

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 1829

**Upotreba istosmjernog
elektronički komutiranog motora
električnog bicikla za zvučnu
komunikaciju s vozačem**

Ksenija Marković

Zagreb, srpanj 2019.

Zagreb, 7. ožujka 2019.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 1829

Pristupnik: **Ksenija Marković (0036475749)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektroničko i računalno inženjerstvo

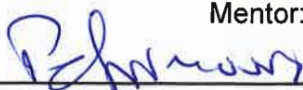
Zadatak: **Upotreba istosmjernog elektronički komutiranog motora električnog bicikla za zvučnu komunikaciju s vozačem**

Opis zadatka:

Mnogi sustavi koriste elektromotore za pogon. U značajnom broju tih sustava korisno je znati neke parametre sustava kao što su primjerice stanje greške sustava, stanje napunjenosti baterije i slično. Često se koriste LCD zasloni, ali u nekim slučajevima ove informacije je bolje priopćiti zvukom. Tako u nekim sustavima - kao što je električni bicikl - to omogućuje vozaču da ne skreće pogled s ceste. U drugim slučajevima LCD zaslon nije prihvatljiv zbog svoje složenosti i dodatnog troška. Istosmjerni elektronički komutirani motor je izrađen od bakra, silikonskog čelika i trajnih magneta. Zbog magnetostrikcije silikonskog čelika te sila između statora i trajnih magneta, motor se može ponašati kao zvučnik. Uz odgovarajući algoritam u kontroleru motora (inverteru) moguće je koristiti motor kao zvučnik za slanje željenih informacija korisniku. Iz perspektive opreme postoji samo mali trošak za potrebne elektroničke sklopove. Većina napora će se uložiti u modifikaciju algoritma unutar kontrolera motora. Cilj je utvrditi može li pogonski motor za električni bicikl dati odgovarajuću glasnoću i kvalitetu zvuka kako bi bio koristan za navedenu komunikaciju.

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2019.
Rok za predaju rada: 28. lipnja 2019.

Mentor:



Prof. dr. sc. Davor Petrinović

Djelovođa:



Doc. dr. sc. Tomislav Petković

Predsjednik odbora za
diplomski rad profila:



Prof. dr. sc. Mladen Vučić

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Istosmjerni elektronički komutirani motor (EKM)	3
2.1. Usporedba elektronički i mehanički komutiranih motora	4
2.2. Načela rada EKM motora	5
2.2.1. Ampèreov zakon	5
2.2.2. Faradayev zakon	6
2.2.3. Lentzov zakon	7
2.3. Okretni moment i kutna brzina motora	8
2.4. Struktura EKM motora	10
2.4.1. Električni i mehanički kut	11
2.4.2. Stator	12
2.4.2.1. Stator s utorima	12
2.4.2.2. Stator bez utora	13
2.4.3. Rotor	13
2.5. Određivanje pozicije rotora	15
2.5.1. Senzorski pristup	15
2.5.1.1. Hallove sonde	16
2.5.1.2. Optički enkoder	18
2.5.1.3. Rezolver	19
2.5.2. Bezsenzorski pristup	20
2.6. Kontrola rada EKM motora	22
2.6.1. Elektronički komutator	22
2.6.2. Načini komutacije	24
2.6.2.1. Trapezna komutacija	24
2.6.2.2. Sinusna komutacija	26
2.6.2.3. Vektorsko upravljanje	27
2.7. Primjena EKM motora	34

3. Magnetostrikcija	36
4. Implementacija	38
4.1. Opis opreme	38
4.1.1. CMC420	38
4.1.1.1. Blok shema kontrolera	41
4.1.1.2. Digitalni signalni procesor	42
4.1.2. EKM motor	44
4.1.2.1. Unutrašnjost motora	46
4.1.2.2. Testiranje Hallovih sondi	47
4.1.3. Zvučno pojačalo	48
4.1.3.1. Shema zvučnog pojačala	50
4.2. Shema spajanja pojačala, kontrolera i motora	51
4.3. Upravljački algoritam	52
5. Rezultati	55
5.1. Mjerna oprema	55
5.2. Analiza	57
6. Zaključak	63
Literatura	64

1. Uvod

Razvojem digitalne obrade signala i brzih mikroprocesora praktična primjena teorije upravljanja istosmjernim motorima postala je učestala. Za motore kojima se upravlja pomoću mikrokontrolera kažemo da su elektronički komutirani. Motor koji se može elektronički komutirati sadrži magnetsku jezgru koju nazivamo rotor i fiksne električne zavojnice jednako razmaknute u prstenu oko jezgre, koje predstavljaju stator motora. Ispravan rad takvog motora osigurava elektroničko upravljanje pomoću odgovarajućeg načina komutacije.

Struja u statoru motora generira magnetsko polje koje primjenjuje silu na trajni magnet rotora elektromotora, zbog čega se rotor pokreće. Tijekom okretanja rotora motora poznato je da dolazi do magnetostrikcije čelika od kojeg je motor izrađen. Slično se događa i sa zvučnikom, koji kao i motor pretvara električnu energiju u mehanički rad. Zvučnik se sastoji od magneta, zavojnice, membrane, ovjesa i košare. Magnet i zavojnica zvučnika isto predstavljaju motor, magnet je statični dio, a zavojnica pomični. Zavojnica je s jedne strane slobodna, a s druge pričvršćena na membranu. Dolaskom električne energije počinje se gibati gore - dolje unutar magnetskog polja. Broj tih pomaka određuje frekvenciju koju zvučnik trenutno reproducira. Gibanje zavojnice najčešće je kompleksno te zbog toga zvučnik može svirati više frekvencija odjednom. Kako se giba zavojnica, giba se i membrana te zbog veće titrajuće površine to gibanje postaje čujno. Tako zvučnik proizvodi zvučne valove i odašilje ih u prostor. Magnetostrikcija u statoru elektronički komutiranog motora predstavlja upravo tu titrajuću površinu zbog koje se i motor može ponašati kao zvučnik. U slučaju kad je motor električnog bicikla postavljen na glavinu kotača, žbice kotača imaju utjecaj na zvuk koji motor generira, možemo ih usporediti s membranom zvučnika.

Cilj ovog rada je utvrditi može li elektronički komutirani motor električnog bicikla dati odgovarajuću razinu i kvalitetu zvuka koja bi bila korisna za komunikaciju s vozačem bicikla. U slučaju da su razina i kvaliteta zvuka koje motor reproducira zadovoljavajuće, podaci o stanju greške sustava električnog bicikla, napunjenosti baterije ili

prijeđenim kilometrima u vožnji mogli bi se prenijeti vozaču bez upotrebe LCD (*engl. Liquid Crystal Display*) zaslona, što omogućuje vozaču da ne skreće pogled s ceste. Realizacije ovakve komunikacije ne poskupljuje proizvodnju električnih bicikla i ne povećava njihovu težinu, već se ostvaruje samo promjenom u upravljačkom algoritmu motora.

2. Istosmjerni elektronički komutirani motor (EKM)

Istosmjerni elektronički komutirani motor (EKM) ili istosmjerni motor bez četkica *engl. (Brushless DC electric motor – BLDC)* razvijen je 1960-ih godina.[1] To je vrsta sinkronog motora, što znači da se magnetsko polje koje generira rotor i magnetsko polje koje generira stator rotiraju na istoj frekvenciji.[2] Prethodio mu je istosmjerni mehanički komutirani motor poznat i kao istosmjerni motor s četkicama (*engl. Brushed DC electric motor - BDC*).

Kod istosmjernog mehanički komutiranog motora električna struja prolazi kroz namote smještene na rotoru i raspoređene unutar fiksnog magnetskog polja. Struja se dovodi preko fiksnih provodnih četkica (elektroda) koje uspostavljaju kontakt s komutatorom, čija rotacija uzrokuje promjenu struje kroz zavojnice. Kontinuirano mijenjajući smjer struje, polariteti zavojnica se neprestano okreću, a zavojnice nastavljaju „loviti“ suprotne polove trajnih magneta na statoru. Mehanički komutator ima mnogo nedostataka:

- materijal od kojih su izrađene četkice se smanjuje zbog trenja, pri čemu se stvara prašina i četkice je potrebno zamijeniti [3];
- trenje četkica koje klize duž rotirajućih dijelova komutatora uzrokuje gubitke snage koji mogu biti značajni kod motora male snage [3];
- kontinuirano mijenjanje smjera struje u namotima zavojnica uzrokuje iskrenja na komutatoru, što dovodi do opasnosti od požara u eksplozivnoj atmosferi i elektroničkog šuma koji može uzrokovati elektromagnetske smetnje (EMI) u obližnjim mikroelektronskim krugovima. [4]

Tipični istosmjerni elektronički komutirani motor sastoji se od trajnih magneta na rotoru i fiksnih armaturnih namota jednoliko raspoređenih na statoru. Uz to se koriste senzori za određivanje položaja rotora i odgovarajuća učinska elektronika. Elektronički komutator kontrolira redoslijed aktiviranja namota na osnovu signala od senzora

položaja rotora. Budući da magneti rotora obično imaju veliku gustoću magnetskog toka i visoku električnu provodljivost, gubici na rotoru su mali što rezultira većom učinkovitošću. EKM motori za razliku od mehanički komutiranih motora ne zahtijevaju četkice za svoj komutacijski sustav.

2.1. Usporedba elektronički i mehanički komutiranih motora

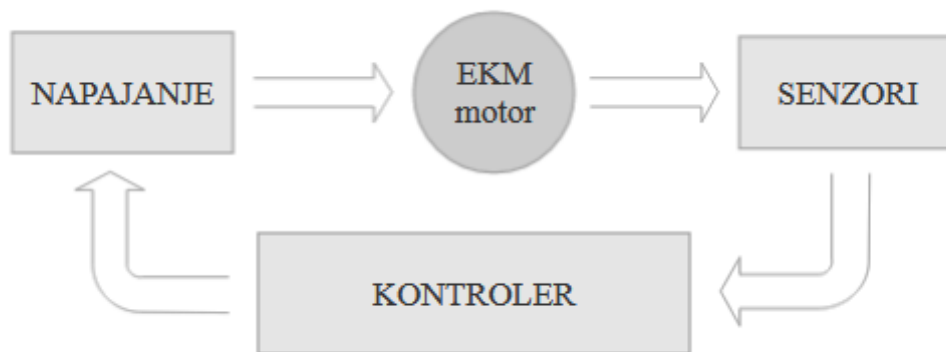
Glavna razlika između elektronički komutiranog motora i mehanički komutiranog motora je eliminacija karbonskih ili grafitnih četkica koje mehanički komutirani motori koriste za upravljanje brzine. Uklanjanje četkica daje elektronički komutiranim motorima mnoge prednosti u odnosu na mehanički komutirane i to ih čini pogodnim za različite primjene. Osnovna usporedba između mehanički komutiranih i elektronički komutiranih motora dana je u tablici 2.1.

Tablica 2.1: Usporedba elektronički i mehanički komutiranih motora

Elektronički komutirani motor	Mehanički komutirani motor
visoka učinkovitost (nema pada napona na četkicama)	niska učinkovitost
dulji vijek trajanja (manje gubitaka)	kraći vijek trajanja
veći raspon brzina	umjereni raspon brzina
manja potreba za održavanjem jer ne treba mijenjati četkice	potrebno je periodičko održavanje
učinkovita disipacija topline	neučinkovita disipacija topline zbog načina na koji je konstruiran rotor
komutator ne izaziva iskrenje i smanjuje se elektromagnetska interferencija (EMI)	prisutno iskrenje i elektromagnetska interferencija (EMI)
mala buka tijekom rada	velika buka tijekom rada
veliki omjer snage i mase motora	mali omjer snage i mase motora
kompleksna i skupa kontrola	jednostavna i jeftina kontrola
visoki troškovi proizvodnje	niski troškovi proizvodnje

2.2. Načela rada EKM motora

Osnovni sustav EKM motora najčešće se sastoji se od četiri dijela: uređaja za napajanje, EKM motora, senzora i upravljačkog algoritma, kao što je prikazano na slici 2.1. Uređaji za napajanje prenose električnu energiju iz izvora na istosmjerni EKM motor koji je zatim pretvara u mehaničku energiju. Glavna značajka sustava je određivanje položaja rotora EKM motora pomoću senzora ili u novije vrijeme bezsenzorskim pristupom (*engl. sensorless*). Ta informacija predaje se kontroleru (dio elektroničkog komutatora) koji na temelju upravljačkog algoritma donosi daljnje odluke. Kontroler šalje naredbe uređaju za napajanje da uključi ili isključi napajanje određenih namota na statoru.



Slika 2.1: Blok dijagram osnovnog sustava EKM motora

Rad rotacijskih električnih strojeva temelji se na više zakona fizike: Ampèreov zakon, Faradayev zakon i Lenzov zakon. Ovi zakoni fizike objašnjeni su u nastavku.

2.2.1. Ampèreov zakon

Ampèreov zakon postavio je André-Marie Ampère 1826. godine [5], a glasi:

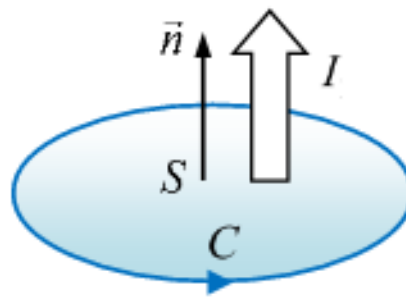
„Linijski integral magnetskog polja po proizvoljnoj zatvorenoj krivulji razmjernan je ukupnoj električnoj struji koju obuhvaća ta krivulja.”

Matematički zapis Ampèreovog zakona dan je jednadžbom 2.1 [6]:

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} d\vec{s} = \mu_0 I \quad (2.1)$$

gdje je:

- \vec{B} - magnetska indukcija,
- $d\vec{l}$ - element puta uzduž krivulje integracije,
- μ_0 - magnetska permeabilnost vakuuma,
- \vec{J} - gustoća struje na površini S ,
- S - površina omeđena konturom C krivulje integracije,
- I - algebarska suma struja koje protječu kroz zatvorenu konturu C , odnosno kroz proizvoljnu površinu S je omeđena konturom C .



Slika 2.2: Grafički prikaz Ampèreovog zakona [6]

Magnetsko polje u električnim strojevima stvaraju struje kroz namote (i trajni magneti) što znači da struje nisu raspodijeljene u prostoru, već postoje u namotima. Stoga površinski integral gustoće struje \vec{J} možemo zamijeniti algebarskom sumom struja u namotima koji prolaze kroz površinu S , kako je prikazano slikom 2.2 i formulom 2.1.

2.2.2. Faradayev zakon

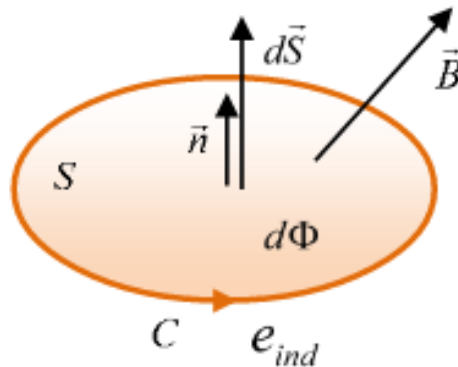
Michael Faraday 1845. godine predstavio je Faradayev zakon elektromagnetske indukcije kojim je otkrio kako se inducira napon tj. elektromotorna sila (EMS) u namotima [5]:

„Trenutna vrijednost inducirane elektromotorne sile u zatvorenoj vodljivoj petlji jednaka je brzini promjene magnetskog toka obuhvaćenog tom petljom.”

Magnetski tok Φ kroz zatvorenu petlju C matematički izražavamo jednadžbom 2.2 [5]:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{s} \quad (2.2)$$

gdje je \vec{B} magnetska indukcija, a S površina koja je omeđena konturom C .



Slika 2.3: Grafički prikaz Faradayevog zakona [6]

Na slici 2.3 vidimo zatvorenu vodljivu petlju C u magnetskom polju indukcije \vec{B} . Promjena magnetskog toka kroz vodljivu petlju C dovodi do pojave inducirane elektromotorne sile u petlji. Matematički zapis Faradayevog zakona dan je jednadžbom 2.3[6]:

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

gdje je: ε inducirana elektromagnetska sila, a $d\Phi$ je promjena magnetskog toka kroz strujnu petlju u vremenu dt .

Magnetski tok može se mijenjati na različite načine: pomicanjem vodiča u magnetskom polju, vrtnjom namota ili prolaskom izmjenične struje namotom. Faradayevo je otkriće bilo posebno važno za razvoj elektrotehnike. Jedna od najvažnijih primjena elektromagnetske indukcije je pretvaranje mehaničke energije u električnu energiju pomoću magnetskog polja, što se upotrebljava pri proizvodnji električne energije. Na tom principu rade električni generatori, motori, transformatori, induktori i zvučnici.

2.2.3. Lentzov zakon

Lentzov zakon nazvan je po Heinrichu Lentzu i glasi [5]:

„Smjer inducirane elektromotorne sile i njome pokrenute električne struje u strujnoj petlji kroz koju se mijenja magnetski tok uvijek je takav da poništava promjenu magnetskoga toka kojim je napon induciran.“

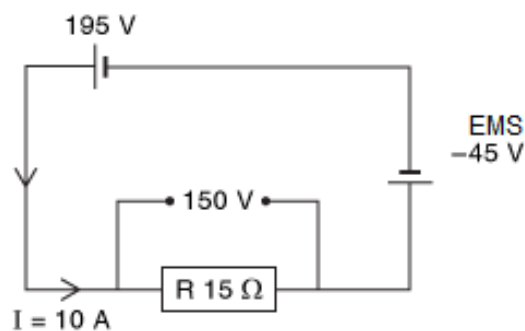
Jednostavnije objašnjeno, inducirana elektromotorna sila opire se prirodnom kretanju

motora. Matematički se izražava kao i Faradayev zakon, ali sa suprotnim predznakom [6]:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.4)$$

gdje je N broj namota jer ako se petlja sastoji od više namota tada svaki namot doprinosi induciranoj elektromotornoj sili.

Na primjeru jednostavnog strujnog kruga (slika 2.4) i uzimajući u obzir očuvanje energije, vidimo da će ukupni napon na motoru uvijek biti jednak sumi napona napajanja i inducirane elektromotorne sile.



Slika 2.4: EMS - strujni krug

Ako se teret primjeni na motor dodatno opterećenje uzrokovat će smanjenje brzine motora. Kod konstrukcije motora, na induciranu elektromotornu silu utječe broj zavoja u namotima statora i magnetsko polje. Jednom kad je motor konstruiran, broj zavoja u namotima statora i magnetsko polje ostaje konstantno. Jedini faktor koji upravlja induciranom elektromotornom silom je kutna brzina rotora. Kako se brzina povećava, povećava se i elektromotorna sila. [2]

2.3. Okretni moment i kutna brzina motora

Za proučavanje električnih motora, okretni moment je vrlo važan pojam. Po definiciji to je sklonost sile da rotira objekt oko svoje osi. Okretni moment računa se u odnosu na neku točku, pomoću vektorskog produkta [3]:

$$M = \vec{F} \times \vec{r} \quad (2.5)$$

gdje je \vec{r} usmjerena dužina povučena od te točke do pravca na kojemu djeluje sila \vec{F} . Stoga, da bi povećali okretni moment možemo povećati silu koja zahtijeva jače magnete ili više struje ili možemo povećati udaljenost, za što su potrebni veći magneti.

Kutna brzina predstavlja brzinu promjene kuta pri kružnom gibanju u jedinici vremena. Promatra se kut za koji se motor zakrene prilikom rotacije. Iznos kutne brzine dan je jednačbom [3]:

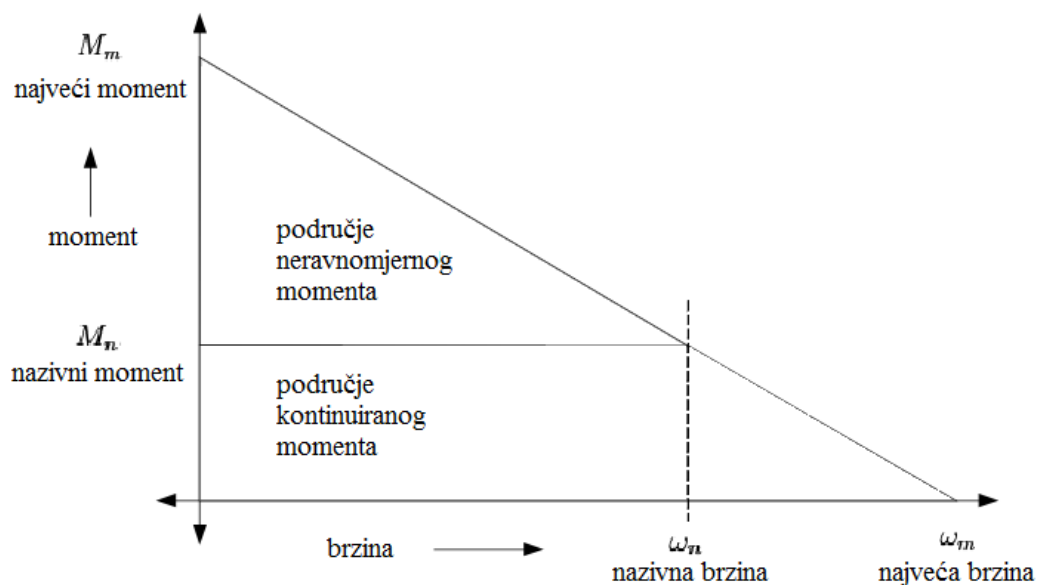
$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.6)$$

gdje je ω - kutna brzina, φ - kut i t - vrijeme.

Učinkovitost je bitna za konstrukciju motora jer određuje količinu potrošene energije. Motor s većom učinkovitošću također će zahtijevati manje materijala za generiranje potrebnog okretnog momenta. Ako promatramo matematički (2.7), učinkovitost u električnim motorima predstavlja omjer izvršenog (korisnog) mehaničkog rada prema utrošenoj električnoj energiji iz izvora [3]:

$$\eta = \frac{P_{izlazno}}{P_{ulazno}} = \frac{M\omega}{UI} \quad [\%] \quad (2.7)$$

gdje je: η - učinkovitost, M - okretni moment, ω - kutna brzina, U - napon izvora i I - struja izvora.



