UNIVERZA V LJUBLJANI Fakulteta za elektrotehniko

Barbara Killer

# ABSOLUTNI MAGNETNI DAJALNIK ZASUKA Z UPORABO PRINCIPA NONIJ

DIPLOMSKO DELO UNIVERZITETNEGA ŠTUDIJA

Mentor: doc. dr. Boštjan Murovec Ljubljana, junij 2008

# Zahvala

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Boštjanu Murovcu za pomoč, podporo in potrpežljivost med pisanjem diplomskega dela. Zahvaljujem se tudi vsem zaposlenim pri podjetju RLS merilna tehnika, predvsem Branku Cvetkoviću, ki me je s svojim strokovnim znanjem vseskozi vodil in podpiral.

Zahvala gre tudi mojemu očetu, ki mi vedno stoji ob strani in mi je omogočil uspešno šolanje.

# Povzetek

V diplomski nalogi je opisana izdelava prototipa absolutnega magnetnega dajalnika zasuka, ki temelji na principu Nonij. Dajalnik je sestavljen iz dveh magnetnih obročev z različnim številom magnetnih period, dveh Hallovih senzorjev in interpolatorja, ki izračuna absolutno pozicijo po principu Nonij.

Dajalnike položaja se uporablja v aplikacijah, kjer je potrebno meriti pomik ali zasuk. Ker je pojem dajalnik položaja zelo širok, je delo vsebinsko razdeljeno na dva dela. Prvi del je namenjen seznanjanju bralca s trenutnim stanjem tehnologije na področju dajalnikov. Opisani so različni načini zaznavanja, s poudarkom na magnetnem principu. Razložena sta tudi Hallov in magnetorezistivni efekt. Sledi razlaga inkrementalnih in absolutnih izhodov. Natančno je opisan princip Nonij, ki spada med absolutne izhode in katerega je potrebno analizirati.

V drugem delu so zajete meritve, ki so bile izvedene na laboratorijskem prototipu dajalnika. Le-te pokažejo, da je mehanska postavitev sistema izjemno pomembna. Če magnetna obroča nista pritrjena soosno, se le-to pozna v napakah meritev. Kljub temu se princip Nonij lahko uspešno uporabi za kodiranje absolutne pozicije in je primeren za uporabo v aplikacijah, kjer se dajalnik nahaja v grobem in neprijaznem okolju.

Ključne besede: merjenje položaja, dajalniki zasuka, Hallovi senzorji, AMR senzorji, absolutna pozicija, inkrementalna pozicija, princip Nonij.

# Abstract

This thesis describes the development of an absolute magnetic angle encoder based on the Nonius principle. The encoder comprises two magnetic rings with a different magnetic period count, two Hall sensors and an interpolator, which calculates the absolute position using the Nonius principle.

Position encoders can be utilized in any application where linear or rotary displacement has to be determined. Since position encoders is a broad term, the thesis is divided into two parts. The first part is meant to give the reader an insight into the currently available encoder technology by explaining various sensing principles that can be used. It focuses especially on magnetic sensing technology with a focus on the Hall and the magnetoresistive effect. Further, the basics of incremental and absolute outputs are explained, followed by a thorough explanation of the Nonius principle which provides an absolute output and has to be analysed.

The second part includes the measuremets of the prototype, which has been tested under laboratory conditions. These measurements will show that the mechanical setup of this encoder is of crucial importance as even slight misalignments between the two magnetic rings lead to inaccurate measurements. Nonetheless, the measurements confirm that the Nonius principle (often called Vernier principle) can be used for encoding absolute position and is also suitable for applications in harsh and unfriendly environments.

Keywords: position measurement, angular encoders, Hall sensors, AMR sensors, absolute position, incremental position, Nonius (Vernier) principle.

# Kazalo

1	ι	Jvc	od	1
2	C	Daj	jalnik položaja	3
	2.1		Induktivni princip	3
	2.2		Princip z vrtinčnimi tokovi	4
	2.3		Optični princip	4
	2	2.3.	.1 Merilne letve optičnih dajalnikov	6
	2.4		Magnetni princip	8
	2	2.4.	.1 Magnetne merilne letve	10
3	N	Ла	gnetni senzorji	11
	3.1		Hallov pojav	11
	3.2		Hallovi senzorji	13
	3.3		Magnetorezistenca	14
	3	3.3.	.1 Tipi magnetorezistence	15
	3.4		AMR senzorji	15
	3.5		Magnetni senzorji pomika in zasuka	16
	3	8.5.	.1 Merjenje zasuka s cilindričnim permanentnim magnetnom	16
	3	8.5.	.2 Merjenje pomika in zasuka z namagnetenim trakom	18
	3.6		Primerjava Hallovih in AMR senzorjev	20
4	lz	zho	odni signali	21
	4.1		Inkrementalni dajalnik položaja	21
	4.2		Absolutni dajalniki položaja	24
	4	1.2.	.1 Navidezno absolutni	26
5	Ν	lor	nijev princip	29
	5.1		Pomično merilo	29
	5.2		Uporaba Nonijevega principa za absolutni magnetni dajalnik zasuka	30
6	N	Ла	gnetni dajalnik z uporabo Nonijevega principa	35

6.1	Sestavni deli dajalnika	. 35
6.1.	1 Namagnetena obroča	. 35
6.1.	2 Hallov senzor iC-ML	. 37
6.1.	3 Interpolator iC-MN	. 38
6.2	Testiranje dajalnika	. 39
6.2.	1 Umerjanje	. 39
6.2.	2 Merjenje natančnosti	. 41
6.2.	3 Merjenje položaja v odvisnosti od sprememb parametrov	. 44
6.2.	4 Največja možna interpolacija	. 47
6.3	Zaščita dajalnika	. 48
7 Zak	ljuček	. 49

# Kazalo slik

Slika 2.1: Induktivni dajalnik	4
Slika 2.2: Presvetlitvena metoda	5
Slika 2.3: Optični dajalnik, ki temelji na odboju svetlobe	6
Slika 2.4: Primeri merilnih letev in obročev za optične dajalnike	7
Slika 2.5: Merjenje zasuka z uporabo permanentnega magneta	8
Slika 2.6: Merjenje pomika z uporabo namagnetenega traku	9
Slika 2.7: Merjenje pomika s kovinskim trakom in magnetom za induciranje	
magnetnega polja	9
Slika 3.1: Hallov pojav	11
Slika 3.2: Bločna shema Hallovega senzorja	13
Slika 3.3: Shema preprostega Hallovega senzorja	13
Slika 3.4: Magnetorezistenca	14
Slika 3.5: Shema preprostega AMR senzorja	15
Slika 3.6: Magnetne silnice diametralno polariziranega magneta	16
Slika 3.7: Magnetni senzor z elementi v štirih kvadrantih	17
Slika 3.8: Sinusna in kosinusna napetost, ki ju generira Hallov senzor pri zasuku	
magneta za 360°.	17
Slika 3.9: Sinusna in kosinusna napetost, ki ju generira AMR senzor pri zasuku	
magneta za 360°	17
Slika 3.10: Magnetni senzor za merjenje pomika in zasuka z namagnetenim trak	om
	19
Slika 3.11: Magnetni senzor pod namagnetenim trakom	19
Slika 4.1: Merilni obroč in merilna letev inkrementalnih dajalnikov	21
Slika 4.2: Inkrementalni izhodni signal	21
Slika 4.3: Inkrementalni dajalnik z dvema linijama	22
Slika 4.4: Podvojena ločljivost inkrementalnega sistema z dvema linijama	23
Slika 4.5: Obroč z absolutno kodo	24
Slika 4.6: Obroč navidezno absolutnega sistema podjetja GPI	27
Slika 5.1: Pomično merilo	29
Slika 5.2: Merjenje premera s pomičnim merilom	29
Slika 5.3: Določanje razdalje x	30

Slika 5.4: Primerjava namagnetenih trakov za magnetorezistivni in Hallov princip p	ri
uporabi Nonijevega principa	. 31
Slika 5.5: Izhodi, ki jih dobimo z glavnega traku (levo) in z Nonijevega traku (desno	))
	. 32
Slika 5.6: Ugotavljanje absolutne pozicije iz grafa	. 33
Slika 5.7: Ugotavljanje absolutne pozicije s pomočjo faznega zamika	. 34
Slika 5.8: Sestavljanje binarne kode za absolutno pozicijo	. 34
Slika 6.1: Testna naprava prototipnega Nonijevega dajalnika	. 35
Slika 6.2: Namagneteni obroč	. 36
Slika 6.3: Zamik med magnetnimi periodami glavnega in Nonijevega obroča	. 36
Slika 6.4: Pozicija Hallovih elementov znotraj integriranega vezja iC-ML	. 37
Slika 6.5: Programska oprema za interpolator iC-MN	. 39
Slika 6.6: Optimalni premik sinusnega signala (levo) in kosinusnega signala (desn	0)
	. 40
Slika 6.7: Optimalno razmerje amplitude (levo) in faze (desno)	. 40
Slika 6.8: Optimalna nastavitev signalov na glavni sledi (levo) in Nonij sledi (desno	)
	. 41
Slika 6.9: Testna naprava z novim referenčnim dajalnikom LIR	. 42
Slika 6.10: Razlika pozicije pri raznih ločljivostih	. 43
Slika 6.11: Primerjava razlike pozicije pri različnih ločljivostih glavne sledi	. 43
Slika 6.12: Prevelik premik sinusnega ali kosinusnega signala	. 44
Slika 6.13: Vpliv spremembe premika sinusne napetosti (levo) in premika kosinusr	e
napetosti (desno) na natančnost merjenja	. 44
Slika 6.14: Prevelika amplituda signala	. 45
Slika 6.15: Vpliv prevelike amplitude signala na natančnost merjenja	. 45
Slika 6.16: Druga meritev vpliva prevelike amplitude signala na natančnost merjen	ja
	. 46
Slika 6.17: Neenakomerna faza med signaloma	. 46
Slika 6.18: Vpliv neenakomerne faze med signaloma na natančnost merjenja	. 47
Slika 6.19: Zaporedne meritve iste pozicije pri 19 bitni ločljivosti	. 47
Slika 6.20: Spektralna analiza meritev pri ločljivosti 19 bitov	. 48

# Kazalo tabel

Tabela 3.1: Primerjava Hallovih in AMR senzorjev	20
Tabela 4.1: Primerjava binarne in Grayeve kode	25
Tabela 4.2: Pretvorba Grayeve kode v binarno kodo	26

# 1 Uvod

Podjetje RLS merilna tehnika d.o.o. je bilo ustanovljena leta 1989 v Ljubljani. Kratica RLS pomeni Rotacijski in Linearni Senzorji pomika in zasuka (oziroma v angleščini: Rotary and Linear motion Sensors). Podjetje je že od samega začetka osredotočeno na zagotavljanje rešitev za široko področje merilne tehnike, kjer je potreben nadzor pomika in zasuka. Od leta 2000 se RLS osredotoča na načrtovanje in proizvodnjo magnetnih dajalnikov pomika in zasuka ter njihovih komponent.

