

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Mitja Alič

**Vpliv statične in dinamične
ekscentričnosti magnetnega
senzorja RM44 na napako v
signalu kota**

Magistrsko delo

Mentor: doc. dr. Mitja Nemec

Ljubljana, 2018

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Mitji Nemcu za pomoč pri izdelavi magistrskega dela. Prav tako se zahvaljujem sodelovcem laboratorija LRTME. Zahvala gre tudi dr. Blažu Šmidu in drugim v podjetju RLS Merilna tehnika. Zahvaljujem se družini in prijateljem, ki so me spodbujali in podpirali tekom celotnega študija.

Vsebina

1	Uvod	5
2	Senzor RM44	7
3	Zastavljena naloga	11
4	Analitična izpeljava vplivov dinamične in statične ekscentričnosti	13
4.1	Definicija koordinatnih sistemov	13
4.2	Izpeljava gibanja položaja Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti	14
4.3	Izpeljava gibanja lokacije Hall-ove sonde na magnet pri statični ekscentričnosti	16
4.4	Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde	17
5	Izpeljava poteka polja $B_z(\theta)$ in ocena napake zaradi ekscentričnosti	19
5.1	Definicija gostote magnetnega polja B_z	19
5.2	Postavitev Hallovih sond in pomerjeno polje v odvisnosti od ekscentričnosti	20
5.2.1	Sprememba magnetnega polja zaradi ekscentričnosti	21

5.3 Premik senzorja v z smeri	22
6 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov	23
6.1 Različne amplitude	23
6.2 Različne enosmerne komponente	25
6.2.1 Enosmerna komponenta le v signalu \sin	26
6.2.2 Enosmerna komponenta signala \cos	28
6.2.3 Enosmerna komponenta pri obeh signalih	29
6.3 Neorotogonalnost signalov	30
6.4 Potek napake pri statični ekscentričnosti v smeri x	33
6.5 Potek napake pri statični ekscentričnosti v smeri y	33
6.6 Potek napake pri dinamični ekscentričnosti v smeri x	34
7 Linearni model	35
7.1 Brez ekscentričnosti	35
7.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi	35
7.2.1 Sprememba \sin , \cos ter napake v odvisnosti od Δx_s	37
7.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi	41
7.3.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δy_s	43
7.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x osi	46
7.4.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δx_d	48
8 Realni model magnetnega polja	51
8.1 Brez napake	52
8.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi	53
8.2.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δx_s	56

8.3	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi	59
8.3.1	Sprememba \sin, \cos ter napake od Δy_s	61
8.4	Dinamična ekscentričnost v smeri x	63
8.4.1	Sprememba \sin, \cos ter napake od Δx_d	66
8.5	Dinamična ekscentričnost v smeri y	68
8.5.1	Sprememba \sin, \cos ter napake od Δy_d	70
9	Meritve	75
9.1	Oprema in postavitev merilnega mesta	75
9.2	Zajem podatkov	79
9.3	Senzor v izhodiščni legi	81
9.3.1	Meritve v izhodišni legi	82
9.4	Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi	85
9.4.1	Sprememba \sin, \cos ter napake od Δx_s	86
9.5	Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi	89
9.5.1	Sprememba \sin, \cos ter napake od Δy_s	91
9.6	Meritve dinamične ekscentričnosti v smeri x-osi	94
9.6.1	Sprememba \sin, \cos ter napake od Δx_d	96
10	Sklep	101
10.1	Merjenje kota in vpliv na napako	101
10.2	Nepravilna montaža	101
10.3	Oblika napake	102
10.4	Izvedba meritev	102
10.5	Komentar rezultatov	102

Seznam uporabljenih simbolov

2.1	Nahajanje radialno polariziranega magneta nad čipom AM256	8
2.2	Oblika Z komponente gostote magnetnega pretoka nad magnetom	9
2.3	Analogna signala zajeta s Hallovimi sondami	9
2.4	Senzor RM44	10
2.5	Oblika Z komponente gostote magnetnega pretoka nad magnetom s aproksimirano ravnino	10
4.1	Definicija koordinatnega sistema z magnetom in Hall-ovo sondijo	14
4.2	Sprememba položaja glede na magnet ob rotaciji	14
4.3	Definicije dinamične ekscentričnosti	15
4.4	Shema definicije statične ekscentričnosti	16
4.5	Potek sonde ob vrtenju glede na magnet ob statični ekscentričnosti	16
5.1	Primer magneta predlagan s strani proizvajalca RLS	19
5.2	z -komponenta vektorja gostote magnetnega polja nad cilindričnim magnetom [1]	20
5.3	Začetna postavitev Hallovih sond	21
6.1	ε ob limiti k v neskončnost	24
6.2	ε pri $k=1.1$	25

6.3	Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2 in izračunano napako z vrsto (prvih 15 členov) po (6.5) pri $k = 1.1$	25
6.4	ε ob limiti B_0 v neskončnost	26
6.5	ε pri $B_0 = 0,1$	27
6.6	Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (6.9) pri $B_0 = 0,1$ in $n < 20$	27
6.7	ε ob limiti A_0 v neskončnost	28
6.8	ε pri $A_0 = 0,1$	29
6.9	Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (6.9) pri $A_0 = 0,1$ in $n < 20$	29
6.10	ε ob limiti c_0 v neskončnost	30
6.11	ε pri $C_0 = 0,1$	31
6.12	Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (6.14) pri $C_0 = 0,1$ in $n < 20$	31
6.13	Napaka ε ob limiti $\varphi_s \rightarrow 90^\circ$	32
7.1	\sin in \cos pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti	36
7.2	Napaka ε pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti	36
7.3	\sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x	37
7.4	Napaka ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x	37
7.5	Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x	38

7.6	Amplituda osnovnega harmonika \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x	39
7.7	Enosmerna komponenta \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x	39
7.8	Fazni zamik \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala \sin in \cos	40
7.9	Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z linearnim poljem	40
7.10	\sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y	42
7.11	Napaka ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y	42
7.12	Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y	43
7.13	Amplituda osnovnega harmonika signalov \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y	44
7.14	Enosmerna komponenta \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y	44
7.15	Fazni zamik \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala \sin in \cos	45
7.16	Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z linearnim poljem	45
7.17	\sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x	46
7.18	Napaka ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x	47

7.19 Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x	47
7.20 Amplituda osnovnega harmonika \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x	48
7.21 Enosmerna komponenta \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x	49
7.22 Fazni zamik \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala \sin in \cos	49
7.23 Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od dinamične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z linearnim poljem	50
8.1 Model z- komponente gostote magnetnega polja uporabljen v simulacijah	51
8.2 \sin in \cos pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti	52
8.3 Napaka ε pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti	53
8.4 Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem brez ekscentričnosti	53
8.5 \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x	54
8.6 Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x	55
8.7 Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x	55

8.8	Amplituda osnovnega harmonika \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x	56
8.9	Enosmerna komponenta \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x	57
8.10	Fazni zamik \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala \sin in \cos	57
8.11	Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z realnim poljem	58
8.12	\sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y	59
8.13	Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y	60
8.14	Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y	60
8.15	Amplituda osnovnega harmonika \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y	61
8.16	Enosmerna komponenta \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y	62
8.17	Fazni zamik \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala \sin in \cos	62
8.18	Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z realnim poljem	63
8.19	\sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x	64
8.20	Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x	65

8.21 Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x	65
8.22 Amplituda osnovnega harmonika \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x	66
8.23 Enosmerna komponenta \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x	67
8.24 Fazni zamik \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala \sin in \cos	67
8.25 Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od dinamične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z realnim poljem	68
8.26 \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y	69
8.27 Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y	69
8.28 Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y	70
8.29 Amplituda osnovnega harmonika \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y	71
8.30 Enosmerna komponenta \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y	71
8.31 Fazni zamik \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala \sin in \cos	72
8.32 Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od dinamične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z realnim poljem	72

9.1	Dinamično ekscentričnost se lahko izmeri le v eni smeri	76
9.2	Postavitev testnega mesta	76
9.3	Postavitev testnega mesta	77
9.4	Naprava za nastavljanje statične ekscentričnosti	78
9.5	Potek hitrosti od zasuka	78
9.6	Grafični vmesnik s poteki signalov	80
9.7	Krmilna plošča za krmiljenje pogona in obdelavo signalov s dajalnikov položaja	80
9.8	Signala \sin in \cos pomerjena v izhodiščni legi	82
9.9	Napaka ε pomerjena v izhodiščni legi	82
9.10	Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri meritvah v izhodiščni legi	83
9.11	Porazdelitev meritev enosmerne komponente signalov \sin in \cos .	83
9.12	Porazdelitev meritev amplitude osnovnega harmonika signalov \sin in \cos	84
9.13	Signala \sin in \cos merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x	85
9.14	Napaka ε merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x .	86
9.15	Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x	86
9.16	Potek amplitude osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x	87
9.17	Potek enosmerne komponente \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x	88
9.18	Fazni zamik osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala \sin in \cos	88

9.19	Potek amplitud posameznega harmonika napake ε pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x	89
9.20	Signala \sin in \cos merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y	90
9.21	Napaka ε merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y	90
9.22	Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y	91
9.23	Potek amplitude osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y	92
9.24	Potek enosmerne komponente \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y	92
9.25	Fazni zamik osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y glede na izhodiščno lego	93
9.26	Potek amplitud posameznega harmonika napake ε pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y	93
9.27	Signala \sin in \cos merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x	95
9.28	Napaka ε merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x	96
9.29	Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x	96
9.30	Potek amplitude osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x	97
9.31	Potek enosmerne komponente \sin in \cos pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x	98
9.32	Fazni zamik osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na izhodiščno lego	98

9.33 Potek amplitud posameznega harmonika napake ε pri meritvah
 dinamične ekscentričnosti v smeri x 99

V zaključnem delu so uporabljeni naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
referenčni kot	Θ	stopinja	$^\circ$
pomerjeni kot	φ	stopinja	$^\circ$
napaka	ε	stopinja	$^\circ$
z-komponenta gostote magnetnega pretoka B_z	militesla	mT	
statična ekscentričnost v x	Δx_s	milimetri	mm
statična ekscentričnost v y	Δy_s	milimetri	mm
dinamična ekscentričnost v x	Δx_d	milimetri	mm
dinamična ekscentričnost v y	Δy_d	milimetri	mm

Tabela 1: Veličine in simboli

Povzetek

V magistrski nalogi je predstavljen vpliv napačno merjene gostote magnetnega pretoka enkoderja, zaradi nepravilne montaže enkoderja ali magnetnega aktuatorja. Predstavljen je simulacijski model enkoderja, ter odvisnost napake na nepravilno montažo. Simulacije si primerjane z meritvami na enkoderju RM44.

Ključne besede: dajalnik položaja, Hallova sonda, napačna montaža, predvidevanje napake, arcustangens

Abstract

The thesis addresses ... **Key words:** position encoders, Hall effect sensor,

superficial implementation, anticipating an error, arcustangens

1 Uvod

Skozi celotno zgodovino so si ljudje žeeli olajšati fizična dela na različne načine. Ponavljača dela je olajšala uporaba pogonov. Električni pogoni so delovne procese optimizirali. Za točnejše delovanje so se razvili različni načini krmiljenja. Z novimi načini krmiljenja, so se pojavile tudi potrebe po merjenju novih količin. V zadnjih desetletjih, je pri krmiljenju, potrebna informacija o trenutnem položaju pogona.

Trenutni položaj merijo dajalniki pomika ali zasuka[2]. 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[3].

Pri magnetnem principu senzor dajalnika zaznava spremembo jakosti in smeri magnetnega polja. Magnetno polje se ustvari z aktuatorjem radialno polariziranega magneta. Meri se s Hallovimi sondami ali AMR senzorji. Iz zajetega polja sledi izračun dejanskega položaja. Dajalnik položaja, ki pretvarja merjeno magnetno polje v informacijo o položaju imenujemo enkoder[4].

Kot vsak meritni element, ima tudi magnetni enkoder napako. Napaka se lahko pojavi ob narobe merjenem magnetnem polju[5]. Napako lahko povzroči tudi napačno pomerjeno polje. To se zgodi ob nepravilni montaži enkoderja ali

magnetnega aktuatorja na pogon. S poznavanjem vplivov nepravilne montaže na napako pomerjenega položaja, se napako lahko predvivi in odpravi.

Cilj naloge je analizirtai kako različne napake pri montaži, vplivajo na napako v signalih kota. Želi se predstaviti čim bolj preprost model, ki bo dovolj točno opisal dogajanje ob prisotnosti napake in to prekontrolirati.

Senzor RM44 mora biti za pravilno delovanje in točnost izhodnega podatka pravilno montiran.

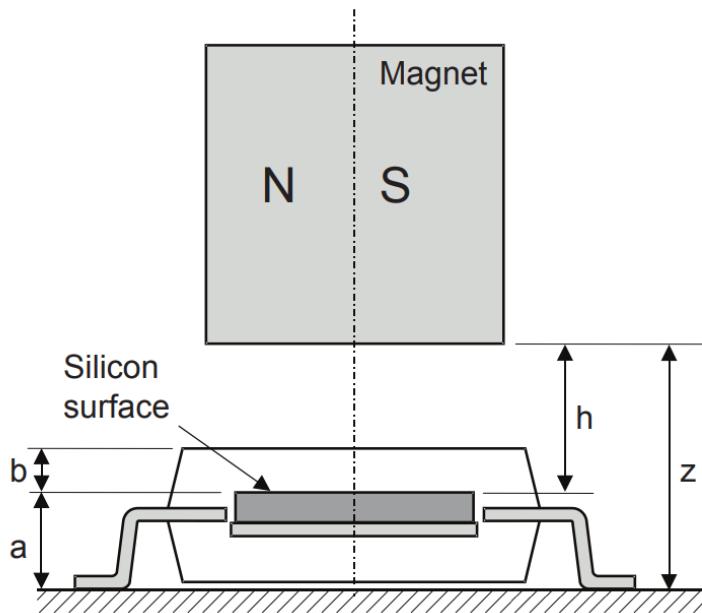
Magistrsko delo predstavlja vpliv nepravilno montiranega senzorja ali nepravilno montiranega magneta na napako. Kako nepravilna montaža vpliva na izhodna signala sinus in kosinus ter neposredno iz tega tudi na napako. Različne literature so ocenjevale vpliv neidealnih analognih signalov za izračun kota[10][11][12]. V delu je predstavljena odvisnost napake pri spremembi idealnih signalov sinus in kosinus na izračunan kot.

2 Senzor RM44

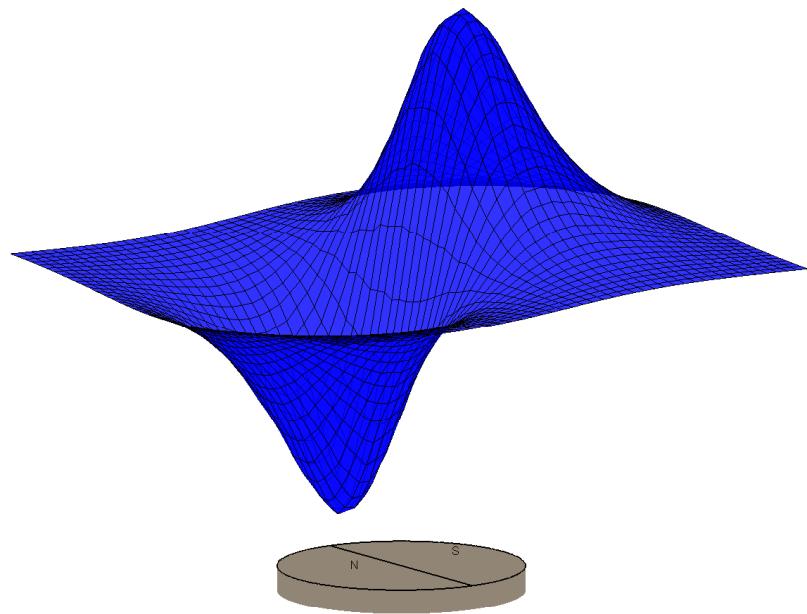
Senzor RM44 je 13 bitni enkoder, primeren za merjenje zasuka in hitrosti elektromotorskega pogona[6]. Enkoder se nahaja v robustem ohišju, zato je primeren za delovanje v težkem industrijskem okolju. Oblika izhodnega podatka o zasuku, je prilagodljiva na sistem aplikacije v kateri bo uporabljen[7]. Izhod senzorja je lahko analogni v obliki sinusnega in cosinusnega signala ali linearne spremajče se napetosti med potencialoma GND in VDD v odvisnosti od kota zasuka. Izhod je lahko tudi v oliki inkrementalnih signalov A in B s katerih se lahko izračuna smer vrtenja ter signal Ri kateri določa referenčno točko. Izhod je možen tudi preko SSI vodila. Senzor ima možnost nastavitev resolucije od 5 do 13 bitov [1][6]. Senzor na katerem so bile opravljene meritve je imel na voljo analogna signala sinus in kosinus. Točno ime senzorja je RM44AC0001S20F2E10, v delu bo poimenovan okrajšano RM44.

Ključni element senzorja je čip AM256. Čip se nahaja nad radialno polariziranim cilindričnim magnetom(slika 2.1). Magnet je pritrjen na os vrtenja. Na sliki 2.5 je prikazana oblika Z komponente vektorja gostote magnetnega pretoka. V čipu so na siliciju Hallove sonde za meritev Z-komponento gostote magnetnega pretoka. Ob prostorskem zajemu Z komponente gostote magnetnega pretoka, zajame Hallovu sondu polje v obliki cosinusnega oz. sinusnega signala. S pravilno postavitvijo Hallovih sond se ob prostorskem zajemu zajame 2 signala, ki sta za 90° fazno zamaknjena na drugega. Signala imata obliko cosinusa in sinusa (slika 2.3). Prvi signal, katerega osnovna oblika je cosinus, je v delu poimenovan B_x , drugi signal, osnovne oblike sinus, je poimenovan B_y .

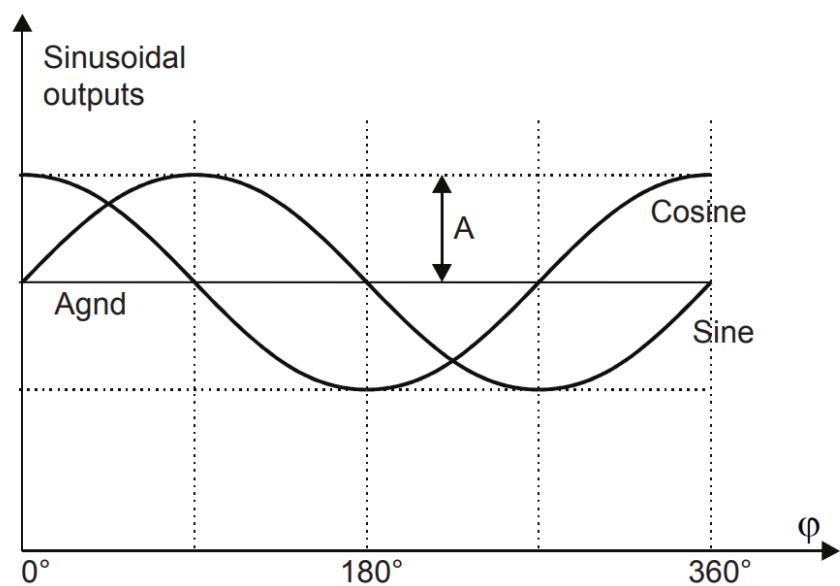
Iz signalov, zajetih s Hallovih sond, se izračuna kot. Metod, za numeričen izračun kota iz podatkov kot sta signala B_x in B_y je več (CORDIC, SAR, sledilna metoda, itd [8]). Osnovni princip metode je izračun funkcije atan2() [9].



Slika 2.1: Nahajanje radialno polariziranega magneta nad čipom AM256



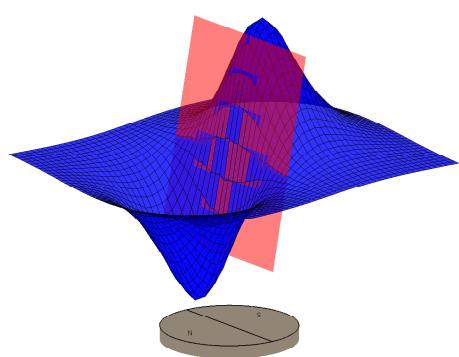
Slika 2.2: Oblika Z komponente gostote magnetnega pretoka nad magnetom



Slika 2.3: Analogna signala zajeta s Hallovimi sondami



Slika 2.4: Senzor RM44



Slika 2.5: Oblika Z komponente gostote magnetnega pretoka nad magnetom s aproksimirano ravnino

3 Zastavljena naloga

V začetku je bila opravljena izpeljava kako se giblje magnet ali senzor v sistemu z nepravilno montažo[13]. Opravil sem simulacije na linearno aproksimiranem magnetnem polju, ter na numerično izračunanim polju simuliranega realnega magneta. Tehnologija senzorja RM44 je poslovna skrivnost, zato je bil postavljen lasten simulacijski model senzorja, s pričakovanji, da bo rezultat slabši od končnih meritev.

Na tej točki bi bilo primerno definirati pojme, kateri se bodo uporabljali tekom izdelave dela. Izmik senzorja bo med spremjanja kota zasuka postavljen fiksno in se njegova lokacija nebo spreminja na os vrtenja. Ta izmik je poimenovan statična ekscentričnost. V nalogi bo preverjeno kako vpliva izmik magneta na točnost izhodnega podatka. Ob izmiku magneta iz osi vrtenja se pojavi opletanje magneta. Lokacija središča magneta se spreminja glede na določen zasuk magneta. Opletanje magneta je poimenovano dinamična ekscentričnost.

4 Analitična izpeljava vplivov dinamične in statične ekscentričnosti

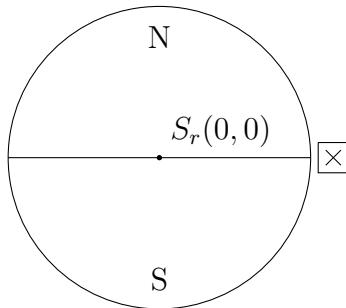
V tem poglavju je analitično izpeljan vpliv ekscentričnosti, ki se pojavita zaradi neprimerne vgradnje. Napaki različno vplivati na izhodni podatek, zato se ju lahko obravna posamično. Preko analitične izpeljave je prikazano, kako se spreminja lokacija Hall-ove sonde glede na magnet ob pravilni montaži. Z vpeljavo dodatne ekscentričnosti v model se potek gibanja sonde glede na magnet spremeni. S poznavanjem lokacije sonde nad magnetom se lahko odčita pomerjena vrednost B_z .

4.1 Definicija koordinatnih sistemov

Definiran kartezični koordinatni sistem, ima v izhodišcu postavljen radialno magnetiziran magnet. Na poljubno točko $S_{h0}(x_0, y_0)$, vendar ne v izhodišče je postavljena Hall-ova sonda (slika 4.1). Za lažjo predstavo se Hall-ova sonda nahaja na abcisno osi.

Z rotacijo magneta za kot θ , se položa sonde glede na magnet spremeni. Nov položaj sonde glede na magnet je enak, če se namesto magnet, zavrti sondo za kot $-\theta$. Nov položaj sonde glede na magnet je (4.1).

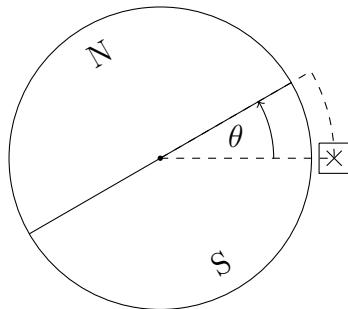
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$



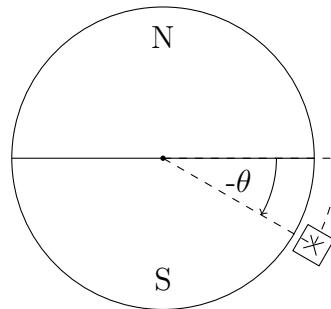
Slika 4.1: Definicija koordinatnega sistema z magnetom in Hall-ovo sondou

Argument rotacijske matrike je $-\theta$. Z upoštevanjem lihosti funkcije sinus in sodosti funkcije kosinus[14], se (4.1) poenostavi v:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$



(a) Zasukan magnet za kot θ



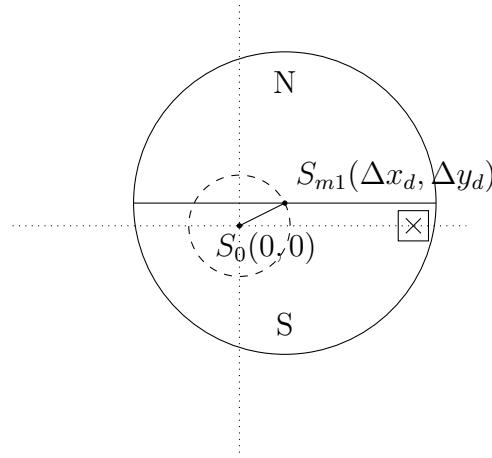
(b) Zasukan senzor za kot $-\theta$

Slika 4.2: Sprememba položaja glede na magnet ob rotaciji

4.2 Izpeljava gibanja položaja Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti

Magnet je postavljen v izhodišče koordinatnega sistema $S_m(0,0)$, kjer je os vrtenja. Vpliv dinamične ekscentričnosti je sprememba središča magneta v točko $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$ (Slika 4.3). Os vrtenja je ostaja v izhodišču koordinatnega sis-

tema. Središce magneta $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$ ob rotaciji opisuje okoli osi vrtenja krožnico z radijem $\sqrt{\Delta x_d^2 + \Delta y_d^2}$.