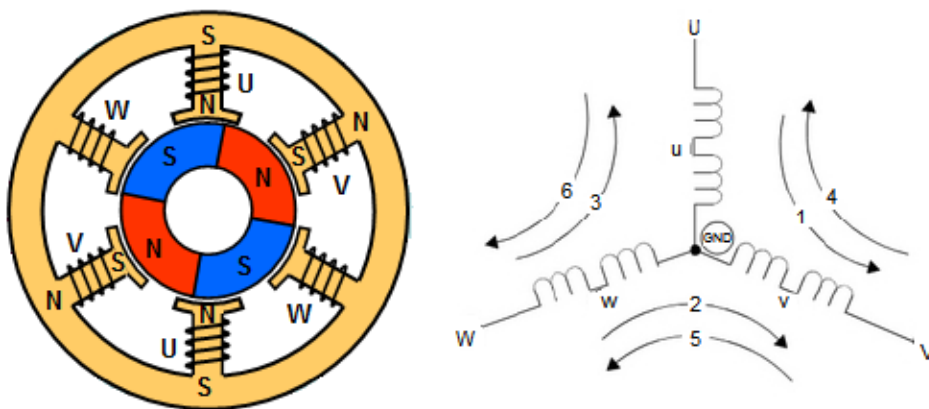
Slika 2.5: Dijagram karakteristike okretnog momenta EKM motora u ovisnosti o kutnoj brzini rotora [2]

Postoje dva parametra okretnog momenta koji se koriste kod definiranja EKM motora

najveći okretni moment M_m i nazivni okretni moment M_n . Za vrijeme rada, motor može biti povremeno i kratkotrajno opterećen do najvećeg momenta M_m , ali u kontinuiranom radu opterećenje ne smije biti iznad nazivnog momenta M_n . [2] Motori su konstruirani tako da kada rade pri nazivnoj brzini, razlika potencijala između EMS-a i napona napajanja uzrokuje da motor povuče nazivnu struju i isporuči nazivni okretni moment M_n . Vožnja motora iznad nazivne brzine bitno povećava EMS, smanjujući razliku potencijala na namotima, a zatim smanjujući struju i okretni moment. Povećanje do najveće brzine motora ω_m uzrokovalo bi induciranu EMS (i gubitke motora) vrijednosti jednake naponu napajanja. Najveća kutna brzina ω_m može biti i do 150% nazivne kutne brzine ω_n , ali pri tome moment struja padaju gotovo na nulu. [2] Slika 2.5 prikazuje karakteristiku okretnog momenta EKM motora u ovisnosti o kutnoj brzini rotora.

2.4. Struktura EKM motora

Svi električni i mehanički problemi zbog četkica u istosmjernom mehanički komutiranom motoru uklanjaju se u istosmjernim elektronički komutiranim motorima. Četkice se zamjenjuju elektroničkim regulatorom koji kontrolira brzinu motora. Kroz fiksne namote uzastopno se propušta struja kako bi se uzrokovalo okretanje rotora. Izvedbe elektronički komutiranog motora mogu biti monofazne, dvofazne i trofazne, a trofazne se najčešće koriste. Mogu se proizvesti i EKM motori s više od tri faze, ali nisu uobičajeni i uvelike povećavaju troškove proizvodnje. [7] Tipičan trofazni EKM motor sa strujnim dijagramom prikazan je na slici 2.6. Budući da polja statora i rotora EKM motora rotiraju u istoj frekvenciji ne postoji klizanje između statora i rotora kao u slučaju mehanički komutiranih motora.



Slika 2.6: Trofazni EKM motor i strujni dijagram [3]

Trofazni EKM motor pokreće se primjenom pozitivne struje na jednu od faza (npr. faza U na slici 2.6), dok negativna struja izlazi na drugu fazu (faza V na slici 2.6). Pri tome struja nikad na teče trećom fazom (faza W na slici 2.6). Struje u namotima generiraju magnetsko polje. Nastali magnetski tokovi prve i druge faze se zbrajaju u rezultatni magnetski tok. Južni (S) i sjeverni (N) polovi magneta na rotoru se izravnavaju prema rezultatnom toku (sjeverni pol najbliži smjeru toka). Da bi se rotacija održala potrebno je stalno mijenjati redoslijed napajanja faza. Mijenjanjem redoslijeda napajanja faza mijenja se smjer rezultatnog toka koji povlači magnet rotora za sobom.

2.4.1. Električni i mehanički kut

Za svaki tip elektromotora možemo definirati pojmove brzine i položaja. Položaj se odnosi na mehanički položaj motora, a brzina motora je brzina kojom se rotor okreće. Kada se rotor okrene za jedan potpuni okretaj kažemo da je napravio potpuni mehanički put od 360 stupnjeva. Jednom kad prođe cijeli put, rotor se vraća u svoj početni položaj. Ovo gibanje se opisuje mehaničkim kutom motora. Električni kut u motoru povezan je s položajem magneta rotora. Jedan prijelaz iz sjevernog (N) pola u južni (S) i zatim ponovo u sjeverni (N) je jednak 360 električnih stupnjeva. Broj magnetskih polova na rotoru ima glavnu ulogu u određivanju odnosa između električnog i mehaničkog položaja motora. Kod motora koji ima jedan par polova, električki i mehanički prijedeni put su jednaki, a time su jednaki električni i mehanički kut. U slučaju više pari polova, broj električnih i mehaničkih okretaja nije jednak, kao što nije jednak niti njihov kut. Odnos između električnog kuta i mehaničkog kuta može se izraziti pomoću jednadžbe (2.8), koja pokazuje da se s povećanjem broja pari polova povećava i broj električnih okretaja u jednom potpunom mehaničkom okretaju.

$$N_P = \frac{\theta_E}{\theta_M} \quad (2.8)$$

gdje je N_P broj pari polova, θ_E električni kut, a θ_M mehanički kut.

Dakle, da bi motor s dva para polova (2 N pola i 2 S pola) rotirali za 360 električnih stupnjeva potrebno ga je rotirati za 180 mehaničkih stupnjeva. To znači da će motor s četiri para polova (4 N pola i 4 S pola) napraviti 360 električnih stupnjeva kada se rotor okrene za 90 mehaničkih stupnjeva.

2.4.2. Stator

Stator EKM motora sadrži višefazne armaturne namote kroz koje se propušta struja koja dovodi do zakretanja rotora. Izvedba statora nalikuje izvedbama indukcijskih elektromotora, ali s drugačije raspoređenim namotima. [2] Prema broju faza određen je i broj namota na statoru pa tako trofazni stator ima tri namota. Svaki od namota raspoređen je na periferiji statora tako da se dobije parni broj polova. [2]

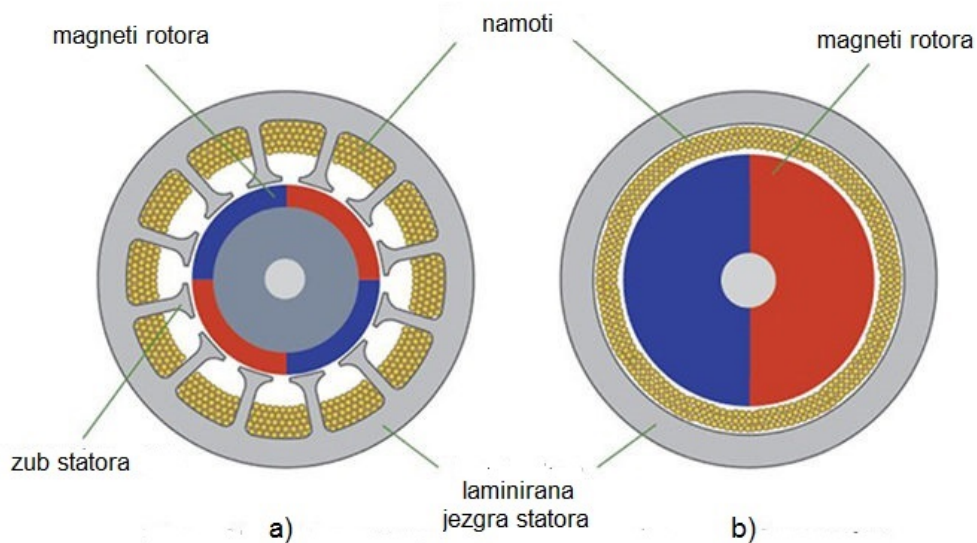
Namoti u statoru mogu biti povezani na dva načina: spoj zvijezde ili spoj trokuta. Glavna razlika između ova dva spoja je u tome što spoj zvijezde daje visoki okretni moment pri malom broju okretaja, dok spoj trokuta daje nizak okretni moment pri malom broju okretaja. Iz načina rada EKM motora možemo zaključiti da se namoti ovog elektromotora uvijek spajaju u oblik zvijezde jer samo u takvom spoju, ako priključimo izvor napona između bilo koja dva voda, struja teče između dvije faze spojene u seriju ostavljajući treću fazu neiskorištenom. U slučaju spoja trokuta, da su bilo koja dva voda povezana s naponskim izvorom, sve tri faze se napajaju jer su paralelno povezane. Zbog toga se pola napona primjenjuje na namot koji se ne koristi, čime se povećavaju gubici, smanjuje učinkovitost i okretni moment.

Jezgra statora je čelična, a izrađuje se tehnikom laminacije. Laminacija je proces proizvodnje materijala u više slojeva, tako da kompozitni materijal postiže poboljšanu čvrstoću, stabilnost, zvučnu izolaciju i izgled. [3] Ovisno o izradi jezgre statora razlikujemo:

- stator s utorima;
- stator bez utora.

2.4.2.1. Stator s utorima

Kod statora s utorima (*engl. slotted*), kao što je prikazano na slici 2.7 a), bakreni namoti su umetnuti u te utore. Dizajn statora s utorima je jednostavan i jeftin za proizvodnju, ali je prisutan visok zaporni okretni moment (*engl. detent torque*). Zaporni okretni moment javlja se zbog trajnog magneta rotora koji se nastoji izravnati s utorima statora. Budući da se zaporni okretni moment mora prevladati prije nego se motor pomakne, smanjuje se idealan okretni moment koji motor može proizvesti kada radi. Količina energije koju motor mora proizvesti kako bi se prevladao zaporni okretni moment je proporcionalna brzini motora. Dakle, što se motor brže okreće, to će veći utjecaj zadržati zaporni okretni moment na stvarni, izlazni okretni moment motora. Također, rotacija motora postaje manje glatka, pojavljuju se trzaji, a to je posebno vidljivo pri



Slika 2.7: Stator elektronički komutiranog motora: a) stator s utorima; b) stator bez utora [8]

niskim okretajima motora. Prisutnost utora i zuba statora utječe i na minimalnu veličinu motora jer postupak namatanja bakrene žice postaje teže izvediv kada se veličina motora smanji. Izvedbe statora s utorima poželjnije su kada je potreban veći promjer motora i veći broj polova.

2.4.2.2. Stator bez utora

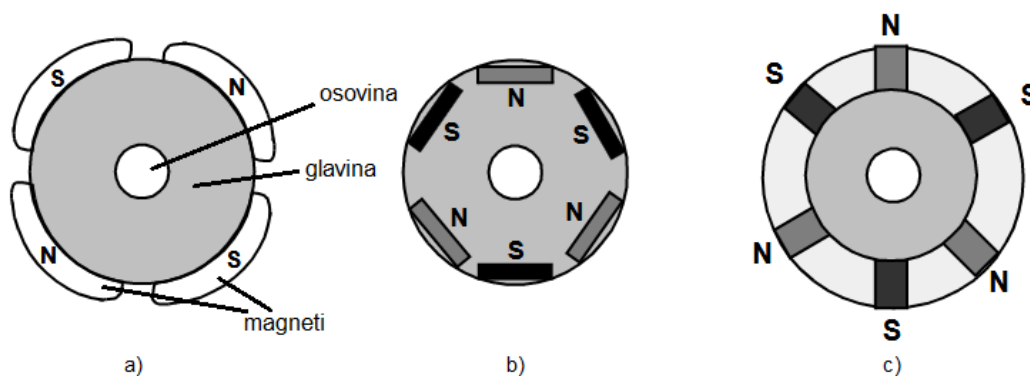
Stator bez utora (*engl. slotless*), kao što je prikazano na slici 2.7 b), nema zube koji podupiru namote. Umjesto toga laminacija statora je izrađena od slojeva čeličnih prstena. Namotana bakrena žica cilindričnog je oblika i postavlja se u zračni raspored između lamela statora i rotora. Magnetska indukcija u namotu je manja nego u statoru s utorima zbog većeg zračnog rasporeda. Zbog toga struja može vrlo brzo ući u namote statora, što čini statore bez utora dobrim za primjene koje zahtijevaju veliko ubrzanje i dinamički odziv. Za kompenzaciju gubitka indukcije obično se koriste veći magneti. Nedostatak ovog rješenja je moguće povećanje inercije rotora i povećanje troškova proizvodnje. Prednost dizajna statora bez utora je nedostatak zuba zbog čega ne postoji zaporni okretni moment pa su karakteristike motora vrlo glatke i značajno je smanjena buka. Proizvodnja okretnog momenta je predvidljiva i lako upravljiva jer je zbog eliminacije zapornog okretnog momenta izravno povezana sa strujom koja se dovodi na namote.

2.4.3. Rotor

Rotor elektronički komutiranog motora sastoji se od osovine, glavine i trajnih magneta. Ovisno o primjeni broj pari polova u rotoru varira od dva do osam. Veći broj magnet-

skih polova daje bolji okretni moment, ali po cijenu smanjenja maksimalne moguće brzine. Povećanjem broja magnetskih polova smanjuje se raspoloživi prostor za svaki pol. Na kraju se dostiže granica gdje razmak između polova magneta rotora predstavlja značajan postotak ukupnog prostora na rotoru, a okretni moment više ne raste. Optimalni broj magnetskih polova ovisi o geometriji motora i svojstvima materijala koji se koriste u motoru.

Magneti mogu biti postavljeni na obodu rotora, ugrađeni u rotor ili umetnuti u jezgru rotora. Slika 2.8 prikazuje poprečne presjeke različitih izvedbi magneta u rotoru.



Slika 2.8: Izvedbe poprečnih presjeka magneta u rotoru: a) kružna jezgra s magnetima na obodu, b) kružna jezgra s magnetima pravokutnog oblika ugrađenim u rotor, c) kružna jezgra s pravokutnim magnetima umetnutim u jezgru rotora. [2]

Drugi parametar rotora koji utječe na maksimalni okretni moment je materijal koji se koristi za izradu trajnih magneta. Što je veća gustoća toka materijala, to je veći okretni moment. Materijali od kojih se izrađuju trajni magneti mogu biti:

- legure rijetkih zemnih metala;
- ferit.

U novije vrijeme sve je češća upotreba magneta napravljenih od legura rijetkih zemnih metala, kao što su: samarijev kobalt (SmCo) i legura neodija, ferita i bora (NdFeB). Magneti od ovih legura imaju visoku magnetsku gustoću po volumenu. Veća gustoća pomaže pri smanjenju dimenzija rotora uz zadržavanje visokog okretnog momenta u usporedbi s motorima iste veličine koji koriste feritne magnete. [2] Magneti napravljeni od legure samarija i kobalta (SmCo) su skupi i zahtjevni za obradu, ali remanencija B_r iznosi do 1,1 T i imaju visoku temperaturnu postojanost (250 – 350°C). Magneti od sintetiziranog neodija (NdFeB) imaju najveću remanenciju (B_r iznosi i do

1,45 T), ali nedostatak im je ograničena temperaturna postojanost (do 230°C uz B_r oko 1,1 T ; do 70°C uz B_r oko 1,4 T). [9]

Feritni trajni magneti se najčešće koriste jer su relativno jeftini i imaju dobru temperaturnu postojanost (do 250°C). Nedostaci ferita su: niska gustoća toka za dani volumen, mala remanentna indukcija B_r (0,2 – 0,45 T) i slaba električna vodljivost. [9]

2.5. Određivanje pozicije rotora

Kao što je već spomenuto u poglavlju 2.4, EKM motor pokrećemo kontinuirano mijenjajući smjer resultantnog magnetskog toka kojeg stvaraju namoti statora. Trajni magneti na rotoru neprestano prate promjenu toka, što uzrokuje okretanje rotora. Kontrola EKM motora mora biti usklađena s položajem rotora (magneta) zbog čega motori najčešće koriste senzore za detekciju tog položaja. Umjesto senzora sve češće se primjenjuje i bezsenzorski način određivanja pozicije rotora. Primjena struje kada je položaj rotora nepoznat može uzrokovati okretanje rotora u pogrešnom smjeru. Upotreba jednog od navedenih rješenja sprječava taj problem.

2.5.1. Senzorski pristup

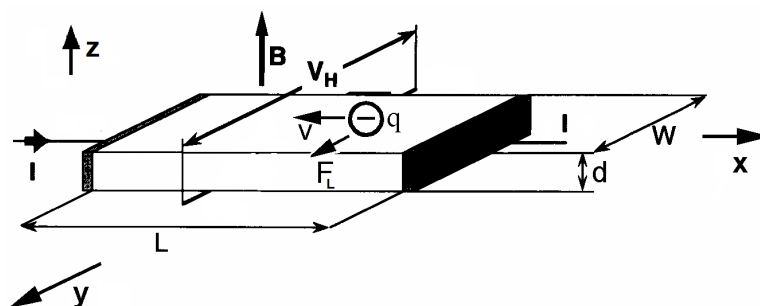
U tablici 2.2 navedeni su tipovi senzora koji se koriste u EKM motorima. Za različite metode upravljanja koriste se različiti tipovi senzora. Hallove sonde najbolje su za motore koji koriste trapeznu komutaciju, gdje je samo potrebno odrediti koja će se faza napajati. Precizniji senzori, kao što su rezolver i optički enkoder, prikladniji su za motore koji koriste sinusnu komutaciju ili vektorsko upravljanje, gdje je kontrola finija. Iako senzori nude očigledne prednosti i oni dolaze s nedostacima. Neki senzori imaju malu toleranciju na prašinu i zahtijevaju redovito održavanje. Drugi rade ispravno samo u ograničenom rasponu temperatura. Uporaba senzora i implementacija svih pratećih sklopova povećava troškove proizvodnje, a vrlo precizni senzori su naravno i najskuplji.

Tablica 2.2: Usporedba senzora za određivanje položaja rotora [10]

Senzor	Primjena	Značajke
Hallove sonde	trapezna komutacija	jednostavna ugradnja; niska cijena; slaba tolerancija na toplinu
Optički enkoder	sinusna komutacija; vektorsko upravljanje	visoka rezolucija; ograničen temperaturni raspon (-20 °C to +70 °C), osjetljiv na prašinu
Rezolver	sinusna komutacija; vektorsko upravljanje	visoka rezolucija; robustan; može se koristiti u teškim uvjetima rada; visoka cijena i velika težina

2.5.1.1. Hallove sonde

Razvoj poluvodičkih elektroničkih komponenata omogućio je izradu manjih mjernih senzora magnetskog polja. Jedan od primjera je Hallova sonda, vodič kojim protječe električna struja i stvara magnetsko polje.



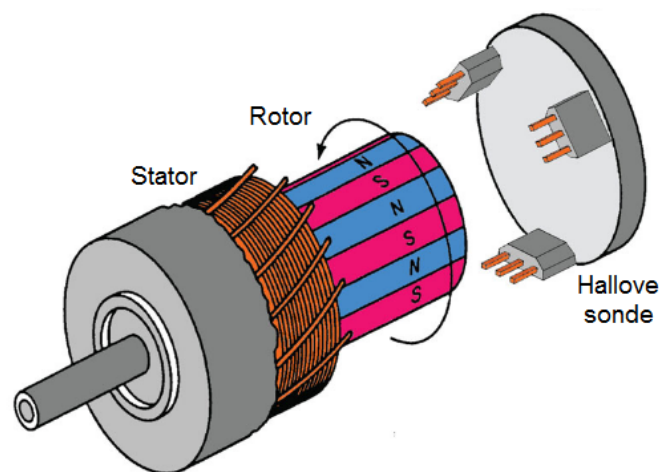
Slika 2.9: Grafički prikaz Hallovog efekta[11]

Slika 2.9 prikazuje Hallov efekt: električna struja I protječe kroz vodljivu pločicu debljine d . Pločica se nalazi u magnetskom polju \vec{B} . Na nositelje naboja u pločici djeluje magnetska Lorentzova sila \vec{F}_L , koja je okomita na smjer magnetskog polja i na smjer struje, te uzrokuje nakupljanje naboja na jednoj strani pločice. Takva posljedica nakupljanja naboja je mjerljivi napon na rubovima pločice koji se zove Hallov napon V_H . Napon je izravno proporcionalan jakosti magnetskog polja koje prolazi kroz pločicu.

Postoje dvije vrste Hallovih sondi s obzirom na izlaz, linearni odnosno analogni izlaz te digitalni izlaz. Kod analognih senzora izlazni signal se uzima direktno iz izlaza

operacijskog pojačala kojemu je izlazni napon direktno proporcionalan magnetskom polju koje prolazi kroz Hallovu sondu. Analogne sonde imaju na izlazu stalan napon koji se povećava jačanjem magnetskog polja te smanjuje slabljenjem istog. Kako se snaga magnetskog polja povećava ujedno se povećava i izlazni signal operacijskog pojačala sve do granice zasićenja. Nakon toga svako dodatno povećanje magnetskog polja neće utjecati na izlaz osim nešto dubljev dovodjenja u područje zasićenja.

Sonde s digitalnim izlazom imaju Schmittov sklop s ugrađenom histerezom spojen na operacijsko pojačalo. Izmjereni Hallov napon se uspoređuje s unaprijed definiranom graničnom vrijednošću. Kada magnetsko polje, koje je proporcionalno s Halovim naponom i prolazi kroz Hallovu sondu, prijeđe graničnu vrijednost mijenja se izlazni napon i izlaz uređaja brzo i bez ikakvog istitravanja prebacuje iz "OFF" stanja u "ON" stanje. Promjena stanja predstavlja digitalnu informaciju koja se šalje elektroničkom komutatoru motora i na temelju koje komutator određuje napajanje određenog namota. Ugrađena histereza eliminira sve oscilacije izlaznog signala zbog pomicanja sonde unutar i izvan magnetskog polja. Iz toga slijedi da digitalne Hallove sonde imaju samo dva stanja, "ON" i "OFF" stanje.