Pred kratkim je podjetje RLS dobilo povpraševanje za ustrezni dajalnik, ki bo pritrjen na os hidravlične črpalke. Zahteve so naslednje:

- dajalnik je potrebno pritrditi okoli osi (namestitev na konec osi ni mogoča); premer osi je okvirno 100 mm,
- 2. dajalnik mora podati absolutno pozicijo,
- 3. ločljivost mora biti vsaj 0,5°,
- 4. dajalnik mora biti odporen na pogoje znotraj črpalke, ki so:
  - kontakt s hidravličnim oljem, ki lahko vsebuje majhne železne delce (zaradi obrabe delov),
  - o pritisk tekočine v bližini dajalnika je lahko do 5 kPa (5 atm),
  - temperatura od –40 °C do +93,3 °C (–40 °F do +200 °F),
  - o možni termični šoki,
- 5. okvirna cena dajalnika med 60 \$ in 75 \$ (približno 38 € do 48 €).

Ker v standardni ponudbi podjetja RLS ni ustreznega dajalnika, smo pričeli z njegovim razvojem. Tako kot ostali dajalniki podjetja, bo tudi ta temeljil na magnetni tehnologiji.

Pred pričetkom razvoja je pomembno, da se seznanimo z obstoječimi izdelki in tehnologijami na tem področju. Prvi del diplomske naloge zato opisuje obstoječe stanje tehnologij v povezavi z dajalniki in tudi pojasnitev, zakaj določena tehnologija je ali ni primerna za naš projekt.

V drugem delu je opisan magnetni dajalnik, ki z uporabo Nonijevega principa podaja absolutno pozicijo. Podajamo, kako je testna merilna naprava sestavljena, katere teste smo izvedli ter ustreznost dajalnika z zahtevami zadanega projekta. Na koncu diplome sledi zaključek, v katerem so opisani predlogi za izboljšave.

# 2 Dajalnik položaja

Dajalnik položaja je naprava, ki zazna fizikalno spremembo, ki se pojavi pri premiku ali zasuku, ter jo prevede v analogni ali digitalni električni signal.

Delimo jih na dajalnike pomika ali linearne dajalnike in dajalnike zasuka ali rotacijske dajalnike. Pri rotacijskih dajalnikih ločimo dajalnike, ki merijo zasuk na koncu osi (angl.: on axis) in dajalnike, ki merijo zasuk na osi (angl.: through hole). Možna delitev rotacijskih dajalnikov je tudi na eno-obratne (angl.: single-turn) in več-obratne (angl.: multi-turn). Eno-obratni rotacijski dajalniki podajo položaj znotraj enega obrata, medtem ko več-obratni štejejo tudi število polnih obratov.

Dajalnike položaja delimo tudi glede na uporabljeni princip zaznavanja fizikalne spremembe, torej glede na uporabljeno tehnologijo. Poznamo magnetne, optične, induktivne in druge.

Dajalniki se razlikujejo tudi glede na izhodne signale, in sicer poznamo inkrementalne in absolutne. Inkrementalni dajalniki, ki se jih včasih imenuje tudi relativni dajalniki, podajo relativno spremembo pozicije, ter smer premikanja, medtem ko absolutni dajalniki podajo absolutno pozicijo.

Principi zaznavanja pri dajalnikih so:

- optični,
- magnetni,
- induktivni in
- princip z vrtinčnimi tokovi (angl.: Eddy currents).

Izbira tehnologije za naš razvoj se nagiba pretežno k optičnim in magnetnim linearnim dajalnikom, zato sta slednja dva načina zajema opisana zgolj na kratko.

#### 2.1 Induktivni princip

Induktivni princip merjenja pozicije [1] temelji na interakciji elektromagnetnega polja s kovinami v okolici. Dajalnik je sestavljen iz merilne letve in merilne glave (slika 2.1). Merilna letev je cev iz nerjavečega jekla, v katero so vstavljeni ležaji. V merilni glavi se nahajajo glavna oziroma referenčna tuljava in šest zaznavalnih tuljav. Dolžina slednjih je enaka premeru ležajev znotraj cevi. Za doseganje višje ločljivosti je vsaka zaznavalna tuljava razdeljena še na štiri faze, ki so na sliki 2.1 označene z A, B, C in D. Ko preko referenčne tuljave teče tok, se generira izmenično magnetno polje. Ob premikanju merilne glave vzdolž cevi se magnetno polje popači na znan in ponovljiv način. Zaznavalne tuljave zaznavajo spremembe v magnetnem polju in z dodatno elektroniko se lahko izvede natančne in ponovljive meritve pozicije.



Slika 2.1: Induktivni dajalnik

### 2.2 Princip z vrtinčnimi tokovi

Pri dajalnikih, ki temeljijo na vrtinčnih tokovih, se uporablja referenčno tuljavo, ki v premikajočem se delu dajalnika vzpostavi magnetno polje. Nasproti se nahaja senzorska tuljava, ki ob premiku referenčne tuljave zazna spremembo magnetnega polja. Ker omenjeni princip temelji na motnjah v magnetnem polju, je premikajoči del dajalnika lahko magnetni ali nemagnetni, feromagnetni ali neferomagnetni.

### 2.3 Optični princip

Najbolj znani so optični dajalniki. Temeljijo na presvetlitvi ali odboju svetlobe od merilne letve ali merilnega obroča z določenim rastrom in zaznavi ter procesiranju tako dobljenih optičnih signalov. Za svetlobni vir se večinoma uporablja infrardeče LED diode in fotodetektorje infrardeče svetlobe. Valovna dolžina infrardeče svetlobe je daljša od valovne dolžine vidne svetlobe, zato je senzor skorajda neobčutljiv na vidno svetlobo iz okolice, ki bi drugače predstavljala izvor šuma, za odpravo katerega bi morali uporabiti dodatno filtriranje [2].

Pri presvetlitveni metodi se svetlobni vir nahaja nad fotodetektorjem, vmes pa se postavi merilno letev oziroma obroč (izraz za oba lahko poenotimo v merilni trak), kar je prikazano na sliki 2.2. Raster merilnega traku je sestavljen iz transparentnih in netransparentnih razdelb, kjer prve prepuščajo svetlobo, druge pa ne. Pred fotodetektorjem se nahaja še zaslonka, ki ima ravno tako transparentne in netransparentne razdelbe enakega rastra kot merilni trak.

Merilna glava, sestavljena iz svetlobnega vira, zaslonke in fotodetektorja, se premika vzdolž merilnega traku. Svetloba lahko prehaja samo čez transparentne razdelbe. Jakost detektirane svetlobe je najmočnejša, ko raster zaslonke natančno sovpada z rastrom merilnega traku, torej ko so transparentne razdelbe zaslonke točno nad transparentnimi razdelbami merilnega traku. Ko sta rastra zamaknjena za dolžino celotne razdelbe, svetloba ne prehaja. Pri vmesnih stanjih je jakost svetlobe odvisna od medsebojnega prekrivanja rastra. Fotodetektor zaznava spremembe jakosti svetlobe in jih pretvarja v električni signal.



Slika 2.2: Presvetlitvena metoda

Pri metodi z odbojem se svetlobni vir in fotodetektor nahajata nad merilnim trakom (slika 2.3), ki ima zopet določen raster. Trak je običajno steklen ali kovinski. Pred fotodetektorjem se nahaja zaslonka, ki ima enak raster transparentnih in netransparentnih razdelb kot merilni trak. Svetlobni vir je infrardeča LED dioda, fotodetektor pa je sestavljen iz fotovoltaičnih celic in skupaj z zaslonko tvorijo merilno glavo, ki se premika vzdolž merilnega traku. Svetloba, ki jo oddaja LED dioda, zajame več kot 100 razdelb na merilni letvi, ki svetlobo razprši in odbije do zaslonke.

Raster letve in raster zaslonke skupaj ustvarita sinusoidne interference, ki jih fotovoltaične celice zaznajo. Dodatna elektronika znotraj merilne glave te signale predela v dva sinusoidna signala, ki sta med seboj zamaknjena za 90°.



Slika 2.3: Optični dajalnik, ki temelji na odboju svetlobe

#### 2.3.1 Merilne letve optičnih dajalnikov

Optični dajalniki merijo položaj s pomočjo rastra na merilnih letvah. Izbira materiala merilne letve je odvisna od dolžine in hitrosti merjenja. Za dolžine do 4 m in hitrosti do 10.000 obr/min se uporablja steklene letve, za merjenje zasuka ter dolžin do 30 m in hitrosti do 20.000 obr/min pa se uporablja kovinske trakove [3]. Razlog za uporabo slednjih je transport. Kovinske trakove se enostavno navije na kolut, medtem ko je steklene merilne letve potrebno pazljivo in ustrezno zaščititi, da se med transportom ne poškodujejo.

Raster na merilnih letvah se izdela z različnimi fotolitografskimi načini [4]:

- izjemno trdne linije iz kroma na steklu,
- jedkane matirane linije na pozlačenem kovinskem traku ali
- trodimenzionalne strukture na steklenih ali kovinskih substratih.

Slika 2.4 prikazuje merilni letvi iz invarja (zlitine niklja in železa z majhnim razteznim koeficientom) in merilne obroče iz nerjavečega jekla, ki so primerni za dajalnike, ki temeljijo na odboju svetlobe.



Slika 2.4: Primeri merilnih letev in obročev za optične dajalnike

Perioda rastrov sega od 40 µm do približno 1 µm. Z izjemno natančnimi litografskimi postopki in s pomočjo dodatne elektronike znotraj merilne glave lahko z optičnimi dajalniki dosežemo ločljivost do 5 nm oziroma 1 kotne sekunde. Optični dajalniki so torej primerni za aplikacije, kjer potrebujemo veliko natančnost merjenja pozicije. Fotolitografski postopki so precej dragi, saj zahtevajo izjemno čisto okolje proizvodnje, zato so posledično drage tudi merilne letve in merilni obroči.

Zaradi uporabljenih materialov so merilne letve precej občutljive in jih je potrebno zavarovati pred zunanjimi vplivi. Onesnaženje zaradi prahu, vlage, prstnih odtisov, olja ali drugih sredstev lahko povzroči izpad funkcije merjenja ali poslabšanje merilnih lastnosti – natančnosti, hitrosti odziva... Lahko pride tudi do poškodovanja površine merilne letve, kjer se pojavijo razne praske. V industrijskem okolju (v obdelovalnih strojih, stružnicah in podobno) se zato uporablja zaprte sisteme, kjer je merilna letev zaprta v aluminijastem ohišju, ki jo ščiti pred zunanjimi vplivi. V čistih okoljih (v merilnih strojih, v polprevodniški industriji) pa lahko uporabljamo odprte sisteme, kjer merilna letev ni zaščitena.

Optični princip je najboljša izbira za natančne in čiste aplikacije, medtem ko za našo aplikacijo ni najboljši, predvsem zaradi grobega okolja, v katerem se bo dajalnik nahajal. Le-ta bo prihajal v stik s hidravličnim oljem, ki lahko prekrije in umaže merilni trak in s tem onemogoči pravilni odboj svetlobe. Tudi ločljivost optičnih sistemov je mnogo večja od zahtevane in zaradi dragega procesa izdelave merilnih letev je cena optičnega sistema znatno prevelika.