Slika 4.3: Definicije dinamične ekscentričnosti

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

S (4.3) je izraženo gibanje središče magneta na Hallovem sondi. Celoten sistem se vrati okoli osi vrtenja $S_0(0,0)$. Velja enak razmislek kot v prejšnjem poglavju z vrtenjem sonde za kot $-\theta$:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \right) \quad (4.4)$$

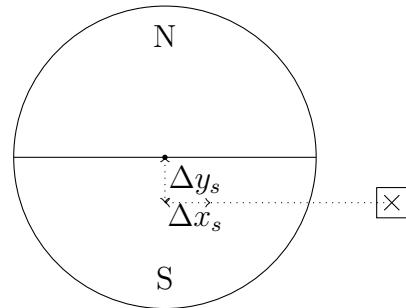
(4.4) se poenostavi:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

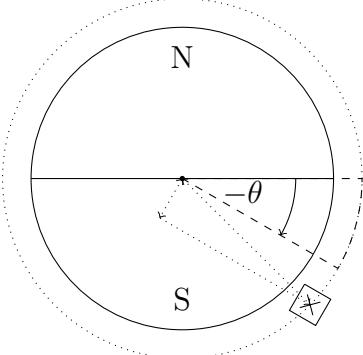
Dinamična ekscentričnost na gibanje sonde vpliva kot enosmerna komponenta $(-\Delta x_d, -\Delta y_d)$. Enak učinek se doseže, z izmikom Hallove sonde in osi vrtenja v novo točko $S_{h1}(-\Delta x_d, -\Delta y_d), S_0(x_0 - \Delta x_d, y_0 - \Delta y_d)$ in zavrti sondi okoli osi vrtenja za $-\theta$.

4.3 Izpeljava gibanja lokacije Hall-ove sonde na magnet pri statični ekscentričnosti

Statična ekscentričnost se pojavi, ob izmiku Hallove sonde iz njene osnovne lege v $S_{h1}(x_0 + \Delta x_s, y_0 + \Delta y_s)$. Z vrtenjem magneta je sonda ves čas enako oddaljena od središča magneta. Z miselnim obratom vrtenja sonde v nasprotni smeri se gibanje sonde izrazi kot gibanje po krožnici z radijem $\sqrt{(x_0 + \Delta x_s)^2 + (y_0 + \Delta y_s)^2}$ (4.6).



Slika 4.4: Shema definicije statične ekscentričnosti



Slika 4.5: Potek sonde ob vrtenju glede na magnet ob statični ekscentričnosti

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x_s \\ y_0 + \Delta y_s \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

4.4 Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde

(4.5) in (4.2) sta med seboj neodvisni zato se ju lahko združi.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x_s \\ y_0 + \Delta y_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

5 Izpeljava poteka polja $B_z(\theta)$ in ocena napake zaradi ekscentričnosti

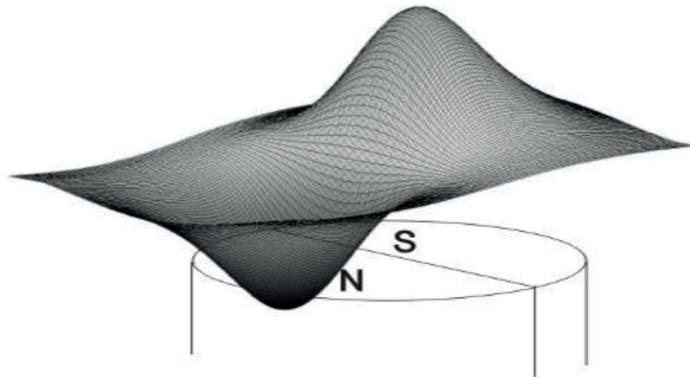
5.1 Definicija gostote magnetnega polja B_z

Predlagan magnet s strani proizvajalca senzorja je radialno magnetiziran s premerom 4 mm in višino 4 mm (slika 5.1). Dajalnik pozicije RM44 meri z-komponento



Slika 5.1: Primer magneta predlagan s strani proizvajalca RLS

gostote magnetnega polja [1]. Potek komponente B_z nad cilindričnim magnetom je prikazan na sliki 5.2.



Slika 5.2: z-komponenta vektorja gostote magnetnega polja nad cilindričnim magnetom [1]

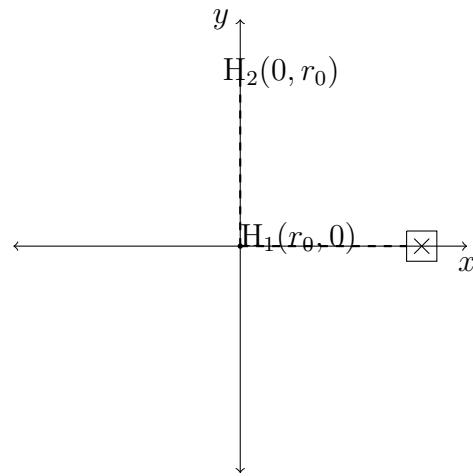
Potek z-komponente se lahko izračuna po Biot-Savartovim zakonom oz. z numerično seštevanjem prispevke posameznih delčkov magneta. Za oceno napake, se magnetno polje z komponente v okolici osi vrtenja magneta aproksimira z ravnino (??).

$$B_z(x, y) = k \cdot x. \quad (5.1)$$

Aproksimacija zadostuje za oceno napake. S poznavanjem lokacije sonde glede na magnet, se lahko izračuna merjena komponenta magnetnega polja. Aproksimirano polje je linearno odvisno od x komponente (??). Za lažje razumevanje naj bo k enak 1.

5.2 Postavitev Hallovih sond in pomerjeno polje v odvisnosti od ekscentričnosti

Za izračun kota je potrebno poznati polje v vsaj dveh točkah nad magnetom. Simulacijski model vsebuje 2 Hallovi sondi na koordinatnih oseh, oddaljeni od izhodišča za r_0 .



Slika 5.3: Začetna postavitev Hallovih sond

S poznavanjem položaja sonde glede na magnet (4.7) in funkcije polja (??) se lahko določi potek polja sonde. Sondi ob obratu vsaka pomeri svoje polje. Potek polja pomerjen s sondom v abcisni osi (H_1), je v idealni montaži podoben signalu kosinus, zato je poimenovan *cos*. Potek polja pomerjenega s sondom v ordinatni osi (H_2) je za 90° zamaknjeno proti *cos*, zato je potek imenovan *sin*.

$$\cos = B_{H_1}(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d \quad (5.2)$$

$$\sin = B_{H_2}(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = r_0 \sin \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d \quad (5.3)$$

5.2.1 Sprememba magnetnega polja zaradi ekscentričnosti

Iz izrazov (5.2) in (5.2) brez upoštevanja ekscentričnosti sta *sin* in *cos* enake amplitudo ter fazno zamaknjena za 90° . Z upoštevanjem statične ekscentričnosti se med *sin* in *cos* zmanjša fazni kot ter spremni amplituda (5.4) (5.5). Ob dinamični ekscentričnosti signala pridobita enosmerni komponenti (5.6) (5.7).

$$\cos(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s) = \sqrt{(r_0 + \Delta x_s)^2 + \Delta y_s^2} \cos\left(\theta - \arctan \frac{\Delta y_s}{r_0 + \Delta x_s}\right) \quad (5.4)$$

$$\sin(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s) = \sqrt{\Delta x_s^2 + (r_0 + \Delta y_s)^2} \sin(\theta + \arctan \frac{\Delta x_s}{r_0 + \Delta y_s}) \quad (5.5)$$

$$\cos(\theta, r_0, \Delta x_d, \Delta y_d) = r_0 \cos \theta - \Delta x_d \quad (5.6)$$

$$\sin(\theta, r_0, \Delta x_d, \Delta y_d) = r_0 \sin \theta - \Delta x_d \quad (5.7)$$

5.3 Premik senzorja v z smeri

Pri magnetnem polju aproksimiranem z ravnino (??), se gostota magnetnega polja pri obeh sondah spreminja enako. To se v enačbah odraža le kot dodaten faktor. Upoštevano spremembo polja zaradi premika senzorja po z osi se izrazi kot:

$$\cos = k_z(r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d) \quad (5.8)$$

$$\sin = k_z(r_0 \sin \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d) \quad (5.9)$$

Z vstavitvijo formul v arctan se faktor k_z nahaj tako v števcu kot imenovalcu ter se okrajša. Ti poteki polj veljajo le z upoštevanjem aproksimiranega polja (??).

6 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov

Izhod enkoderja je podatek o zasuku. Iz pomerjenega polja, sledi izračun kota preko inverza funkcije tangens. V programu MATLAB se za izračun kota uporablja funkcijo atan2(); za izhodno vrednost kota v radianih oz. atan2d(); za vrednost v stopinjah [9][15]. Različne literature [5] [10] [11] [12] opisujejo napake zaradi popačitve signalov $\sin \cos$. Napaka je izražena v obliki enosmerne komponente ter prvega oz drugega harmonika, kateri od primera do primera najbolj izstopa. V nadaljevanju je prikazano, kako popačen signal kot vhod v funkcijo atan2d(); vpliva na napako ter kako se odraža tudi na višjih harmonikih. Za majhne popačenja signalov, literatura nakazuje linearno naraščanje napake.

6.1 Različne amplitude

Vhodna signala v atan2d(), sta:

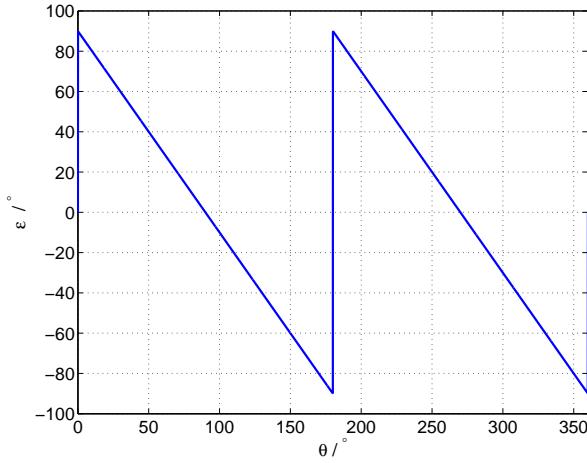
$$\text{Sin} = k \sin(\theta) \quad (6.1)$$

$$\text{Cos} = \cos(\theta) \quad (6.2)$$

limita ko gre k proti neskončnosti:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \text{atan2}(k \sin \theta, \cos \theta) \quad (6.3)$$

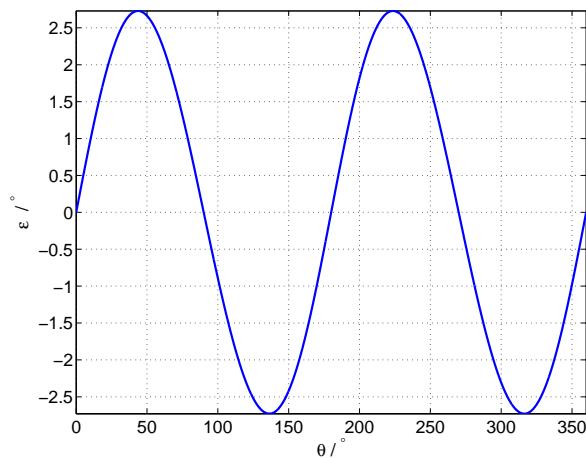
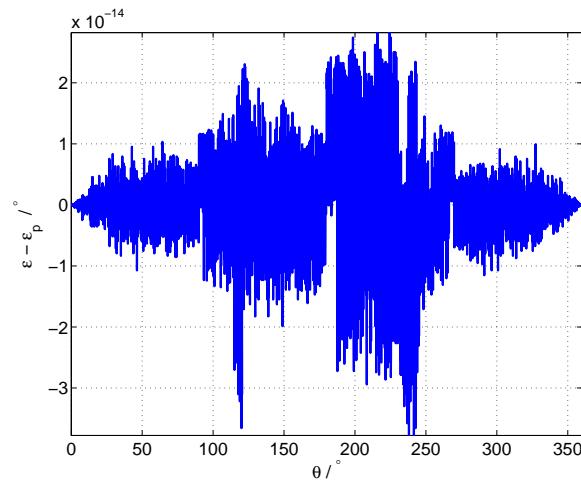
Kot ε , se bo ob limiti izrazila v obliki , ki jo lahko izrazimo z Fourierovo vrsto [14]:

Slika 6.1: ε ob limiti k v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin 2n\theta \quad (6.4)$$

V napaki nastopajo le sodi harmoniki. S opazovanjem sodih harmonikov napake pri različnih k -jih in uporabo funkcije Curve Fitting tool [16], sem določil funkcijo poteka napake v odvisnosti od k .

$$\varepsilon_p = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^n \sin 2n\theta \quad (6.5)$$

Slika 6.2: ε pri $k=1.1$ Slika 6.3: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2 in izračnunano napako z vrsto (prvih 15 členov) po (6.5) pri $k=1.1$

6.2 Različne enosmerne komponente

Enosmerna komponenta se lahko pojavi tako v \sin , \cos ali v obeh.

Vhodna signala v atan2d();, sta:

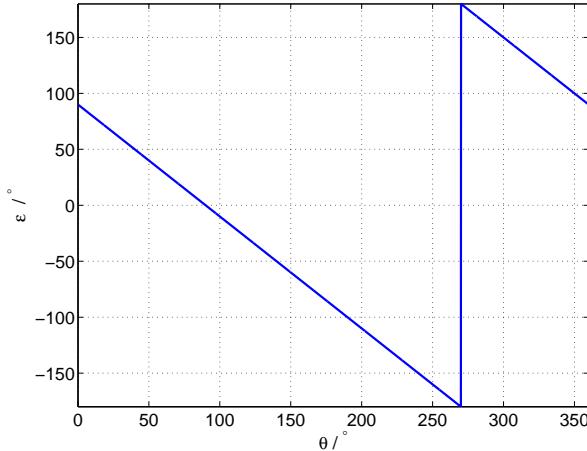
$$Sin = \sin(\theta) + B_0 \quad (6.6)$$

$$Cos = \cos(\theta) + A_0 \quad (6.7)$$

V podpoglajih so obravnavani različni primeri enosmernih komponent v signalih *sin* in *cos*.

6.2.1 Enosmerna komponenta le v signalu *sin*

Z limito B_0 v neskončnost, in izpeljavi napake v obliko Fourierove vrste, se napaka izrazi kot:

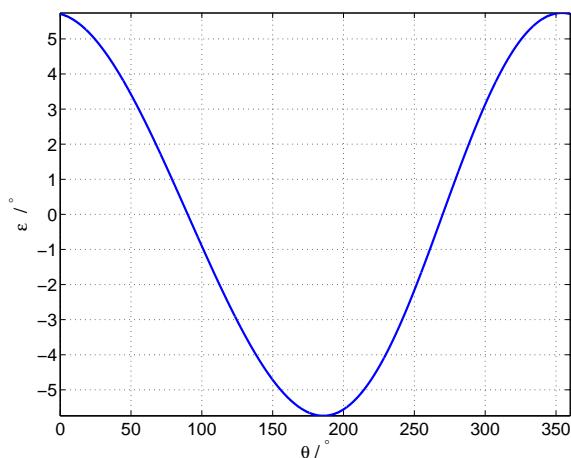
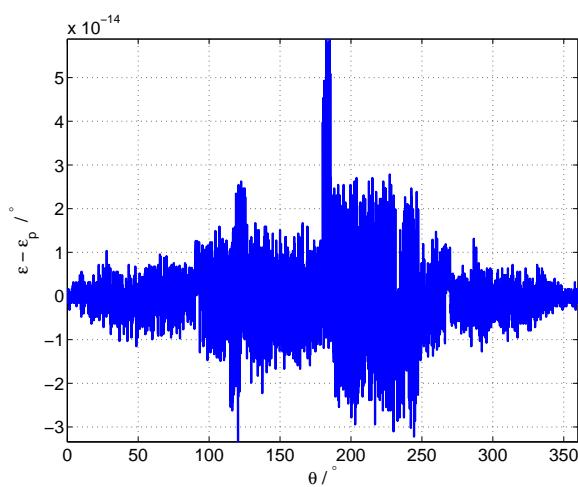


Slika 6.4: ε ob limiti B_0 v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta + 90n) \quad (6.8)$$

Z analizo potekov posameznega harmonika napake in uporabe Curve Fitting tool je bila najdena funkcija, ki opiše odvisnost napake od enosmerne komponente v signalu *sin*.

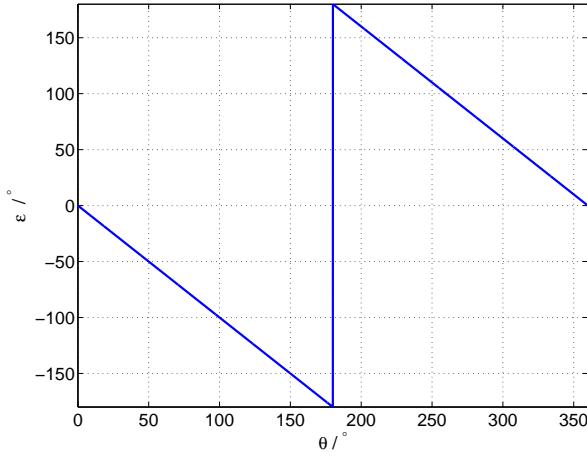
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-|B_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta - 90n), & B_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_0^n}{n} \sin(n\theta + 90n), & |B_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-B_0^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & B_0 \geq 1 \end{cases} \quad (6.9)$$

Slika 6.5: ε pri $B_0 = 0,1$ Slika 6.6: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (6.9) pri $B_0 = 0,1$ in $n < 20$

6.2.2 Enosmerna komponenta signala \cos

Postopek je ponovljen tudi za enosmerno komponento v signalu \cos

$$\lim_{A_0 \rightarrow \infty} \text{atan2}(\sin \theta, \cos \theta + A_0) \quad (6.10)$$



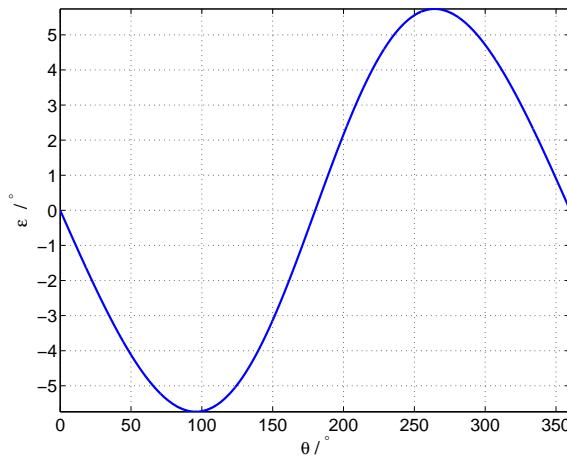
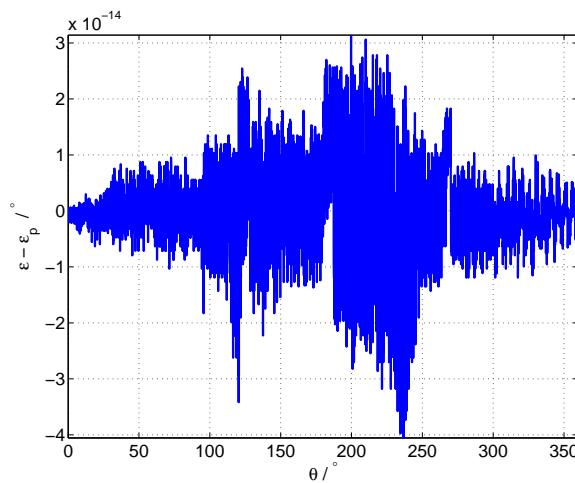
Slika 6.7: ε ob limiti A_0 v neskončnost

Napaka (slika 6.7) je proti napaki na sliki 6.4 le fazno zamaknjena. To se izrazi tudi v Fourierovi vrsti.

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta + 90n) \quad (6.11)$$

Potek napake v odvisnosti od A_0 je (6.12)

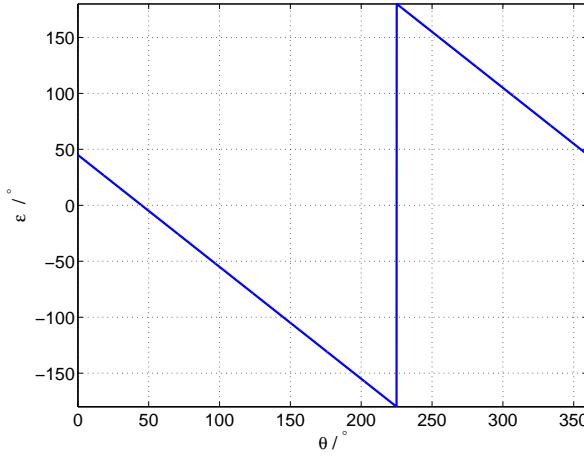
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-|A_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{A_0^n}{n} \sin(n\theta), & |A_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-A_0^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \geq 1 \end{cases} \quad (6.12)$$

Slika 6.8: ε pri $A_0 = 0,1$ Slika 6.9: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (6.9) pri $A_0 = 0,1$ in $n < 20$

6.2.3 Enosmerna komponenta pri obeh signalih

Enosmerna komponenta pri obeh signalih je označena z C_0 .

Limita napake ko gre $C \rightarrow 0$ proti neskončnosti se v Fourierovi vrsti izrazi kot:

Slika 6.10: ε ob limiti c_0 v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta - 90n) \quad (6.13)$$

Odvisnost napake ob spremjanju enosmernih komponent pri obeh signalih se je izrazilo v (6.14).

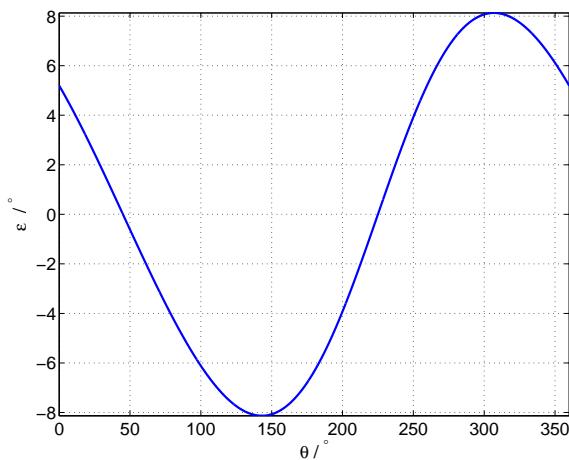
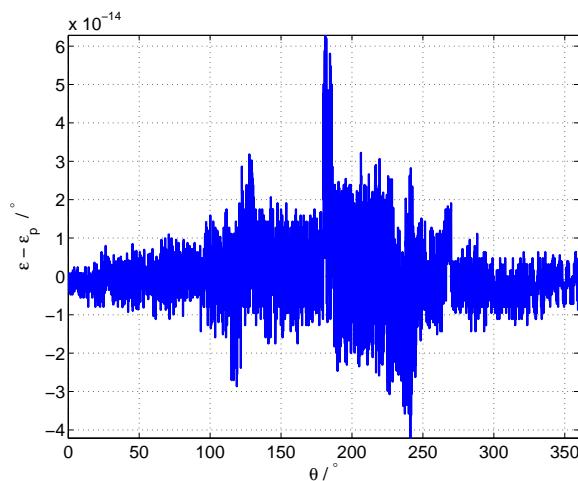
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 - |\sqrt{2}c_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & c_0 \leq -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sqrt{2}c_0)^n}{n} \sin(n\theta - 90n), & |c_0| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 - (\sqrt{2}c_0)^{-n}}{n} \sin(n\theta - 90n), & c_0 \geq \frac{\sqrt{2}}{2} \end{cases} \quad (6.14)$$

6.3 Neorotogonalnost signalov

Napaka se pojavi tudi, če signala \sin in \cos nista fazno zamaknjena za točno 90° . Vhodna signala imata obliko:

$$\text{Sin} = \sin(\theta + \varphi_s) \quad (6.15)$$

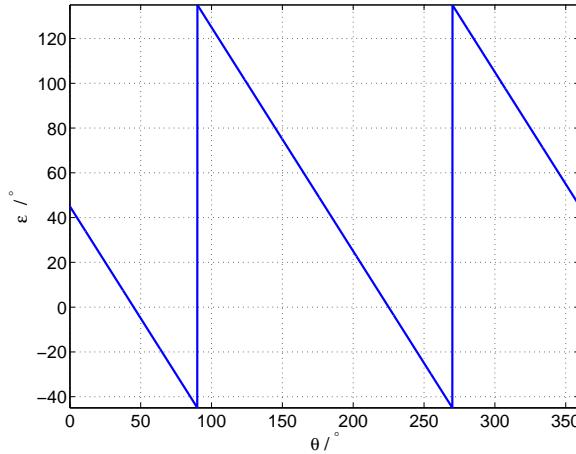
$$\text{Cos} = \cos(\theta + \varphi_c) \quad (6.16)$$

Slika 6.11: ε pri $C_0 = 0,1$ Slika 6.12: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (6.14) pri $C_0 = 0,1$ in $n < 20$

Napako se določi posamično za vsakega od parametrov. Drugi je takrat enak 0. Na koncu se enačbi združi. Za določanje limite ni potrebno iti proti neskončnosti, ampak le do najslabše možnosti, ki je pri $\pm 90^\circ$:

$$\varepsilon = \lim_{\varphi_s \rightarrow 90^\circ} \text{atan2}(Sin, Cos) - \text{atan2d}(\sin(\theta), \cos(\theta)) \quad (6.17)$$

Potek napake ε s slike ?? predstavi vrsta (6.18).