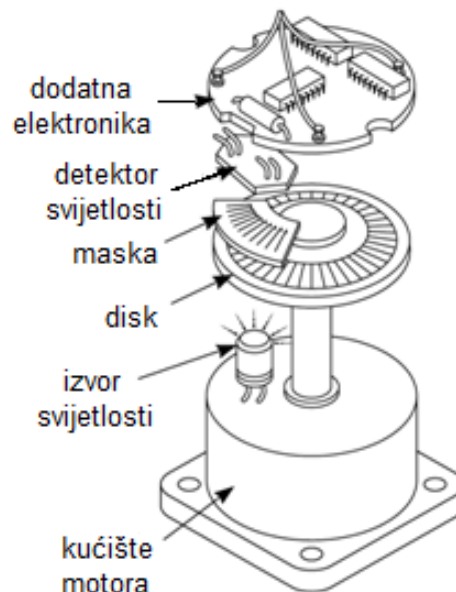


Slika 2.10: EKM motor s Hallovim sondama [13]

EKM motori obično imaju tri Hallove sonde postavljene s faznim pomakom od 120 stupnjeva na statoru ili rotoru (slika 2.10). Svakih 60 električnih stupnjeva rotacije jedna od Hallovih sondi mijenja stanje, što pokreće komutaciju struje između dvije faze. Potrebno je šest koraka za dovršetak jedne električne periode (vidi: trapezna komutacija, poglavlje 2.6.2.1)

2.5.1.2. Optički enkoder

Optički enkoder je tip rotacijskog enkodera čiji digitalni izlaz ovisi o kutnom položaju osovine motora. Postoje dvije vrste optičkih enkodera: apsolutni i inkrementalni. Izlaz apsolutnih enkodera daje trenutni položaj osovine motora. Izlaz inkrementalnih enkodera daje informaciju o pomaku osovine motora, koja se dalje koristi za izračun brzine, udaljenosti, broja okretaja u minuti i položaja.



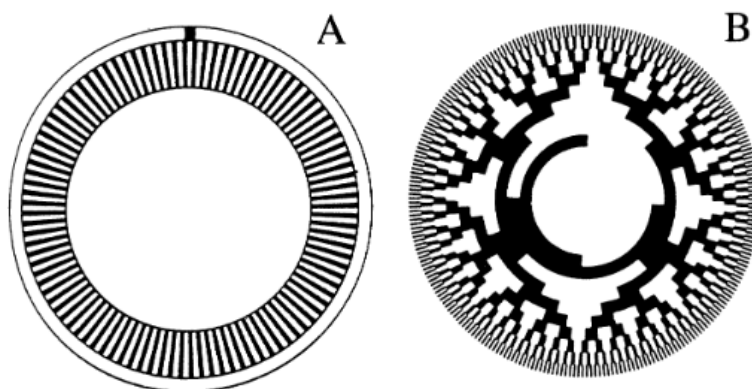
Slika 2.11: Komponente optičkog enkodera [14]

Optički koder sastoji se od tri glavna elementa, kako je prikazano na slici 2.11 :

- Disk - sadrži masku koja se sastoji od niza naizmjeničnih tamnih i svijetlih područja podijeljenih u staze. Raspored tamnih i svijetlih područja ovisi o vrsti optičkog enkodera.
- Emiter - paralelni snop svjetlosti (npr. iz skupa svjetlosnih dioda) koji pada na sve staze jedne strane diska.
- Detektor - skupina fotosenzora (npr. fotodiode) detektira svjetlost na drugoj strani diska. Obično se postavlja po jedan senzor za svaku stazu.

Izvor svjetlosti pada na rotirajući disk koji je konstruiran tako da svjetlo prolazi kroz njega ili je blokirano. Fotosenzor optičkog enkodera prepoznaje prolaz svjetla na disku i stvara odgovarajući električni impuls. Impuls predstavlja pomak kuta osovine motora u digitalnom obliku.

Maska inkrementalnog enkodera sastoji se od niza naizmjeničnih tamnih i svijetlih područja jednake duljine i jednakog broja. Tamno i svjetlo područje detektira se pomoću stacionarnih maski, razmaknutih za jednu četvrtinu periode ponavljanja tamno-svjetlo. Svjetlo područje daje "1", a tamno "0". Nasuprot tome, maske diskova apsolutnih enkodera imaju tamnija i svjetlija područja nejednako razmaknuta i raspoređena u specifičnom uzorku na svakoj stazi tako da se dobije binarni kod (ili Grayev kod) za izlazne podatke iz enkodera. Prikaz maske na disku inkrementalnog i apsolutnog enkodera dan je na slici 2.12.



Slika 2.12: Inkrementalni (A) i apsolutni (B) disk optičkog enkodera [15]

Više pari polova na motoru zahtjeva puno više manjih koraka pri rotaciji motora u jednom punom okretaju rotora. Na primjer, EKM motor s jednim parom polova generira šest stanja, elektronički odvojena na 60° mehaničkih stupnjeva. Nasuprot tome, EKM motor s dva para polova generira 12 stanja, elektronički odvojena na 30° mehaničkih stupnjeva isto tijekom jednog punog okretaja rotora. Povećanje broja parova polova smanjuje valovitost signala. Istovremeno, smanjenje valovitog signala poboljšava faktor snage i glatkoću rotacije motora. Optički koder se može prilagoditi kako bi odgovarao zahtjevima motora s većim brojem pari polova, što nije moguće s Hallovim sensorima. Najmanji kut detekcije je $0,33^\circ$, za maksimalno 180 pari polova, a ograničen je samo dizajnom fotodetektora. [20]

2.5.1.3. Rezolver

Rezolver je vrsta rotacijskog električnog transformatora, koja se koristi za mjerenje kuta rotacije. Većina rezolvera izgleda slično električnom motoru (slika 2.13) - ima metalni rotor i bakrene namote na statoru. Induktivna sprega između namota transformatora mijenja se s kutom. To znači da ćemo napajanjem rezolvera izmjeničnim naponom i mjerenjem izlaza iz namota dobiti električni signal izmjenične struje s amplitudom koja se mijenja sukladno s kutom rotacije motora.



Slika 2.13: Rezolver [16]

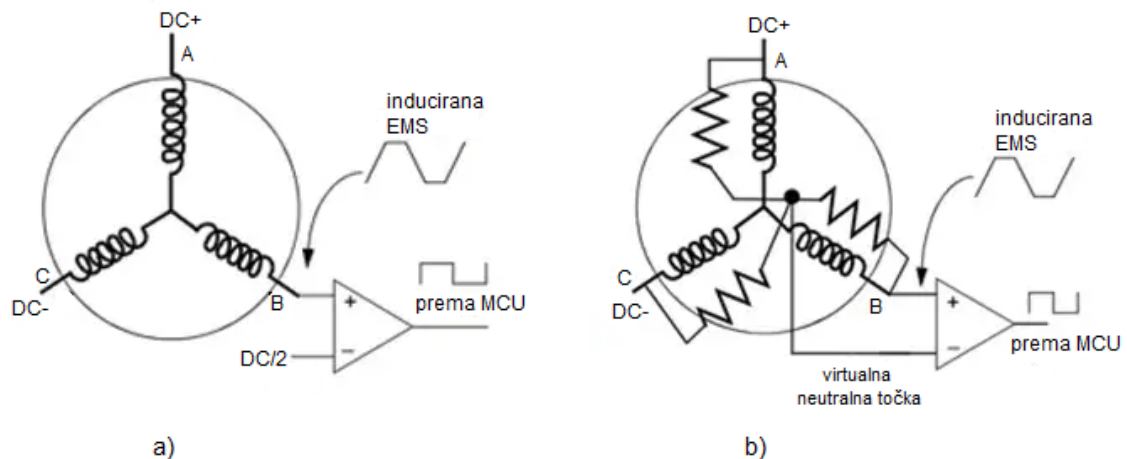
Rezolver na sekundaru daje dva izlazna signala, jedan je sinusnog valnog oblika, drugi je kosinusnog valnog oblika, dok je na primaru priključen izmjenični napon. Fazni pomak izlaznih signala jednak je kutu rotacije motora. Izlaz je analogno prikazan. Kvaliteta analogno - digitalnog kruga pretvorbe određuje istinsku razlučivost rezolvera. Za pretvorbu se najčešće koriste posebni pretvarači, takozvani rezolver - digitalni pretvarači. Oni pretvaraju sinusni i kosinusni signal u binarni signal (10 do 16-bitni) koji se prosljeđuje elektroničkom komutatoru motora. [17]

Rezolveri nisu ekonomski isplativi za većinu primjena i općenito se koriste samo u sektorima kao što su vojska i zrakoplovstvo, gdje su troškovi izrade sekundarni u odnosu na performanse i specifikacije uređaja.

2.5.2. Bezsenzorski pristup

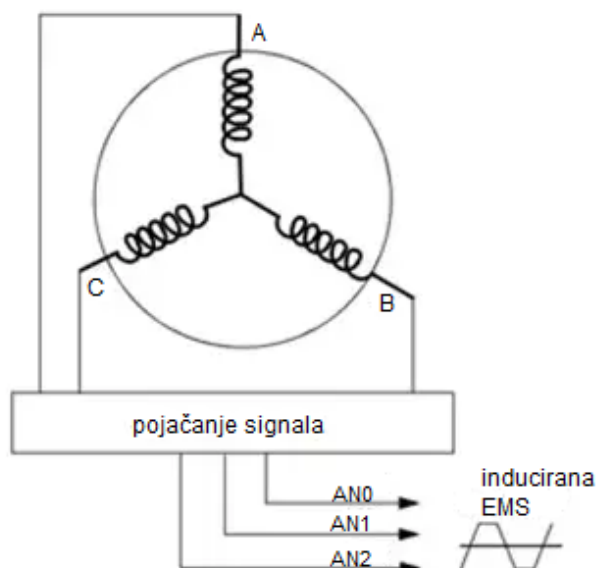
U bezsenzorskom (*engl. sensorless*) pristupu određivanja položaja rotora motora u odnosu na stator motora koristi se inducirana elektromotorna sila (EMS). Napon koji se primjenjuje na namotima statora pokreće rotor motora. Međutim, pomicanje rotora kroz magnetsko polje motora analogno je ponašanju generatora, pa motor ne samo da prima napon napajanja, nego stvara i vlastiti napon. Taj se napon naziva inducirana elektromotorna sila i proporcionalan je brzini vrtnje motora (vidi: poglavlje 2.2.2 i 2.2.3).

Postoji nekoliko metoda mjerenja inducirane EMS. Najjednostavnije je usporediti EMS s vrijednošću polovice DC napona pomoću komparatora. Slika 2.14 a) prikazuje shemu takvog sustava. Komparator je spojen na namot B. Kompletan sustav bi imao komparator spojen na svakom namotu. Prema slici struja ulazi u namot A, a izlazi



Slika 2.14: Metode mjerenja inducirane EMS EKM motora: a) Komparator za mjerenje inducirane EMS; b) Poboljšana metoda za mjerenje inducirane EMS pomoću komparatora [18]

iz namota C, dok kroz namot B ne teče struja. Inducirana EMS se povećava i smanjuje sukladno prolazu struje za fazu A. Glavni nedostatak ove jednostavne metode je mogućnost da sva tri namota statora nemaju identične karakteristike što rezultira pozitivnim ili negativnim faznim pomakom od stvarne nulte točke prijelaza. Motor bi vjerojatno još uvijek radio, ali može povlačiti previše struje. U drugoj metodi generira se virtualna neutralna točka, pomoću tri otpornika spojena paralelno s namotima statora kao što je prikazano na slici 2.14 b). Inducirana EMS se uspoređuje s virtualnom neutralnom točkom.



Slika 2.15: Mjerenje inducirane EMS pomoću ADP-a [18]

Treća metoda je korištenje analogno-digitalnih pretvornika (ADP), prikazano na slici 2.15. Mnogi od mikrokontrolera (MCU) za upravljanje EKM motora imaju ugrađene ADP-ove velike brzine. S ovom metodom, inducirana EMS je naponski prilagođena tako da se može izravno proslijediti MCU-u. Signal se uzorkuje pomoću ADP-a i zatim se uspoređuje s digitalnom vrijednošću koja odgovara nultoj točki. Kada se dvije vrijednosti podudaraju, sekvenca koja aktivira zavojnice indeksira sljedeći korak. Prednost ove metode je mogućnost korištenja digitalnih filtara koji uklanjaju visokofrekvencijske komutacijske komponente iz inducirane EMS.

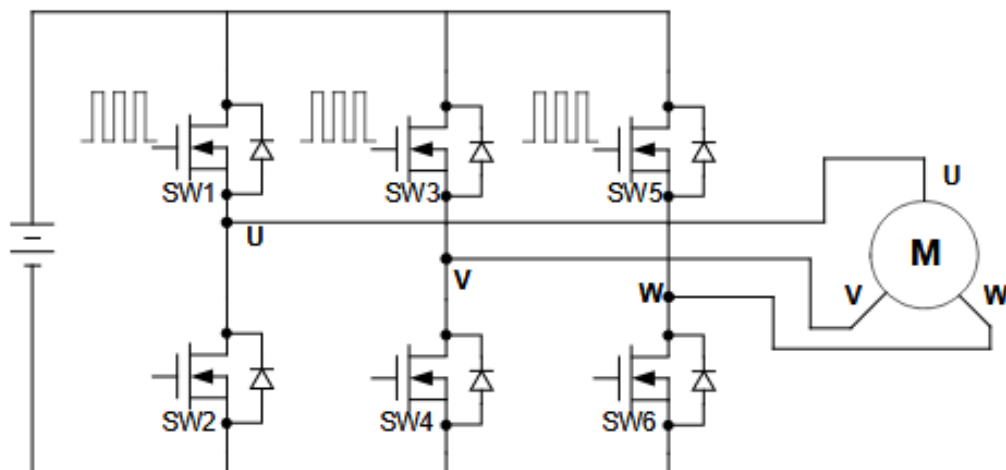
Bezsenzorski pristup određivanja pozicije rotora eliminira upotrebu senzora i time pojednostavljuje izvedbu motora (nema dodatnih ožičenja) te smanjuje troškove proizvodnje i održavanja EKM motora. Ovaj pristup ima i nedostatke: kada motor miruje ne stvara se inducirana EMS, čime se MCU-u oduzimaju informacije o položaju statora i rotora. Također, kako je inducirana EMS proporcionalna brzini vrtnje, EKM motori bez senzora nisu najbolji izbor za primjene koje zahtijevaju vrlo male brzine.

2.6. Kontrola rada EKM motora

2.6.1. Elektronički komutator

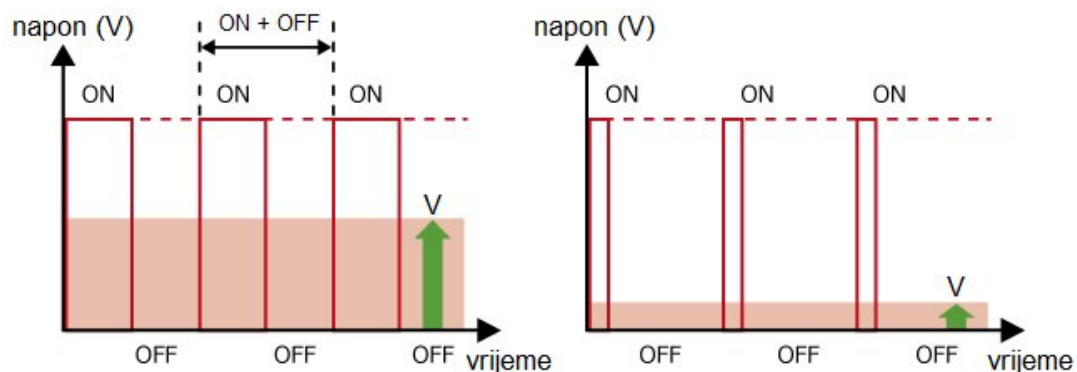
Strujom koja prolazi kroz statorske namote upravlja se elektroničkim sklopom, takozvanim elektroničkim komutatorom koji zamjenjuje klasični (mehanički) komutator. Elektronički komutator sastoji se od elektroničkog učinkog pretvarača i softverski implementirane komutacije motora pomoću mikrokontrolera. Alternativno se komutacija motora može implementirati kao analogni hardver ili kao digitalni *firmware* pomoću programirljivih logičkih sklopova (*engl. Field Programmable Gate Array - FPGA*). Načini komutacije elektronički komutiranog motora bit će objašnjeni u poglavlju 2.6.2.

Slika 2.16 prikazuje elektronički učinski pretvarač s kojim je moguće prilagođavati napon na svakom namotu, a time i kontrolirati amplitudu i smjer struje na namotima. Pretvarač je obično sastavljen od FET ili MOSFET elemenata za napone do 200 V ili IGBT elemenata za napone više od 200 V. [3] U pretvaraču su uvijek istovremeno spojene samo dvije faze na izvor kako bi struja kroz jedan namot ulazila u središte spoja u zvijezdu, a kroz drugi namot izlazila iz središta spoja. Najčešće se koriste tri para MOSFET-a raspoređenih u strukturu mosta, kao što je prikazano na slici 2.16. Svaki par MOSFET-a upravlja jednom fazom motora.



Slika 2.16: Elektronički učinski pretvarač [12]

MOSFET-i se kontroliraju pomoću pulsno - širinske modulacije (PWM). U ovom pristupu mijenjamo napon produljenjem ili smanjivanjem vremena uključivanja impulsa (*ON*), čime utječemo na radni ciklus (*engl. duty cycle*) – omjer vremena uključivanja i ukupnog intervala *ON + OFF*. Povećanje radnog ciklusa ima isti učinak kao i podizanje napona, a smanjenje radnog ciklusa ima isti učinak kao i smanjenje napona, kako je prikazano na slici 2.17.



Slika 2.17: Utjecaj radnog ciklusa na izlazni napon PWM-a [10]

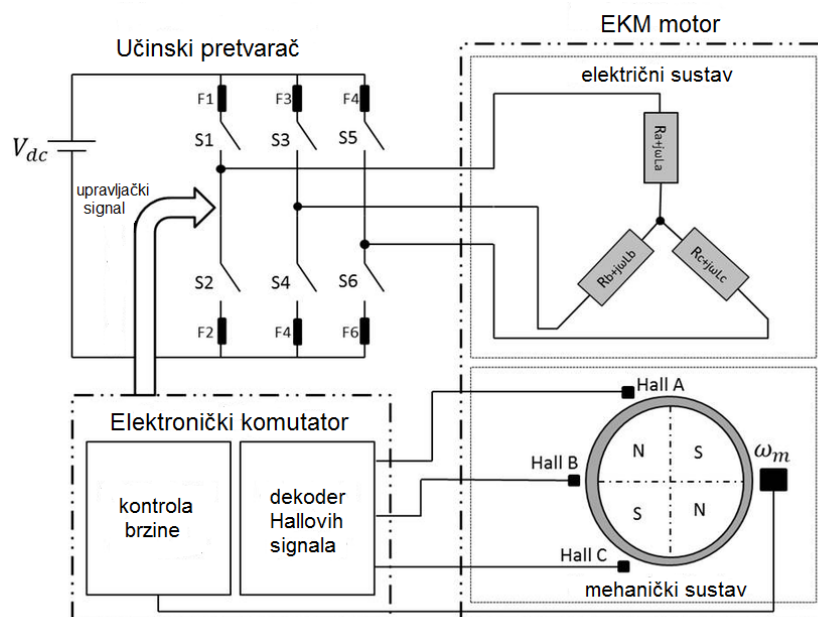
Upotreba PWM-a omogućuje ograničenje startne struje i nudi preciznu kontrolu brzine i okretnog momenta. PWM frekvencija predstavlja kompromis između gubitaka nastalih pri preklapanju elektroničkih sklopki koji se javljaju na visokim frekvencijama i valovitih struja koje se javljaju na niskim frekvencijama, a koje u ekstremnim slučajevima mogu oštetiti motor. Tipično se koristi frekvencija PWM-a najmanje za red veličine veća od maksimalne brzine motora. [19]

2.6.2. Načini komutacije

Komutacija je proces prebacivanja struje u fazama da bi se generiralo okretanje motora. Postoji više načina komutacije: trapezna i sinusna komutacija (vrste skalarnog upravljanja) i vektorsko upravljanje opisani su u nastavku.