#### 2.4 Magnetni princip

Pri magnetnem principu senzor dajalnika zaznava spremembo jakosti in smeri magnetnega polja. Magnetno polje je lahko realizirano na dva načina:

- 1. s permanentim magnetom,
- 2. z jedkanim kovinskim trakom, kjer pasivni magnet inducira magnetno polje.

Ponavadi se uporablja permanentne magnete v obliki cilindra ali namagnetenega traku. Prve se uporablja za merjenje zasuka, kar prikazuje slika 2.5. Magnetno polje se ustvari s permanentnim magnetom, ki ima severni in južni pol. Magnet se pritrdi na konec osi, ki se vrti. Nasproti njega se nahaja magnetni senzor. Z vrtenjem osi in magneta se spreminja jakost magnetnega polja, kar senzor zazna in pretvori v električne signale.



Slika 2.5: Merjenje zasuka z uporabo permanentnega magneta

Uporaba namagnetenega traku je analogna optičnemu principu in je prikazana na sliki 2.6. Na traku se izmenjujeta severni in južni pol, ki predstavljata raster. Senzorji v merilni glavi zaznavajo jakost magnetnega polja, ki je odvisna od položaja merilne glave glede na namagneteni trak. Merimo lahko pomik ali zasuk. Pri slednjem se namagneteni trak pritrdi okoli osi, katere zasuk merimo.



namagneten trak Slika 2.6: Merjenje pomika z uporabo namagnetenega traku

Pri drugem načinu se uporabi kovinski trak, kjer je raster narejen z jedkanjem. Razdelbe na traku so torej vdolbine in izbokline, kot je prikazano na sliki 2.7. Nad trakom se nahajata senzor in magnet. Magnet na kovinskem traku inducira magnetno polje, katerega jakost je odvisna od položaja magneta. Polje je najmočnejše, ko se le-ta nahaja nad izboklino, in najšibkejše, ko se magnet nahaja nad vdolbino. Senzor zaznava variacije v jakosti magnetnega polja in jih pretvori v električni signal. Tudi ta način je primeren za merjenje pomika ali zasuka.



Slika 2.7: Merjenje pomika s kovinskim trakom in magnetom za induciranje magnetnega polja.

#### 2.4.1 Magnetne merilne letve

Magnetne merilne letve so sestavljene iz magnetnega traku iz stroncijevega ferita, ki je vezan s plastiko ali gumo (elastomerom), kar se skupaj pritrdi na jeklen nosilec [5]. Jekleni nosilec zagotavlja mehansko stabilnost, saj ima jeklo majhen temperaturni koeficient razteza. Poleg tega se tako zagotovi tudi magnetna zaključitev sistema, saj se magnetne silnice ob koncih letve lepo zaključijo.

Raster na magnetnih merilnih letvah je realiziran z izmenjavanjem severnega in južnega pola. Najkrajša dosegljiva dolžina enega pola je 1 mm, kar pomeni, da je dolžina magnetne periode (skupna dolžina severnega in južnega pola) 2 mm. S pomočjo dodatne elektronike v merilni glavi lahko dosežemo ločljivosti do 1 µm. Vidimo torej, da je ločljivost magnetnih dajalnikov bolj groba od optičnih.

Magnetne letve so robustne in odporne na mnoge snovi, ki se uporabljajo v industrijskem okolju. Zaradi tega je celotni magnetni sistem primeren za aplikacije v grobih in neprijaznih okoljih. Magnetno zaznavanje ni občutljivo na prah, prstne odtise, vlago, razna olja in podobno, saj ti faktorji ne vplivajo na magnetno polje. Dejavniki, ki lahko popačijo magnetno polje, so na primer praske, ki jih lahko povzročijo kovinski opilki, in močna zunanja magnetna polja.

Zaradi robustnosti, relativno grobe ločljivosti in tudi cenovne ugodnosti je magnetni dajalnik primeren za zahtevano aplikacijo. V nadaljevanju sledi natančni opis raznih magnetnih senzorjev. Prav tako temeljijo vsi nadaljnji opisi na magnetnem principu zaznavanja, ker bomo le-tega uporabili v naši aplikaciji.

### 3 Magnetni senzorji

Senzorji za zaznavanje magnetnega polja so:

- 1. Hallovi senzorji in
- 2. magnetorezistivni senzorji.

Za dobro razumevanje delovanja magnetnih senzorjev je pomembno razumeti Hallov pojav in magnetorezistenco.

### 3.1 Hallov pojav

Pojav je leta 1879 odkril ameriški fizik Edwin Hall, ko je bil še v študentskih letih [6]. Hallov pojav opisuje sile, ki delujejo na premikajoče se električne naboje v prevodniku, ki je izpostavljen magnetnemu polju.

Predstavljajmo si prevodnik prečnega prereza širine *a* in debeline *b* (slika 3.1), skozi katerega v smeri osi x teče tok *I* z enakomerno gostoto *J*. Nosilci toka z nabojem *q* se premikajo s hitrostjo  $v_d$ . Prevodnik izpostavimo homogenemu magnetnemu polju *B*, ki deluje le v smeri osi y, torej pravokotno na prevodnik. Na nosilce toka sedaj deluje magnetna sila  $F_m$ , ki je usmerjena v smeri osi z, ne glede na predznak nosilcev toka.



Slika 3.1: Hallov pojav

Silo  $F_m$  izrazimo z naslednjo enačbo.

$$F_m = |q| v_d B \tag{3.1}$$

Zaradi te sile se nosilci elektrine začnejo nabirati na zgornjem delu traku, kot posledica pa se na spodnjem delu traku začne pojavljati pomanjkanje nosilcev elektrine. Po širini prevodnika se prične vzpostavljati električno polje.

Nabiranje elektrine na zgornjem delu traku traja dokler sila, ki jo povzroča električno polje, ni nasprotno enaka magnetni sili. Nastalo polje imenujemo Hallovo polje  $E_H$ , ki ga lahko zapišemo po naslednji enačbi.

$$E_H = -\frac{F_m}{|q|} = -\nu_d B \tag{3.2}$$

Hallovo polje  $E_H$  povzroči potencialno razliko med zgornjim in spodnjim robom, kar imenujemo Hallova napetost  $U_H$ .

$$U_H = E_H a = -v_d B a \tag{3.3}$$

Vendar nam enačba (3.3) še ne pove, kako nam Hallov pojav pomaga pri zaznavanju spremembe magnetnega polja. Zato si poglejmo naslednji zapis gostote toka *J*.

$$J = \frac{I}{ab} = nqv_d \tag{3.4}$$

Parameter *n* v enačbi (3.4) je koncentracija nosilcev elektrine *q*. Če iz enačb (3.3) in (3.4) izrazimo *a* in vstavimo v enačbo (3.2), izrazimo Hallovo napetost na naslednji način.

$$U_H = -\frac{IB}{nqb} = -R_H \frac{IB}{b}$$
(3.5)

Parameter  $R_H$  predstavlja takoimenovano Hallovo konstanto, ki je odvisna od uporabljenega materiala traku. Iz enačbe (3.5) izhaja, da je Hallova napetost premosorazmerna gostoti magnetnega polja *B*.

#### 3.2 Hallovi senzorji

Hallovi senzorji temeljijo na Hallovem pojavu. Sestavljeni so iz Hallovih elementov in iz dodatne elektronike za ojačanje in vrednotenje dobljenih analognih signalov iz Hallovih elementov. Bločno shemo takega senzorja prikazuje slika 3.2.



Slika 3.2: Bločna shema Hallovega senzorja

Hallov element je v bistvu prevodnik določenega prereza, kot je prikazan na sliki 3.1. Iz sheme preprostega Hallovega senzorja na sliki 3.3 je razvidno, da dve priključni sponki Hallovega elementa služita za napajanje, medtem ko z drugima dvema odjemamo Hallovo napetost. Le-ta se na sponkah pojavi, ko je element izpostavljen magnetnemu polju. Ker je ta napetost velikosti nekaj µV, jo z diferencialnim ojačevalnikom ojačamo na vrednost, ki je praktično sprejemljiva za nadaljnjo obdelavo. Izhod ojačevalnika je torej napetost, ki je proporcionalna jakosti magnetnega polja. Hallovi senzorji, ki se jih uporablja v dajalnikih, so vedno sestavljeni iz večih Hallovih elementov, ki so razporejeni v določeni geometriji, odvisno od namena uporabe.



Slika 3.3: Shema preprostega Hallovega senzorja

#### 3.3 Magnetorezistenca

Leta 1856 je Lord Kelvin prvi opazil magnetorezistivni pojav v feromagnetnih kovinah [7]. Ugotovil je, da se specifična upornost železa poveča za 0,2 %, če je le-ta izpostavljen magnetnemu polju, ki poteka vzporedno s smerjo toka in za 0,4 %, če magnetno polje poteka pod kotom glede na smer toka [8].

Na sliki 3.4 je prikazan trak iz feromagnetnega materiala, preko katerega teče tok *I* z gostoto *J*. Ko je trak izpostavljen magnetnemu polju *B*, ki je vzporeden s smerjo toka, potem je tudi vektor magnetizacije vzporeden s smerjo toka. Če se magnetno polje zasuka za kot  $\alpha$  okoli osi y, se tudi vektor magnetizacije zasuka za isti kot  $\alpha$ .



Slika 3.4: Magnetorezistenca

Magnetizacija je torej odvisna od kota med vektorjem gostote toka J in vektorjem magnetnega polja B. Zaradi spremembe kota magnetizacije se spremeni tudi specifična upornost materiala in s tem upornost traku, kar opisuje naslednja enačba.

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2 \alpha \tag{3.6}$$

V enačbi (3.6) predstavlja  $R_0$  izmerjeno upornost, ko material ni izpostavljen magnetnemu polju (B = 0),  $\Delta R$  pa je sprememba upornosti zaradi prisotnosti magnetnega polja.

Magnetorezistenco izrazimo kot razmerje med spremembo upornosti  $\Delta R$  in začetne upornosti  $R_0$  (izraz (3.7)), ki je lahko reda velikosti nekaj odstotkov.

$$\frac{\Delta R}{R_0} \tag{3.7}$$

#### 3.3.1 Tipi magnetorezistence

AMR ali anizotropna magnetorezistenca: v tem primeru je električna upornost senzorja odvisna od kota med smerjo električnega toka in orientacijo magnetnega polja. Podjetja kot so Honeywell, NXP Semiconductors, Sensitec GmbH in HL-Planar GmbH v svojih senzorjih izkoriščajo to lastnost.

GMR ali velikanska magnetorezistenca (angl.: giant magnetoresistance): je efekt na nivoju kvantne mehanike. Pojavi se v tankih plasteh, sestavljenih iz feromagnetnih in nemagnetnih plasti, ki medsebojno alternirajo. Relativno novo odkritje iz leta 1988 [9] je za svoje senzorje izkoristilo podjetje NVE.

