

Projektiranje sustava za regulaciju brzine vrtnje istosmjernog motora zasnovanog na magnetskom enkoderu

Antolić, Zdravko

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:289994>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Zdravko Antolić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Mario Hrgetić

Student:

Zdravko Antolić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru, doc. dr. sc. Mariu Hrgetiću, na vođenju ovog završnog rada te na iznimnoj strpljivosti i danim korisnim savjetima prilikom izrade istog.

Također, zahvaljujem i svojoj obitelji i prijateljima na podršci tijekom cijelog studija.

Zdravko Antolić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Zdravko Antolić** Mat. br.: 0035204709

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projektiranje sustava za regulaciju brzine vrtnje istosmjernog motora zasnovanog na magnetskom enkoderu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of a speed control system for a DC motor based on a magnetic encoder**

Opis zadatka:

Optički inkrementalni i apsolutni enkoderi redovito se primjenjuju u servo-sustavima za mjerenje brzine vrtnje i kutnog zakreta zbog svoje visoke rezolucije, točnosti i neosjetljivosti na elektrostatske i elektromagnetske smetnje. Ubrzani razvoj MEMS tehnologije omogućio je razvoj minijaturnih magnetskih enkodera u čipu zasnovanih na primjeni mreže Hallovih senzora. Prednosti magnetskih enkodera su jednostavna ugradnja, niska cijena uz visoke performanse u uvjetima niskih EMI smetnji. U radu je potrebno:

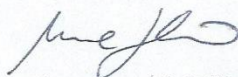
1. Proučiti i opisati princip mjerenja brzine vrtnje i kuta zakreta primjenom integriranih magnetskih enkodera sa Hallovim sensorima, te detaljno proučiti tehničku dokumentaciju mjernog pretvornika AM 4096.
2. Osmisliti i izraditi ožičenje ispitne makete DC motora RS-555PB-19180, s prigradenim 12-bitnim magnetskim enkoderom zasnovane na Arduino UNO mikrokontroleru s DC pretvaračem sa H-mostom. Izlazne signale magnetskog enkodera je potrebno povezati sa mikrokontrolerom. Referentne i mjerene veličine potrebno je pohranjivati na računalo u tekstualnu datoteku korištenjem serijske komunikacije.
3. Temeljem poznatih parametara motora i DC pretvarača potrebno je realizirati simulacijski model sustava u Matlab/Simulink okruženju i razviti programske rutine za podešavanje parametara regulatora brzine vrtnje DC motora.
4. Projektirati sustav upravljanja brzinom vrtnje DC motora što uključuje: podešavanje parametara regulatora, izradu programskog koda za Arduino mikrokontroler koji će omogućiti regulaciju brzine vrtnje, te mjerenje, prikaz i pohranu relevantnih veličina pogona kao što su brzina vrtnje, kut zakreta i struja DC motora.

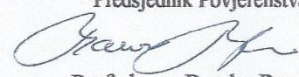
Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predvideni datumi obrane:
1. rok: 24.2. - 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Mario Hrgetić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. MJERENJE BRZINE VRTNJE ELEKTROMOTORA.....	2
2.1. Optički davači	2
2.1.1. Apsolutni optički enkoder.....	3
2.1.2. Inkrementalni optički enkoder	3
2.2. Rezolveri	5
2.2.1. Princip rada	5
2.3. Hallovi senzori	6
2.3.1. Hallov učinak (efekt)	6
2.3.2. Magnetski enkoder temeljen na Hallovom učinku	8
2.4. Usporedba opisanih senzora.....	10
3. OPIS MJERNOG SUSTAVA	11
3.1. Istosmjerni motor	11
3.1.1. Tipovi istosmjernih elektromotora.....	13
3.1.1.1. Istosmjerni motori sa četkicama (kolektorski motori).....	13
3.1.1.2. Istosmjerni motori bez četkica (beskolektorski motori)	14
3.1.2. Režimi rada elektromotora.....	16
3.1.2.1. Prazni hod	16
3.1.2.2. Kratki spoj.....	16
3.1.2.3. Motorski ili generatorski režim rada.....	17
3.1.3. Istosmjerni motor korišten u eksperimentalnom postavu	18
3.1.3.1. Određivanje konstante momenta motora K_m	18
3.1.4. Dinamički model istosmjernog motora.....	19
3.2. Magnetski enkoder AM4096	21
3.2.1. Programiranje čipa	22
3.2.2. Inkrementalni izlazi.....	25
3.3. Mikrokontroler Arduino Uno.....	25
3.3.1. Arduino IDE sučelje	27
3.4. Tranzistorski frekvencijski pretvarač (Chopper)	28
3.4.1. Arduino motor shield sa L298P H – mostom	31
4. MJERENJA – EKSPERIMENTALNI REZULTATI	33
4.1. Struja armature I_a	33
4.2. Analogni linearni napon (V_{out})	34
4.2.1. Mjerenje brzine vrtnje.....	36
4.2.1.1. Određivanje brzine vrtnje prilikom malih brzina.....	38

4.2.1.2.	Određivanje brzine vrtnje prilikom velike brzine vrtnje.....	41
4.2.1.3.	Simulacijski rezultati mjerenja brzine vrtnje	42
5.	UPRAVLJANJE I REGULACIJA BRZINE VRTNJE.....	44
5.1.	Uvedena ograničenja kod upravljanja i regulacije brzine vrtnje.....	44
5.1.1.	Potreban minimalan napon armature za pokretanje vrtnje	44
5.1.2.	Nelinearnost izlaznog napona tranzistorskog frekvencijskog ispravljača	44
5.1.3.	Izobličenje PWM signala na armaturi motora	46
5.2.	Upravljanje brzinom vrtnje	48
5.3.	Regulacija brzine vrtnje	49
5.3.1.	Kaskadna regulacija brzine vrtnje.....	50
5.3.1.1.	Sinteza regulacijskog kruga struje armature	50
5.3.1.2.	Sinteza regulacijskog kruga brzine vrtnje.....	53
5.3.1.3.	Simulacija regulacije brzine vrtnje bez regulatora struje armature	57
6.	ZAKLJUČAK.....	60
	LITERATURA.....	61
	PRILOZI.....	62

POPIS SLIKA

Slika 1.	Disk apsolutnog optičkog enkodera [1].....	3
Slika 2.	Disk i oblik izlaznih signala inkrementalnog optičkog enkodera [1].....	4
Slika 3.	Električna shema rezolvera [2].....	5
Slika 4.	Princip rada rezolvera.....	6
Slika 5.	Hallov efekt [3]	7
Slika 6.	Izlazni signali linearnog Hallovog senzora [4].....	8
Slika 7.	Izlazni signali digitalnih Hallovih senzora	9
Slika 8.	Ekscentricitet magneta i vratila elektromotora [5]	9
Slika 9.	Razlika u amplitudama magnetske indukcije kod Hallovih senzora [5].....	10
Slika 10.	Eksperimentalni postav	11
Slika 11.	Osnovni istosmjerni motor [8]	12
Slika 12.	Istosmjerni motor sa četkicama	13
Slika 13.	Poprečni presjek rotora BLDC elektromotora [10].....	14
Slika 14.	Aksijalni poprečni presjek BLDC elektromotora [10]	15
Slika 15.	Valni oblici elektromotorne sile [10]	15
Slika 16.	Četverokvadratni režim rada motora [12]	17
Slika 17.	Postav za mjerenje konstante momenta K_m	18
Slika 18.	Nadomjesna shema istosmjernog motora.....	19
Slika 19.	Blokovski dijagram DC motora [13].....	21
Slika 20.	AM4096 raspored senzora te izlazni signal [14].....	21
Slika 21.	Blokovski dijagram AM4096 [14]	22
Slika 22.	TWI protokol [14]	23
Slika 23.	Inkrementalni signali A, B, Ri.....	25
Slika 24.	Arduino Uno [15]	26
Slika 25.	Arduino IDE sučelje	28
Slika 26.	Principijelna shema tranzistorskog frekvencijskog pretvarača [13].....	29
Slika 27.	Odnos napona i struje istosmjernog motora u PWM načinu rada.....	30
Slika 28.	Arduino motor shield [16]	31
Slika 29.	Ovisnost struje o vremenu za različite brzine vrtnje	34
Slika 30.	Analogni linearni napon [15]	35
Slika 31.	Analogni linearni napon dobiven eksperimentalnim mjerenjima	35
Slika 32.	Algoritam za mjerenje brzine vrtnje vratila elektromotora	37
Slika 33.	Graf ovisnosti kuta zakreta vratila elektromotora o vremenu	38
Slika 34.	Očitavanje brzine vrtnje kod malih brzina vrtnje.....	39
Slika 35.	Usporedba prave i prosječne brzine vrtnje vratila elektromotora	41
Slika 36.	Očitavanje brzine vrtnje kod velikih brzina okretaja	42
Slika 37.	Simulink model za upravljanje brzinom vrtnje	43
Slika 38.	Usporedba izmjerenih i simulacijskih vrijednosti brzine vrtnje.....	43
Slika 39.	Aproksimirana ovisnost napona armature o upisanoj vrijednosti PWM-a.....	45
Slika 40.	Aproksimirana ovisnost napona armature o upisanoj vrijednosti PWM-a nakon ograničenja	46
Slika 41.	PWM signal na frekvenciji motorshielda od 3 kHz.....	47
Slika 42.	PWM signal na frekvenciji motorshielda od 31 kHz.....	48
Slika 43.	Koncept upravljanja [17].....	48
Slika 44.	Koncept regulacije [17]	49

Slika 45.	Blokovski dijagram regulacijskog kruga struje armature [13]	50
Slika 46.	Blokovski dijagram regulacijskog kruga struje na kojem se zasniva sinteza PI regulatora [13]	51
Slika 47.	Simulink model PI regulatora struje armature	53
Slika 48.	Blokovski dijagram regulacijskog kruga brzine vrtnje [13].....	54
Slika 49.	Simulink model regulacijskog kruga brzine vrtnje	55
Slika 50.	Mjereni i simulacijski odziv regulacijskog kruga brzine vrtnje kod 300 min^{-1}	56
Slika 51.	Mjereni i simulacijski odziv regulacijskog kruga brzine vrtnje kod 1000 min^{-1} ...	56
Slika 52.	Blokovski dijagram DC motora napajanog tranzistorskim frekvencijskim ispravljačem [13]	57
Slika 53.	Blokovski dijagram ekvivalentnog vremenski kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje sa PI regulatorom [13].....	58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba različitih senzora brzine vrtnje	10
Tablica 2. Karakteristike korištenog motora	19
Tablica 3. Adrese magnetskog enkodera.....	24
Tablica 4. Naredbe za čitanje podataka.....	24
Tablica 5. Arduino Uno – tehničke specifikacije	27
Tablica 6. Korišteni pinovi po kanalima	32
Tablica 7. Tehničke karakteristike motor shielda	32
Tablica 8. Broj perioda signala u ovisnosti o vrijednosti parametra	36

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
B	T	Magnetska indukcija
B_z	T	Magnetska indukcija
D_i	-	Karakteristični odnosi
$D_{2\omega}, D_{3\omega}$	-	Optimalni odnosi karakterističnih polinoma
d	-	Faktor popunjenosti PWM signala
e	V	Inducirani elektromotorni napon
F_m	N	Lorentzova sila
I	A	Jakost struje
I_0	A	Struja praznog hoda
I_A	A	Jakost struje armature
I_k	A	Struja kratkog spoja
J	kgm ²	Inercija
J_x	A / mm ²	Gustoća struje
K_e	-	Konstanta pojačanja elektromotorne sile
K_{ei}	-	Nadomjesno pojačanje regulacijskog kruga struje
K_m	-	Konstanta momenta
K_p	Vs/rad	Pojačanje pojednostavljenog modela motora
K_R	Vs/rad	Pojačanje regulatora
k	-	Pojačanje ulaznog signala kod rezolvera
L_a	H	Induktivitet armaturnih namota
l	M	Duljina vodiča koji se giba u magnetskom polju
m_m	Nm	Razvijeni okretni moment na vratilu elektromotora
m_t	Nm	Moment tereta
P_k	W	Snaga kratkog spoja
p	-	Broj pari polova motora
R_a	Ω	Otpor armaturnih namota
R_H	-	Hallova konstanta
T	s	Vrijeme uzorkovanja
T_e	s	Ekvivalentna vremenska konstanta
T_{em}	s	Elektromehanička vremenska konstanta
T_{ei}	s	Nadomjesna vremenska konstanta regulacijskog kruga struje
T_I	s	Integralna vremenska konstanta
T_k	Nm	Okrenti moment u kratkom spoju
T_{par}	s	Parazitska vremenska konstanta
T_s	s	Period između dva očitavanja

T_{Σ}	s	Vremenska konstanta parazitske dinamike
$T_{\Sigma i}$	s	Parazitska vremenska konstanta regulacijskog kruga struje
$T_{\Sigma \omega}$	s	Parazitska vremenska konstanta regulacijskog kruga brzine vrtnje
t_c	s	Period PWM signala
t_i	s	Vrijeme niskog stanja PWM signala
t_u	s	Vrijeme visokog stanja PWM signala
U	V	Napon
U_b	V	Napon napajanja tranzistorskog frekvencijskog pretvarača
U_n	V	Nazivni napon
U_{sr}	V	Srednja vrijednost napona armature
u_a	V	Napon armature istosmjernog motora
v	m/s	Brzina gibanja vodiča u magnetskom polju
V_h	V	Hallov napon
$\cos \varphi_0$	-	Faktor snage
ε	Rad	Kut zakreta vratila elektromotora kod rezolvera
ρ_k	°	Trenutni kut zakreta vratila elektromotora
ρ_{k-1}	°	Kut zakreta vratila elektromotora u prošlom koraku
ω	Rad/s	Kutna brzina simulacijskog modela istosmjernog motora
ω_k	°/s	Kutna brzina vratila elektromotora

SAŽETAK

Završni rad opisuje postupak sinteze i implementacije PI regulatora u sustavu regulacije brzine vrtnje rotora elektromotora. Za mjerenje brzine vrtnje korišten je magnetski apsolutni enkoder temeljen na Hallovom efektu. Detaljno je opisan princip rada senzora, s naglaskom na analognom naponskom signalu enkodera koji je korišten u sustavu regulacije. Provedeno je modeliranje i identifikacija parametara elektromotornog pogona, neophodno za sintezu regulatora brzine vrtnje. Računalna simulacija dinamičkog ponašanja pogona i regulatora je provedena u MATLAB Simulinku, a zatim je regulator implementiran i testiran na eksperimentalnom postavu.

Ključne riječi: upravljanje i regulacija brzine vrtnje, istosmjerni motor, magnetski enkoder

SUMMARY

In this final paper procedure of PI regulator parameters estimation and its implementation into speed control system is described. Magnetic absolute encoder, based on Hall effect is used for rotational speed measurement. Work principle of used sensor, with accent on analog voltage encoder signal, which is used in control system, is detailed described. Modeling and identification of electric motor drive parameters, which are necessary for rotational speed regulator synthesis are carried out. Computer simulation of drive and regulator dynamic behavior is conducted in MATLAB Simulink. After that, regulator is implemented and tested on experimental model.

Key words: position control, speed control, DC motor, magnetic encoder

1. UVOD

U elektromotornim pogonima potrebno je znati trenutnu poziciju i brzinu vrtnje rotora elektromotora. U tu se svrhu najčešće primjenjuju inkrementalni optički i apsolutni enkoderi. Osim optičkih, ubrzani razvoj MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) tehnologije omogućio je razvoj magnetskih enkodera vrlo malih dimenzija zasnovanih na primjeni mreže Hallovih senzora.

U završnom radu opisani su pojmovi vezani uz komponente korištene na eksperimentalnom postavu, provedeno je određivanje parametara pogona te je izvršena sinteza regulatora brzine vrtnje primjenom optimuma dvostrukog odnosa. Za upravljanje naponom armature istosmjernog motora korišten je Arduino Motorshield sklop koji na svom izlazu daje pulsno širinski modulirani (PWM) oblik napona. Mjerni signali pohranjuju se u tekstualnu datoteku za potrebe naknadne obrade i analize.

Kako dokumentacija o korištenom elektromotoru nije dostupna, konstanta elektromotorne sile motora K_e , kao i konstanta momenta elektromotora K_m određena je eksperimentalnim putem, što je detaljno opisano u radu. Temeljem identificiranih parametara dinamičkog modela motora postavljen je simulacijski model regulacijskog kruga i provedena sinteza parametara regulatora primjenom kriterija optimuma dvostrukog odnosa.

Kvaliteta regulacije brzine pogona demonstrirana je eksperimentalnim odzivima na ulaznu skokovitu promjenu reference brzine vrtnje u režimu malih opterećenja. Dobiveni eksperimentalni rezultati uspoređeni su s rezultatima računalne simulacije.

2. MJERENJE BRZINE VRTNJE ELEKTROMOTORA

Poznavanje trenutne brzine vrtnje, kao i trenutne pozicije vratila elektromotora, iznimno je važno u današnjim sustavima upravljanja i regulacije. Za mjerenje brzine vrtnje i kuta zakreta vratila elektromotora koriste se razni tipovi mjernih pretvornika od kojih bi svakako trebalo izdvojiti one najčešće:

- optički enkoderi (davači)
- resolveri
- Hallovi senzori.

2.1. Optički davači

Općenito govoreći, enkoderi, odnosno davači, su uređaji koji neke neelektrične fizikalne veličine pretvaraju u električne. S obzirom na vrstu pomaka koji mjere postoje linearni i rotacijski optički enkoderi.

Linearni enkoderi mjere linearni pomak koji zatim pretvaraju u električni signal, dok rotacijski enkoderi pretvaraju kutni položaj ili rotacijsko gibanje vratila osovine motora u izlazni signal koji može biti analognog ili digitalnog tipa, ovisno o tome koristi li se analogni ili digitalni enkoder.

Osim podjele na linearne i rotacijske, davači se mogu podijeliti i po tipu informacije koju daju i to na:

- apsolutne enkodere i
- inkrementalne enkodere.

U praksi se koriste različite izvedbe mjernih pretvornika kuta zakreta i brzine vrtnje:

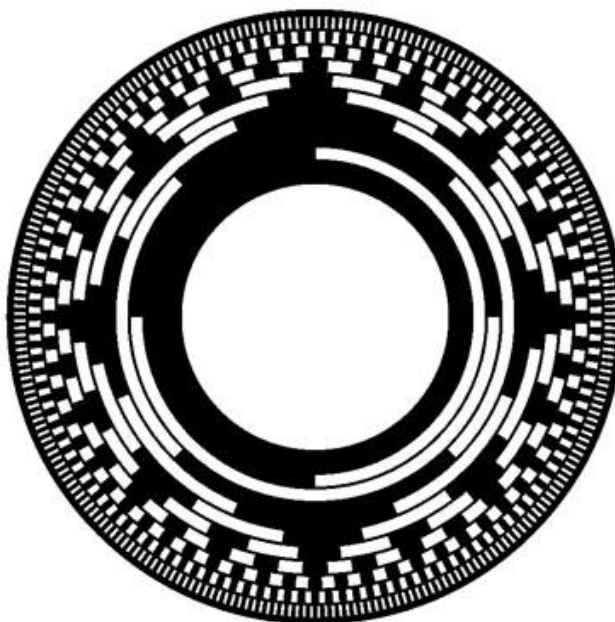
- otpornički
- kapacitivni
- induktivni
- magnetski
- ultrazvučni
- optički.

Optički enkoderi su beskontaktni mjerni pretvornici razvijeni s ciljem otklanjanja problema trošenja kod kontaktnih enkodera. Zbog svoje velike razlučivosti i točnosti primjenjivi su i na velikim brzinama vrtnje.

2.1.1. *Apsolutni optički enkoder*

Apsolutni enkoderi daju jedinstven digitalni kod za svaku različitu poziciju rotora, odnosno kao izlaz se dobije trenutna pozicija vratila elektromotora. Priključenjem napona na enkoder on trenutno daje digitalnu kodiranu informaciju o trenutnom položaju vratila. Kodirana informacija, koja je najčešće u obliku Grayovog koda, treba se dekodirati kako bi se dobila informacija o trenutnom položaju te brzini vrtnje.

Kako je i prikazano na slici 1., disk apsolutnog optičkog enkodera sastoji se od prozirnih i neprozirnih segmenata. S jedne strane diska pažljivo su postavljeni fotoelektrični senzori (npr. fotodioda), dok su s druge strane postavljeni izvori svjetlosti prilikom čega je svaki izvor svjetlosti (npr. LED dioda) usmjeren točno prema jednom fotoelektričnom senzoru. Kako je disk spojen na vratilo elektromotora te rotira zajedno s njim dolazi do naizmjeničnog prolaska, odnosno blokiranja svjetlosti kroz disk, te fotoelektrični senzori u određenom slijedu primaju ili ne primaju svjetlosne signale odaslane s izvora svjetlosti. Na taj se način generira izlazni kod čijom se daljnom obradom određuje brzina, odnosno pozicija vratila.



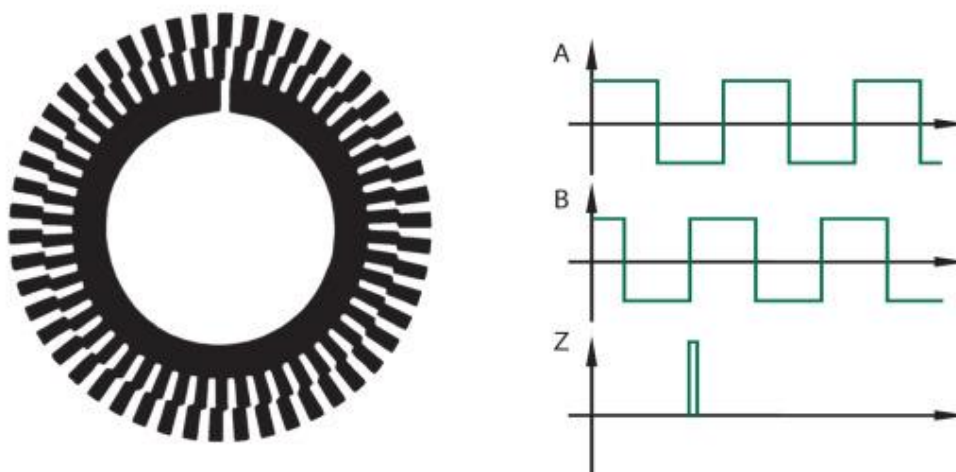
Slika 1. Disk apsolutnog optičkog enkodera [1]

2.1.2. *Inkrementalni optički enkoder*

S druge strane, inkrementalni enkoderi su oni koji ne generiraju određenu digitalnu sekvencu bitova nego generiraju slijed električnih impulsa čijom se daljnom analizom može odrediti kut zakreta i brzina vrtnje vratila. Obično su izvedeni kao dvokanalni dodavači čime dobivamo

moгуćnost određivanja smjera vrtnje. Inkrementalni davači najčešće su korišteni senzori za digitalno mjerenje pozicije i brzine vrtnje elektromotora.

Inkrementalni optički enkoder sastoji se obično od tri izlaza: A, B i Z. Slično kao i kod apsolutnih optičkih enkodera, disk inkrementalnog optičkog enkodera sastoji se od prozirnih i neprozirnih elemenata po obodu diska. S jedne strane diska postavljeni su izvori svjetlosti, dok se sa druge strane nalaze primatelji svjetlosti koji generiraju signale (slika 2.)



Slika 2. Disk i oblik izlaznih signala inkrementalnog optičkog enkodera [1]

Signal iz prvog izlaza (obično označen slovom A) sastoji se od niza pravokutnih impulsa čija je frekvencija određena brzinom vrtnje te rezolucijom pretvarača (broj impulsa po okretaju). Ukoliko je brzina vrtnje vratila elektromotora velika, za određivanje brzine vrtnje koristi se metoda koja se zasniva na brojanju impulsa A (ili B) signala unutar fiksnog vremenskog intervala i to prema izrazu (1).

$$n = \frac{C}{r} \cdot \frac{60}{t}, \quad (1)$$

gdje je:

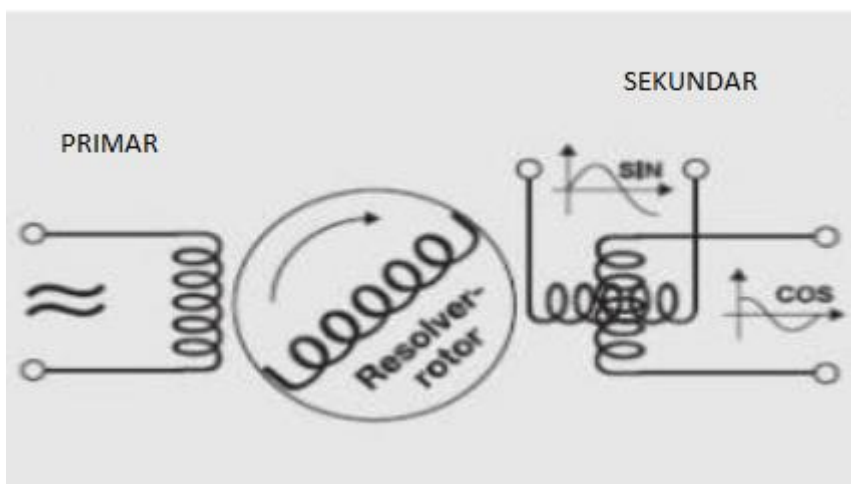
- n – brzina vrtnje vratila elektromotora
- C – broj izbrojanih impulsa
- r – rezolucija pretvarača (broj impulsa po okretaju)
- t – vremenski interval.

