

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

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Senzor RM44</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Izpeljava gibanja sonde relativno na magnet ob nepravilni montaži</b>	<b>11</b>
3.1	Definicija koordinatnih sistemov . . . . .	11
3.2	Izpeljava gibanja položaja Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti . . . . .	12
3.3	Izpeljava gibanja lokacije Hall-ove sonde na magnet pri statični ekscentričnosti . . . . .	14
3.4	Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Izpeljava poteka polja <math>B_z(\theta)</math> in ocena napake zaradi ekscentričnosti</b>	<b>17</b>
4.1	Definicija gostote magnetnega polja $B_z$ . . . . .	17
4.2	Postavitev Hallovih sond in pomerjeno polje v odvisnosti od ekscentričnosti . . . . .	18
4.2.1	Sprememba magnetnega polja zaradi ekscentričnosti . . . . .	19
4.3	Premik senzorja v z smeri . . . . .	20

<b>5 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov</b>	<b>21</b>
5.1 Različne amplitude . . . . .	21
5.2 Različne enosmerne komponente . . . . .	23
5.2.1 Enosmerna komponenta le v signalu $\sin$ . . . . .	24
5.2.2 Enosmerna komponenta signala $\cos$ . . . . .	26
5.2.3 Enosmerna komponenta pri obeh signalih . . . . .	27
5.3 Neorotogonalnost signalov . . . . .	28
5.4 Potek napake pri statični ekscentričnosti v smeri x . . . . .	31
5.5 Potek napake pri statični ekscentričnosti v smeri y . . . . .	31
5.6 Potek napake pri dinamični ekscentričnosti v smeri x . . . . .	32
<b>6 Linearni model</b>	<b>33</b>
6.1 Brez ekscentričnosti . . . . .	33
6.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi . . . . .	33
6.2.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake v odvisnosti od $\Delta x_s$ . . . . .	35
6.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi . . . . .	39
6.3.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_s$ . . . . .	41
6.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x osi . . . . .	44
6.4.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_d$ . . . . .	46
<b>7 Realni model magnetnega polja</b>	<b>49</b>
7.1 Brez napake . . . . .	50
7.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi . . . . .	51
7.2.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_s$ . . . . .	54
7.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi . . . . .	57

7.3.1	Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_s$	59
7.4	Dinamična ekscentričnost v smeri x	61
7.4.1	Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_d$	64
7.5	Dinamična ekscentričnost v smeri y	66
7.5.1	Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_d$	68
<b>8</b>	<b>Meritve</b>	<b>73</b>
8.1	Oprema in postavitev merilnega mesta	73
8.2	Zajem podatkov	77
8.3	Senzor v izhodiščni legi	79
8.3.1	Meritve v izhodišni legi	80
8.4	Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi	83
8.4.1	Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_s$	84
8.5	Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi	87
8.5.1	Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_s$	89
8.6	Meritve dinamične ekscentričnosti v smeri x-osi	92
8.6.1	Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_d$	94
<b>9</b>	<b>Sklep</b>	<b>99</b>
9.1	Merjenje kota in vpliv na napako	99
9.2	Nepravilna montaža	99
9.3	Oblika napake	100
9.4	Izvedba meritev	100
9.5	Komentar rezultatov	100



## Seznam simbolov

V zaključnem delu so uporabljeni naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
referenčni kot	$\Theta$	stopinja	$^\circ$
pomerjeni kot	$\varphi$	stopinja	$^\circ$
napaka	$\varepsilon$	stopinja	$^\circ$
z-komponenta gostote magnetnega pretoka	$B_z$	militesla	mT
statična ekscentričnost v x	$\Delta x_s$	milimetri	mm
statična ekscentričnost v y	$\Delta y_s$	milimetri	mm
dinamična ekscentričnost v x	$\Delta x_d$	milimetri	mm
dinamična ekscentričnost v y	$\Delta y_d$	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. 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. **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 predvidi 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.

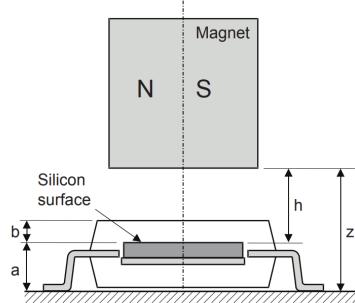
## 2 Senzor RM44

Senzor RM44 je 13 bitni enkoder, primeren za merjenje zasuka rotirajočega 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 linearno spreminjačje se napetosti med potencialoma GND in VDD v odvisnosti od kota zasuka. Izhod je lahko tudi v obliki inkrementalnih signalov A in B s katerih se lahko določi smer in relativni zasuk 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.

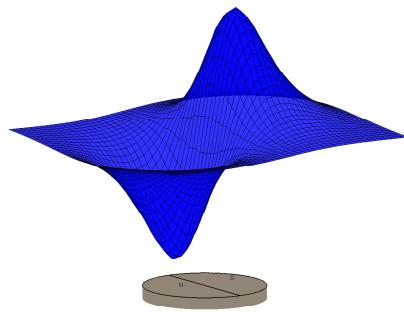


Slika 2.1: Senzor RM44

Ključni element senzorja je čip AM256. Za odčitavnaje zasuka, se mora nahajati nad radialno polariziranim cilindričnim magnetom, ki je pritrjen na os



Slika 2.2: Nahajanje radialno polariziranega magneta nad čipom AM256 [1]

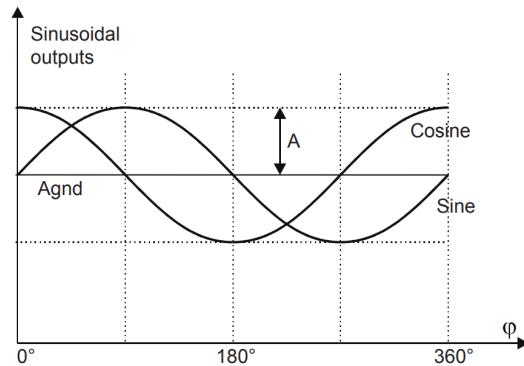


Slika 2.3: Oblika Z komponente gostote magnetnega pretoka nad magnetom

vrtenja(slika 2.2). Na siliciju čipa so razporejene Hallove sonde za meritev Z-komponento gostote magnetnega pretoka. Na sliki 2.3 je prikazana oblika Z komponente vektorja gostote magnetnega pretoka povzročene s radialno polariziranim cilindričnim magnetom. S pravilno postavitvijo Hallovih sond se ob prostorskem zajemu zajame 2 signala kosinusne oblike, ki sta za  $90^\circ$  prostorsko zamaknjena drug na drugega (slika 2.4). Prvi zajet signal, fazno prehiteva za  $90^\circ$  drugi signal in je v delu poimenovan  $B_x$ , drugi signal, 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  $\text{atan2}(B_y, B_x)$  [9].

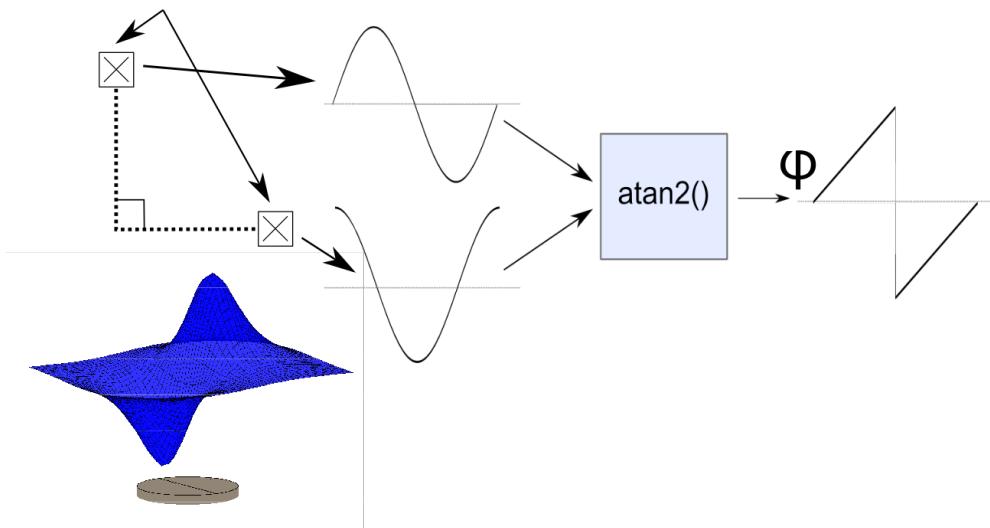
Osnovno delovanje senzorja se lahko ponazorji, z dvema Hallovima sondama. Sondi sta postavljeni na krožnico s središčem v osi vrtenja magneta in radijem



Slika 2.4: Analogna signala zajeta s Hallovimi sondami [1]

$r_0$ . Sondi sta prostorsko zamaknjeni za  $90^\circ$  (slika 2.5). S sondama se zajame signala  $B_x$  in  $B_y$ . Signala sta vhodna parametra v funkcijo atan2(), ki izračuna kot zasuka (slika 2.5).

### Hallovni sondi



Slika 2.5: Osnovni model, za izračun kot zasuka



## 3 Izpeljava gibanja sonde relativno na magnet ob nepravilni montaži

Nepravilna montaža bo vplivala na obe Hallovi sondi simulacijskega modela enako. Vpliv izmika senzorja in magneta bo zato prikazan na eni Hallovi sondi.

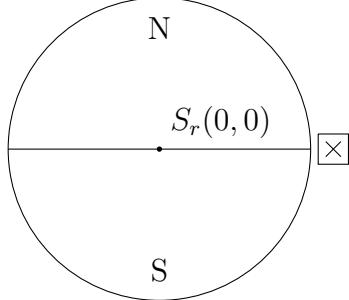
Izmik sredine senzorja iz osi vrtenja bo med spremenjanjem dejanskega kota zasuka statičen, njegova lokacija se nebo spreminja na os vrtenja. Ta izmik je poimenovan statična ekscentričnost. Ob izmiku magneta iz osi vrtenja se pojavi opletanje magneta. Lokacija središča magneta se spreminja glede na določen zasuk magneta. Opletanje magneta je poimenovano dinamična ekscentričnost.

V tem poglavju je izpeljan vpliv napačne montaže , ki se pojavit 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 poznanjem lokacije sonde nad magnetom se lahko odčita pomerjena vrednost  $B_z$ .

### 3.1 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 3.1). Za lažjo predstavo se Hall-ova sonda nahaja

na abcisno osi.



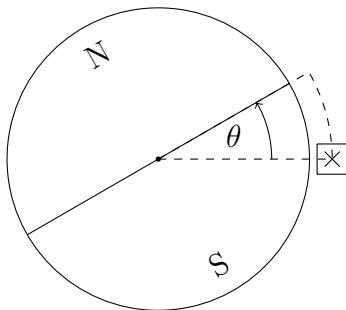
Slika 3.1: Definicija koordinatnega sistema z magnetom in Hall-ovo sondou

Z rotacijo magneta za kot  $\theta$ , se položa sonde glede na magnet spremeni. Nov položaj sonde glede na magnet je enak, če se namesto magnet, zavrti sonda za kot  $-\theta$ . Nov položaj sonde glede na magnet je (3.1).

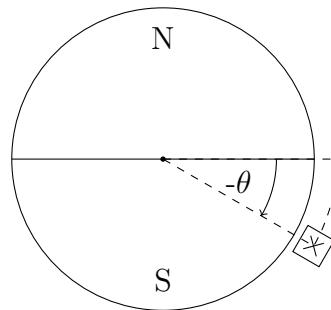
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Argument rotacijske matrike je  $-\theta$ . Z upoštevanjem lihosti funkcije sinus in sodosti funkcije kosinus[14], se (3.1) poenostavi v:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$



(a) Zasukan magnet za kot  $\theta$

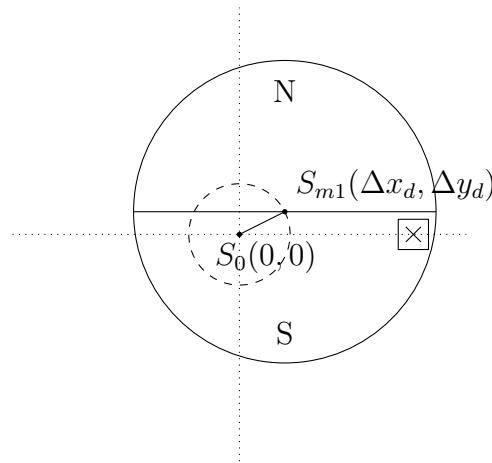


(b) Zasukan senzor za kot  $-\theta$

Slika 3.2: Sprememba položaja glede na magnet ob rotaciji

### 3.2 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 3.3). Os vrtenja je ostaja v izhodišču koordinatnega sistema. 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 3.3: Definicije dinamične ekscentričnosti

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

S (3.3) je izraženo gibanje središča 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  $-\theta$ :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \left( \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \right) \quad (3.4)$$

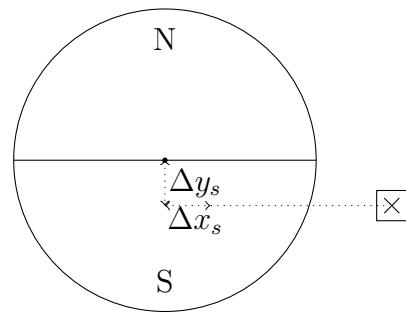
(3.4) se poenostavi:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

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 sondu okoli osi vrtenja za  $-\theta$ .