### 3.4 AMR senzorji

Anizotropni magnetorezistivni oziroma AMR senzorji izkoriščajo lastnost določenih materialov, da spremenijo specifično upornost, če so izpostavljeni zunanjemu magnetnemu polju. Senzorji so sestavljeni iz tankih NiFe trakov (trakov iz zlitine niklja in železa) ter iz dodatne elektronike za ojačanje in vrednotenje dobljenih analognih signalov. Ko so tanki NiFe trakovi izpostavljeni magnetnemu polju, spremenijo specifično upornost za 2 % do 3 %. Ponavadi so ti trakovi povezani v Wheatstoneov mostič (slika 3.5), kjer trakovi predstavljajo spremenljive upore. Zaradi spremembe v upornosti elementov mostiča se spremeni tudi izhodna napetost mostiča, ki je direktno proporcionalna jakosti magnetnega polja.



Slika 3.5: Shema preprostega AMR senzorja

#### 3.5 Magnetni senzorji pomika in zasuka

Magnetne senzorje lahko uporabljamo tudi kot senzorje položaja. V tem primeru magnetno polje ustvarimo s pomočjo cilindričnega permanentnega magneta ali namagnetenega traku. Princip je v obeh primerih enak. Hallovi senzorji pri vsakem prehodu čez oba pola, sever in jug, generirajo eno periodo sinusne in kosinusne napetosti. AMR senzorji pa generirajo eno periodo sinusne in kosinusne napetosti pri prehodu čez dolžino enega pola (sever ali jug). Glede na razmerje med tema dvema signaloma se lahko določi položaj senzorja.

#### 3.5.1 Merjenje zasuka s cilindričnim permanentnim magnetnom

Pri merjenju zasuka s cilindričnim permanentnim magnetom je dajalnik sestavljen iz magnetnih senzorjev in diametralno polariziranega magneta cilindrične oblike. Slika 3.6 prikazuje, kako potekajo magnetne silnice tako polariziranega magneta.



Slika 3.6: Magnetne silnice diametralno polariziranega magneta

Magnet se pritrdi na konec osi, katere rotacijo merimo, nasproti pa se montira magnetni senzor. Senzor ima Hallove ali AMR elemente razporejene v krogu, pri čemer morajo biti koti med njimi vedno enaki (slika 3.7). Število uporabljenih elementov mora biti večkratnik števila 4, ki je tudi najmanjše število možnih elementov. Le-ti so razdeljeni v štiri kvadrante, kjer vsak vsebuje enako število elementov in vsak generira svoj analogni signal, ki jih označimo kot *S1*, *S2*, *S3* in *S4*.



Slika 3.7: Magnetni senzor z elementi v štirih kvadrantih

Permanentni cilindrični magnet postavimo koncentrično nad (ali pod) senzor. Polmer kroga z elementi mora biti manjši od polmera magneta. Magnetno polje, ki ga senzor zazna, se spreminja s položajem magneta. Če uporabimo Hallov senzor, le-ta pri enem popolnem zasuku magneta generira eno periodo sinusne in kosinusne napetosti (slika 3.8).



Slika 3.8: Sinusna in kosinusna napetost, ki ju generira Hallov senzor pri zasuku magneta za 360°.

Za razliko od Hallovega senzorja, AMR senzor pri zasuku magneta za 360° generira dve periodi sinusne in kosinusne napetosti (slika 3.9).



Slika 3.9: Sinusna in kosinusna napetost, ki ju generira AMR senzor pri zasuku magneta za 360°.

Sinus in kosinus se generira s pravilnim seštevanjem analognih signalov posameznih kvadrantov. Signali so med seboj zamaknjeni za 90°.

$$sinus = S1 + S2 - S3 - S4 \tag{3.8}$$

$$kosinus = S1 - S2 - S3 + S4$$
(3.9)

Nasprotna signala se seštejeta, kar podvoji velikost amplitude signala in hkrati pomaga izločiti magnetna polja zunanjega izvora.

Pozicijo znotraj enega obrata izračunamo kot arkus tangens razmerja med sinusnim in kosinusnim signalom po naslednji enačbi.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi}\right) \tag{3.10}$$

Zgornji izračun je hardversko izveden s takoimenovanim interpolatorjem.

Pri tem načinu merjenja zasuka se uporablja Hallove senzorje, ker se sinusna in kosinusna napetost generirata pri celem obratu. S primerjavo obeh signalov je pozicija znortaj enega obrata enolično določena. Pri AMR senzorjih se enolično lahko določi le pozicijo pri zasuku za 180°.

Opisanega principa se ne da uporabiti v vseh primerih. Včasih aplikacija ne omogoča pritrditve na konec osi, kar je slučaj v našem primeru. Zato nam opisani način merjenja zasuka ne odgovarja, saj ne ustreza pogoju, da mora biti senzor pritrjen okoli osi.

#### 3.5.2 Merjenje pomika in zasuka z namagnetenim trakom

Pri merjenju pomika in zasuka z namagnetenim trakom je dajalnik sestavljen iz merilne glave in namagnetenega traku. Na namagnetenem traku se izmenjujeta severni in južni pol, ki skupaj tvorita takoimenovano magnetno periodo. Merilna glava se nahaja direktno nad trakom. Magnetni senzorji znotraj glave so postavljeni v vrsto, pri čemer je razdalja med njimi enaka (slika 3.10). Velja, da je razmik *x* med dvema

elementoma enak polovici magnetnega pola. Senzor torej ob vsakem danem trenutku zaznava 3/4 magnetne periode.



Slika 3.10: Magnetni senzor za merjenje pomika in zasuka z namagnetenim trakom

Dajalnik deluje najbolj optimalno, če je merilna glava montirana tako, da senzor zaznava magnetno polje na sredini namagnetenega traku. Pri premiku senzorja za eno magnetno periodo se generirata ena perioda sinusne in kosinusne izhodne napetosti pri uporabi Hallovega senzorja (slika 3.11) in dve periodi sinusne in kosinusne napetosti pri uporabi AMR senzorja.



Slika 3.11: Magnetni senzor pod namagnetenim trakom

Sinusna in kosinusna napetost se tudi v tem primeru generirata s pravilnim seštevanjem analognih signalov posameznih Hallovih ali AMR elementov v senzorju. Pozicijo znotraj enega obrata pa se izračuna po enačbi (3.10).

### 3.6 Primerjava Hallovih in AMR senzorjev

V tabeli 3.1 so povzete glavne razlike med Hallovimi in AMR senzorji.

Hallovi senzorji	AMR senzorji
Generirajo eno periodo sinusne napetosti ob prehodu čez magnetno periodo.	Generirajo dve periodi sinusne napetosti ob prehodu čez magnetno periodo.
Bipolarna občutljivost (razlikujejo med severnim in južnim polom magneta).	Niso bipolarno občutljivi (ne razlikujejo med severnim in južnim polom magneta).
Občutljivost na pravokotno komponento magnetnega polja <i>B</i> .	Občutljivost na vzporedno komponento magnetnega polja <i>B</i> .
Linearni odziv na magnetno polje B.	Nelinearni odziv na magnetno polje B.
Brez električne histereze.	Prisotna električna histereza.

Tabela 3.1: Primerjava Hallovih in AMR senzorjev

AMR senzorji so bolj natančni, ker niso bipolarno občutljivi. Ravno zaradi bipolarne občutljivosti Hallovih senzorjev pa so le-ti primerni za merjenje zasuka s cilindričnim permanentnim magnetom. Oba magnetna senzorja imata torej svoje prednosti in slabosti. Zato bo šele obdelava izhodnih signalov pokazala, kateri senzorji so najprimernejši za našo aplikacijo.

### 4 Izhodni signali

Na podlagi pregleda tehnologij dajalnikov položaja smo za našo aplikacijo izbrali magnetno tehnologijo, in sicer dajalnik zasuka z merilno letvijo. Sledi opis izhodnih signalov izbranega dajalnika.

#### 4.1 Inkrementalni dajalnik položaja

Pri inkrementalnih dajalnikih ima merilni obroč enakomeren raster (slika 4.1). Severni in južni pol sta enako široka in skupaj tvorita eno periodo. Če bi dajalnik temeljil na optični tehnologiji, bi na stekleni merilni letvi morale biti transparentne razdelbe rahlo ožje od netransparentnih, in sicer zaradi difrakcije svetlobe.



Slika 4.1: Merilni obroč in merilna letev inkrementalnih dajalnikov

Za nadaljnjo razlago vzemimo obroč zunanjega obsega 360 mm, ki ima magnetno periodo dolgo 4 mm. Vsak prehod čez en pol je torej enak rotaciji za 2°. Senzor v merilni glavi naj temelji na Hallovem principu. Obroč montiramo na os, katere pozicijo znotraj enega obrata merimo, nad obroč pa pritrdimo merilno glavo, ki je fiksna glede na os. Ko se os, in s tem merilni obroč, vrtita, senzorji v merilni glavi zaznavajo spremembe magnetnega polja, ki jih pretvorijo v električni signal; v našem primeru dobimo sinusno napetost. Vzemimo nadaljnjo elektroniko, ki signal obdela tako, da ob pozitivni napetosti dobimo izhod 1, ob negativni izhod 0. Ustrezni izhodni signal je prikazan na sliki 4.2.



Slika 4.2: Inkrementalni izhodni signal

Izhodni signal je voden na števec, ki šteje vsak prehod stanja, torej iz 0 na 1 in iz 1 na 0. Prehod se zgodi po prehodu senzorja dajalnika čez en pol, kar je enako zasuku za 2° ( $\varphi$  = 2°). Če števec našteje 10 prehodov (n = 10), to pomeni, da se je os zasukala za 20°, po naslednji enačbi.

$$n \cdot \varphi = 10 \cdot 2^\circ = 20^\circ \tag{4.1}$$

V tem primeru je ločljivost dajalnika omejena z dolžino pola.

Velika pomankljivost opisanega dajalnika je, da pravilno deluje le v eni smeri vrtenja. Ob zasuku osi za 20° v smeri urinega kazalca, ki mu sledi zasuk osi za 20° v drugi smeri, bi moral merilni sistem prikazati skupni zasuk za 0°. Ker pa s trenutnim senzorjem, ki generira samo en signal, lahko določimo samo prehode, ne pa tudi smeri vrtenja, bo števec naštel 20 prehodov (10 v eno in 10 v drugo smer), torej skupno zasuk za 40°. Rezultat je nesmiseln.

Zato si pomagamo še s kosinusno napetostjo, ki jo generira Hallov senzor. Sinusna in kosinusna napetost sta med seboj zamaknjeni za 90°. Ustrezna digitalizirana signala sta prikazana na sliki 4.3 kot linija A za sinusni in linija B za kosinusni signal, ki sta med seboj zamaknjena za četrtino magnetne periode. Oba vodimo naprej na števec, ki šteje prehode na obeh linijah. Sedaj lahko določimo, v katero smer se vrti os, in sicer tako, da gledamo, na kateri liniji se najprej zgodi prehod iz 0 na 1; takemu prehodu rečemo tudi pozitivna fronta.