Slovom B obično je označen signal iz drugog izlaza enkodera. Izlazni signal po svojem je obliku i periodu jednak signalu A uz tu razliku što je obično pomaknut za $\pi/2$ u odnosu na prvi signal. U ovisnosti o tome prethodi li ili zaostaje signal A za signalom B, može se obradom signala odrediti vrti li se vratilo elektromotora u smjeru kazaljke na satu ili u obratnom smjeru.

Treći izlaz enkodera (označimo ga slovom Z) označava prolazak vratila elektromotora kroz početnu poziciju. Prilikom prolaska vratila kroz početnu poziciju dobiva se jedan kratak impuls jednom po okretaju. Ukoliko je brzina vrtnje vratila elektromotora mala, za detektiranje brzine vrtnje koristi se brojanje navedenog impulsa visoke frekvencije unutar perioda A, odnosno B, signala.

2.2. Rezolveri

Samo ime rezolveri su dobili još pedesetih godina prošlog stoljeća kada su se koristili za rješavanje trigonometrijskih odnosa upravo zato jer se njihov rad na neki način temelji na sinusnim i kosinusnim oblicima signala. Suštinski gledano, rezolveri su zapravo rotacijski transformatori na kojima inducirani napon na sekundaru transformatora (rezolvera) ovisi o položaju samog vratila elektromotora. Na rotoru rezolveri imaju primarni namot, dok se na statoru nalaze obično dva međusobno okomita namota (slika 3). Zbog svoje velike točnosti rezolveri se primjenjuju na primjer u robotima za regulaciju kutnog zakreta određenog stupnja slobode gibanja. Osim kod robota, rezolveri imaju i široku primjenu u numerički upravljanim strojevima te u brodovima za preciznu kontrolu radara.



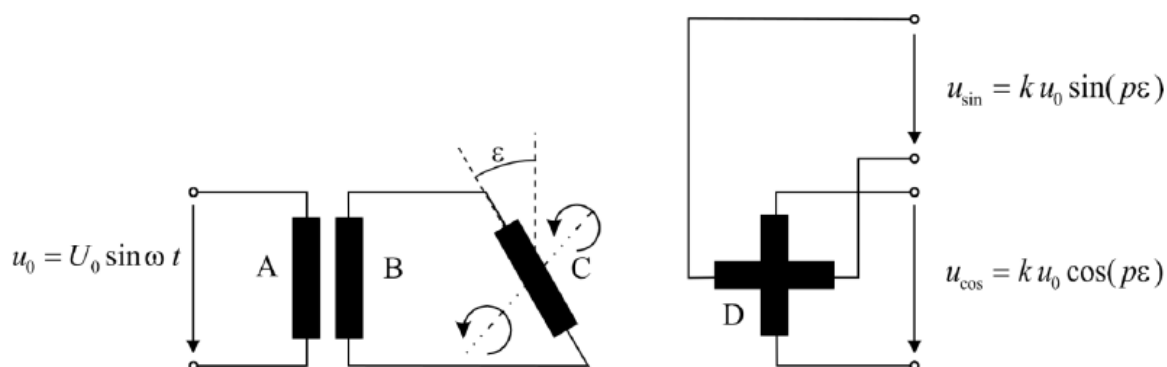
Slika 3. Električna shema rezolvera [2]

2.2.1. Princip rada

Primar rezolvera napaja se izmjeničnim signalom sinusnog oblika pri čemu se na statorskim namotima inducira napon izmjeničnog oblika čija amplituda ovisi o samom položaju rotora (slika 4).

S u_0 označen je uzbudni napon čija je amplituda označena s U_0 . Rotorska zavojnica označena je slovom C, dok su slovom D označene statorske zavojnice na kojima se inducira napon. Ovisno o kutu zakreta rotora ε , mijenja se i amplituda inducirano napona na statorskim zavojnicama označenim s u_{\sin} i u_{\cos} . Oznakom k označeno je pojačanje signala u odnosu na

signal spojen na rotorski namot, dok je slovom p predočen broj pari polova motora. Kad je rotorski, primarni namot ujednačen sa „cos“ namotom, kut zakreta jednak je nuli. Daljnom obradom sinusnog i kosinusnog signala generiranih na sekundarnim namotima rezolvera te obradom istih signala određuje se kut zakreta rotorskog namota iz čega se može odrediti i brzina vrtnje vratila elektromotora.



Slika 4. Princip rada rezolvera

Sama analiza i obrada signala, iz koje se dobiva kut zakreta elektromotora, vrši se najčeće uređajima koji pretvaraju izlazne sinusne i kosinusne signale u binarni oblik (veličine 10 do 16 bitova) koji se dalje mogu lakše koristiti u raznim kontrolorima.

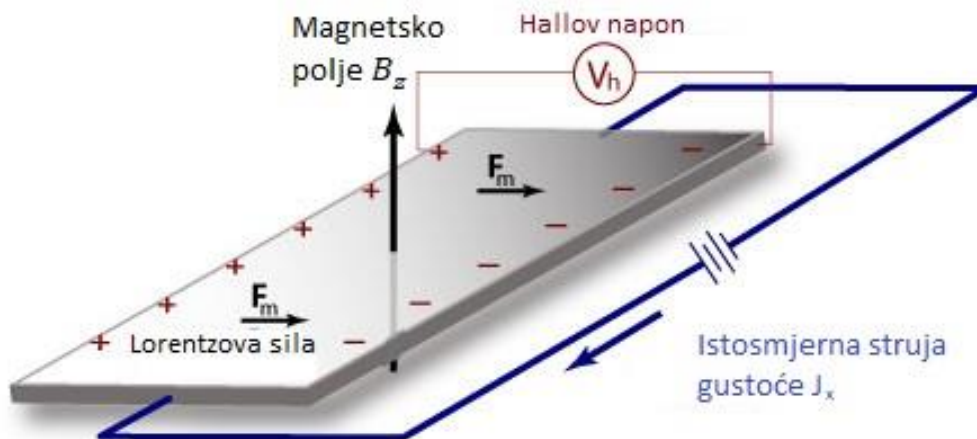
2.3. Hallovi senzori

Glavna prednost Hallovih senzora u odnosu na druge senzore (inkrementalne, apsolutne davače...) je ta što su Hallovi senzori otporni na prljavštinu, vibracije, razne prepreke koje mogu spriječiti svjetlosnu zraku kod optičkih enkodera i sl. Relativno velike dimenzije rezolvera glavni su nedostatak istih što Hallove senzore opet stavlja u bolji položaj pošto isti mogu biti izrazito kompaktnih izvedbi.

Prije opisa samog senzora te principa rada potrebno je poznavati i teoriju na kojoj se Hallov sensor zasniva. To podrazumijeva shvaćanje Hallovog učinka (efekta) te zašto i pod kojim uvjetima dolazi do njega.

2.3.1. Hallov učinak (efekt)

Prolaskom istosmjerne struje gustoće J_x kroz tanku pločicu napravljenu od vodljivog ili poluvodljivog materijala, a zbog djelovanja Lorentzove sile F_m na elektrone u magnetskom polju magnetske indukcije B_z , dolazi do pojave razdvajanja naboja na krajevima pločice što dovodi do pojave tzv. Hallovog napona V_h (slika 5.)



Slika 5. Hallov efekt [3]

Iznos induciranog Hallovog napona izračunava se prema jednadžbi (2):

$$V_h = R_H \cdot J_x \cdot B_z, \quad (2)$$

gdje je R_H oznaka za Hallovu konstantu (Hallov otpor).

Kako je iznos induciranog napona vrlo malen, potrebno je na izlazni dio kruga postaviti i pojačalo za pojačavanje dobivenog signala te za njegovu daljnu upotrebu.

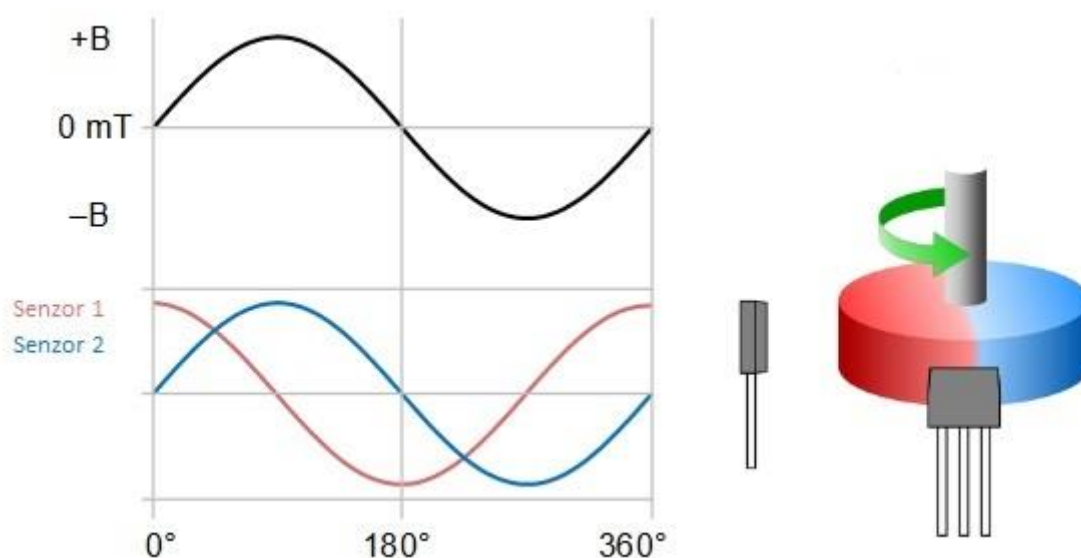
Efekt je otkriven još 1879. godine od strane Edwina Herberta Halla po kome je i dobio ime. Hallov efekt se najprije proučavao na vodljivim materijalima, koje karakterizira veliki broj nosilaca električnog naboja (elektrona), a koji su slabo pokretljivi. Zbog navedenih svojstava vodljivih materijala, Hallov učinak je bio skoro pa zanemariv. Daljna istraživanja vezana uz Hallov efekt pojačano su se širila značajnijim razvojem poluvodiča. Specifičnost poluvodiča je ta da su nosioci električnog naboja kod njih i elektroni i šupljine. U vanjskom električnom polju šupljine se gibaju u suprotnom smjeru od elektrona i nose pozitivan naboj. Samim time i sila koja djeluje na šupljine jednaka je Lorentzovoj sili koja djeluje na elektrone, ali je suprotnog smjera djelovanja. Rezultat djelovanja sile na elektrone i na šupljine bit će skupljanje negativnog naboja na jednoj strani poluvodiča te skupljanje pozitivnog naboja (od šupljina) na suprotnoj strani poluvodiča. Samim time i izlazni Hallov napon bit će značajniji od napona koji se inducira kod čistih, vodljivih materijala.

Primjena Hallovih senzora za mjerenje brzine vrtnje uključuje različite izvedbe, od senzora za mjerenje brzine vrtnje kotača na biciklu pa do mjerenja brzine vrtnje elektromotornih pogona. Osim navedenih, postoje senzori tlaka i protoka čiji se rad zasniva na Hallovom učinku. Mjerenje struje kroz strujni krug također je moguće izvesti na principu Hallovog učinka.

2.3.2. Magnetski enkoder temeljen na Hallovom učinku

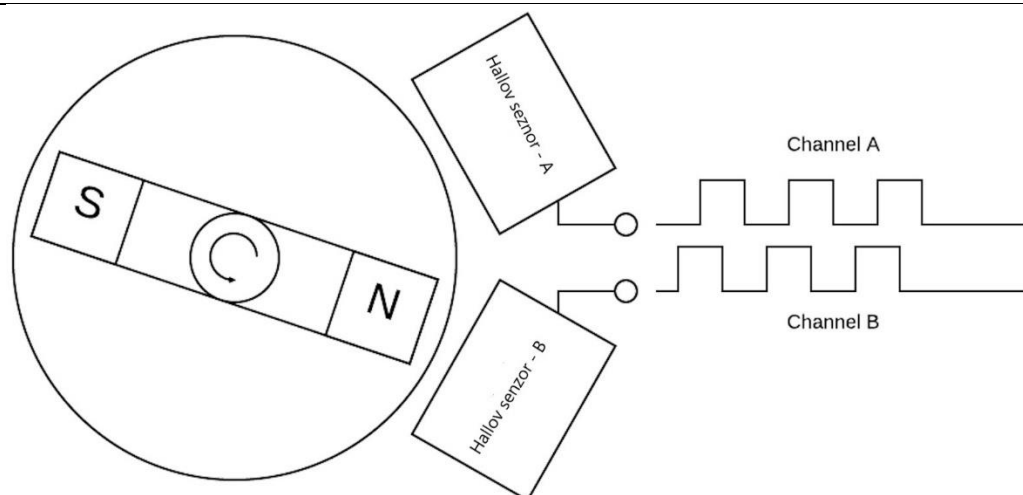
Magnetski enkoderi su beskontaktni senzori pozicije, odnosno brzine vrtnje vratila elektromotora, često korišteni u strojevima za automatizaciju te servo sustavima.

Sam princip rada im se temelji na Hallovom učinku. Inducirani Hallov napon na senzoru najveći je u trenutku kada je pozitivan (ili negativan) pol magneta točno iznad Hallovog senzora, dok se udaljavanjem magnetskog pola od senzora inducirani napon smanjuje po sinusoidalnom obliku. Samom analizom i obradom izlaznih signala kod linearnih Hallovih senzora se dobiva trenutna pozicija vratila elektromotora te njegova brzina vrtnje. Na slici 6. prikazani su izlazni signali dva linearna Hallova senzora u ovisnosti o položaju magneta. Hallovi senzori međusobno su okomito postavljeni.



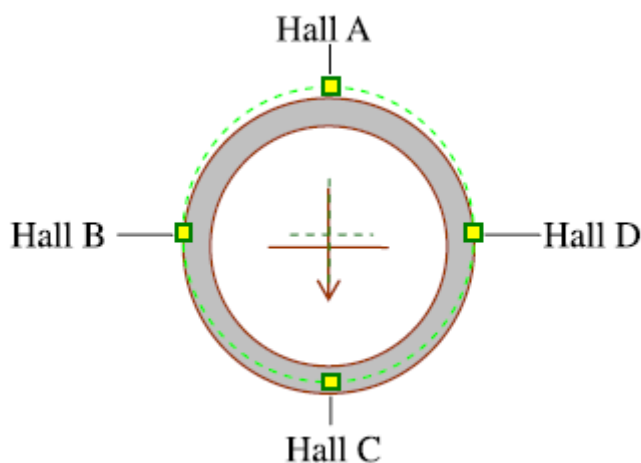
Slika 6. Izlazni signali linearnog Hallovog senzora [4]

Slično kao i kod optičkih inkrementalnih enkodera, izlazni signali digitalnih Hallovih senzora pravokutnog su oblika. Za razliku od linearnih Hallovih enkodera za koje je praktički dovoljan samo jedan senzor, kod digitalnih Hallovih senzora potrebna su barem dva senzora kako bi se iz njihovog međusobnog odnosa mogao dobiti podatak o brzini i smjeru vrtnje vratila elektromotora.



Slika 7. Izlazni signali digitalnih Hallovih senzora

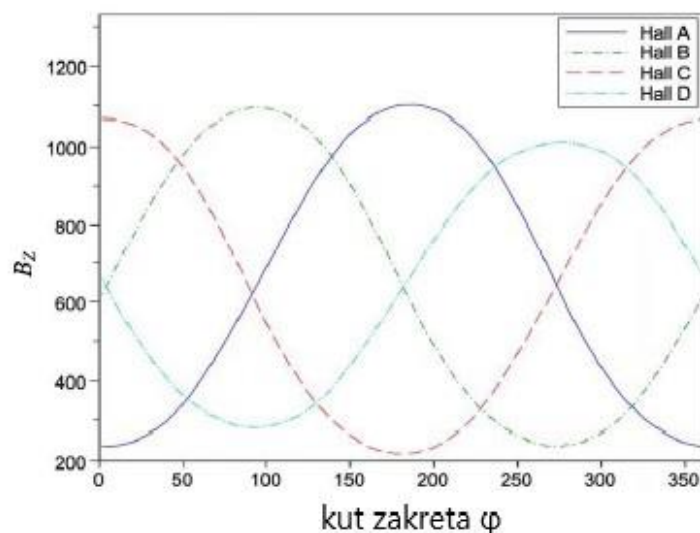
Kako se kod magnetskih enkodera magnet najčešće rotira zajedno s vratilom elektromotora (dok je Hallov senzor statičan), dolazi do razlika u amplitudama izlaznih signala kod linearnih magnetskih enkodera. Do navedenih problema dolazi zbog nekolinearnosti između vratila elektromotora i magneta (magnetnog prstena) koji se stavlja na vratilo što dovodi do određenog ekscentriciteta između vratila i magneta. Navedeni problem i ne bi imao prevelikog utjecaja kada bi bio postavljen samo jedan Hallov senzor, međutim, kako je već i napisano, obično se oko magneta postavlja nekoliko Hallovih senzora zbog bolje aproksimacije brzine vrtnje elektromotora. Zbog ekscentriciteta magnet je bliži jednom senzoru nego što je drugom (slika 8.), a kako je inducirani Hallov napon tim veći što je magnet bliži Hallovom senzoru, dolazi do razlika u amplitudi izlaznih signala.



Slika 8. Ekscentricitet magneta i vratila elektromotora [5]

U eksperimentalnom istraživanju iz [4] ekscentricitet između magneta i vratila elektromotora iznosio je 1,6 mm. Navedena vrijednost ekscentriciteta dovela je i do različitih vrijednosti amplituda magnetske indukcije B u svakom od četiri Hallova senzora (slika 9). Iako

amplitude nisu značajno različite, kod npr. robotskih ruku i ta mala razlika između amplituda može činiti veliku razliku u samoj točnosti robota.



Slika 9. Razlika u amplitudama magnetske indukcije kod Hallovihi senzora [5]

2.4. Usporedba opisanih senzora

Kako je već i spomenuto, optički enkoderni (davači), rezolverti te Hallovi senzori najčešće su korišteni senzori za mjerenje brzine vrtnje vratila elektromotora. U tablici 1. dana je usporedba performansi za sva tri navedena tipa mjernih pretvornika brzine vrtnje. Osim slabije rezolucije, u svim drugim segmentima Hallovi su senzori, ako ne boljih, makar jednako dobrih svojstava kao i ostali senzori.

Tablica 1. Usporedba različitih senzora brzine vrtnje

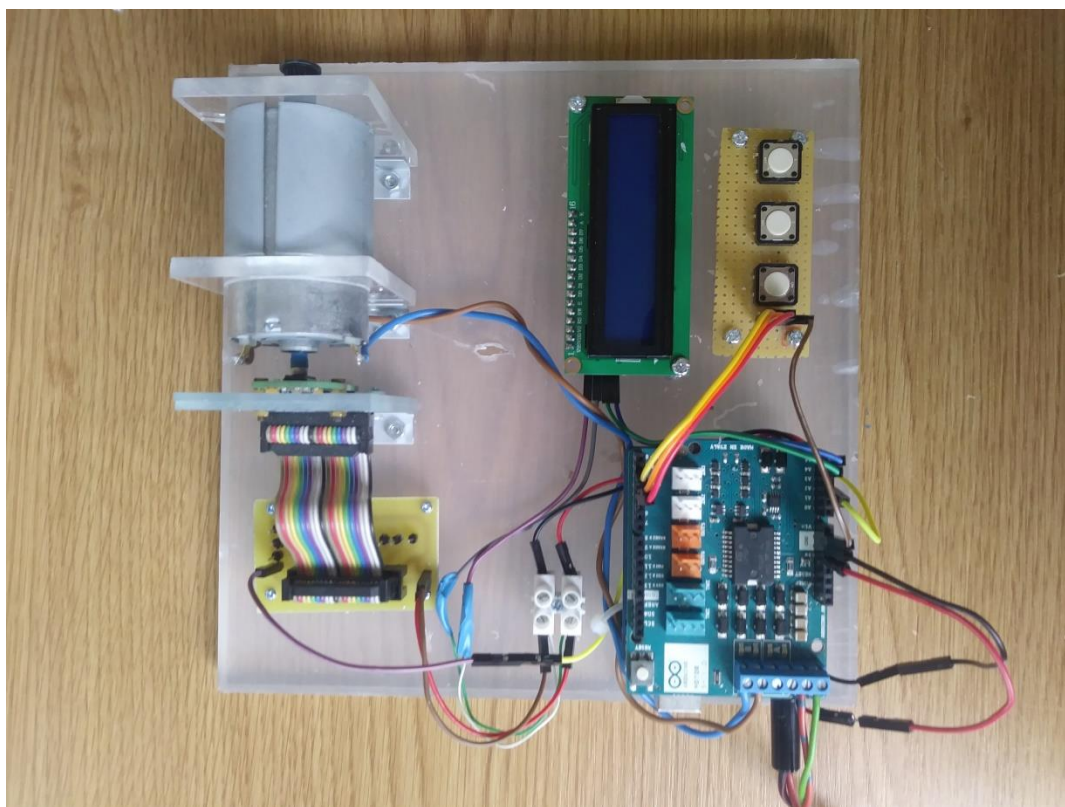
	Optički enkoder	Rezolver	Hallovi senzori
Osjetljivost na udare	Visoka	Niska	Niska
Osjetljivost na vibracije	Visoka	Niska	Niska
Osjetljivost na masnoću, prašinu...	Visoka	Niska	Niska
Veličina	Veliki	Veliki	Vrlo mali
Masa	Srednja	Velika	Vrlo mala
Rezolucija	Izrazito visoka	Visoka	Niska
Nužnost skale	Da	Ne	Ne
Cijena	Vrlo visoka	Srednja	Vrlo niska

3. OPIS MJERNOG SUSTAVA

Eksperimentalni postav za mjerenje i regulaciju brzine vrtnje istosmjernog motora prikazan je na slici 10., a sastoji se od:

- Istosmjerni motor s permanentnim magnetima (RS-555PH-18200, Mabuchi motors)
- Magnetski apsolutni enkoder (AM4096, RLS)
- Arduino Motorshield
- Mikrokontroler Arduino Uno
- Međusklop za povezivanje Arduina Uno i magnetskog enkodera.

U nastavku poglavlja bit će opisana svojstva i uloga svake od gore nabrojane komponente.



Slika 10. Eksperimentalni postav

3.1. Istosmjerni motor

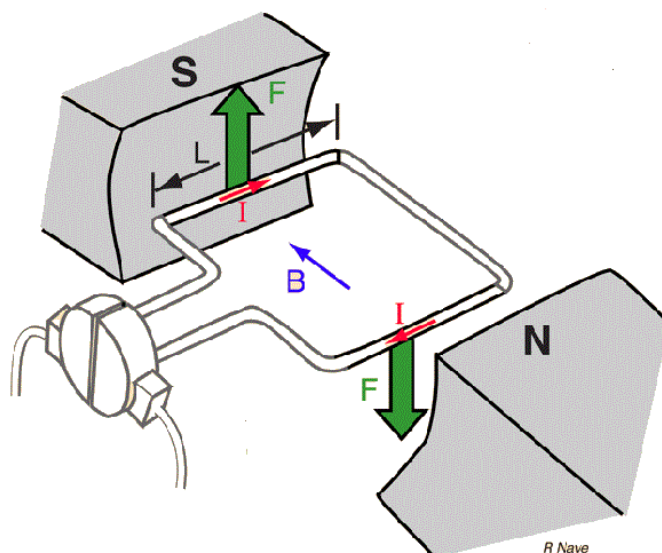
Općenito govoreći, električni motori su uređaji koji pretvaraju električnu energiju u mehaničku. Ako pritom motori koriste istosmjerni izvor napajanja govorimo o istosmjernim (električnim) motorima. Postoje razne izvedbe istosmjernih motora. Oni male snage i malih dimenzija mogu se naći u raznim igračkama, dok s druge strane, postoje i veliki istosmjerni

elektromotori koji se koriste u raznim dizalima, tramvajima, električnim biciklima, mlinovima i slično.

Jednostavnije upravljanje i regulacija brzine vrtnje elektromotora, uz veći okretni moment kod istih dimenzija motora (u usporedbi sa izmjeničnim elektromotorima), glavne su prednosti istosmjernih elektromotora. Upravo zbog navedenog istosmjerni se elektromotori pretežito koriste kod proizvodnje dizala, tramvaja i slično.

Svaki se motor sastoji od dva ključna dijela: statora i rotora. Stator je dio elektromotora koji je, kako se i iz naziva zaključuje stacionaran, te je njegova osnovna uloga da stvara magnetno polje koje omogućuje rotaciju rotora elektromotora.

Jednostavan istosmjerni motor (slika 11.) na svom statorskom dijelu ima par magneta dok rotor čini namotaj žice od vodljivog materijala kroz koji prolazi struja.



Slika 11. Osnovni istosmjerni motor [8]

Načelo rada istosmjernih motora temelji se na osnovnim fizikalnim pojavama. Kada kroz električni vodič u magnetskom polju protječe električna struja, na vodič djeluje sila F čiji se iznos računa prema izrazu (3) :

$$F = B \cdot I \cdot l, \quad (3)$$

gdje je:

- B magnetska indukcija
- I jakost struje koja protječe kroz vodiče
- l duljina električnog vodiča koji se giba u magnetskom polju.

Kako je hvatište sile koja djeluje na vodič izvan osi rotacije rotora, stvara se moment koji zakreće rotor elektromotora.