Slika 6.13: Napaka ε ob limiti $\varphi_s \rightarrow 90^\circ$

$$\varepsilon = 45^\circ - \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(2n\theta) \quad (6.18)$$

Iz izraza je vidno nastopanje enosmerne komponente in sodih harmonikov. Z opazovanjem sodih harmonikov napake pri različnih faznih kotih je bil dobljen izraz napake v odvisnosti od faznih zamikov *sin* in *cos* na idealna signala.

$$\begin{aligned} \varepsilon(\varphi_s, \varphi_c) &= \frac{\varphi_s + \varphi_c}{2} + \\ &\quad \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\tan \frac{\varphi_s - \varphi_c}{2} \right)^n \sin(2n\theta + n(90^\circ + \varphi_s + \varphi_c)) \end{aligned} \quad (6.19)$$

6.4 Potek napake pri statični ekscentričnosti v smeri x

Statična ekscentričnost povzroči v *sin* in *cos* razliko amplitud kot spremembo faz. Za vsako ekscentričnost posebaj je bil izračunan potek napake aproksimirn z racionalno funkcijo.

Definirana vhodna signala:

$$\sin = r_0 \sin(\theta) + \Delta x_s \cos(\theta) \quad (6.20)$$

$$\cos = r_0 \cos(\theta) + \Delta x_s \sin(\theta) \quad (6.21)$$

Opravljena je bila limita Δx_s v neskončnost. V napaki nastopa enosmerna komponenta in sodi harmoniki. Funkcija ki predstavlja odvisnost napake od statične ekscentričnosti je (6.22).

$$\varepsilon_p = \text{atan} \frac{\Delta x_s}{\Delta x_s + 2r_0} + \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{\Delta x_s}{\sqrt{\Delta x_s^2 + 2r_0 \Delta x_s + 2r_0^2}} \right)^n \sin(2n\theta + n(90 + \text{atan}(\frac{\Delta x_s + r_0}{r_0}))) \quad (6.22)$$

Pri čemer:

$$\Delta x_s > -r_0$$

6.5 Potek napake pri statični ekscentričnosti v smeri y

Postopek ponovljen za ekscentričnost v y smeri. Pričakovani je podoben potek kot pri ekscentričnosti v x smeri.

Izračunana vrsta napake v odvisnosti od Δy_s je:

$$\varepsilon_p = \text{atan} \frac{-\Delta y_s}{\Delta y_s + 2r_0} + \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{\Delta y_s}{\sqrt{\Delta y_s^2 + 2r_0 \Delta y_s + 2r_0^2}} \right)^n \sin(2n\theta + n(90 + \text{atan}(\frac{\Delta y_s + r_0}{r_0}))) \quad (6.23)$$

Pri čemer:

$$\Delta y_s > -r_0$$

6.6 Potek napake pri dinamični ekscentričnosti v smeri x

sin in *cos* se pri dinamični ekscentričnosti spreminja, kot je bilo opisano pri napaki z enakima enosmernima komponentama. Rezultat napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti je:

$$\varepsilon_p = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{-\sqrt{2}}{r_0} \Delta x_d \right)^n \sin(n\theta - 90n) \quad (6.24)$$

Pri čemer velja

$$|\Delta x_d| \leq \frac{r_0}{\sqrt{2}}$$

Za majhne odmike, je dovolj upoštevanje le prvega člena vrste, pri katerih se tudi predpostavi linearno naraščanje napake. V nadaljevanju bodo velikosti harmonikov v odvisnosti od povzročene ekscentričnosti aproksimirani s kubičnim polinomi. Da bo primerjava možna bodo poteki izračunani v tem poglavju razviti v Taylorjevo vrsto do tretje stopnje.

7 Linearni model

V tem poglavju so prikazani rezultati simulacij z aproksimiranim poljem (7.1).

$$B(x, y) = x \quad (7.1)$$

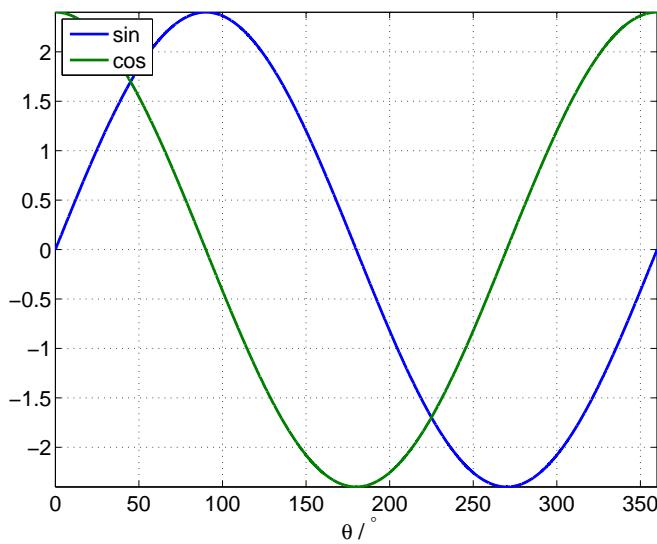
Prikazan je potek napake pri različnih izmikih, ter potek amplitud posameznih haarmonikov napake v odvisnosti od ekscentričnosti. Hall-ovi sondi sta postavljeni na krožnico z radijem 2,4 mm [1].

7.1 Brez ekscentričnosti

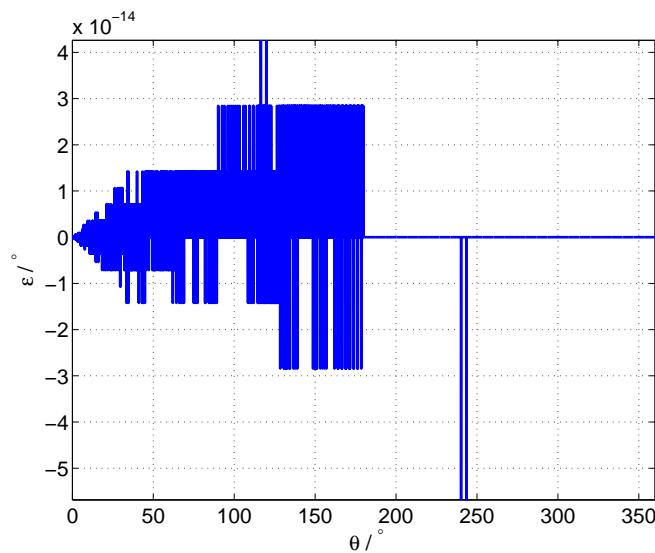
Signala \sin in \cos pomerjena v stanju brez ekscentričnosti imata enaki amplitudi in sta fazno zamaknjena za 90° . Napaka ε , ki se pojavi pri izračunu je le numerična napaka funkcije atan2d (Slika 7.2). Numerična napaka je proti pričakovani napaki zaradi ekscentričnosti zanemarljiva.

7.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

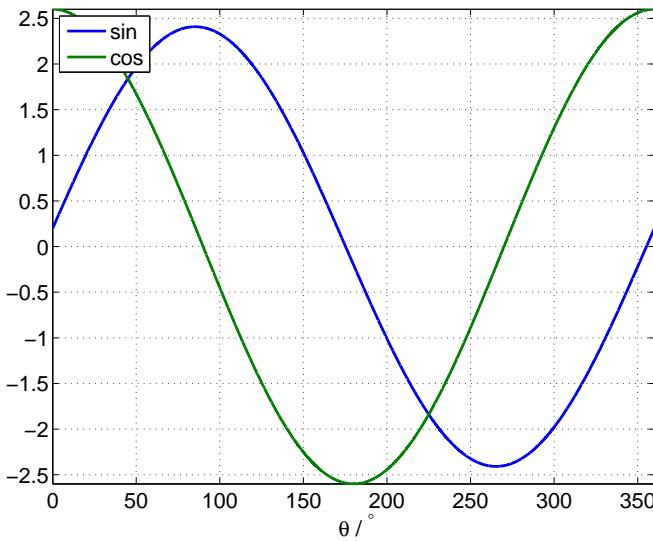
Po pričakovanjih se bo povišala amplituda \sin in \cos signala ter zmanjšal njun fazni zamik (5.4) (5.5). Po pričakovanjih najbolj izstopata enosmerna komponenta (harmonik 0) in drugi harmonik.



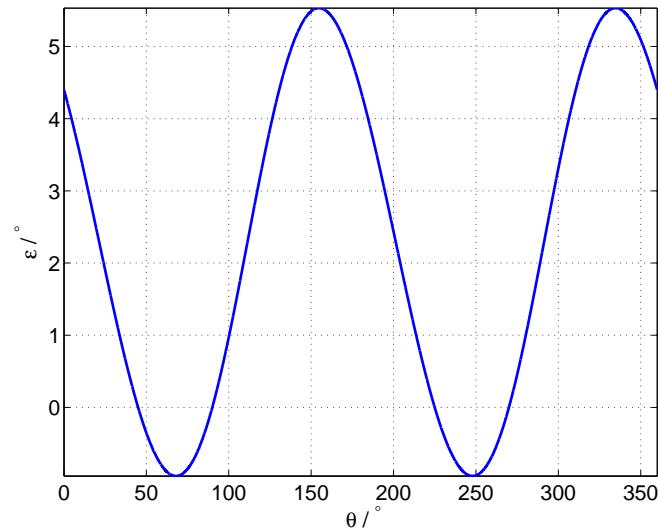
Slika 7.1: \sin in \cos pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



Slika 7.2: Napaka ε pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



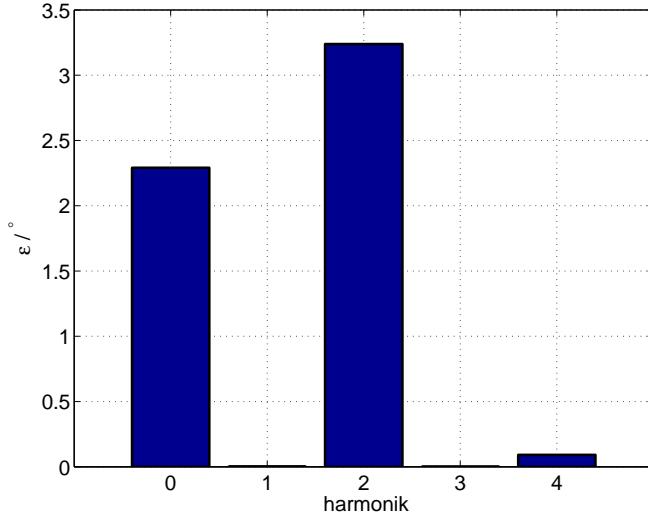
Slika 7.3: \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.4: Napaka ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x

7.2.1 Sprememba \sin , \cos ter napake v odvisnosti od Δx_s

Na sliki 7.6 je prikazana sprememba amplitude prvega harmonika signalov \sin in \cos . Razvidno iz (5.4) (5.5) se linearno narašča amplituda \cos . Slika 7.7 prikazuje



Slika 7.5: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x

enosmerni komponenti, ki od statične ekscentričnosti nista odvisni. Slika 7.8 prikazuje fazni zamik signalov glede na njuno idealno poravnavo. Po (5.5) je pričakovano spremjanje faze \sin .

Spreminjanje amplituda prvega harmonika, enosmerne komponente in faznega zamika \sin in \cos signalov je opisano z (5.4) in (5.5). Tu so poteki razviti v Taylorjevo vrsto do tretje stopnje.

$$A_{\sin} = 2,08 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 2,4 \quad (7.2)$$

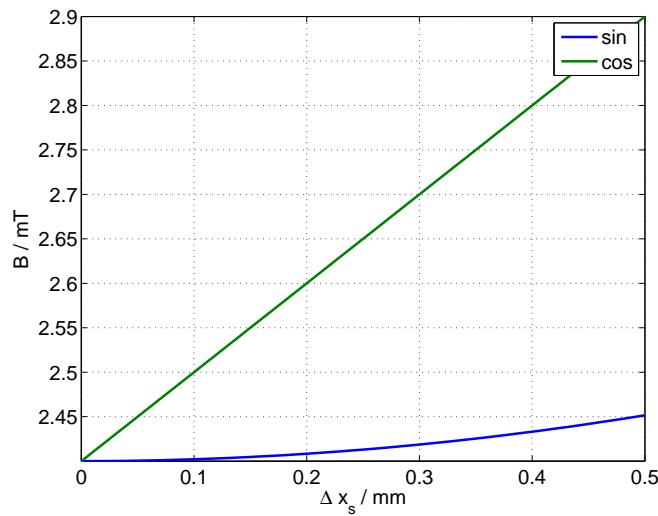
$$Off_{\sin} = 0 \quad (7.3)$$

$$\delta_{\sin} = -1,38 \Delta x_s^3 + 23,9 \Delta x_s \quad (7.4)$$

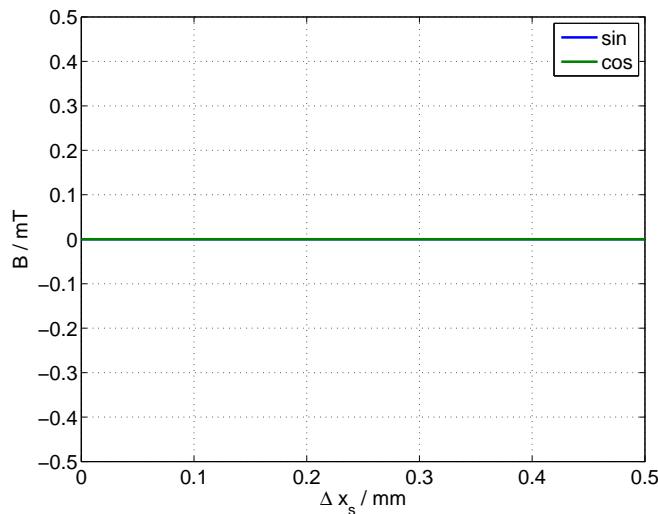
$$A_{\cos} = \Delta x_s + 2,4 \quad (7.5)$$

$$Off_{\cos} = 0 \quad (7.6)$$

$$\delta_{\cos} = 0 \quad (7.7)$$

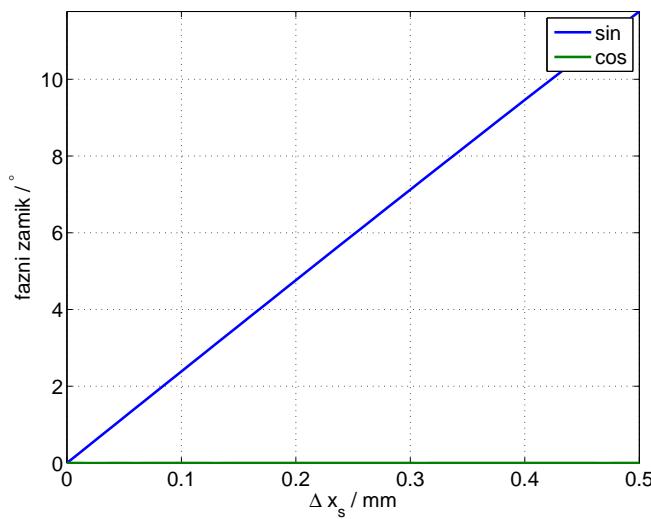


Slika 7.6: Amplituda osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

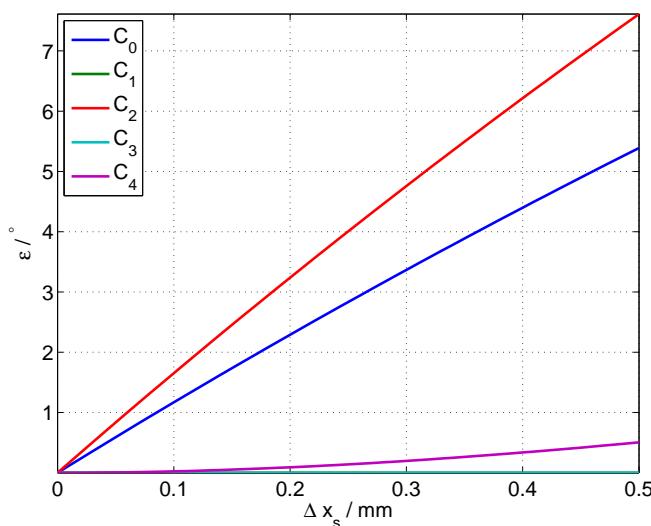


Slika 7.7: Enosmerna komponenta *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

Spremembi signalov *sin* in *cos* se odrazita tudi pri izračunu kota φ in napake ε . Na sliki 7.9 vidimo odvisnost amplitud posameznega harmonika od sprememjanja statične ekscentričnosti v smeri x. Poteke s slike 7.9 aproksimiramo s polinomi.



Slika 7.8: Fazni zamik *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala *sin* in *cos*



Slika 7.9: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z linearnim poljem

$$C_0 = 3,35 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 2,48 \Delta x_s^2 + 11,9 \Delta x_s + 1,23 \cdot 10^{-5} \quad (7.8)$$

$$C_1 = 5,56 \cdot 10^{-4} \Delta x_s^3 - 2,00 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^2 + 4,34 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 7,67 \cdot 10^{-8} \quad (7.9)$$

$$C_2 = 4,13 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 3,53 \Delta x_s^2 + 16,9 \Delta x_s - 2,31 \cdot 10^{-5} \quad (7.10)$$

$$C_3 = -2,17 \cdot 10^{-4} \Delta x_s^3 + 2,57 \cdot 10^{-4} \Delta x_s^2 + 0,0042 \Delta x_s + 4,51 \cdot 10^{-8} \quad (7.11)$$

$$C_4 = -8,27 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 + 2,42 \Delta x_s^2 + 8,08 \cdot 10^{-3} \Delta x_s - 1,60 \cdot 10^{-4} \quad (7.12)$$

Za primerjavo, s dodane tudi enačbe potekov amplitud posameznega harmonika razvitega v Taylorjevo vrsto, katere sledijo iz (6.22):

$$C_0 = 3,45 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 2,49 \Delta x_s^2 + 11,9 \Delta x_s \quad (7.13)$$

$$C_1 = 0 \quad (7.14)$$

$$C_2 = 3,66 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 3,51 \Delta x_s^2 + 16,9 \Delta x_s \quad (7.15)$$

$$C_3 = 0 \quad (7.16)$$

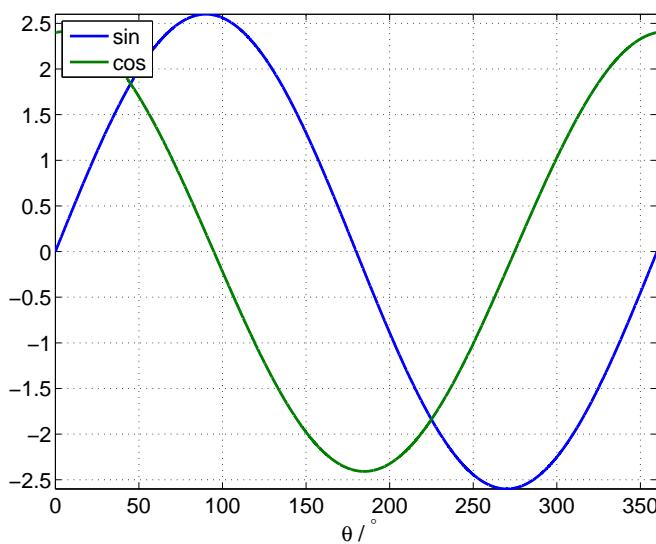
$$C_4 = -1,04 \Delta x_s^3 + 2,49 \Delta x_s^2 \quad (7.17)$$

Rezultati so pričakovani. Enosmerna komponenta in amplituda prvega harmonika naraščata linearno, četrtri harmonik narašča s kvadratom ekscentričnosti, lihi harmoniki, so zanemarljivi.

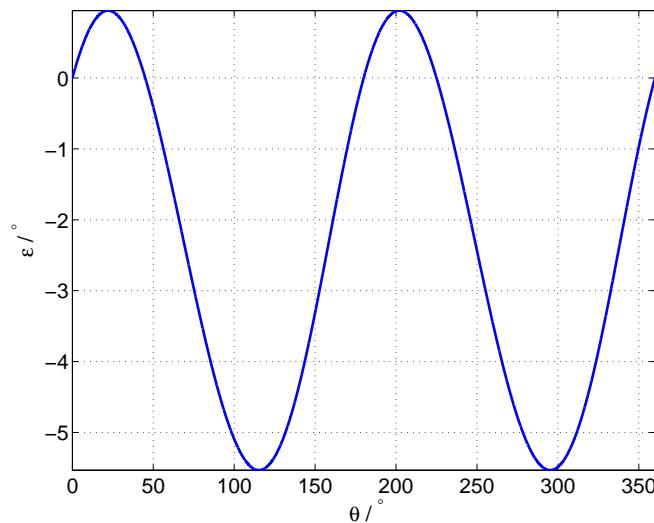
7.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

Pričakovani so podobni rezultati kot pri statični ekscentričnosti v smeri x, le da bo tu hitreje naraščala amplituda \sin in spremenjal se bo fazni zamik \cos .

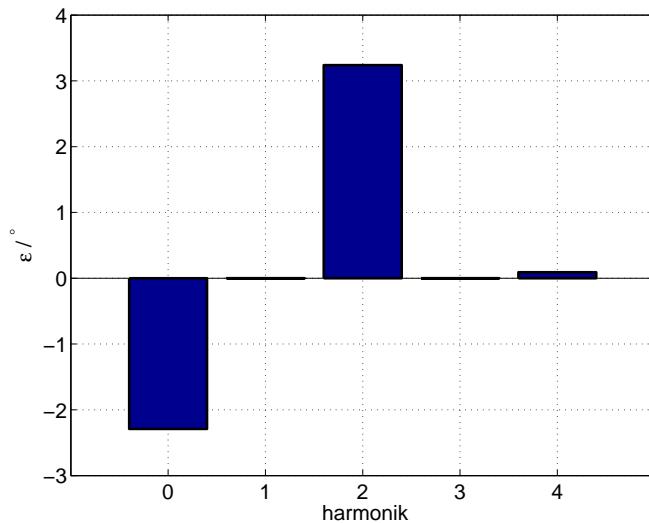
Napaka je prikazana na sliki 7.11. Sestavlja jo negativna enosmerna komponenta in izrazit drugi harmonik. Iz napake razvite v vrsto (7.12) je vidna enaka amplituda drugega harmonika, kot pri ekscentričnosti v smeri x. Enosmerna komponenta se razlikuje v predznaku.



Slika 7.10: \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y



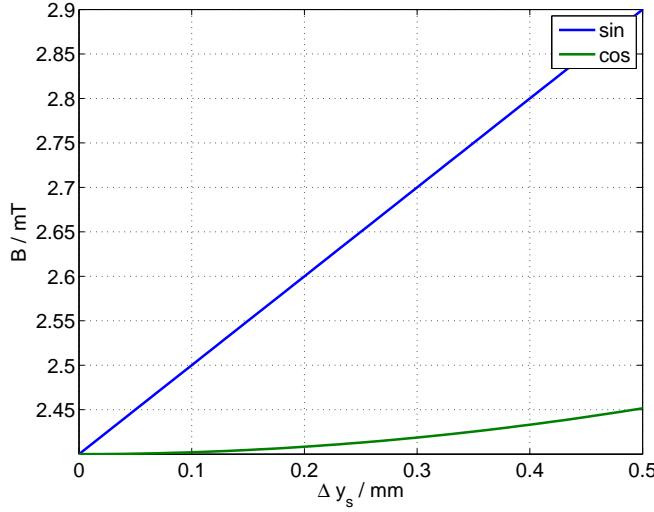
Slika 7.11: Napaka ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y



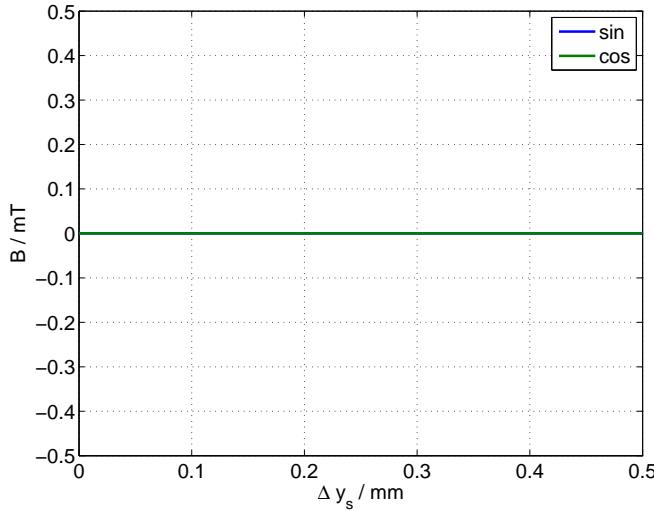
Slika 7.12: Amplitude harmonikov napake ϵ razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

7.3.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δy_s

Potek hitrejšega spreminjanja amplitude \sin je pričakovani. Enosmerna komponenta signalov se prav tako ni spremenila. Fazni zamik signala \cos se je zmanjševal, posledično tudi fazna razlika med signaloma. Poteki so opisani s kubičnimi polinomi. Na sliki 7.16 so prikazani poteki amplitud posameznih harmonikov v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y. Poteki so aproksimirani z kubičnimi polinomi. Potek amplitud harmonikov je enak potekom simuliranih s statično ekscentričnostjo v smeri x, razlikuje se enosmerna komponenta z nasprotnim predznakom.