Iz Slika 4.3 razberemo, da se pri vrtenju v smeri urinega kazalca, pozitivna fronta pojavi najprej na liniji A. Pri zasuku v drugo smer, pa najprej na liniji B. Če določimo, da je vrtenje v smeri urinega kazalca pozitivno, števec v tem primeru šteje navzgor, pri vrtenju v drugo smer pa navzdol.



Slika 4.3: Inkrementalni dajalnik z dvema linijama

Poleg določanja smeri vrtenja nam upoštevanje obeh signalov dodatno poveča ločljivost. Ker sta signala med seboj zamaknjena za četrtino magnetne periode oziroma za polovico dolžine pola, to pomeni, da se sprememba signala zgodi pri zasuku za 1°. Ločljivost smo torej podvojili, kar se vidi na sliki 4.4.



Slika 4.4: Podvojena ločljivost inkrementalnega sistema z dvema linijama

Še večjo ločljivost dosežemo z nadaljnjo interpolacijo sinusne in kosinusne napetosti po enačbi (3.10). Končna ločljivost je odvisna od dolžine magnetne periode in skupnega števila prehodov signalov A in B. Slednje lahko poimenujemo tudi interpolacijski faktor. Vzemimo naslednje vrednosti.

dolžina magnetne periode: 
$$L_m = 4 \text{ mm}$$
  
kot, ki ga objema ena magnetna perioda:  $\varphi_m = 4^\circ$   
interpolacijski faktor:  $f_i = 200$ 

Ločljivost izračunamo z naslednjo enačbo.

ločljivost = 
$$\frac{\varphi_m}{f_i} = \frac{4^\circ}{200} = 0,02^\circ$$
 (4.2)

S tem principom smo ločljivost povečali iz 1° na 0,02°.

Poglejmo še eno pomanjkljivost sistema. Sinusni in kosinusni signal se ponovita po vsaki magnetni periodi. Ker so ti signali identični, dajalnik ne more ločiti, na kateri periodi, torej na katerem položaju oziroma nad katerim delom obroča, se nahaja. Zato si pri inkrementalnih sistemih pomagamo s takoimenovano referenco, ki predstavlja izhodišče ali začetno točko. Ob vsakem vklopu sistema se merilno glavo premakne do izhodišča, kjer se števec nastavi na 0. Od tu naprej merimo zasuk, ki se nanaša na to izhodišče. Inkrementalni sistem podaja relativno spremembo položaja od neke referenčne točke.

Referenco realiziramo mehansko ali električno. Pri rotacijskih sistemih referenco nastavimo tam, kjer želimo, da je izmerjeni kot enak 0°. Pri linearnih sistemih pa se referenca pogosto nahaja na sredini letve ali pa na njenem levem ali desnem koncu.

#### 4.2 Absolutni dajalniki položaja

Pri inkrementalnih dajalnikih položaja govorimo o relativni spremembi položaja glede na neko izhodiščno točko. Pri absolutnih sistemih pa velja, da podajo absolutni položaj. To pomeni, da dajalnik takoj ob zagonu izmeri položaj in nam s tem poda absolutno pozicijo – kje na letvi ali nad obročem se nahaja.

Učinkovita realizacija absolutnega dajalnika je uporaba več vzporednih merilnih letev ali koncentričnih merilnih obročev, kjer ima vsaka letev oziroma obroč drugačen raster. Ideja je prikazana na sliki 4.5, kjer ima vsak krog drugačno dolžino magnetnega pola. Natančna preučitev obroča razkrije, da je vsak položaj zapisan z drugačno kodo, kar pomeni, da je vsak položaj enolično oziroma absolutno kodiran.



Slika 4.5: Obroč z absolutno kodo.

V merilni glavi magnetnega dajalnika se nahaja toliko magnetnih senzorjev, kolikor je merilnih letev. Senzorji so postavljeni vzporedno, pri čemer se vsak nahaja nad svojo letvijo. Izhodni signal vsakega senzorja je 0 ali 1, odvisno od pola, nad katerim se nahaja. Dajalnik ob vklopu prebere vse signale in ker je vsak položaj enolično zapisan, je s tem absolutni položaj glave dajalnika nedvoumno določen.

Najpogosteje se za kodiranje položaja uporabi binarno kodo ali Grayevo kodo. Tabela 4.1 podaja primerjavo obeh kod, pri čemer je v prvem stolpcu zapisano decimalno število, v drugem zapis v binarni kodi, v tretjem pa zapis v Grayevi kodi.

decimalni zapis	binarna koda	Grayeva koda
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

Tabela 4.1: Primerjava binarne in Grayeve kode.

Uporaba binarne kode, ki je v računalniški tehnologiji najobičajnejša, predstavlja v senzoriki problem. Iz tabele 4.1 vidimo, da se pri prehodu med sosednjimi stanji lahko spremeni več kot en bit (na primer pri prehodu iz 0011 na 0100 se spremenijo kar vsi zadnji trije biti). Zaradi toleranc v procesiranju signala se dogaja, da dajalnik ne razpozna vseh prehodov istočasno. Posledično je razbrani položaja nepravilen.

Problem rešimo z uporabo Grayeve kode, pri kateri se vsako sosednje stanje razlikuje le v enem bitu. S tem zmanjšamo možnost napake pri razbiranju položaja. Grayevo kodo se pred izdajo rezultata pretvori v binarno obliko – zaradi lažjega

procesiranja v nadaljevanju. Pretvorbo dosežemo s funkcijo XOR (izključujoči ali), kar prikazuje tabela 4.2.

bit	i Gray	eve ko	ode	bit	i bina	rne ko	ode
G <sub>3</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>1</sub>	G <sub>0</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1	1
0	1	1	0	0	1	0	0
0	1	1	1	0	1	0	1
0	1	0	1	0	1	1	0
0	1	0	0	0	1	1	1
1	1	0	0	1	0	0	0
1	1	0	1	1	0	0	1
1	1	1	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	1	1
1	0	1	0	1	1	0	0
1	0	1	1	1	1	0	1
1	0	0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	1	1	1

 $B_0 = G_3 \ XOR \ G_2 \ XOR \ G_1 \ XOR \ G_0$   $B_1 = G_3 \ XOR \ G_2 \ XOR \ G_1$   $B_2 = G_3 \ XOR \ G_2$   $B_3 = G_3$ 

Tabela 4.2: Pretvorba Grayeve kode v binarno kodo

Obstajajo tudi drugi načini absolutnega zapisa pozicije. Zelo pogosta je tudi uporaba kodiranja traku s psevdo naključno binarno vrsto ali PNBV (angl.: PRBS – Pseudo-Random Binary Sequence). Elementi PNBV so med sabo navidezno neodvisni, vendar se vsaka psevdo naključna binarna vrsta prej ali slej začne ponavljati. Ima torej maksimalno periodo, ki diktira maksimalno dolžino. Tako zaporedje je realizirano s polinomskimi funkcijami.

Princip, ki ga želimo uporabiti pri našemu magnetnemu dajalniku, temelji na takoimenovanem Nonijevem principu in bo natančneje opisan v poglavju 5.

#### 4.2.1 Navidezno absolutni

Podjetje GPI (Gurley Precision Instruments) je razvilo navidezno absolutni zajem informacij in ga zaščitilo pod imenom *Virtual Absolute*® oziroma *VA*<sup>™</sup> [10]. Gre za optični princip, ki se poslužuje treh trakov. Prvi in drugi trak sta enaka kot pri inkrementalnem dajalniku (zamaknjena za četrtino periode), tretji trak pa ima enolično določeno kodo, in sicer s PNBV – razdelbe na tem traku spominjajo na črtno

kodo (slika 4.6). Ob zagonu dajalnik ne poda točne oziroma absolutne pozicije, enako kot pri inkrementalnem dajalniku. Ob izvedbi majhnega premika (pri dajalniku zasuka je le-ta velik od 1° do 2°, kar ustreza tudi dolžini bitne besede, uporabljene za PNBV) senzor ugotovi, kje točno na merjenem območju se nahaja. Od tega premika naprej se dajalnik navzven obnaša kot absolutni dajalnik. Ker se sistem ob vklopu pred izvedbo zahtevanega premika obnaša kot inkrementalni dajalnik in šele po omenjenem premiku kot absolutni, je princip dobil naziv virtualno oziroma navidezno absolutni.



Slika 4.6: Obroč navidezno absolutnega sistema podjetja GPI

# 5 Nonijev princip

Nonijev princip temelji na dveh (ali več) skalah, ki imata (imajo) različne razdelbe. S primerjavo teh skal lahko matematično določimo dolžino, velikost, obseg, pozicijo in druge veličine. Najbolj znan instrument, ki se poslužuje Nonijevega principa, je pomično merilo.

### 5.1 Pomično merilo

Pomično merilo je sestavljeno iz dveh merilnih letvic (ali dveh ravnil):

- glavno merilo, pri katerem je 1 cm razdeljen na 10 enakih razdelkov,
- pomožno merilo, pri katerem je 0,9 cm razdeljenega na 10 enakih razdelkov (vsak razdelek je torej dolg 0,9 mm).

Deset razdelkov na pomožnem merilu torej sovpada z 9 razdelki na glavnem merilu, kot je razvidno iz slike 5.1.



Slika 5.1: Pomično merilo

Če nas zanima na primer premer nekega okroglega objekta, le-tega vstavimo v kljun merila in nato premer tudi odčitamo, kot prikazuje slika 5.2.



Slika 5.2: Merjenje premera s pomičnim merilom

Za odčitavanje si pomagamo s pomožnim merilom, katerega ničla je postavljena malce višje od 1,2 cm. Ta številka nam predstavlja prvi, grobi del odčitka. Natančnejši odčitek dobimo, če ugotovimo še neznano razdaljo x na sliki 5.3.



Slika 5.3: Določanje razdalje x

Dolžini *d* in *d'* dobimo tako, da najdemo razdelek na pomičnem merilu, ki najbolj sovpada z razdelkom na glavnem merilu. Na sliki 5.3 je to razdelek 3. Vidimo, da je d = 3 mm in d' = 3.0,9 mm. S tem dobimo spodnjo enačbo.

$$x = d - d' = 3 \text{ mm} - 3 \cdot 0.9 \text{ mm} = 3 \cdot 0.1 \text{ mm} = 0.3 \text{ mm} = 0.03 \text{ cm}$$
 (5.1)

Končni rezultat oziroma odčitek izračunamo na naslednji način.

$$1,2 \text{ cm} + 0,03 \text{ cm} = 1,23 \text{ cm}$$
 (5.2)

Ločljivost takega merilnega instrumenta je odvisna od razlike med dolžino najmanjšega razdelka glavnega merila (1 mm) in dolžino razdelka pomožnega merila (0,9 mm). Omenjeno pomično merilo ima ločljivost ±0,1 mm. Princip lahko razširimo na več merilnih letev.