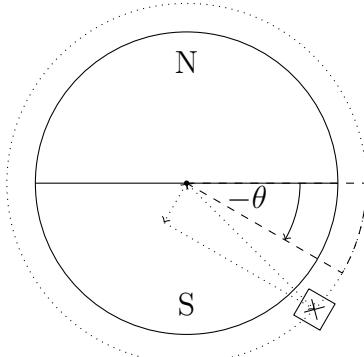
### 3.3 Izpeljava gibanja lokacije Hall-ove sonde na magnet pri statični ekscentričnosti

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  $\sqrt{(x_0 + \Delta x_s)^2 + (y_0 + \Delta y_s)^2}$  (3.6).



Slika 3.4: Shema definicije statične ekscentričnosti

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x_s \\ y_0 + \Delta y_s \end{bmatrix} \quad (3.6)$$



Slika 3.5: Potek sonde ob vrtenju glede na magnet ob statični ekscentričnosti

### 3.4 Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde

(3.5) in (3.2) sta med seboj neodvisni zato se ju lahko združi.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x_s \\ y_0 + \Delta y_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (3.7)$$



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

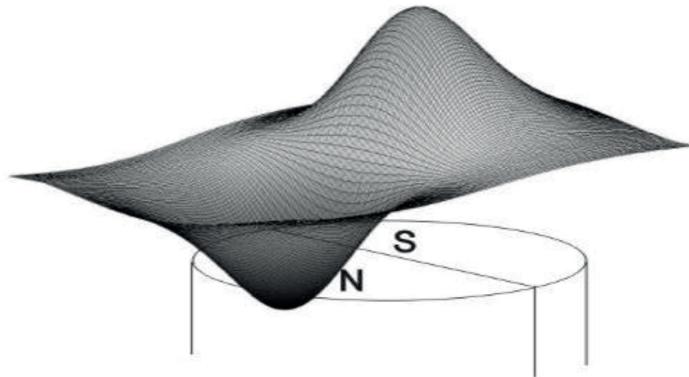
### 4.1 Definicija gostote magnetnega polja $B_z$

Predlagan magnet s strani proizvajalca senzorja je radialno magnetiziran s premerom 4 mm in višino 4 mm (slika 4.1). Dajalnik pozicije RM44 meri z-komponento



Slika 4.1: Primer magneta predlagan s strani proizvajalca RLS

gostote magnetnega polja [1]. Potek komponente  $B_z$  nad cilindričnim magnetom je prikazan na sliki 4.2.



Slika 4.2: z-komponenta vektorja gostote magnetnega polja nad cilindričnim magnetom [1]

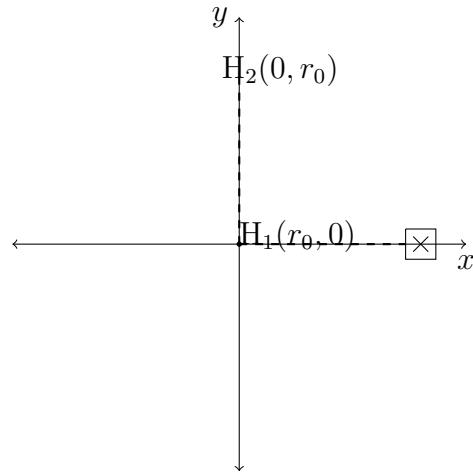
Potek z-komponente se lahko izračuna po Biot-Savartovim zakonom oz. z numerično seštevanjem prispevke posameznih delčkov magneta. Za oceno napake, se magnetno polje z komponente v okolici osi vrtenja magneta aproksimira z ravnino (??).

$$B_z(x, y) = k \cdot x. \quad (4.1)$$

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.

## 4.2 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 4.3: Začetna postavitev Hallovih sond

S poznavanjem položaja sonde glede na magnet (3.7) 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  $90^\circ$  zamaknjeno proti *cos*, zato je potek imenovan *sin*.

$$\cos = B_{H_1}(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d \quad (4.2)$$

$$\sin = B_{H_2}(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = r_0 \sin \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d \quad (4.3)$$

#### 4.2.1 Sprememba magnetnega polja zaradi ekscentričnosti

Iz izrazov (4.2) in (4.2) brez upoštevanja ekscentričnosti sta *sin* in *cos* enake amplitudo ter fazno zamaknjena za  $90^\circ$ . Z upoštevanjem statične ekscentričnosti se med *sin* in *cos* zmanjša fazni kot ter spremni amplituda (4.4) (4.5). Ob dinamični ekscentričnosti signala pridobita enosmerni komponenti (4.6) (4.7).

$$\cos(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s) = \sqrt{(r_0 + \Delta x_s)^2 + \Delta y_s^2} \cos\left(\theta - \arctan \frac{\Delta y_s}{r_0 + \Delta x_s}\right) \quad (4.4)$$

$$\sin(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s) = \sqrt{\Delta x_s^2 + (r_0 + \Delta y_s)^2} \sin(\theta + \arctan \frac{\Delta x_s}{r_0 + \Delta y_s}) \quad (4.5)$$

$$\cos(\theta, r_0, \Delta x_d, \Delta y_d) = r_0 \cos \theta - \Delta x_d \quad (4.6)$$

$$\sin(\theta, r_0, \Delta x_d, \Delta y_d) = r_0 \sin \theta - \Delta x_d \quad (4.7)$$

### 4.3 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:

$$\cos = k_z(r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d) \quad (4.8)$$

$$\sin = k_z(r_0 \sin \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d) \quad (4.9)$$

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 (??).

## 5 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.

### 5.1 Različne amplitude

Vhodna signala v atan2d(), sta:

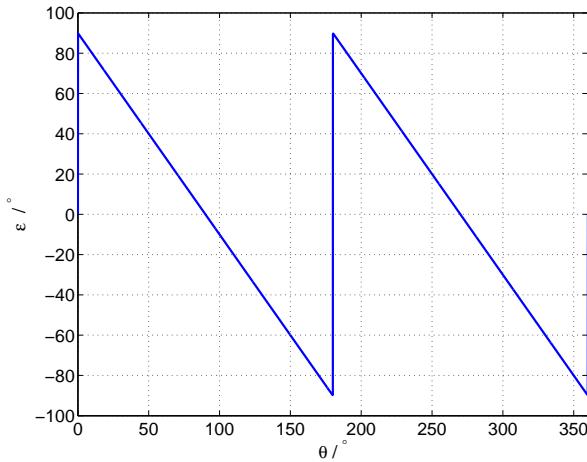
$$\text{Sin} = k \sin(\theta) \quad (5.1)$$

$$\text{Cos} = \cos(\theta) \quad (5.2)$$

limita ko gre k proti neskončnosti:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \text{atan2}(k \sin \theta, \cos \theta) \quad (5.3)$$

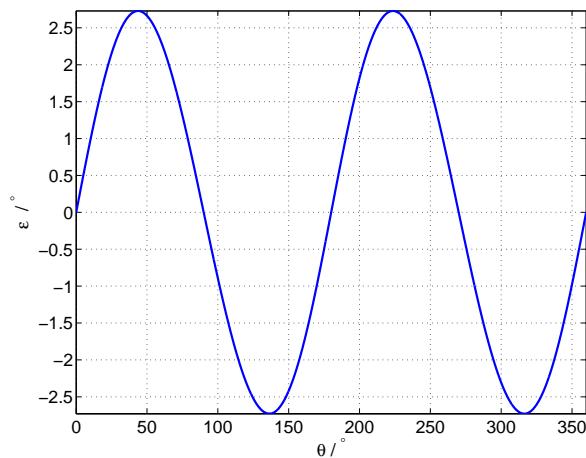
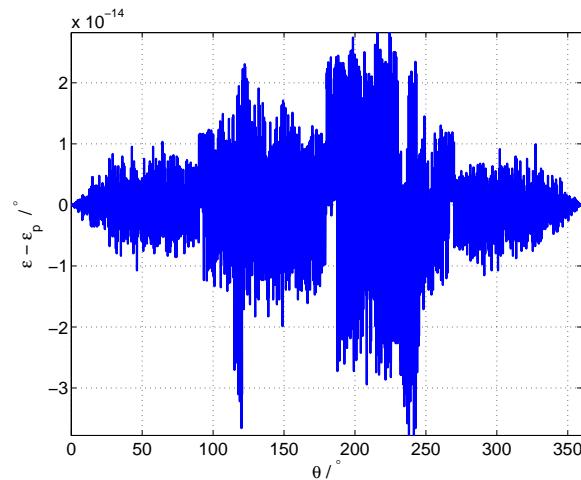
Kot  $\varepsilon$ , se bo ob limiti izrazila v obliki , ki jo lahko izrazimo z Fourierovo vrsto [14]:

Slika 5.1:  $\varepsilon$  ob limiti k v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin 2n\theta \quad (5.4)$$

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  $k$ .

$$\varepsilon_p = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{k-1}{k+1} \right)^n \sin 2n\theta \quad (5.5)$$

Slika 5.2:  $\varepsilon$  pri  $k=1.1$ Slika 5.3: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2 in izračnunano napako z vrsto (prvih 15 členov) po (5.5) pri  $k=1.1$ 

## 5.2 Različne enosmerne komponente

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

Vhodna signala v atan2d();, sta:

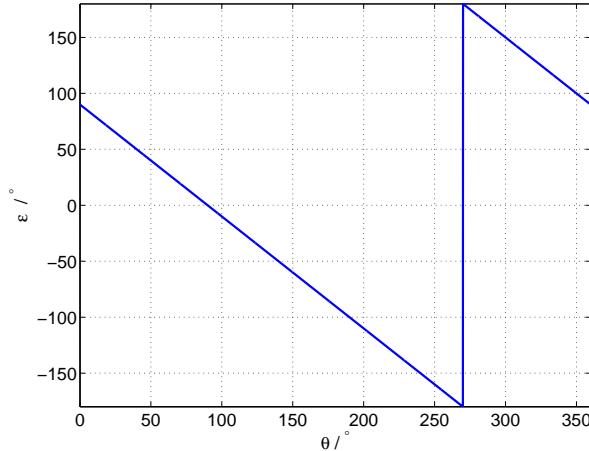
$$Sin = \sin(\theta) + B_0 \quad (5.6)$$

$$Cos = \cos(\theta) + A_0 \quad (5.7)$$

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

### 5.2.1 Enosmerna komponenta le v signalu *sin*

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

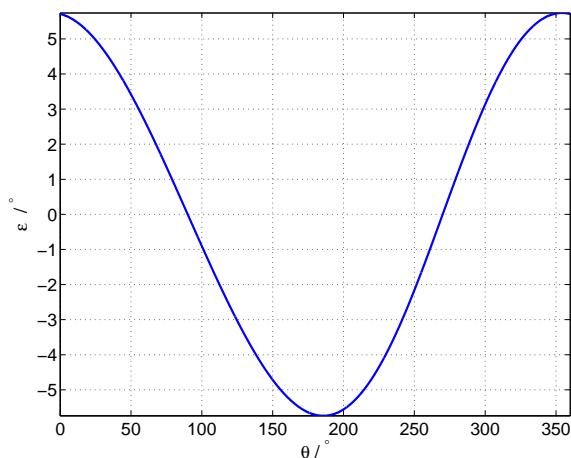
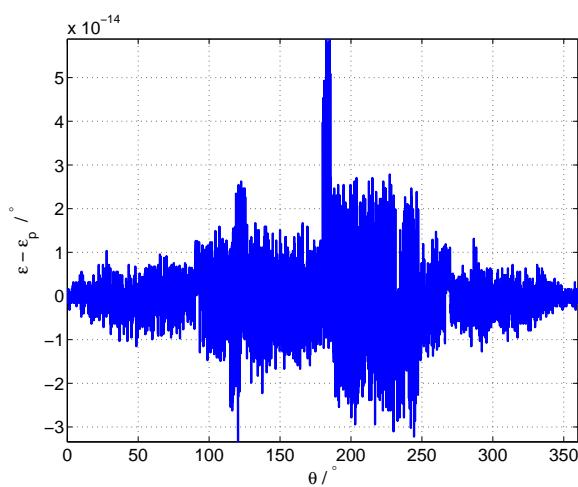


Slika 5.4:  $\varepsilon$  ob limiti  $B_0$  v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta + 90n) \quad (5.8)$$

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*.