Na krajevima vodiča se inducira električni napon U čija je jakost proporcionalna magnetskoj indukciji B , duljini vodiča l i brzini gibanja vodiča u magnetskom polju v , prema izrazu (4) :

$$U = B \cdot l \cdot v, \quad (4)$$

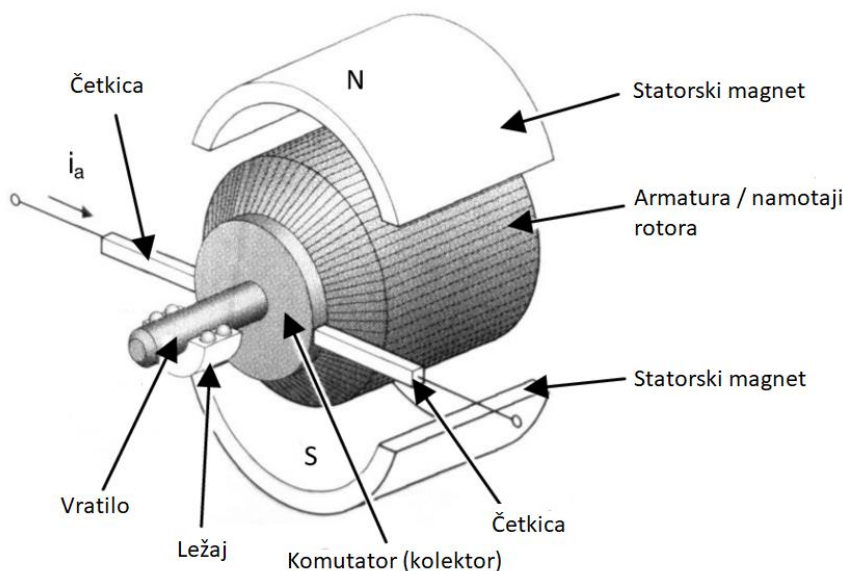
3.1.1. Tipovi istosmjernih elektromotora

Iako je princip rada svakog elektromotora jednak bez obzira na vrstu istog, postoji više izvedbi elektromotora. Tako postoje istosmjerni motori s četkicama te istosmjerni motori bez četkica. U nastavku će biti pobliže opisana svaka od grupa te glavne prednosti i nedostaci.

3.1.1.1. Istosmjerni motori sa četkicama (kolektorski motori)

Kako je i spomenuto, prvotna verzija istosmjernog (DC) motora bila je ona s četkicama. Osim četkica, komutator (kolektor) je također svojstven ovom tipu elektromotora.

Elektromotor s četkicama (slika 12.) ima dvije grafitne četkice koje su postavljene jedna nasuprot drugoj. Preko četkica, koje kližu po komutatoru, se motoru dovodi električna struja. Komutator je dio rotora motora po kojem klize četkice. Najčešće je napravljen kao skup bakrenih, međusobno izoliranih lamela. Kraj svakog namota armature spojen je na jednu od lamela te se na taj način preko četkica koje kližu po komutatoru armaturi elektromotora dovodi struja.



Slika 12. Istosmjerni motor sa četkicama

Kada četkice prelaze s jedne lamele kolektora na drugu dolazi do promjena polariteta struje kroz armaturni namot. Pritom dolazi do iskrenja četkica što dovodi do laganog uništavanja grafitnih četkica, ali i do oksidacije i trošenja komutatora. Upravo je to glavni nedostatak ovih

motora. Bez obzira na sve prostranjeniju upotrebu beskolektorskih motora, kolektorski motori još uvijek pronalaze primjenu u raznim kranovima, printerima i slično.

3.1.1.2. Istosmjerni motori bez četkica (beskolektorski motori)

Kao što i sam naziv „beskolektorski“ motori govori, ovaj tip elektromotora nema kolektora odnosno komutatora. Umjesto njega, kod ovakvih je motora zamjena namotaja kroz koji teče struja ostvarena elektroničkim putem i to naizmjeničnim, vremenski precizno definiranim intervalima, u kojima se propušta struja kroz određeni namot statora elektromotora. Kako ovakvi motori nemaju kolektora, a samim time ni četkica, ne dolazi do iskrenja i trošenja četkica što je glavna prednost beskolektorskih elektromotora u odnosu na one s kolektorom.

Stator elektromotora sastoji se od stoga željeznih lamela s namotajima žica oko lamele. Broj namotaja može biti različit te s obzirom na njegov broj imamo različit broj polova motora. Kako je već i opisano, kroz određene statorske namote se propušta struja u točno određenim intervalima s obzirom na brzinu i smjer vrtnje elektromotora.

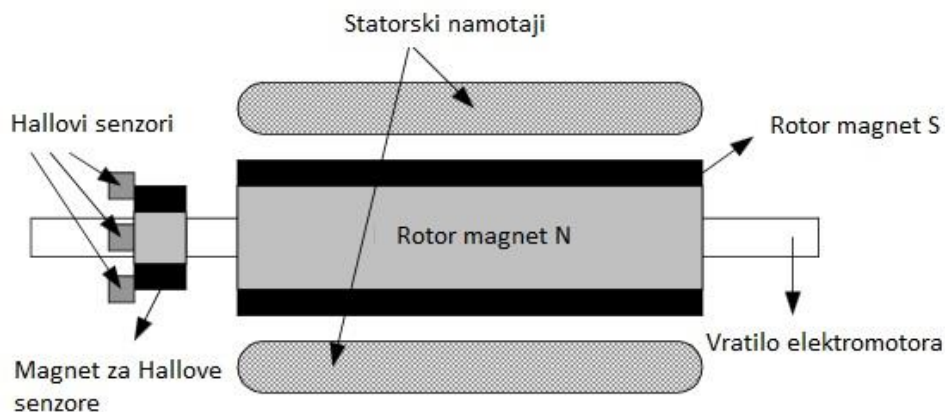
Rotor elektromotora nije ništa drugo nego permanentni magnet koji može imati od dva do osam pari polova sa sjevernim (N) i južnim (S) polom. S obzirom na potrebnu gustoću magnetskog polja odabire se i materijal od kojeg će rotor biti napravljen. Najčešći rotori su oni neodimijski (Nd), samarij – kobalski (SmCo) te oni s legurama neodimija, željeza i bora (NdFeB).

Neke od izvedbi rotora prikazane su na slici 13.



Slika 13. Poprečni presjek rotora BLDC elektromotora [10]

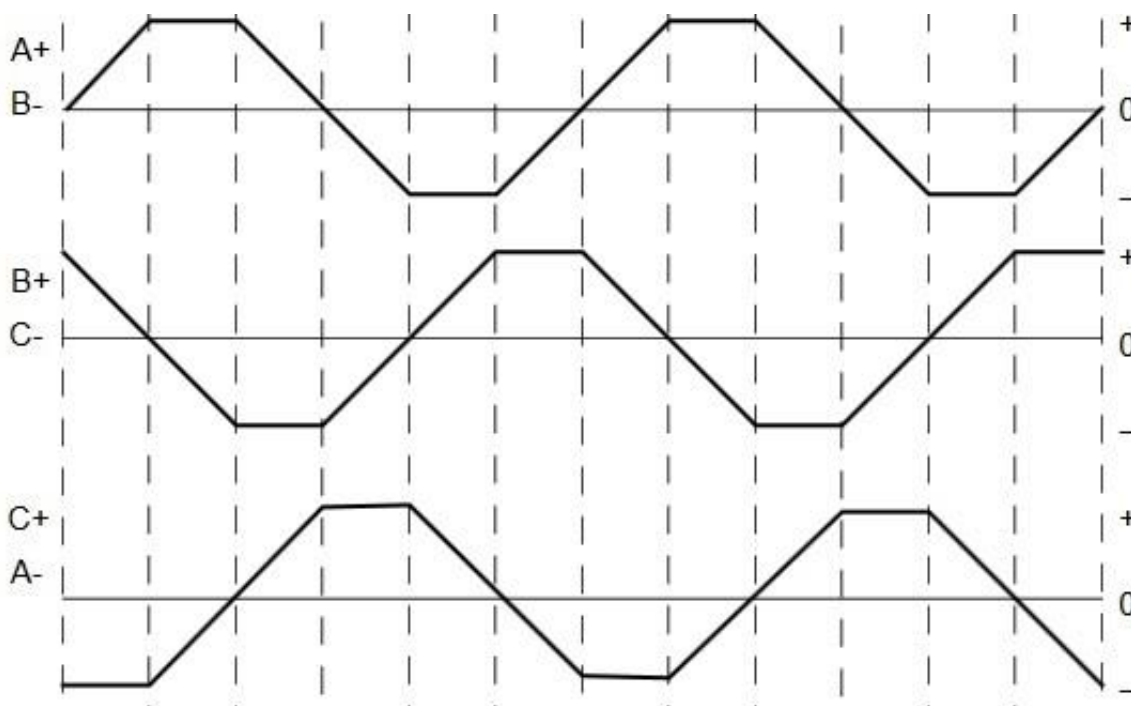
Kako bi upravljačka jedinica znala kroz koje namote statora elektromotora treba u kojem trenutku propustiti struju, ista mora znati i koja je trenutna pozicija vratila elektromotora. Za detektiranje kuta zakreta najčešće se koriste Hallovi senzori (slika 14).



Slika 14. Aksijalni poprečni presjek BLDC elektromotora [10]

Kako je opisano u poglavlju 2.3.2, iz daljnje analize i obrade izlaznih signala Hallovih senzora može se izraziti trenutna pozicija vratila elektromotora koja se prosljeđuje do jedinice koja određuje u kojem se trenutku i kroz koji namot propušta struja.

Osim izvedbe s Hallovim sensorima, poziciju vratila elektromotora moguće je odrediti i iz tzv. elektromotorne sile koja se inducira u namotajima motora. Za slučaj elektromotora koji ima tri para namotaja žice na statoru (označenima s A, B i C), valni oblik iz kojeg se daljnom analizom može dobiti pozicija vratila prikazan je na slici 15.



Slika 15. Valni oblici elektromotorne sile [10]

3.1.2. Režimi rada elektromotora

U ovisnosti o tome kakav je, odnosno je li uopće na izlazno vratilo elektromotora spojen teret, razlikujemo različite režime rada elektromotora:

- prazni hod,
- kratki spoj,
- motorski ili generatorski režim rada.

3.1.2.1. Prazni hod

Prazni hod je pogonsko stanje u kojem je stroj (elektromotor) uzbuđen te se slobodno vrti bez tereta na vratilu elektromotora. Iako elektromotor nije opterećen, u armaturnom se namotu inducira elektromotorna sila.

Bez obzira na to što prilikom rada elektromotora u režimu praznog hoda nema vanjskog tereta koji elektromotor treba pogoniti, motor treba razviti dovoljno veliki moment za savladavanje gubitaka trenja i ventilacije, gubitke u statorskom namotu u praznom hodu te gubitke u željezu statora.

Kako je struja armature praznog hoda mala, mjerenje konstante elektromotorne sile K_e izvodi se u pokusu praznog hoda prilikom čega se zanemaruje pad napona na motoru izazvan unutarnjim otporom motora.

3.1.2.2. Kratki spoj

Kratki spoj je režim rada elektromotora kada se vratilo elektromotora na neki način zakoči, bilo mehaničkim kočnicama ili se pak optereti tolikim teretom koji elektromotor ne može pokrenuti. Pritom je cijelo vrijeme na stezaljke elektromotora spojen izvor napona te strujnim krugom teku velike struje.

Pokus kratkog spoja izvodi se na sličan način kao i pokus praznog hoda. Osim mjerenja električne snage P_k , napona U te struje kratkog spoja I_k , mjeri se još i okretni moment na vratilu elektromotora T_k .

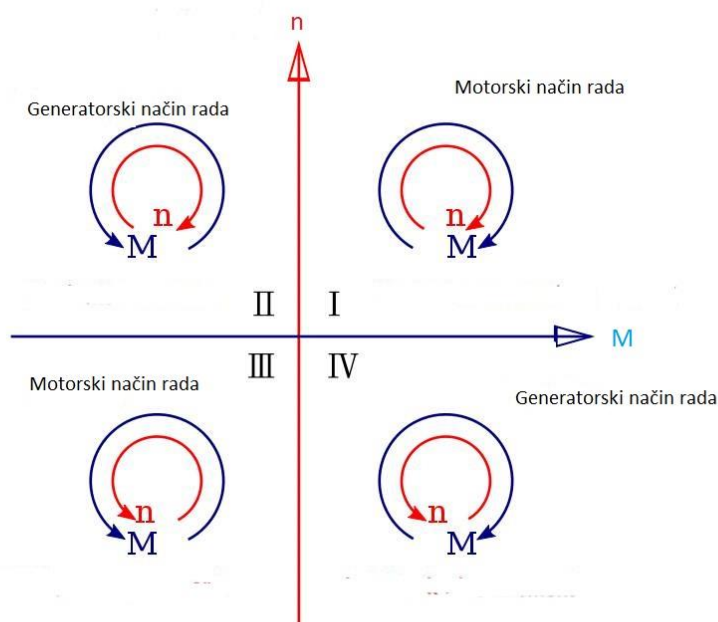
Glavni problem kod izvođenja pokusa kratkog spoja je taj što su struje koje se javljaju znatno veće od onih koje se javljaju prilikom normalnog rada motora što dovodi do značajnijeg i brzog zagrijavanja motora. Kako visoke temperature mogu uništiti motor, pokus kratkog spoja se izvodi počevši s najvećim narinutim naponom pa se smanjuje prema nuli (jer se s većim naponom javlja i veća struja kratkog spoja). Iz pokusa kratkog spoja moguće je dobiti konstantu momenta motora K_M što će biti i objašnjeno u radu.

3.1.2.3. Motorski ili generatorski režim rada

Osnovna zadaća elektromotora je pretvorba električne energije u mehaničku. Međutim, svaki elektromotor može raditi i obratno, tj. može mehaničku energiju pretvarati u električnu te se ponašati kao generator. Također, vratilo elektromotora može se zakretati u smjeru kazaljke na satu kao i u smjeru suprotnom kazaljci na satu. Uzevši sve moguće varijante gore opisanih slučajeva, rad elektromotora možemo promatrati kroz takozvani četverokvadratni režim rada (slika 16). Spomenuti režim rada elektromotora može se prikazati i koordinatnim sustavom, gdje se na osi apscisa nalazi moment tereta koji je proporcionalan struji koja prolazi kroz statorske namote, dok se na osi ordinata nalazi broj okretaja elektromotora koji je proporcionalan narinutom naponu napajanja motora.

Dakle, kada se vratilo elektromotora okreće u istom smjeru u kojem djeluje i moment tereta (prvi i treći kvadrant), motor radi u motorskom režimu rada prilikom čega se električna energija dovedena motoru pretvara u mehaničku energiju. Kao primjer može se uzeti podizanje dizala.

U drugom i četvrtom kvadrantu je smjer vrtnje elektromotora suprotan momentu tereta. Elektromotor u takvim režimima rada koči teret (npr. spuštanje lifta). Prilikom kočenja elektromotora je inducirana elektromotorna sila u motoru veća od narinutog napona te se u tom slučaju mehanička energija pretvara u električnu što elektromotor pretvara u svojevrsni generator.



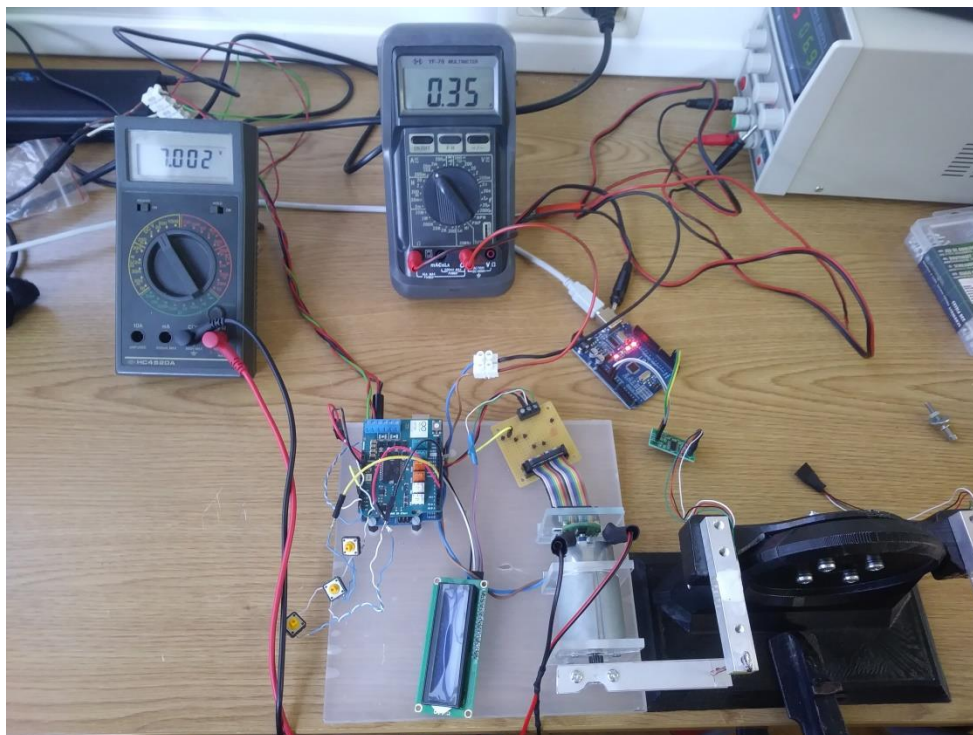
Slika 16. Četverokvadratni režim rada motora [12]

3.1.3. Istosmjerni motor korišten u eksperimentalnom postavu

U eksperimentalnom djelu ovog završnog rada koristio se motor proizvođača *Mabuchi motors*. Otpor i induktivitet namotaja motora izmjereni su RLC metrom, a izračunavanje faktora pojačanja inducirane elektromotorne sile izvođeno je za mjerenja kod različitih brzina vrtnje te se uzimala srednja vrijednost svih dobivenih rezultata.

3.1.3.1. Određivanje konstante momenta motora K_m

Za eksperimentalno određivanje konstante momenta motora napravljen je postav prikazan na slici 17. Postav se sastoji od izvora istosmjernog napona, ampermetra spojenog u seriju koji mjeri struju armature te voltmetra paralelno spojenog na stezaljke motora. Osim navedenog, za određivanje okretnog momenta koji razvija motor korištena je i tenzometarska vaga koja je preko poluge bila spojena sa vratilom elektromotora.



Slika 17. Postav za mjerenje konstante momenta K_m

Proces mjerenja je tekao na taj način da se motor početno napajao istosmjernim naponom od 4 V te se pritom mjerio napon i struja armature. Na Arduino Uno bila je spojena spomenuta tenzometarska vaga te se preko nje očitavao iznos mase kojom poluga spojena na vratilo elektromotora djeluje na tenzometarski senzor. Izračunavanjem sile iz dobivene mase, te množenjem dobivene sile sa duljinom poluge, dobio se okretni moment iz kojeg se preko izraza:

$$K_m = \frac{T}{I_a} \quad (5)$$

dobiva tražena konstanta momenta motora. Postupak je ponovljen za različite vrijednosti napona napajanja motora te je kao konačni rezultat uzeta srednja vrijednost izmjerenih veličina koja u ovom slučaju iznosi $K_m = 0,075276 \text{ Nm/A}$.

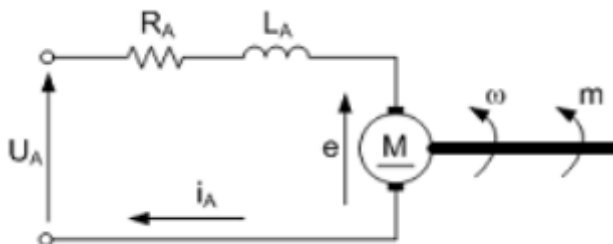
Podatci o korištenom modelu dani su u tablici 2.

Tablica 2. Karakteristike korištenog motora

Napon napajanja	12 V
R_a	43,4 Ω
L_a	14,7 mH
Struja praznog hoda	40 mA
K_e	0,076537 Vs/Rad
K_m	0,075276 Nm/A
Promjer izlaznog vratila	3,0 mm
Duljina izlaznog vratila	10,50 mm
Duljina motora	57 mm
Širina motora	37,50 mm
Masa	36 g

3.1.4. Dinamički model istosmjernog motora

Istosmjerni elektromotor sa permanentnim magnetima može se prikazati preko nadomjesne sheme elektromotora (slika 18).



Slika 18. Nadomjesna shema istosmjernog motora

Primjenjujući prvi Kirchoffov zakon na nadomjesnu shemu motora dolazimo do jednačbe

$$u_a(t) = i_a(t)R_a + e(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (6)$$

Vrijednost induciranoeg elektromotornog napona iz prošlog izraza može se zapisati i prema izrazu:

$$e(t) = K_e \omega(t) \quad (7)$$

Mehanički dio sheme može se prikazati jednadžbom ravnoteže momenata koristeći Newtonove jednadžbe:

$$m_m(t) = m_t(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (8)$$

Razvijeni okretni moment m_m dobiva se preko izraza:

$$m_m(t) = K_m i(t) \quad (9)$$

gdje su:

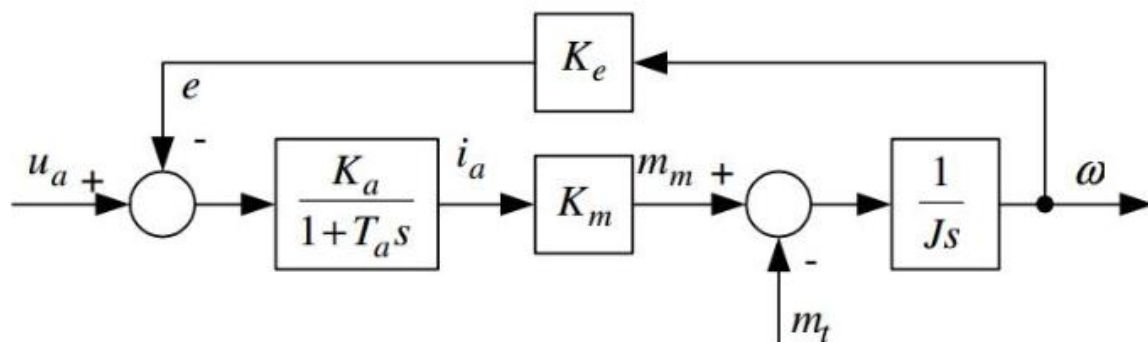
- u_a napon armature istosmjernog motora
- R_a nadomjesni električni otpor namota armature
- e inducirani elektromotorni napon
- L_a nadomjesni induktivitet namota armature
- K_e Konstanta pojačanja elektromotorne sile
- ω kutna brzina vratila elektromotora
- m_m razvijeni okretni moment
- m_t moment tereta
- J inercija
- K_m konstanta momenta.

Iz prethodne četiri jednadžbe se Laplaceovom transformacijom dobivaju izrazi na kojima se temelji izrada blokovskog dijagrama simulacijskog modela motora (slika 19.):

$$\frac{i_a(s)}{u(s) - e(s)} = \frac{1}{R_a + L_a s} = \frac{K_a}{1 + T_a s} \quad (10)$$

$$e(s) = K_e \omega(s) \quad (11)$$

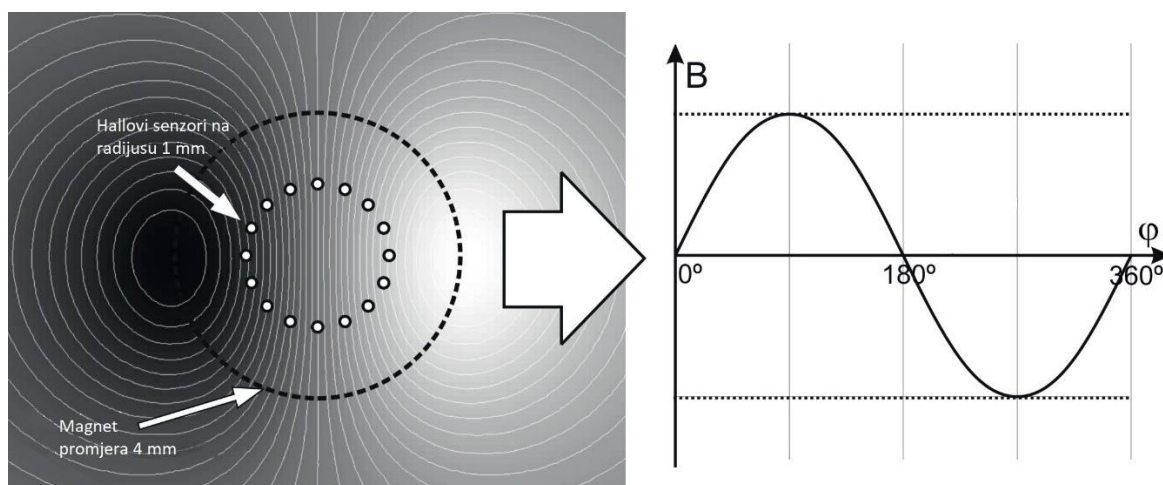
$$m_m(s) = m_t(s) + J\omega(s)s = K_m i(s) \quad (12)$$



Slika 19. Blokovski dijagram DC motora [13]

3.2. Magnetski enkoder AM4096

Magnetski enkoder AM4096 slovenskog proizvođača RLS bio je korišten u eksperimentalnom djelu ovog rada za detektiranje smjera i brzine vrtnje vratila elektromotora. Kako je i podrobnije spomenuto u odlomku 2.3.2, princip rada enkodera temelji se na Hallovom efektu gdje Hallovi senzori, kružno raspoređeni po kružnici radijusa 1 mm, detektiraju promjene gustoće magnetskog polja B te daje izlazne signale kao na slici 20.