S pomičnim merilom sicer merimo obseg ali pa dolžino nekega objekta. Lahko pa bi šlo tudi za premik iz izhodiščne točke 0 cm do točke, oddaljene za 1,23 cm. Zato lahko Nonijev princip uporabimo tudi za merjenje absolutne pozicije.

#### 5.2 Uporaba Nonijevega principa za absolutni magnetni dajalnik zasuka

Za izvedbo takega dajalnika potrebujemo dva namagnetena trakova z različnima rastroma. Število period na prvem ali glavnem traku je za eno večje od števila period na drugem ali Nonijevem traku. Na sliki 5.4 vidimo, kako sta namagnetena traka pri

uporabi magnetorezistivnih senzorjev (zgornja trakova) oziroma Hallovih senzorjev (spodnja trakova). Če želimo meriti zasuk, moramo trakova nanesti na os, tako da se prvi in zadnji pol traku stikata. Ugotovimo, da se pri uporabi magnetorezistivnih senzorjev pri Nonijevem traku stikata dva enaka pola. Zaradi tega se popači magnetno polje in uporaba magnetorezistivnih senzorjev za naš dajalnik odpade.



Slika 5.4: Primerjava namagnetenih trakov za magnetorezistivni in Hallov princip pri uporabi Nonijevega principa

Za razlago principa bomo uporabili namagnetena trakova s 16 magnetnimi periodami na glavnem traku in 15 magnetnimi periodami na Nonijevem traku. Uporabljeni senzorji temeljijo torej na Hallovem principu, tako da dobimo pri rotaciji za 360° na glavnem traku 16 sinusoid, na Nonijevem traku pa 15 sinusoid. Če gledamo vsak senzor kot svoj sistem, se le-ta obnaša kot inkrementalni dajalnik. Prav tako kot pri inkrementalnih dajalnikih, dobimo pozicijo znotraj ene periode z enačbo (3.10). Vzemimo 4-bitno interpolacijo – vsaka perioda je torej razdelana še na 16 delov. Poglejmo si najprej glavni trak.

16 period na 360° = 1 perioda na 22,5°  
interpolacijski faktor: 
$$\varphi_i = 16$$
  
ločljivost =  $\frac{22,5^\circ}{\varphi_i} = 1,40625^\circ$ 
(5.3)

Za Nonijev trak dobimo naslednje vrednosti.

15 period na 360° = 1 perioda na 24°  
interpolacijski faktor: 
$$\varphi_i = 16$$
  
ločljivost =  $\frac{24^\circ}{\varphi_i} = 1,5^\circ$ 
(5.4)

Slika 5.5 prikazuje najprej analogni sinus in kosinus napetosti, nato digitalizirano pozicijo (označena kot  $\alpha_1$  in  $\alpha_2$ ).



Slika 5.5: Izhodi, ki jih dobimo z glavnega traku (levo) in z Nonijevega traku (desno)

Če se os obrne za kot 275,6°, dobimo na izhodu, ki bere glavni trak, binarno kodo  $\alpha_1 = 0100$ , na izhodu, ki bere Nonijevev trak, pa  $\alpha_2 = 1000$ . Na glavnem traku se ta koda pojavi 16-krat (enkrat v vsaki periodi), torej ne moremo vedeti, kateri kot je pravi. Zato si pomagamo še z Nonijevim trakom, in sicer tako, da digitalizirane pozicije glavnega in Nonijevega traku narišemo na istem grafu (slika 5.6) in ugotovimo, pri katerem kotu dobimo obe binarni kodi. Iz slike 5.6 vidimo, da se to res zgodi pri kotu 275,6°.



Slika 5.6: Ugotavljanje absolutne pozicije iz grafa

Da ne bi vsakič iskali izmerjeni kot na grafu, si pomagamo s faznim zamikom med pozicijama na glavnem in Nonijevem traku. Le-ta nam poda grobo pozicijo in s tem informacijo, znotraj katere periode najdemo pravilno pozicijo.

fazni zamik: 
$$\beta = \alpha_1 - \alpha_2$$
 (5.5)

Na sliki 5.7 je prikazan graf, v katerega sta vrisana pozicija  $\alpha_I$ , brana z glavnega traku, in fazni zamik  $\beta$  med pozicijama glavnega in Nonijevega traku. Vidimo, da se kot 275,6° pojavi znotraj faznega zamika vrednosti  $\beta$  = 1100. Znotraj te periode se nahaja tudi prava pozicija  $\alpha_I$ .



Slika 5.7: Ugotavljanje absolutne pozicije s pomočjo faznega zamika

Binarno kodo na izhodu sestavimo, kot je prikazano na sliki 5.8.



Slika 5.8: Sestavljanje binarne kode za absolutno pozicijo

Na izhodu sedaj dobimo 8-bitno besedo (256 stanj), ki je enolična za vsako pozicijo znotraj enega obrata. Zgoraj sestavljena beseda se interpretira kot sledi.

ločljivost dajalnika = 
$$\frac{360^{\circ}}{256}$$
 = 1,40625° (5.6)  
 $11000100_{[2]}$  = 196<sub>[10]</sub>  
absolutna pozicija = 196 · 1,40625° = 275,625° (5.7)

# 6 Magnetni dajalnik z uporabo Nonijevega principa

Po analizi obstoječih možnosti, smo se odločili za razvoj magnetnega dajalnika, ki temelji na Nonijevem principu. Slika 6.1 prikazuje testno napravo laboratorijskega prototipa dajalnika. Le-ta je sestavljen iz 3 osnovnih delov: dveh Hallovih senzorjev iC-ML, dveh namagnetenih obročev in interpolatorja iC-MN. Ostali deli testne naprave so še motorček, ki vrti gred, na katero sta nanešena namagnetena obroča, referenčni magnetni dajalnik RM44 podjetja RLS in USB vmesnik za komunikacijo med dajalnikom in osebnim računalnikom.



Slika 6.1: Testna naprava prototipnega Nonijevega dajalnika

### 6.1 Sestavni deli dajalnika

Predno si ogledamo delovanje dajalnika, opišimo značilnosti njegovih posameznih delov.

#### 6.1.1 Namagnetena obroča

Namagnetena obroča smo dobavili pri firmi Bogen Electronic GmbH. Magnetni trak iz stroncijevega ferita je vezan z elastomerom, kar je skupaj pritrjeno na jeklen nosilec (slika 6.2). Notranji premer obroča je 84,5 mm, zunanji premer pa 100,5 mm. Zunanji premer variira na drugi decimalki, kar predstavlja rahlo ekscentričnost pri vrtenju obroča. Ekscentričnost lahko povzroči nenatančnosti pri meritvah, saj se s tem spreminja razdalja med senzorjem in namagneteno površino. Višina magnetnega obroča je 8,5 mm.



Slika 6.2: Namagneteni obroč

Spodnji obroč na testni napravi ima 64 magnetnih period, zgornji obroč pa 63 magnetnih period. Zamik med magnetnimi periodami je razviden iz slike 6.3, kjer je uporabljen takoimenovani magnetni prikazovalnik (angl.: magnetic viewer).



Slika 6.3: Zamik med magnetnimi periodami glavnega in Nonijevega obroča

Obroč s 64 magnetnimi periodami je glavna (ang.: master) sled, obroč s 63 magnetnimi periodami pa Nonijeva sled. Vsaka magnetna perioda na glavni sledi predstavlja zasuk za 5,625°, vsaka magnetna perioda na Nonijevi sledi pa predstavlja zasuk za 5,714°. Natančnost magnetenja period je s strani dobavitelja podana kot  $\pm$ 40". Dolžine magnetnih period izračunamo z naslednjima enačbama, kjer *N* predstavlja število magnetnih period in *d* premer obroča.

glavna sled: 
$$p_M = \frac{\pi \cdot d}{N} = \frac{\pi \cdot 100,5 \text{ mm}}{64} = 4,93 \text{ mm}$$
 (6.1)

Nonij sled: 
$$p_N = \frac{\pi \cdot d}{N} = \frac{\pi \cdot 100,5 \text{ mm}}{63} = 5,01 \text{ mm}$$
 (6.2)

#### 6.1.2 Hallov senzor iC-ML

Uporabili smo Hallov senzor iC-ML podjetja iC-Haus [11], katerega glavne značilnosti so:

- namenjen za uporabo z magnetnimi trakovi magnetne periode 5,12 mm,
- neobčutljivost na homogena magnetna polja zunanjega izvora (uporaba diferencialnega zaznavanja),
- možnost analognih izhodov z amplitudo 2 V<sub>pp</sub>,
- avtomatično prilagajanje ojačenja (angl.: AGC automatic gain control),
- merjenje hitrosti do 5 m/s,
- temperaturno obratovalno območje od 40 °C do +125 °C.

Integrirano vezje se nahaja v ohišju TSSOP20, dimenzije silicija znotraj integriranega vezja pa so 4,4 mm x 1,9 mm. Pozicija Hallovih elementov v integriranem vezju je prikazana na sliki 6.4.



Slika 6.4: Pozicija Hallovih elementov znotraj integriranega vezja iC-ML

Razmik med Hallovimi elementi je 1,28 mm, kar je enako eni četrtini idealne magnetne periode. Magnetne periode naših namagnetenih trakov so krajše, kar pomeni, da bo Hallov senzor zajel nekoliko več od treh četrtin periode. V podatkovnem listu integriranega vezja iC-ML je predlagano, da se v takem primeru ohišje zasuka tako, da bo pravokotna projekcija razmika med Hallovimi elementi enaka trem četrtinam uporabljene periode. V našem prototipu le-tega nismo upoštevali. Namesto tega smo kompenzacijo faznega zamika med sinusnim in kosinusnim signalom izvedli s korekcijo faze.

Izhodni signali integriranega vezja so sinusna napetost, kosinusna napetost in obe negirani vrednosti, kar vodimo naprej na interpolator. Razdalja med senzorjem in magnetnim trakom je 1,6 mm.

#### 6.1.3 Interpolator iC-MN

Za vrednotenje signala smo uporabili interpolator iC-MN podjetja iC-Haus [12], čigar temperaturno območje delovanja je od –40 °C do +95 °C. Integrirano vezje ima možnost branja treh analognih signalov in izračuna absolutnega položaja po Nonijevem principu z dvema ali tremi sledmi. Za našo aplikacijo uporabljamo le dve sledi – glavno in Nonijevo sled.

Število period na glavni sledi je 64, zato moramo iz faznega zamika med sledema dobiti ravno toliko razdelkov. V ta namen nam interpolator iC-MN narekuje, da se ločljivost Nonijeve sledi nastavi na 6 bitov (64 inkrementov). Maksimalna ločljivost, ki je dosegljiva znotraj magnetne periode na glavni sledi, je 13 bitov oziroma 8.192 inkrementov. Največja teoretično deosegljiva ločljivost je 19 bitov ali 524.288 inkrementov (6 bitov iz faznega zamika plus maksimalna ločljivost glavne sledi, ki je 13 bitov). Z meritvami bomo ugotovili, kakšne so realne meje ločljivosti.