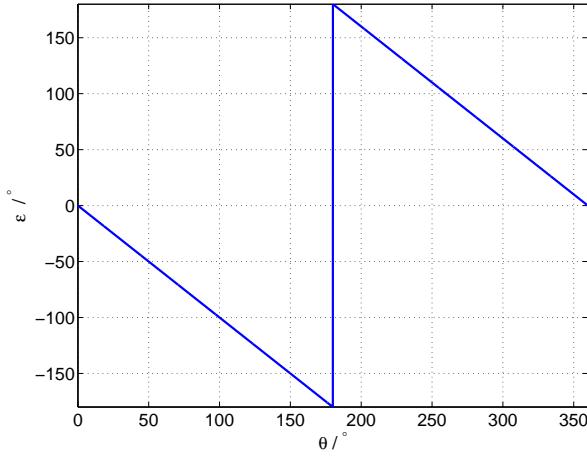
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-|B_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta - 90n), & B_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_0^n}{n} \sin(n\theta + 90n), & |B_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-B_0^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & B_0 \geq 1 \end{cases} \quad (5.9)$$

Slika 5.5:  $\varepsilon$  pri  $B_0 = 0,1$ Slika 5.6: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (5.9) pri  $B_0 = 0,1$  in  $n < 20$

### 5.2.2 Enosmerna komponenta signala $\cos$

Postopek je ponovljen tudi za enosmerno komponento v signalu  $\cos$

$$\lim_{A_0 \rightarrow \infty} \text{atan2}(\sin \theta, \cos \theta + A_0) \quad (5.10)$$



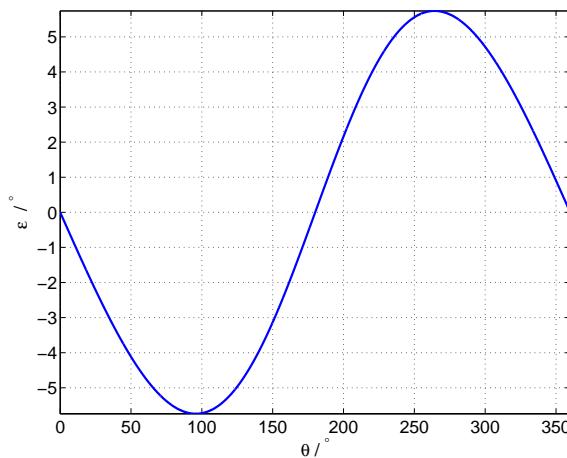
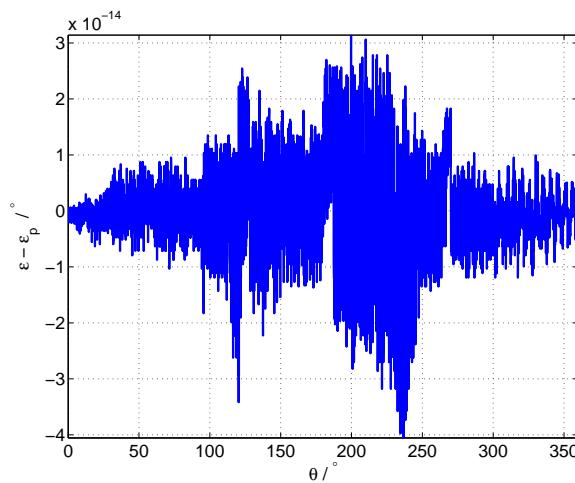
Slika 5.7:  $\varepsilon$  ob limiti  $A_0$  v neskončnost

Napaka (slika 5.7) je proti napaki na sliki 5.4 le fazno zamaknjena. To se izrazi tudi v Fourierovi vrsti.

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta + 90n) \quad (5.11)$$

Potek napake v odvisnosti od  $A_0$  je (5.12)

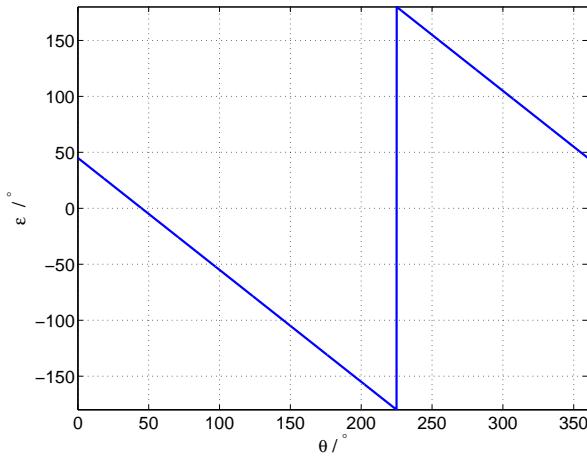
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-|A_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{A_0^n}{n} \sin(n\theta), & |A_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-A_0^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \geq 1 \end{cases} \quad (5.12)$$

Slika 5.8:  $\varepsilon$  pri  $A_0 = 0,1$ Slika 5.9: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (5.9) pri  $A_0 = 0,1$  in  $n < 20$ 

### 5.2.3 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 5.10:  $\varepsilon$  ob limiti  $c_0$  v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta - 90n) \quad (5.13)$$

Odvisnost napake ob spremjanju enosmernih komponent pri obeh signalih se je izrazilo v (5.14).

$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 - |\sqrt{2}c_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & c_0 \leq -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sqrt{2}c_0)^n}{n} \sin(n\theta - 90n), & |c_0| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 - (\sqrt{2}c_0)^{-n}}{n} \sin(n\theta - 90n), & c_0 \geq \frac{\sqrt{2}}{2} \end{cases} \quad (5.14)$$

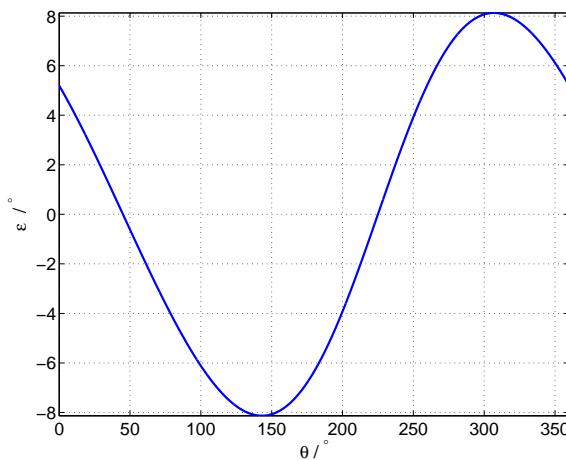
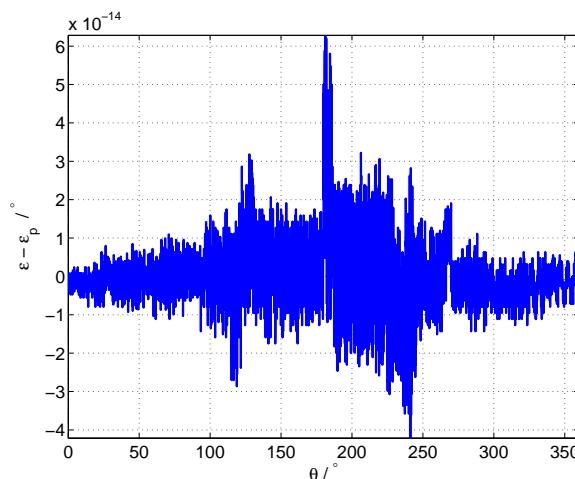
### 5.3 Neorotogonalnost signalov

Napaka se pojavi tudi, če signala  $\sin$  in  $\cos$  nista fazno zamaknjena za točno  $90^\circ$ .

Vhodna signala imata obliko:

$$\text{Sin} = \sin(\theta + \varphi_s) \quad (5.15)$$

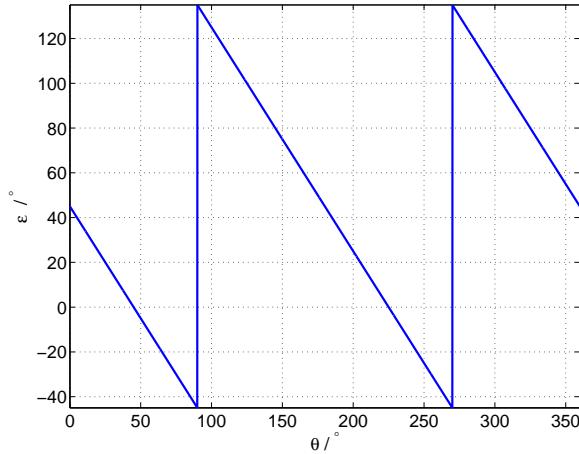
$$\text{Cos} = \cos(\theta + \varphi_c) \quad (5.16)$$

Slika 5.11:  $\varepsilon$  pri  $C_0 = 0,1$ Slika 5.12: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (5.14) 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  $\pm 90^\circ$ :

$$\varepsilon = \lim_{\varphi_s \rightarrow 90^\circ} \text{atan2}(Sin, Cos) - \text{atan2d}(\sin(\theta), \cos(\theta)) \quad (5.17)$$

Potek napake  $\varepsilon$  s slike ?? predstavi vrsta (5.18).



Slika 5.13: Napaka  $\varepsilon$  ob limiti  $\varphi_s \rightarrow 90^\circ$

$$\varepsilon = 45^\circ - \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(2n\theta) \quad (5.18)$$

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.

$$\begin{aligned} \varepsilon(\varphi_s, \varphi_c) &= \frac{\varphi_s + \varphi_c}{2} + \\ &\quad \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \tan \frac{\varphi_s - \varphi_c}{2} \right)^n \sin(2n\theta + n(90^\circ + \varphi_s + \varphi_c)) \end{aligned} \quad (5.19)$$

## 5.4 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:

$$\sin = r_0 \sin(\theta) + \Delta x_s \cos(\theta) \quad (5.20)$$

$$\cos = r_0 \cos(\theta) + \Delta x_s \sin(\theta) \quad (5.21)$$

Opravljena je bila limita  $\Delta x_s$  v neskončnost. V napaki nastopa enosmerna komponenta in sodi harmoniki. Funkcija ki predstavlja odvisnost napake od statične ekscentričnosti je (5.22).

$$\varepsilon_p = \text{atan} \frac{\Delta x_s}{\Delta x_s + 2r_0} + \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{\Delta x_s}{\sqrt{\Delta x_s^2 + 2r_0 \Delta x_s + 2r_0^2}} \right)^n \sin(2n\theta + n(90 + \text{atan}(\frac{\Delta x_s + r_0}{r_0}))) \quad (5.22)$$

Pri čemer:

$$\Delta x_s > -r_0$$

## 5.5 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  $\Delta y_s$  je:

$$\varepsilon_p = \text{atan} \frac{-\Delta y_s}{\Delta y_s + 2r_0} + \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{\Delta y_s}{\sqrt{\Delta y_s^2 + 2r_0 \Delta y_s + 2r_0^2}} \right)^n \sin(2n\theta + n(90 + \text{atan}(\frac{\Delta y_s + r_0}{r_0}))) \quad (5.23)$$

Pri čemer:

$$\Delta y_s > -r_0$$

## 5.6 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:

$$\varepsilon_p = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{-\sqrt{2}}{r_0} \Delta x_d \right)^n \sin(n\theta - 90n) \quad (5.24)$$

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.

# 6 Linearni model

V tem poglavju so prikazani rezultati simulacij z aproksimiranim poljem (6.1).

$$B(x, y) = x \quad (6.1)$$

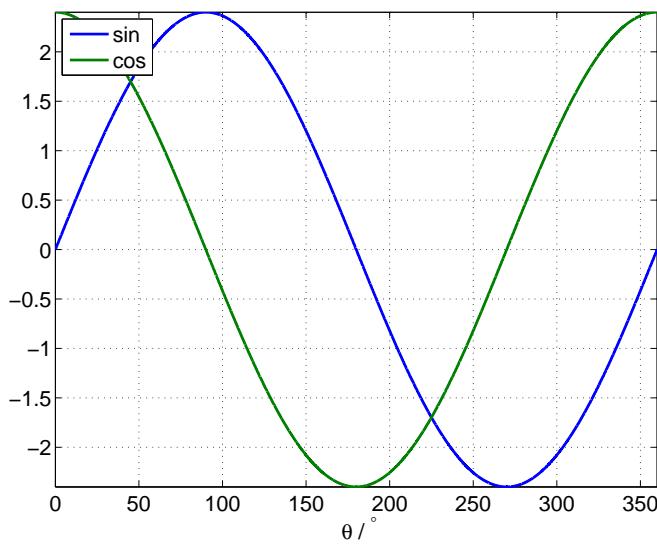
Prikazan je potek napake pri različnih izmikih, ter potek amplitud posameznih haarmonikov napake v odvisnosti od ekscentričnosti. Hall-ovi sondi sta postavljeni na krožnico z radijem 2,4 mm [1].

## 6.1 Brez ekscentričnosti

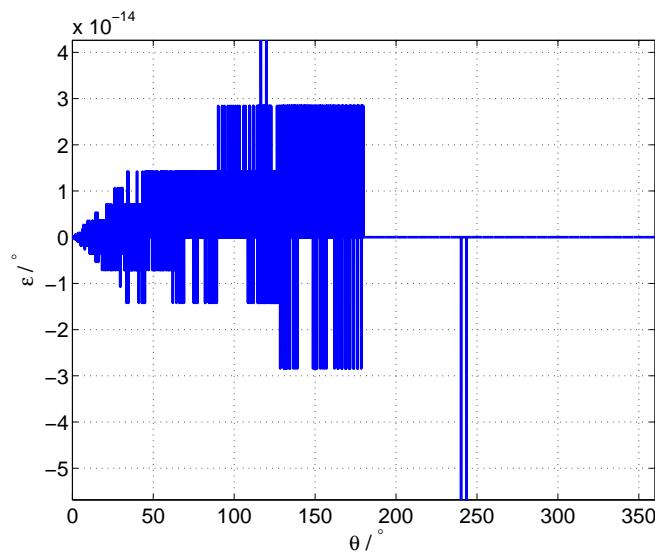
Signala  $\sin$  in  $\cos$  pomerjena v stanju brez ekscentričnosti imata enaki amplitudi in sta fazno zamaknjena za  $90^\circ$ . Napaka  $\varepsilon$ , ki se pojavi pri izračunu je le numerična napaka funkcije atan2d (Slika 6.2). Numerična napaka je proti pričakovani napaki zaradi ekscentričnosti zanemarljiva.

## 6.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

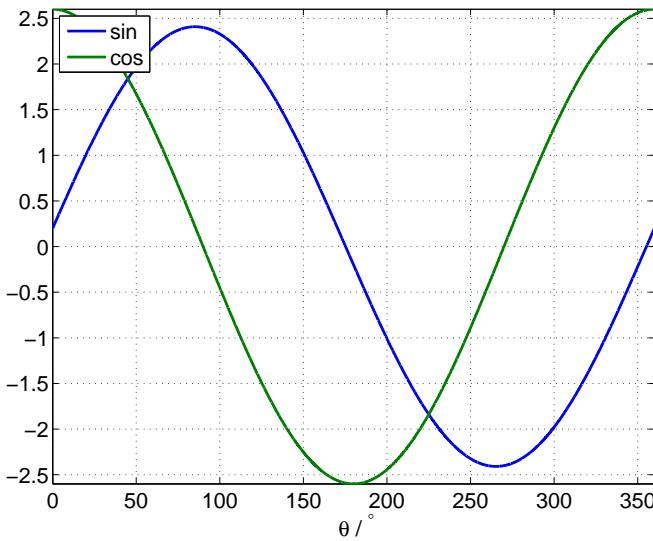
Po pričakovanjih se bo povišala amplituda  $\sin$  in  $\cos$  signala ter zmanjšal njun fazni zamik (4.4) (4.5). Po pričakovanjih najbolj izstopata enosmerna komponenta (harmonik 0) in drugi harmonik.