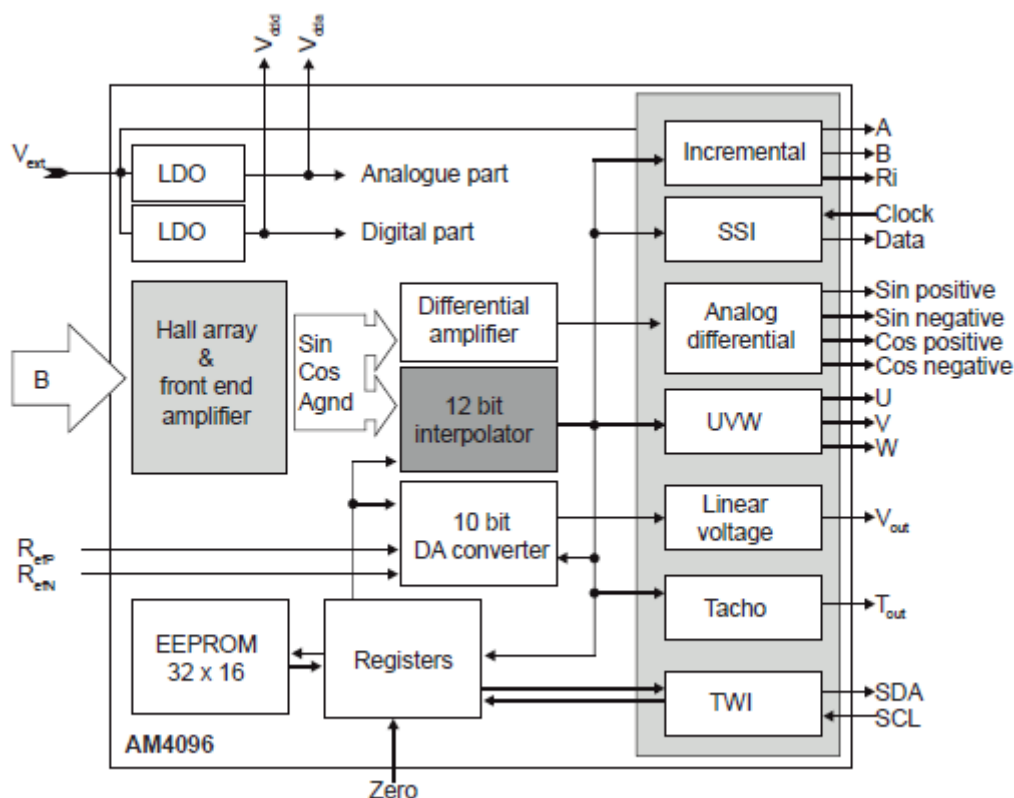


Slika 20. AM4096 raspored senzora te izlazni signal [14]

Kod maksimalne gustoće magnetskog polja, odnosno kada je pol magneta točno iznad Hallovog senzora, gustoća magnetskog polja otprilike iznosi 1 Tesla, a pritom je inducirani Hallov napon jednak otprilike 0,68 V. Stoga se izlazni signali najprije zbroje, a zatim pojačaju za daljnu upotrebu istih.

Od dobivenih sinusnih i kosinusnih izlaznih signala, pozicija vratila elektromotora dobije se preko 12-bitnog interpolatora. Kako je i prikazano na blokovskom dijagramu enkodera (slika 21.), magnetski enkoder emulira različite tipove izlaznih signala:

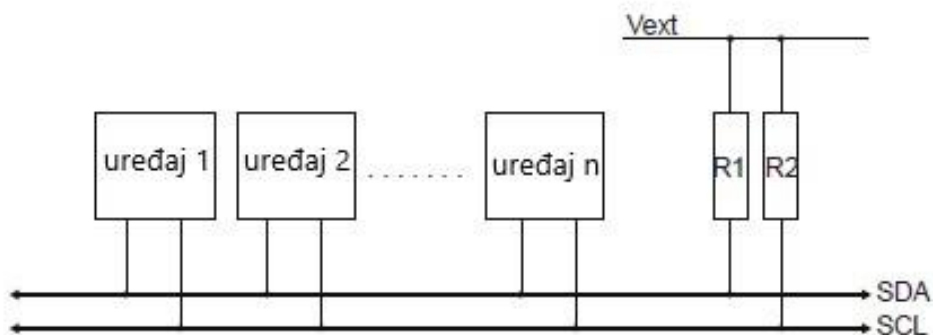
- Inkrementalni (signali A, B, Ri)
- Serijski SSI
- Serijski TWI (*two wire interface*)
- UVW komutatorski signali
- Analogni linearni napon



Slika 21. Blokovski dijagram AM4096 [14]

3.2.1. Programiranje čipa

Čip magnetskog enkodera se programira preko TWI (two-wire serial interface) protokola koji je kompatibilan sa I²C protokolom. TWI protokol dozvoljava istovremeno spajanje do 128 uređaja koji se mogu zasebno adresirati koristeći samo dvije linije; jednu za „clock“ signal (SCL), a drugu za prenošenje informacija (SDA). Vanjski pull – up otpornik za svaku od linija jedino je što se treba izvana dodati za komunikaciju preko TWI protokola (slika 22).



Slika 22. TWI protokol [14]

Prilikom komunikacije dva ili više uređaja preko TWI protokola, samo je glavnom (eng. *Master*) omogućeno upravljanje s obje linije, odnosno samo glavni uređaj može zatražiti početak i kraj prijenosa podataka između dva uređaja. Za razliku od glavnog uređaja, ostali imaju mogućnost samo slanja podataka preko SDA, odnosno Data linije, i to onda kad glavni uređaj zatraži isto. Svi podatci odaslani preko TWI protokola duljine su devet bitova, od čega osam bitova nose podatci koji se šalju dok je jedan bit, bit potvrde. Tijekom slanja podataka glavni uređaj generira CLOCK, START i STOP uvjete, dok je prijamni uređaj odgovoran za slanje potvrdnog signala za omogućavanje komunikacije.

Trenutak u kojem je SCL linija u visokom stanju, a SDA linija mijenja stanje iz visokog u nisko, označava START uvjet te u tom trenutku počinje prijenos podataka između uređaja. Nakon što je detektiran START uvjet, slijedi 7 – bitna adresa uređaja s kojim se omogućava komunikacija. Bit koji slijedi nakon adrese „podređenog“ uređaja je bit koji govori u kojem se smjeru odvija komunikacija te u ovisnosti o tome ili glavni (Master) uređaj ili „podređeni“ (Slave) uređaj šalje 8 bitne podatke po SDA liniji. Prijamni uređaj po zaprimanju podataka potvrđuje da je iste primio. Prijenos podataka se zaustavlja kad glavni uređaj pošalje STOP uvjet kojeg karakterizira prijelaz iz niskog u visoko stanje na SDA liniji, pri čemu je SCL linija u visokom stanju. Ako „podređeni“ uređaj u trenutku prispjeća podataka poslanih od glavnog uređaja iste ne može zaprimiti jer obavlja neke druge funkcije, on može držati SCL liniju u niskom stanju te na taj način forsira glavni uređaj da uđe u stanje čekanja.

Magnetski enkoder AM4096 se ponaša kao „podređeni“ uređaj te može primiti podatke od glavnog uređaja, ali ih može i odašiljati prema glavnom uređaju. Tvornička adresa enkodera je 00h, a ista se može i mijenjati od uređaja do uređaja. Funkcionalnost enkodera se može programirati na adresama danim u tablici 3. i to preko riječi duljine 16 bitova.

Tablica 3. Adrese magnetskog enkodera

Adresa	Funkcija
00 – 31	Čitaj / piši EEPROM
32 – 35	Čitaj iz registara za čitanje izlaznih podataka enkodera
40 – 41	Piši u registre za tvornički reset
48 – 55	Čitaj / piši registre sa postavkama

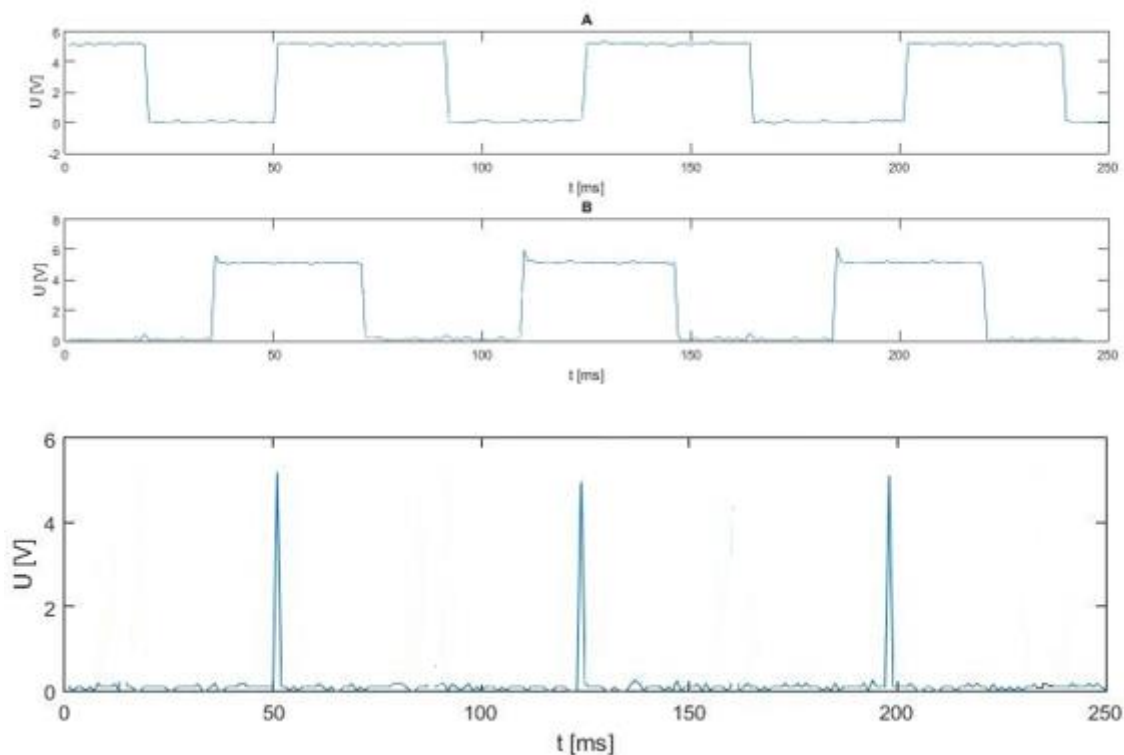
Kako tijekom izrade završnog rada programator za enkoder nije bio dostupan, u tablici 4. su dane naredbe kojima se čitaju podatci o stanju enkodera, dok naredbe koje se koriste za programiranje samog enkodera nisu priložene.

Tablica 4. Naredbe za čitanje podataka

Naredba	Rezolucija (u bitovima)	Informacija koja se dobiva	Vrijednost
SRCH	1	Valjana vrijednost pozicije	0 = ispravna vrijednost 1 = neispravna vrijednost
Rpos	12	Informacija o relativnoj poziciji	0 = 0° 4095 = 360°
Apos	12	Informacija o apsolutnoj poziciji	0 = 0° 4095 = 360°
Weh	1	Udaljenost magneta prevelika	0 = udaljenost je dobra 1 = udaljenost prevelika
Wel	1	Udaljenost magneta premala	0 = udaljenost je dobra 1 = udaljenost premala
Thof	1	Brzina prevelika za Tacho	0 = brzina je dobra 1 = brzina izvan dosega
Tho	10	Tacho izlazna vrijednost	0 = 0 1023 = najveća moguća brzina

3.2.2. Inkrementalni izlazi

Magnetski enkoder osim navedenih, ima i tri inkrementalna izlaza: A, B i Ri. Na slici 23. prikazani su inkrementalni signali prilikom brzine vrtnje vratila elektromotora od 810 min^{-1} . A i B signali su kvadratni signali, međusobno pomaknuti za 90° , dok je Ri referentni signal koji odlazi u visoko stanje prilikom prolaska magneta, a time i vratila elektromotora, kroz nultu poziciju. Vremenski period u kojem je referentni Ri signal u visokom stanju jednak je četvrtini perioda kvadratnih signala A i B te je sinkron s njima. Opisani magnetski enkoder daje četiri impulsa po okretaju, dok je minimalno vrijeme između dva impulsa limitirano interpolatorom, odnosno minimalno vrijeme ovisi o rezoluciji interpolatora koja je podesiva od 32 do 4096 bitova. Kada je smjer vrtnje vratila elektromotora jednak smjeru kazaljke na satu, signal B prethodi signalu A.



Slika 23. Inkrementalni signali A, B, Ri

3.3. Mikrokontroler Arduino Uno

Kako je Arduino platforma jedna od najpoznatijih „open – source“ platformi za izradu elektroničkih prototipova, za upravljanje i regulaciju brzine vrtnje istosmjernog motora u ovom je radu korišten upravo Arduino i to Arduino Uno mikrokontroler (slika 24).



Slika 24. Arduino Uno [15]

„Mozak“ cijele Arduino Uno pločice je Atmega328 mikrokontroler koji se programira korištenjem Arduino IDE sučelja te se preko USB kabela napisani kod implementira u mikrokontroler. Za lakše spajanje vanjskih uređaja te napajanja mikrokontrolera, izvodi samog mikrokontrolera izvučeni su na same krajeve pločice te spojeni na konektore na koje se zatim spajaju vanjski uređaji. Kako bi se lakše raspoznalo koji konektor čemu služi, kraj svakog od njih je napisano njegovo ime. S jedne strane pločice imamo „digitalni“ dio pločice na kojem se nalaze konektori za digitalne signale te za PWM signale. S druge strane pločice nalaze se konektori na koje se spaja napajanje pločice (i vanjskih uređaja) dok se pored dijela za napajanje nalazi i šest analognih konektora. Tehničke specifikacije dane su u tablici 5.

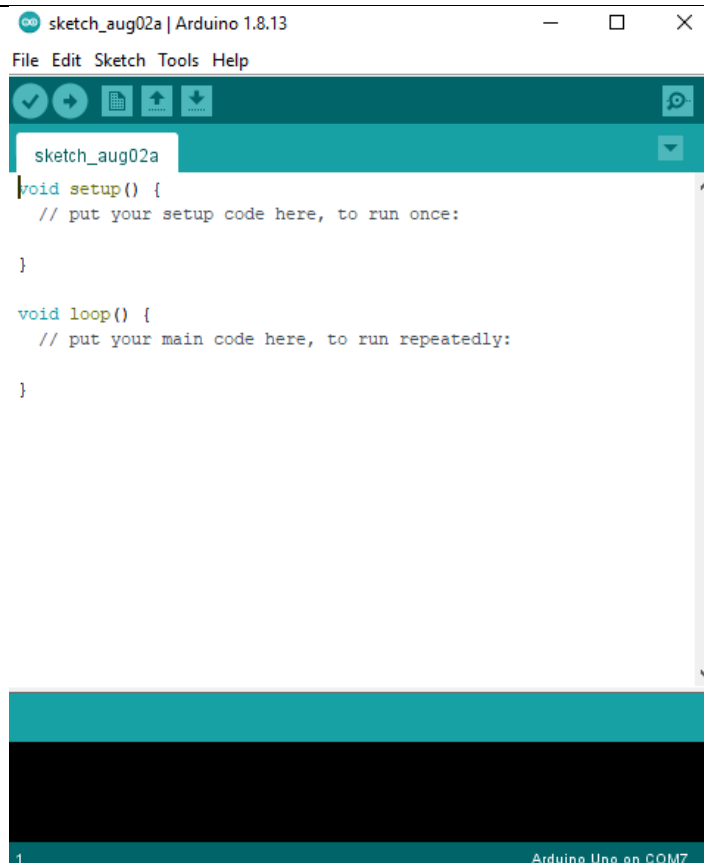
Tablica 5. Arduino Uno – tehničke specifikacije

Mikrokontroler	Atmega328P
Radni napon	5V
Preporučeni ulazni napon	7 – 12 V
Granični ulazni napon	6 – 20 V
Broj digitalnih ulazno / izlaznih pinova	14 (od kojih 6 ima mogućnost PWM izlaza)
Broj PWM pinova	6
Broj analognih ulaznih pinova	6
Istosmjerna struja po ulazno / izlaznom pinu	20 mA
Istosmjerna struja za 3,3 V pin	50 mA
Flash memorija	32 KB od koje je 0,5 KB korišteno za <i>bootloader</i>
EEPROM	1 KB
Frekvencija oscilatora	16 MHz
Ugrađena LED dioda	Pin 13
Duljina	68,6 mm
Širina	53,4 mm
Masa	25g

Za napajanje mikrokontrolera može se koristiti i USB kabel koji služi za serijsku komunikaciju s mikrokontrolerom. Osim USB kabela, na Arduino Uno pločici nalazi se i priključak za 5,5 / 2,1 *barrel* konektor te Vin i GND izvodi na koje se može jednostavno umetnuti žica od baterije / ispravljača te na taj način dovesti napajanje mikrokontroleru.

3.3.1. Arduino IDE sučelje

Kako bi sva spojena elektronika i uređaji izvršavali neki algoritam, potrebno je u sam mikrokontroler upisati kod. Za programiranje čipa moguće je koristiti više sučelja, međutim, u svrhu izrade završnog rada korišteno je Arduinovo IDE sučelje (slika 25). Program se piše u C++ programskom jeziku modificiranom za Arduino platformu.



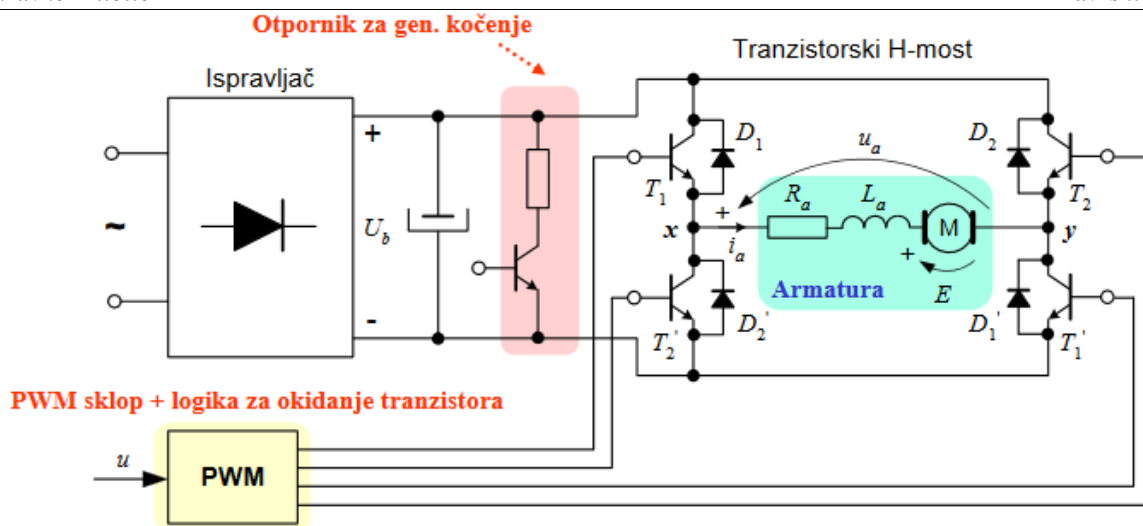
Slika 25. Arduino IDE sučelje

Sučelje se može podijeliti u više osnovnih dijelova. Gornji dio sačinjava alatna traka s izbornikom ispod koje se nalaze ikone za brže pristupanje često korištenim opcijama, dok je srednji dio sučelja namijenjen pisanju koda. U početnom dijelu koda inicijaliziraju se varijable, definiraju pinovi i slično, nakon čega slijedi pozivanje funkcije *void setup()* koja se pokreće samo jednom tijekom izvođenja programa. Nakon početne inicijalizacije svih parametara sustava, slijedi pozivanje funkcije *void loop()*. Kod upisan u funkciju periodički izvršava isprogramirane funkcije za razliku od koda koji je upisan u funkciju *setup()*.

Prije pokretanja prenošenja upisanog koda na mikroracunalo, u Arduino IDE sučelju potrebno je odabrati koja se Arduino pločica koristi (Uno, Mega...) te na koji se COM priključak računala ista spaja.

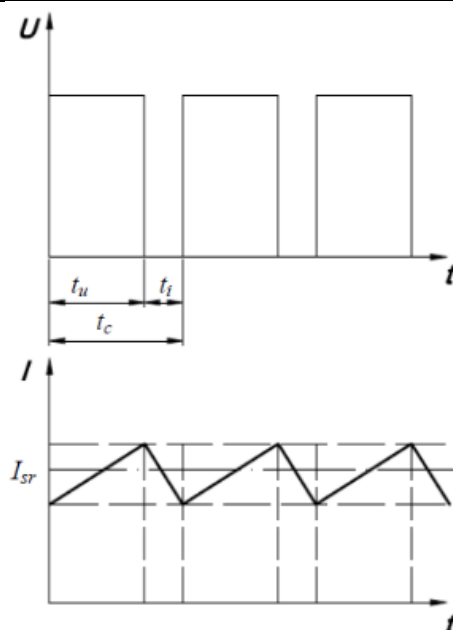
3.4. Tranzistorski frekvencijski pretvarač (Chopper)

Brzina vrtnje istosmjernog motora izravno ovisi o narinutom naponu na armaturu motora. Dakle, da bi se moglo upravljati naponom, a samim time i brzinom vrtnje vratila elektromotora, potreban je elektronički sklop koji ima mogućnost brze i precizne promjene napona. Takav elektronički sklop naziva se tranzistorski frekvencijski pretvarač (eng. *chopper*) čija je principijelna shema prikazana na slici 26.



Slika 26. Principijelna shema tranzistorskog frekvencijskog pretvarača [13]

Jezgra tranzistorskog pretvarača je H – most kojim se istosmjernom motoru privodi napon na armaturu. H – most radi u prekidačkom režimu rada (eng. *switching mode*), što znači da će i valni oblik napona na armaturi biti isprekidan (eng. *chopped*). Ovisno o tome koliko je armatura motora dugo uključena, odnosno isključena, mijenjat će se i srednji napon armature. Takvo upravljanje naponom, a u konačnici i brzinom vrtnje elektromotora, naziva se pulsno širinska modulacija (eng. *Pulse Width Modulation – PWM*). Željeni iznos napona na izlazu pretvarača zadaje se preko ulaznog (referentnog) signala PWM sklopa koji upravlja okidanjem pojedinih tranzistora u H – mostu (Arduino Uno u našem slučaju). Kako je rotor istosmjernog motora napravljen od namotaja žice koja se u strujnom krugu ponaša kao serijski spoj otpornika i zavojnice, to će uzrokovati kašnjenje struje armature za naponom armature.



Slika 27. Odnos napona i struje istosmjernog motora u PWM načinu rada

Isprekidani napon armature izravno dovodi do oscilacija u struji, a samim time i momenta motora. Za sprječavanje istog važno je da je frekvencija uključivanja i isključivanja pojedinih tranzistora H – mosta bude reda veličine nekoliko kHz. Srednja vrijednost napona armature računa se prema sljedećem izrazu:

$$U_{sr} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} u(t) dt = \frac{U_b \cdot t_u}{t_c} = d \cdot U_b \quad (13)$$

gdje je:

- U_{sr} srednja vrijednost napona armature
- t_c period cijelog PWM signala
- t_u vrijeme visokog stanja PWM signala
- U_b napon napajanja pretvarača
- d faktor popunjenosti.

Faktor popunjenosti d izražava se u postotcima, a definiran je kao omjer vremena u kojem je PWM signal u visokom stanju t_u i perioda trajanja cijelog PWM signala t_c :

$$d = \frac{t_u}{t_c} = \frac{t_u}{t_u + t_i} = 1 - \frac{t_i}{t_u + t_i} \quad (14)$$

gdje je t_i vrijeme niskog stanja PWM signala.

U osnovi postoje dvije osnovne izvedbe PWM modulacije za upravljanje istosmjernim motorom. Kod prve izvedbe se armatura elektromotora isprekidano napaja pozitivnim i negativnim dijelom napona napajanja. Stoga iznos faktora popunjenosti od 50% odgovara

srednjem naponu jednakom nuli (vratilo elektromotora se ne zakreće). Iznos faktora popunjenosti većeg od 50% rezultira vrtnjom vratila elektromotora u jednu stranu, dok vrijednost faktora popunjenosti manja od 50% rezultira vrtnjom vratila elektromotora u drugu stranu. Drugu izvedbu PWM modulacije karakterizira kretanje napona armature od nule do pozitivne vrijednosti napona napajanja za smjer vrtnje elektromotora u jednu stranu, dok kretanje napona armature od nule do negativne vrijednosti napona napajanja rezultira vrtnjom u drugom smjeru. Kako se u ovom slučaju faktorom popunjenosti ne može direktno upravljati i smjerom vrtnje vratila elektromotora, potreban je dodatni signal kojim će se određivati željeni smjer vrtnje.