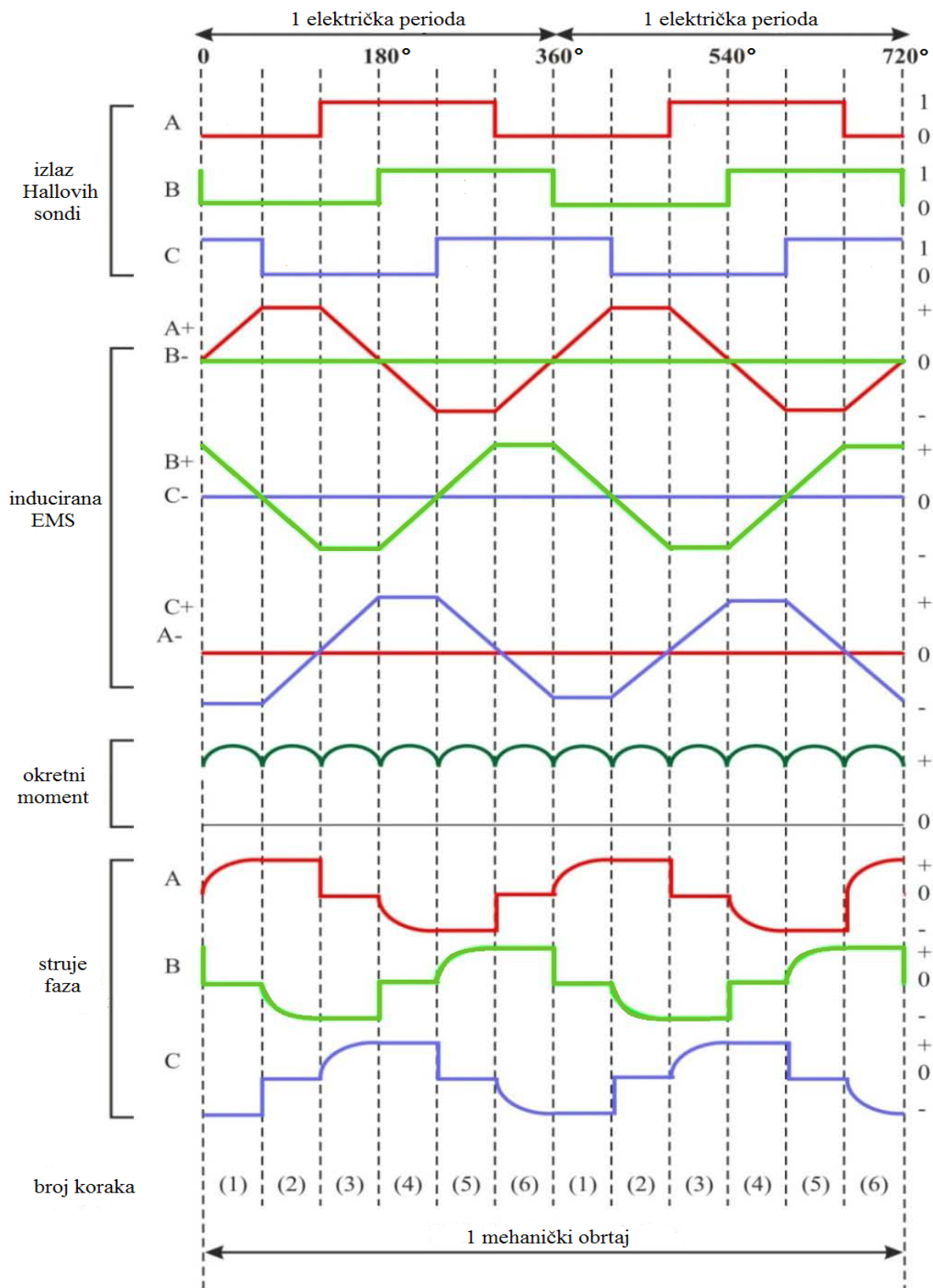
2.6.2.1. Trapezna komutacija

Trapezna komutacija, drugog naziva šest-koračna komutacija, uobičajena je za primjene koje zahtijevaju velike brzine ili velik okretni moment. Trapezna komutacija česti je izbor jer je jeftinija od drugih metoda zbog jednostavnog algoritama upravljanja. Za određivanje položaja rotora najčešće se koriste Hallove sonde, montirane na statoru s faznim pomakom od 120 električnih stupnjeva. Kada rotor prolazi Hallove sonde, sonde na izlazu daju visoki ili nizak signal (1 ili 0) ovisno o tome koji pol rotora (N ili S) trenutno prolazi mimo sonde. Svaki 60 električnih stupnjeva rotacije jedna od Hallovih sondi mijenja stanje. Signali se šalju mikrokontroleru (dio elektroničkog komutatora) i prema tim signalima određuju se trenutci u kojima počinje komutacija struje između dvije faze. Na slici 2.18 prikazana je pojednostavljena shema spajanja EKM motora, Hallovih sondi, elektroničkog komutatora i učinskog pretvarača.



Slika 2.18: Shema spajanja EKM motora, Hallovih sondi, elektroničkog komutatora i učinskog pretvarača. [21]

Za dovršetak jedne električne periode potrebno je šest koraka. Na slici 2.19 prikazani su valni oblici izlaza Hallovih sondi, inducirane EMS, okretnog momenta i struja faza trapezne komutacije tijekom jednog mehaničkog obrtaja.

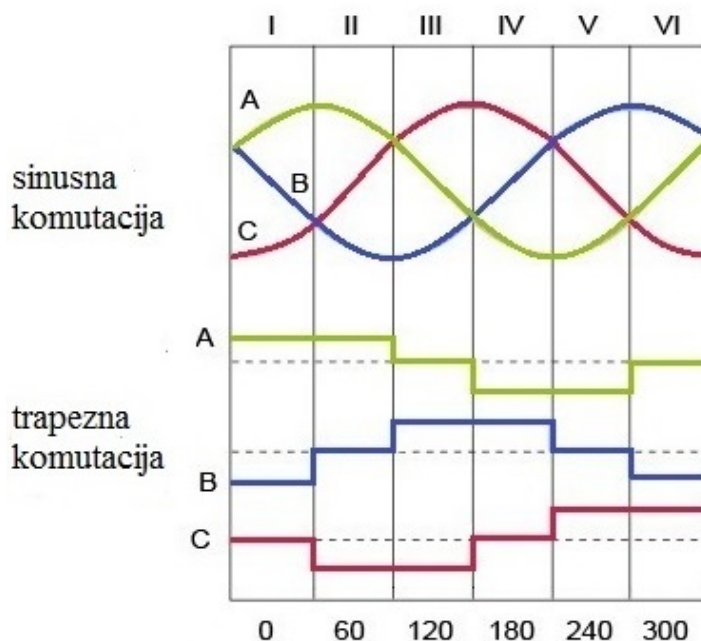


Slika 2.19: Trapezna komutacija: izlaz Hallovih sondi, inducirane EMS, okretnog momenta i faznih struja. [22]

U trapeznoj komutaciji postoji samo šest rezultatnih smjerova magnetskog toka za pokretanje motora. Komutacija omogućava kontinuiranu rotaciju, ali to je pomalo trzajuća rotacija. U nekim slučajevima, ta trzavost stvorit će neželjene vibracije i mehaničku buku. Zbog toga se kod svakog koraka komutacije (na svakih 60 stupnjeva) javlja valovitost okretnog momenta.

2.6.2.2. Sinusna komutacija

Koristeći sinusnu komutaciju ravni dijelovi trapezne komutacije zamjenjuju se sinusoidama. Postoje dva načina izvedbe sinusne komutacije. Prvi način je uz upotrebu Hallovih sondi. Taj način je jeftiniji, ali uzrokuje više buke i može rezultirati lošim radom motora zbog većeg utjecaja na slijed komutacije. Zbog toga se za sinusnu komutaciju preporučuje upotreba preciznijih senzora za praćenje položaja rotora - optički enkoder ili rezolver. Optički enkoder i rezolver su skuplji od Hallovih sondi, ali njihovom primjenom značajno se smanjuje valovitost okretnog momenta i postiže se glađi i tiši rad EKM motora.



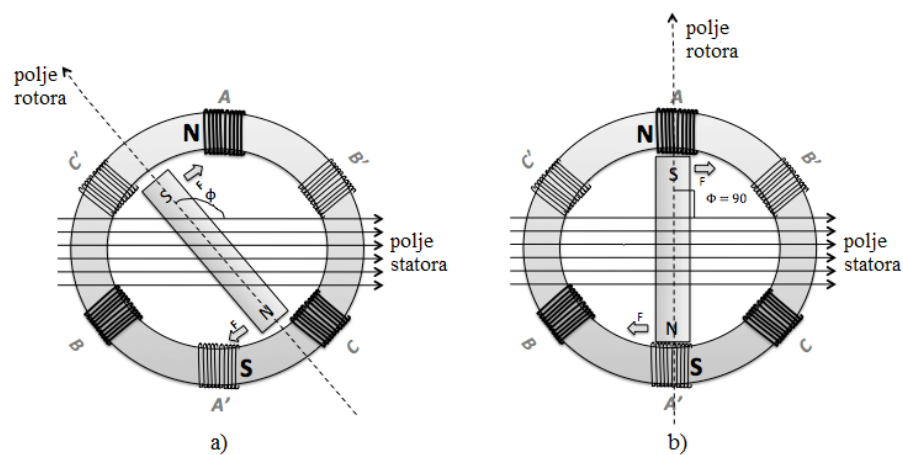
Slika 2.20: Usporedba sinusne i trapezne komutacije [23]

Algoritam sinusne komutacije znatno je složeniji jer se mora točno isporučiti različiti iznos struje u sve tri faze istovremeno. Vremenski promjenjive struje kontroliraju se pomoću PI regulatora, koji imaju ograničeni frekvencijski odziv i ograničeno pojačanje, što dovodi do slabih performansi pri većim brzinama. Sinusna komutacija prikazuje signal faze u koju struja ulazi kao $\sin(\theta)$, dok signal faze iz koje struja iz-

lazi $\sin(\theta + 120)$ ima fazni pomak od 120 stupnjeva. Priroda inducirane EMS sinusne komutacije zahtijeva preklapanje ta dva signala zbog čega se smanjuje valovitost okretnog momenta i postiže preciznija kontrola EKM motora. Usporedba sinusne i trapezne komutacije dana je na slici 2.20.

2.6.2.3. Vektorsko upravljanje

Vektorsko upravljanje (*engl. field oriented control*) osigurava veću učinkovitost pri većim brzinama u usporedbi sa sinusnom komutacijom. Ne postoji valovitost okretnog momenta i može se postići glatka i precizna kontrola motora pri velikim i malim brzinama. Okretni moment EKM motora je maksimalan kada su polja statora i rotora međusobno ortogonalna, kao što je prikazano na slici 2.21.



Slika 2.21: Položaj polja statora i rotora u vektorskom upravljanju: a) $\phi \neq 90^\circ$, okretni moment nije maksimalan, b) kut $\phi = 90^\circ$, okretni moment je maksimalan [24]

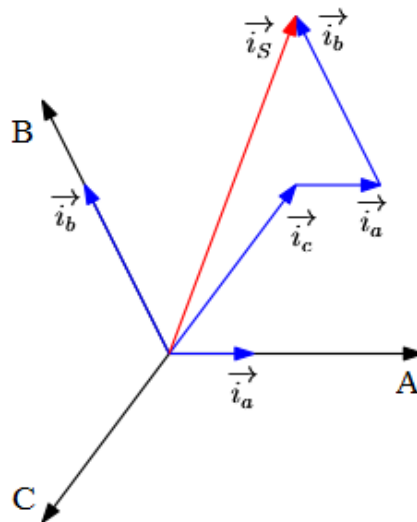
Da bi na bilo kojem električnom motoru kontrolirali okretni moment moramo kontrolirati struju motora, a za trofazni motor moramo kontrolirati tri struje istovremeno. Kontrolu struje u vektorskom upravljanju možemo rastaviti na četiri koraka:

1. Mjerenje struje koja već protječe motorom.
2. Generiranje signala pogreške usporedbom izmjerene struje i očekivane struje.
3. Pojačanje signala pogreške kako bi stvorili napon ispravljanja.
4. Modulacija napona ispravljanja na priključcima motora.

U nastavku je prema gore navedenim koracima detaljno objašnjen postupak vektorskog upravljanja EKM motorom.

1. Mjerenje struje koja već protječe motorom

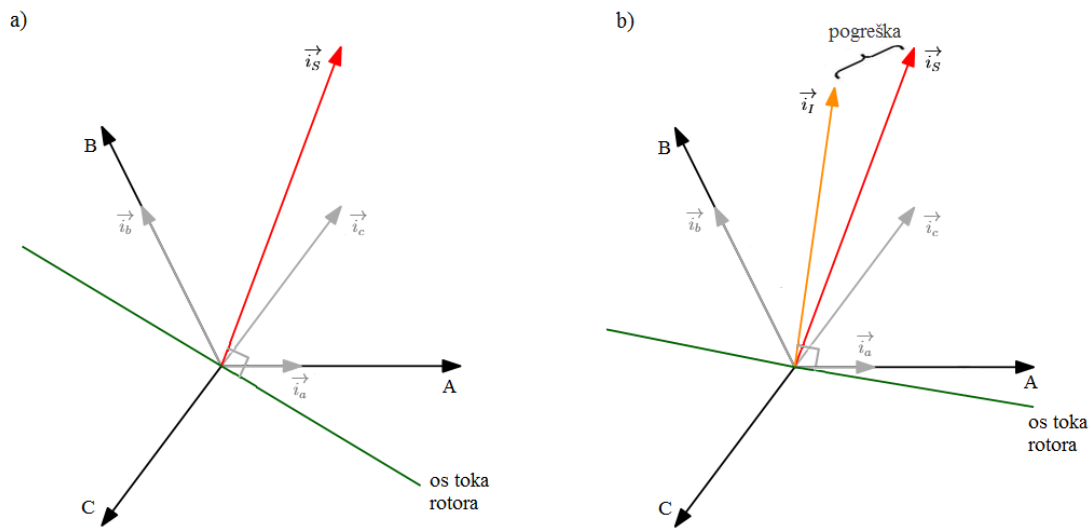
Ako pretpostavimo da su namoti statora izolirani (nisu povezani s kućištem motora niti su uzemljeni) možemo primijeniti Krichhoffov zakon struja. Ako su struje koje ulaze u fazu A i fazu B poznate znači da suma tih struja mora biti jednaka struji koja izlazi iz faze C. Prema tome, suma vektora faze A \vec{i}_a , vektora faze B \vec{i}_b i vektora faze C \vec{i}_c predstavlja vektor ukupne struje statora \vec{i}_S kako je prikazano na vektorskom dijagramu (slika 2.22). Vektor \vec{i}_S je vektor koji želimo postaviti pod 90° u odnosu na magnetski tok rotora kako bi se postigao maksimalan okretni moment.



Slika 2.22: Vektorski dijagram faznih struja EKM motora

2. Generiranje signala pogreške usporedbom izmjerene struje i očekivane struje

U drugom koraku uspoređujemo izmjerenu ukupnu struju statora \vec{i}_S i struju ispravljanja (struja koju želimo) kako bi generirali signal pogreške. Struja ispravljanja ovisi o kutu magnetskog toka rotora. Ako se magnetski tok rotora prostire duž osi zelene boje prikazane na slici 2.23 a), onda je struja ispravljanja upravo ta izmjerena struja statora \vec{i}_S jer je pod kutem od 90° u odnosu na magnetski tok rotora. U tom slučaju ne postoji pogreška. Ako se magnetski tok rotora prostire duž zelene osi prikazane na slici 2.23 b) uvodimo struju ispravljanja \vec{i}_I koja je za razliku od struje statora \vec{i}_S postavljena na 90° u odnosu na magnetski tok rotora. U tom slučaju postoji pogreška i moramo regulirati fazne struje \vec{i}_a , \vec{i}_b i \vec{i}_c da bi postavili izmjerenu struju statora \vec{i}_S na istu poziciju na osi toka rotora gdje je i struja ispravljanja \vec{i}_I .



Slika 2.23: Vektorski dijagram ukupne struje statora: a) pod kutem od 90° , b) pod kutem manjim od 90° u donosu na magnetski tok polja rotora

Da bi odredili amplitudu i kuta vektora \vec{i}_I potreban nam je koordinatni sustav s dvije osi, a ne tri. To znači da ćemo pretvoriti naš trofazni sustav u ekvivalentni dvofazni sustav, tj. promijenit ćemo način na koji promatramo motor. Za to koristimo Clarkeovu transformaciju, kojom prema zadanim jednadžbama (2.9, 2.10 i 2.11) sve fazne struje pretvaramo u dvije ekvivalentne struje u ortogonalnom $\alpha - \beta$ koordinatnom sustavu (slika 2.24) [26]:

$$i_\alpha = \frac{2}{3}i_a - \frac{1}{3}(i_b - i_c) \quad (2.9)$$

$$i_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \quad (2.10)$$

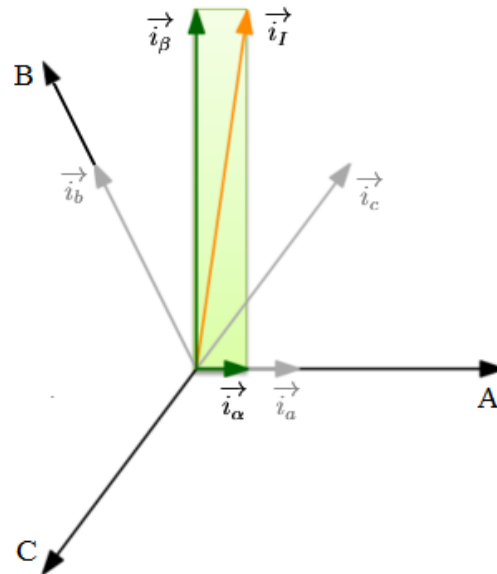
$$i_o = \frac{2}{3}(i_a + i_b + i_c) \quad (2.11)$$

gdje su \vec{i}_α i \vec{i}_β komponente ortogonalnog stacioniranog koordinatnog sustava, a \vec{i}_o homeopolarna komponenta sustava. U mnogim primjenama homeopolarna komponenta je odsutna ili manje važna. U odsutnosti homeopolarne komponente prostorni vektor $u = u_\alpha + ju_\beta$ predstavlja izvorni ulazni signal. Ako promatramo slučaj kada je $i_\alpha = i_a$ i od prije nam je poznato da vrijedi $i_a + i_b + i_c = 0$ transformaciju možemo napraviti prema sljedećim matematičkim izrazima (2.12 i 2.13) [26]:

$$i_\alpha = i_a \quad (2.12)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b \quad (2.13)$$

Prikazane jednadžbe su amplitudno invarijantne, što znači da su izlazi skalirani tako da dvofazni valni oblici imaju istu amplitudu kao i izvorni trofazni valni oblici.



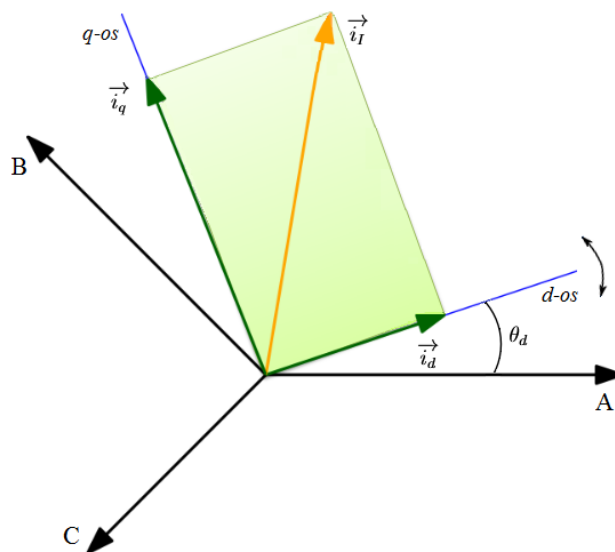
Slika 2.24: Ortogonalni stacionirani sustav dobiven Clarkeovom transformacijom

Ako smo u stacioniranom koordinatnom sustavu teško je pratiti objekt koji se rotira jer kako se brzina povećava raste i frekvencija izmjenične struje. Zbog toga AC struje stacioniranog sustava preslikavamo u rotirajući koordinatni sustav $d-q$ koji je sinkroniziran s magnetskim tokom rotora. Pretvorbu izvršavamo Parkovom transformacijom prema sljedećim izrazima (2.14 i 2.15) [26]:

$$i_d = i_\alpha \cos(\theta_d) + i_\beta \sin(\theta_d) \quad (2.14)$$

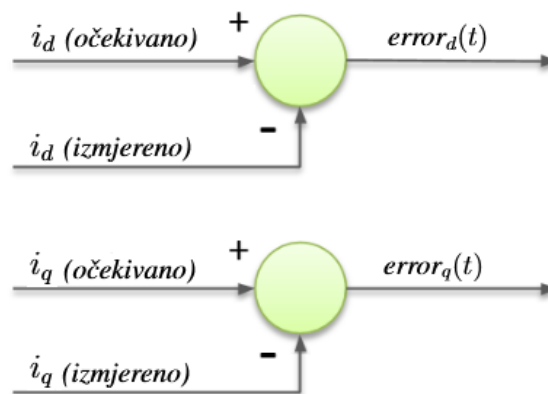
$$i_q = -i_\alpha \sin(\theta_d) + i_\beta \cos(\theta_d) \quad (2.15)$$

Parkovom transformacijom sinusoidne struje smo pretvorili u stacionarne DC vrijednosti. Struja i_d leži na d -osi koja predstavlja os magnetskog toka rotora, dok struja i_q leži na q -osi i okomita je na d -os. Kut θ_d je kut između stacioniranog i rotirajućeg koordinatnog sustava (slika 2.25). Podešavanjem struje i_d , da bude pozitivna ili negativna, možemo pojačati ili oslabiti učinak toka rotora. Dokle god EKM motor radi pri nor-



Slika 2.25: Ortogonalni rotirajući sustav dobiven Parkovom transformacijom

malnoj brzini obično struju i_d postavljamo na nulu jer u normalnim uvjetima magneti rotora proizvode dovoljan magnetski tok. Budući da je q -os u svakom trenutku okomita na os toka rotora, struja i_q koja leži na q -osi izravno je odgovorna za proizvodnju okretnog momenta motora.



Slika 2.26: Generiranje signala pogreške

Sada možemo generirati signale pogreške $error_d(t)$ i $error_q(t)$. To radimo oduzimanjem očekivanih i izmjerenih vrijednosti struja, posebno za struje d -osi i posebno za struje q -osi kako je prikazano na slici 2.26.

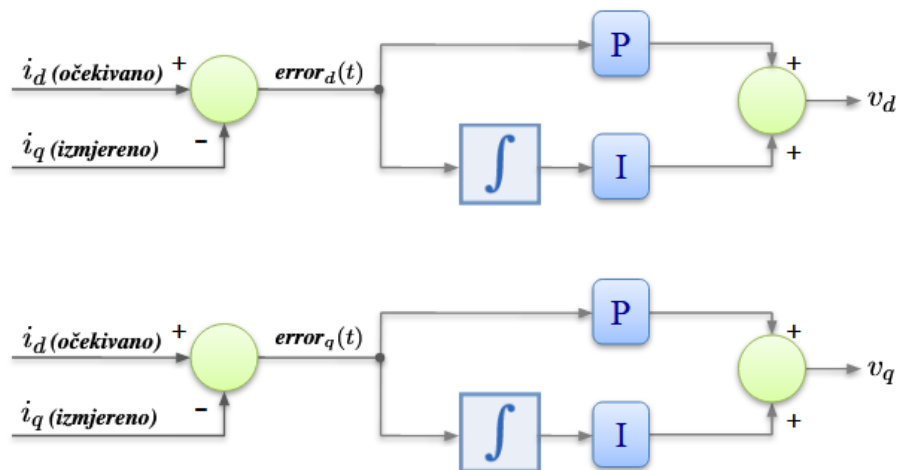
3. Pojačanje signala pogreške kako bi stvorili napon ispravljanja

U trećem koraku koristimo dva PI regulatora, jedan za d -osi i jedan za q -os, kako bi pojačali iznos signala pogreške (dijagram 2.27). PI regulator uzima signale trenutne

pogreške i pojačava radi stvaranja napona korekcije motora. Općenito, PI regulator ima proporcionalno (P), i integracijsko djelovanje (I). Proporcionalnim djelovanjem izlazna veličina regulatora postaje proporcionalna signalu pogreške. Integracijsko djelovanje predstavlja integraciju signala pogreške. To znači da se integracijskim djelovanjem vrijednost upravljačke veličine mijenja brzinom koja je proporcionalna pogrešci. Osnovni algoritam vođenja PI regulacije je sljedeći (2.16) [25]:

$$V_{PI} = K_C e(t) + \frac{K_C}{\tau} \int_0^t e(t) dt \quad (2.16)$$

gdje je K_C pojačanje regulatora, e pogreška i τ vrijeme integracije.