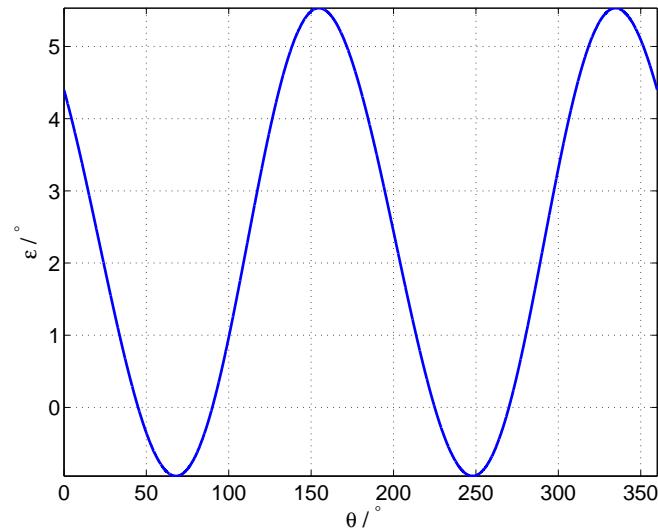
Slika 6.1:  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



Slika 6.2: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



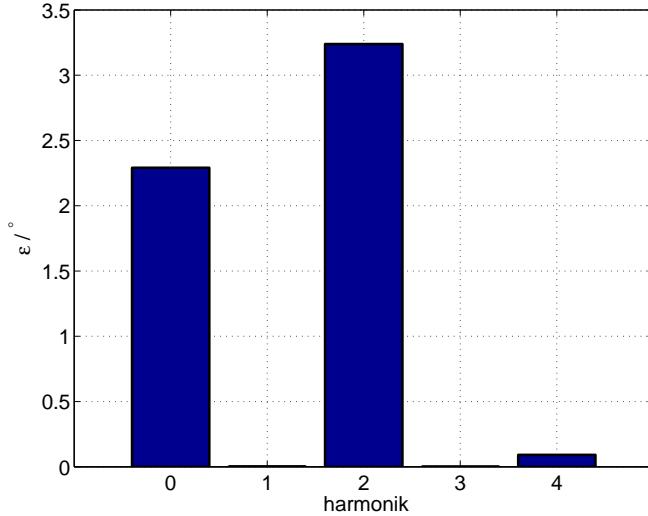
Slika 6.3:  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 6.4: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x

### 6.2.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake v odvisnosti od $\Delta x_s$

Na sliki 6.6 je prikazana sprememba amplitude prvega harmonika signalov  $\sin$  in  $\cos$ . Razvidno iz (4.4) (4.5) se linearno narašča amplituda  $\cos$ . Slika 6.7 prikazuje



Slika 6.5: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  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 6.8 prikazuje fazni zamik signalov glede na njuno idealno poravnavo. Po (4.5) je pričakovano spreminjanje faze  $\sin$ .

Spreminjanje amplituda prvega harmonika, enosmerne komponente in faznega zamika  $\sin$  in  $\cos$  signalov je opisano z (4.4) in (4.5). Tu so poteki razviti v Taylorjevo vrsto do tretje stopnje.

$$A_{\sin} = 2,08 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 2,4 \quad (6.2)$$

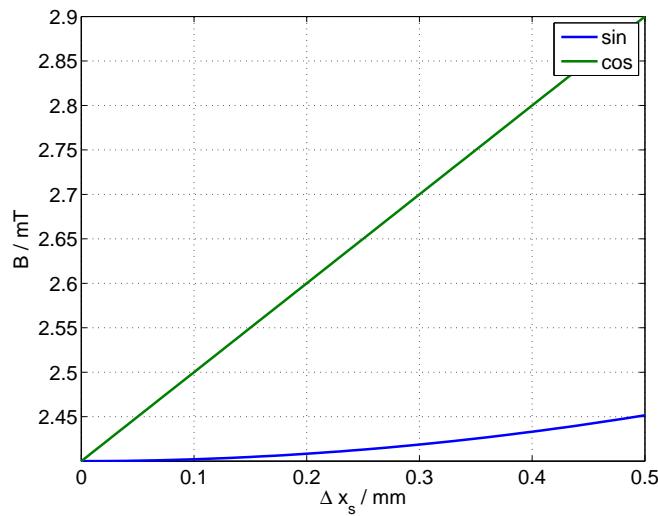
$$Off_{\sin} = 0 \quad (6.3)$$

$$\delta_{\sin} = -1,38 \Delta x_s^3 + 23,9 \Delta x_s \quad (6.4)$$

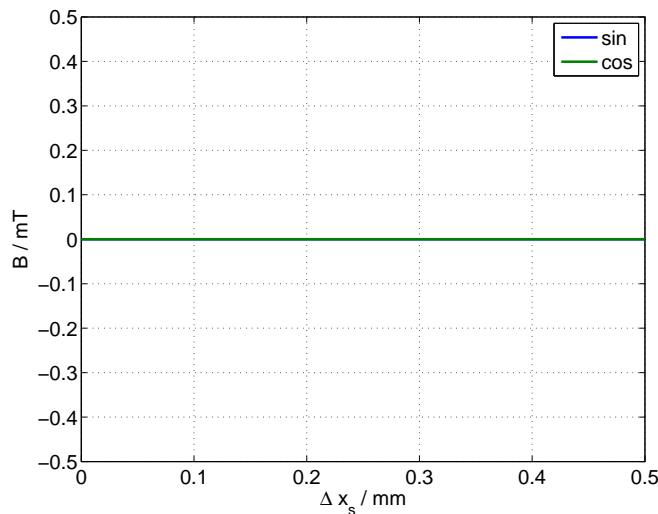
$$A_{\cos} = \Delta x_s + 2,4 \quad (6.5)$$

$$Off_{\cos} = 0 \quad (6.6)$$

$$\delta_{\cos} = 0 \quad (6.7)$$

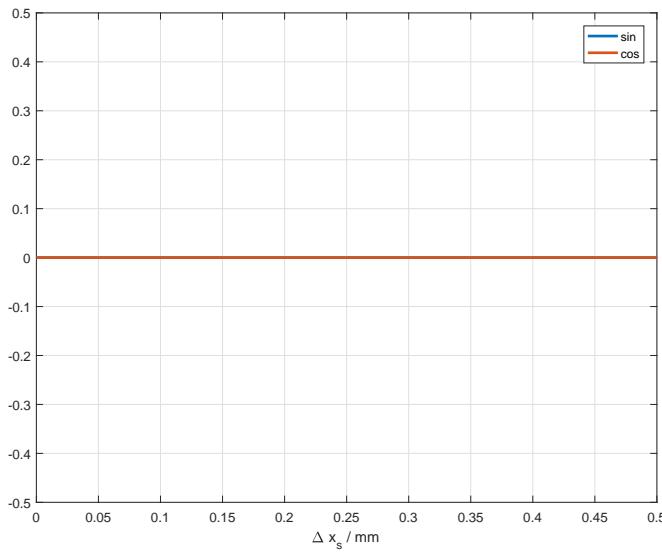


Slika 6.6: Amplituda osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

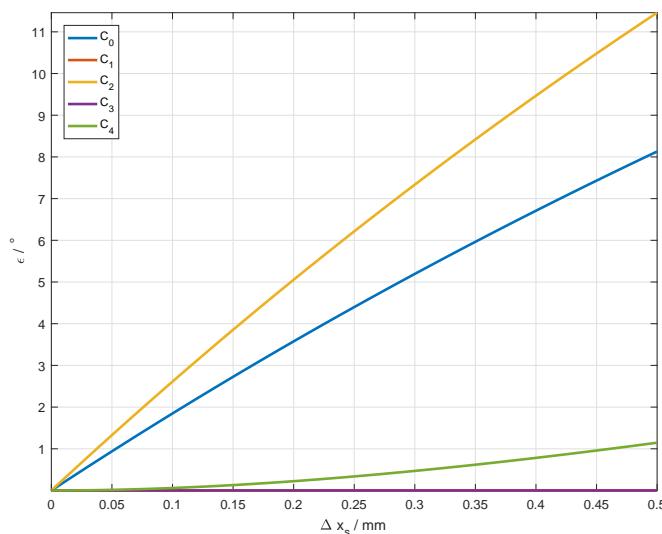


Slika 6.7: Enosmerna komponenta *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

Spremembi signalov *sin* in *cos* se odrazita tudi pri izračunu kota  $\varphi$  in napake  $\varepsilon$ . Na sliki 6.9 vidimo odvisnost amplitud posameznega harmonika od sprememjanja statične ekscentričnosti v smeri x. Poteke s slike 6.9 aproksimiramo s polinomi.



Slika 6.8: Fazni zamik *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala *sin* in *cos*



Slika 6.9: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z linearnim poljem

$$C_0 = 3,35 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 2,48 \Delta x_s^2 + 11,9 \Delta x_s + 1,23 \cdot 10^{-5} \quad (6.8)$$

$$C_1 = 5,56 \cdot 10^{-4} \Delta x_s^3 - 2,00 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^2 + 4,34 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 7,67 \cdot 10^{-8} \quad (6.9)$$

$$C_2 = 4,13 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 3,53 \Delta x_s^2 + 16,9 \Delta x_s - 2,31 \cdot 10^{-5} \quad (6.10)$$

$$C_3 = -2,17 \cdot 10^{-4} \Delta x_s^3 + 2,57 \cdot 10^{-4} \Delta x_s^2 + 0,0042 \Delta x_s + 4,51 \cdot 10^{-8} \quad (6.11)$$

$$C_4 = -8,27 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 + 2,42 \Delta x_s^2 + 8,08 \cdot 10^{-3} \Delta x_s - 1,60 \cdot 10^{-4} \quad (6.12)$$

Za primerjavo, s dodane tudi enačbe potekov amplitud posameznega harmonika razvitega v Taylorjevo vrsto, katere sledijo iz (5.22):

$$C_0 = 3,45 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 2,49 \Delta x_s^2 + 11,9 \Delta x_s \quad (6.13)$$

$$C_1 = 0 \quad (6.14)$$

$$C_2 = 3,66 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 3,51 \Delta x_s^2 + 16,9 \Delta x_s \quad (6.15)$$

$$C_3 = 0 \quad (6.16)$$

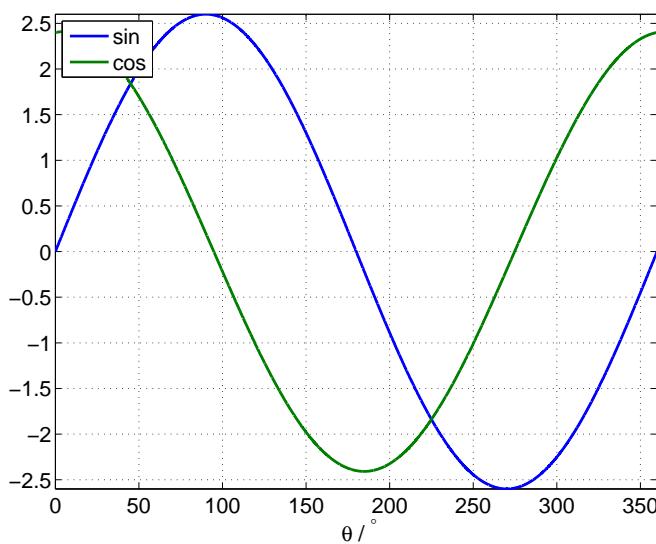
$$C_4 = -1,04 \Delta x_s^3 + 2,49 \Delta x_s^2 \quad (6.17)$$

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

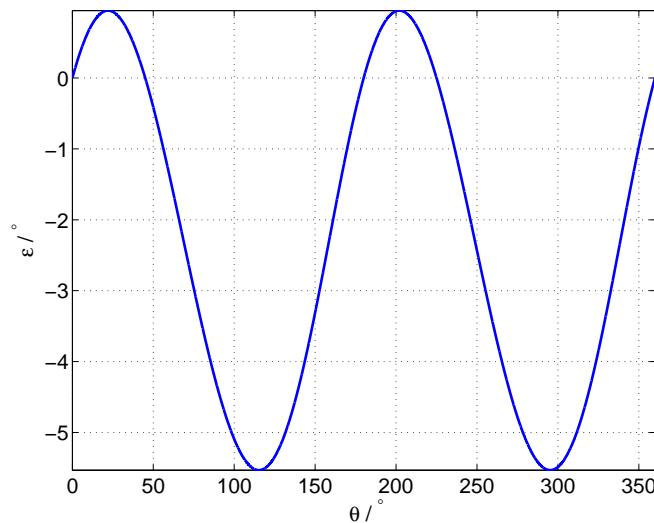
### 6.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

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  $\cos$ .