Slika 7.13: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.14: Enosmerna komponenta *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

$$A_{\sin} = \Delta x_s + 2,4 \quad (7.18)$$

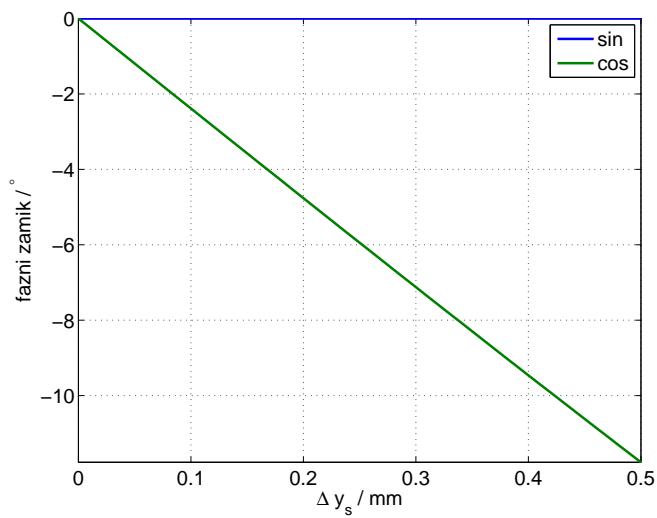
$$Off_{\sin} = 0 \quad (7.19)$$

$$\delta_{\sin} = 0 \quad (7.20)$$

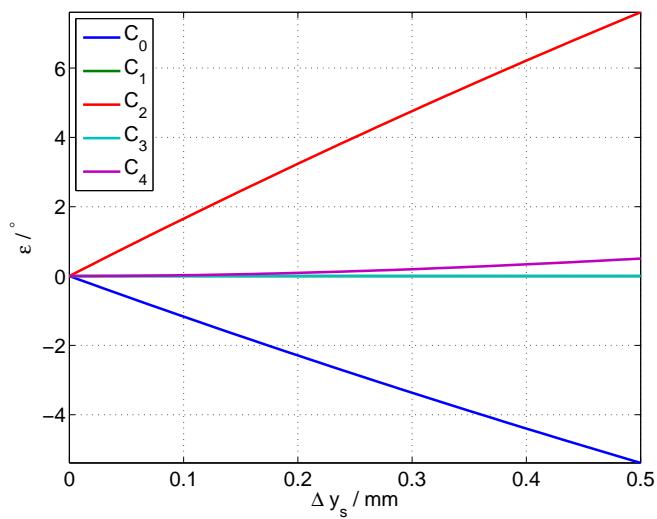
$$A_{\cos} = 2,08 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 2,4 \quad (7.21)$$

$$Off_{\cos} = 0 \quad (7.22)$$

$$\delta_{\cos} = 1,38 \Delta x_s^3 - 23,9 \Delta x_s \quad (7.23)$$



Slika 7.15: Fazni zamik *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala *sin* in *cos*



Slika 7.16: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z linearnim poljem

$$C_0 = -3,35 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 + 2,48 \Delta y_s^2 - 11,9 \Delta y_s - 1,22 \cdot 10^{-5} \quad (7.24)$$

$$C_1 = 1,09 \cdot 10^{-4} \Delta y_s^3 - 8,69 \cdot 10^{-4} \Delta y_s^2 + 0,00434 \Delta y_s + 7,62 \cdot 10^{-10} \quad (7.25)$$

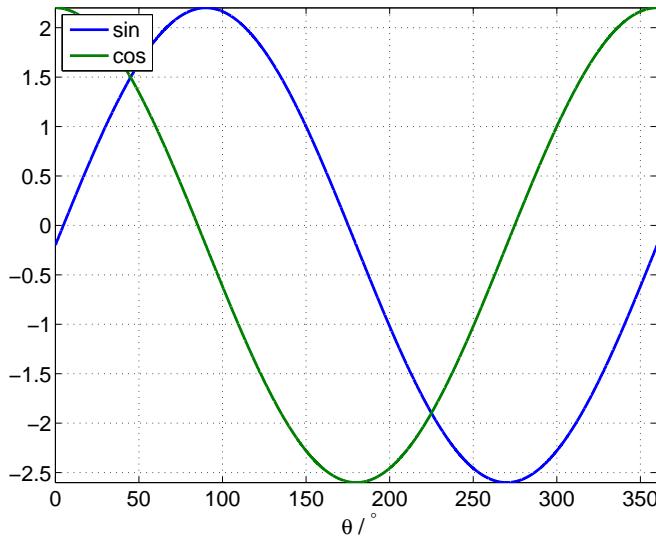
$$C_2 = 4,12 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 - 3,53 \Delta y_s^2 + 1,69 \cdot 10 \Delta y_s - 2,31 \cdot 10^{-5} \quad (7.26)$$

$$C_3 = 2,43 \cdot 10^{-4} \Delta y_s^3 - 0,00130 \Delta y_s^2 + 0,00420 \Delta y_s + 1,83 \cdot 10^{-8} \quad (7.27)$$

$$C_4 = -8,26 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 + 2,42 \Delta y_s^2 + 6,13 \cdot 10^{-3} \Delta y_s - 1,60 \cdot 10^{-4} \quad (7.28)$$

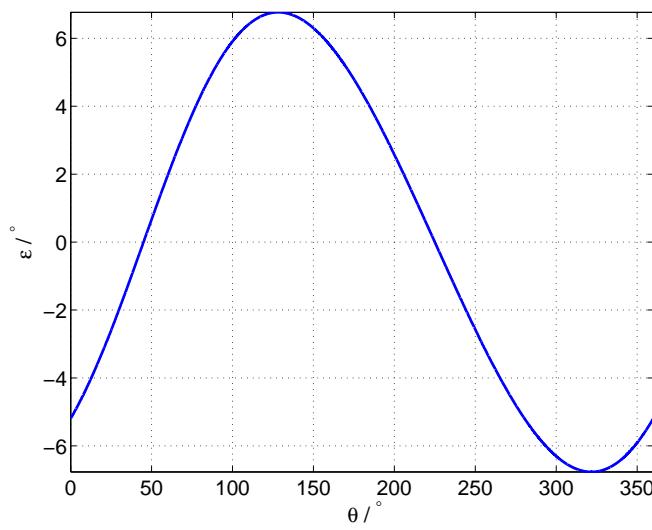
7.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x osi

Dinamična ekscentričnost pričakovano povzroči v *sin* in *cos* enosmerno komponento (Slika 7.17). Na sliki 7.18 je vidna napaka v obliki prvega harmonika, kar

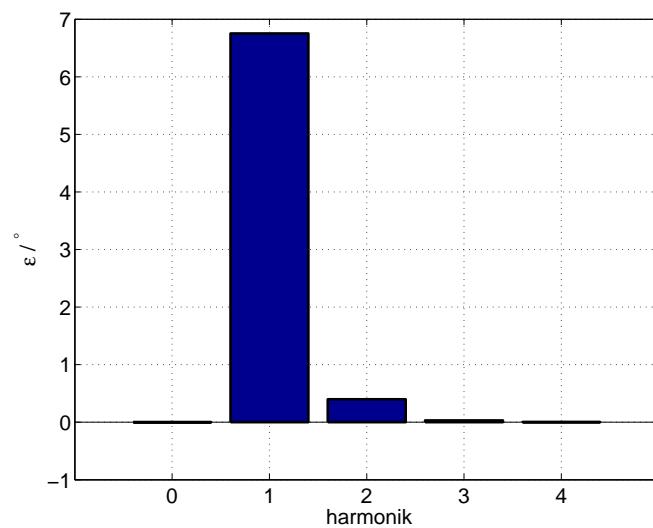


Slika 7.17: *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

je bilo pričakovati. Z razvojem napake v Fourierovo vrsto je nejizrazitejši prvi harmonik, enosmerna komponenta je nič (slika 7.19).



Slika 7.18: Napaka ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

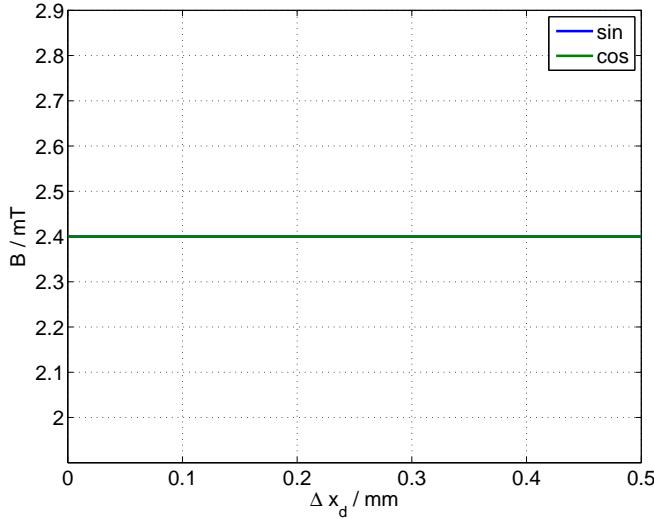


Slika 7.19: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

7.4.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δx_d

Dinamična ekscentričnost vpliva na enosmerni komponenti \sin in \cos (slika 7.21).

Z aproksimacijo posameznega parametra \sin in \cos s kubičnim polinomom



Slika 7.20: Amplituda osnovnega harmonika \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

sta od dinamične ekscentričnosti odvisni le enosmerni komponenti.

$$A_{\sin} = 2,4 \quad (7.29)$$

$$Off_{\sin} = -\Delta x_d \quad (7.30)$$

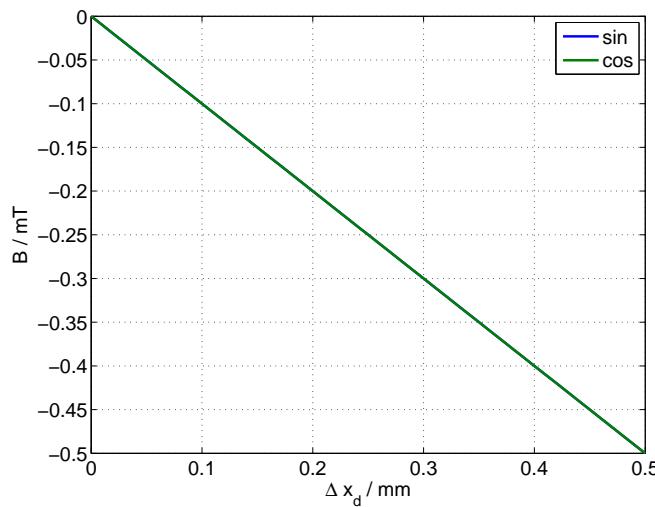
$$\delta_{\sin} = 0 \quad (7.31)$$

$$A_{\cos} = 2,4 \quad (7.32)$$

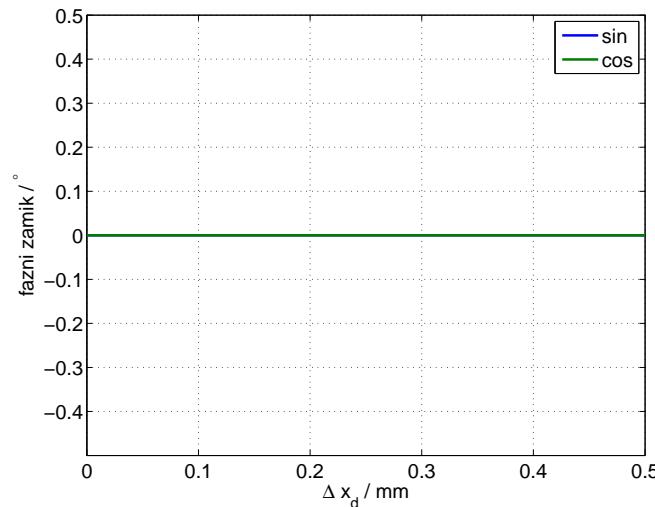
$$Off_{\cos} = -\Delta x_d \quad (7.33)$$

$$\delta_{\cos} = 0 \quad (7.34)$$

Slika 7.23 prikazuje odvisnost amplitud napake od spremenjanja dinamične ekscentričnosti v smeri x. V napaki, se po pričakovanih linearno povečuje prvi harmonik (6.14). Poteki opisani s kubičnimi polinomi.



Slika 7.21: Enosmerna komponenta *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.22: Fazni zamik *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala *sin* in *cos*

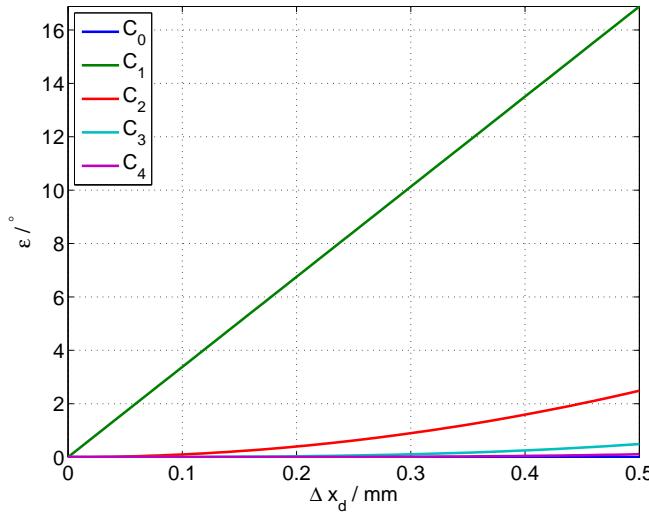
$$C_0 = 2,64 \cdot 10^{-4} \Delta x_d^3 + 0,00125 \Delta x_d^2 + 0,00291 \Delta x_d + 1,02 \cdot 10^{-7} \quad (7.35)$$

$$C_1 = 1,58 \cdot 10^{-4} \Delta x_d^3 + 2,37 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^2 + 33,8 \Delta x_d + 2,28 \cdot 10^{-7} \quad (7.36)$$

$$C_2 = 1,06 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^3 + 9,95 \Delta x_d^2 - 1,95 \cdot 10^{-3} \Delta x_d + 7,96 \cdot 10^{-7} \quad (7.37)$$

$$C_3 = 3,91 \Delta x_d^3 - 1,41 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^2 + 9,91 \cdot 10^{-4} \Delta x_d + 1,06 \cdot 10^{-5} \quad (7.38)$$

$$C_4 = 1,73 \Delta x_d^3 - 5,52 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 + 6,15 \cdot 10^{-2} \Delta x_d - 1,36 \cdot 10^{-3} \quad (7.39)$$



Slika 7.23: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od dinamične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z linearimi poljem

Poteki (6.24) razviti v Taylorjevo vrsto, so podali enake rezultate.

$$C_0 = 0 \quad (7.40)$$

$$C_1 = 33,8\Delta x_d \quad (7.41)$$

$$C_2 = 9,95\Delta x_d^2 \quad (7.42)$$

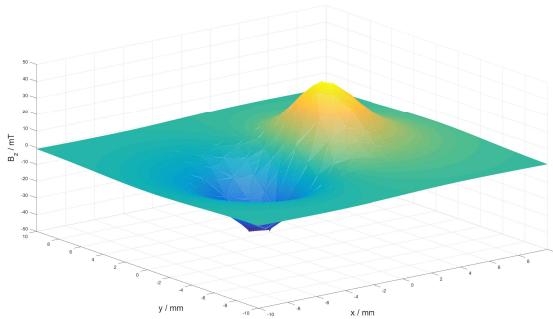
$$C_3 = 3,91\Delta x_d^3 \quad (7.43)$$

$$C_4 = 0 \quad (7.44)$$

Predstavljen je bil potek spremnjanja \sin in \cos in napake v odvisnosti od ekscentričnosti. Napaka zaradi dinamične ekscentričnosti je bila 0, zato rezultati tudi niso podani. Dinamična ekscentričnost v smeri y nima vpliva na enosmerno komponento, niti na osnovni harmonik \sin in \cos .

8 Realni model magnetnega polja

S poznanjem točnejše funkcije polja, je točnejše predvidevanje potekov realnih $\sin \cos$ in napake. Podjetje RLS, je posredovalo rezultate z-komponente gostote magnetnega polja 2,55 mm nad simuliranim magnetom. Definicijsko območje je 20x20 mm s korakom 0,02 mm (Slika 8.1). Polje, ki ga pomeri Hallova sonda v

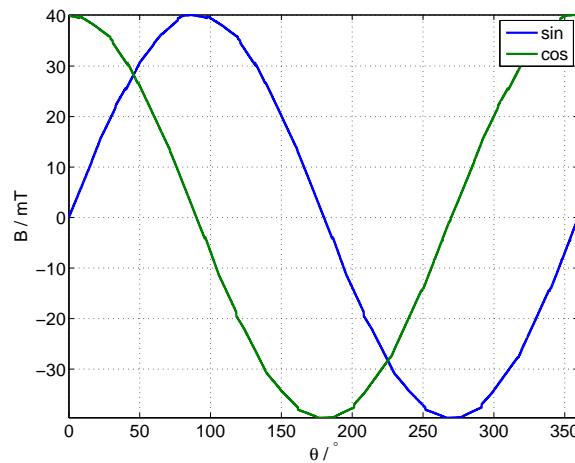


Slika 8.1: Model z- komponente gostote magnetnega polja uporabljen v simulacijah

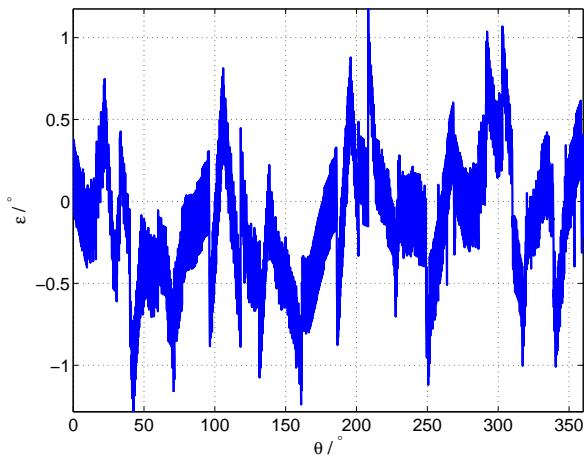
poljubni točki, je bilo aproksimirano s poljem, definiranim v geometrijsko najbližji točki definicijskega območja. V tem poglavju so predstavljeni rezultati simulacij ekscentričnosti z uporabo realnega modela magnetnega polja.

8.1 Brez napake

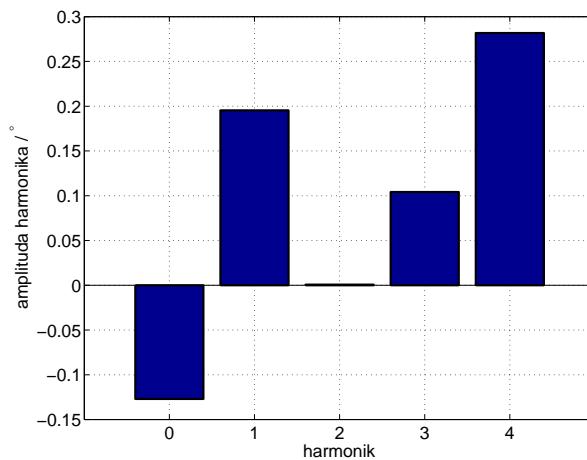
Kljub idealni montaži, Hallovi sondi ne zajameti idealnih signalov. Signala nimata popolnoma enakih amplitudi osnovnega harmonika, idealnega faznega zamika, vsebujeta tudi enosmerne komponente. Vsebujeta tudi višje harmonike (Slika 8.2). To se izrazi na napaki (Slika 8.3). V napaki se pojavijo skoki (105°), ki so posledica nepopolnega numerično izračunanega modela magnetnega polja. Napaka razvita v Fourierova vrsto prikaže vrednosti amplitud posameznih harmonikov napake (Slika 8.4). Izrazit je četrtri harmonik, ki je pričakovani po podatkovnih listih [1].



Slika 8.2: \sin in \cos pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



Slika 8.3: Napaka ε pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti

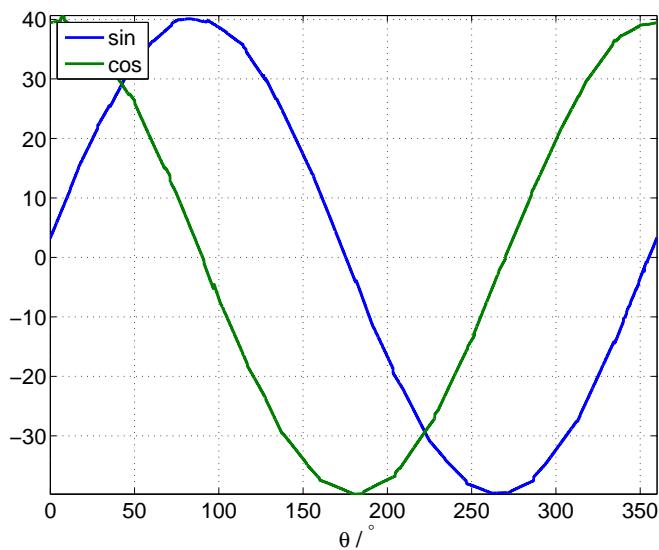


Slika 8.4: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem brez ekscentričnosti

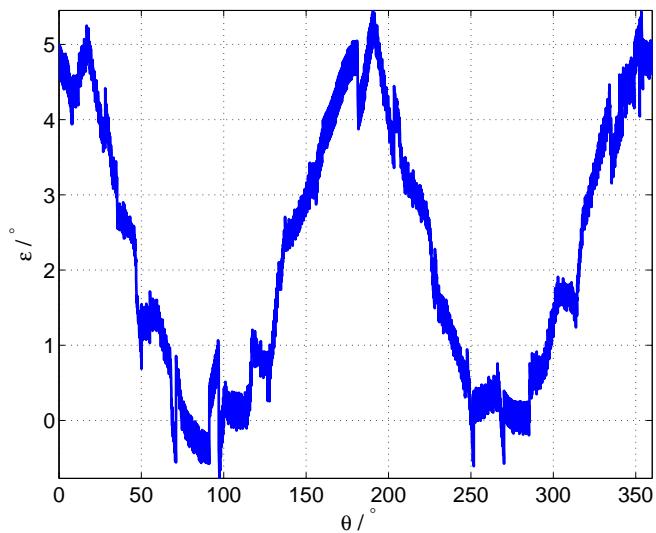
8.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

Po pričakovanjih se bo spremenila amplituda \sin in \cos signala ter zmanjšal njun fazni zamik (izraza (5.4) in 5.5). Na sliki 8.5 ni opaziti razlik, v primerjavi s \sin

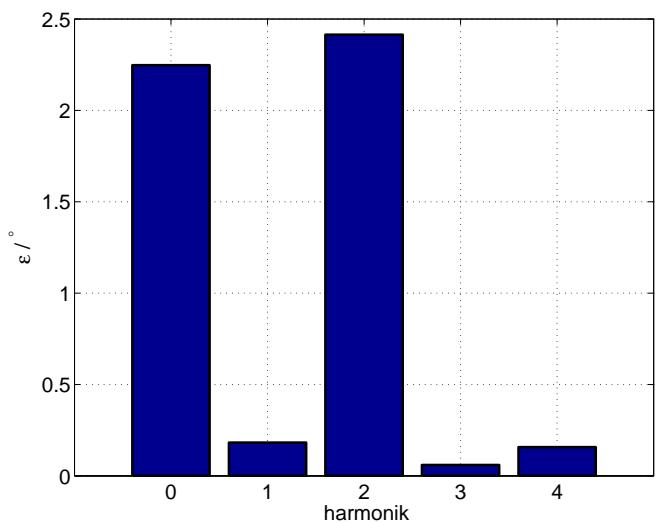
in \cos brez vpliva ekscentričnosti. Na sliki 8.6 je prikazana napaka ε . Oblika je bila pričakovana [1]. Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 8.7) prikaže enako velikost enosmerne komponente in nižjo amplitudo drugega harmonika, kot pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem.