3.4.1. Arduino motor shield sa L298P H – mostom

Za kontrolu brzine vrtnje istosmjernog motora korišten je službeni Arduinov motor shield koji je temeljen na L298P dvokanalnom H – mostu. Osim mogućnosti istovremenog upravljanja s dva istosmjerna motora, shield se može koristiti i za upravljanje relejima, solenoidima te koračnim motorima.



Slika 28. Arduino motor shield [16]

Od svih drugih značajki, Arduinov motor shield značajan je po tome što ima mogućnost direktnog mjerenja struje armature za svaki od dva kanala i to jednostavnim naredbom *analogRead()*. Za svaki od dva kanala H – mosta potrebno je koristiti po četiri pina što ukupno daje „potrošnju“ od osam pinova Arduino Uno pločice što ih čini neupotrebljivima za druge funkcije programa. Ukoliko nam mjerenje struje, odnosno funkcija kočnice za projekt nisu od ključne važnosti, ili nam pinovi koji nam tome služe trebaju za spajanje drugih komponenti, isti se mogu onemogućiti odspajanjem kratkospojnika na stražnjem dijelu shielda. Pinovi po kanalu kao i njihove funkcije dane su u tablici 6.

Tablica 6. Korišteni pinovi po kanalima

Funkcija	Korišteni pin za kanal A	Korišteni pin za kanal B
Smjer	D12	D13
PWM	D3	D11
Kočnica	D9	D8
Mjerenje struje	A0	A1

Postavljanjem pina koji određuje smjer vrtnje vratila elektromotora u visoku razinu (HIGH) postiže se smjer vrtnje u jednu stranu, dok se postavljanjem istog pina u nisku razinu (LOW) postiže okretanje vratila elektromotora u suprotnu stranu. Kao što je napisano u prethodnom odjeljku, brzina vrtnje vratila elektromotora postavlja se upisujući vrijednosti (0 – 255) na PWM pin u ovisnosti o tome na koji je kanal motor spojen. Postavljanjem pinova za kočnicu u visoku razinu dolazi do laganog kočenja vratila elektromotora koji se na kraju zaustavlja što je svakako bolji izbor od naglog odspajanja elektromotora s napajanja.

Tehničke karakteristike korištenog motor shielda dane su u tablici 7.

Tablica 7. Tehničke karakteristike motor shielda

Nazivni napon	5 – 12 V
H – most	L298P
Maksimalna struja	2A po kanalu
Pojačanje senzora struje	1,65 V/A

4. MJERENJA – EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Kao što je i navedeno u (3.2), korišteni magnetski enkoder ima više izlaznih signala čijom se analizom i obradom dobivaju informacije o brzini okretanja vratila elektromotora, struji koja teče kroz armaturu elektromotora, smjeru u kojem se okreće vratilo i slično.

Kako su inkrementalni izlazi magnetskog enkodera izrazito brzi signali, a upravljanje brzinom vrtnje vrši se preko Arduino platforme koja nema dovoljno veliku brzinu za očitavanje vrijednosti inkrementalnih signala, za detektiranje kuta zakreta vratila elektromotora, iz kojeg se kasnije dobiva trenutna brzina vrtnje elektromotora, koristio se analogni izlaz magnetskog enkodera (V_{out}) koji će biti opisan u nastavku rada. Na taj se način detektiranje brzine vrtnje vratila elektromotora izvelo pomoću značajnije jeftinijih komponenata, a pritom se dobila i zadovoljavajuća točnost.

Svaka od mjerenih veličina u izradi završnog rada će u nastavku biti detaljnije objašnjena.

4.1. Struja armature I_a

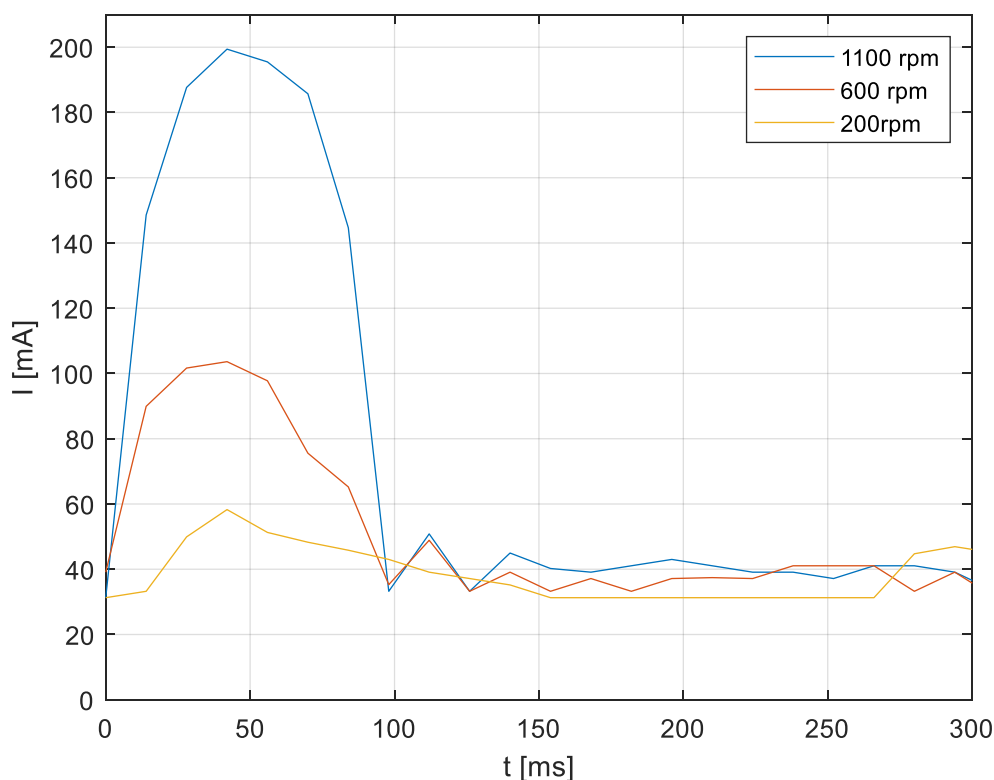
Korišteni chopper (H-most), detaljnije opisan u 3.4.1 ima mogućnost mjerenja struje armature motora spojenog na H-most.

Kako korišteni H-most ima mogućnost istovremenog upravljanja dvama istosmjernim elektromotorima, postoje i dva pina kroz koje se očitava struja kroz pojedini elektromotor, a koji ovisi o kanalu na koji je elektromotor spojen (tablica 6).

Kao i sva druga mjerenja, i mjerenje struje armature izvedeno je u pokusu praznog hoda. Shodno tome, za očekivati je da se struja armature neznatno mijenja u ovisnosti o brzini vrtnje vratila elektromotora. Stoga su napravljena mjerenja u otvorenom krugu za različite brzine vrtnje, a rezultati mjerenja prikazani su na slici 29.

Mjerenja su potkrijepila očekivanja da se struja armature neznatno mijenja u ovisnosti o brzini vrtnje vratila elektromotora.

Snimljeni valni oblici nisu idealni, odnosno jasno se vidi utjecaj vanjskih šumova i nesavršenosti komponenti koji za rezultat imaju razlomljenu krivulju koja prikazuje ovisnost izmjerene struje u vremenu. Šumovi su tim veći što je brzina okretaja vratila elektromotora manja.

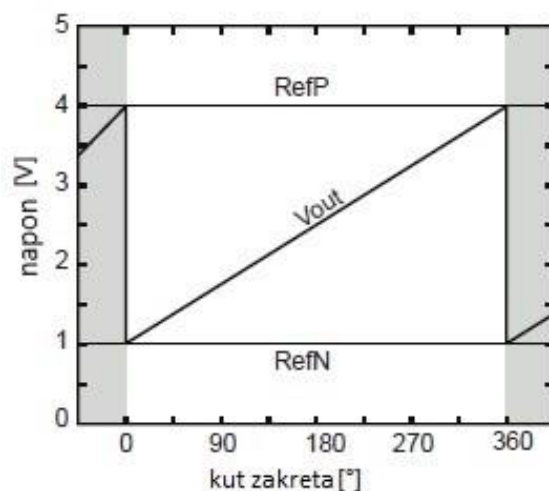


Slika 29. Ovisnost struje o vremenu za različite brzine vrtnje

4.2. Analogni linearni napon (V_{out})

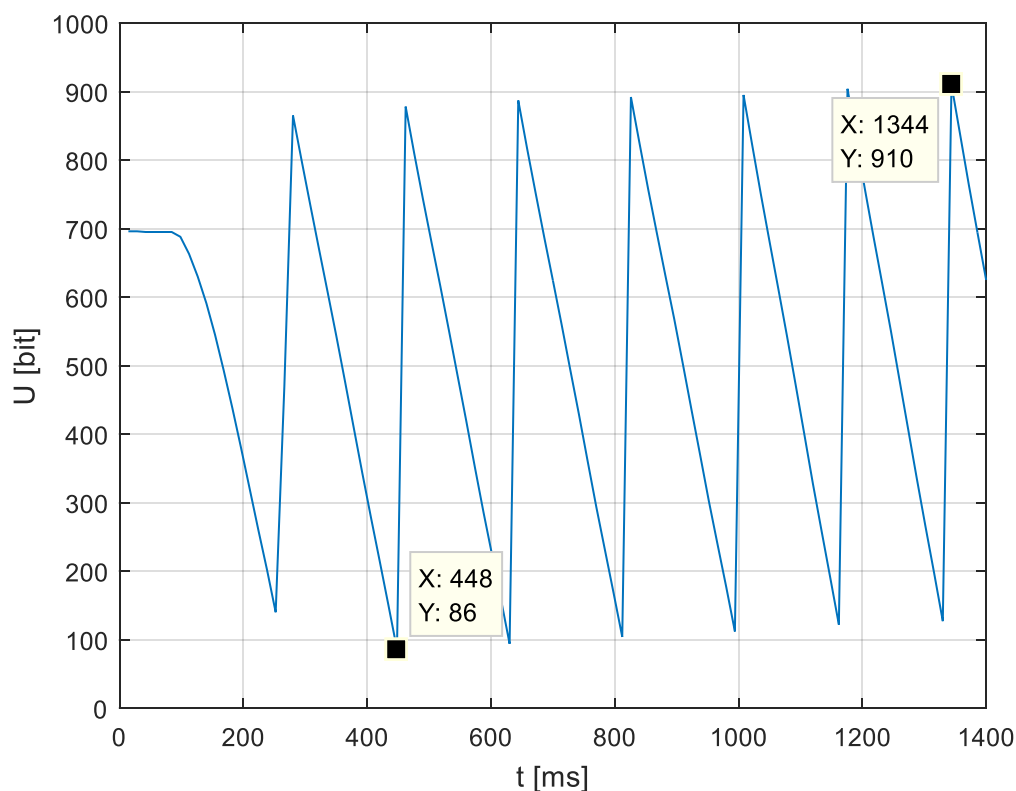
Kao što je prikazano na slici 6., izlazni napon Hallovog senzora V_h ovisi o položaju vratila elektromotora te se sinusoidalno mijenja od minimalne vrijednosti, kada je vratilo elektromotora na kojem je magnet u takvom položaju da sjeverni pol bude točno iznad Hallovog senzora, pa sve do maksimalne vrijednosti kada je južni pol magneta u neposrednoj blizini Hallovog senzora.

Iz blokovske sheme enkodera (slika 21.), očitani Hallov napon se filtrira preko tvornički podešenih sinusnih i kosinusnih signala te se preko 12-bitnog interpolatora signal pretvara u različite digitalne oblike signala. Dobiveni digitalni signal se zatim preko 10-bitnog digitalno – analognog pretvornika pretvara u linearni oblik napona kod kojeg generirani napon ovisi o kutnom zakretu vratila elektromotora te se kreće od minimalne i maksimalne vrijednosti napona (slika 30). Minimalna i maksimalna vrijednost napona daju se programatorom podesiti na željenu vrijednost.



Slika 30. Analogni linearni napon [15]

Kako tijekom izrade završnog rada programator za enkoder nije bio dostupan, a opet kako bi se iz trenutne vrijednosti napona dobio i ispravni trenutni kut zakreta vratila elektromotora, trebalo je odredit minimalnu i maksimalnu vrijednost napona koja je tvornički uprogramirana u enkoder (minimalna i maksimalna vrijednost analognog izlaznog napona prikazana je na slici 31).



Slika 31. Analogni linearni napon dobiven eksperimentalnim mjerenjima

Smjer vrtnje vratila elektromotora u eksperimentalnom djelu rada bio je različit od smjera vrtnje u slučaju kao na slici 30. Zbog tog su razloga i oblici signala dobiveni eksperimentalnim mjerenjima (slika 31.) te oni prikazani na slici 30. različiti.

Mjerenjem je utvrđeno da minimalna izlazna vrijednost analognog linearnog napona iznosi 0,3715 V, dok je maksimalna izlazna vrijednost istog signala 4,648 V(slika 31).

Broj perioda signala po jednom punom okretaju vratila elektromotora može se mijenjati postavljajući vrijednost parametra „Dac“. S obzirom na vrijednost koja je dodijeljena parametru, broj generiranih signala po punom okretaju vratila dan je u tablici 8.

Tablica 8. Broj perioda signala u ovisnosti o vrijednosti parametra

Vrijednost dodijeljena parametru „Dac“	Broj perioda signala po jednom okretaju vratila
0 0	jedan
0 1	dva
1 0	četiri
1 1	osam

Kako je već spomenuto, programator za enkoder nije bio dostupan tijekom izrade rada. Stoga nije bilo moguće ni mijenjati vrijednost parametra „Dac“ te je korištena već uprogramirana vrijednost parametra „Dac“ koja daje jedan period signala po jednom okretaju vratila elektromotora.

4.2.1. Mjerenje brzine vrtnje

Analogni linearni izlazni signal je karakterističan za korišteni magnetski enkoder te je stoga određivanje brzine vrtnje vratila elektromotora bilo izvedeno koristeći rezultate dobivene ovim signalom. Algoritam određivanja brzine vrtnje vratila elektromotora prikazan je na slici 32.

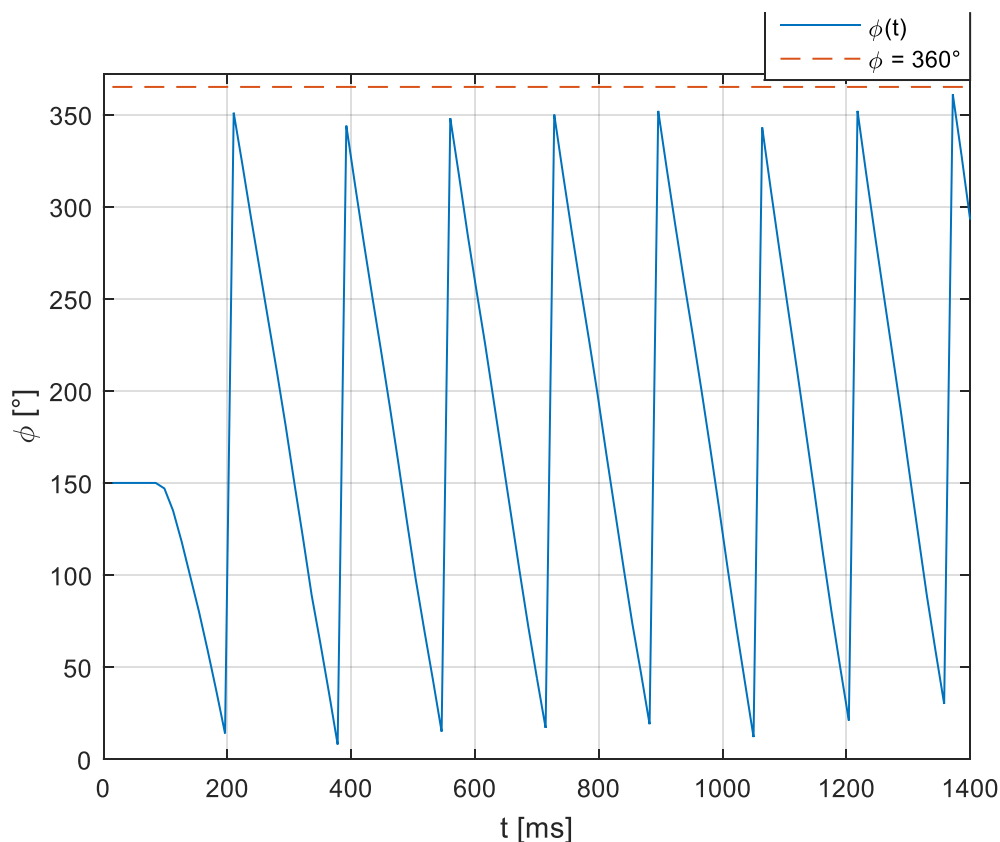


Slika 32. Algoritam za mjerenje brzine vrtnje vratila elektromotora

Kako je Arduino digitalna platforma, a analogni linearni napon je signal analognog tipa, dobiveni je signal najprije trebalo diskretizirati prilikom čega je period diskretizacije (uzorkovanja) bio jednak vremenu potrebnom za jedno izvođenje cijelog programa. Samo uzorkovanje analognog signala odrađuje se jednostavno koristeći naredbu *analogRead()* koja periodično očitava trenutnu vrijednost analognog izlaznog napona.

Zakret vratila elektromotora od 360° u odnosu na nultu poziciju vratila odgovara maksimalnoj vrijednosti izlaznog linearnog napona, dok zakret vratila od 1° odgovara minimalnoj vrijednosti izlaznog linearnog napona. U svrhu pridruživanja određenog kuta zakreta određenoj vrijednosti izlaznog analognog napona u kodu je korištena naredba „*map*“ koja

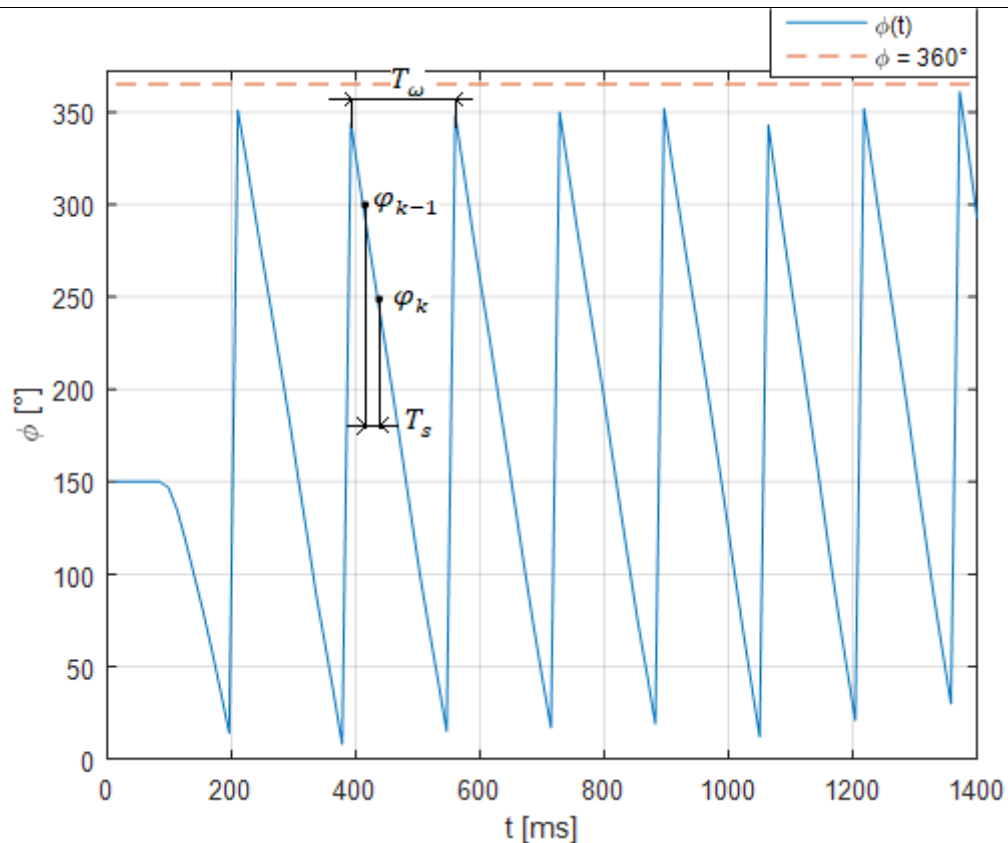
svakoj od vrijednosti izlaznog V_{out} signala izraženoj u bitovima prirodaje određeni kut zakreta vratila elektromotora. Rezultati dobiveni korištenjem opisane naredbe prikazani su na slici 33.



Slika 33. Graf ovisnosti kuta zakreta vratila elektromotora o vremenu

4.2.1.1. Određivanje brzine vrtnje prilikom malih brzina

Kada je vrijeme uzorkovanja, koje je ograničeno vremenom izvođenja programa, puno manje od perioda jednog okretaja vratila elektromotora ($T_s \ll T_\omega$), trenutni i prethodni kut zakreta vratila elektromotora očitavaju se tijekom jednog okretaja vratila (slika 34). Vrijeme uzorkovanja u okviru ovog rada je 14 ms.



Slika 34. Očitavanje brzine vrtnje kod malih brzina vrtnje

Brzina se izračunava preko izraza (15):

$$\omega_k = \frac{\varphi_k - \varphi_{k-1}}{T_s} \quad (15)$$

gdje je:

- ω_k trenutna kutna brzina vratila elektromotora
- φ_k trenutni kut zakreta vratila elektromotora
- φ_{k-1} kut zakreta u prošlom očitavanju
- T_s vremenski period između dva očitavanja kutne pozicije vratila.

Nakon što je dobivena trenutna kutna brzina vratila elektromotora izražena u stupnjevima u sekundi, trenutna brzina okretaja izražena u okretajima vratila u minuti dobiva se izrazom (16):

$$n = \frac{\omega}{360} \cdot 60 \quad (16)$$

Izraz (16) može se jednostavnije zapisati kao:

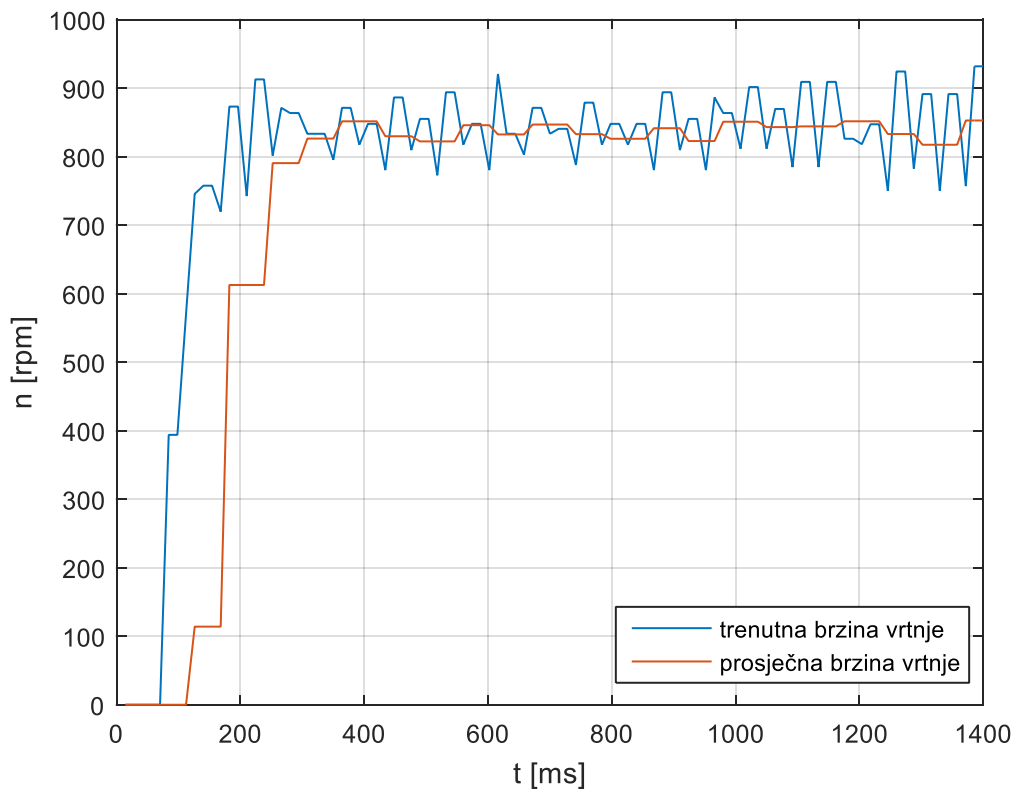
$$n = \frac{1}{60} \cdot \omega \quad (17)$$

gdje je:

- n brzina okretaja vratila elektromotora izražena u min^{-1}

- ω kutna brzina vratila elektromotora izražena u $^{\circ}/s$.