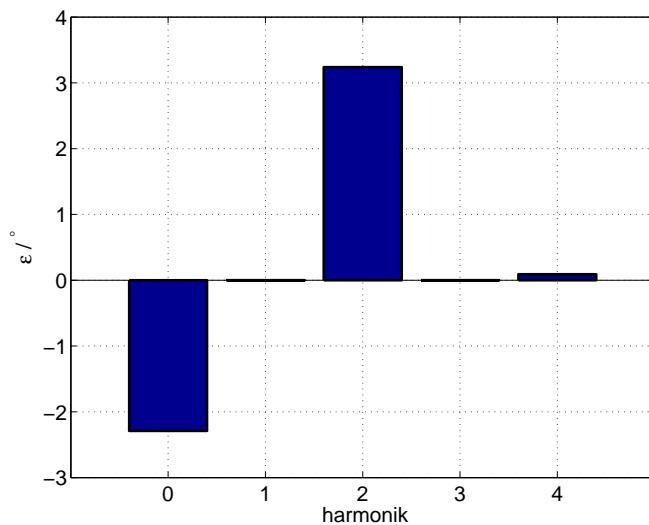
Napaka je prikazana na sliki 6.11. Sestavlja jo negativna enosmerna komponenta in izrazit drugi harmonik. Iz napake razvite v vrsto (6.12) je vidna enaka amplituda drugega harmonika, kot pri ekscentričnosti v smeri x. Enosmerna komponenta se razlikuje v predznaku.



Slika 6.10:  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y



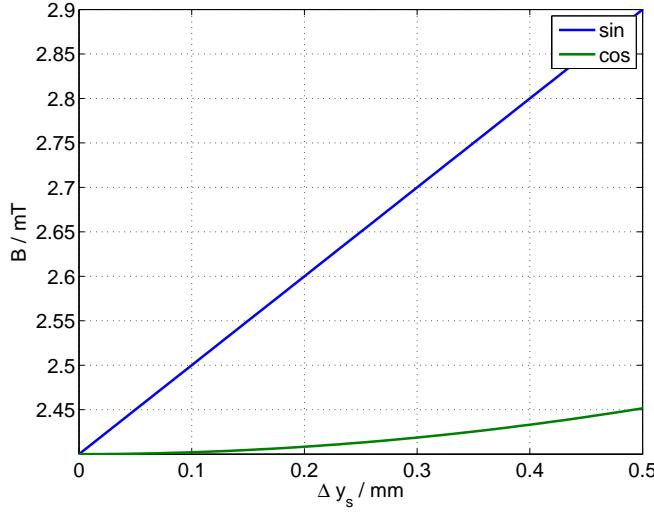
Slika 6.11: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y



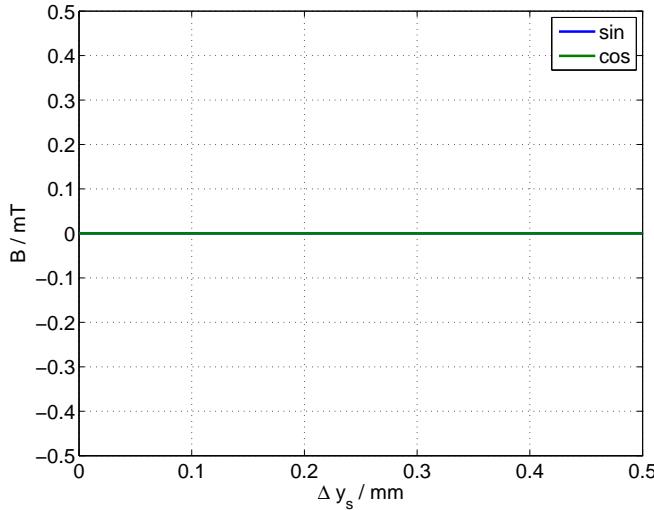
Slika 6.12: Amplitude harmonikov napake  $\epsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

### 6.3.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_s$

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 6.16 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 simuliранih s statično ekscentričnostjo v smeri x, razlikuje se enosmerna komponenta z nasprotnim predznakom.



Slika 6.13: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.14: Enosmerna komponenta *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

$$A_{\sin} = \Delta x_s + 2,4 \quad (6.18)$$

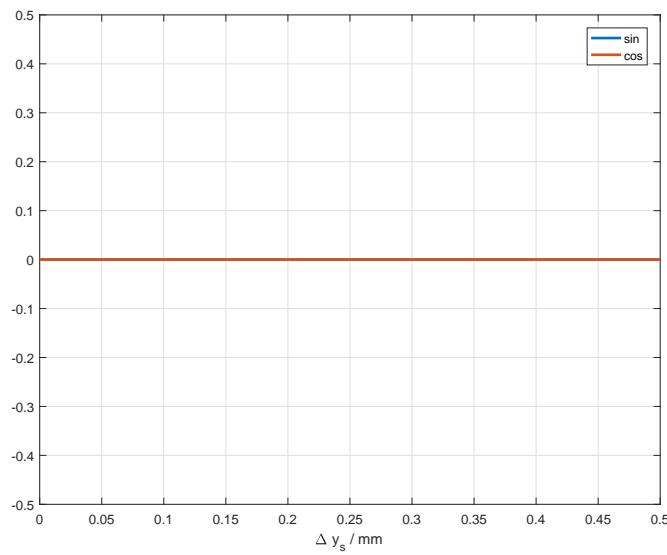
$$Off_{\sin} = 0 \quad (6.19)$$

$$\delta_{\sin} = 0 \quad (6.20)$$

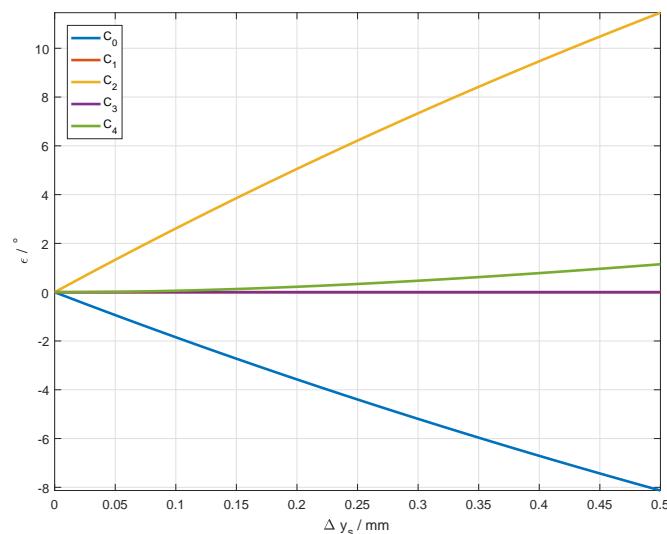
$$A_{\cos} = 2,08 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 2,4 \quad (6.21)$$

$$Off_{\cos} = 0 \quad (6.22)$$

$$\delta_{\cos} = 1,38 \Delta x_s^3 - 23,9 \Delta x_s \quad (6.23)$$



Slika 6.15: Fazni zamik *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala *sin* in *cos*



Slika 6.16: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z linearnim poljem

$$C_0 = -3,35 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 + 2,48 \Delta y_s^2 - 11,9 \Delta y_s - 1,22 \cdot 10^{-5} \quad (6.24)$$

$$C_1 = 1,09 \cdot 10^{-4} \Delta y_s^3 - 8,69 \cdot 10^{-4} \Delta y_s^2 + 0,00434 \Delta y_s + 7,62 \cdot 10^{-10} \quad (6.25)$$

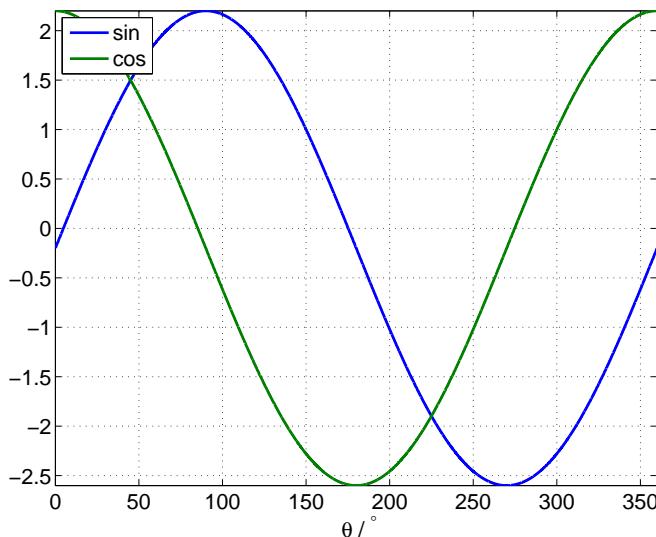
$$C_2 = 4,12 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 - 3,53 \Delta y_s^2 + 1,69 \cdot 10 \Delta y_s - 2,31 \cdot 10^{-5} \quad (6.26)$$

$$C_3 = 2,43 \cdot 10^{-4} \Delta y_s^3 - 0,00130 \Delta y_s^2 + 0,00420 \Delta y_s + 1,83 \cdot 10^{-8} \quad (6.27)$$

$$C_4 = -8,26 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 + 2,42 \Delta y_s^2 + 6,13 \cdot 10^{-3} \Delta y_s - 1,60 \cdot 10^{-4} \quad (6.28)$$

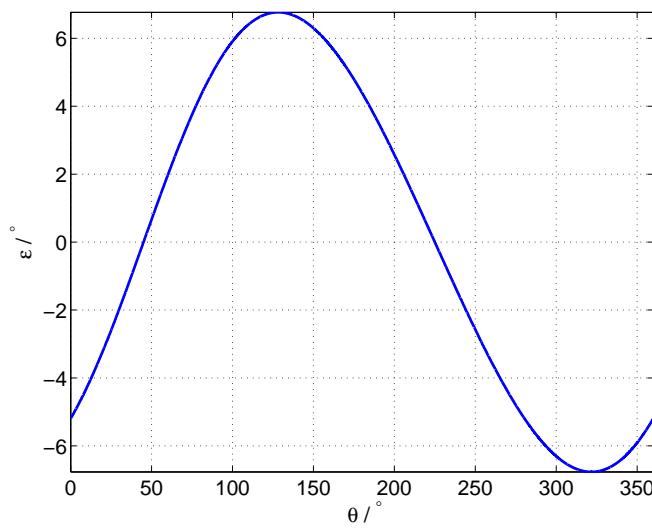
## 6.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x osi

Dinamična ekscentričnost pričakovano povzroči v *sin* in *cos* enosmerno komponento (Slika 6.17). Na sliki 6.18 je vidna napaka v obliki prvega harmonika, kar

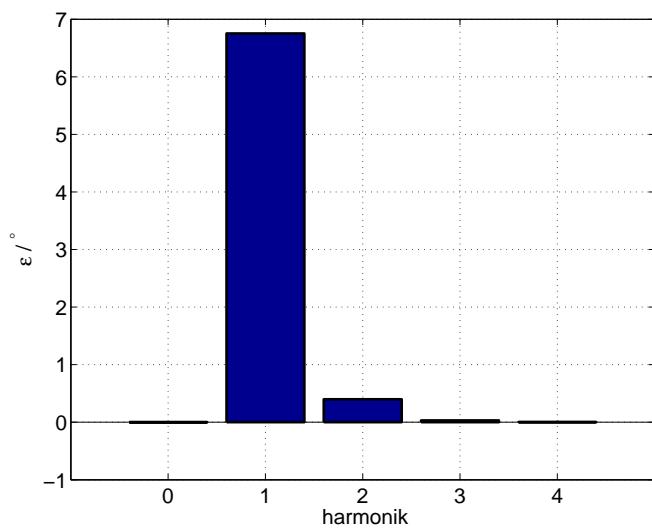


Slika 6.17: *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

je bilo pričakovati. Z razvojem napake v Fourierovo vrsto je nejizrazitejši prvi harmonik, enosmerna komponenta je nič (slika 6.19).



Slika 6.18: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

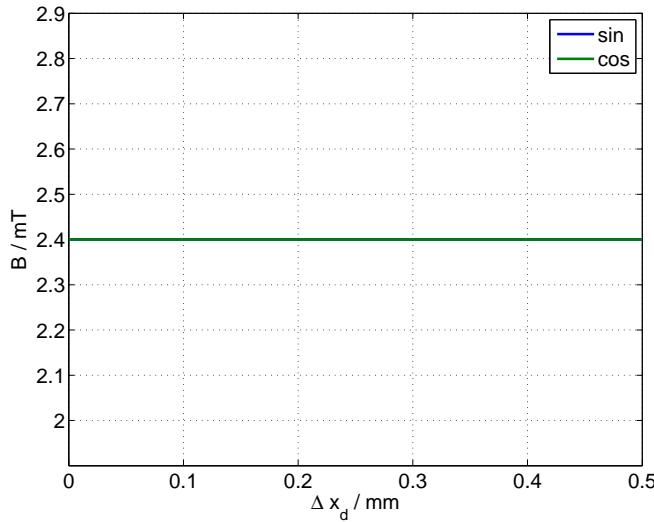


Slika 6.19: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

### 6.4.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_d$

Dinamična ekscentričnost vpliva na enosmerni komponenti  $\sin$  in  $\cos$  (slika 6.21).