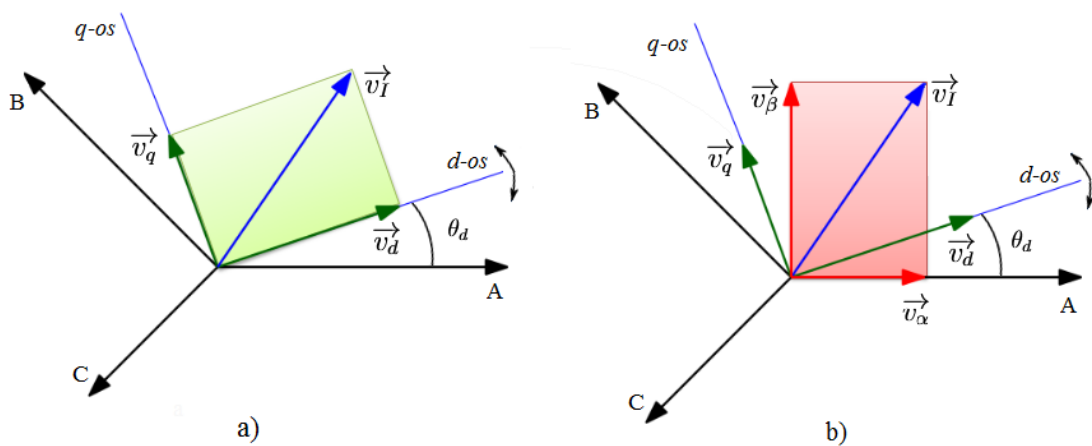
Slika 2.27: Blok dijagram PI regulatora za i_d i i_q struje EKM motora

4. Modulacija napona ispravljanja na priključcima motora

Kombinirajući dobivene napone ispravljanja v_d i v_q moramo dobiti vektor napona koji ćemo primijeniti na namote statora. Naponi v_d i v_q nalaze se u rotirajućem koordinatnom sustavu (slika 2.28 a)), a namoti statora su u stacionarnom koordinatnom sustavu. Da bi primijenili napon na namote statora moramo pretvoriti napone rotirajućeg sustava u ekvivalentne napone za stacionirani koordinatni sustav (slika 2.28 b)). Za to koristimo inverznu Parkovu transformaciju danu sljedećim jednadžbama (2.17 i 2.18) [26]:

$$v_\alpha = v_d \cos(\theta_d) - v_q \sin(\theta_d) \quad (2.17)$$

$$v_\beta = v_d \sin(\theta_d) + v_q \cos(\theta_d) \quad (2.18)$$



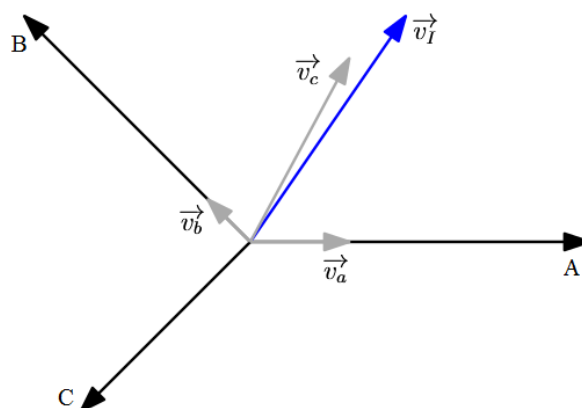
Slika 2.28: Prikaz vektora napajanja u: a) rotirajućem, b) stacioniranom koordinatnom sustavu

Budući da imamo trofazni motor, moramo pretvoriti dobivene vektore \vec{v}_α i \vec{v}_β u tri vektora napona: \vec{v}_a , \vec{v}_b i \vec{v}_c , čije vrijednosti primjenjujemo na tri namota statora. Zbog toga se vraćamo iz dvofaznog koordinatnog sustava u ekvivalentni trofazni koordinatni sustav (slika 2.29). Koristimo inverznu Clarkeovu transformaciju danu sljedećim matematičkim izrazima (2.19, 2.20 i 2.21) [26]:

$$v_a = \frac{2}{3}v_\alpha \quad (2.19)$$

$$v_b = -\frac{1}{3}v_\alpha + \frac{1}{\sqrt{3}}v_\beta \quad (2.20)$$

$$v_c = -\frac{1}{3}v_\alpha - \frac{1}{\sqrt{3}}v_\beta \quad (2.21)$$



Slika 2.29: Prikaz vektora faznih napona dobivenih inverznom Clarkeovom transformacijom

Dobiveni naponi se unose u učinski pretvarač koji koristi PWM algoritam za određivanje potrebne širine impulsa faznih napona statora i kontrolira tranzistore učinskog pretvarača. S vremenom, nakon primjene na namote, u stacionarnim uvjetima, ova tri napona će se pretvoriti u trofazne sinusne valove koji su fazno pomaknuti za 120° .

2.7. Primjena EKM motora

U početku su EKM motori uglavnom bili korišteni u visokokvalitetnim vojnim primjenama, ali razvoj obrade signala i mikroprocesora povećao je učinkovitost i dugotrajnost EKM motora, te su postali uobičajeniji u svakodnevnom životu. Pokazali su se dobrim u raznoj elektroničkoj opremi, osobito uređajima kao što su tvrdi diskovi računala i CD/DVD playeri, a koriste se i za pogon gramofonskih ploča. Mali ventilatori za hlađenje u elektroničkoj opremi napajaju se isključivo EKM motorima. Većina električnih bicikala koristi EKM motore koji se ugrađuju u glavinu kotača (*engl. hub motor*). Zbog male težine i visoke učinkovitosti ugrađuju se u trimere i kosilice za travu, motorne pile i bušilice. Uređaji za grijanje, ventilaciju i klima uređaji koriste EKM motore jer ugrađeni mikroprocesor omogućuje programabilnost, kontrolu nad protokom zraka i serijsku komunikaciju.

U servo pogonima alatnih strojeva EKM motori isto imaju važnu ulogu. Servomotori se koriste za mehaničko pomicanje, pozicioniranje ili preciznu kontrolu kretanja. Istosmjerni *stepper* motori se također mogu koristiti kao servomotori, ali s njima se upravlja otvorenom petljom (nema povratne informacije o poziciji rotora), što rezultira pulsiranjem okretnog momenta. EKM motori prikladniji su kao servomotori jer se njihovo precizno gibanje temelji na kontrolnom sustavu zatvorene petlje koji osigurava stabilan rad.

U novije vrijeme EKM motori postali su popularan izbor za električne modele letjelica, uključujući helikoptere i bespilotne letjelice (dronovi). Zbog velikog raspona dostupnih veličina potisnuli su upotrebu mehanički komutiranih motora. Niska buka i manja težina u usporedbi s malim motorima s unutarnjim sagorijevanjem još je jedan razlog njihove popularnosti. Tome su pridonijela i zakonska ograničenja za korištenje modela letjelica s unutarnjim izgaranjem u nekim zemljama, najčešće zbog zagađenja bukom.

Popularnost ovih motora velika je u području radio-upravljanih (RC) automobila. Legalni su u sjevernoameričkim RC utrkama u skladu s ROAR-om od 2006. godine. Upareni s odgovarajućim zupčanicima i Li-Po ili LiFePO₄ baterijama automobili mogu postići brzine preko 160 kilometara na sat. [27] Možemo zaključiti da se EKM motori mogu koristiti u bilo kojem području gdje se trenutno tradicionalni motori koriste kao potrošači od kojih se očekuje manja potrošnja energije, bolje performanse i manja buka.

3. Magnetostrikcija

1842. godine britanski fizičar James Prescott Joule otkrio je prvi magnetomehanički učinak, poznat kao Jouleov učinak ili longitudinalna magnetostrikcija - promjena dimenzija tijela načinjenih od feromagnetskih materijala pod utjecajem magnetskog polja. [28] J.P. Joule je zaključio da produljenje (pozitivna magnetostrikcija ili dilatacija) i skraćivanje (negativna magnetostrikcija ili kontrakcija) tijela ovisi o materijalu od kojeg je napravljeno. Smjer promjene duljine ne ovisi o smjeru magnetskog polja, a veličina promjene je funkcija jakosti magnetskog polja. Otkrio je i transversalnu magnetostrikciju, te zaključio da u longitudinalnom smjeru dolazi do dilatacije (širenje) ako se u transversalnom smjeru događa kontrakcija (skupljanje). Treći magnetomehanički učinak koji je otkrio je volumna magnetostrikcija - feromagnetska kugla u magnetskom polju pokazuje tendenciju smanjenja volumena i povećanja promjera u smjeru polja. U daljnjim istraživanjima magnetostrikcije svoj doprinos dali su njemački i talijanski fizičari - Gustav Wiedemann i Emilio Villari. Tako se pojava mehaničkog uvijanja (torzija) duge feromagnetske žice kroz koju protječe električna struja na mjestu djelovanja aksijalnog magnetskog polja naziva Wiedemannov efekt. Villari efekt nastaje kad feromagnetska tijela pri skupljanju i rastezanju mijenjaju magnetsku permeabilnost.

Pojava magnetostrikcije odgovorna je za zvuk kojega proizvode transformatori i drugi uređaji koji imaju željeznu jezgru i zavojnice. U zraku su zvučni valovi vrlo slabi jer postoji velika impedancijska neusklađenost između željeza i zraka. U vodi je usklađenost impedancije sa željezom puno bolja pa se pojava magnetostrikcije koristi u sonarima - elektroakustični uređaji za podvodno motrenje. Nastale periodičke oscilacije magnetskih materijala predstavljaju parazitski efekt za većinu električnih strojeva jer se teži smanjenju buke pri radu. Najveće smetnje se javljaju kod transformatora i uređaja za reprodukciju zvuka. Kod transformatora dolazi do pojave parazitskog efekta pri 120 Hz i to nazivamo električnim brujanjem. Zbog promjene magnetskog polja brujanje se javlja i kod zvučnika. Ako usporedimo rad zvučnika i elektromotora primijetit ćemo sličnosti. Struja u statoru generira magnetsko polje koje primjenjuje

silu na trajni magnet rotora elektromotora. Isto tako, bakrena zavojnica u zvučniku generira magnetsko polje koje primjenjuje silu na trajni magnet zvučnika. U elektromotoru sila rotira osovinu i mijenja se oblik željeza u armaturi, dok u zvučniku sila djeluje na zavojnicu i pričvršćenu membranu. Obje radnje proizvode vibracije koje mi doživljavamo kao zvuk. Zvučnik će dati visokokvalitetan zvuk jer ima membranu za usklađivanje akustične impedancije i time se poboljšava učinkovitost prijenosa energije u zraku. Elektromotor se može ponašati kao zvučnik, ali daje zvuk upitne kvalitete.

Primjer elektromotora kao zvučnika predstavio je kanadski pijanist i skladatelj Gordon Monahan u performansu „A Piano Listening To Itself”. Na klavir smješten na sredini trga i ispred kraljevskog dvorca u Varšavi spojio je šest dugih žica klavira koje se spuštaju s vrha dvorca. Na mjestu gdje su žice klavira pričvršćene na dvorcu zvučni signali ulaze u pojačalo i prenose se u žice klavira. Prijenos se odvija pomoću vibrirajućih zavojnica u malim elektromotorima pričvršćenim na te iste žice klavira. Žice klavira zbog magnetostrikcije pričvršćenih motora vibriraju u skladu sa zvučnim signalima i kroz zvučnu ploču klavira izlazi zvuk. Tako su motori, duge žice klavira i zvučna ploča postali zamjena za zvučni sustav. Prikaz i skica ovog zvučnog sustava je na slici 3.1.



Slika 3.1: Zvučni sustav „A Piano Listening To Itself” [29]

4. Implementacija

4.1. Opis opreme

Kao elektronički komutator istosmjernog EKM motora korišten je kontroler CMC420, proizvod tvrtke Cognito Elektronika. Za motor je odabran istosmjerni EKM *hub* motor marke EVBIKE, koji je namijenjen za električne bicikle ili preradu tradicionalnih bicikli u električne. Konstruirano je jednostavno pojačalo koje na ulazu dobiva zvučni signal, a izlaz pojačala se prosljeđuje kontroleru i reproducira na *hub* EKM motoru. Motor zbog pojave magnetostrikcije željezne jezgre i sila između statora i trajnih magnetna na rotoru ima ulogu zvučnika. Detaljan opis korištene opreme dan je u nastavku.

4.1.1. CMC420

CMC420 je niskonaponski kontroler za izmjenične i istosmjerne motore (slika 4.1). Namijenjen je prvenstveno za kontrolu gibanja u servo pogonima (aktuatori, solenoidi), a može se koristiti i za pomoćne sustave poput pumpi, kompresora ili pomoćnog osvjetljenja. Njegove prednosti dolaze do izražaja u primjenama gdje je važna ušteda prostora i visoka integracija u sustav. Kontrolerom je moguće pogoniti do četiri motora, od toga istovremeno do dva izmjenična ili istosmjerna motora snage do 600 W te dva istosmjerna motora snage do 150 W. Osnovni model izveden je na aluminijskoj podnici za prilagođeno hlađenje u sustavu u koji se ugrađuje.

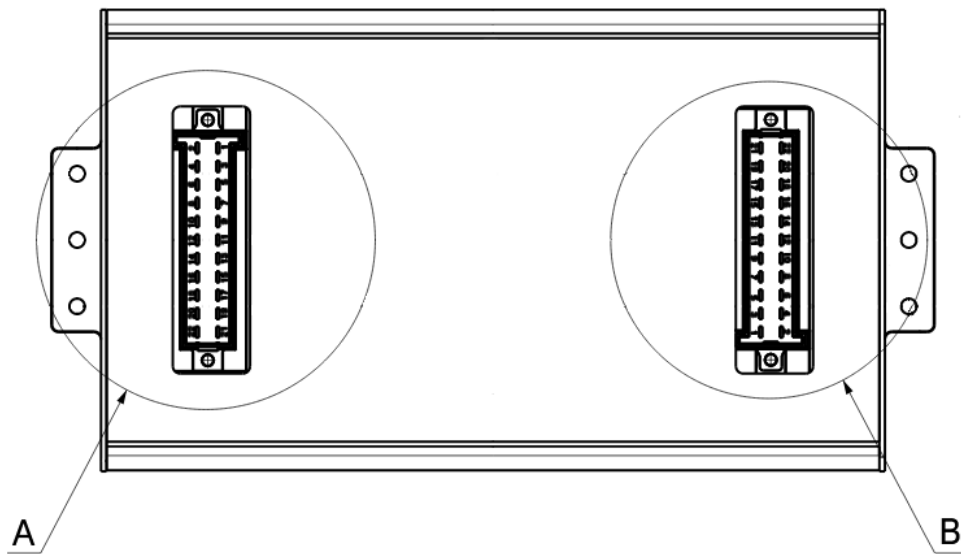


Slika 4.1: CMC420 [30]

Tablica 4.1: Tehničke značajke CMC420 kontrolera [30]

Napajanje	24-30 V
Struja	30 A kont.
Komunikacija	CAN
Napajanje logike	24-30 V
Ulazi, izlazi	6 analognih 2 digitalna
Senzor položaja	inkrementalni enkoder magnetski senzor (Hall)
Vrste motora	istosmjerni EKM motor mehanički komutirani motor sinkroni AC motor s trajnim magnetima indukcijski AC motor

CMC420 kontroler sadrži digitalni signalni procesor (DSP), sklopovlje za prekostrujnu zaštitu i učinske pretvarače, kako je prikazano na blok shemi kontrolera (slika 4.4). U tablici 4.1 prikazane su tehničke specifikacije kontrolera. Za komunikaciju se koristi CAN protokol, a ovisno o konfiguraciji moguća su do dva digitalna i do šest analognih ulaza i izlaza. Kontroler može primiti informacije o položaju rotora od inkrementalnog enkodera ili Hall sonde, a moguće je upravljati s različitim vrstama motora. Kontroler ima dvije (A i B) strane od kojih svaka ima po 22 pina (slika 4.2 i slika 4.3). U ovom radu na A stranu kontrolera spojene su faze motora i signali Hallovih sondi, dok je B strana korištena za zvučno pojačalo. Raspored pinova A i B strane dan je na slici 4.3.

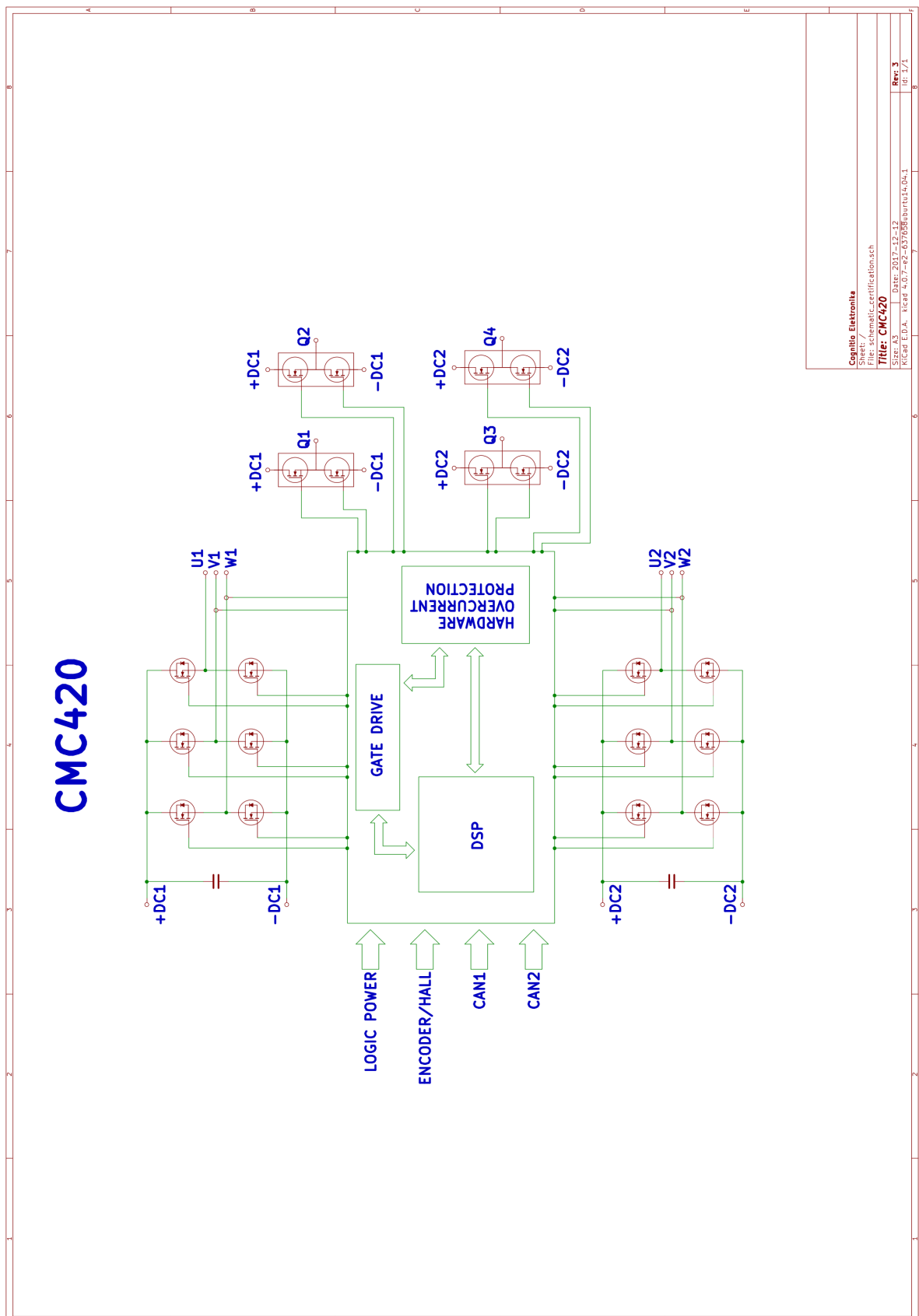


Slika 4.2: CMC420: A i B strana kontrolera [30]

A - 22 PIN		PIN	Signal name	B - 22 PIN		PIN	Signal name
	1	PH3		1	PH6		
	2	Q2		2	Q4		
	3	RAI1/HALL		3	RAI6/HALL		
	4	AI1		4	AI3		
	5	RAI2/HALL		5	RAI5/HALL		
	6	AI2		6	AI4		
	7	RAI3/HALL		7	RAI4/HALL		
	8	12/5V		8	12/5V		
	9	DCB-		9	DCB-		
	10	DCB-		10	DCB-		
	11	PH2		11	PH5		
	12	RAI7		12	AI6		
	13	DCB+		13	DCB+		
	14	DCB+		14	DCB+		
	15	AI5		15	TDI1		
	16	LPWR		16	LPWR		
	17	CANL01		17	CANL02		
	18	APWR1		18	APWR2		
	19	CANHI1		19	CANHI2		
	20	GND		20	GND		
	21	PH1		21	PH4		
	22	Q1		22	Q3		

Slika 4.3: CMC420: raspored pinova [30]

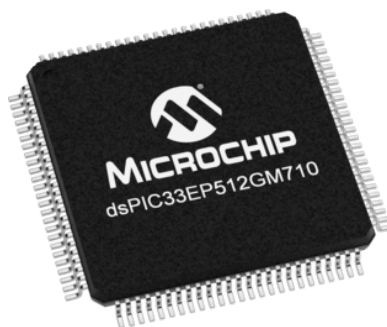
4.1.1.1. Blok shema kontrolera



Slika 4.4: Blok Shema CMC420 [30]

4.1.1.2. Digitalni signalni procesor

CMC420 kontroler sadrži digitalni signalni procesor (DSP). Općenito, digitalni signalni procesori su specijalizirani mikroprocesori s arhitekturom optimiziranom za brze operacije potrebne pri digitalnoj obradi signala. Obrađuju podatke u stvarnom vremenu pa su odličan izbor za aplikacije koje ne trpe kašnjenje. U ovom radu DSP obrađuje zahtjevne matematičke proračune vektorskog upravljanja EKM motorom. Ulazi u DSP su signali položaja rotora koji se zbog visokih performansi odabranog mikroprocesora uspješno obrađuju na najbrži mogući način.