Slika 8.5: \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x



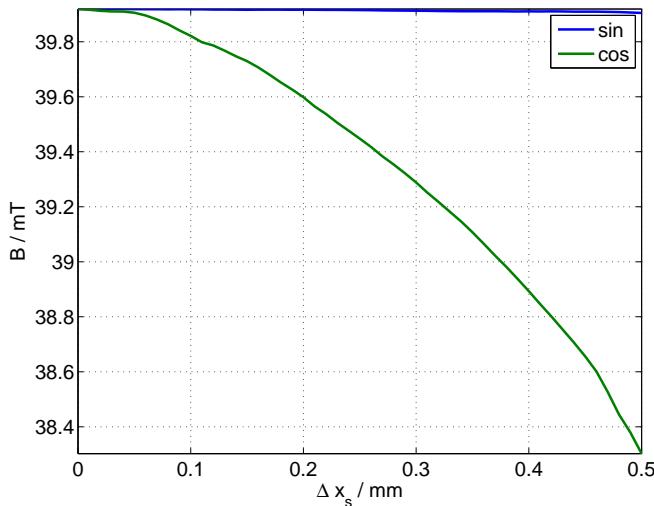
Slika 8.6: Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.7: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x

8.2.1 Spremembra \sin , \cos ter napake od Δx_s

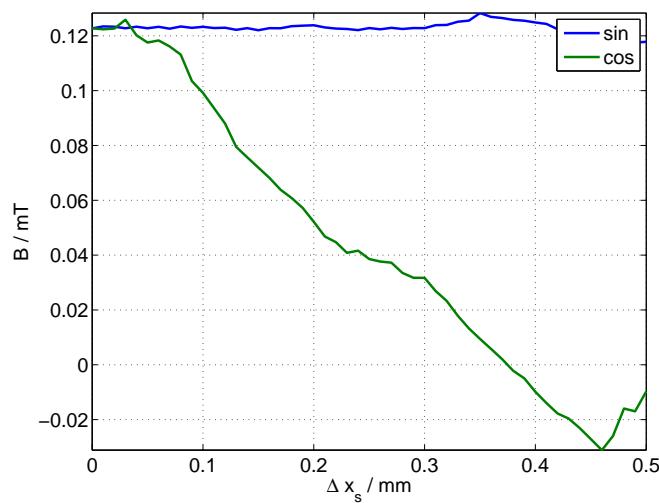
Na sliki 8.8 je prikazana sprememba amplituda prvega harmonika signalov \sin in \cos . Pričakovano je bilo hitrejše spreminjanje amplitude signala \cos . Amplituda z višanjem ekscentričnosti pada, kar je razumljivo. Senzor je predviden za uporabo priporočenega magneta s premerom 4mm. S pravilno postavitvijo sond, je v najboljši legi pomerjeno polje z najvišjo amplitudo. Z ekscentričnostjo Hallova sonda pomeri polje z nižjo maksimalno vrednostjo. Na sliki 8.9 je prikazan potek enosmerne komponente \sin in \cos . Po rezultatih simulacij ni bilo pričakovano spremjanje enosmerne komponente v \cos . Zanimivo je tudi, naraščanje enosmerne komponente \cos signala pri ekscentričnostih višjih od 0,45 mm. Slika 8.10 prikazuje potek faznih signalov. Rezultat je bil pričakovan. Poteke se apro-



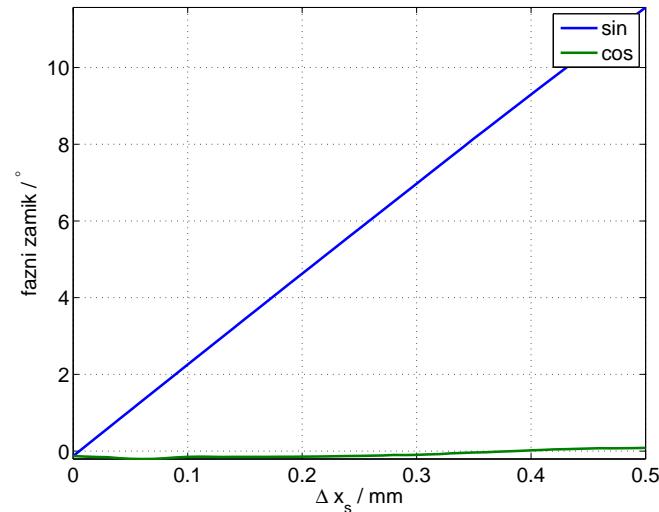
Slika 8.8: Amplituda osnovnega harmonika \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

ksimira s kubičnimi polinomi. Enačbe potrdijo konstantnost amplitude prvega harmonika in enosmerne komponente signala \sin , ter linearno naraščanje faznega zamika.

Na sliki 8.11 so prikazani poteki amplitud posameznega harmonika ob spremi-



Slika 8.9: Enosmerna komponenta \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.10: Fazni zamik \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala \sin in \cos

njanja statične ekscentričnosti v smeri x. Enosmerna komponenta in amplituda drugega harmonika naraščata linearno, ostali harmoniki ohranjajo konstantno

amplitudo (8.7)-(8.11).

$$A_{sin} = +4,18 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 6,17 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 3,60 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 39,9 \quad (8.1)$$

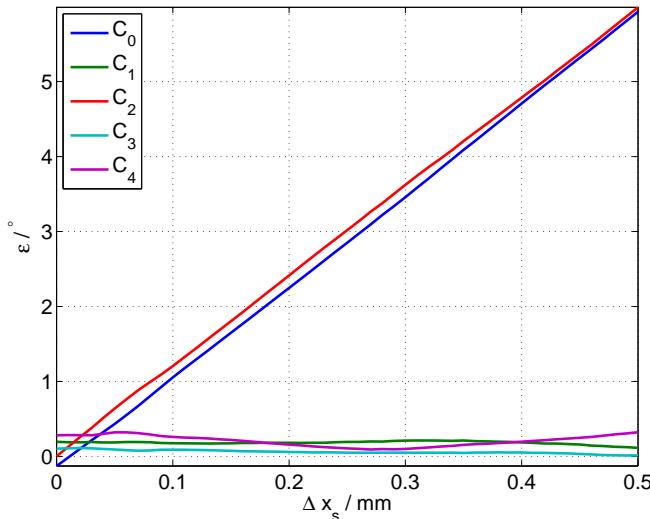
$$Off_{sin} = -0,545 \Delta x_s^3 + 0,343 \Delta x_s^2 - 5,33 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 0,125 \quad (8.2)$$

$$\delta_{sin} = -2,29 \Delta x_s^3 + 0,365 \Delta x_s^2 + 23,80 \Delta x_s - 0,125 \quad (8.3)$$

$$A_{cos} = -2,39 \Delta x_s^3 - 3,28 \Delta x_s^2 - 0,966 \Delta x_s + 39,9 \quad (8.4)$$

$$Off_{cos} = +0,868 \Delta x_s^3 - 0,423 \Delta x_s^2 - 0,316 \Delta x_s + 0,131 \quad (8.5)$$

$$\delta_{cos} = -2,71 \Delta x_s^3 + 3,54 \Delta x_s^2 - 0,597 \Delta x_s - 0,146 \quad (8.6)$$



Slika 8.11: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z realnim poljem

$$C_0 = -1,30 \Delta x_s^3 + 1,66 \Delta x_s^2 + 1,16 \cdot 10 \Delta x_s - 1,37 \cdot 10^{-1} \quad (8.7)$$

$$C_1 = -5,99 \Delta x_s^3 + 3,85 \Delta x_s^2 - 6,20 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 2,05 \cdot 10^{-1} \quad (8.8)$$

$$C_2 = -3,28 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 5,20 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 + 12,0 \Delta x_s + 1,66 \cdot 10^{-2} \quad (8.9)$$

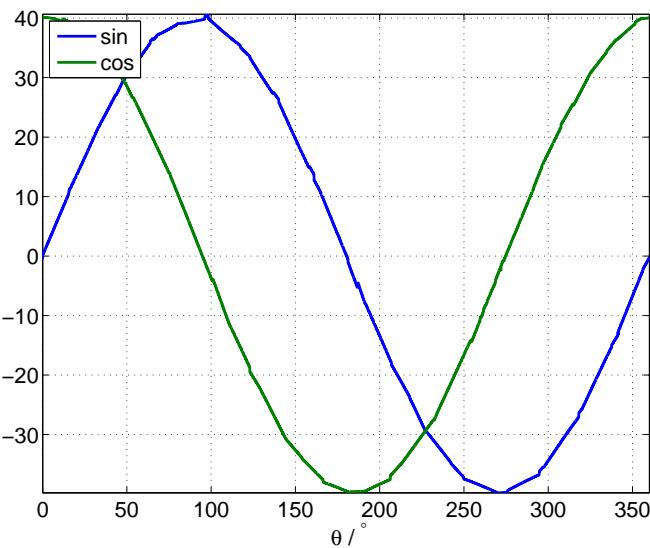
$$C_3 = -1,84 \Delta x_s^3 + 1,50 \Delta x_s^2 - 4,91 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 1,16 \cdot 10^{-1} \quad (8.10)$$

$$C_4 = 8,53 \Delta x_s^3 - 3,17 \Delta x_s^2 - 4,72 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 3,20 \cdot 10^{-1} \quad (8.11)$$

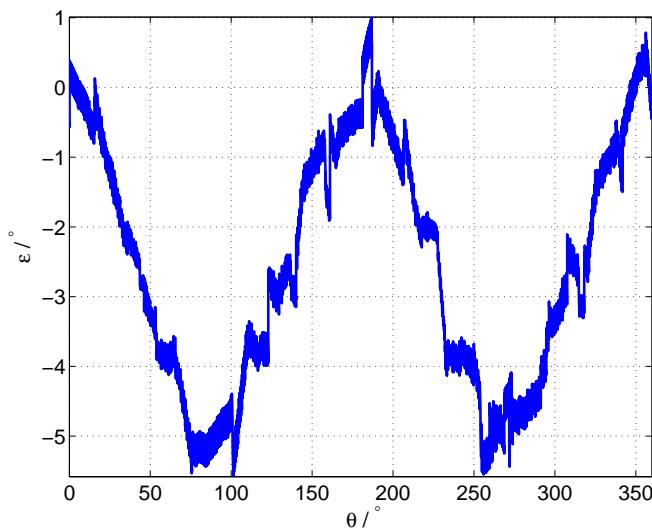
Enosmerna komponenta narašča enako kot pri simulacijah z linearnim poljem. Drugi harmonik narašča nekoliko počasneje, kot je naraščal pri simulacijah z linearnim poljem.

8.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

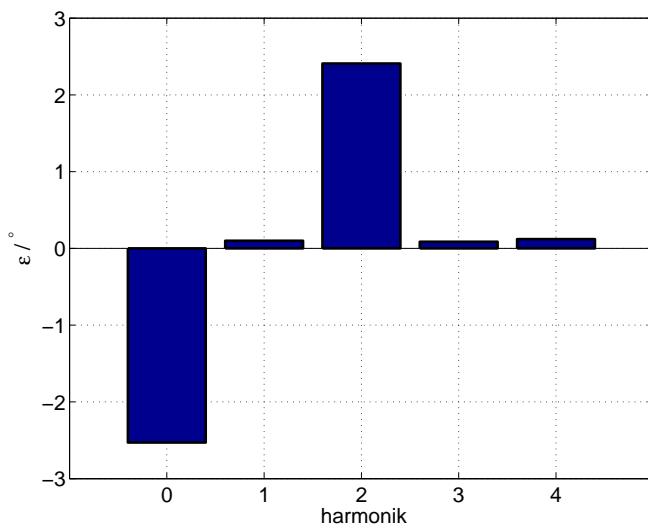
Tako kot pri statični ekscentričnosti v smeri x, se tudi na \sin in \cos signalih ob povzročeni ekscentričnosti ne opazi vidne razlike (slika 8.12). Napaka ε (slika 8.13) je enake oblike kot je bila pri simulacijah statične ekscentričnosti v smeri x (slika 8.6). Napaka ima le negativno enosmerno komponento. Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 8.7) potrdi pričakovanja.



Slika 8.12: \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 8.13: Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

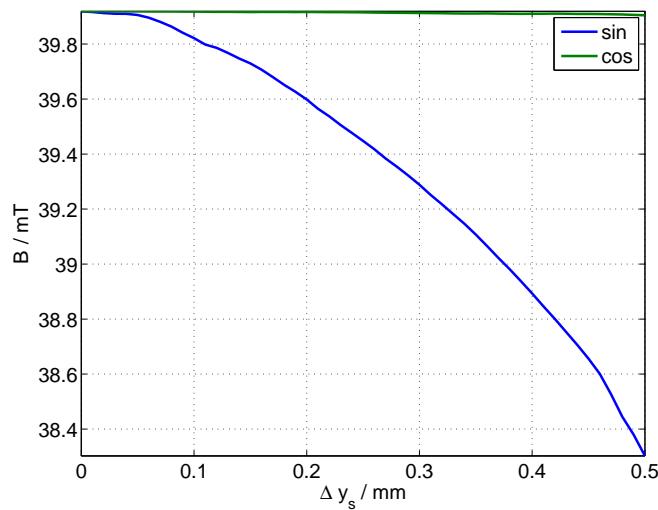


Slika 8.14: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

8.3.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δy_s

Potek amplitude osnovnega harmonika \sin (slika 8.15) se spreminja kot se je spremenjala amplituda osnovnega harmonika \cos pri simulacijah statične ekscentričnosti v smeri x. Sprememba \cos od statične ekscentričnosti v smeri y je proti spremembji \sin zanemarljiva. Enosmerena komponenta (slika 8.16) pri \sin se spreminja enako, kot enosmerna komponenta \cos pri statični ekscentričnosti v smeri x (slika 8.9). Fazni zamik signalov se spreminja po pričakovanjih (slika 8.17). Fazni zamik se manjša, pri čemer pada fazni zamik \cos signala.

Poteki



Slika 8.15: Amplituda osnovnega harmonika \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

zapisani s kubičnimi polinomi.

$$A_{\sin} = -2,39\Delta y_s^3 - 3,28\Delta y_s^2 - 0,966\Delta y_s + 39,9 \quad (8.12)$$

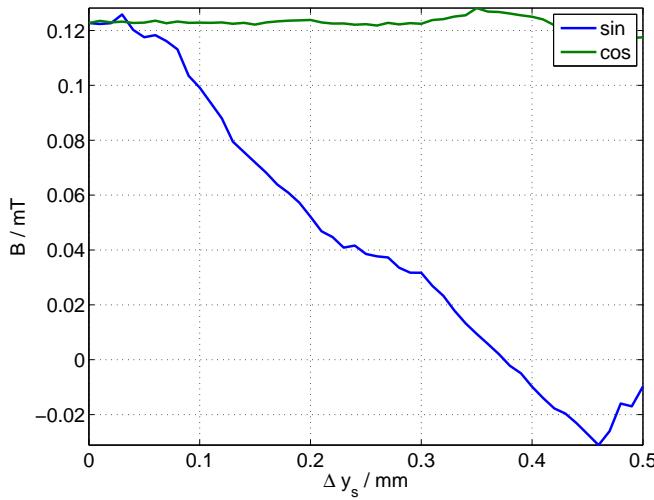
$$Off_{\sin} = +0,868\Delta y_s^3 - 0,423\Delta y_s^2 - 0,316\Delta y_s + 0,131 \quad (8.13)$$

$$\delta_{\sin} = -2,71\Delta y_s^3 + 3,54\Delta y_s^2 - 5,97 \cdot 10^{-1}\Delta y_s - 1,46 \cdot 10^{-1} \quad (8.14)$$

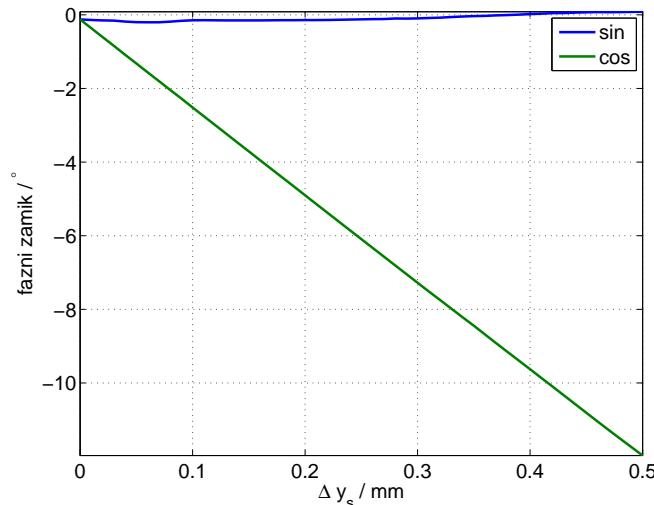
$$A_{\cos} = +3,76 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^3 - 5,99 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 - 3,87 \cdot 10^{-3}\Delta y_s + 39,9 \quad (8.15)$$

$$Off_{\cos} = -0,545\Delta y_s^3 + 0,342\Delta y_s^2 - 5,30 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 0,124 \quad (8.16)$$

$$\delta_{\cos} = +0,229\Delta y_s^3 + 0,473\Delta y_s^2 - 24,0\Delta y_s - 0,124 \quad (8.17)$$



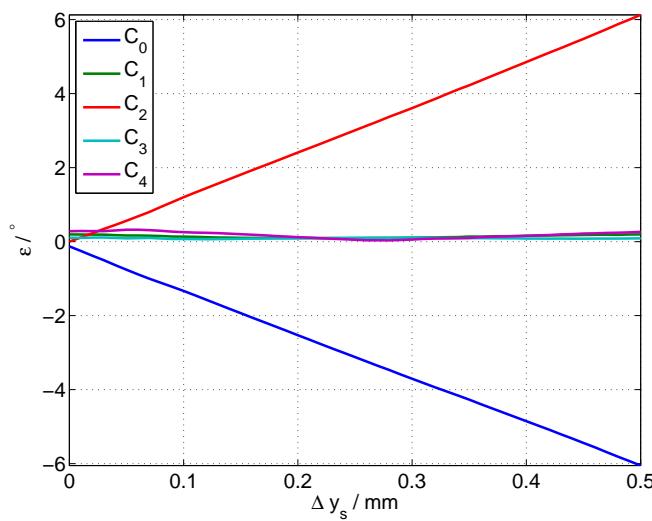
Slika 8.16: Enosmerna komponenta \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 8.17: Fazni zamik \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala \sin in \cos

Enačbe prikazujejo podobne poteke kot poteki pri statični ekscentričnosti v smeri x . Poteki, ki so veljali za \sin tu veljajo za \cos in obratno. Razlikuje se le pri predzanku faznega zamika φ_{\cos} .

Posledično to vpliva na posamezne harmonike napake. Po pričakovanju je enosmerna komponenta negativana, drugi harmonik narašča počasneje kot je pri simulacijah z linearnim poljem, kar je pričakovano. Poteki aproksimirani s kubičnimi polinomi so podobni aprksimacijam amplitud posameznih harmonikov napake statične ekscentričnosti v smeri x.



Slika 8.18: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z realnim poljem

$$C_0 = -2,56\Delta y_s^3 + 2,36\Delta y_s^2 - 1,24 \cdot 10\Delta y_s - 1,33 \cdot 10^{-1} \quad (8.18)$$

$$C_1 = -2,46\Delta y_s^3 + 3,57\Delta y_s^2 - 1,19\Delta y_s + 2,14 \cdot 10^{-1} \quad (8.19)$$

$$C_2 = 2,92\Delta y_s^3 - 1,53\Delta y_s^2 + 1,23 \cdot 10\Delta y_s - 2,78 \cdot 10^{-2} \quad (8.20)$$

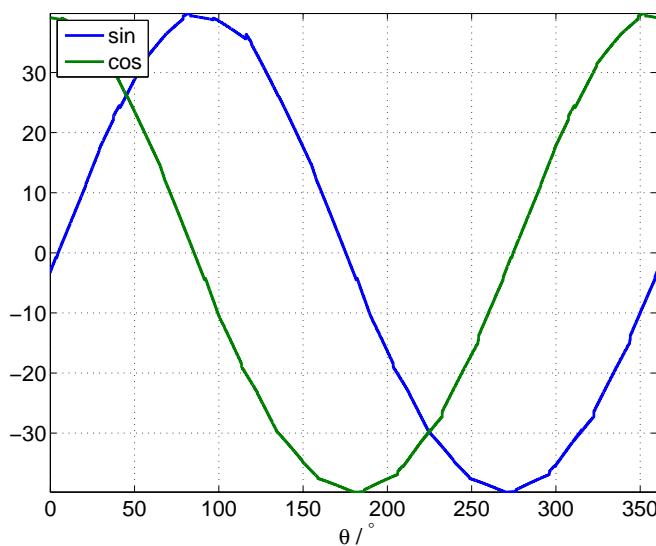
$$C_3 = -2,93\Delta y_s^3 + 2,15\Delta y_s^2 - 4,19 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 1,07 \cdot 10^{-1} \quad (8.21)$$

$$C_4 = 8,63\Delta y_s^3 - 2,82\Delta y_s^2 - 7,73 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 3,33 \cdot 10^{-1} \quad (8.22)$$

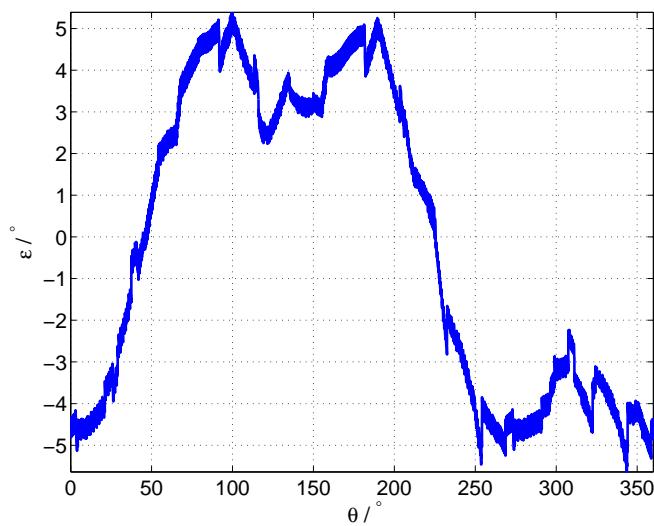
8.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x

Vpliv dinamične ekscentričnosti v \sin in \cos bo viden v enosmerni komponenti. Na sliki 8.19 sprememba ni opazna, posledica enosmerne komponente v \sin in

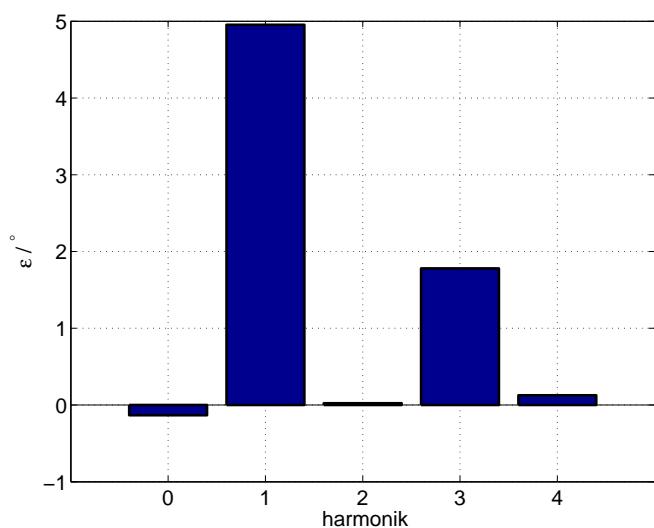
\cos je vidna v napaki (Slika 8.20). Napaka se izrazi v obliki prvega harmonika, ki je posledica enosmerne komponente. V napaki je viden tudi tretji harmonik saj enosmerna komponenta vpliva tudi nanj (6.9). Razvoj napake v Fourierovo vrsto potrdi pričakovanja (Slika 8.21). Poglejmo si še fft napake s slike 8.20, prikazanega na sliki 8.21.



Slika 8.19: \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.20: Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

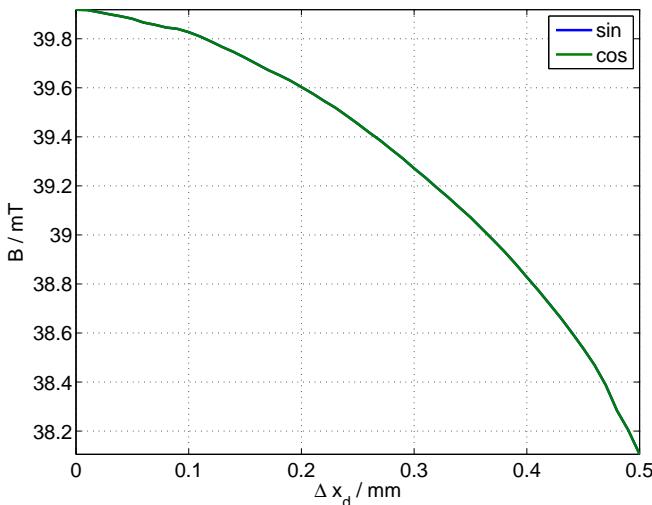


Slika 8.21: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

8.4.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δx_d

Spremembe amplitude osnovnega harmonika pri \sin in \cos po pričakovanjih iz rezultatov statične ekscentričnosti simulacij z realnim poljem pada. Zanimivo je, enako spremjanje amplitude osnovnega harmonika (slika 8.22). Enako se spreminja tudi enosmerni komponenti signalov (slika 8.23). Fazna razlika signalov ostaja konstantna, vendar je opazno lezenje obeh signalov in posledično naraščanje enosmerne komponente napake.