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



Slika 6.20: Amplituda osnovnega harmonika  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

sta od dinamične ekscentričnosti odvisni le enosmerni komponenti.

$$A_{\sin} = 2,4 \quad (6.29)$$

$$Off_{\sin} = -\Delta x_d \quad (6.30)$$

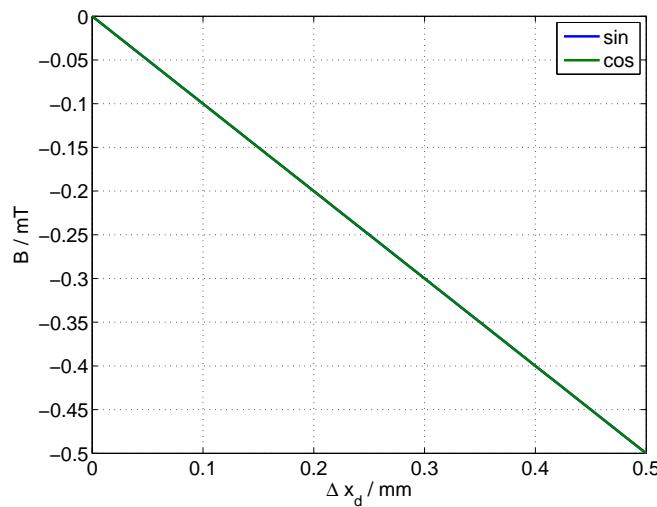
$$\delta_{\sin} = 0 \quad (6.31)$$

$$A_{\cos} = 2,4 \quad (6.32)$$

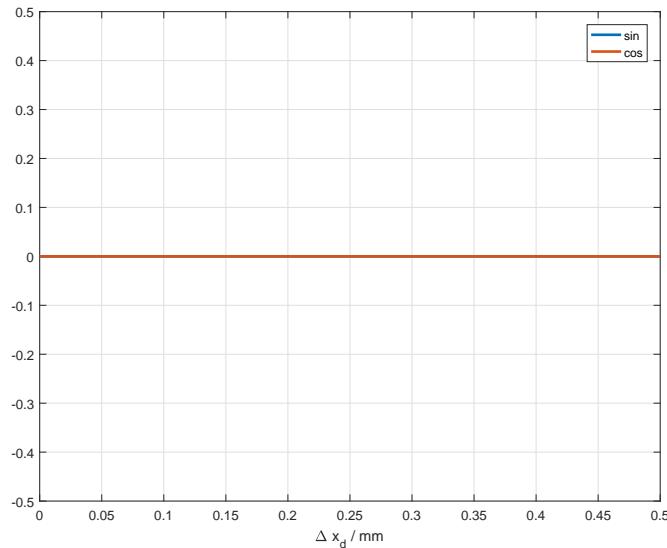
$$Off_{\cos} = -\Delta x_d \quad (6.33)$$

$$\delta_{\cos} = 0 \quad (6.34)$$

Slika 6.23 prikazuje odvisnost amplitud napake od spremenjanja dinamične ekscentričnosti v smeri x. V napaki, se po pričakovanih linearno povečuje prvi harmonik (5.14). Poteki opisani s kubičnimi polinomi.



Slika 6.21: Enosmerna komponenta *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 6.22: Fazni zamik *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala *sin* in *cos*

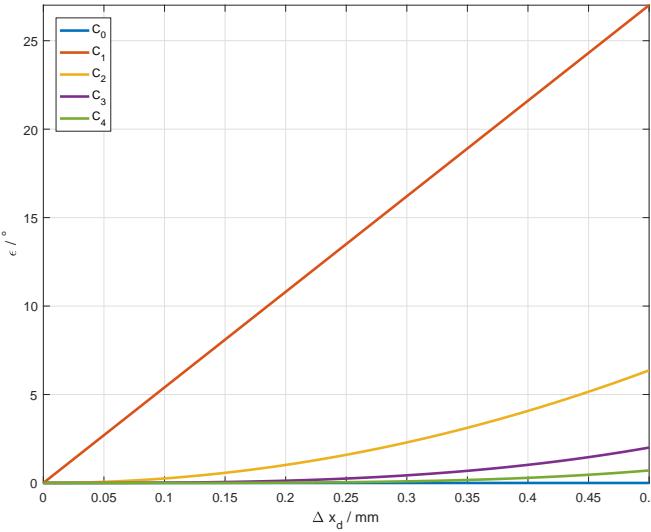
$$C_0 = 2,64 \cdot 10^{-4} \Delta x_d^3 + 0,00125 \Delta x_d^2 + 0,00291 \Delta x_d + 1,02 \cdot 10^{-7} \quad (6.35)$$

$$C_1 = 1,58 \cdot 10^{-4} \Delta x_d^3 + 2,37 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^2 + 33,8 \Delta x_d + 2,28 \cdot 10^{-7} \quad (6.36)$$

$$C_2 = 1,06 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^3 + 9,95 \Delta x_d^2 - 1,95 \cdot 10^{-3} \Delta x_d + 7,96 \cdot 10^{-7} \quad (6.37)$$

$$C_3 = 3,91 \Delta x_d^3 - 1,41 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^2 + 9,91 \cdot 10^{-4} \Delta x_d + 1,06 \cdot 10^{-5} \quad (6.38)$$

$$C_4 = 1,73 \Delta x_d^3 - 5,52 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 + 6,15 \cdot 10^{-2} \Delta x_d - 1,36 \cdot 10^{-3} \quad (6.39)$$



Slika 6.23: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od dinamične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z linearним poljem

Poteki (5.24) razviti v Taylorjevo vrsto, so podali enake rezultate.

$$C_0 = 0 \quad (6.40)$$

$$C_1 = 33,8\Delta x_d \quad (6.41)$$

$$C_2 = 9,95\Delta x_d^2 \quad (6.42)$$

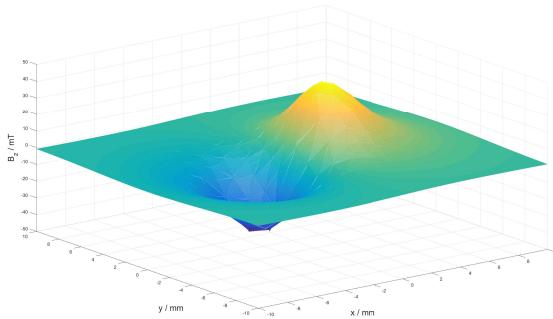
$$C_3 = 3,91\Delta x_d^3 \quad (6.43)$$

$$C_4 = 0 \quad (6.44)$$

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  $\cos$ .

## 7 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. Definicjsko območje je 20x20 mm s korakom 0,02 mm (Slika 7.1). Polje, ki ga pomeri Hallova sonda v

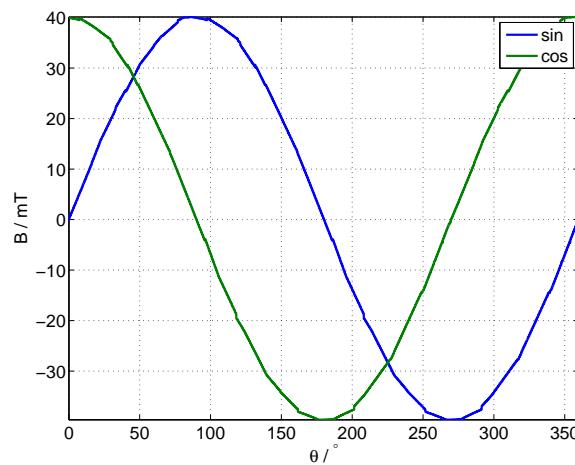


Slika 7.1: Model z- komponente gostote magnetnega polja uporabljen v simulacijah

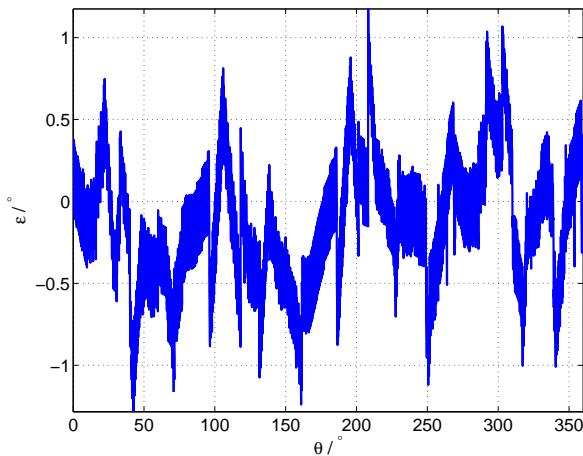
poljubni točki, je bilo aproksimirano s poljem, definiranim v geometrijsko najbližji točki definicijskega območja. V tem poglavju so predstavljeni rezultati simulacij ekscentričnosti z uporabo realnega modela magnetnega polja.

## 7.1 Brez napake

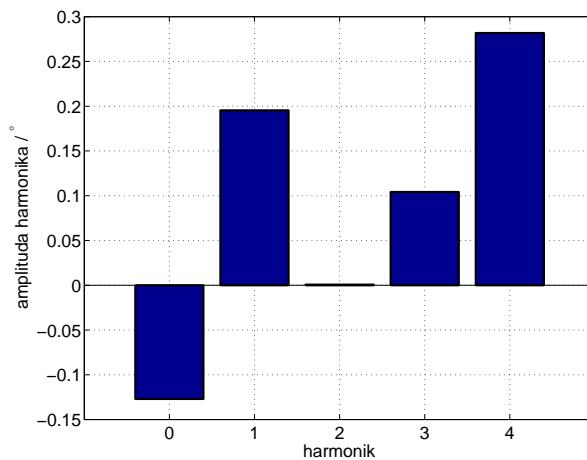
Kljub idealni montaži, Hallovi sondi ne zajameti idealnih signalov. Signala nimata popolnoma enakih amplitudi osnovnega harmonika, idealnega faznega zamika, vsebujeta tudi enosmerne komponente. Vsebujeta tudi višje harmonike (Slika 7.2). To se izrazi na napaki (Slika 7.3). V napaki se pojavijo skoki ( $105^\circ$ ), ki so posledica nepopolnega numerično izračunanega modela magnetnega polja. Napaka razvita v Fourierova vrsto prikaže vrednosti amplitud posameznih harmonikov napake (Slika 7.4). Izrazit je četrtri harmonik, ki je pričakovani po podatkovnih listih [1].



Slika 7.2:  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



Slika 7.3: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti

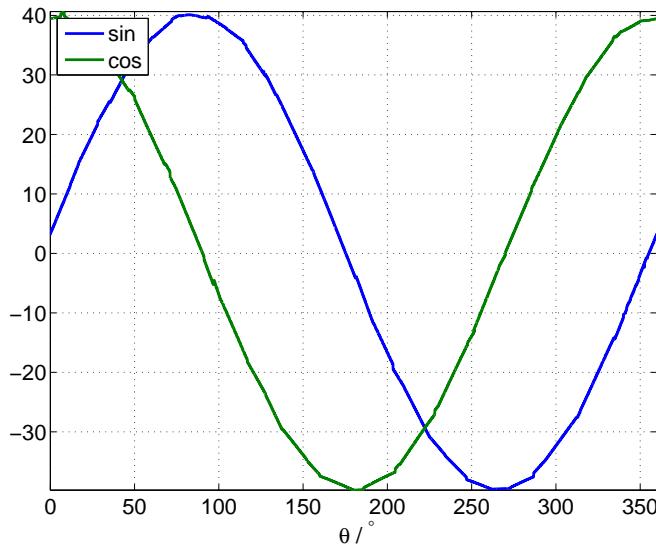


Slika 7.4: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem brez ekscentričnosti

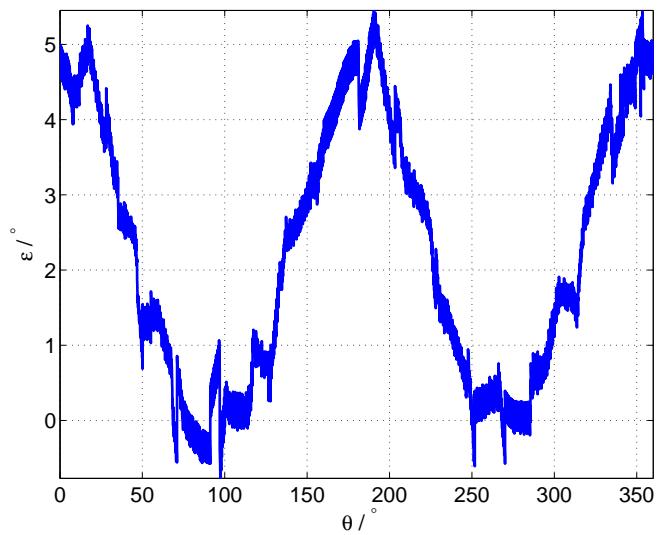
## 7.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

Po pričakovanjih se bo spremenila amplituda  $\sin$  in  $\cos$  signala ter zmanjšal njun fazni zamik (izraza (4.4) in 4.5). Na sliki 7.5 ni opaziti razlik, v primerjavi s  $\sin$

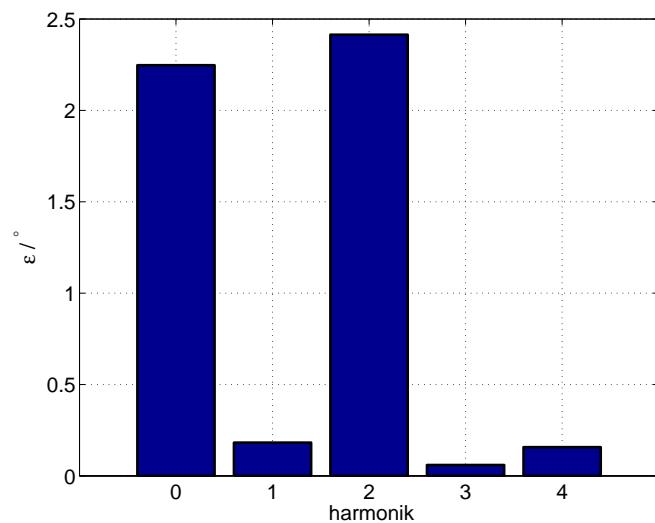
in  $\cos$  brez vpliva ekscentričnosti. Na sliki 7.6 je prikazana napaka  $\varepsilon$ . Oblika je bila pričakovana [1]. Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 7.7) prikaže enako velikost enosmerne komponente in nižjo amplitudo drugega harmonika, kot pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem.