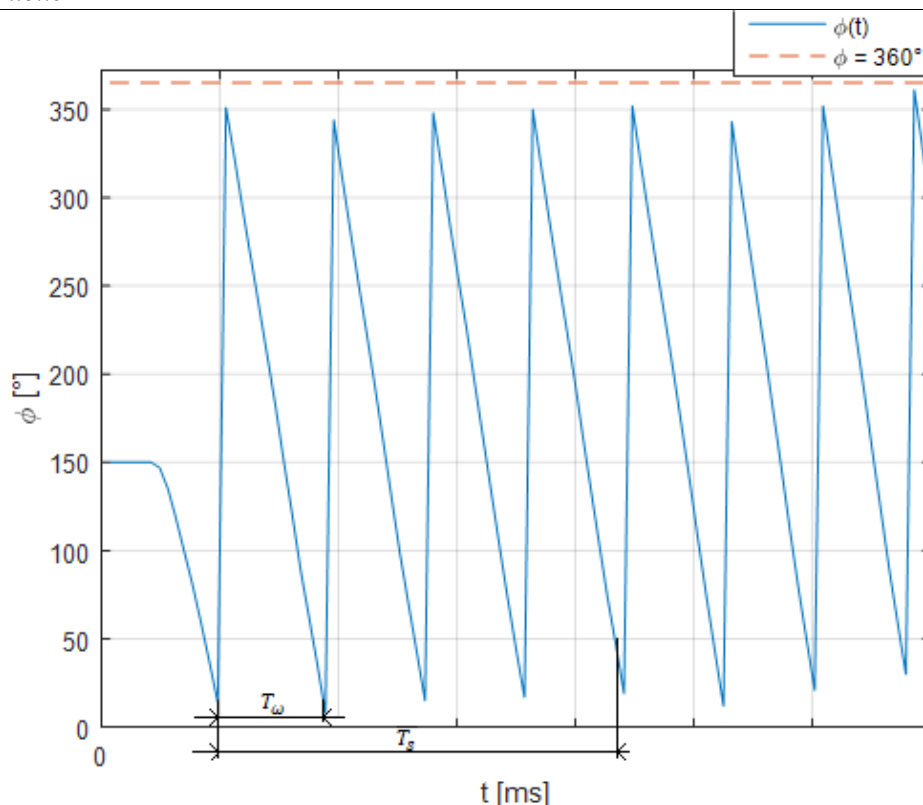
Slika 35. predstavlja snimljen signal brzine vrtnje vratila elektromotora. Sa slike je vidljivo kako signal koji predstavlja trenutnu brzinu vrtnje ima određena kolebanja oko srednje brzine vrtnje. Ukoliko je smjer vrtnje vratila elektromotora u smjeru kazaljke na satu, generirani linearni analogni napon oblika je kao onaj na slici 31. Kod upisan u mikroračunalo sustava izračunava brzinu vrtnje vratila elektromotora u svakom trenutku kada je očitana vrijednost analognog signala manja od prošle očitane vrijednosti. U trenutku kada je vrijednost analognog signala veća od prošle očitane vrijednosti (što je slučaj kada vratilo elektromotora „prebaci“ tzv. nultu poziciju), mikroračunalo ne izračunava brzinu okretaja vratila elektromotora. Zbog toga, i zbog utjecaja ostalih vanjskih smetnji, kao i nesavršenosti senzora i mjerne opreme, dolazi do skokovitih promjena očitane vrijednosti brzine vrtnje vidljivih na slici 35. Kako bi se smanjile oscilacije kod očitavanja trenutne brzine vrtnje, u sam algoritam izvođenja programa implementiran je i kod koji izračunava prosječnu brzinu okretaja na temelju k uzoraka. Osim grafa trenutne brzine vrtnje vratila elektromotora, na slici 35. prikazan je i graf srednje vrijednosti brzine vrtnje koji jasno prikazuje višestruko smanjenje oscilacija prilikom ispisivanja brzine vrtnje. Uvođenje ovakvog načina očitavanja brzine vrtnje, a što je i vidljivo na slici, usporava odziv samog senzora. Povećanjem broja uzoraka k na osnovu kojih se izračunava srednja vrijednost brzine okretaja smanjuju se oscilacije, ali se i povećava vrijeme odaziva senzora.



Slika 35. Usporedba prave i prosječne brzine vrtnje vratila elektromotora

4.2.1.2. Određivanje brzine vrtnje prilikom velike brzine vrtnje

Kod velikih brzina vrtnje ($T_\omega < T_s$) princip mjerenja brzine vrtnje dan u prethodnom poglavlju nije primjenjiv. Naime, broj izuzetih uzoraka u vremenu uzorkovanja je malen te se pritom gubi stvarna informacija o trenutnoj poziciji vratila elektromotora (slika 36).



Slika 36. Očitavanje brzine vrtnje kod velikih brzina okretaja

Ukoliko se u obzir uzme dano ograničenje ($T_\omega < T_s$), a pritom je vrijeme uzorkovanja $T_s = 14 \text{ ms}$, dolazi se do kritične brzine vrtnje kod koje se treba mijenjati model određivanja brzine vrtnje:

$$n_{krit} = \frac{1}{T_s} \cdot 60 = \frac{1}{0,014} \cdot 60 = 5000 \text{ min}^{-1} \quad (18)$$

Stoga se kod brzina vrtnje većih od kritične trenutna pozicija vratila elektromotora određuje brojanjem punih okretaja vratila prema izrazu:

$$\varphi_k = N \cdot 360^\circ + \varphi_{k-1} \quad (19)$$

Pritom se kutna brzina vratila elektromotora izračunava prema izrazu:

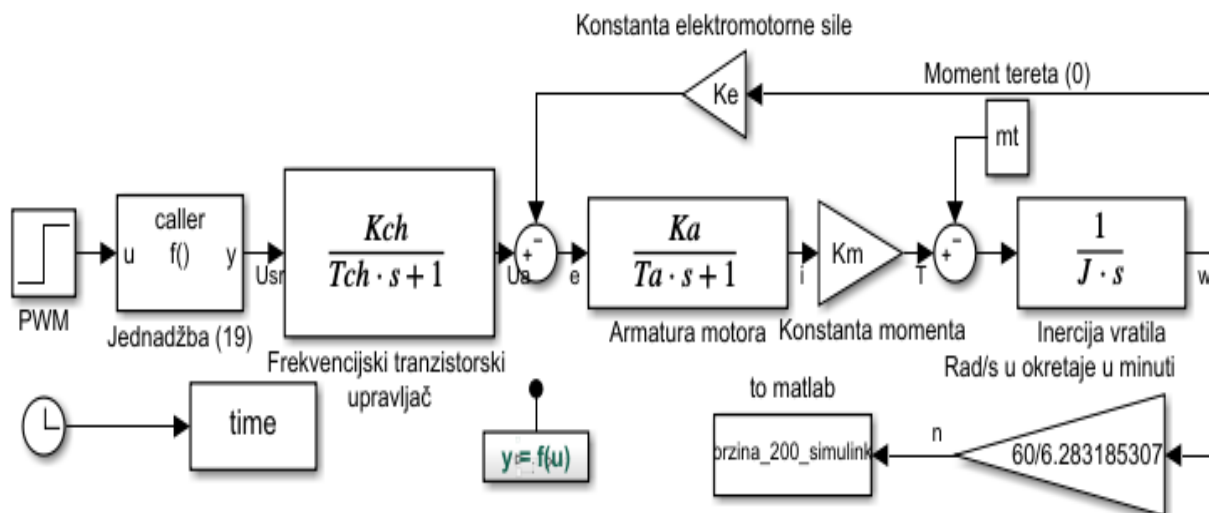
$$\omega = \frac{N \cdot 360^\circ}{T_\omega} \quad (20)$$

4.2.1.3. Simulacijski rezultati mjerenja brzine vrtnje

U MATLABovom alatu *Simulink* napravljeni su simulacijski modeli korišteni za regulaciju i upravljanje brzinom vrtnje istosmjernog motora.

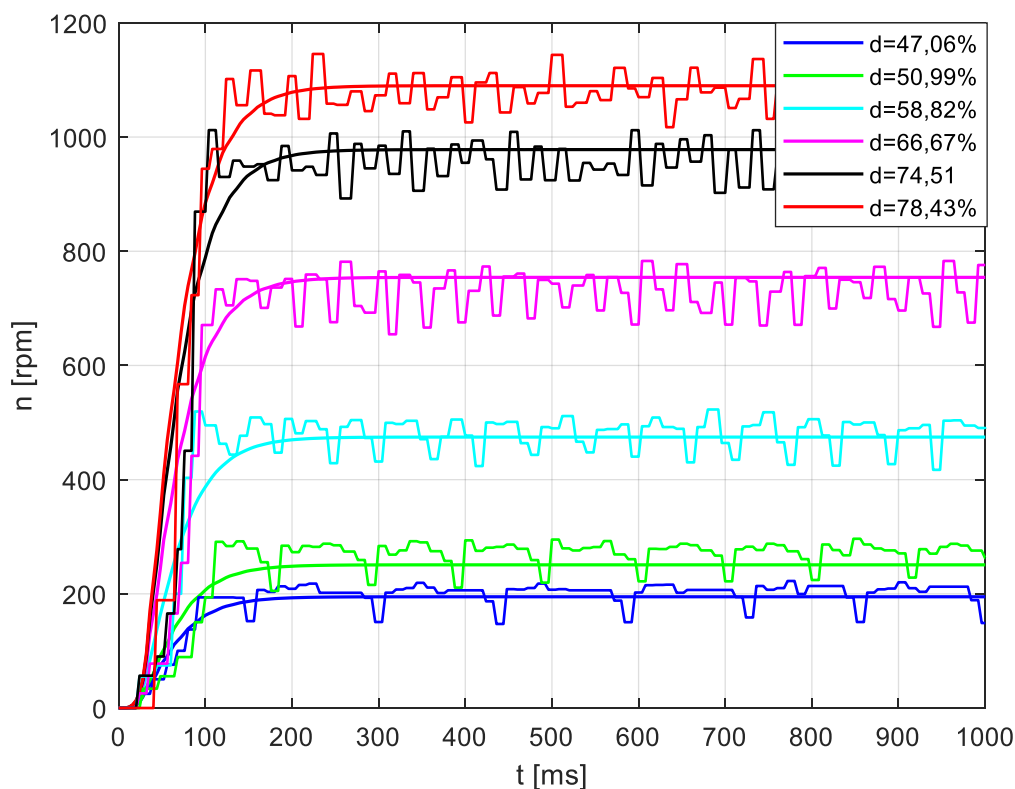
Nakon mjerenja i izračunavanja konstanti tranzistorskog frekvencijskog pretvarača i motora, u Simulinku je napravljen model (slika 37.) u kontinuiranoj (s) domeni, a čiji je izlaz jednak

simulacijskoj brzini vrtnje elektromotora s obzirom na upisanu vrijednost PWM signala u Arduino sučelju.



Slika 37. Simulink model za upravljanje brzinom vrtnje

Slika 38. prikazuje usporedbu izmjerenih i simulacijskih podataka o brzini vrtnje elektromotora u ovisnosti o vrijednosti faktora popunjenosti PWM d . Konstanta elektromotorne sile K_e mjerila se za više različitih vrijednosti brzine vrtnje te je kao referentna vrijednost uzeta srednja vrijednost svih mjerenja.



Slika 38. Usporedba izmjerenih i simulacijskih vrijednosti brzine vrtnje

5. UPRAVLJANJE I REGULACIJA BRZINE VRTNJE

Nakon što su predstavljani članovi mjernog sustava i njihove specifikacije te nakon što su prikazani simulacijski krugovi i njihovi odzivi, bilo je potrebno implementirati PI regulator u postav eksperimentalnog rada.

Najprije se sustavom upravljalo u otvorenoj petlji, a onda je napravljen i PI regulator brzine okretaja vratila elektromotora.

5.1. Uvedena ograničenja kod upravljanja i regulacije brzine vrtnje

Prilikom početnih mjerenja brzine vrtnje vratila elektromotora naišlo se na određene nedostatke članova mjernog sustava te su zbog njih uvedena ograničenja koja su niže detaljnije razrađena.

5.1.1. *Potreban minimalan napon armature za pokretanje vrtnje*

Ponajviše zbog stacionarnog trenja koji se javlja u motoru prilikom pokretanja te gustoći magnetskog toka u motoru, za pokretanje vratila elektromotora trebalo je na armaturni dio motora narinuti određeni minimalni napon kako bi struja armature porasla na dovoljno visoku vrijednost za započinjanje vrtnje elektromotora. Mjerenjem je uspostavljeno da se vratilo elektromotora ne počinje jednoliko okretati konstantnom brzinom kod napona manjeg od 1,65V pri čemu se isti vrti brzinom od 175 okretaja u minuti. Srednja vrijednost PWM ulaznog signala pritom iznosi 2,35V što je jednako pozivu funkcije *analogWrite(120)*.

5.1.2. *Nelinearnost izlaznog napona tranzistorskog frekvencijskog ispravljača*

Slanjem 8 – bitnog PWM signala preko Arduina na frekvencijski ispravljač (Arduino motor shield) upravlja se naponom na stezaljkama motora. Prilikom upisivanja maksimalne vrijednosti PWM signala (255), što odgovara srednjoj vrijednosti PWM napona od 5V, na stezaljkama motora izmjeren je napon od 11,06V. Također, prilikom ispitivanja utvrđeno je da frekvencijski pretvarač ulazi u zasićenje već na vrijednostima upisanog signala od 240 te će se stoga maksimalnom vrijednosti PWM signala smatrati vrijednost od 240.

Prije izrade rada bilo je očekivano da napon na stezaljkama elektromotora linearno ovisi o srednjoj vrijednosti PWM napona po sljedećoj zakonitosti:

$$U_a = \frac{11,06}{240} \text{ PWM_value} \quad (21)$$

gdje je:

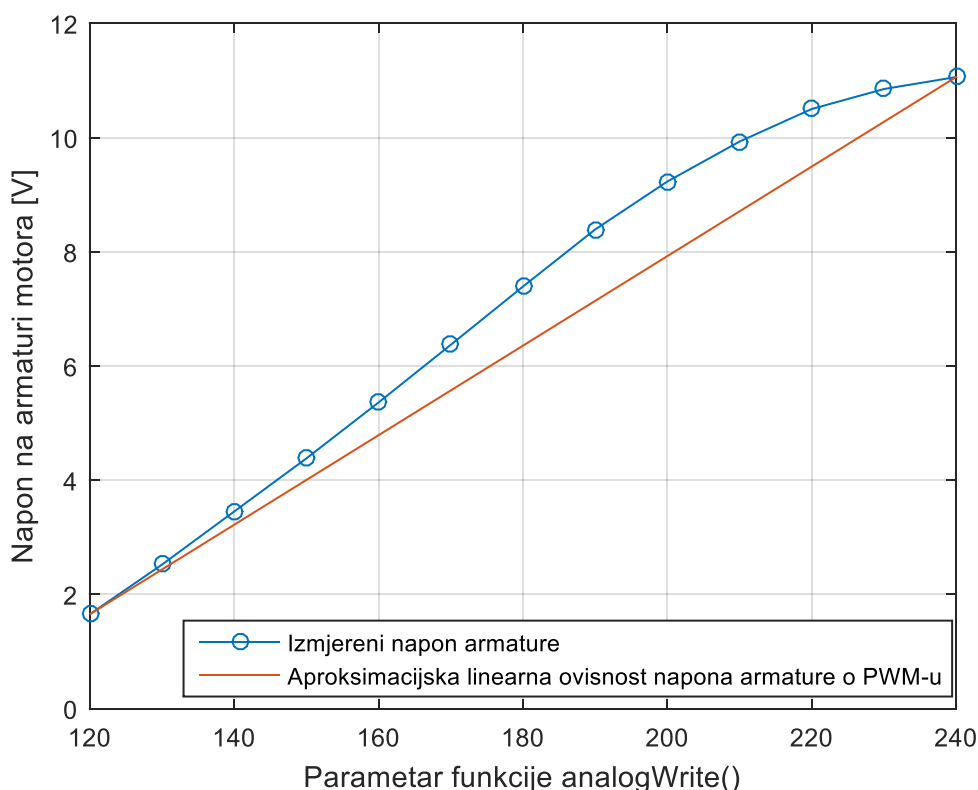
- U_a napon na armaturi elektromotora

- PWM_value vrijednost upisana u funkciju $analogWrite$.

Međutim, izravnim mjerenjem ustanovljeno je da napon na armaturi elektromotora ne slijedi navedenu zakonitost, već da postoje nelinearnosti.

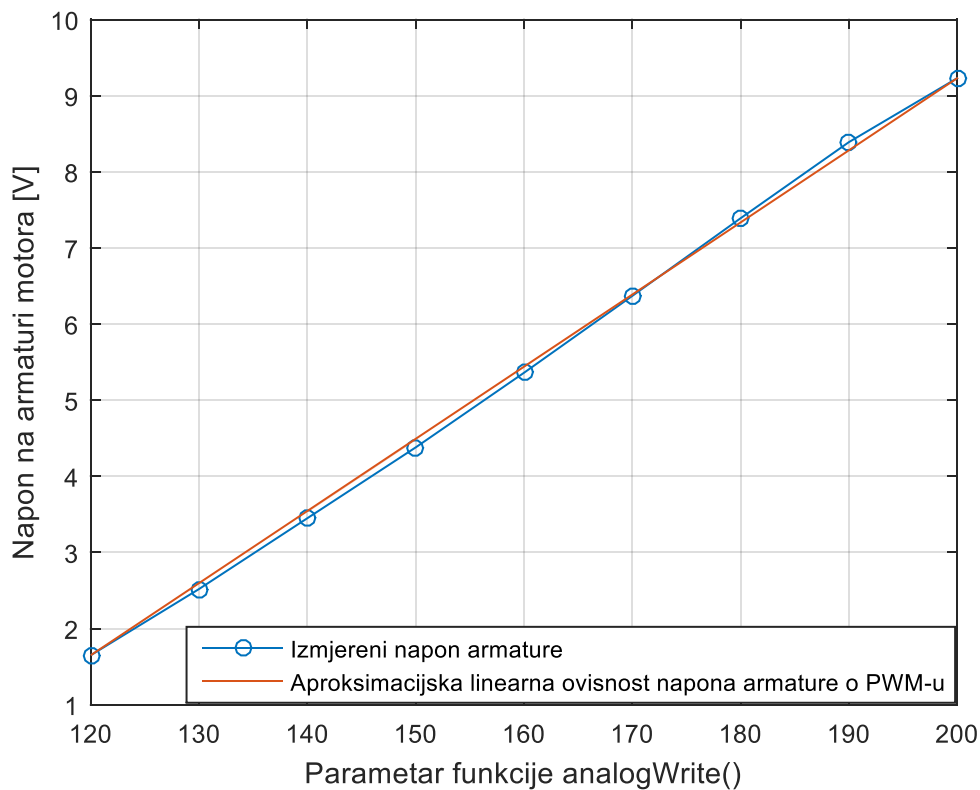
Zbog značajne nelinearnosti, napravljena je korekcija računanja vrijednosti PWM-a koja se upisuje u funkciju $analogWrite()$ u ovisnosti o traženom naponu kod regulacije brzine vrtnje prema aproksimaciji danoj u izrazu (22), a rezultati aproksimacije dani su na slici 39.:

$$U_a = 0,0784167PWM_value - 7,76 \quad (22)$$



Slika 39. Aproksimirana ovisnost napona armature o upisanoj vrijednosti PWM-a

Iz prethodnog je jasno vidljivo kako se i aproksimirani pravac i izmjerene vrijednosti ne poklapaju zbog odlaska *choppera* u zasićenje. Stoga će se regulacija i upravljanje brzinom vrtnje elektromotora svesti na brzine ostvarive između vrijednosti PWM signala upisane u funkciju $analogWrite()$ između 120 i 200 čime se dobiva aproksimacija pravcem koja se već značajnije poklapa sa izmjerenim vrijednostima (slika 40). Uvođenjem navedenih ograničenja, upravljanje i regulacija brzinom vrtnje vratila elektromotora svedena je na brzine od 250 do 1100 okretaja u minuti.



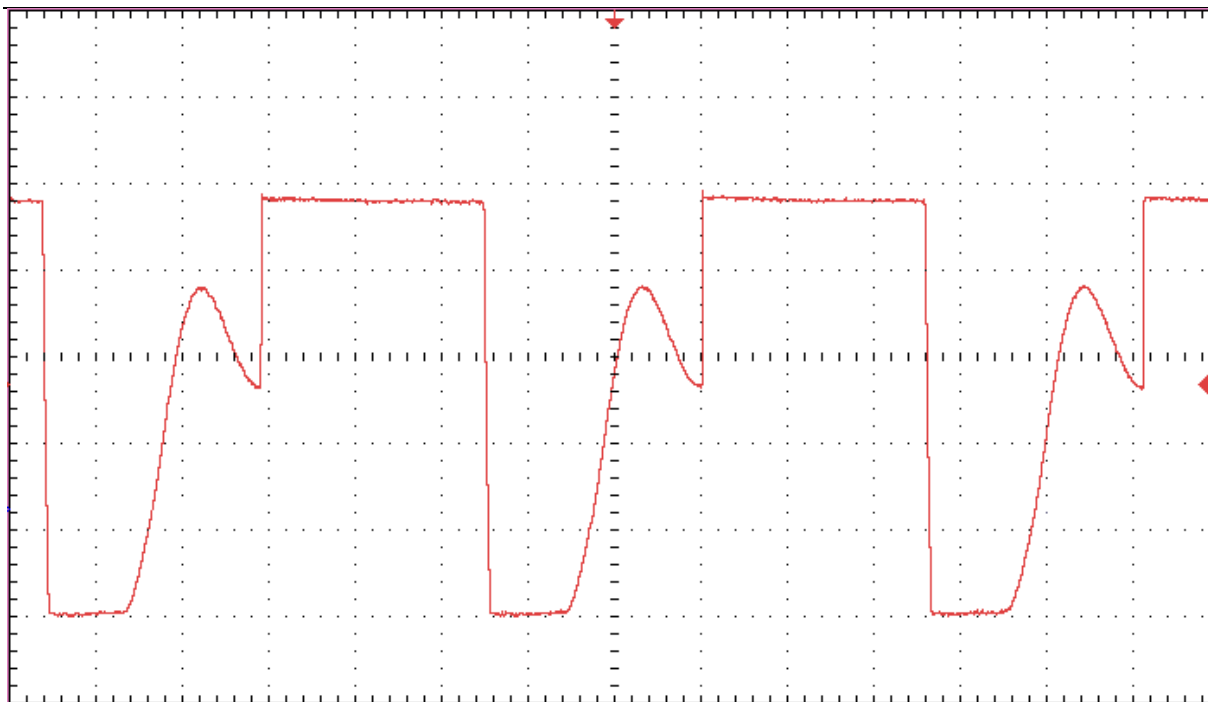
Slika 40. Aproximirana ovisnost napona armature o upisanoj vrijednosti PWM-a nakon ograničenja

Jednadžba kojom se aproksimirala vrijednost izlaznog napona glasi:

$$U_a = 0,09475PWM_value - 9,72 \quad (23)$$

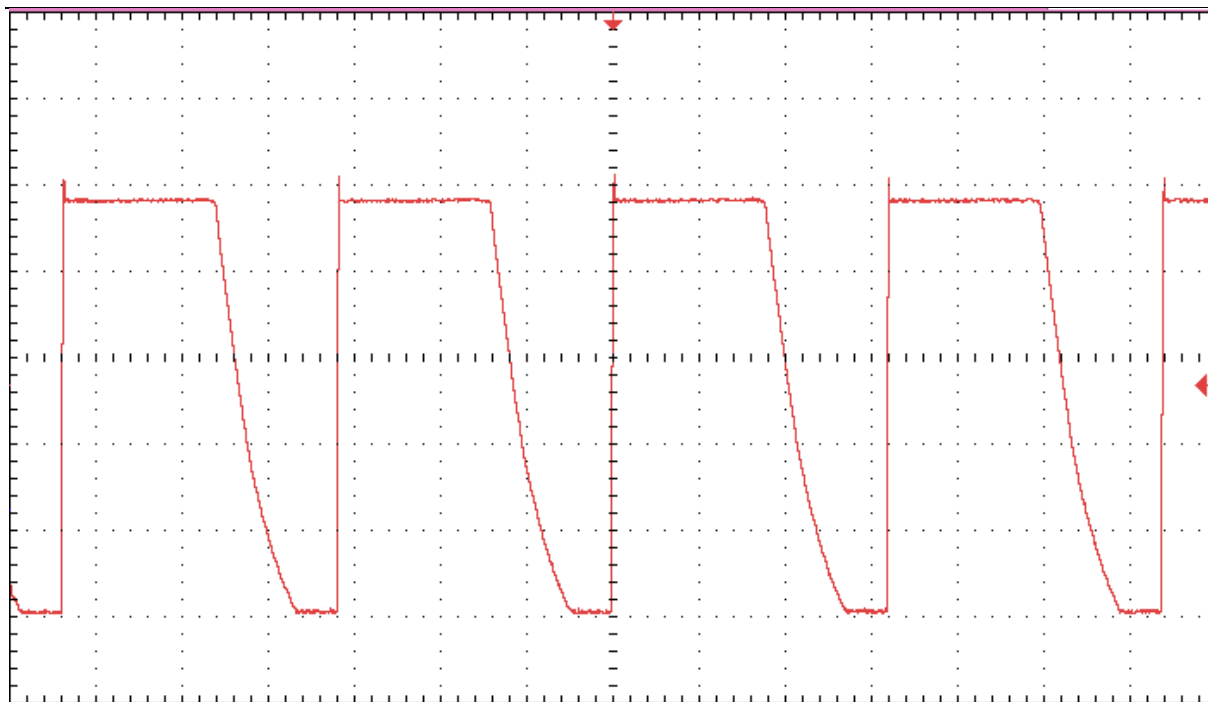
5.1.3. Izobličenje PWM signala na armaturi motora

Nakon početnog postavljanja faktora popunjenosti PWM signala na 50% pristupilo se osciloskopskom mjerenju oblika PWM signala na stezaljkama motora te su dobiveni rezultati ukazali na određena izobličenja mjerenog signala koja su prikazana na slici 41. Vremenska baza osciloskopa prilikom prikazanih mjerenja bila je postavljena na $10 \mu s/dsk$, dok je u smjeru y osi ona bila postavljena na $5V/dsk$.