Poteki zapisani s kubičnimi



Slika 8.22: Amplituda osnovnega harmonika \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

polinomi predstavijo enako spremjanje signala \sin in \cos .

$$A_{\sin} = -6,54\Delta x_d^3 - 1,78\Delta x_d^2 - 1,04\Delta x_d + 39,9 \quad (8.23)$$

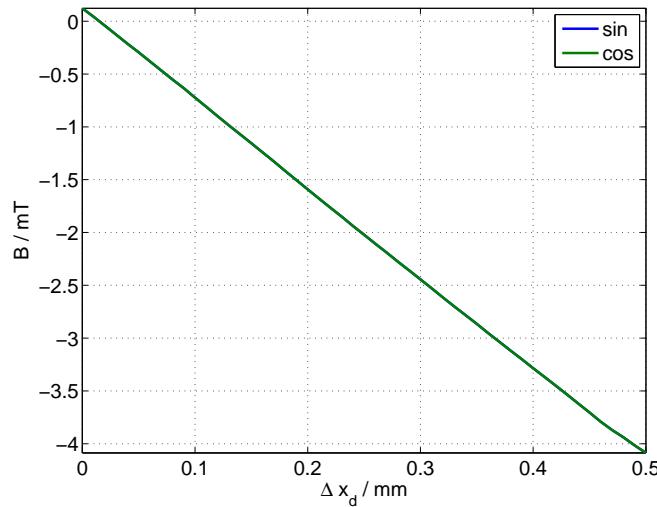
$$Off_{\sin} = 2,20\Delta x_d^3 - 1,11\Delta x_d^2 - 8,45\Delta x_d + 1,28 \cdot 10^{-1} \quad (8.24)$$

$$\delta_{\sin} = -4,82\Delta x_d^3 + 4,73\Delta x_d^2 - 8,49 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (8.25)$$

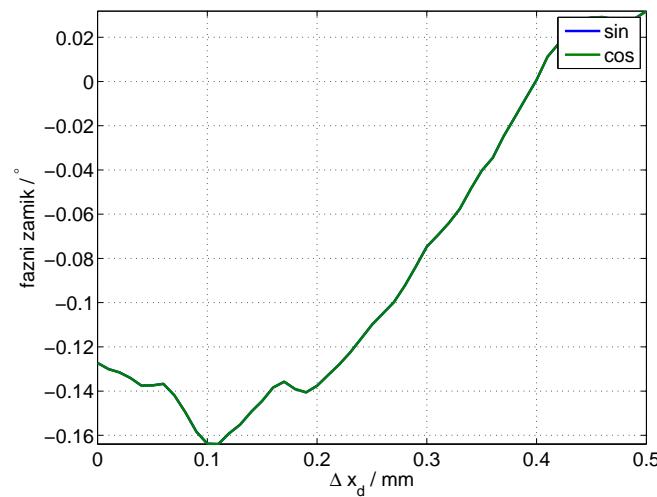
$$A_{\cos} = -6,54\Delta x_d^3 - 1,78\Delta x_d^2 - 1,04\Delta x_d + 39,9 \quad (8.26)$$

$$Off_{\cos} = 2,20\Delta x_d^3 - 1,11\Delta x_d^2 - 8,45\Delta x_d + 1,28 \cdot 10^{-1} \quad (8.27)$$

$$\delta_{\cos} = -4,82\Delta x_d^3 + 4,73\Delta x_d^2 - 8,49 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (8.28)$$

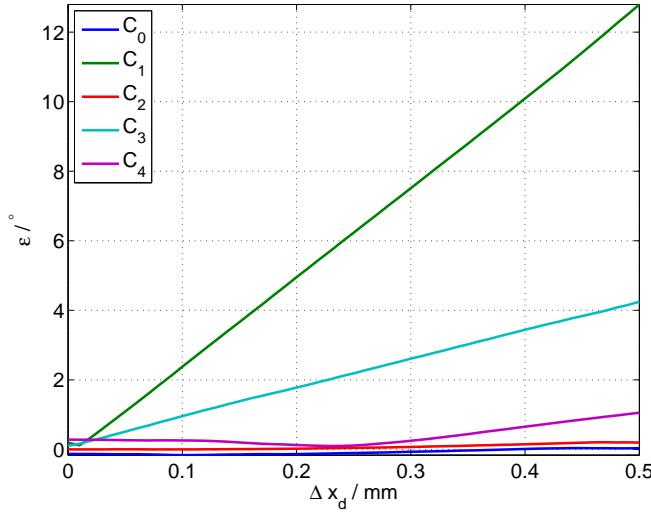


Slika 8.23: Enosmerna komponenta *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.24: Fazni zamik *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala *sin* in *cos*

Potek posameznih harmonikov napake je viden na sliki 8.25. Po pričakovanjih najhitreje narašča prvi harmonik napake, sledi mu treji. Ostali harmoniki so zanemarljivi. Poteki so aproksimirani tudi s kubičnimi polinomi.



Slika 8.25: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od dinamične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z realnim poljem

$$C_0 = -5,61\Delta x_d^3 + 5,24\Delta x_d^2 - 9,00 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (8.29)$$

$$C_1 = -2,27\Delta x_d^3 + 3,60\Delta x_d^2 + 2,44 \cdot 10\Delta x_d - 8,53 \cdot 10^{-2} \quad (8.30)$$

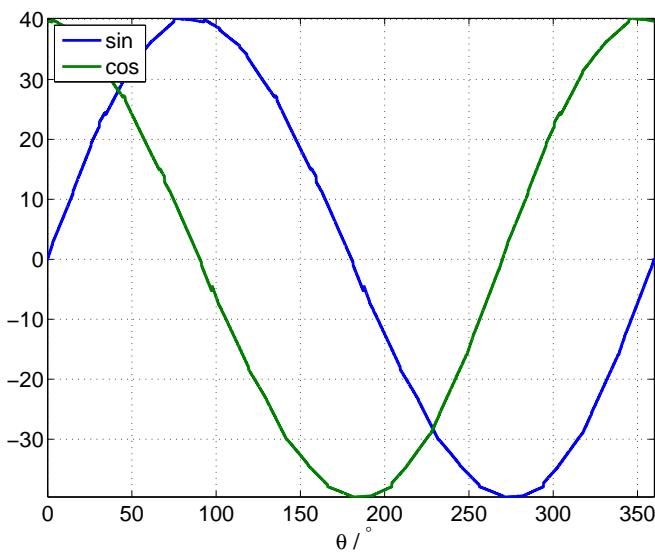
$$C_2 = -1,71\Delta x_d^3 + 2,37\Delta x_d^2 - 3,36 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 9,84 \cdot 10^{-3} \quad (8.31)$$

$$C_3 = 1,07\Delta x_d^3 - 1,37\Delta x_d^2 + 8,73\Delta x_d + 8,63 \cdot 10^{-2} \quad (8.32)$$

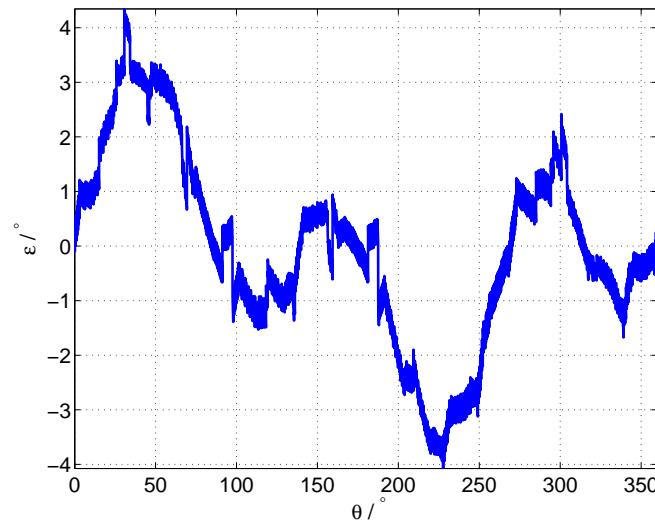
$$C_4 = 6,38\Delta x_d^3 + 4,03\Delta x_d^2 - 2,02\Delta x_d + 3,51 \cdot 10^{-1} \quad (8.33)$$

8.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y

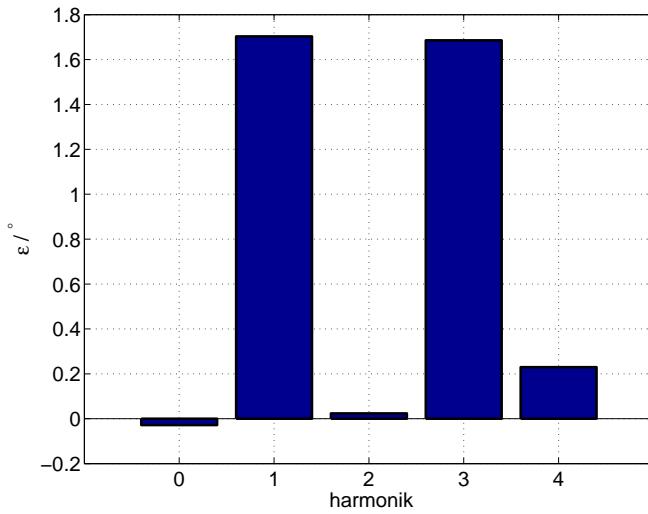
V simulacijah z linearnim poljem napaka ni bila odvisna od dinamične ekscentričnosti v smeri y. Kljub temu je bila opravljena simulacija. Rezultati so razlikujejo od pričakovanj. Spremembe v \sin in \cos ni opaziti (slika 8.26), vendar v napaki se pojavi prvi in tretji harmonik (slika 8.26). Razvoj v Fourierovo vrsto potrdi izstopanje omenjeinih harmonikov.



Slika 8.26: \sin in \cos pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 8.27: Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 8.28: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y

8.5.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δy_d

Sprememba amplitude osnovnega harmonika od naraščanja ekscentričnosti pada (slika 8.29). Razlika amplitud ostaja nespremenjena. Enosmerna komponenta (slika 8.30) se spreminja minimalno, komponenti obeh signalov sta enaki. Vidno je tudi sofazno lezenje faznih zamikov obeh signalov (slika 8.31). Poteki so aproksimirani s kubičnimi polinomi in potrdijo enako spremenjanje.

$$A_{\sin} = +1,15\Delta y_d^3 - 2,72\Delta y_d^2 - 3,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,99 \cdot 10 \quad (8.34)$$

$$Off_{\sin} = -0,244\Delta y_d^3 - 0,292\Delta y_d^2 + 0,169\Delta y_d + 0,131 \quad (8.35)$$

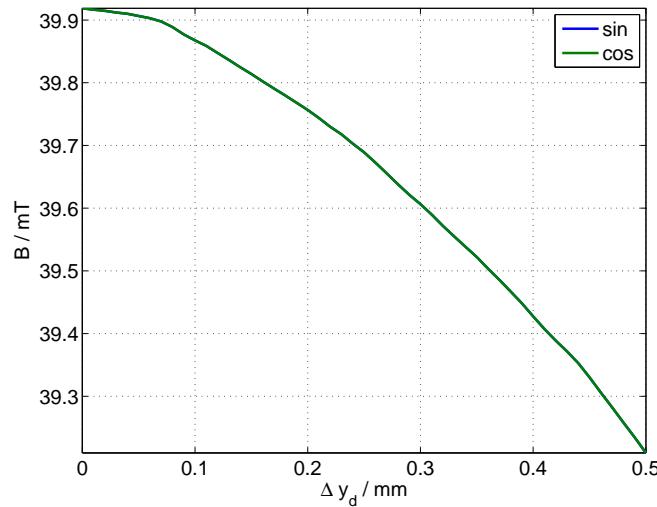
$$\delta_{\sin} = +2,39\Delta y_d^3 - 2,10\Delta y_d^2 + 9,01 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (8.36)$$

$$A_{\cos} = +1,15\Delta y_d^3 - 2,72\Delta y_d^2 - 3,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,99 \cdot 10 \quad (8.37)$$

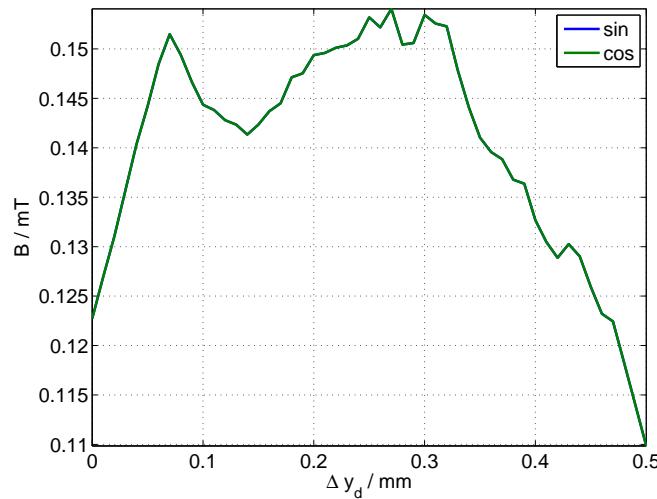
$$Off_{\cos} = -0,244\Delta y_d^3 - 0,292\Delta y_d^2 + 0,169\Delta y_d + 0,131 \quad (8.38)$$

$$\delta_{\cos} = +2,39\Delta y_d^3 - 2,10\Delta y_d^2 + 9,01 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (8.39)$$

Na sliki 8.32 je prikazana odvisnost amplitud napake ob spremenjanju dinamične ekscentričnosti v smeri y. Napaka, se po pričakovanjih najbolj izrazi s prvim in

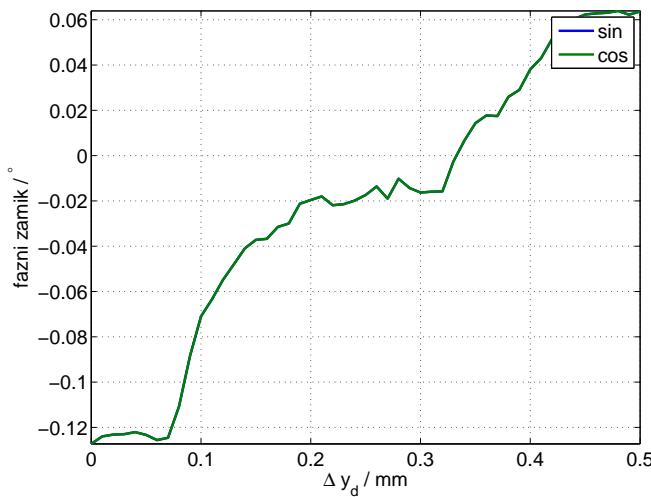


Slika 8.29: Amplituda osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y



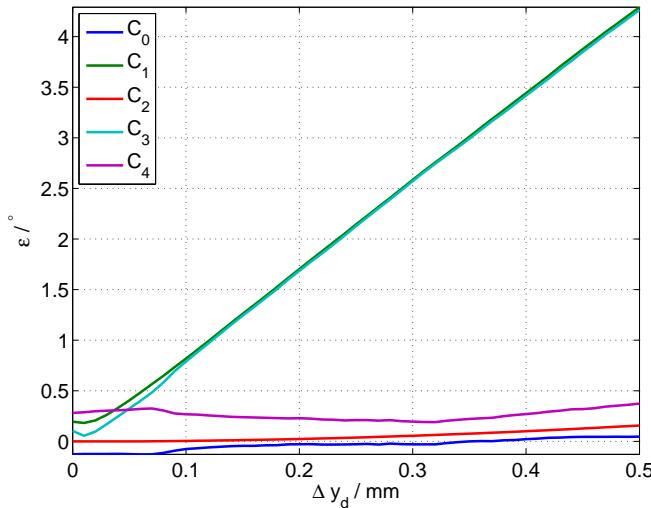
Slika 8.30: Enosmerna komponenta *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y

tretjim harmonikom. Oblika napake ni posledica spremembe amplitudne osnovnega harmonika, enosmerne komponente ali spremembe faznega zamika v *sin* in *cos*. Naraščanje prvega in tretjega harmonika je posledica vpliva drugega har-



Slika 8.31: Fazni zamik *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri *y* glede na idealna signala *sin* in *cos*

monika, ki se pojavi v *sin* in *cos*. Drugi harmonik v *sin* in *cos* se pojavi zaradi magnetnega polja, kar v tem delu ni raziskano zakaj.



Slika 8.32: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od dinamične ekscentričnosti v smeri *y* pri simulacijah z realnim poljem

$$C_0 = 2,50\Delta y_d^3 - 2,14\Delta y_d^2 + 8,63 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (8.40)$$

$$C_1 = -9,46\Delta y_d^3 + 7,85\Delta y_d^2 + 6,81\Delta y_d + 8,35 \cdot 10^{-2} \quad (8.41)$$

$$C_2 = -0,148\Delta y_d^3 + 0,762\Delta y_d^2 - 3,01 \cdot 10^{-2}\Delta y_d + 4,54 \cdot 10^{-4} \quad (8.42)$$

$$C_3 = -6,17\Delta y_d^3 + 4,40\Delta y_d^2 + 7,91\Delta y_d - 3,84 \cdot 10^{-2} \quad (8.43)$$

$$C_4 = 5,60\Delta y_d^3 - 1,89\Delta y_d^2 - 2,84 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,13 \cdot 10^{-1} \quad (8.44)$$

V tem poglavju so bile prikazane simulacije z uporabo realnega polja, ki ga merijo Hall-ove sonde. Rezultati imajo manjšo napako kot pri simulacijah z aproksimiranim linearnim magnetnim poljem. Opaziti je bilo manjši fazni zamik obeh signalov \sin in \cos pri dinamični ekscentričnosti, kar bi bilo smiselno pri meritvah podrobno opazovati. Na koncu, pri dinamični ekscentričnosti v smeri y je prikazano tudi, da se v zajetem polju pojavijo tudi višji harmoniki, ki še dodatno ustvarijo napako.

9 Meritve

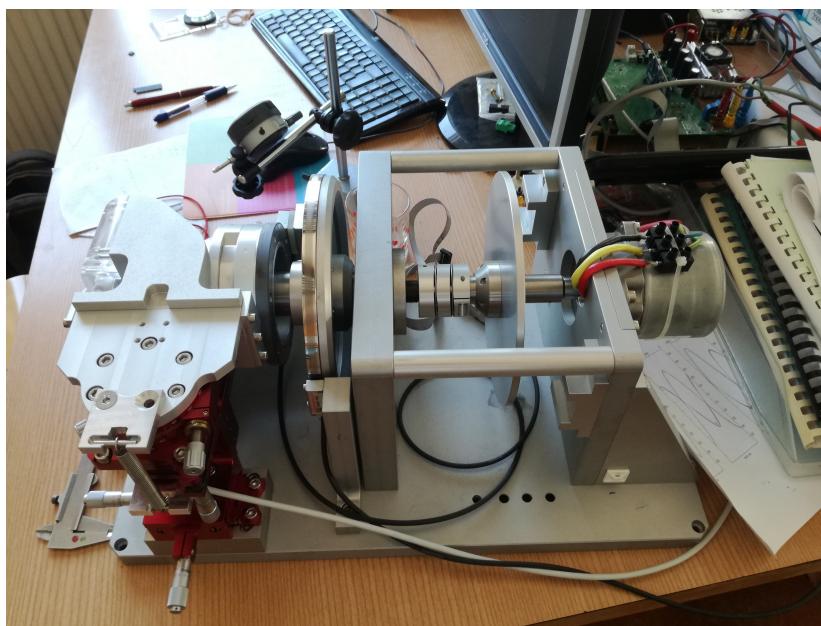
Simulacije so prikazale okvirne poteke \sin in \cos signalov ter napake ob posameznih ekscentričnostih. Na meritni napravi so bile opravljene meritve ekscentričnosti. V poglavju je opisana meritna naprava, zajem podatkov ter izvedba meritev.

9.1 Oprema in postavitev meritnega mesta

Meritno mesto sestavlja krmilna plošča za regulacijo motorskega pogona in obdelavo signalov sestavljena v LRTME. Vsebuje elektromotorski pogon z inkrementalnim, referenčnim dajalnikom zasuka TONiC podjetja Renishaw in magnetnim aktuatorjem za RM44 podjetja RLS d.o.o. Magnetni aktuator je možno premikati le v eni prostorski osi (slika 9.1). Senzor RM44 je pritrjen na konstrukcijo 6-osnega mikrometrskoga nastavljalnika pozicije HTIMS601. Celotno meritno mesto je prikazano na sliki 9.2. Za manevriranje s HTIMS601 je potrebno nastaviti 6 osi. S postavitvijo koordinatnega sistema (slika 9.3), je vsak od vijakov definiral premik senzorja. Vsako os se nastavlja z enim od vijakov (slika 9.4). Vijaki poimenovani x-os, y-os in z-os so za nastavljanje translacijskega merjenca, x-rot, y-rot in z-rot so za nastavljanje rotacije premikajoče plošče na vrhu HTIMS601. S spremembjo vrtenja vijakov translacijskih osi, se je lokacija senzorja pred magnetom spreminja za enako spremembo. S spremembjo vrtenja rotacijskih vijakov, se je zaradi ročice na katero je pritrjen senzor, senzor zarotira in hkrati tudi premakne iz dotedanje lege. S spremembjo rotacije je potrebno



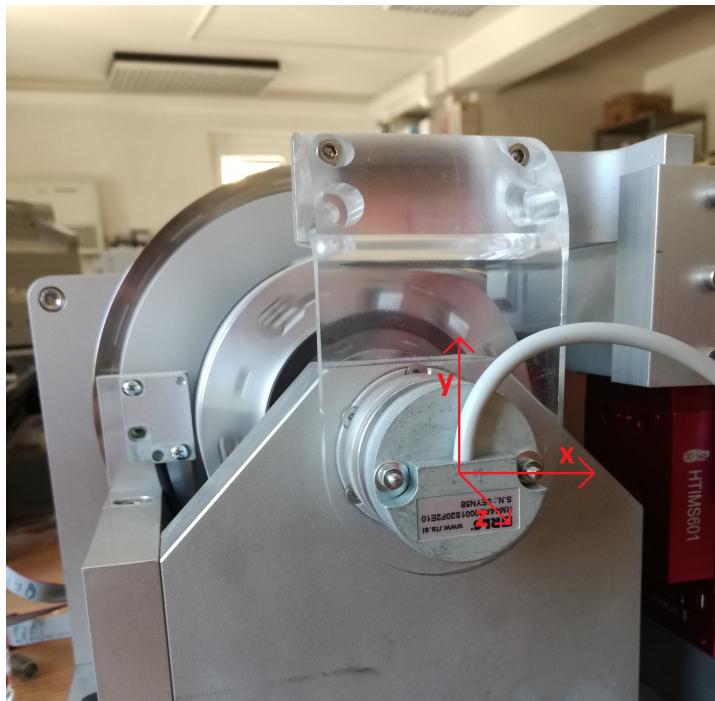
Slika 9.1: Dinamično ekscentričnost se lahko izmeri le v eni smeri



Slika 9.2: Postavitev testnega mesta

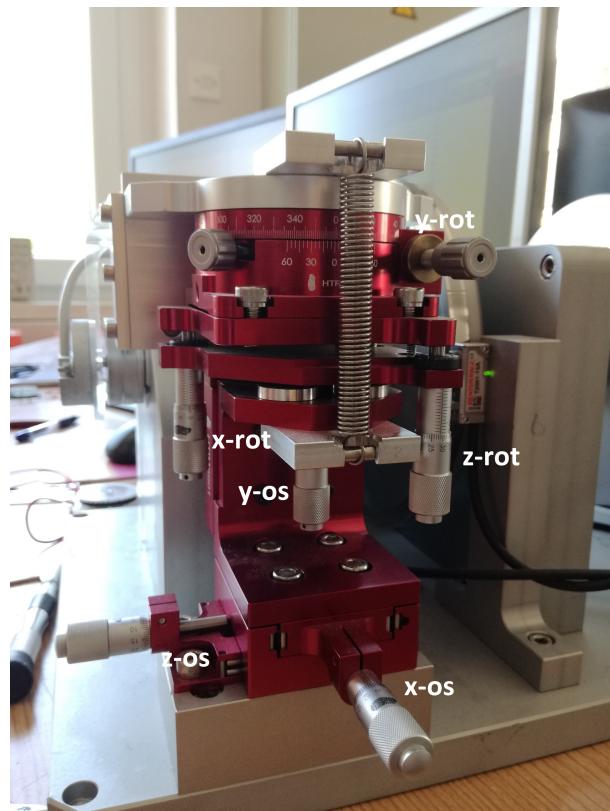
popraviti tudi nastavitev vijakov, ki senzor premikajo v translacijskih oseh.

Hitrost vrtenja pogona je nastavljiva. Hitrost vrtenja je pogona je nastavljena na 60 RPM. Hitrost ni popolnoma konstantna (slika 9.5). Vzrok je v vztrajno-

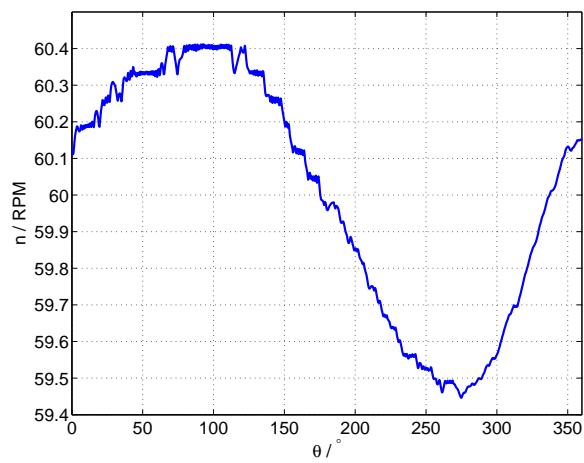


Slika 9.3: Postavitev testnega mesta

sti pogona. Mitja Nemec je problem skušal čim bolje odpraviti, z dodajanjem primernih uteži na primerna mesta na vztrajniku.