Slika 7.5:  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x



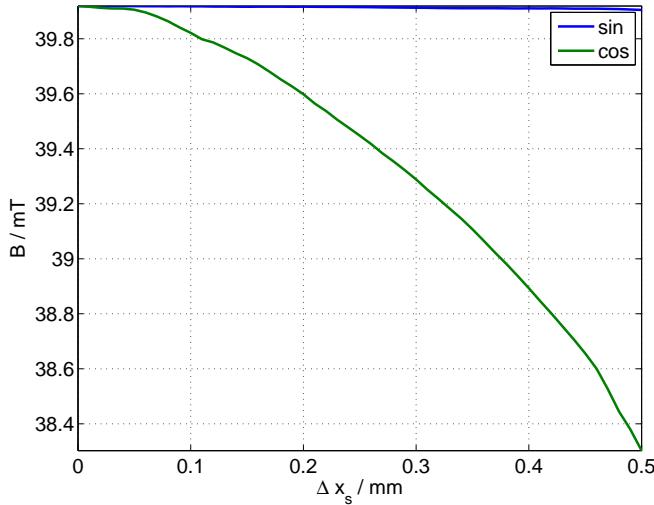
Slika 7.6: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.7: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x

### 7.2.1 Spremembra $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_s$

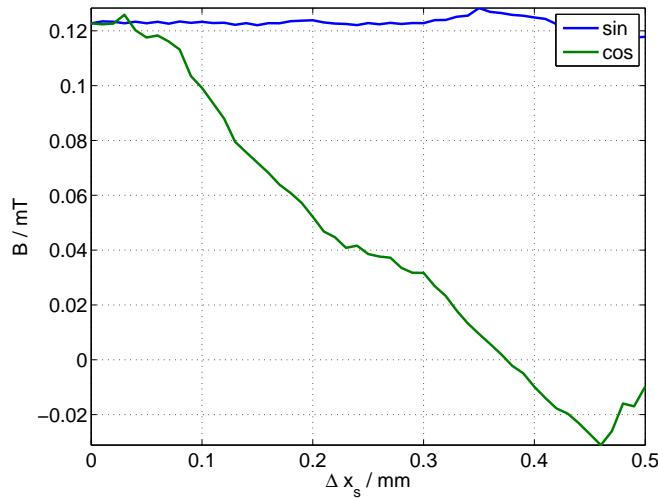
Na sliki 7.8 je prikazana sprememba amplitude prvega harmonika signalov  $\sin$  in  $\cos$ . Pričakovano je bilo hitrejše spreminjanje amplitude signala  $\cos$ . Amplituda z višanjem ekscentričnosti pada, kar je razumljivo. Senzor je predviden za uporabo priporočenega magneta s premerom 4mm. S pravilno postavitvijo sond, je v najboljši legi pomerjeno polje z najvišjo amplitudo. Z ekscentričnostjo Hallova sonda pomeri polje z nižjo maksimalno vrednostjo. Na sliki 7.9 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 7.10 prikazuje potek faznih signalov. Rezultat je bil pričakovan. Poteke se apro-



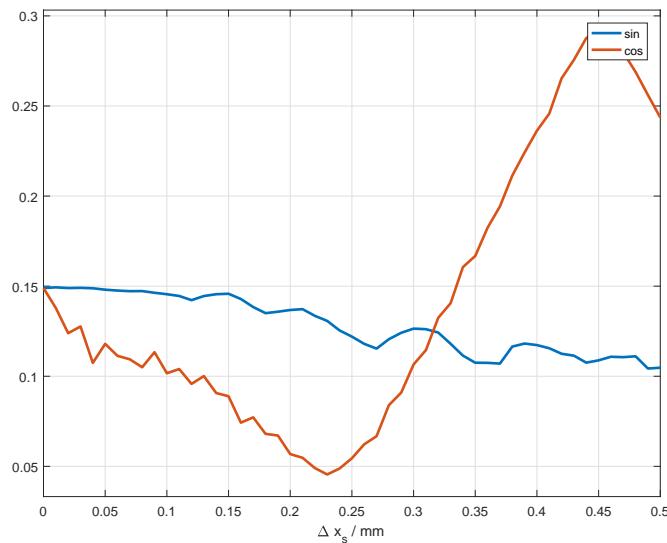
Slika 7.8: Amplituda osnovnega harmonika  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

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

Na sliki 7.11 so prikazani poteki amplitud posameznega harmonika ob spremi-



Slika 7.9: Enosmerna komponenta  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.10: 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 (7.7)-(7.11).

$$A_{sin} = +4,18 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 6,17 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 3,60 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 39,9 \quad (7.1)$$

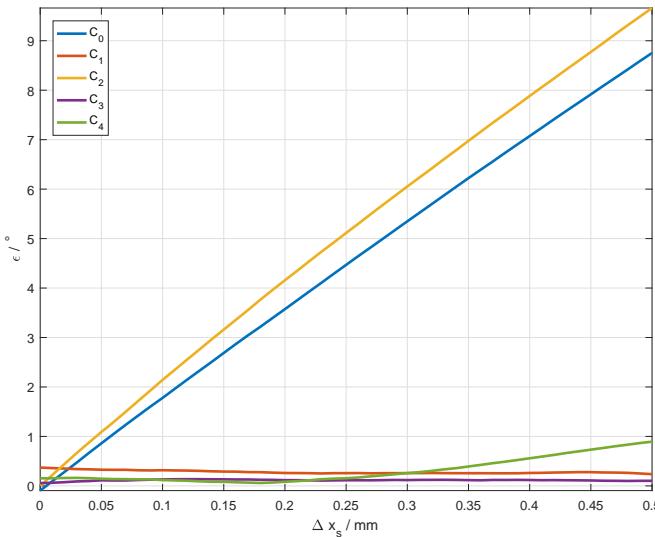
$$Off_{sin} = -0,545 \Delta x_s^3 + 0,343 \Delta x_s^2 - 5,33 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 0,125 \quad (7.2)$$

$$\delta_{sin} = -2,29 \Delta x_s^3 + 0,365 \Delta x_s^2 + 23,80 \Delta x_s - 0,125 \quad (7.3)$$

$$A_{cos} = -2,39 \Delta x_s^3 - 3,28 \Delta x_s^2 - 0,966 \Delta x_s + 39,9 \quad (7.4)$$

$$Off_{cos} = +0,868 \Delta x_s^3 - 0,423 \Delta x_s^2 - 0,316 \Delta x_s + 0,131 \quad (7.5)$$

$$\delta_{cos} = -2,71 \Delta x_s^3 + 3,54 \Delta x_s^2 - 0,597 \Delta x_s - 0,146 \quad (7.6)$$



Slika 7.11: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z realnim poljem

$$C_0 = -1,30 \Delta x_s^3 + 1,66 \Delta x_s^2 + 1,16 \cdot 10 \Delta x_s - 1,37 \cdot 10^{-1} \quad (7.7)$$

$$C_1 = -5,99 \Delta x_s^3 + 3,85 \Delta x_s^2 - 6,20 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 2,05 \cdot 10^{-1} \quad (7.8)$$

$$C_2 = -3,28 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 5,20 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 + 12,0 \Delta x_s + 1,66 \cdot 10^{-2} \quad (7.9)$$

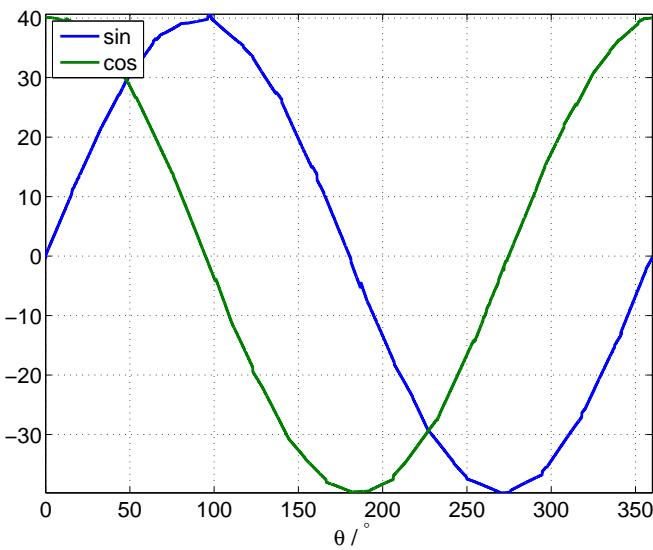
$$C_3 = -1,84 \Delta x_s^3 + 1,50 \Delta x_s^2 - 4,91 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 1,16 \cdot 10^{-1} \quad (7.10)$$

$$C_4 = 8,53 \Delta x_s^3 - 3,17 \Delta x_s^2 - 4,72 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 3,20 \cdot 10^{-1} \quad (7.11)$$

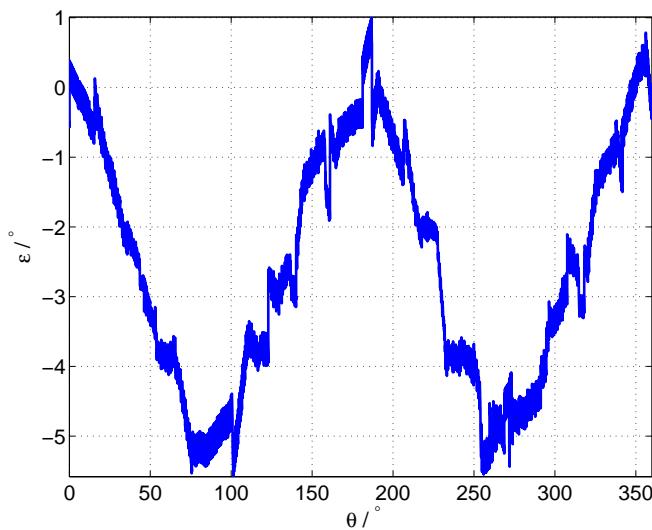
Enosmerna komponenta narašča enako kot pri simulacijah z linearnim poljem. Drugi harmonik narašča nekoliko počasneje, kot je naraščal pri simulacijah z linearnim poljem.

### 7.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

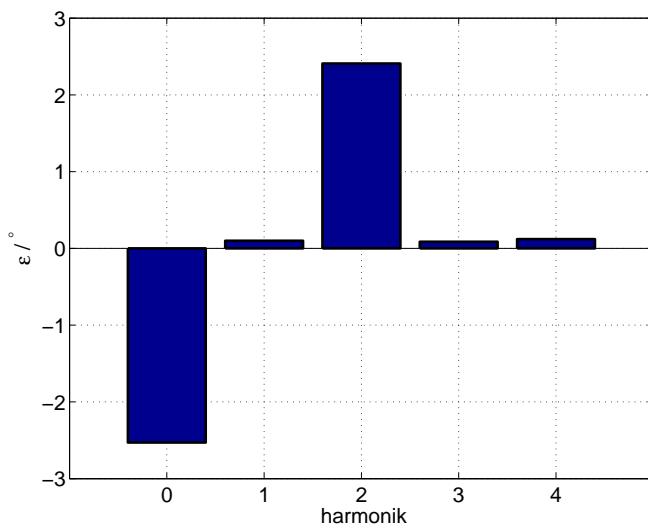
Tako kot pri statični ekscentričnosti v smeri x, se tudi na  $\sin$  in  $\cos$  signalih ob povzročeni ekscentričnosti ne opazi vidne razlike (slika 7.12). Napaka  $\varepsilon$  (slika 7.13) je enake oblike kot je bila pri simulacijah statične ekscentričnosti v smeri x (slika 7.6). Napaka ima le negativno enosmerno komponento. Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 7.7) potrdi pričakovanja.



Slika 7.12:  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.13: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

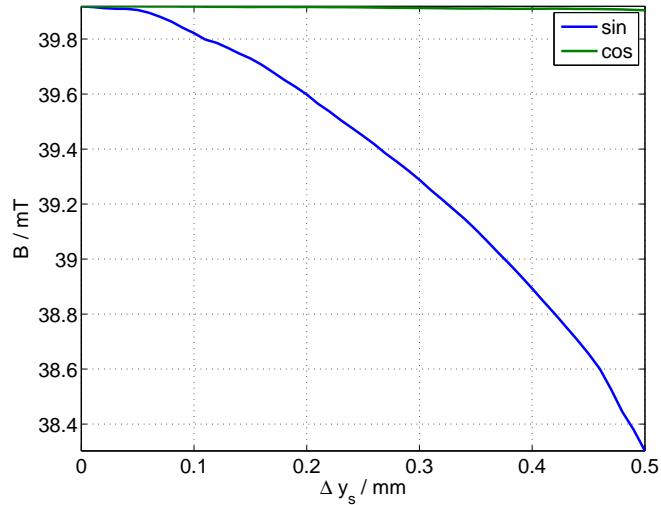


Slika 7.14: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

### 7.3.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_s$

Potek amplitude osnovnega harmonika  $\sin$  (slika 7.15) 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 7.16) pri  $\sin$  se spreminja enako, kot enosmerna komponenta  $\cos$  pri statični ekscentričnosti v smeri x (slika 7.9). Fazni zamik signalov se spreminja po pričakovanjih (slika 7.17). Fazni zamik se manjša, pri čemer pada fazni zamik  $\cos$  signala.