Slika 4.5: Mikroprocesor dsPIC33EP512GM710 [31]

dsPIC33EP512GM710 je digitalni signalni procesor iz familije dsPIC33E *Microchip Technology* proizvođača. Familija dsPIC33E mikroprocesora omogućuje dizajn visokoučinkovitih, preciznih sustava upravljanja motorom koji su energetski učinkoviti, tiši u radu, imaju veliki raspon i produljen vijek trajanja. Mogu se koristiti za kontrolu EKM motora, mehanički komutiranih motora, sinkronih AC motora s trajnim magnetima, indukcijskih AC motora i *stepper* motora. Na slici 4.5 prikazan je dsPIC33EP512GM710 mikroprocesor. Tablica 4.2 sadrži njegove tehničke značajke. Uređaj se temelji na dsPIC jezgri Harvardske arhitekture, To je 16-bitni procesor, omogućuje učinkovito kodiranje (C i assembler) i podršku za 32-bitne operacije množenja. Ima tipičan radni napon od 3.3 V. Minimalni radni napon je 3 V, a maksimalni 3.6 V. Programska memorija (*engl. flash*) iznosi 512 KB, a statička radna memorija (SRAM) iznosi 48 KB. Ima maksimalnu brzinu takta od 70 MHz. Radno temperaturno područje iznosi od -40°C do 85°C na 70 MHz, dok se pri 60 MHz gornja granica temperature povećava na $+150^{\circ}\text{C}$. Sadrži dva nezavisna analogno-digitalna pretvarača (ADP) koji mogu biti 10-bitne rezolucije (1.1 Msps) koristeći četiri S&H sklopa ili 12-bitne rezolucije (500 ksps) uz jedan S&H sklop. Moguće je koristiti do 5 komparatora ili operacijskih pojačala izravno povezanih s ADP sklopom i do šest PWM generatora (12 PWM izlaza). Periferijski sklopovi uključuju 21 brojilo opće namjene od kojih je devet 16-bitnih i četiri 32-bitna, a dva brojala su dio periferijskog generatora okidanja

(PTG) koji je sposoban generirati niz složenih signala okidanja za koordinaciju rada drugih perifernih sklopova. Također, postoje dva sučelja za inkrementalne enkodere (QEI) koja se mogu podesiti kao 32-bitna brojila. Ugrađena su dva CAN modula (1 Mbps) s CAN 2.0B podrškom. Izravan pristup glavnoj memoriji (DMA) omogućen je za četiri kanala istovremeno, a podržava UART, SPI, ADP i ulazne signale, te usporedbe izlaza i brojila. [31]

Tablica 4.2: Tehničke značajke dsPIC33EP512GM310 mikroprocesora [31]

Arhitektura	16-bitna
Max. brzina procesora	70 MHz
Programska memorija	512 KB
RAM	48 KB
DMA	4
Radna temperatura	-40°C - 150°C
Napajanje	3 - 3.6 V
Broj pinova	100
Komparatori	5
Brojila	21
Analogna periferija	2 ADP i 2 DAP
PWM izlazi	12
UART	4
SPI	3
CAN	2
I2C	2

4.1.2. EKM motor

Odabran je EKM *hub* (engl. *hub* = hrv. glavina) motor za električni bicikl, koji je namontiran direktno u kotač kao glavina. Obično je stražnji kotač bolje mjesto za postavljanje motora zbog četiri šipke koje se spajaju s ostatkom okvira, umjesto samo dvije koje se nalaze naprijed. *Hub* motori imaju direktan prijenos energije na sam kotač i samim time vrlo visoku učinkovitost. Općenito imaju veći okretni moment od središnjih motora (engl. *mid-drive*) za bicikle. Zatvorenog su dizajna što ih čini otporne na vodu i nepovoljne vremenske uvjete. Ne pružaju nikakav otpor dok se ne koriste (engl. *freewheel*), već funkcioniraju poput tradicionalne glavine kotača (povezuje obod na osovinu). Također, u slučaju kvara vrlo ih je lako zamijeniti jer su vezani samo za kotač motora, dok su središnji motori montirani na ili blizu dna nosača (točka u kojoj se ručice pričvršćuju kroz okvir za pedaliranje) i pružaju otpor kada se ne koriste. Jedna od negativnih strana *hub* motora je dodavanje još veće težine na kotač i potreba za dodatnim žicama za električnu energiju. Pri većem opterećenju kotača može doći do pucanja žbica, pa proizvođači moraju definirati maksimalno opterećenje kotača.



Slika 4.6: EKM *hub* motor

Na slici 4.6 prikazan je EKM *hub* motor marke *EVBIKE* proizvođača *GWL POWER*. Motor se prodaje kao dio seta za pretvorbu tradicionalnih bicikala u električne. U set su još uključeni baterija, LCD zaslon i kontroler koji nisu korišteni u ovom radu. Motor je odabran jer ga je moguće upravljati s bilo kojim drugim kontrolerom bez obzira na to što mu je već namijenjen kontroler u setu za pretvorbu. Uz to, omjer cijene (cca.

250 \$) i tehničkih značajki je vrlo dobar. Tehničke značajke motora dane su tablicom 4.3.

Tablica 4.3: Tehničke značajke *EVBIKE hub* motora [32]

Napon	36/48 V
Ulazna struja	22 A
Struja kont.	11 A
Snaga	500/750 W
Brzina	25 km/h
Težina	6.62 kg
Promjer statora	205 mm
Promjer kotača	28"
Max. opterećenje	70 kg

Uz napon od 36 V motor razvija snagu do 500 W, dok povećanjem napona do 48 V snaga motora može rasti do 750 W. Najveća ulazna struja iznosi 22 A, dok je kontinuirana struja motora 11 A. Motor može razviti brzinu od 25 km/h, a stvarna brzina može biti veća i ovisi o snazi motora, promjeru kotača, težini biciklista i uvjetima vožnje. Maksimalno opterećenje kotača iznosi 70 kg, dok ukupno opterećenje bicikla iznosi 120 kg, što uključuje težinu vozača, samog bicikla i EVBIKE seta. Podaci o okretnom momentu motora nisu poznati jer tehnička dokumentacija opisuje motor kao dio seta za pretvorbu i ne daje detaljne informacije o karakteristikama motora.

Uz poznate podatke brzine, promjera kotača i opterećenja bicikla možemo procijeniti okretni moment motora. Pretpostavimo da motor postiže brzinu od 25 km/h za 10 sekundi, a prema formuli 4.1 ubrzanje motora iznosi:

$$a = \frac{dv}{dt} = 25 \frac{km}{h} * \frac{1000}{3600} * \frac{1}{10s} = 0.694 \frac{m}{s^2} \quad (4.1)$$

Uz pretpostavku da opterećenje bicikla neće prijeći dozvoljenih 120 kg, iz Newtonovog zakona gibanja (4.2) slijedi:

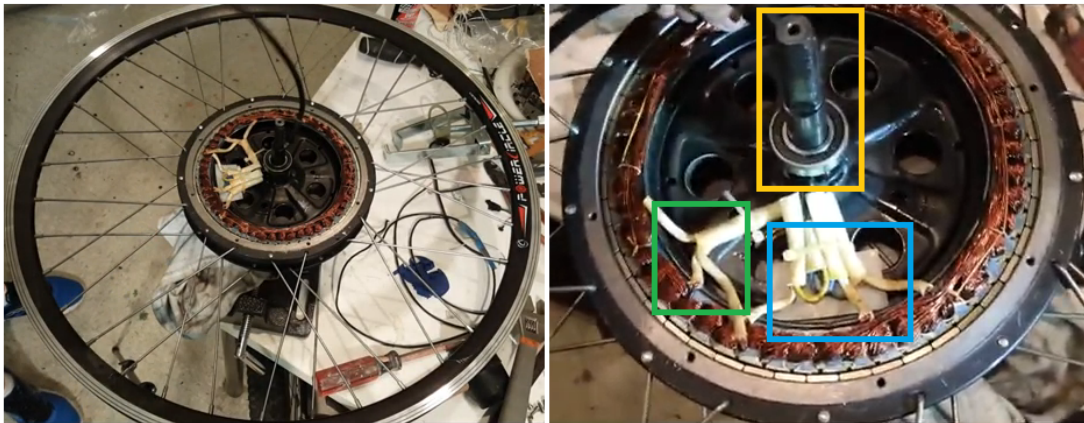
$$F = m * a = 120kg * 0.694 \frac{m}{s^2} = 83.3N \quad (4.2)$$

Iz dobivene sile F i promjera kotača bicikla r možemo izračunati okretni moment M na središtu kotača (4.3):

$$M = r * F = 28'' * 0.0254 * 83.3N = 0.7712m * 83.3N = 64.3Nm \quad (4.3)$$

4.1.2.1. Unutrašnjost motora

Motor je trofazni i koristi tri Hallove sonde za određivanje položaja rotora, postavljene s faznim pomakom od 120° . Stator motora je izveden kao stator s utorima, dok su trajni magneti pravokutnog oblika ugrađeni u kružnu jezgru rotora.



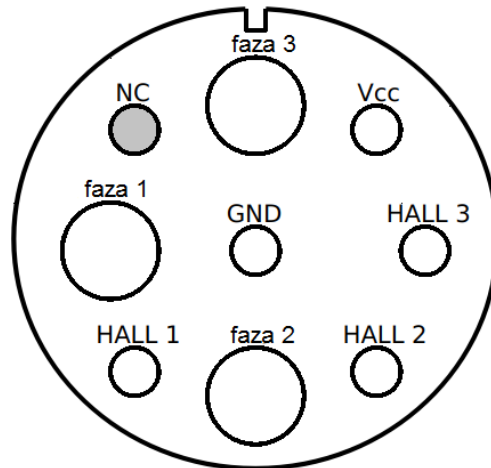
Slika 4.7: Unutrašnjost EKM hub motora



Slika 4.8: Konektor hub motora [32]

Na slici 4.7 prikazana je unutrašnjost korištenog EKM hub motora. U zelenom pravo-

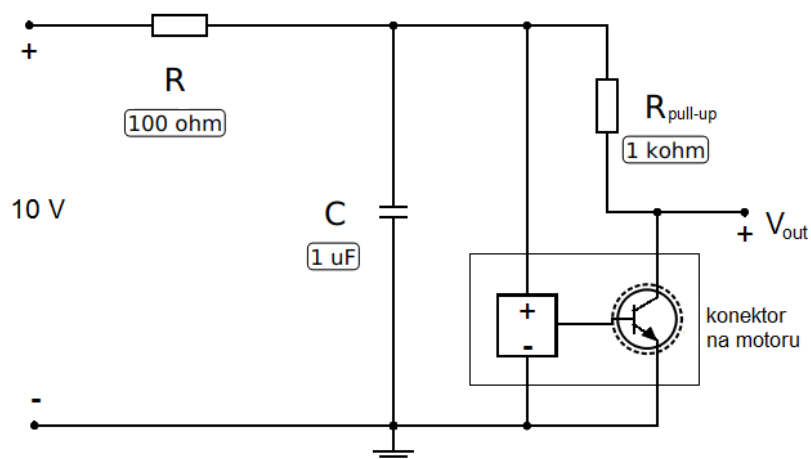
kutniku na slici označene su žice faznih struja, a u plavom pravokutniku žice Hallovih sondi. Žuti pravokutnik označava osovinu motora na koju se priključuje konektor *hub* motora. Konektor fizički povezuje ulazni napon i Hallove sonde motora s A stranom CMC420 kontrolera. Slika 4.8 prikazuje *hub* konektor, a raspored pinova na konektoru prikazan je na slici 4.9.



Slika 4.9: Konektor *hub* motora: raspored pinova (*top view*)

4.1.2.2. Testiranje Hallovih sondi

Napravljen je test Hallovih sondi pomoću jednostavnog strujnog kruga prikazanog na slici 4.10. Za napajanje Hallovih sondi korišten je analogni model napajanja od 10 V na CMC420 kontroleru. Na ulazu strujnog kruga nalazi se otpor R od 100 Ω , pa po Ohmovom zakonu u krug ulazi struja od 10 mA.



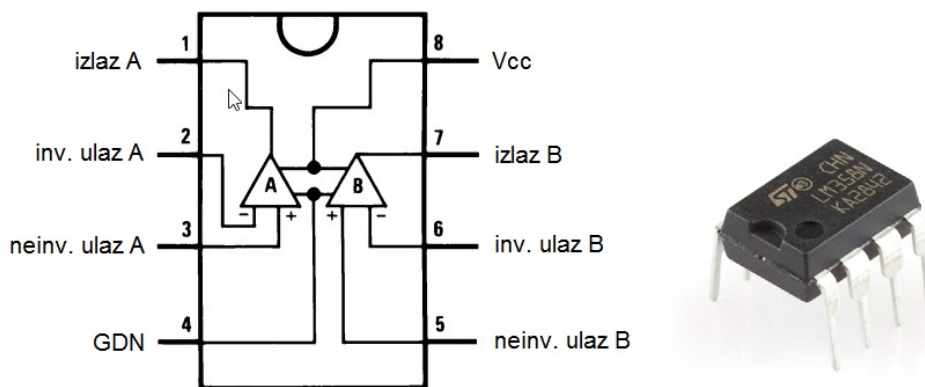
Slika 4.10: Strujni krug za testiranje Hallovih sondi

Uz pomoć multimetra mjereni su maksimalni naponi na Hallovim sondama. Crna

proba multimetra mora imati kontakt s uzemljenjem na *hub* konektoru, dok se crvena proba multimetra naizmjenice dovodi u kontakt s tri žice Hallovih sonde na konektoru. Istovremeno rukom, lagano, okrećemo kotač u suprotnom smjeru. Maksimalan napon koji na multimetru naizmjenice pokazuju Hallove sonde iznosio je približno 10 V, što znači da postavljene sonde pravilno reagiraju na promjenu pozicije magneta rotora. U bilo kojem trenutku zaustavljanja kotača na multimetru smo mogli dobiti napone od približno 10 V na dvije Hallove sonde, dok bi treća bila u nuli. To pokazuje da struja pravilno teče fazama. Prema dostupnim Hallovim sondama, od dobavljača kao što su *Digy-key* i *Mouser*, može se zaključiti da su u motoru montirane Hallove sonde SS400 serije, koje mogu imati napajanje od 3.8 V do 30 V, maksimalnu ulaznu struju do 10 mA i temperaturno radno područje između -40°C i 150°C . [37]

4.1.3. Zvučno pojačalo

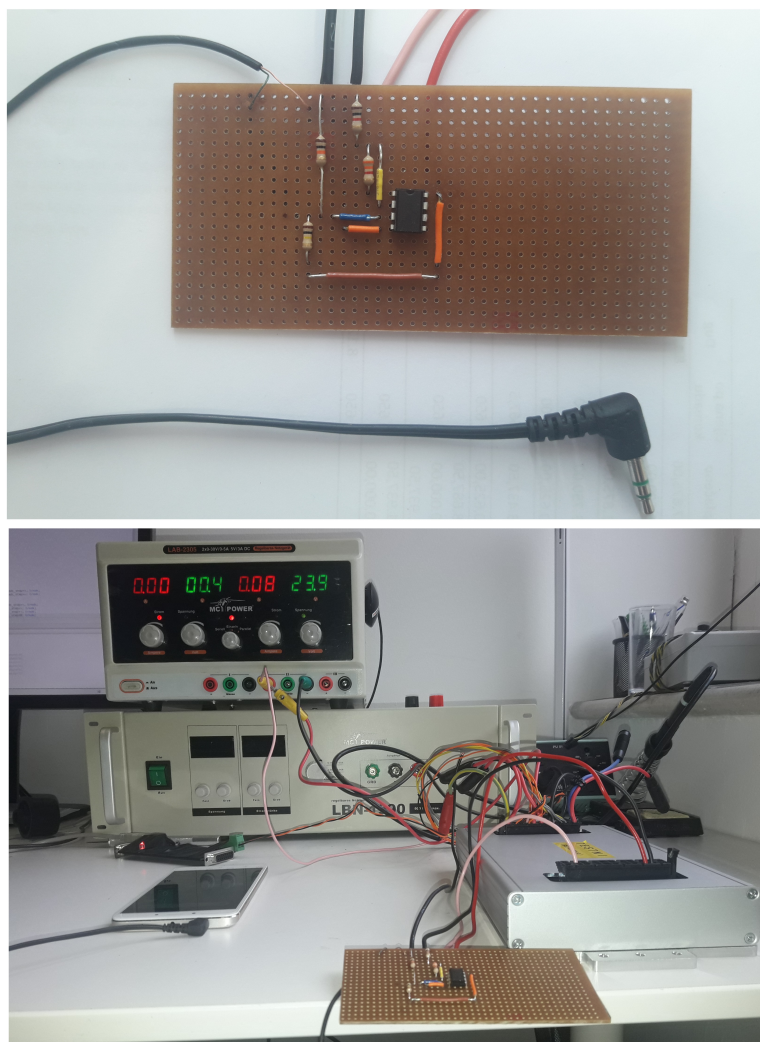
Operacijsko pojačalo je elektronički sklop ili integrirana elektronička komponenta koja ima mogućnost pojačanja izmjeničnog ili istosmjernog napona diferencijalnim ulazom, jednim izlazom i naponskim pojačanjem kontroliranim negativnom povratnom vezom. Kod suvremenih operacijskih pojačala, električni otpor na ulazu može se smatrati beskonačnim, dok je izlazni električni otpor zanemarivo mali.



Slika 4.11: LM358: raspored pinova i vanjski izgled [33]

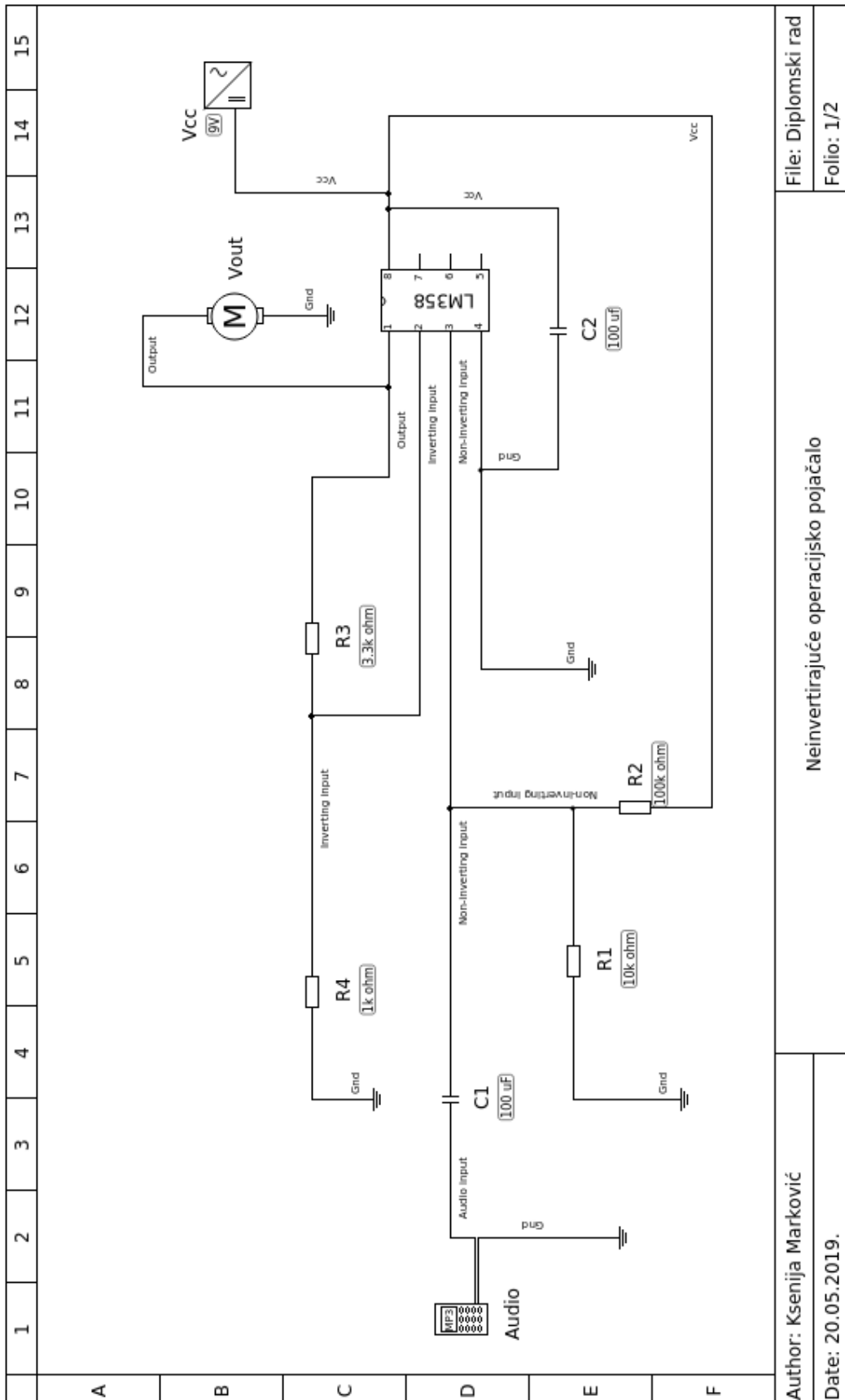
U ovom radu, kontroler motora (na B strani) kao ulazni signal prima izlaz iz zvučnog pojačala čija je shema prikazana na slici 4.13. Za glavnu komponentu zvučnog pojačala odabrano je operacijsko pojačalo niske potrošnje - LM358. Kratica LM358 označava 8-pinski integrirani krug (sklop), koji se zapravo sastoji od dva operacijska pojačala male snage sa zajedničkim napajanjem, kako je prikazano na slici 4.11. Za potrebe ovog zvučnog pojačala korišteno je samo A operacijsko pojačalo LM358 sklopa. A operacijsko pojačalo na neinvertirajućem ulazu prima signal iz mobitela. Za fizičko

spajanje mobitela i neinvertirajućeg ulaza iskoristene su žice slušalica za mobitel. U mobitelu je korišten utor za slušalice, a s druge strane oklop žice slušalica je rastvoren, negativna žica je uzemljena, a pozitivna spojena na neinvertirajući ulaz A pojačala. Napajanje pojačala V_{cc} iznosi 9V. Napon na izlazu V_{out} varira za $\pm 3V$ oko centralne točke V_{centar} koja iznosi 3.5 V. Zvučno pojačalo ima pojačanje od 4.3, odnosno 12.7 decibela. Kako bi se postiglo željeno pojačanje korišteni su odgovarajući otpori iznosa prikazanih na shemi zvučnog pojačala 4.13. Uz to postavljeni su kondenzatori od $100 \mu F$ na neinvertirajućem ulazu (za prilagodbu ulaznog signala) i između napajanja i uzemljenja pojačala (za suzbijanje šuma). Prototip pojačala prikazan je na slici 4.12. Umjesto klasičnih kondenzatora korišteni su SMT (engl. *Surface-mount technology*) kondenzatori, koji su zalemljeni s druge strane pojačala i ne vide se na slici. Shema 4.14 prikazuje spajanje zvučnog pojačala s kontrolerom motora i samim motorom.