Slika 41. PWM signal na frekvenciji motorshilda od 3 kHz

Kako je vremenska konstanta armature elektromotora niska, pretpostavilo se kako je relativno niska frekvencija korištenog Arduino motorshilda (3 kHz) uzrok izobličenju signala. Stoga se frekvencija uključivanja tranzistora motorshilda povećala na vrijednost od 31 kHz te su se time izobličenja smanjila (slika 42). Sa slike je i vidljivo trenutno paljenje tranzistora, dok njihovo gašenje traje određeno vrijeme te stoga i sam prijelaz tranzistora u nisko stanje nije trenutno. Zbog navedenog, prilikom mjerenja konstante elektromotorne sile, motor je bio direktno spojen na izvor napajanja prilikom očitavanja brzine vrtnje. Kada je mjerenje bilo izvedeno na način da se motor napajao PWM signalom iz Arduino motorshilda, zbog opisanih izobličenja vrijednost konstante elektromotorne sile nisu ispadale konstante, što je posljedično prouzročilo i odstupanje simuliranih i mjerenih vrijednosti brzine vrtnje u otvorenom krugu.

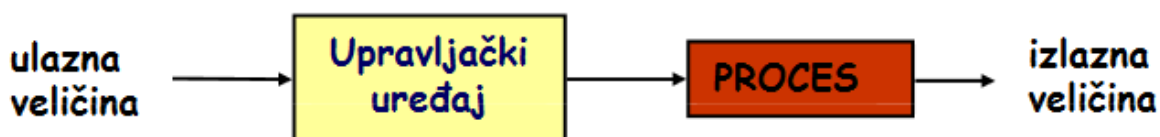


Slika 42. PWM signal na frekvenciji motorshielda od 31 kHz

5.2. Upravljanje brzinom vrtnje

Pod pojmom upravljanja podrazumijeva se izvršavanje rutinske instrukcije bez pomoći čovjeka gdje se pojedini ciklusi rada automatski startaju ili ponavljaju. Osjetljivost na vanjske poremećaje, kao i nepostojanje povratne veze za samoispravljanje djelovanja, osnovne su značajke navedenog pojma.

Prilikom upravljanja sustavom ulazna veličina (npr. vanjska temperatura) ulaz je upravljačkog uređaja (ventila) koji upravlja procesom. U spomenutom slučaju, otvaranjem ventila povećava se protok tople vode kroz radiator što kao rezultat ima povećanje temperature u prostoriji što je i izlazna veličina sustava (slika 43).



Slika 43. Koncept upravljanja [17]

Kada se gore spomenuti koncept upravljanja prenese na upravljanje brzinom vrtnje vratila elektromotora iz eksperimentalnog dijela rada, ulazna veličina je narinuti napon na ulaz choppera. Kako srednja vrijednost narinutog napona choppera (frekvencijskog pretvarača) ovisi o faktoru popunjenosti generiranog PWM signala, faktor popunjenosti, a time i ulaz

sustava upravljanja, zadaje se u vidu broja 1 – 255 upisanog preko tipkovnice na serijski port. Upravljački uređaj je Chopper (H-most) koji pojačava ulazni signal te u ovisnosti o narinutoj vrijednosti faktora popunjenosti naizmjenično uključuje i isključuje tranzistore H – mosta što kao rezultat ima određenu brzinu vrtnje vratila elektromotora. Pošto tijekom cijelog procesa izvođenja upravljanja nemamo informaciju o brzini vrtnje u povratnoj vezi, riječ je o upravljanju brzinom vrtnje elektromotora. Eksperimentalna mjerenja povezana s upravljanjem brzinom vrtnje mogu se pronaći u 4.2.1.

5.3. Regulacija brzine vrtnje

Pojam regulacije brzine vrtnje podrazumijeva upravljanje s posrednom (indirektnom) kompenzacijom poremećaja. Regulatorima se smatraju samoispravljujući strojevi koji djeluju prema pogrešci regulacije. Pogreška regulacije je razlika između ulazne i regulirane veličine. Kad bismo pojam pogreške regulacije sveli na razinu upravljanja brzinom vrtnje vratila elektromotora, pogreška regulacije bila bi razlika između trenutne brzine vrtnje vratila elektromotora te referentne (ulazne) brzine koja je zadana te koja se želi postići. Osnovne značajke regulacije su jednostavna petlja, negativna povratna veza za samoispravljanje djelovanja te oklanjanje vanjskih i unutarnjih poremećaja regulacije.

Na slici 44. dan je osnovni blok dijagram karakterističan za procese regulacije raznih veličina. X_u predstavlja referentnu veličinu koja se još naziva vodećom ako je riječ o slijednoj regulaciji te nazivnom ukoliko je riječ o čvrstoj. Signali X_i označava reguliranu veličinu dok je oznakom e prikazana regulacijska pogreška koja je jednaka razlici referentne i regulirane veličine. Oznakom z prikazani su vanjski poremećaji na sustav.



Slika 44. Koncept regulacije [17]

Regulacija brzine vrtnje istosmjernog motora, koja je tema završnog rada, spada pod čvrstu regulaciju jer se željena brzina vrtnje ne mijenja često kako bi to bilo kod npr. kod sustava slijedeđenja nazivne veličine. PID regulator najčešće je korišten tip regulatora kod regulacije neke fizikalne veličine, a sastoji se od P regulatora koji na grešku regulacije djeluje

proporcionalno, I regulatora koji na grešku djeluje integralno te D regulatora koji ima derivacijsko djelovanje na grešku. U praksi su moguće sve kombinacije P, I i D regulatora osim ID regulatora. PI izvedba regulatora će biti korištena za regulaciju brzine vrtnje vratila elektromotora u okviru ovog završnog rada.

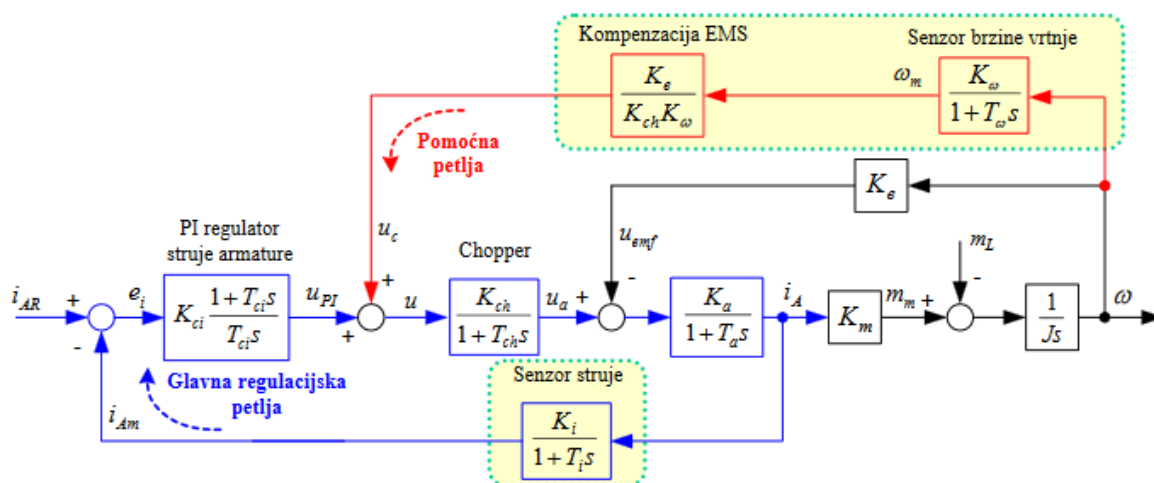
5.3.1. Kaskadna regulacija brzine vrtnje

Za regulaciju brzine vrtnje istosmjernog motora često se primjenjuje sustav kaskadne regulacije brzine. Kaskadni sustav znači da će regulacijski krug brzine vrtnje biti nadređen regulacijskom krugu struje armature, odnosno izlaz regulatora brzine vrtnje predstavlja referentnu (ulaznu) veličinu regulacijskom krugu struje armature. Prema [9] kaskadna regulacija ima niz prednosti:

- Djelovanje poremećajnih veličina u servosustavu se uvijek potiskuje na lokalnom nivou (PI regulator struje kompenzira utjecaj elektromotorne sile, dok PI regulator brzine kompenzira utjecaj momenta tereta)
- Sinteza i ispitivanje pojedinih regulacijskih krugova izvode se korak po korak
- Jednostavno preklapanje moda regulacije

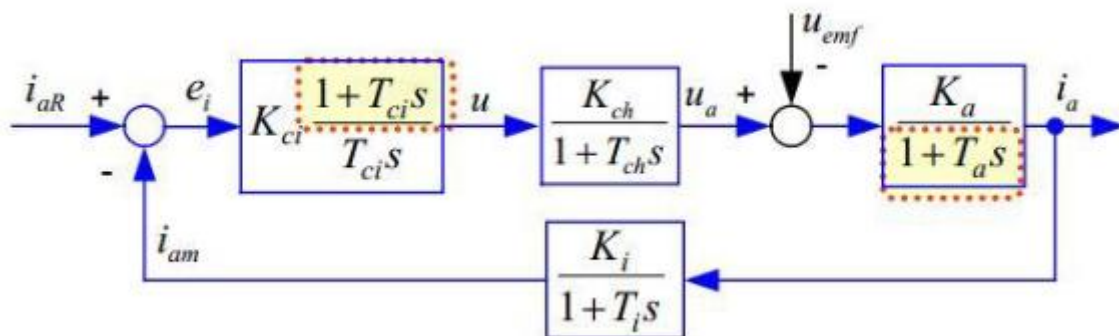
5.3.1.1. Sinteza regulacijskog kruga struje armature

Brzina promjene struje armature obično se mijenja puno brže od promjene induciranog napona (elektromotorne sile) te se vrijednost induciranog napona uzima kao spora poremećajna veličina koju otklanja I djelovanje regulatora. Kako bi se ubrzao odziv struje armature i kompenzirao utjecaj povratnog djelovanja elektromotorne sile koristi se PI regulator proširen kompenzatorom djelovanja elektromotorne sile, temeljen na mjerenju brzine vrtnje (slika 45).



Slika 45. Blokovski dijagram regulacijskog kruga struje armature [13]

PI regulator se projektira uz pretpostavku da se elektromotorna sila (EMS) može smatrati vanjskim poremećajem kojeg će kompenzirati kompenzator EMS ukoliko se radi o brzim promjenama EMS ili sami PI regulator ukoliko se radi o sporim promjenama. Time se gore dan blokovski dijagram pojednostavljuje, kao što je prikazano na slici 46.



Slika 46. Blokovski dijagram regulacijskog kruga struje na kojem se zasniva sinteza PI regulatora [13]

Sinteza regulatora započinje podešavanjem vremenske konstante T_{ci} . Kako je vremenska konstanta armature T_a uobičajeno dominantna vremenska konstanta ($T_a \gg T_i, T_{ch}$) odziv zatvorenog regulacijskog kruga struje može se, kriterijem tzv. tehničkog optimuma, značajno ubrzati ukoliko se nulom regulatora $(1 + T_{ci}s)$ pokradi dominantna dinamika (pol) objekta upravljanja $(1 + T_a s)$, odnosno ako se izabere $T_{ci} = T_a$.

Nakon navedenog slijedi podešavanje pojačanja regulatora K_{ci} . Kako je brzina odziva struje značajno ubrzana primjenom tehničkog optimuma, izborom pojačanja regulatora prvenstveno se utječe na prigušenje odziva struje armature. U tu se svrhu koristi tzv. optimum dvostrukog odnosa. Postupak se zasniva na izjednačavanju karakterističnog polinoma prijenosne funkcije regulacijskog kruga s karakterističnim polinomom optimuma dvostrukog odnosa:

$$A(s) = D_n D_{n-1}^2 \cdots D_2^{n-1} T_e^n s^n + D_{n-1} D_{n-2}^2 \cdots D_2^{n-2} T_e^{n-1} s^{n-1} + \cdots + D_2 T_e^2 s^2 + T_e s + 1 \quad (24)$$

gdje su:

- T_e ekvivalentna vremenska konstanta
- D_i karakteristični odnosi ($i = 2, 3, \dots, n$), a koji određuju prigušenje odziva.

Postavljanjem svih karakterističnih odnosa na optimalni iznos 0,5 ($D_2 = D_3 = \dots = D_n = 0,5$) postiže se tzv. kvazi – aperiodski odziv regulacijskog kruga struje sa 6% nadvišenja u odzivu, te vremenom porasta $t_{100\%} \approx 1,8T_e$.

U svrhu pojednostavljenja sinteze tzv. parazitska dinamika regulacijskog kruga struje koja uključuje dinamiku pretvarača i senzora struje ($T_{ch}, T_i \ll$) može se aproksimirati ekvivalentnim PT_1 članom:

$$G_{par}(s) = \frac{K_{ch}}{1 + T_{ch}s} \frac{K_i}{1 + T_i s} \approx \frac{K_{ch}K_i}{1 + (T_{ch} + T_i)s} = \frac{K_{ch}K_i}{1 + T_{\Sigma i}s} \quad (25)$$

gdje je $T_{\Sigma i}$ tzv. parazitska vremenska konstanta regulacijskog kruga struje. Uzveši u obzir gore navedenu aproksimaciju, prijenosna funkcija regulacijskog kruga struje armature poprima sljedeći oblik:

$$G_{ci}(s) = \frac{i_a(s)}{i_{ar}(s)} = \frac{1}{1 + \frac{T_{ci}}{K_{ci}K_{ch}K_iK_a}s + \frac{T_{ci}T_{\Sigma i}}{K_{ci}K_{ch}K_iK_a}s^2} \quad \xleftrightarrow{\text{Optimum}} \quad G_{ei}(s) = \frac{1}{1 + T_{ei}s + D_{2i}T_{ei}^2s^2} \quad (26)$$

dvostrukog odnosa

Odavde slijedi da je ekvivalentna vremenska konstanta zatvorenog regulacijskog kruga struje armature $T_{ei} = T_{\Sigma i}/D_{2i}$, što za optimalan izbor karakterističnog odnosa $D_{2i} = 0,5$ odgovara $T_{ei} = 2T_{\Sigma i}$.

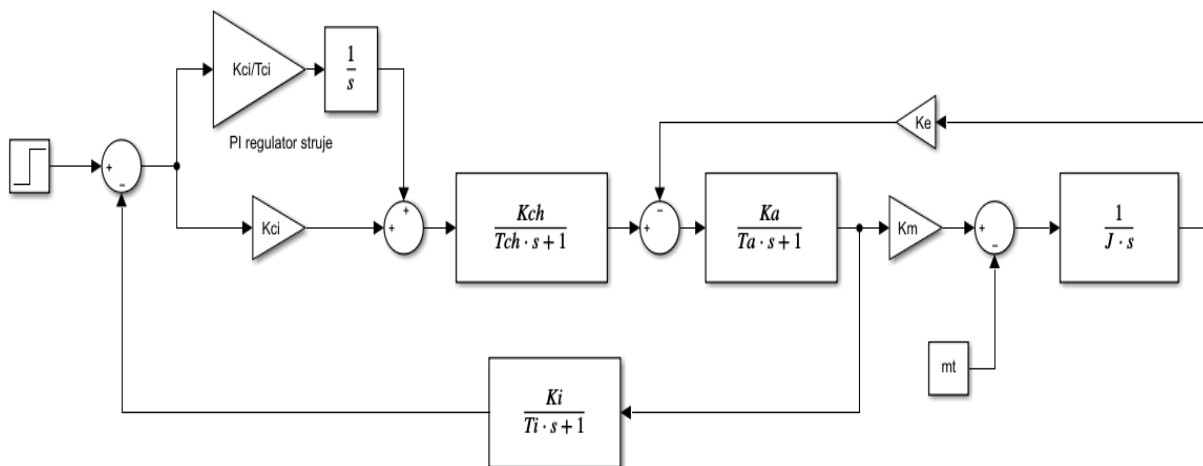
Nakon sređivanja izraz za optimalno pojačanje regulatora (uz izbor karakterističnog polinoma $D_{2i} = 0,5$) glasi:

$$K_{ci} = \frac{T_{ci}}{T_{\Sigma i}} \frac{D_2}{K_{ch}K_iK_a} = \frac{T_{ci}}{T_{\Sigma i}} \frac{1}{2K_{ch}K_iK_a} \quad (27)$$

Konačni parametri PI regulatora uz uvjet tehničkom optimuma te optimuma dvostrukog odnosa su:

- $T_{\Sigma i} = T_i + T_{ch} = 0,120 + 0,032 = 0,152 \text{ ms}$
- Vremenska konstanta regulatora: $T_{ci} = T_a = 0,3387 \text{ ms}$
- Pojačanje regulatora: $K_{ci} = \frac{T_{ci}}{T_{\Sigma i}} \cdot (2K_{ch}K_aK_i)^{-1} = 11,74 \text{ V/V}$
- Nadomjesna vremenska konstanta regulacijskog kruga struje: $T_{ei} = 2T_{\Sigma i} = 0,304 \text{ ms}$

Nakon izračunavanja parametara PI regulatora napravljen je i Simulink model regulatora koji je prikazan na slici 47.



Slika 47. Simulink model PI regulatora struje armature

5.3.1.2. Sinteza regulacijskog kruga brzine vrtnje

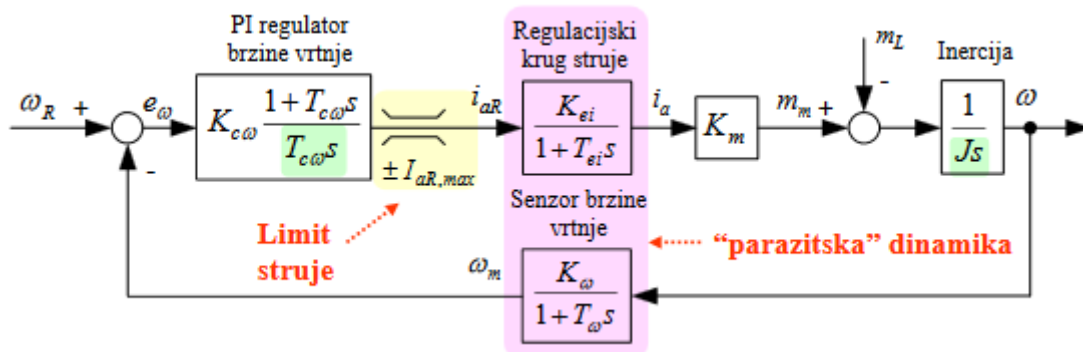
Za potrebe sinteze regulacijskog kruga brzine vrtnje, regulacijski krug struje armature od referentne vrijednosti i_{aR} do stvarne vrijednosti struje armature i_a opisuje se sljedećom prijenosnom funkcijom:

$$G_{ei}(s) = \frac{i_a(s)}{i_{aR}(s)} \approx \frac{1}{K_i} \frac{1}{1 + T_{ei}s} = \frac{K_{ei}}{1 + T_{ei}s} \quad (28)$$

gdje su:

- K_{ei} nadomjesno pojačanje regulacijskog kruga struje $K_{ei} = \frac{1}{K_i} = 0,60606 \text{ A/V}$
- T_{ei} nadomjesna vremenska konstanta kruga struje $T_{ei} = 2T_{\Sigma i} = 0,304 \text{ ms}$

Na temelju navedenog, regulacijski krug brzine vrtnje motora s podređenim regulacijskim krugom struje armature i PI regulatorom može se prikazati blokovskim dijagramom na slici 48. Izlaz regulatora brzine vrtnje predstavlja referentnu veličinu regulacijskom krugu struje armature.



Slika 48. Blokovski dijagram regulacijskog kruga brzine vrtnje [13]

U svrhu pojednostavljenja sinteze PI regulatora brzine vrtnje parazitska dinamika podređenog regulacijskog kruga struje armature i senzora brzine vrtnje aproksimira se sljedećim nadomjesnim PT_1 članom:

$$G_{par}(s) = \frac{K_{ei}}{1 + T_{ei}s} \frac{K_{\omega}}{1 + T_{\omega}s} \approx \frac{K_{ei}K_{\omega}}{1 + (T_{ei} + T_{\omega})s} = \frac{K_{ei}K_{\omega}}{1 + T_{\Sigma\omega}s} \quad (29)$$

gdje je $T_{\Sigma\omega}$ tzv. parazitska vremenska konstanta regulacijskog kruga brzine vrtnje.

Za razliku od sinteze PI regulatora struje armature gdje je za podešavanje integralne vremenske konstante PI regulatora primjenjeno kraćenje nule regulatora i pola procesa, ovdje taj princip nije primjenjiv, jer bi se njihovim kraćenjem pokratila parazitska vremenska konstanta $T_{\Sigma\omega}$ i integralna vremenska konstanta regulatora $T_{c\omega}$ te bi tada prijenosna funkcija otvorenog regulacijskog kruga brzine vrtnje odgovarala dvostrukom integratoru što bi za rezultat imalo neprigušene i oscilacije konstante amplitude u odzivu zatvorenog regulacijskog kruga brzine vrtnje. Stoga se parametri PI regulatora brzine vrtnje određuju primjenom kriterija optimuma dvostrukog odnosa na prijenosnu funkciju zatvorenog regulacijskog kruga brzine:

$$G_{c\omega} = \frac{\omega_m(s)}{\omega_R(s)} = \frac{1 + T_{c\omega}s}{1 + T_{c\omega}s + \frac{T_{c\omega}}{K_{c\omega}} \frac{J}{K_{\omega}K_{ei}K_m} s^2 + \frac{T_{c\omega}}{K_{c\omega}} \frac{JT_{\Sigma\omega}}{K_{\omega}K_{ei}K_m} s^3} \quad (30)$$

Karakteristični polinom prijenosne funkcije zatvorenog regulacijskog kruga brzine vrtnje (30) izjednačuje se s karakterističnim polinomom optimuma dvostrukog odnosa:

$$A_{odo}(s) = 1 + T_{e\omega} + D_{2\omega}T_{e\omega}^2s^2 + D_{3\omega}D_{2\omega}^2T_{e\omega}^3s^3, \quad (31)$$

iz čega izravno slijedi da je ekvivalentna vremenska konstanta zatvorenog regulacijskog kruga jednaka integralnoj vremenskoj konstanti PI regulatora, $T_{e\omega} = T_{c\omega}$.

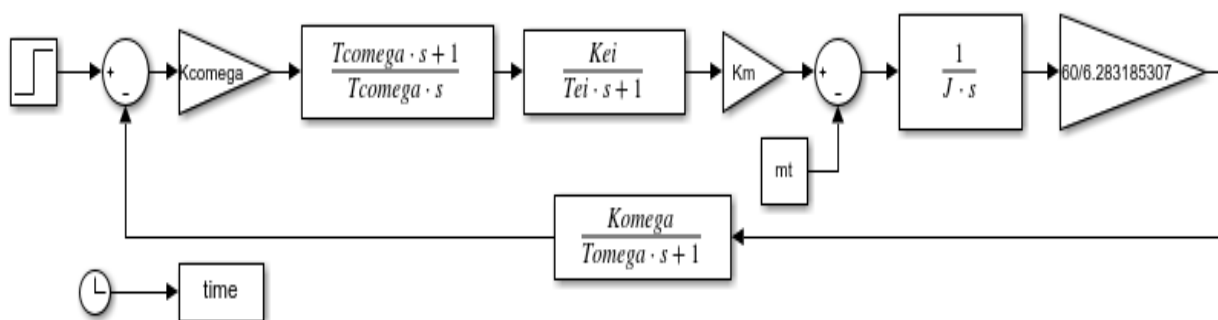
Nakon rješavanja izraza dobivamo parametri PI regulatora:

$$T_{c\omega} = T_{e\omega} = \frac{T_{\Sigma\omega}}{D_{3\omega}D_{2\omega}} = 4T_{\Sigma\omega} \quad (32)$$

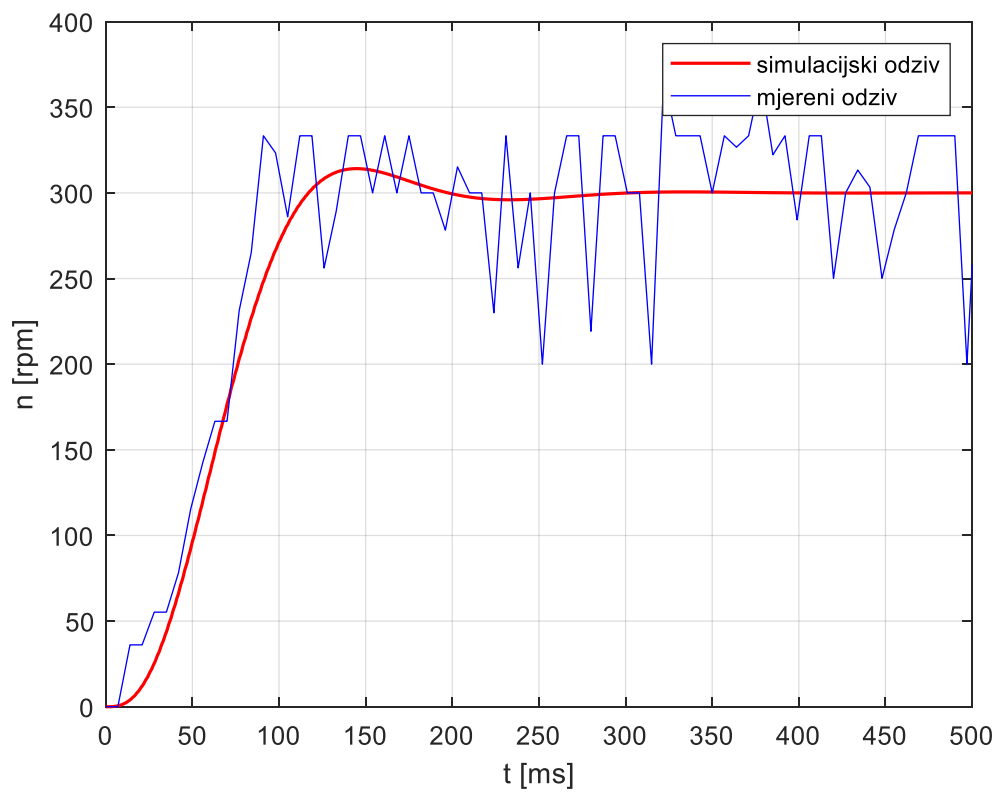
$$K_{c\omega} = \frac{J}{T_{e\omega} D_{3\omega} K_{\omega} K_{ei} K_m} = \frac{D_{3\omega} J}{T_{\Sigma\omega} K_{\omega} K_{ei} K_m}. \quad (33)$$

Ovaj način podešavanja regulatora naziva se simetrični optimum. Međutim, valja uočiti da će zbog derivirajućeg djelovanja nule u prijenosnoj funkciji zatvorenog kruga nadvišenje brzine vrtnje na skokovitu promjenu referentne vrijednosti brzine vrtnje biti znatno više od 4% - 8%. Stoga se, kako bi se eliminiralo derivirajuće djelovanje (posljedica nule PI regulatora brzine vrtnje), u granu reference brzine vrtnje dodaje prefiltar prvog reda s vremenskom konstantom $T_{f\omega} = T_{c\omega} = T_{e\omega}$.