Od podjetja iC-Haus smo dobili tudi testno vezje »iC-MN Evaluation board« in programsko opremo za nastavljanje parametrov interpolatorja iC-MN. Slednja je prikazana na sliki 6.5.

	RICC.ID		Mode			_	
IC-MN	4D4E3001000	56943	No Hardware			- fic	Haus
Version C1							
				ReadSens			MN_CMD
Output Format	Sens			Read Output	Single		WRITE CONF
Dec 🔻			_	Incos gouper	j		SOFT_PRES
	MI		_	Write File	Err -> St	op	CRC_CHECK
mm / SI	Error W	arning					TOG_BISS
							Write MN CMD
Analog Analog Master An Direction of	alog Segment Analog No	onius Offsets Sing Bitlength Master	leturn Multiturn 13 bit	Interface Test	Op. Moo	@ 2	© 3
Analog Analog Master An Direction of Rotation Counterdivisor Parting	alog Segment Analog No 25 ns /L:125 ns 👻	onius Offsets Sing Bitlength Master Used Bitlength Segment	leturn Multiturn 13 bit 0 bit	Interface Test	Op. Mor Register ck nt wal Frequency itoring	<ul> <li>Norma</li> <li>2</li> <li>7,625</li> </ul>	© 3 kHz •
Analog Analog Master An Direction of Rotation H: 11 Counterdivisor H: 11 Counterdivisor Binary Search H: 11	alog Segment Analog Ne 25 ns / L: 125 ns * 25 ns / L: 250 ns *	onius Offsets Sing Bitlength Master Used Bitlength Segment Sync Bitlength Segment	leturn Multiturn 13 bit 0 bit 0 bit	DIR Interface Test Tra Cou Sign Mor Dat	Op. Mor Register ck nt val Frequency itoring jeturn a length	<ul> <li>Norma</li> <li>2</li> <li>7,625</li> <li>13 bit</li> </ul>	© 3 kHz •
Analog Analog Master An Direction of Rotation Counterdvisor Hell Parting Counterdvisor Binary Search Mode Dx0	alog Segment Analog No 25 ns / L: 125 ns v 25 ns / L: 250 ns v : Nonius v	onius Offsets Sing Bitlength Master Used Bitlength Segment Sync Bitlength Segment Used Bitlength Nonius	leturn Multiturn 13 bit 0 bit 0 bit 6 bit	Interface Test	Op. Mor Register dk nt wal Frequency itoring jeturn a length	<ul> <li>Norma</li> <li>2</li> <li>7,625</li> <li>13 bit</li> </ul>	© 3 kHz •
Analog Analog Master An Direction of Rotation Counterdvisor Hill Parting Counterdvisor Binary Search Hill SJCConversion Doxo	alog Segment Analog Ne 25 ns / L: 125 ns * 25 ns / L: 250 ns * : Nonius *	anius Offsets Sing Bitlength Master Used Bitlength Segment Segment Used Bitlength Nonius	leturn Multiturn 13 bit 0 bit 0 bit 6 bit 4 bit	JIR Interface Test Co. Sign Sign Dat	Op. Mor Register dk nt al Frequency itoring jeturn a length	<ul> <li>Norma</li> <li>2</li> <li>7,625</li> <li>13 bit</li> </ul>	© 3 kHz •
Analog Analog Master An Direction of Rotation Counterdvisor Hill Binary Search Hill SDConversion Data	alog Segment   Analog No 25 ns / L:125 ns + 25 ns / L:250 ns + : Nonius +	onus Offsets Sing Bitlength Master Used Bitlength Segment Sync Bitlength Nonius Sync Bitlength Nonius	leturn Multiturn 13 bit 0 bit 6 bit 4 bit	Interface Test Interface Test Co. Sorr Sorr Sorr Sorr Trans Sorr Mor Dat	Op. Mor Register dk nt lal Frequency itoring jeturn a length	<ul> <li>Norma</li> <li>2</li> <li>7,625</li> <li>13 bit</li> </ul>	© 3 kHz •
Analog Analog Master An Direction of Rotation Parting Counterdvisor H=12 Binary Search S/DConversion 0x0	alog Segment   Analog N 25 ns / L:125 ns *) 25 ns / L:250 ns *) : Nonius *)	onus Offsets Sing Bitlength Master Used Bitlength Sync Bitlength Nonius Sync Bitlength Nonius	leturn Multiturn 13 bit 0 bit 6 bit 4 bit	Interface Test Tra Co. Sign Mor Dat	Op. Moc Register ck nt wal Frequency itoring Jeturn a length	<ul> <li>Norma</li> <li>2</li> <li>7,625</li> <li>13 bit</li> </ul>	© 3 kHz v
Analog Analog Master An Direction of Rotation Counterdvisor H122 Parting Counterdvisor Binary Search H122 S/DConversion Dx0	alog Segment   Analog Ne 25 ns / L:125 ns • ) 25 ns / L:250 ns • ) : NonLus • )	anus Offsets Sing Bitlength Master Used Bitlength Segment Used Bitlength Nonius Sync Bitlength Nonius	leturn Muliturn 13 bit 0 bit 6 bit 4 bit	Interface Test Tra Co. Sign Mor Dat	Op. Moc Register dt nt al Frequency itoring Jeturn a length	<ul> <li>Norma</li> <li>2</li> <li>7,625</li> <li>13 bit</li> </ul>	© 3 kHz •
Analog Analog Master An Direction of Rotation Counterdvisor H:12 Parting Counterdvisor Binary Search SpConversion 0x0 Node	alog Segment         Analog Ne           25 ns /L:125 ns         *)           25 ns /L:250 ns         *)           25 ns /L:250 ns         *)           30 Nonius         *)	Bitength Master Used Bitength Sagment Sync Bitength Nonius Sync Bitength Nonius	leturn Multiturn 13 bit 0 bit 0 bit 6 bit 4 bit	Interface Test	Op. Moc Register dt al Frequency itoring Jefurn a length	<ul> <li>Norma</li> <li>2</li> <li>7,625</li> <li>13 bit</li> </ul>	03 kHz ·

Slika 6.5: Programska oprema za interpolator iC-MN

#### 6.2 Testiranje dajalnika

Sistem je napajan z napetostjo 5 V, in sicer preko USB vmesnika iC-MN testnega vezja, ki je povezan z osebnim računalnikom.

#### 6.2.1 Umerjanje

Najprej smo z umerjanjem optimizirali analogne signale na glavni in na Nonijevi sledi. Umerjanje smo izvedli s programsko opremo za iC-MN interpolator, kjer smo nastavljali naslednje parametre: premik (angl.: offset) sinusnega signala, premik kosinusnega signala, amplitudo obeh signalov in fazo obeh signalov. Ponovitveni cikel (angl.: duty cycle) omenjenih parametrov je bilo potrebno nastaviti na 50 %.

Ob priključitvi na osciloskop smo ugotovili, da sinusna in kosinusna napetost pri vrtenju rahlo (za nekaj 10 mV) spreminjata amplitudo in da perioda signalov ni enakomerna. Sprememba v amplitudi nam je dala misliti, da se magnetna obroča vrtita ekscentrično. Obroča sta dejansko opletala, kar smo popravili. Kljub temu se je amplituda še vedno spreminjala. Z nadaljnjimi meritvami smo ugotovili, da je ekscentričnost posledica neenakosti debeline nanosa magnetnega materiala na kovinski nosilec (kot že omenjeno v poglavju 6.1.1). Le-tega nismo imeli možnosti odpraviti.

Kljub temu smo nadaljevali z umerjanjem signalov. Na slikah z osciloskopa (slika 6.6 in slika 6.7) je rumena krivulja sinusna napetost, zelena krivulja kosinusna napetost, modra in vijolična krivulja pa prikazujeta komparirane sinusne oziroma kosinusne signale. Umerjali smo enosmerno komponento sinusnega oziroma kosinusnega signala tako, da smo dosegli 50 % ponovitveni cikel na kompariranih signalih. Ob robu osciloskopskih slik se vidi čas trajanja pozitivnega in negativnega pulza na kompariranih signalih.



Slika 6.6: Optimalni premik sinusnega signala (levo) in kosinusnega signala (desno)



Slika 6.7: Optimalno razmerje amplitude (levo) in faze (desno)

Isto smo izvedli na glavni in na Nonijevi sledi. Na sliki 6.8 so prikazani optimalno nastavljeni signali na obeh sledeh.



Slika 6.8: Optimalna nastavitev signalov na glavni sledi (levo) in Nonij sledi (desno)

Pomemben pogoj za pravilno delovanje sistema je tudi fazni zamik med magnetnimi preiodami namagnetenih obročev. Programator interpolatorja iC-MN ima tudi funkcijo kalibracije omenjenega faznega zamika. Pri številu 64 magnetnih period na glavni sledi je maksimalno dopustno fazno odstopanje ±2,46° glede na eno električno periodo glavne sledi. Z obračanjem Nonijevega obroča smo dosegli najmanjše fazno odstopanje ±3,94°, nikakor pa nam ni uspelo ujeti dopustnega intervala. Če smo kalibrirali le eno osmino obroča, smo padli znotraj dopustnega intervala. Iz tega sklepamo, da je zopet problem ekscentričnosti namagnetenih obročev. Pričakujemo, da se bo ta napaka poznala pri meritvah.

#### 6.2.2 Merjenje natančnosti

Ločljivost Nonijeve sledi je bila fiksirana na 6 bitov, ločljivost glavne sledi pa je bila nastavljena na 13 bitov. Merili smo več pozicij pri enem obratu in izvedli več meritev, pri katerih smo izhod dajalnika spreminjali od ločljivosti 13 bitov do maksimalne ločljivosti 19 bitov. Če je izhod nastavljen na manjšo ločljivost od maksimalne, potem manj pomembni biti (LSB) niso upoštevani.

Izhodišče je bilo vedno v isti točki, korak merjenja je bil 22,5°. Meritev smo izvedli tako, da smo os z obročema ročno zavrteli do naslednjega koraka, ki smo ga določili z referenčnim dajalnikom. Nato smo zapisali vrednost, ki smo jo dobili na Nonij dajalniku. Kmalu smo ugotovili, da je referenčni dajalnik RM44 premalo natančen, saj smo v bistvu merili napako referenčnega dajalnika in ne merjenega dajalnika. Zato smo le-tega morali zamenjati z bolj natančnim dajalnikom. Nad os smo montirali

optični inkrementalni dajalnik LIR podjetja SKB IS, čigar ločljivost je 1.200.000 inkrementov na obrat. Na sliki 6.9 se vidi, da je dajalnik LIR pritrjen na os s sklopko, s katero smo zagotovili, da ni prihajalo do spodrsovanja.



Slika 6.9: Testna naprava z novim referenčnim dajalnikom LIR

Sedaj smo meritve izvajali na naslednji način:

- izhodiščna točka je bila vedno ista,
- merjen je bil cel obrat s korakom 22,5°,
- pozicioniranje osi je bilo izvedeno z ročnim pomikom,
- pozicija je bila nastavljena na prehod med želenim položajem in predhodnim,
- pozicija je bila nastavljena glede na izhod Nonij dajalnika.