Slika 9.4: Naprava za nastavljanje statične ekscentričnosti



Slika 9.5: Potek hitrosti od zasuka

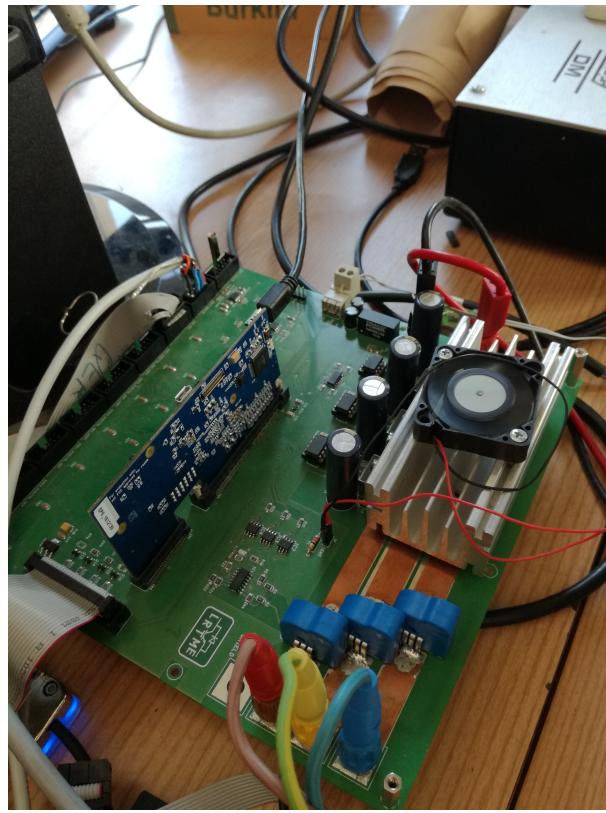
9.2 Zajem podatkov

Mitja Nemeč je pripravil grafični uporabniški vmesnik za prikazovanje meritvev (slika 9.6). Vmesnik lahko prikazuje potek refernečnega kota, \sin in \cos senzorja RM44, izračunanega kota iz \sin in \cos signala, napako med izračunanim kotom senzorja in referenčnim dajalnikom, hitrost vrtenja ter tok prve faze motorskega pogona. Signaloma \sin in \cos se v programu prišteje enosmerna komponenta, ki bi popravila izhodna signala.

Krmilna plošča (slika 9.7) zajema podatke s pogona s frekvenco 1kHz. Referenčni inkrementalni dajalnik, se ob zagonu inicializira. V programu se podatek o kotu deli z 12595200. Definicjsko območje referenčnega kota se giblje med 0 in 1. Signala sin in cos se na krmilni plošči ojačata in pretvorita z 12 bitnim AD pretvornikom. Izhodu AD pretvornika se odšteje 2048 in deli s 4096. Definicjsko območje sin in cos signala se gibljetva med $\pm 0,5$. Hitrost in napaka sta izračunana iz zajetih signalov. Podatki so v obliki enega paketa poslati s krmilne plošče na 1 sekundo. Pri frekvenci vrtenja 1 Hz, grafični vmesnik prikaže en obrat. Podatke se lahko izvozi v obliki .csv datoteke in nato poljubno obdelava. Na sliki 9.6 je prikazan sinusni signal prikazan kot da je zamaknjen za 180° . To je posledica definicije pozitvne smeri vrtenja za senzor [6]. Senzor ima nasproto definirano pozitivno smer vrtenja. To sem rešil tako, da sem obrnil podatke. Popraviti je bilo potrebno tudi potek referenčnega dajalnika.



Slika 9.6: Grafični vmesnik s poteki signalov

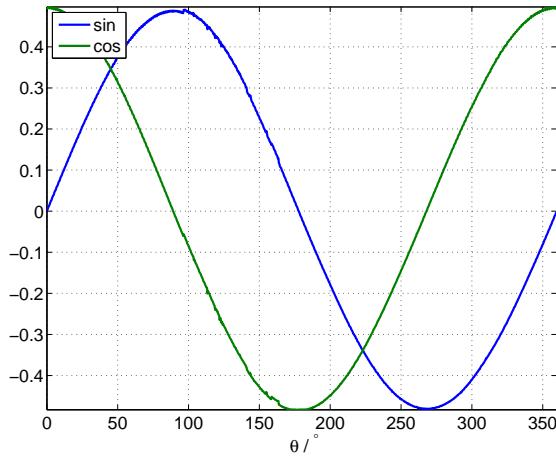


Slika 9.7: Krmilna plošča za krmiljenje pogona in obdelavo signalov s dajalnikov položaja

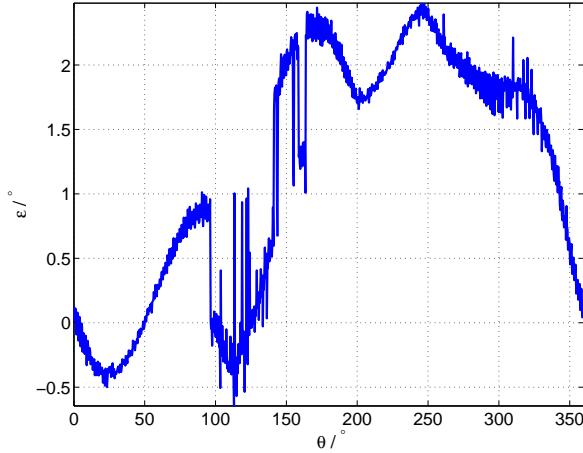
9.3 Senzor v izhodiščni legi

Senzor in magnet se lahko gibljeta, najprimernejša, izhodiščna lega, ni definirana. Z merilno urico Mitutoyo 543-391B se je dinamično ekscentričnost magneta nastavilo na najmanjšo. Oplet z merilno urico je bil pomerjen $\pm 3\mu\text{m}_{\text{pp}}$. S prilagajanjem vijakov HTIMS601, opazovanjem *sin* in *cos* ter napake je bil senzor nastavljen v lego, kjer je bila amplituda drugega harmonika napake najmanjša. Najprimernejšo lego sem iskal glede na vrednost amplitud in ortogonalnost *sin* in *cos*. Signala *sin* in *cos* morata ustrezati definicijskem območju zajema AD pretvornika.

Na sliki 9.8 sta prikazana *sin* in *cos*. Enosmerni komponenti sta prisotni v obeh signalih, posledično se izrazi v napaki prvi harmonik (slika 9.9). V napaki se pojavi med 95° in 140° preskok napake. V signalih *sin* in *cos* se v tem območju pojavi fazni zamik, *sin* pri 95° in nato *cos* pri 160° . Vzroka nisem raziskoval. Z razvojem napake v Fourierovo vrsto (slika 9.10) vidimo velikosti posameznih amplitud napake. Enosmererna komponenta je posledica sofaznih zamikov obeh signalov *sin* in *cos*. Prvi harmonik je posledica enosmernih komponent *sin* in *cos*. Z matematično obdelavo signalov *sin* in *cos* sem enosmerni komponenti odstranil, vendar se prvi harmonik napake še vedno izrazi. Prvi harmonik napake je odvisen tudi od drugega harmonika v signalih *sin* in *cos*. Z odstranitvijo tudi drugega harmonika iz signalov *sin* in *cos* je bil prvi harmonik v napaki odstranjen. Signala *sin* in *cos* med izvajanjem meritev ne bosta spremenjena zaradi matematične obdelave. Spreminjanje signalov *sin* in *cos* in napake se bo opazovalo glede na potek, ki je bil pomerjen v izhodiščni legi.



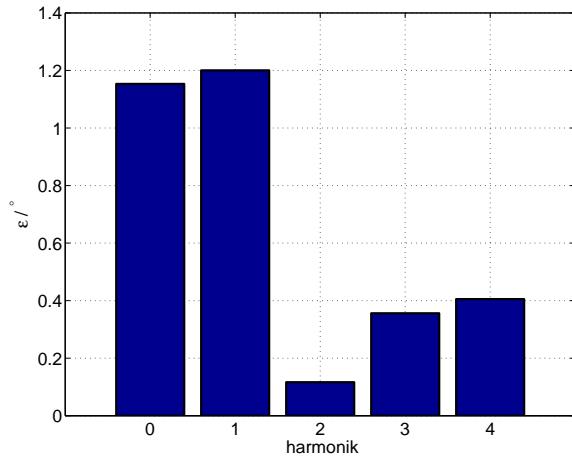
Slika 9.8: Signalna \sin in \cos pomerjena v izhodiščni legi



Slika 9.9: Napaka ε pomerjena v izhodiščni legi

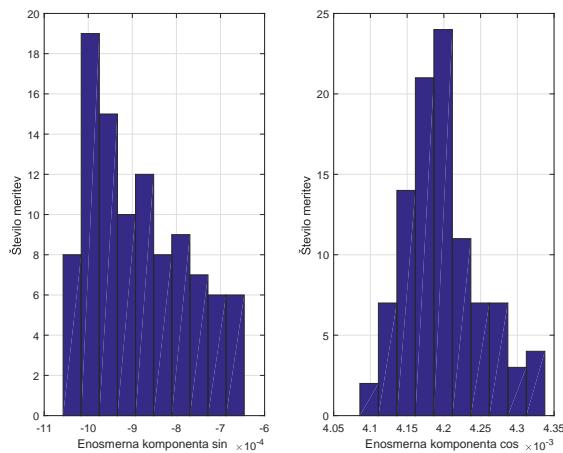
9.3.1 Meritve v izhodiščni legi

V izhodiščni legi je bilo opravljenih več meritov. Osredotočil sem se na enosmerni komponenti in amplitudi osnovnega harmonika \sin in \cos . Porazdelitev enosmerne komponente signala \sin in \cos je prikazana na sliki 9.11. Srednja vrednost enosmerne komponente \sin je $-8,85 \cdot 10^{-4}$, standardna deviacija je



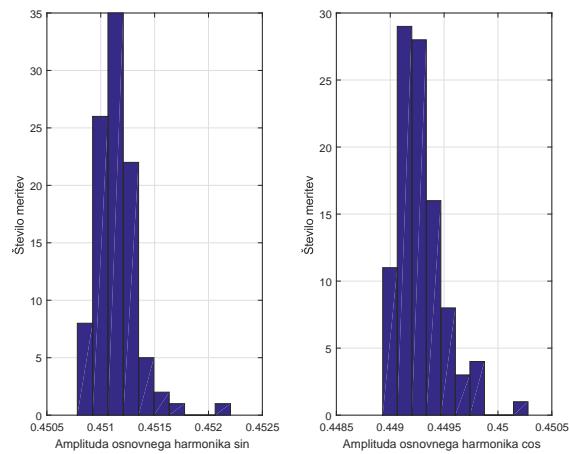
Slika 9.10: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri meritvah v izhodiščni legi

$1,08 \cdot 10^{-4}$. Srednja vrednost enosmerne komponente \cos je $4,20 \cdot 10^{-3}$, standardna deviacija je $5,20 \cdot 10^{-5}$. Porazdelitev amplitude osnovnega harmonika



Slika 9.11: Porazdelitev meritev enosmerne komponente signalov \sin in \cos

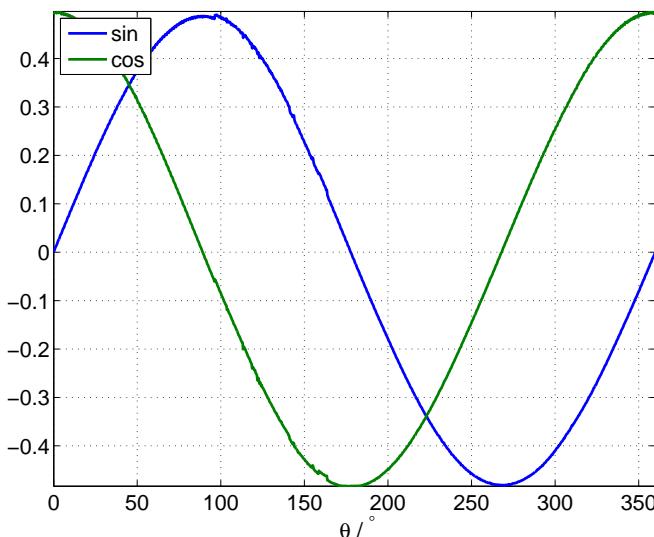
signala \sin in \cos je prikazana na sliki 9.11. Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika \sin je $0,451$, standardna deviacija je $2,20 \cdot 10^{-4}$. Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika \cos je $0,449$, standardna deviacija je $1,95 \cdot 10^{-4}$.



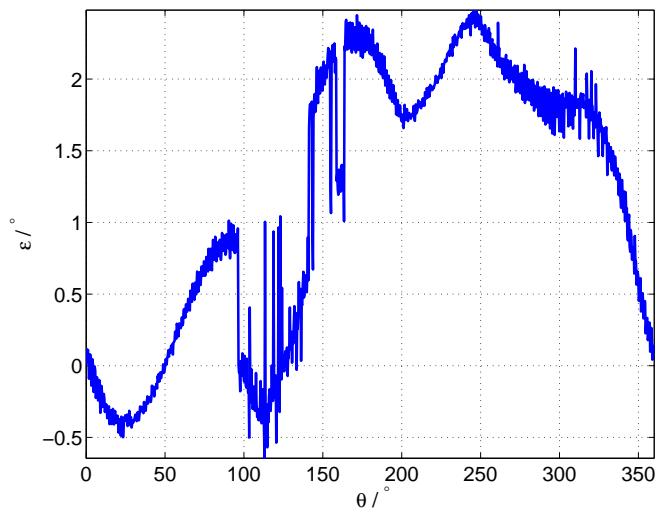
Slika 9.12: Porazdelitev meritev amplitude osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos*

9.4 Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi

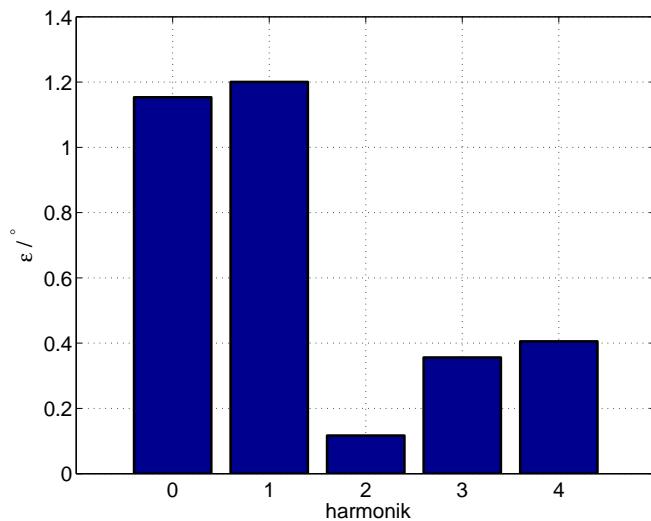
Pri meritvi je pričakovati spremembo amplitud in faznih zamikov signalov \sin in \cos . Na sliki 9.13 sta prikazana \sin in \cos pomerjena pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x. Na signalih, med 95 in 175° se pojavijo nenavadni skoki. Izrazijo se tudi na napaki, ki je prikazana na sliki 9.14. Med 95 in 175° se signala \sin in \cos hkrati fazno zamakneta. Vzrok tega pojava nisem raziskoval. Napaka razvita v Fourierovo vrsto prikaže pričakovano povišanje drugega harmonika. Povišala sta se tudi amplitudi tretjega in četrtega harmonika.



Slika 9.13: Signala \sin in \cos merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 9.14: Napaka ε merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

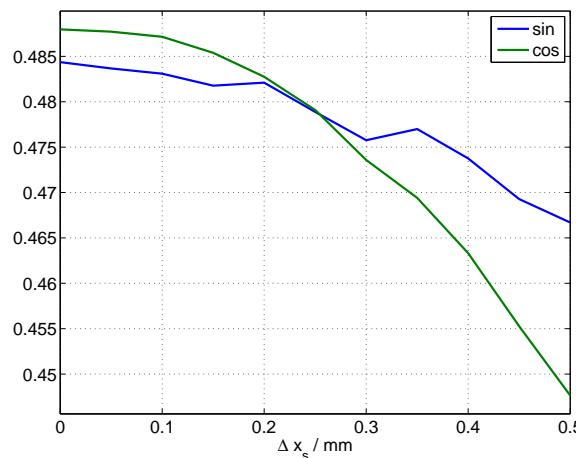


Slika 9.15: Amplitudo harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

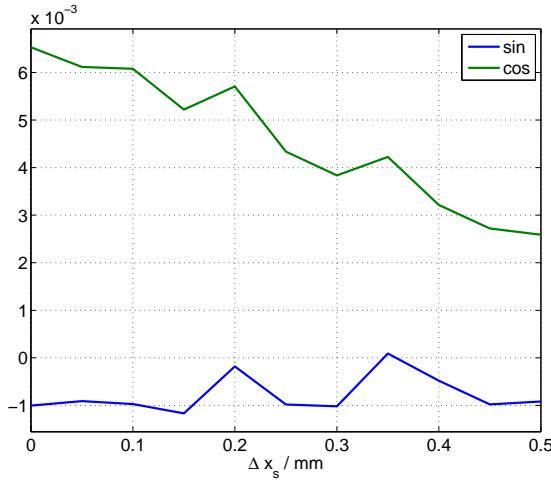
9.4.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δx_s

Iz simulacij se pričakuje zmanjševanje amplitude osnovnega harmonika \cos signala- Sprememba amplitud osnovnih harmonikov je prikazana na sliki 9.16.

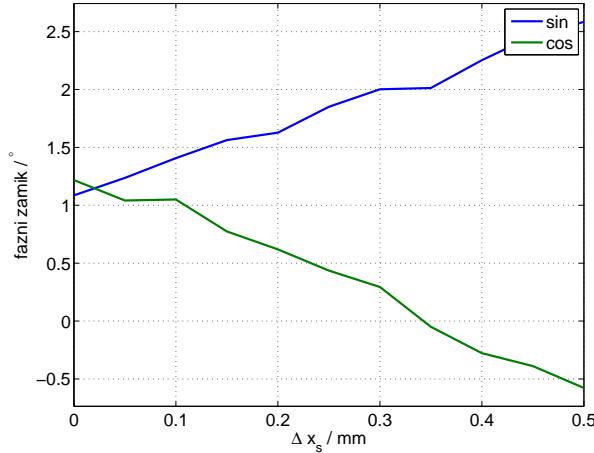
Amplituda signala \cos pada pričakovano, pada tudi amplituda signala \sin . Signala nimata enake amplitude v izhodišču, kar je posledica neidealne izhodiščne lege. Potek enosmerne komponente je prikazan na sliki 9.17. Komponenta \cos signala pada kot je bilo predvideno v simulacijah. Fazni zamik signalov je prikazan na sliki 9.18. Pričakovano po simulacijah se fazna razlika med signaloma zmanjšuje. Rezultati simulacij so prikazovali konstanten fazni kot signala \cos in spremenjanje le faznega kota \sin . Pri meritvah se je fazni kot \cos zmanjševal, fazni kot \sin naraščal. Razlika med njima je manjša, kot je bila posimulirana. Vsota faznih zamikov ostaja konstantna, zato se enosmerna komponenta v napaki ne spreminja. Poteki posameznih komponent signalov \sin in \cos so aproksimirani s kubičnimi polinomi.



Slika 9.16: Potek amplitude osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 9.17: Potek enosmerne komponente \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 9.18: Fazni zamik osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala \sin in \cos

$$A_{\sin} = -6,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 1,71 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 1,17 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 0,484 \quad (9.1)$$

$$Off_{\sin} = -0,0388 \Delta x_s^3 + 0,0237 \Delta x_s^2 - 2,25 \cdot 10^{-3} \Delta x_s - 9,53 \cdot 10^{-4} \quad (9.2)$$

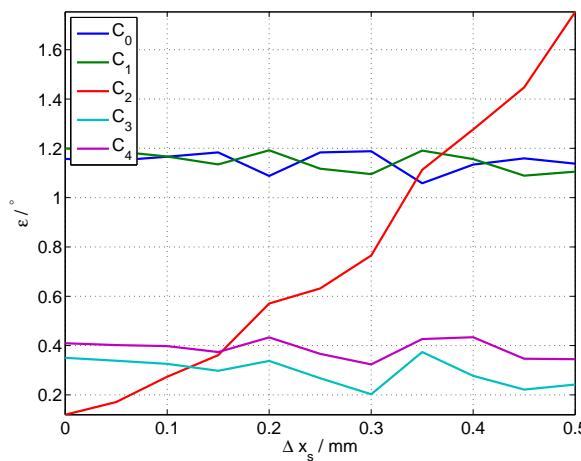
$$\delta_{\sin} = 5,32 \Delta x_s^3 - 3,55 \Delta x_s^2 + 3,49 \Delta x_s + 1,08 \quad (9.3)$$

$$A_{\cos} = 7,46 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^3 - 0,185 \Delta x_s^2 + 1,01 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 0,488 \quad (9.4)$$

$$Off_{\cos} = 0,0221 \Delta x_s^3 - 0,191 \Delta x_s^2 - 3,91 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 6,48 \cdot 10^{-3} \quad (9.5)$$

$$\delta_{\cos} = 11,5 \Delta x_s^3 - 10,6 \Delta x_s^2 - 1,14 \Delta x_s + 1,19 \quad (9.6)$$

Slika 9.19 prikazuje poteke amplitud posameznih harmonik napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x. Kvadratično narašča amplituda drugega harmonika, medtem ko so enosmerna komponenta in ostali harmoniki konstantni. Poteke se aproksimira s kubičnimi polinomi.



Slika 9.19: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x

$$C_0 = 2,42\Delta x_s^3 - 1,71\Delta x_s^2 + 2,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,15 \quad (9.7)$$

$$C_1 = -3,01\Delta x_s^3 + 2,35\Delta x_s^2 - 6,35 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,21 \quad (9.8)$$

$$C_2 = -1,11\Delta x_s^3 + 5,06\Delta x_s^2 + 9,95 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,18 \cdot 10^{-1} \quad (9.9)$$

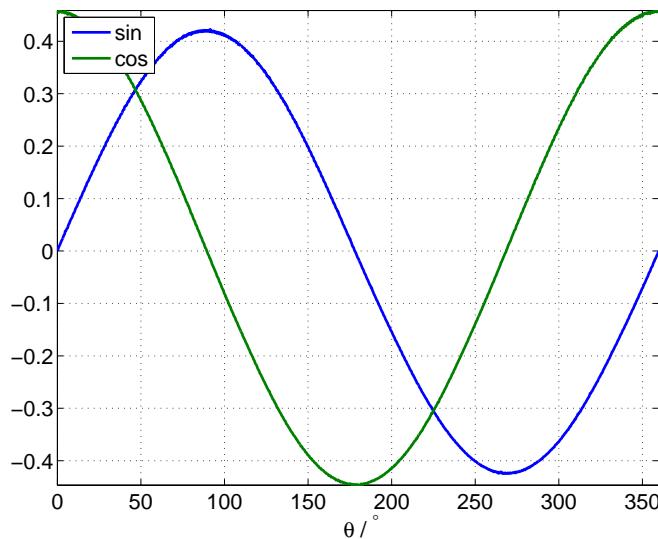
$$C_3 = -2,10\Delta x_s^3 + 1,61\Delta x_s^2 - 5,25 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 3,57 \cdot 10^{-1} \quad (9.10)$$

$$C_4 = -3,24\Delta x_s^3 + 2,29\Delta x_s^2 - 4,73 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 4,17 \cdot 10^{-1} \quad (9.11)$$

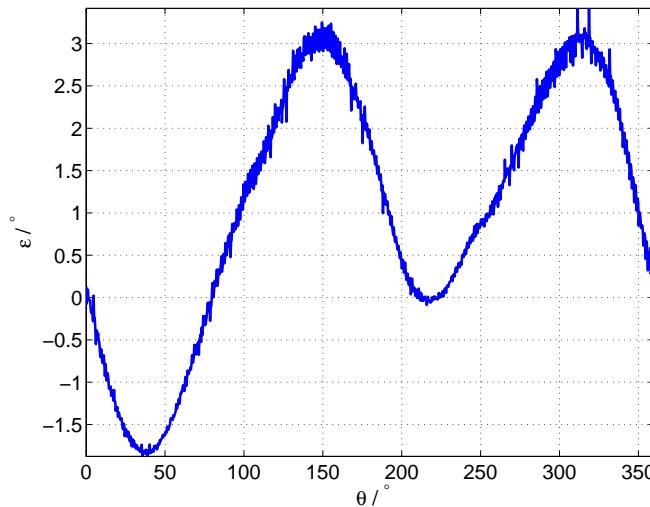
9.5 Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi

Slika 9.20 prikazuje zajeta signala \sin in \cos pri statični ekscentričnosti v smeri y. Amplituda \sin se je zmanjšala, kot je bilo pričakovati po rezultatih simulacij. Posledično se izrazi v napaki višji drugi harmonik (slika 9.21). Z razvojem napake v

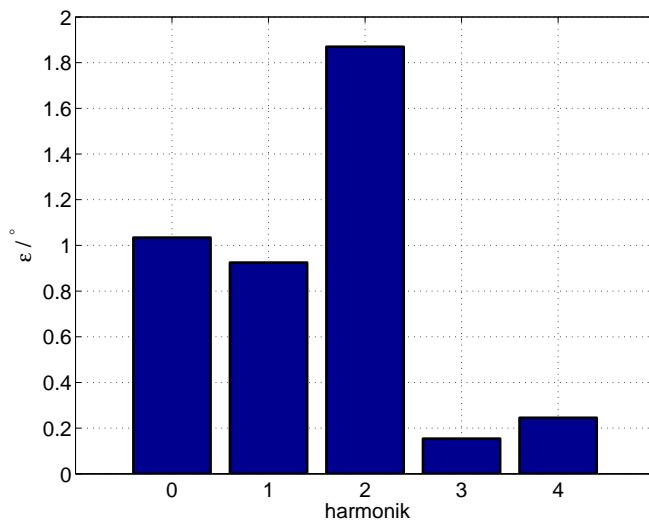
Fourierovo vrsto se potrdi povišanje drugega harmonika. Enosmerna komponenta in prvi harmonik sta nekoliko nižja.