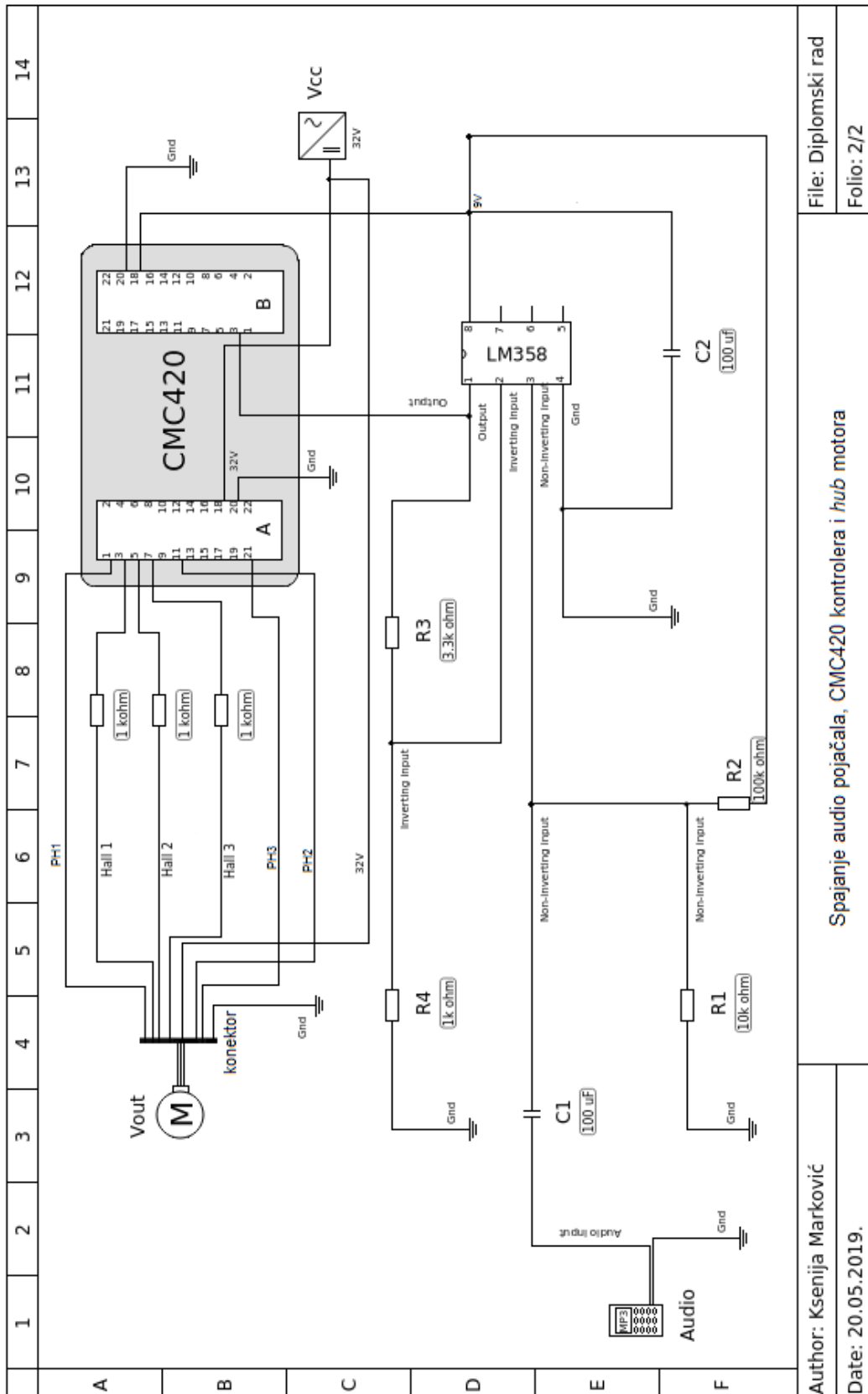
Slika 4.12: Prototip zvučnog pojačala

4.1.3.1. Shema zvučnog pojačala



Slika 4.13: Shema zvučnog pojačala

4.2. Shema spajanja pojačala, kontrolera i motora



File: Diplomski rad

Folio: 2/2

Spajanje audio pojačala, CMC420 kontrolera i hub motora

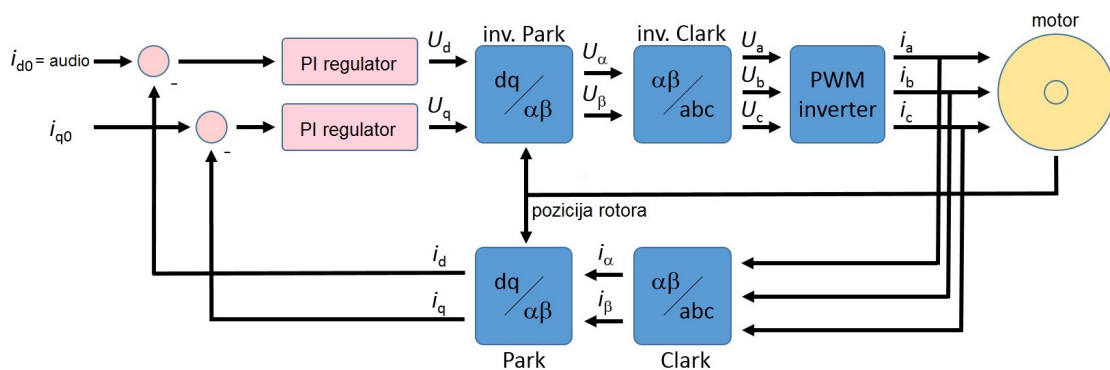
Author: Ksenija Marković

Date: 20.05.2019.

Slika 4.14: Shema spajanja pojačala, kontrolera i motora

4.3. Upravljački algoritam

U radu je korišten algoritam vektorskog upravljanja razvijen od strane Cognitio Elektronika d.o.o. Zadatak diplomskog rada je modificirati taj algoritam kako bi EKM motor reproducirao zvuk. Modifikacija se odnosi na određivanje pozicije rotora motora uz pomoć Hallovih sondi i pripreme signala, koji kontroler CMC420 prima od zvučnog pojačala, za reprodukciju. Na slici 4.15 prikazan je dijagram vektorskog upravljanja.



Slika 4.15: Dijagram vektorskog upravljanja

Ulaz PI regulatora za istosmjernu struju i_{d0} obično se postavlja u nulu. Time se povećava učinkovitost proizvodnje okretnog momenta sustava jer samo kvadraturna struja i_{q0} proizvodi koristan okretni moment. U našem slučaju struja i_{d0} nije postavljena u nulu, već se ulazu u regulator istosmjerne struje prosljeđuje zvučni signal (*audio*) sa izlaza pojačala, kako je prikazano sljedećim isječkom koda:

```
// reset PI loop for d
volatile int audio = 0;
focp->pi_d.reference = audio;
focp->pi_d.feedback = iqd.Id; //feedback signal
pi_loop(&focp->pi_d); //calling PI regulator
```

Drugi PI regulator obrađuje struju kvadrature struje i_{q0} i uzima željeni okretni moment kao ulaz:

```
// run PI loop for q
focp->pi_q.reference = foc_mota1.torque_ref;
focp->pi_q.feedback = iqd.Iq;
pi_loop(&focp->pi_q);
```


Kod analogno digitalne pretvorbe zvučnog signala potrebno je u algoritmu ispravno postaviti gornju i donju granicu primljenog signala. Granice moraju odgovarati najvećem i najmanjem mogućem izlaznom naponu konstruiranog zvučnog pojačala:

```

audio = ADC1BUF0;           //DSP reading
ai_b10v_1 = audio;        //input to CMC420
audio = 316 - audio;
audio = audio << 5;
if (audio > 4000) audio = 4000;
else if (audio < -4000) audio = -4000;

```

Ulaskom u prekidnu rutinu najprije se mora odrediti pozicija rotora da bi se Clark i Parkovim transformacijama mogle izračunati ispravne vrijednosti struja i napona faza. Sljedeći kod prikazuje postavljanje Hallovih sondi za izračun kuta rotora i poziv Clark i Park transformacija. Najprije se ispituju sve moguće pozicije od kojih rotor može krenuti jer je potrebno naći optimalnu startnu poziciju:

```

// possible starting position
unsigned hall_to_ndx[48] = {
    0, 1, 5, 6, 3, 2, 4, 0,
    0, 2, 6, 1, 4, 3, 5, 0,
    0, 3, 1, 2, 5, 4, 6, 0,
    0, 4, 2, 3, 6, 5, 1, 0,
    0, 5, 3, 4, 1, 6, 2, 0,
    0, 6, 4, 5, 2, 1, 3, 0 };

// possible rotating direction
int ndx_to_angle[16] = {
    -1, 0, 85, 171, 256, 341, 427, -1,
    -1, 427, 341, 256, 171, 85, 0, -1 };

// binary HALL to decimal number(index)
unsigned hall = 0;
volatile int angle_out;
volatile unsigned index = 0;
    hall = (HALL1<<2) | (HALL2<<1) | (HALL3);
    index = hall_to_ndx[hall+(hall_to_ndx_select<<3)];
    angle_out = ndx_to_angle[index+(hall_dir_select<<3)];
    focp->rotor_angle = angle_out;

```

```
// look up sin and cos theta
unsigned rotor_angle;
    theta.sin = sintab[focp->rotor_angle];
    theta.cos = sintab[focp->rotor_angle + 128];

// do park and clarke transforms
    clarke_park();
```

Kratko vrijeme nakon izlaska iz prekidne rutine, program ulazi u novu prekidnu rutinu. Do tog trenutka rotor se pomaknuo i promijenio se kut magnetskog toka rotora. Očitava se novi kut i ponovno izračunavaju željene vrijednosti. Proces se ponavlja dokle god napajamo motor.

Pri pokretanju sustava unosi se željeni okretni moment (q), i način određivanja pozicije rotora (uhs):

```
if (!strcmp(command, "q")) {
    foc_mota1.torque_ref = v[1];
    can_printf(channel, "MOTA1_torque=%d\r\n", v[1]);
}
else if (!strcmp(command, "uhs")) {
    if ((v[1] >= 0) && (v[1] <= 1)) {
        use_halls = v[1];
        can_printf(channel, "use_halls=%d\r\n", v[1]);
    }
}
```

U sljedećem poglavlju prikazana je usporedba postignutih razina zvuka s Hallovim sondama i *sensorless* metodom za određivanje pozicije rotora. Algoritam *sensorless* metode u potpunosti je razvila tvrtka Cognitio Elektronika d.o.o. i kod algoritma nije prikazan u ovom radu.

5. Rezultati

Rezultati rada snimljeni su pomoću opreme opisane u nastavku i prikazani u mjernoj jedinici decibela. Kako linearna mjerenja razine zvučnog tlaka ne odražavaju čovjekovu percepciju zvuka, stvorene su različite skale da se dobije mjerenje razine zvuka koje uzima u obzir kako ljudsko uho zapravo doživljava zvuk. Najčešće se koristi A skala koja simulira rad ljudskog uha, odnosno reagira na zvučni podražaj slično kao i ljudsko uho. To znači da daje veći značaj tonovima viših frekvencija koji su štetniji za čovjeka, a manji značaj tonovima nižih frekvencija koje su manje štetne za čovjeka. Zato su rezultati ovog rada prikazani u A skali (dBA).

5.1. Mjerna oprema

Za snimanje zvuka korišten je *Behringer ECM8000* kondenzatorski mikrofona (slika 5.1). Kod kondenzatorskih mikrofona membrana predstavlja jednu ploču kondenzatora. Pomicanjem membrane mijenja se kapacitivnost kondenzatora i ta promjena se u samom mikrofona pretvara u električni signal. Za napajanje takve vrste mikrofona potreban je poseban sistem napajanja poznat kao fantomsko napajanje. Fantomsko napajanje koristi posebne provodnike, tako da ga mikrofoni kojima nije potrebno to napajanje, npr. dinamički mikrofona, ne vide. Dakle, na isti mikrofonski ulaz mogu se priključiti sve vrste mikrofona, kondenzatorski mikrofoni će koristiti napajanje, a za ostale će ono biti fantomsko.

Za potrebe snimanja mikrofona je postavljen na udaljenosti 1 metar od osovine motora. Mikrofona koristi trajno polarizirane elektret materijale (kondenzator elektreta) i ima kružnu karakteristiku zračenja, tj. jednako je osjetljiv za sve smjerove izvora zvuka u odnosu na svoju poziciju (omnidirekcijska karakteristika zračenja). Rezultat toga je linearan frekvencijski odziv od 15 Hz do 20 kHz i visoka razlučivost zvuka. Impedancija mikrofona iznosi 600 ohma, osjetljivost je -60 dB (1 mV/Pa) i teži svega 130 grama. Mikrofona zahtijeva +15 V ili +48 V fantomsko napajanje. Opremljen je niskotemperaturnim FET ulazom koji uklanja niskofrekvencijska izobličenja i 3-pinskim zlatnim

XLR konektorom koji omogućava visok integritet signala. [34]



Slika 5.1: Berhinger ECM8000 mikrofon [34]

Kao zvučno sučelje korištena je vanjska zvučna kartica *Focusrite Scarlett 2i2* (slika 5.2) na koju se spaja mikrofon (XLR konektor). Glavni dijelovi zvučne kartice su A/D pretvarač, D/A pretvarač i predpojačalo za ulazni i izlazni signal. Osnovna ideja A/D pretvorbe je pretvaranje analognog, kontinuiranog signala na ulazu kartice u bitove koje je moguće pohraniti u računalu, da bi ih se potom moglo obraditi i modificirati raznim algoritmima, sažeti npr. u MP3 format. Zadaća D/A pretvorbe je konstruiranje što bolje verzije izvornog signala u bitovima u zvuk, kako bi se isti mogao pojačati i reproducirati pomoću zvučnika ili slušalica.



Slika 5.2: Vanjska zvučna kartica *Focusrite Scarlett 2i2* [35]

Focusrite Scarlett 2i2 se napaja preko USB-a i ima fantomsko napajanje +48 V za mikrofon. Mikrofonski ulaz zvučne kartice ima: frekvencijski odziv od 20 Hz do 20 kHz $\pm 0,1$ dB, dinamički raspon 106 dBA, harmoničko izobličenje + šum manje od 0.002 % i šum koji predpojačalo mikrofona unosi u signal mikrofona - EIN (engl. *Equivalent*

Input Noise) od -128 dBA. [35]

Kalibrator na slici 5.3 predstavlja uređaj koji koristimo za umjeravanje razine zvuka kako bi mogli snimiti zvuk precizne frekvencije i razine koja odgovara onome što čuje ljudsko uho. Korišteni kalibrator zvuka proizvodi nivoe od 94 dB i 114 dB na frekvenciji od 1000 Hz (s točnošću od ± 0.3 dB), uz pomoć stabilnog oscilatora koji pobuđuje vibracije piezoelektričnog elementa i uz metalnu dijafragmu koja svojim osciliranjem stvara zvučno polje. [36] Mikrofon se postavlja u otvor na kalibratoru, zatim se kalibrator uključuje i namješta se fantomsko napajanje na zvučnoj kartici. Program kojim se snima zvuk (*Audacity*) određuje *offset* na temelju najveće razine zvuka koju mikrofon trenutno čuje (izmjereno je -11.9 dB, teoretski to može biti najviše 0 dB) i željene skale koja će predstavljati najveću moguću razinu zvuka (94 dB -A skala). *Offset* iznosi 105.9 dB, a najveća moguća razina zvuka koja se sada može prikazati je 94 dBA.

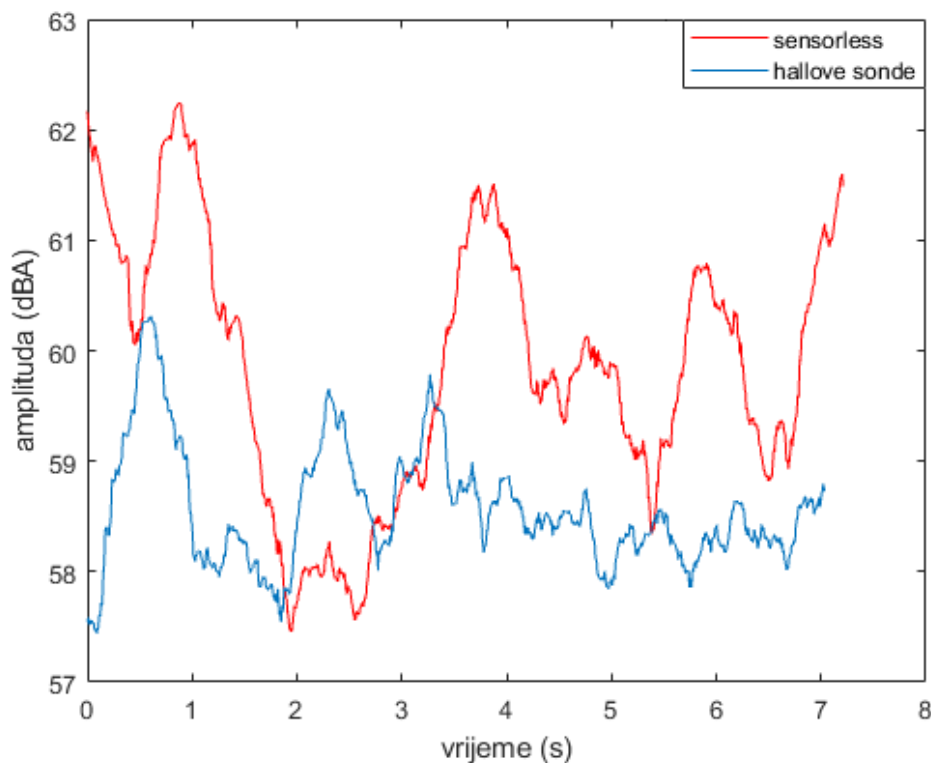


Slika 5.3: Kalibrator razine zvuka [36]

5.2. Analiza

Osim navedene opreme za snimanje zvuka korišten je i programski alat *Audacity* koji služi za snimanje zvuka. Pri pretvorbi analognog signala u digitalni u programu je odabrana frekvencija uzrokovanja od 44100 Hz. Za ispitivanje razine zvuka korišten je generator frekvencija *Axio AX-DG105* koji može generirati frekvencije od 1 Hz do 22 kHz. Dobivene razine zvuka prikazane su u MATLAB okruženju. Ispitane su frekvencije od 500, 700, 909 i 1000 Hz, gdje 909 Hz predstavlja rezonantnu frekvenciju. Frekvencije se puštaju 8 do 9 sekundi i promatra se prisutno variranje amplitude tijekom vremena. Za svaku frekvenciju napravljena je usporedba postignute razine zvuka kada se za određivanje pozicije rotora koriste Hallove sonde i kada se koristi *sensorless* metoda određivanja pozicije rotora. Za vrijeme ispitivanja motoru je zadan okretni moment od 70 Nm. Grafovi prikazuju amplitudu (dBA) u ovisnosti o vremenu (s).

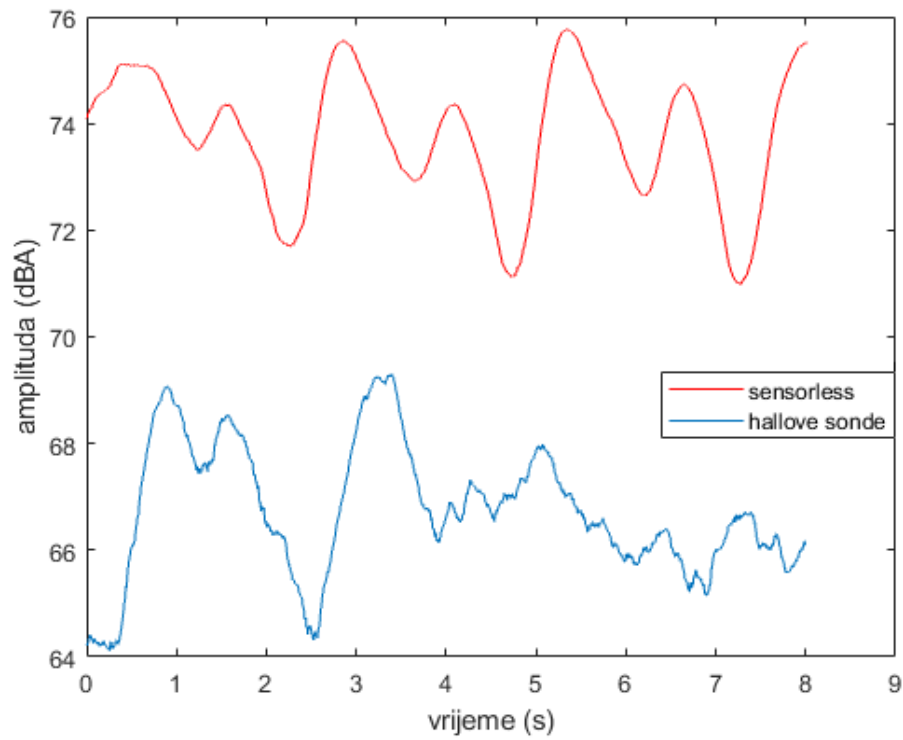
Slika 5.4 prikazuje razine zvuka koje čujemo ako motor dulje vrijeme generira frekvenciju od 500 Hz. Iz slike se vidi prisutnost značajnog šuma i nepravilno variranje amplitude zvuka za obje metode. Glavni izvor šuma je "prebacivanje" struje u fazama motora tijekom rada. Upotrebom Hallovi sonde za određivanje pozicije rotora najveća razina zvuka koju čujemo iznosi 60.3 dBA. *Sensorless* metodom postiže se najveća razina od 62.2 dBA.



