

[14] T. F. Vhan, L. T. Yan, S. Y. Fang, In-Wheel Permanent-Magnet Brushless dc Motor Drive for an Electric Bicycle, , IEEE transactions on industrial electronics, VOL. 17, NO. 2, June 2002.

[15] X. Nian, F. Peng, H. Zhang, Regenerative Breaking System of Electric Vehicles Driven by Brushless DC Motor, IEEE transactions on industrial electronics, VOL. 61, NO. 10, October 2014.

[16] M. D'Andrea, G. Di Domenico, D. Macera, L. Di Leonardo, M. Villani, Brushless DC Motor for Primary Flight Surface Actuator, International Conference on Electrical Machines, Švedska, 23-26 August 2020.

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

Simbol	**Naziv**	**Mjerna jedinica**
Φ	Magnetski tok	Wb
N	Broj zavoja vodiča	
e	Inducirani napon	V
t	Jedinica vremena	s
E	Inducirani napon	V
v	Brzina pomicanja vodiča	m/s
B	Magnetska indukcija	T
l	Duljina vodiča	m
F	Sila	N
I	Jakost struje	A
M	Moment	Nm
k_M	Konstanta momenta motora	
I_s	Struja statora	A
E_H	Hallov napon	V
R_H	Hallova konstanta	
I_H	Struja kroz pločicu	A
d	Debljina pločice	m
S_1-S_4	Sklopke	
Ud	Napon napajanja	V
d1, d2	Priključnice motora	
U, V, W	Faze motora	
T_1-T_6	Tranzistori	
U_{h1}-U_{h3}, U_{l1}-U_{l3}	Upravljački signali	V
PT1-PT3	Fototranzistori	
H1-H3	Hallovi senzori	

POPIS KORIŠTENIH KRATICA

Kratica	Značenje
BLDC	Beskolektorski istosmjerni motor
BLAC	Beskolektorski izmjenični motor
CW	Smjer kazaljke na satu
CCW	Smjer suprotan od kazaljke na satu

SAŽETAK

U ovom završnom radu objašnjen je princip rada beskolektorskih istosmjernih motora prije čega su opisani glavni zakoni na temelju kojih motor radi te opis kolektorskog istosmjernog stroja radi lakšeg razumijevanja rada BLDC strojeva. Uz to opisana je građa motora te razlike između BLDC i ostalih tipova motora. Navedeni su i objašnjeni različiti tipovi upravljanja beskolektorskim istosmjernim motorima te je pobliže opisan rad senzora koji se koriste s pojedinim izvedbama kontrolera. Na temelju prethodnih podataka opisane su dvije izvedbe motora te su navedene glavne primjene beskolektorskih istosmjernih motora.

Ključne riječi: istosmjerni motor, kolektor, BLDC, kontroler, Hallovi senzori

ABSTRACT

In this undergraduate thesis the operation principle of brushless direct current motors is explained before which the main laws on the basis of which the electric motors operate are described, as well as a descriprion of a brushed direct current machine for easier understanding of BLDC machines. In addition, the motor structure and the difference between BLDC and other electrical motor types are described. The different types of controll of brushless DC motors are listed and explained, and the operation of the sensors used with these controller designs is described in more detail. Based on previous data, two motor designs are described and the main applcations of brushless DC motors are listed.

Key words: direct current motor, collector, BLDC, controller, permanent magnets, Hall effect sensor

ŽIVOTOPIS

Karlo Čakanić rođen je u Virovitici 7.7.1999. godine. Osnovnu školu je pohađao u Velikim Zdencima od prvog do četvrtog razreda, te u Grubišnom Polju od petog do osmog razreda. Školovanje nastavlja u Grubišnom polju gdje pohađa Srednju školu Bartola Kašića smjer Tehničar za računalstvo. Godine 2018. upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Na trećoj godini pomaže pri izvođenju laboratorijskih vježbi kao demonstrator na kolegiju Osnove mjerenja.