Izhod Nonij dajalnika so inkrementi (ne stopinje), zato prehoda med dvema položajema ni bilo težko najti. Ko je izhod Nonij dajalnika skakal med na primer 511 in 512, je to pomenil prehod med položajem 22,5° (ekvivalentno 512 inkrementov) in predhodnim položajem. Tedaj smo pogledali, koliko nam kaže referenčni dajalnik. Vse to smo ponovili za ločljivosti 13, 14, 15, 16, 17, 18 in 19 bitov. Prehod med dvema stanjema je bilo mogoče zanesljivo določiti do ločljivosti 16 bitov. Pri višjih ločljivostih prehoda med dvema stanjema ni bilo več mogoče doseči, saj se je zadnji digit spreminjal za več kot ±3 inkremente.

V grafu na sliki 6.10 so vrisane vrednosti za ločljivosti od 13 do 16 bitov. Takoj opazimo, da ob prehodu celega kroga ne pridemo nazaj v ničlo. Ugotovili smo, da

imamo v sistemu napako, ki povzroči -0,08° zamika na obrat in predvidevamo, da je ta napaka posledica omenjene ekscentričnosti magnetnih obročev. Če smo obroč zavrteli nazaj v izhodiščno točko, je le-ta zopet sovpadala na obeh dajalnikih.



Slika 6.10: Razlika pozicije pri raznih ločljivostih

Zanimalo nas je tudi, če ločljivost magnetne periode na glavni sledi vpliva na natančnost. Zato smo izvedli tudi meritev pri 10-bitni ločljivosti glavne sledi. Izhodna ločljivost je bila zopet 13 bitov. Iz slike 6.11 se vidi, da ločljivost glavne sledi ne vpliva na natančnost izpisane pozicije.



Slika 6.11: Primerjava razlike pozicije pri različnih ločljivostih glavne sledi

#### 6.2.3 Merjenje položaja v odvisnosti od sprememb parametrov

Testirali smo tudi, kako se sistem obnaša, če spremenimo katerega od parametrov. Najprej smo spremenili premik na sinusnem in kosinusnem signalu (slika 6.12), kar vpliva na zamik med sinusno in kosinusno napetostjo.



Slika 6.12: Prevelik premik sinusnega ali kosinusnega signala

Kot že omenjeno, smo meritve vedno pričeli iz iste izhodiščne točke, pri čemer smo se orientirali na referenčni dajalnik. Ob spremembi premika sinusnega signala za največjo vrednost v pozitivni smeri je bil izhod Nonij dajalnika zamaknjen za 1.560 inkrementov od izhodiščne točke, kar je enako 68,55°. Ob spremembi premika kosinusnega signala za največjo vrednost v negativni smeri, je bil izhod Nonij dajalnika zamaknjen za 6.632 inkrementov od izhodiščne točke, kar je enako 291,45° oziroma – 68,55°. Sprememba premikov ima torej enak vpliv v obeh primerih, kar je zamik izhodiščne točke za določen kot. Pred merjenjem smo izhod Nonij dajalnika v tej točki ponastavili na vrednost 0 in izvedli meritve pri enem zasuku. Iz grafov na sliki 6.13 se vidi, da premika ne vplivata na natančnost merjenja.



Slika 6.13: Vpliv spremembe premika sinusne napetosti (levo) in premika kosinusne napetosti (desno) na natančnost merjenja

Nato smo spremenili amplitudo signala, tako da je signal prišel skoraj v nasičenje (faktor ojačanja smo z 1,5 povečali na 3,05). Na sliki 6.14 vidimo, da je amplituda sinusnega signala večja od amplitude kosinusnega signala, kar popači nastavitveni cikel.



Slika 6.14: Prevelika amplituda signala

Zopet smo izvedli meritve pozicije pri enem polnem zasuku. Presenečeni smo bili, da sprememba amplitude ni bistveno oziroma sploh ni vplivala na natančnost meritve (slika 6.15).



Slika 6.15: Vpliv prevelike amplitude signala na natančnost merjenja

Ker nas je rezultat presenetil, smo izvedli še eno meritev s spremenjeno amplitudo. V primerjavi s prejšnjo meritvijo sta bili dve razliki: amplitudo smo nastavili na manjše ojačanje (faktor 2,27) in spremenili izhodiščno točko. Graf meritve je prikazan na

sliki 6.16. Na prvi pogled izgleda meritev drugačna od prejšnje, vendar ob natančnejši analizi ugotovimo, da je graf po obliki enak, le da je zamaknjen. S to meritvijo smo v bistvu dokazali, da je sistem ponovljiv in absoluten. Nismo pa ugotovili, zakaj sprememba amplitude ne vpliva na natančnost meritve.



Slika 6.16: Druga meritev vpliva prevelike amplitude signala na natančnost merjenja

Na koncu smo spremenili še fazo signala in na sliki 6.17 se jasno vidi, da ponovitveni cikel ni več 50 %.



Slika 6.17: Neenakomerna faza med signaloma

Izvedli smo meritve pozicije pri zasuku za 360° in tudi sprememba faze ni vplivala na natančnost meritev (slika 6.18).



Slika 6.18: Vpliv neenakomerne faze med signaloma na natančnost merjenja

#### 6.2.4 Največja možna interpolacija

Zadnja meritev je bila namenjena določitvi največje možne uporabne interpolacije. Pri ločljivosti 19 bitov se je zadnji bit spreminjal za nekaj inkrementov. Izvedli smo 200 meritev enega položaja, in sicer vsakih 6 sekund. Graf na sliki 6.19 prikazuje rezultate v časovnem prostoru.



Slika 6.19: Zaporedne meritve iste pozicije pri 19 bitni ločljivosti

Nad rezultati smo izvedli spektralno analizo (Slika 6.20). Ugotovili smo, da spekter nima izrazitih harmonskih komponent, kar je lastnost belega šuma. Šum je reda

velikosti 3 bite pri 19 bitni interpolaciji. Na tej osnovi sklepamo, da je največja uporabna ločljivost 16 bitov.



Slika 6.20: Spektralna analiza meritev pri ločljivosti 19 bitov

### 6.3 Zaščita dajalnika

Pogoj za ciljni dajalnik je tudi, da je zaščiten pred vplivi okolja znotraj hidravlične črpalke. Opisani prototip je primeren le za laboratorijske okoliščine, vendar imamo pripravljeno rešitev za praktično uporabno izvedbo.

Elektroniko bo potrebno ustrezno zaščititi pred vdorom hidravličnega olja in pred pritiskom iz okolice. Za to bo prvi korak dizajniranje tiskanega vezja, ki bo zajelo celotno elektroniko – senzorja in interpolator z vsemi potrebnimi komponentami. Vezje bo nato pritrjeno v ohišje iz aluminija, ter na koncu zalito s posebno zalivko, ki bo elektroniko zaščitila do stopnje zaščite IP68 po standardu IEC 529 [13]. Število 6 pomeni popolno zaščito pred vdorom prahu, število 8 pa pomeni zaščito pred vdorom vode pri popolni potopitvi do 1 m globine. Le-to bo izvedeno v podjetju RLS, ki ta način uporablja za zaščito svojih standardnih dajalnikov.

Za magnetna obroča predstavljajo problem možni kovinski delci, ki se lahko nahajajo v hidravličnem olju. Mehansko, torej pred praskami, je obroča mogoče zaščititi s posebno tanko nemagnetno kovinsko folijo, ki se jo prilepi na magnetni trak. Ostaja možnost, da se ti majhni opilki prilepijo na magnetni obroč in s tem motijo magnetno polje. Ker v laboratoriju nismo imeli možnosti ustvariti okolja, kateremu bo dajalnik izpostavljen, lahko le predvidevamo, da bo sistem obratoval zadovoljivo.

# 7 Zaključek

Iz meritev laboratorijskega prototipa smo ugotovili, da trenutni sistem ni primeren za uporabo in s tem torej ne ustreza podanim zahtevam. Akumulira se napaka približno –0,08° na obrat, ki jo povzroča ekscentričnost obročev z glavno in Nonijevo sledjo. V prototipnem sistemu ta ekscentričnost povzroči kot zamika med glavno in Nonijevo sledjo okoli 4°, dopustni kot zamika pa je le 2,49°. Ekscentričnost lahko izboljšamo ali odpravimo na dva načina:

- z brušenjem obeh obročev na enako debelino še pred magnetenjem ali
- z magnetenjem obeh sledi, izvedenih na enem obroču.

Trenutni sistem bi se morda lahko uporabilo z magnetnima obročema z manjšim številom magnetnih period, kar dopušča večji kot zamika med obročema. Magnetna obroča z 32 magnetnimi periodami na glavni in 31 na Nonijevi sledi dopuščata kot zamika do 4,92°, magnetna obroča s 16 magnetnimi periodami na glavni in 15 na Nonijevi sledi pa dopuščata kot zamika kar 9,84°. V tem primeru torej opažena ekscentričnost ne predstavlja več problema.

Kljub neustreznosti prototipa smo prepričani, da lahko z razrešenjem problema ekscentričnosti napravimo zanesljiv in robusten absolutni dajalnik, ki bo uporaben v mnogih industrijskih aplikacijah v grobih okoljih.

# Literatura

[1] Motion System Design: http://www.motionsystemdesign.com, dostopnost preverjena maja 2008.

[2] Flitec: http://litec.rpi.edu, dostopnost preverjena junija 2008.

[3] Heidenhain: http://www.heidenhain.com, dostopnost preverjena junija 2008.

[4] Exposed linear encoders, Brochure (Heidenhain).

[5] Bogen Electronic: http://www.bogen-electronic.com, dostopnost preverjena junija 2008.

[6] Young Hugh D., Freedman Roger A.: University Physics with modern physics, Tenth edition, Addison-Wesley Publishing Company, 2000.

[7] Caruso Michael J., Bratland Tamara, Smith Carl H. Dr., Schneider Robert: A New Perspective on Magnetic Field Sensing, Honeywell Technical Article, 1998.

(http://www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/new\_pers.pdf, dostopnost preverjena junija 2008)

[8] Checkelsky J.: Anisotropic Magnetoresistance of FexCo1-xS2, Harvey Mudd College, 2004. (http://www2.hmc.edu/~eckert/research/JCHECKELSKY.pdf, dostopnost preverjena junija 2008)

[9] NVE: http://www.nve.com/Downloads/apps.pdf, dostopnost preverjena junija 2008.

[10] GPI Virtual Absolute Technology: http://www.virtualabsolute.com, dostopnost preverjena junija 2008.

[11] iC-ML Hall Position Sensor/Encoder, podatkovni list (iC-Haus).

[12] iC-MN 25-Bit Nonius Encoder, podatkovni list (iC-Haus).

[13] Engineering Toolbox: http://www.engineeringtoolbox.com, dostopnost preverjena junija 2008.

Izjava

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelala samostojno pod vodstvom mentorja doc. dr. Boštjana Murovca, univ. dipl. inž. el. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedla v zahvali.

Barbara Killer