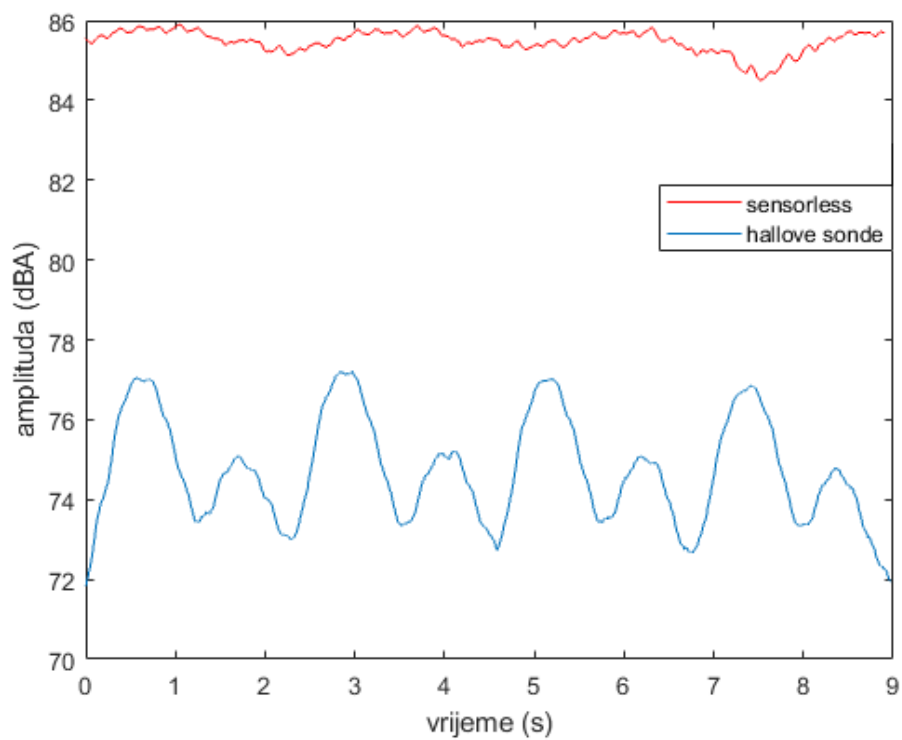
Slika 5.4: Razina zvuka (dBA) frekvencije 500 Hz

Slika 5.5 prikazuje razine zvuka koje čujemo ako motor dulje vrijeme generira frekvenciju od 700 Hz. *Sensorless* metoda daje vrlo čist zvuk pravilnijeg valnog oblika, najveća razine 75.8 dBA. Upotrebom Hallovih sonde i dalje je prisutan šum, ali u manjoj mjeri u odnosu na frekvenciju od 500 Hz. Najveća razina zvuka koju u tom slučaju čujemo je 69.2 dBA.

Pri rezonantnoj frekvenciji (slika 5.6) od 909 Hz *sensorless* metodom motor generira jak zvuk od 85.9 dBA. Amplituda je u tom slučaju ujednačena i prisutan je neznatan šum s obzirom na jačinu zvuka. Upotrebom Hallovih sonde pri određivanju pozicije rotora za istu frekvenciju postiže se razina zvuka od 77 dBA. Dobiveni valni oblik je pravilniji (manje šuma) od valnih oblika dobivenih pri 500 Hz i 700 Hz istom metodom.

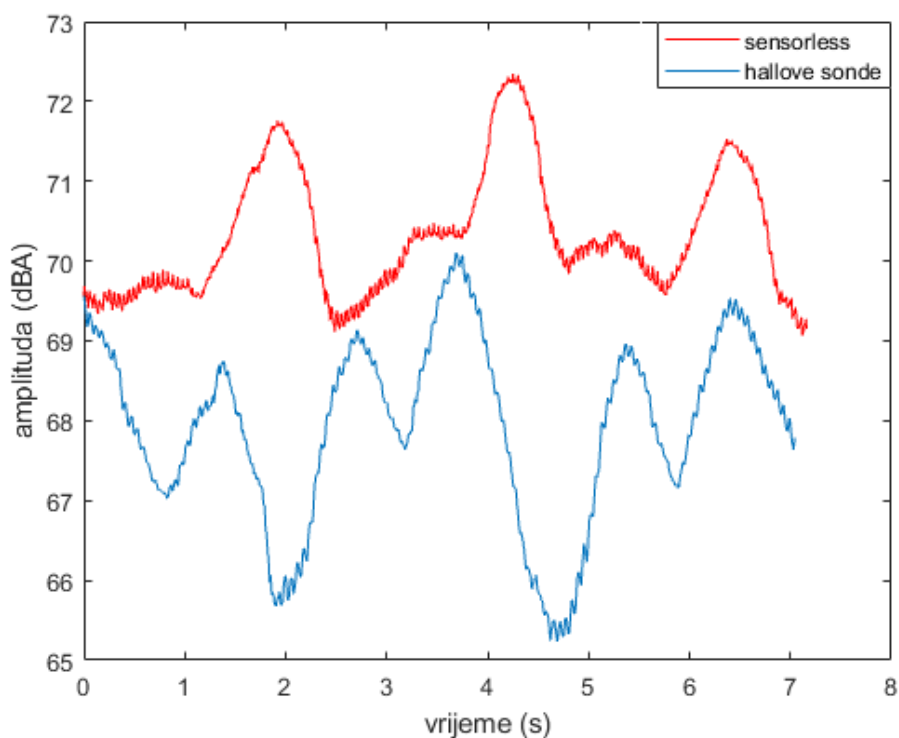


Slika 5.5: Razina zvuka (dBA) frekvencije 700 Hz

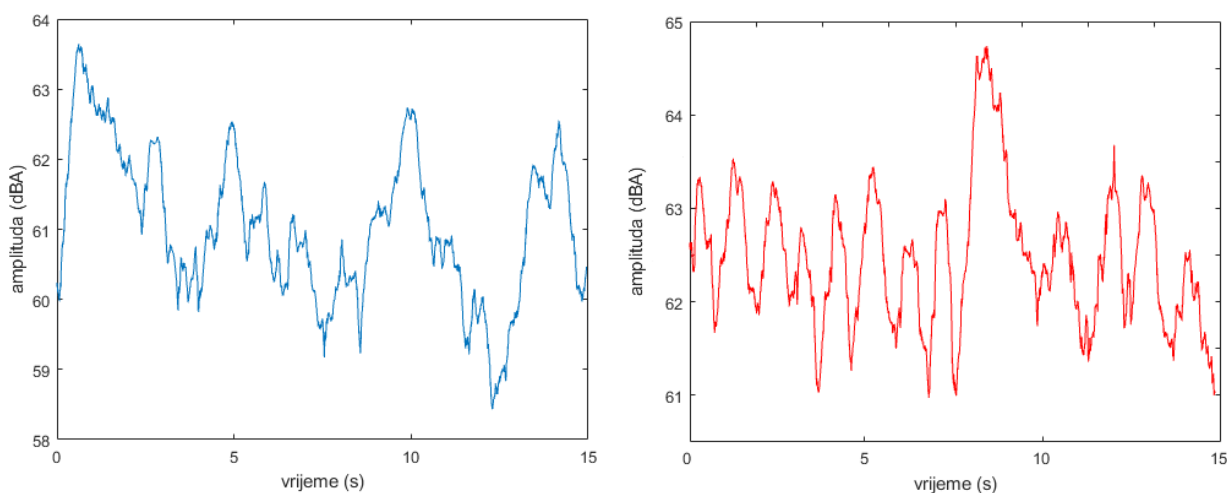


Slika 5.6: Razina zvuka (dBA) frekvencije 909 Hz

Sljedeća slika (5.7) prikazuje razine zvuka koje čujemo ako motor dulje vrijeme generira frekvenciju od 1000 Hz. Za obje metode prisutan je veći šum u usporedbi s frekvencijama 700 Hz i 915 Hz, a razine zvuka su podjednake s razinama na frekvenciji od 700 Hz. Upotrebom Hallovi sonde za određivanje pozicije rotora najveća razina zvuka koju čujemo iznosi 70.1 dBA. *Sensorless* metodom postiže se najveća razina od 72.3 dBA.



Slika 5.7: Razina zvuka (dBA) frekvencije 1000 Hz



Slika 5.8: Razina zvuka (dBA) za zvučni zapis pjesme: korištenjem Hallovih sonde (lijevo) i *sensorless* metode (desno).

Provjerene su i postignute razine zvuka ako motor prima zvučni zapis pjesme. Postavke glasnoće zvuka na mobitelu, koji prosljeđuje zvuk pjesme u pojačalo, postavljene su na maksimum. Za provjeru je odabran refren pjesme „*Highway to hell*” glazbene grupe AC/DC. Iz slike 5.8 vidljiva je velika prisutnost šuma za obje metode. Dobiveni valni oblici najsličniji su valnim oblicima na frekvenciji od 500 Hz. Za obje metode postignute su slične razine zvuka. Za Hallove sonde u prosjeku čujemo razinu zvuka od 61 dBA, dok je najveća postignuta 63.9 dBA. *Sensorless* metodom pjesmu u prosjeku čujemo na razini od 62.5 dBA, a najveća postignuta je 64.7 dBA.

Tablicom 5.1 dan je pregled namanjih i najvećih postignutih razina za obje metode, u promatranim frekvencijama:

Tablica 5.1: Pregled dobivenih rezultata

Frekvencije (Hz)	500		700		909		1000	
Razine zvuka (dBA)	min	max	min	max	min	max	min	max
Hallove sonde	57.4	60.3	64.1	69.2	72	77	65.2	70.1
Sensorless	57.4	62.2	71.1	75.8	84.2	85.9	69.2	72.3

Vidljivo je da za sve odabrane frekvencije *sensorless* metoda postiže veće amplitude. Na frekvencijama 500 Hz i 1000 Hz ti omjeri su neznatni, 1.6 i 1.3 u korist *sensorless* metode. Na frekvenciji 700 Hz razlika iznosi 6.6 dBA, što znači da se korištenjem *sensorless* metode amplituda povećala za 2.13 puta u odnosu na amplitudu dobivenu upotrebom Hallovih sondi. Na rezonantnoj frekvenciji ta razlika iznosi 8.9 dBA, a amplituda je veća za 2.8 puta. Razlika između najveće amplitude upotrebom Hallovih sondi na 700 Hz i 909 Hz iznosi svega 2 dB, dok je pri korištenju *sensorless* metode amplituda na rezonantnoj frekvenciji 3.2 puta veća (10.1 dBA) nego amplituda na 700 Hz.

Raspon frekvencija koje motor može generirati ovisi o tome pušta li se samo jedna frekvencija duže vrijeme ili je pušten niz (*engl. sweep*) frekvencija koje se mijenjaju vrlo brzo. U slučaju da od motora želimo čuti niz frekvencija koje se mijenjaju vrlo brzo motor može generirati frekvencije u rasponu od 300 Hz do 3000 Hz. U drugom slučaju motor može generirati frekvencije od 450 Hz do 1200 Hz bez poteškoća. Oko 500 Hz prisutan je veliki šum. U područjima oko 700 Hz i 900 Hz postižu se dobre razine zvuka i šum nema veliki utjecaj na kvalitetu zvuka. Područje oko 1000 Hz daje dobru razinu zvuka, ali uz veći šum. Frekvencije izvan raspona od 450 Hz do 1200 Hz

ne čuju se dovoljno i prigušuje ih zvuk rada motora, iako motor ne proizvodi značajnu buku pri radu. Nakon duljeg vremena puštanja, frekvencije izvan raspona 450 Hz do 1200 Hz počinju utjecati na glatkoću vrtnje motora.

Sljedeći izvori zvuka odgovaraju razinama zvuka u zgradama: šaptanje (20 dBA), razgovor na udaljenosti od jednog metra (60 dBA), buka u prometu (75 dBA), kamion koji vozi brzinom 65 km/h i udaljen je 15 metara od nas (84 dBA), buka rada motora aviona (120 dBA). [38] U usporedbi s navedenim vrijednostima dobivene razine i kvaliteta zvuka motora vrlo su dobar rezultat i motor može komunicirati s vozačem u prometu. Time je početna teza zadovoljena.

6. Zaključak

Odabir metode određivanja pozicije rotora u algoritmu vektorskog upravljanja utječe na kvalitetu zvuka kojeg EKM motor reproducira. U ovom radu korišten je EKM motor koji za određivanje pozicije rotora koristi Hallove sonde, a upravljan je algoritmom vektorskog upravljanja. Hallove sonde izvorno su namijenjene za upotrebu kada se za upravljanje motora koristi trapezna komutacija jer je tada algoritam jednostavan i potrebno je samo odrediti koja faza će se napajati. Algoritam vektorskog upravljanja je složen i teži se finijem radu motora pa se koriste optički enkoder, rezolover ili *sensorless*, koji mogu udovoljiti tom zahtjevu. Zbog toga *sensorless* metoda u ovom radu daje finije zvukove (neprimjetan šum) veće razine nego kada se Hallove sonde koriste za informaciju o poziciji rotora. EKM motori električnih bicikala prihvatljive cijene, kao ovaj korišten u radu, najčešće imaju ugrađene Hallove sonde.

Prema dobivenim rezultatima možemo zaključiti da se EKM motor električnog bicikla može koristiti za zvučnu komunikaciju s vozačem na dva načina. Prvi način je da motor obavlja funkciju alarma u neizoliranom prostoru. Prema razinama i kvaliteti zvuka koji se postiže na rezonantnoj frekvenciji, 700 Hz i 1000 Hz, za Hallove sonde i *sensorless* metodu, vozač električnog bicikla može jasno čuti zvuk alarma tijekom vožnje u prometu. Alarm bi mogao upozoravati na nisko stanje baterije električnog bicikla. Drugi način je da motor nakon vožnje u tišem okruženju obavijesti riječima vozača o stanju baterije ili prijeđenim kilometrima tijekom vožnje. U tom slučaju kotač motora se ne bi vrtio i bolji izbor metode za određivanje pozicije rotora su Hallove sonde. Hallove sonde imaju prednost jer kada se kotač ne vrti (rotor miruje), EMS nije prisutna i *sensorless* metoda nije pouzdana. Ako bi motor "ispričao" te podatke u prostoru koji nije bučan, npr. garaža, vozač bi mogao jasno razumjeti poruku motora. Motor nije dobar kao zvučnik za reproduciranje glazbe. Riječi pjesme razumljive su samo ako ne postoji buka u prostoru. Ako npr. dvije osobe vode razgovor na razini od 60 dBA dok motor reproducira glazbu, riječi pjesme neće biti razumljive. Isto vrijedi i za obavještanje vozača riječima o stanju motora. Možemo zaključiti i da se potrebna kvaliteta komunikacije može ostvariti bez upotrebe *sensorless* metode.

LITERATURA

- [1] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, 2009.
- [2] P. Yedamale, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, *Microchip Technology Inc.*, 2003.
- [3] C. W. de Silva, *Modeling and Control of Engineering Systems*, CRC Press, 2013.
- [4] H. Moczala, J. Draeger, H. Krauß i H. Schock, *Small Electric Motors*, The Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [5] V. Paar, *Elektromagnetizam*, Školska knjiga, 1992.
- [6] B. Vuković, *Elektromagnetska indukcija*, Odijel za fiziku Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku, URL: <https://slideplayer.com/slide/14389791/>, pristupano: 2019-05-15.
- [7] D. Hanselman, *Brushless permanent magnet motor design*, University of Maine, 2006.
- [8] Motion control tips, URL: <https://www.motioncontroltips.com/what-s-the-difference-between-slotted-and-slotless-motors/>, pristupano: 2019-05-15.
- [9] S. Stipetić, D. Žarko, Sinkroni strojevi s permanentnim magnetima, FER, URL: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/TESIT_2018_2019_SMPM.pdf, pristupano: 2019-05-15.
- [10] Renesas, *Controlling BLDC Motors*, URL: <https://www.renesas.com/in/en/support/technical-resources/engineer-school/brushless-dc-motor-02-inverter-pmw.html>, pristupano: 2019-05-15.
- [11] Senzorske tehnologije – prilog predavanjima: 4-1 Mjerenje magnetskog polja, FER, URL: https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/ST-00-Uvodno_predavanje-2018-19.pdf, pristupano: 2019-05-15.
- [12] How to Power and Control Brushless DC Motors, URL: <https://www.digik ey.com/en/articles/techzone/2016/dec/how-to-power-and-control-brushless-dc-motors>, pristupano: 2019-05-15.
- [13] Motion control tips, URL: <https://www.motioncontroltips.com/fa>

q-what-are-hall-effect-sensors-and-what-is-their-role-in-dc-motors/, pristupano: 2019-05-15.

[14] Anaheim automation, URL: <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/encoder-guide.php>, pristupano: 2019-05-15.

[15] Senzorske tehnologije – prilog predavanjima: 5-1 Mjerenje pomaka, FER, URL: <https://www.fer.unizg.hr/predmet/senteh/materijali>, pristupano: 2019-05-15

[16] Advanced micro controls Inc., URL: <https://www.amci.com/plc-automation-products/h25-allen-bradley-846-resolver-replacement/>, pristupano: 2019-05-15.

[17] Resolver - Based Motor Control Reference Design With a BLDC Motor and C2000, Texas Instruments Inc., 2018., URL: <http://www.ti.com/lit/ug/tidudo9/tidudo9.pdf>, pristupano: 2019-05-15.

[18] S. Keeping, Controlling Sensorless, BLDC Motors via Back EMF, Digy-Key Electronics, 2013., URL: <https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/jun/controlling-sensorless-blDC-motors-via-back-emf>, pristupano: 2019-05-15.

[19] Brushless DC (BLDC) Motor, URL: <https://electricalbaba.com/brushless-dc-blDC-motor/>, pristupano: 2019-05-15.

[20] J. Teh, Motion Control Products Division Avago Technologies, 2010., URL: <https://www.machinedesign.com/sensors/optical-encoders-encourage-efficiency>, pristupano: 2019-05-15.

[21] A. Tashakori, M. Ektesabi Published, Inverter switch fault diagnosis system for BLDC motor drives, 2014., URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Inverter-switch-fault-diagnosis-system-for-BLDC-Tashakori-Ektesabi/a412a76684dbc5a642107caef0ee7869f9c1ab6d>, pristupano: 2019-05-15.

[22] D. Collins, Motion control tips, 2016., URL: <https://www.motioncontroltips.com/faq-trapezoidal-back-emf/>, pristupano: 2019-05-15.

[23] Performance motion devices, URL: [Selecting The Right Motion Control Amplifier – Phasing](#), pristupano: 2019-05-15.

[24] M. Sundaram, Implementing field oriented control of a brushless DC motor, Cypress Semiconductor, 2012. https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279321#, pristupano: 2019-05-15.

[25] K. Johan, Sundaram, Control system design, 2002. <https://www.cds.caltech.edu/murray/courses/cds101/fa02/caltech/astrom-ch6.pdf>, pristupano: 2019-05-15.

- [26] Clarke & Park Transform on the TMS320C2xx, Texas Instruments Inc., 1997., <http://www.ti.com/lit/an/bpra048/bpra048.pdf>, pristupano: 2019-05-15.
- [27] Traxxas big block brushless motor, 2015., <https://traxxas.com/products/models/electric/64077xo1>, pristupano: 2019-05-15.
- [28] J.P. Joule, On the Effects of Magnetism upon the Dimensions of Iron and Steel Bars, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 2009.
- [29] G. Monahan, A Piano Listening To Itself, 2010., http://www.gordonmonahan.com/pages/A_Piano_Listening.html, pristupano: 2019-05-15.
- [30] Cognitio Elektronika d.o.o., CMC420 datasheet, <http://cognitio-elektronika.hr/wp-content/uploads/2017/06/CMC420R0210219.pdf>, pristupano: 2019-05-15.
- [31] dsPIC33EP512GM710, Microchip Inc. datasheet, <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/dsPIC33EP512GM710>, pristupano: 2019-06-20.
- [32] EV BIKE, GWL Power datasheet, <https://www.ev-power.eu/EVBike-WheelKit/E-bike-conversion-kit-EVBike-36-48V-500-750W-Front-28.html#tab1>, pristupano: 2019-06-20.
- [33] LM358 datasheet, <https://www.microohmelectronics.com/product/lm358-dual-op-amp-ic/>, pristupano: 2019-06-20.
- [34] Behringer ECM8000, <http://queen-music.com/behringer-ecm8000>, pristupano: 2019-01-07.
- [35] Focusrite Scarlett 2i2, <https://www.audiopro.hr/proizvod/focusrite-scarlett-2i2-2-generation-audio-sucelje?idPro=30517>, pristupano: 2019-01-07.
- [36] Kalibrator razine zvuka, <https://www.tekcoplus.com/products/slm-111?variant=8114563219557>, pristupano: 2019-01-07.
- [37] Digital Position Sensors, Digi-key datasheet, <https://www.digikey.com/catalog/en/partgroup/ss400-series/12410>, pristupano: 2019-01-07.
- [38] Comparative Examples of Noise Levels, iac aucostic, <http://www.industrialnoisecontrol.com/comparative-noise-examples.htm>, pristupano: 2019-05-07.

Upotreba istosmjernog elektronički komutiranog motora električnog bicikla za zvučnu komunikaciju s vozačem

Sažetak

U radu je detaljno objašnjena struktura, princip i kontrola rada istosmjernog elektronički komutiranog motora i zašto se takav motor može ponašati kao zvučnik. Modificiran je algoritam vektorskog upravljanja elektronički komutiranog motora električnog bicikla kako bi se na motoru reproducirao zvučni signal. Provedeno je ispitivanje razine i kvalitete zvuka koji motor reproducira kako bi se utvrdilo može li se isti koristiti za komunikaciju s vozačem električnog bicikla.

Ključne riječi: EKM motor, magnetostrikcija, zvučnik, vektorsko upravljanje, Hall sonde, bezsenzorska metoda određivanja pozicije rotora.

Application of Brushless Direct Current Motor in Electric Bicycle for Acoustic Communication With Rider

Abstract

This thesis explains the structure, principle of work and control of the brushless DC electric motor and why it could behave as a speaker. With modification of vector control algorithm in brushless motor of an electric bicycle, motor reproduces sound. The quality and sound level testing was performed to determine whether it could be used for communication with the rider of an electric bicycle.

Keywords: BLDC motor, magnetostriction, speaker, field oriented control, Hall sensors, sensorless.