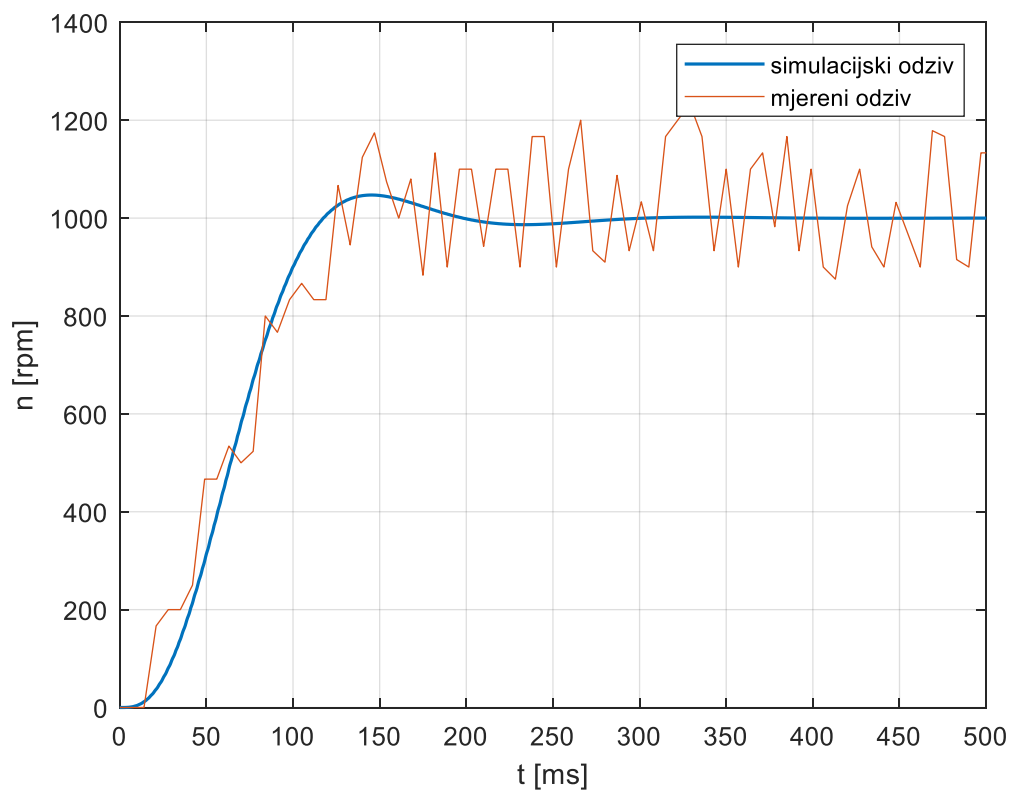
Također, u Simulinku je napravljen simulacijski model regulacijskog kruga brzine vrtnje (slika 49.) te su na slici 50. i 51. prikazani i odzivi na referentnu brzinu vrtnje od 300 min^{-1} i 1000 min^{-1} . Na istim je slikama priložen i odziv brzine vrtnje dobiven eksperimentalnim putem, odnosno dobiven sa senzora (magnetskog enkodera) iz kojih je vidljivo da se rezultati dobiveni simulacijskim modelom poklapaju sa eksperimentalnim rezultatima.



Slika 49. Simulink model regulacijskog kruga brzine vrtnje



Slika 50. Mjereni i simulacijski odziv regulacijskog kruga brzine vrtnje kod 300 min⁻¹

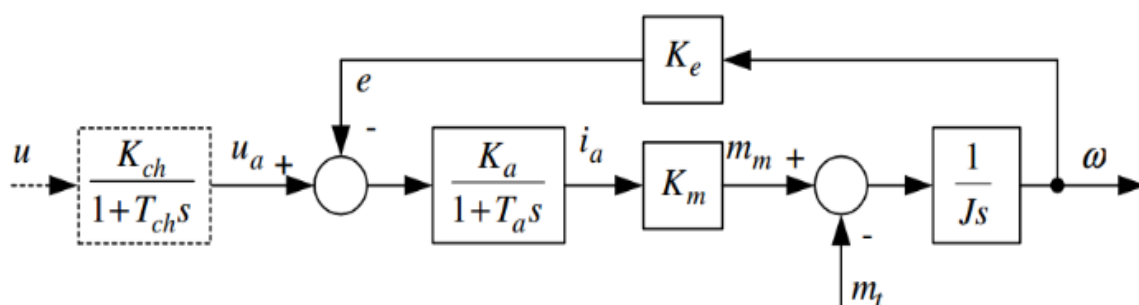


Slika 51. Mjereni i simulacijski odziv regulacijskog kruga brzine vrtnje kod 1000 min⁻¹

5.3.1.3. Simulacija regulacije brzine vrtnje bez regulatora struje armature

Kako je upravljanje i regulacija istosmjernog motora u okviru ovog završnog rada izvedena u pokusu praznog hoda, i struja armature se neznatno mijenja prilikom promjene referentne brzine vrtnje (slika 29). Stoga je i regulacija brzine vrtnje vratila elektromotora na principu regulacije struje armature praktički nerješiva. U tu svrhu, moguće je napraviti sustav regulacije brzine vrtnje bez podređenog regulacijskog kruga struje armature te se pritom utjecaj elektromotorne sile u modelu DC motora ne smije zanemariti.

Iz blokovskog dijagrama DC motora napajanog preko tranzistorskog frekvencijskog pretvarača (slika 52.) određuje se prijenosna funkcija brzine vrtnje u odnosu na referencu napona.



Slika 52. Blokovski dijagram DC motora napajanog tranzistorskim frekvencijskim ispravljačem [13]

Prijenosna funkcija brzine vrtnje u odnosu na referencu napona:

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{K_{ch}}{T_{ch}s + 1} \cdot \frac{1}{K_e} \cdot \frac{1}{1 + \frac{J}{K_a K_m K_e} s + \frac{J T_a}{K_a K_m K_e} s^2} \quad (34)$$

$$T_{em} = \frac{J}{K_a K_m K_e} \quad (35)$$

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (36)$$

$$T_{ch} = \frac{1}{f_{ch}} = 0,031875 \text{ ms} \ll T_{em} \quad (37)$$

$$1 + T_{em}s + T_a T_{em} s^2 \approx 1 + (T_{em} + T_a)s + T_a T_{em} s^2 \quad (38)$$

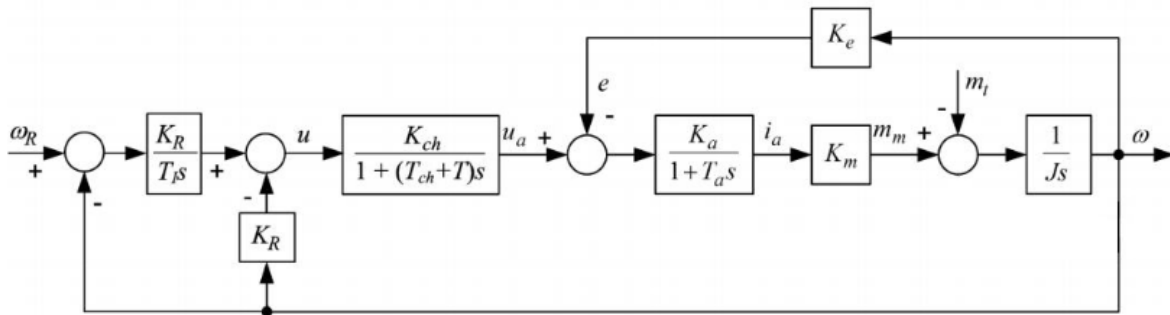
Ako vrijedi da je $T_a \ll T_{em}$ slijedi da je:

$$\frac{\omega(s)}{u(s)} \approx \frac{K_{ch}}{K_e} \cdot \frac{1}{(T_{ch}s + 1)} \cdot \frac{1}{(1 + T_a s)} \cdot \frac{1}{(1 + T_{em}s)} \quad (39)$$

Zamjenom $(T_{ch}s + 1)(1 + T_a s) \approx (T_{\Sigma} s + 1)$ dobivamo:

$$\frac{\omega(s)}{u(s)} \approx \frac{K_{ch}}{K_e} \cdot \frac{1}{(T_{em}s + 1)(T_{\Sigma} s + 1)} \quad (40)$$

Prema gore izvedenom matematičkom modelu motora pristupamo podešavanju PI regulatora brzine vrtnje. PI regulator i regulacijski krug brzine vrtnje motora prikazani su na slici 53.



Slika 53. Blokovski dijagram ekvivalentnog vremenski kontinuiranog regulacijskog kruga brzine vrtnje sa PI regulatorom [13]

Izrazi za parametre regulatora glase:

$$T_{e\omega} = \frac{1}{D_{2\omega} D_{3\omega}} \frac{T_{\Sigma} T_{em}}{T_{\Sigma} + T_{em}} \quad (41)$$

$$T_I = T_{e\omega} \left(1 - \frac{D_{2\omega} T_{e\omega}}{T_{\Sigma} + T_{em}} \right) \quad (42)$$

$$K_R = \frac{1}{K_p} \left(\frac{T_{\Sigma} + T_{em}}{D_{2\omega} T_{e\omega}} - 1 \right) \quad (43)$$

gdje su:

- $T_{e\omega}$ ekvivalentna vremenska konstanta regulacijskog kruga
- T_I integralna vremenska konstanta
- K_R pojačanje regulatora
- $D_{2\omega}, D_{3\omega}$ optimalni iznosi karakterističnog odnosa, $D_{2\omega} = D_{3\omega} = 0,5$
- T_{Σ} vremenska konstanta parazitske dinamike, $T_{\Sigma} = T + T_{par} = 0,0084s$
 - T vrijeme uzorkovanja, $T = 0,008 s$
 - T_{par} parazitska vremenska konstanta, $T_{par} = 0,0004 s$
- T_{em} elektromehanička vremenska konstanta, $T_{em} = 0,0017 s$

- K_p pojačanje procesa, $K_p = K_{ch}/K_e = 30,9144 \text{ Vs/rad}$

Nakon uvrštavanja konkretnih vrijednosti dobivaju se sljedeći iznosi parametara:

$$T_{e\omega} = 0,0069 \text{ s}$$

$$T_I = 0,005 \text{ s}$$

$$K_R = 0,0613 \text{ Vs/rad}$$

6. ZAKLJUČAK

U okviru završnog rada uspješno je implementiran PI regulator brzine vrtnje elektromotora zasnovan na primjeni magnetskog enkodera i Arduino Uno mikrokontrolera.

Napravljen je simulacijski model te su identificirani parametri sustava, nakon čega se pristupilo projektiranju PI regulatora. Parametri PI regulatora podešeni su metodom optimuma dvostrukog odnosa. Izmjereni odzivi brzine vrtnje u slučaju skokovite promjene referentne veličine u praznom hodu motora, pokazuju vrlo dobro poklapanje sa simulacijskim odzivima dobivenim korištenjem simulacijskog modela sustava.

Izrađeni eksperimentalni postav pruža mogućnost implementacije upravljačkih algoritama korištenjem drugih mjernih signala sa magnetskog enkodera, proširenje funkcionalnosti na druge režime rada (terećenje i kočenje). Također, preprogramiranjem magnetskog enkodera AM4096 otvara se mogućnost daljnjih testiranja funkcionalnosti korištenog magnetskog enkodera u regulaciji brzine vrtnje elektromotora.

LITERATURA

- [1] <https://www.machinedesign.com/mechanical-motion-systems/article/21836107/whats-the-difference-between-absolute-and-incremental-encoders>
- [2] Jaroš, R.: Završni rad: Specijalne vrste regulacijskih strojeva za posebne namjene, ETFOS, 2017.
- [3] <https://sites.google.com/site/joshshalleffectcache/>
- [4] Eisenbeis, R., Morse, M.: Overview Using Linear Hall Effect Sensors to Measure Angle, Texas Instruments, 2019.
- [5] Wu, S., Chen, J., Wu, S.: A Rotary Encoder With an Eccentrically Mounted Ring Magnet, IEEE, 2014.
- [6] Pollefliet, J.: Drive Technology and Motion Control, Power Electronics, 2018.
- [7] Jonghwa, K., Seibum, C., Kwanghyun, C., Kanghyun, N: Position Estimation Using Linear Hall Sensors for Permanent Magnet Linear Motor Systems, IEEE, 2016.
- [8] <https://studyelectrical.com/2014/12/working-principle-of-dc-motor.html>
- [9] <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-is-the-commutator-in-a-dc-motor/>
- [10] Yedamale, P.: Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microship Technology Inc., 2003.
- [11] Štigler, D.: Završni rad: Snimanje karakteristika asinkronog motora pomoću wavebook 512 iotech, ETFOS, 2017.
- [12] Sumina, D., Kutija, M.: Proračuni kočnih otpornika za ugradnju u istosmjerni međukrug pretvarača, FER, 2016.
- [13] Pavković, D.: Presentacije za vježbe iz kolegija „Servopogoni“, FSB, 2008.
- [14] RLS: AM 4096 Datasheet, RLS, 2019.
- [15] <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [16] <https://store.arduino.cc/arduino-motor-shield-rev3>
- [17] Majetić, D.: Materijali za kolegij „Upravljanje i Regulacija“, FSB, 2012.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Arduino kod

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd (0x27, 16, 2);
// Inicijalizacija pinova za motorshield
byte directionPin = 13;
byte PWMPin = 11;
byte brakePin = 8;
// Inicijalizacija ostalih pinova
byte Vout_pin = A2;
byte A_pin = A2;
byte B_pin = A3;
byte Ri_pin = A4;
byte struja_pin = A1;
byte interruptPin = 2;
byte interruptPin2 = 3;
byte gumb3Pin = 4;
// Inicijalizacija ostalih potrebnih parametara
int zz=0;
int counter = 1;
int k=1, i = 1, j;
int e_speed, set_speed;
float omega_sr[100];
float omega, fi, fi_prethodni, Ts, Vout, Vout_prethodni = 100;
float h, time_prethodno = 0.01, timel=0.001, n_min, omega_average = 0, omega_sum = 0;
float omega_average_prosli = 0, omega_srednji;
float Kp = 0.00001 * 0.0847;
float Up, Ui=0, UPI, PWM, Ti=0.004, pv_speed = 0, speed_sum = 0, lcd_speed;

void setup() {
  // postavljanje lcd-a
  lcd.begin();
  lcd.noBacklight();
  // Postavljanje PWM frekvencije na 31372,55 Hz
  TCCR2B = TCCR2B & B11111000 | B00000001;
  //Postavljanje signala kao izlazni ili ulazni
  pinMode (directionPin,OUTPUT);
  pinMode (brakePin,OUTPUT);
  pinMode (Vout_pin, INPUT);
  pinMode (A_pin,INPUT);
  pinMode (B_pin,INPUT);
  pinMode (Ri_pin,INPUT);
  pinMode (interruptPin, INPUT_PULLUP);
  pinMode (interruptPin2, INPUT_PULLUP);
  pinMode (gumb3Pin, INPUT_PULLUP);
  // ISR
  attachInterrupt (digitalPinToInterrupt(interruptPin), ubrzaj, RISING);
  attachInterrupt (digitalPinToInterrupt(interruptPin2), uspori, RISING);
  // Pritiskom na gumb pokreće se lcd i ostalo
  while (digitalRead(gumb3Pin) == 1){}
  lcd.backlight();
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Odaberite brzinu");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("vrtanje");
  delay(4000);

```

```

// Ocitavanje pocetnog kuta zakreta vratila
Vout = analogRead(Vout_pin);
fi_prethodni = map (Vout, 72, 951, 0, 360);
}

void loop() {
  // Ogranicavanje brzine vrtnje
  if (set_speed < 250){set_speed = 250;}
  else if (set_speed > 1100){set_speed = 1100;}

  time_prethodno = timel;
  timel = millis();
  Ts = timel - time_prethodno;
  Vout = analogRead(Vout_pin);
  fi = map (Vout, 72, 951, 0, 360);

  if (fi < fi_prethodni) {
    omega = (fi_prethodni - fi)/Ts;
    if (omega < 100000) {
      if (i <= k){
        omega_sr[i] = omega;
        if (i == k){
          for (j=1; j<=k; j++){
            omega_sum += omega_sr[j];
          }
          omega_average = omega_sum / k;
          i = 0;
          omega_sum = 0;
          omega_srednji = 0.8 * omega_average prosli + 0.2 * omega_average;

          omega_average_prosli = omega_average;
          pv_speed = (60000 * omega_srednji) / 360;
        }
      }
      i = i+1;
      fi_prethodni = fi;
      n = 1000 * omega / 360;
      n_min = n*60;
    }
  }
  else {
    Vout = analogRead(Vout_pin);
    fi_prethodni = map (Vout, 70, 952, 0, 360);
  }

  e_speed = set_speed - pv_speed;
  Up = Kp * e_speed;
  Ui += (Kp*Ts/Ti)*e_speed;
  UPI = Ui - Up;
  PWM = (UPI + 9.72) / 0.09475;

  if (PWM <= 200 && PWM >= 120){
    digitalWrite(directionPin, LOW);
    digitalWrite(brakePin, LOW);
    analogWrite (PWMPin, PWM);
  }
  else if (PWM < 120) {
    digitalWrite(directionPin, LOW);

```

```

digitalWrite(brakePin, LOW);
analogWrite(PWMPin,120);
Ui = 1.650 + Up;
}
else if (PWM > 200) {
digitalWrite(directionPin, LOW);
digitalWrite(brakePin, LOW);
analogWrite(PWMPin,200);
Ui = 9.72 + Up;
}
// uzimanje svakog tristotog uzorka i pisanje na lcd
if (zz == 300){
speed_sum += pv_speed;
lcd_speed = speed_sum / counter;
lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(set_speed);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(lcd_speed);
zz=0;
counter += 1;}
zz+=1;
}

// funkcije za ISR
void ubrzaj(){
set_speed += 50;
speed_sum = 0;
counter = 1;

void uspori(){
set_speed -= 50;
speed_sum = 0;
counter = 1;
delay(50);
}

```

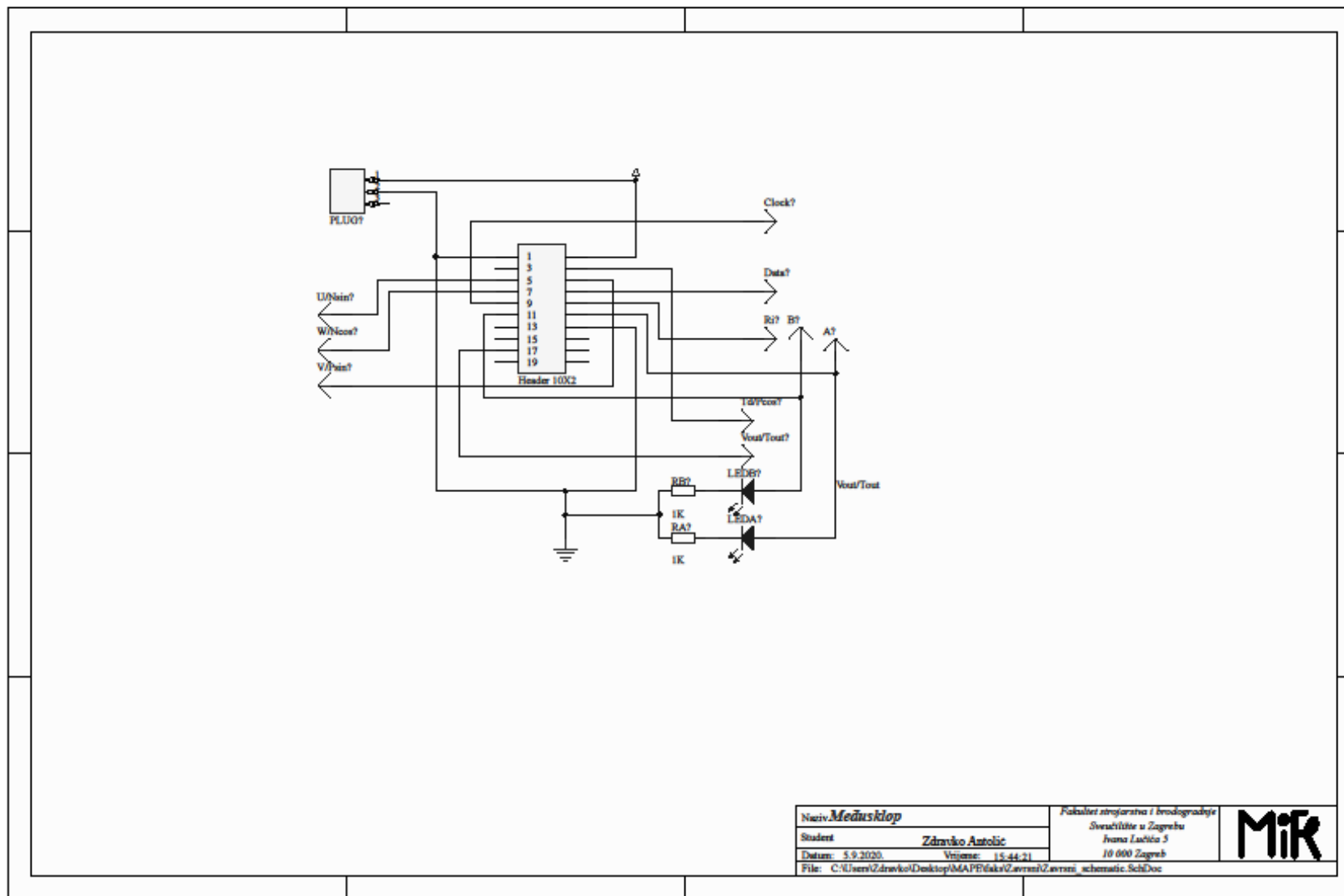
III. Primjer rezultata mjerenja spremljenih u tekstualnu datoteku

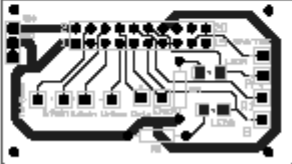



```

PID_1000 - Notepad
File Edit Format View Help
666.67
833.33
966.67
866.67
1000.00
1000.00
866.67
633.33
1133.33
1000.00
1000.00
1000.00
1000.00
900.00
766.67
933.33
1033.33
1100.00
1033.33
1100.00
1033.33
1133.33
966.67
Ln 11, Col 8 100% Windows (CRLF) UTF-8

```

IV. Tehnička dokumentacija



1	2	3	4									
A			A									
B			B									
C			C									
D	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;">  Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu Ivana Lucića 5 10 000 Zagreb </td> <td style="width: 50%;">STUĐENTE: Zdravko Antolić</td> <td style="width: 50%;">NADZV: Medusklonp</td> </tr> <tr> <td>PROJEKT: Završni rad</td> <td></td> </tr> <tr> <td>DATA: 5.9.2020.</td> <td>FORMATOR:</td> </tr> <tr> <td colspan="2">FILE: C:\Users\Zdravko\Desktop\MAPE\folia\Završni\Završni_PCB</td> </tr> </table>		 Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu Ivana Lucića 5 10 000 Zagreb	STUĐENTE: Zdravko Antolić	NADZV: Medusklonp	PROJEKT: Završni rad		DATA: 5.9.2020.	FORMATOR:	FILE: C:\Users\Zdravko\Desktop\MAPE\folia\Završni\Završni_PCB		D
 Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu Ivana Lucića 5 10 000 Zagreb	STUĐENTE: Zdravko Antolić	NADZV: Medusklonp										
	PROJEKT: Završni rad											
	DATA: 5.9.2020.	FORMATOR:										
	FILE: C:\Users\Zdravko\Desktop\MAPE\folia\Završni\Završni_PCB											
1	2	3	4									