Slika 9.20: Signala \sin in \cos merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



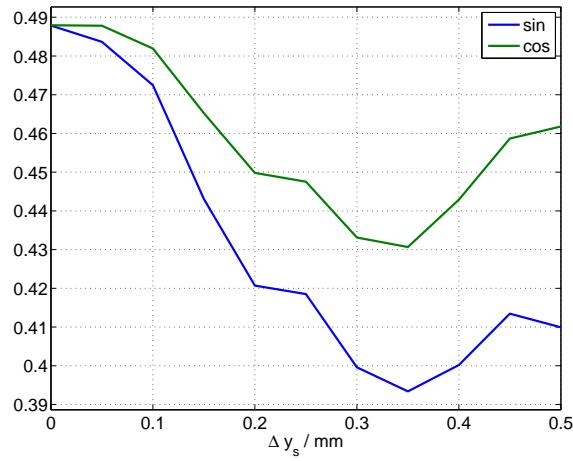
Slika 9.21: Napaka ε merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



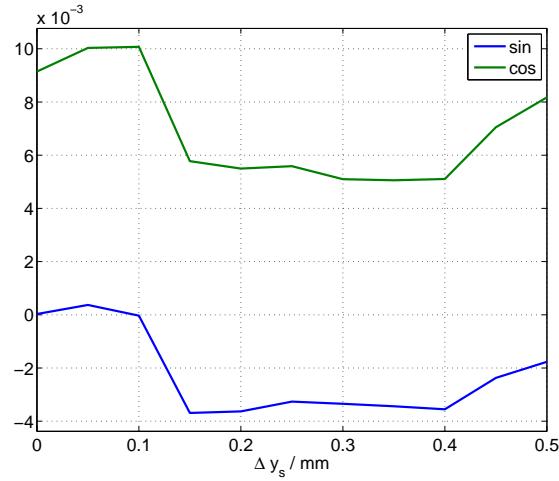
Slika 9.22: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

9.5.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δy_s

Slika 9.23 prikazuje potek amplitud osnovnega hamonika napake v odvisnosti statične ekscentričnosti v smeri y. S potekom se opazi padanje amplitud. Razlika med signaloma linearno narašča. Slika 9.24 prikazuje potek enosmernih komponent. Pri meritvi 0,15 mm se pojavi skok enosmernih komponent, vendar razlika ostaja enaka. Fazni kot se v pri manjših odmikih ne spreminja kot je bilo pričakovati po rezultatih simulacij. Pri večjih odmikih se sprememba faznih kotov izrazi kot se je pričakovalo. Fazna razlika se začne ob večjih izmikih manjšati.



Slika 9.23: Potek amplitude osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 9.24: Potek enosmerne komponente \sin in \cos pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y

$$A_{\sin} = 1,73\Delta y_s^3 - 6,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 2,60 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 4,94 \cdot 10^{9,1} \\ Off_{\sin} = +0,0469\Delta y_s^3 + 0,0132 \quad (9.1)$$

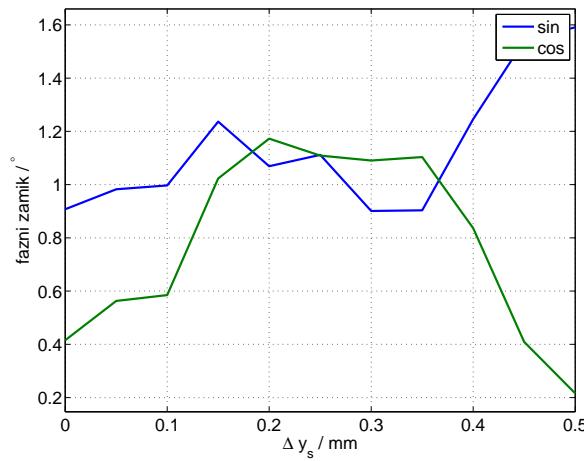
$$Deltay_s^2 - 0,0229\Delta y_s + 7,08 \cdot 10^{-4} \quad (9.1)$$

$$\delta_{\sin} = +3,37 \cdot 10\Delta y_s^3 - 2,12 \cdot 10^1\Delta y_s^2 + 3,81\Delta y_s^1 + 8,82 \cdot 10^{9,1} \quad (9.1)$$

$$A_{\cos} = +1,99\Delta y_s^3 - 9,29 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 7,82 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 4,91 \cdot 10^{9,1} \quad (9.1)$$

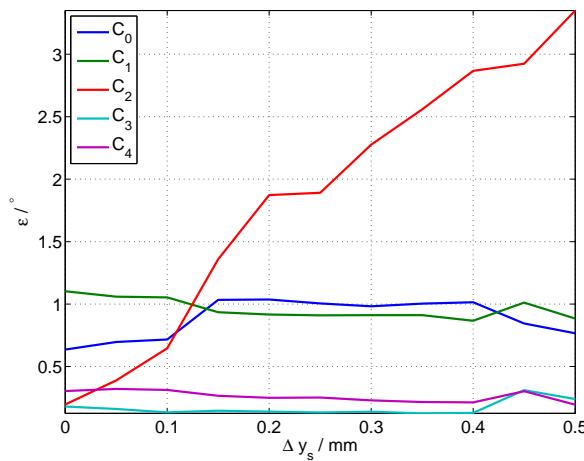
$$Off_{\cos} = 0,187\Delta y_s^3 - 0,0792\Delta y_s^2 - 9,87 \cdot 10^{-3}\Delta y_s + 9,94 \cdot 10^{9,1} \quad (9.1)$$

$$\delta_{\cos} = -1,76 \cdot 10\Delta y_s^3 - 9,77 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 + 4,42\Delta y_s + 3,59 \cdot 10^{9,1} \quad (9.1)$$



Slika 9.25: Fazni zamik osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y glede na izhodiščno lego

Slika 9.26 prikazuje poteke amplitude posameznih harmonikov napake. Kot je bilo pričakovano se spreminja le amplituda drugega harmonika.



Slika 9.26: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y

$$C_0 = -3,26\Delta y_s^3 - 3,10\Delta y_s^2 + 2,68\Delta y_s + 6,00 \cdot 10^{-1} \quad (9.19)$$

$$C_1 = -2,38\Delta y_s^3 + 3,50\Delta y_s^2 - 1,54\Delta y_s + 1,12 \quad (9.20)$$

$$C_2 = -4,15\Delta y_s^3 - 1,64\Delta y_s^2 + 8,22\Delta y_s + 8,04 \cdot 10^{-2} \quad (9.21)$$

$$C_3 = 2,30\Delta y_s^3 - 1,37 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 3,13 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 1,78 \cdot 10^{-1} \quad (9.22)$$

$$C_4 = 7,11 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 - 7,96 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 - 3,14 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 3,21 \cdot 10^{-1} \quad (9.23)$$

9.6 Meritve dinamične ekscentričnosti v smeri x-osi

Meritve dinamične ekscentričnosti so bile lahko pomerjene le v eni koordinatni osi. Os po kateri se na napravi spreminja ekscentričnost magneta je zasukana za $32,4^\circ$ na abciso. Meritev zato ni bilo možno opraviti neposredno v eni koordinatni osi. Enačbe spodaj aproksimirajo poteke amplitude osnovnega harmonika, faze osnovnega harmonika in enosmerne komponente \sin in \cos , ter poteke amplitud posameznega harmonika napake pri dinamični ekscentričnosti v smeri x in zarotiranem magnetu za $32,4^\circ$ pri simulacijah z realnim magnetnim poljem. V enačbah je ekscentričnost označena z Δx_d , z zavedanjem, da je mišljen potek z zasukanim magnetom.

$$A_{\sin} = 1,03\Delta x_d^3 - 5,83 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 3,77 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 3,99 \cdot 10 \quad (9.24)$$

$$Off_{\sin} = 4,24 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^3 + 6,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 - 7,57\Delta x_d + 1,29 \cdot 10^{-1} \quad (9.25)$$

$$\delta_{\sin} = -4,59\Delta x_d^3 + 7,50 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 4,12 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,38 \cdot 10^{-1} \quad (9.26)$$

$$A_{\cos} = 1,03\Delta x_d^3 - 5,83 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 3,77 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 3,99 \cdot 10 \quad (9.27)$$

$$Off_{\cos} = 4,24 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^3 + 6,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 - 7,57\Delta x_d + 1,29 \cdot 10^{-1} \quad (9.28)$$

$$\delta_{\cos} = -4,59\Delta x_d^3 + 7,50 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 4,12 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,38 \cdot 10^{-1} \quad (9.29)$$

$$C_0 = -4,95\Delta x_d^3 + 6,52\Delta x_d^2 - 4,16 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,37 \cdot 10^{-1} \quad (9.30)$$

$$C_1 = -2,62\Delta x_d^3 + 2,78\Delta x_d^2 + 2,11 \cdot 10\Delta x_d - 2,89 \cdot 10^{-2} \quad (9.31)$$

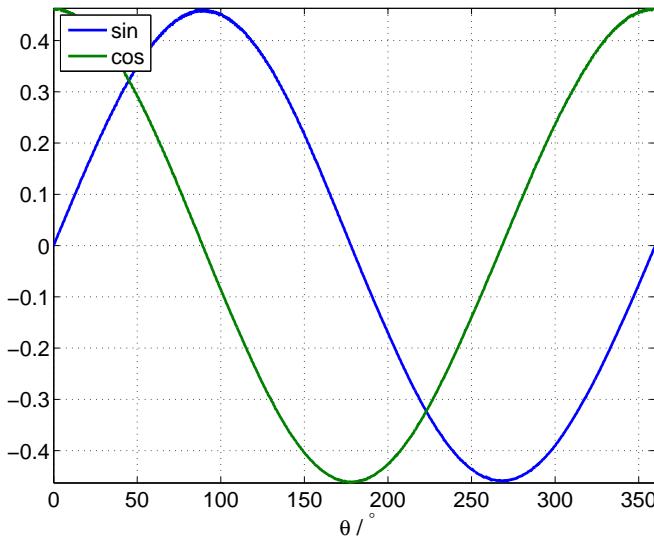
$$C_2 = 4,68 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^3 + 5,21 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 - 2,03 \cdot 10^{-2}\Delta x_d + 2,54 \cdot 10^{-3} \quad (9.32)$$

$$C_3 = -4,90 \cdot 10^{-2}\Delta x_d^3 + 8,11 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 + 7,89\Delta x_d + 1,25 \cdot 10^{-1} \quad (9.33)$$

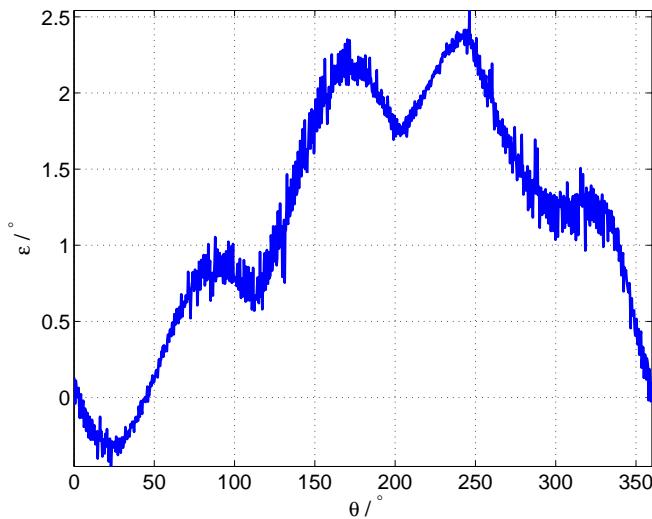
$$C_4 = 1,04 \cdot 10\Delta x_d^3 - 2,55\Delta x_d^2 - 2,82 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 2,96 \cdot 10^{-1} \quad (9.34)$$

Poteki so podobni simulacijam brez zasukanega magneta, amplitude napake so nižje.

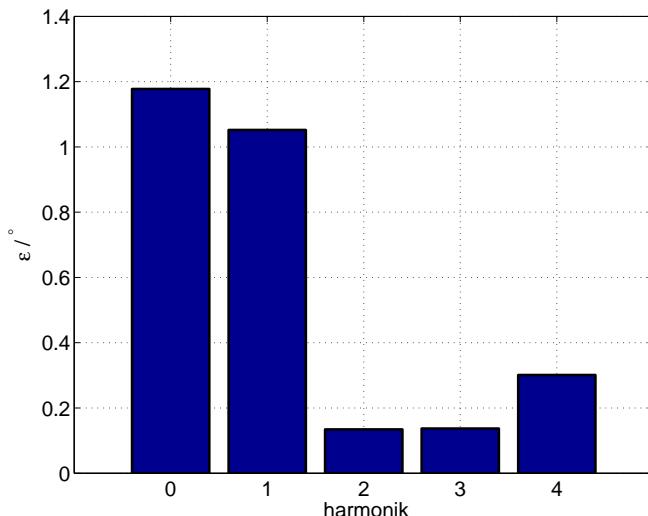
Pri dinamični ekscentričnosti v povzročeni smeri se signala *sin* in *cos* nista opazno spremenila (slika 9.27). Sprememb ni niti na napaki (slika 9.28). Spremembe niso opazne niti na napaki razviti v Fourierovo vrsto (slika 9.29).



Slika 9.27: Signala *sin* in *cos* merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 9.28: Napaka ε merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

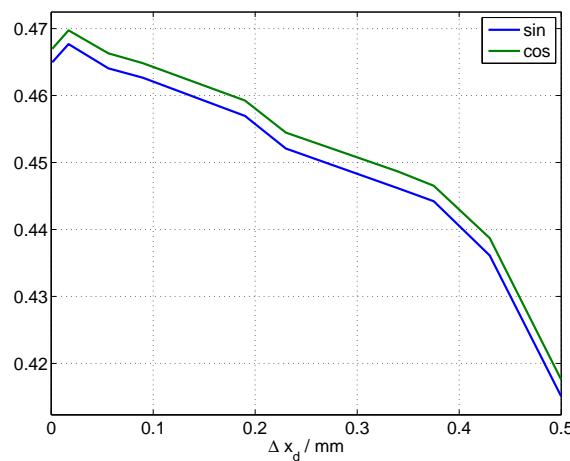


Slika 9.29: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

9.6.1 Sprememba \sin , \cos ter napake od Δx_d

Potek spremenjanja amplitude osnovnega harmonika \sin in \cos glede na dinamično ekscentričnost pričakovano pada (Slika 9.30). Razlika med amplitudama

ostaja tekom spreminjanja dinamične ekscentričnosti enaka. Enosmerni komponenti \sin in \cos padati, vendar vsaka s svojim gradientom. Sprememba enosmerne komponente je manjša, kot je bila predvidena v simulacijah. Sprememba faznega zamika osnovnega harmonika \sin in \cos je prikazana na sliki 9.32. Fazna zamika s spremebo dinamične ekscentričnosti naraščata. V simulacijah tako velika spremembra enosmerne komponente ni bila pričakovana.



Slika 9.30: Potek amplitude osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x

Poteke prikazane na slikah 9.30 9.31 in 9.32, se lahko aproksimira s kubičnimi polinomi.

$$A_{\sin} = -0,795\Delta x_d^3 + 0,405\Delta x_d^2 - 0,106\Delta x_d + 0,468 \quad (9.35)$$

$$Off_{\sin} = (-3,42\Delta x_d^3 + 7,48\Delta x_d^2 - 5,61\Delta x_d - 2,53) \cdot 10^{-3} \quad (9.36)$$

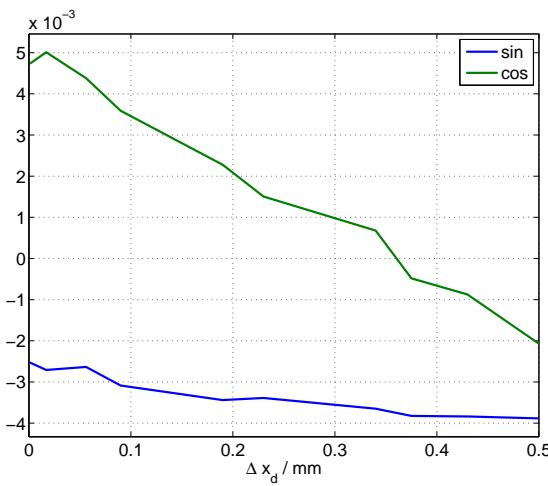
$$\delta_{\sin} = 17,6\Delta x_d^3 - 2,62\Delta x_d^2 + 1,18\Delta x_d + 8,78 \cdot 10^{-1} \quad (9.37)$$

$$A_{\cos} = -0,790\Delta x_d^3 + 0,400\Delta x_d^2 - 0,104\Delta x_d + 0,470 \quad (9.38)$$

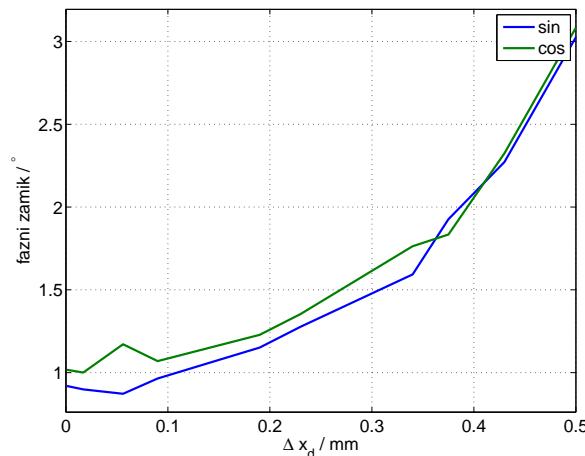
$$Off_{\cos} = (-1,5,8\Delta x_d^3 + 1,22\Delta x_d^2 - 1,63\Delta x_d + 0,505) \cdot 10^{-3} \quad (9.39)$$

$$\delta_{\cos} = 25,8\Delta x_d^3 - 8,64\Delta x_d^2 + 2,01\Delta x_d + 1,00 \quad (9.40)$$

Iz potekov \sin in \cos signala je bila najbolj opazna spremembra faznega zamika

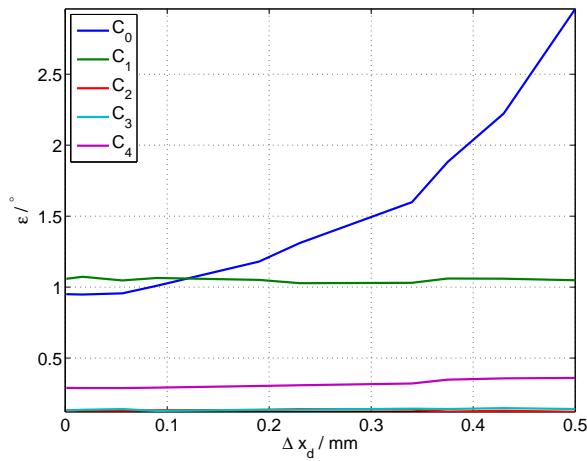


Slika 9.31: Potek enosmerne komponente \sin in \cos pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 9.32: Fazni zamik osnovnega harmonika \sin in \cos pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na izhodiščno lego

obeh signalov. To se izrazi tudi v napaki izhodnega kota, ki pridobi enosmerno komponento. Ostali harmoniki napake so konstantni.



Slika 9.33: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x

$$C_0 = 2,03 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 5,17 \Delta x_d^2 + 1,57 \Delta x_d + 9,20 \cdot 10^{-1} \quad (9.41)$$

$$C_1 = -4,97 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 6,69 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 2,36 \cdot 10^{-1} \Delta x_d + 1,07 \quad (9.42)$$

$$C_2 = 3,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^3 - 0,188 \Delta x_d^2 + 7,10 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 0,129 \quad (9.43)$$

$$C_3 = -0,591 \Delta x_d^3 + 0,451 \Delta x_d^2 - 6,48 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 0,135 \quad (9.44)$$

$$C_4 = -0,991 \Delta x_d^3 + 0,961 \Delta x_d^2 - 8,81 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 0,291 \quad (9.45)$$

10 Sklep

10.1 Merjenje kota in vpliv na napako

Aplikacije, ki za delovanje potrebujejo informacijo o zasuku, kot lahko merijo na različne načine. Senzor RM44 za merjenje kota uporablja Hallove sonde. Senzor je robuste in zato primeren tudi za aplikacije v bolj obremenjenih okoljih. Izhod senzorja kljub robustnosti lahko vsebuje napako. Napaka je lahko posledica nepravilne montaže. S poznavanjem vplivov na napako senzorja zaradi nepravilne montaže, se napako lahko predvidi in odstrani.

10.2 Nepravilna montaža

Merilni sistem za merjenje kota je sestavljen iz dveh delov, magnetnega aktuatorja in senzorja za merjenje magnetnega polja. Nepravilno je lahko montiran aktuator ali senzor. Nepravilno montiran aktuator se izrazi kot dinamična ekscentričnost. Hallova sonda v senzorju pomeri dodatno enosmerno komponento magnetnega polja. Nepravilno montriran senzor, se izrazi kot statična ekscentričnost. Hallova sonda v senzorju zajame magnetno polje s spremenjeno amplitudo in s spremenjenim faznim zamikom.

10.3 Oblika napake

Zaradi nepravilnega zajema magnetnega polja, podatek o kotu vsebuje napako. Napaka zaradi dinamične ekscentričnosti se izrazi kot sinusni signal. Napaka zaradi statične ekscentričnosti se izrazi z sinusnim signalom dvojne frekvence in dodano enosmerno komponento.

10.4 Izvedba meritov

Delovnje senzorja nam je nepoznano (black-box). Senzor vrne izmerjena signala \sin in \cos iz katerih se s funkcijo $\text{atan}2$ izračuna kot. Na napravi izdelani v LRTME na fakulteti, so bile opravljene meritve. Meritve statične ekscentričnosti so simulacije potrdile. Pri meritvah dinamične ekscentričnosti je v napaki naraščala le enosmerna komponenta. Senzor bi se dalo postaviti tudi v boljšo lego. To bi bilo mogoče z uporabo Evaluation boarda RMK2. RMK2 vsebuje enka čip AM256, uporabniku so navoljo vsi pini čipa. Čip ima analogni signal Error, s katerim se lahko preveri poravnava med magnetom in čipom.

10.5 Komentar rezultatov

Zgradba in podrobnejše delovanje senzorja je poslovna skrinost, zato sem predvideval, da bo napaka pri meritvah manjša kot so pokazali rezultati simulacij. Simulacijski model je bil sestavljen iz dveh Hallovih sond, neposredno iz zajetega polja je bil izračunan kot. Podobni senzorji [17], omogočajo popravljanje enosmernih komponent in razmerija amplitud osnovega harmonika signalov \sin in \cos . S kalibracijo senzorja bi bila napaka manjša.

Pri projektu sem se osredotočil le na parametre enosmerne komponente, amplitudo in fazo osnovnega harmonika \sin in \cos . Signala v realnosti vsebujeta tudi višje harmonike, kateri tu niso bili obravnavani.

Literatura

- [1] RLS Merilna tehnika d.o.o., “Am256 – angular magnetic encoder ic.” Dosegljivo: https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FAM256D01_13_bookmark.pdf.
- [2] J. Gachter, M. Hirz in R. Seebacher, “Impact of rotor position sensor errors on speed controlled permanent magnetized synchronous machines,” v *IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, str. pp.822–830, Dec. 2017.
- [3] B. Killer, “Diplomsko delo absolutni magnetni dajalnik z uporabo principa nonij,” Master’s thesis, Univerza v Ljubljani.
- [4] Z. Zhang, F. Ni, H. Liu in M. Jin, “Theory analysis of a new absolute position sensor based on electromagnetism,” v *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence*.
- [5] M. Demierre, *Improvements of CMOS Hall Microsystems and Application for Absolute Angular Position Measurements*. PhD thesis, Federal Polytechnic School of Lausanne, Switzerland.
- [6] RLS Merilna tehnika d.o.o., “Rm44 magnetic encoder base unit.” Dosegljivo: https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FRM44D01_10.pdf.
- [7] V. Ambrožič in P. Zajec, *Električni servo pogoni*. Slovensko Združenje elektroenergetikov CIGRÉ-CIRED.

- [8] iC Haus, “High-precision sine/cosine interpolation / white paper.” Dosegljivo: http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP7en_High-Precision_Interpolation_140124.pdf.
- [9] MathWorks. Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2d.html>.
- [10] J. Lara, “Position error compensation in quadrature analog magnetic encoders through an iterative optimization algorithm,” v *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- [11] Q. Lin, T. Li in Z. Zhou, “Error analysis and compensation of the orthogonal magnetic encoder,” v *IEEE ICMCC Conference*.
- [12] D. Hanselman, “Resolver signal requirements for high accuracy resolver-to-digital conversion,” 37.
- [13] L. Uršič, “Seminar: Analitičen pogled na statično in dinamično ekscentričnost vr resolverja.” ????
- [14] G. Dolinar, *Matematika 1*. Založba FE in FRI.
- [15] MathWorks. Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2d.html>.
- [16] MathWorks. Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/products/curvefitting.html>.
- [17] iCHaus, “14-bit absolute angle hall encoder.” Dosegljivo: http://www.ichaus.de/upload/pdf/MHM_datasheet_D2en.pdf.