Poteki



Slika 7.15: Amplituda osnovnega harmonika  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

zapisani s kubičnimi polinomi.

$$A_{\sin} = -2,39\Delta y_s^3 - 3,28\Delta y_s^2 - 0,966\Delta y_s + 39,9 \quad (7.12)$$

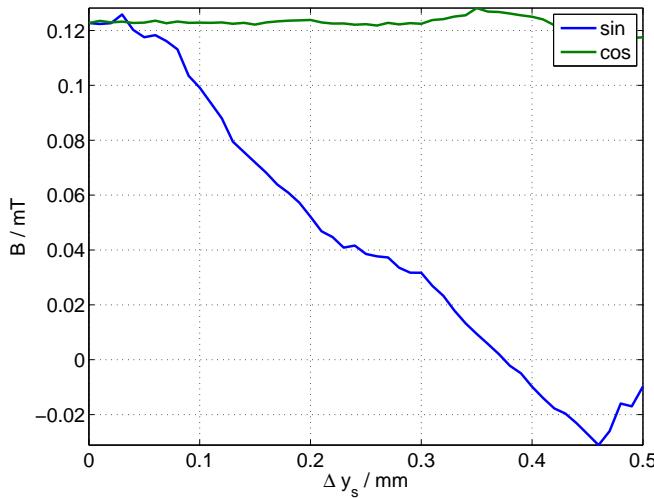
$$Off_{\sin} = +0,868\Delta y_s^3 - 0,423\Delta y_s^2 - 0,316\Delta y_s + 0,131 \quad (7.13)$$

$$\delta_{\sin} = -2,71\Delta y_s^3 + 3,54\Delta y_s^2 - 5,97 \cdot 10^{-1}\Delta y_s - 1,46 \cdot 10^{-1} \quad (7.14)$$

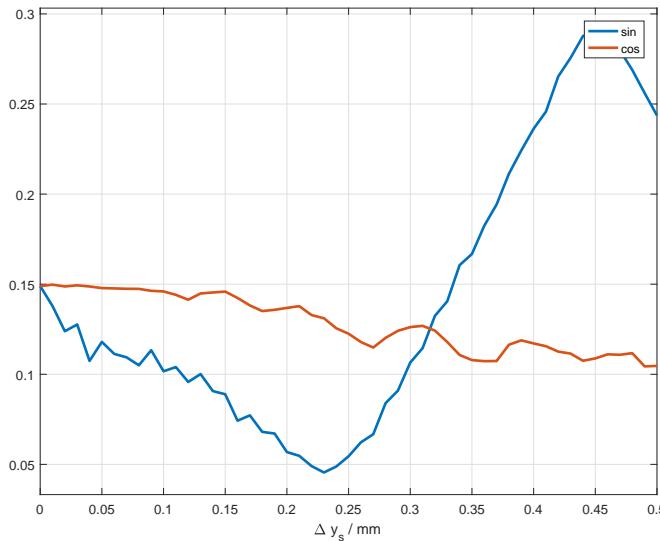
$$A_{\cos} = +3,76 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^3 - 5,99 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 - 3,87 \cdot 10^{-3}\Delta y_s + 39,9 \quad (7.15)$$

$$Off_{\cos} = -0,545\Delta y_s^3 + 0,342\Delta y_s^2 - 5,30 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 0,124 \quad (7.16)$$

$$\delta_{\cos} = +0,229\Delta y_s^3 + 0,473\Delta y_s^2 - 24,0\Delta y_s - 0,124 \quad (7.17)$$



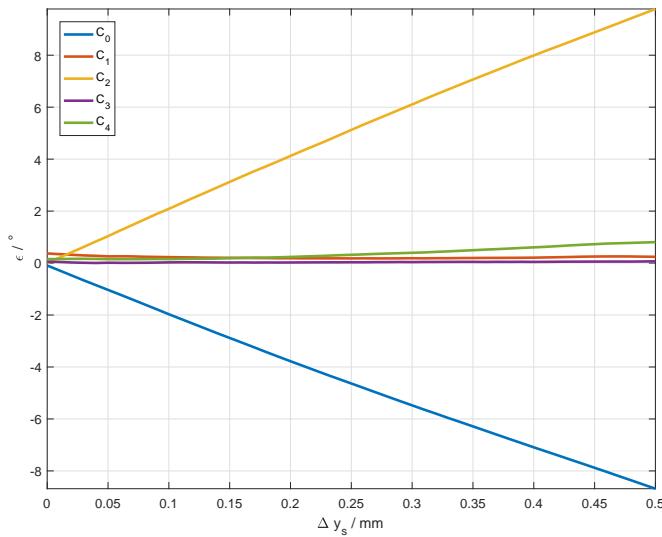
Slika 7.16: Enosmerna komponenta  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri  $y$



Slika 7.17: 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  $\varphi_{\cos}$ .

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 7.18: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z realnim poljem

$$C_0 = -2,56\Delta y_s^3 + 2,36\Delta y_s^2 - 1,24 \cdot 10\Delta y_s - 1,33 \cdot 10^{-1} \quad (7.18)$$

$$C_1 = -2,46\Delta y_s^3 + 3,57\Delta y_s^2 - 1,19\Delta y_s + 2,14 \cdot 10^{-1} \quad (7.19)$$

$$C_2 = 2,92\Delta y_s^3 - 1,53\Delta y_s^2 + 1,23 \cdot 10\Delta y_s - 2,78 \cdot 10^{-2} \quad (7.20)$$

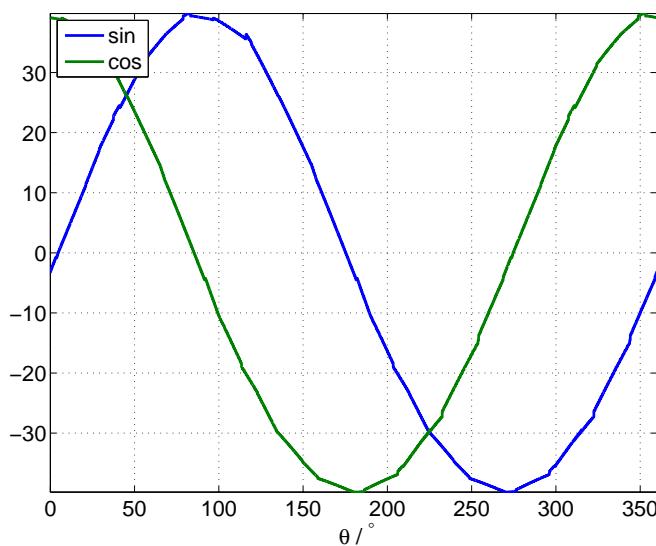
$$C_3 = -2,93\Delta y_s^3 + 2,15\Delta y_s^2 - 4,19 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 1,07 \cdot 10^{-1} \quad (7.21)$$

$$C_4 = 8,63\Delta y_s^3 - 2,82\Delta y_s^2 - 7,73 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 3,33 \cdot 10^{-1} \quad (7.22)$$

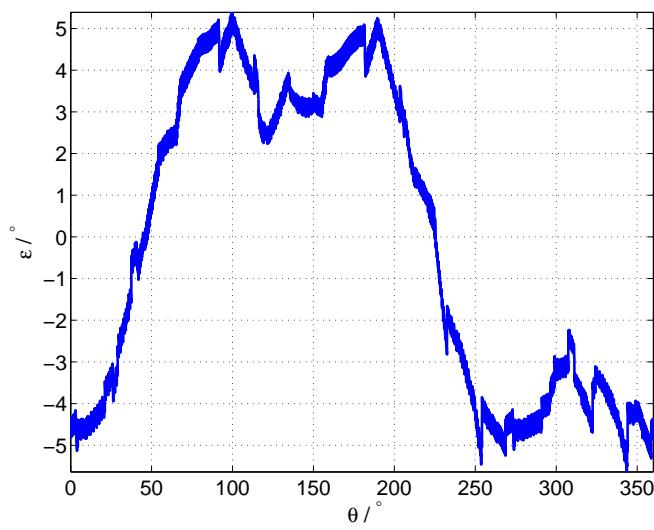
## 7.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x

Vpliv dinamične ekscentričnosti v  $\sin$  in  $\cos$  bo viden v enosmerni komponenti. Na sliki 7.19 sprememba ni opazna, posledica enosmerne komponente v  $\sin$  in

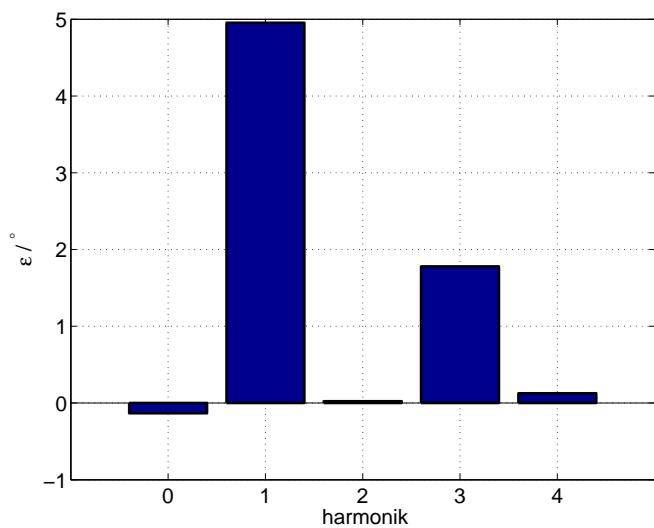
$\cos$  je vidna v napaki (Slika 7.20). Napaka se izrazi v obliki prvega harmonika, ki je posledica enosmerne komponente. V napaki je viden tudi tretji harmonik saj enosmerna komponenta vpliva tudi nanj (5.9). Razvoj napake v Fourierovo vrsto potrdi pričakovanja (Slika 7.21). Poglejmo si še fft napake s slike 7.20, prikazanega na sliki 7.21.



Slika 7.19:  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.20: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

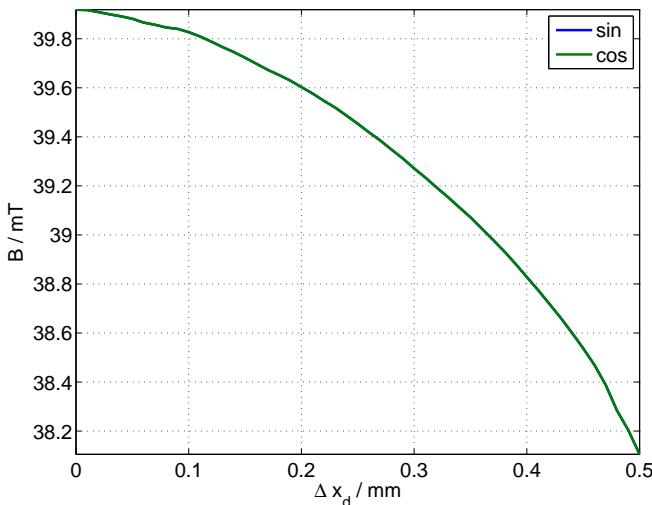


Slika 7.21: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

### 7.4.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_d$

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 7.22). Enako se spreminja tudi enosmerni komponenti signalov (slika 7.23). Fazna razlika signalov ostaja konstantna, vendar je opazno lezenje obeh signalov in posledično naraščanje enosmerne komponente napake.

Poteki zapisani s kubičnimi



Slika 7.22: Amplituda osnovnega harmonika  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

polinomi predstavijo enako spremjanje signala  $\sin$  in  $\cos$ .

$$A_{\sin} = -6,54\Delta x_d^3 - 1,78\Delta x_d^2 - 1,04\Delta x_d + 39,9 \quad (7.23)$$

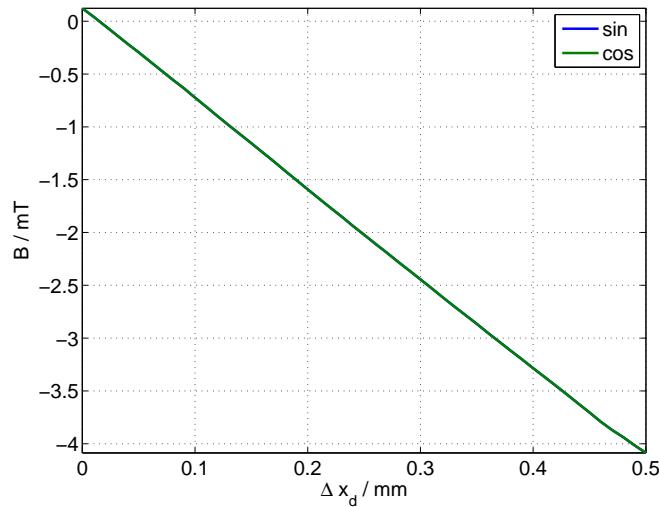
$$Off_{\sin} = 2,20\Delta x_d^3 - 1,11\Delta x_d^2 - 8,45\Delta x_d + 1,28 \cdot 10^{-1} \quad (7.24)$$

$$\delta_{\sin} = -4,82\Delta x_d^3 + 4,73\Delta x_d^2 - 8,49 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (7.25)$$

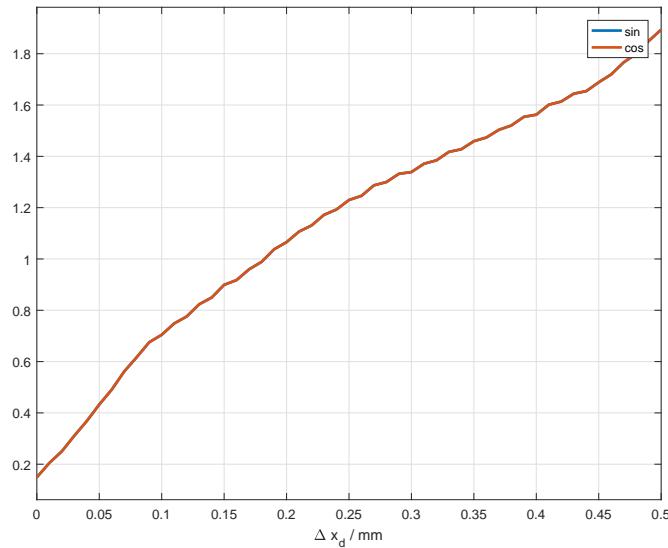
$$A_{\cos} = -6,54\Delta x_d^3 - 1,78\Delta x_d^2 - 1,04\Delta x_d + 39,9 \quad (7.26)$$

$$Off_{\cos} = 2,20\Delta x_d^3 - 1,11\Delta x_d^2 - 8,45\Delta x_d + 1,28 \cdot 10^{-1} \quad (7.27)$$

$$\delta_{\cos} = -4,82\Delta x_d^3 + 4,73\Delta x_d^2 - 8,49 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (7.28)$$

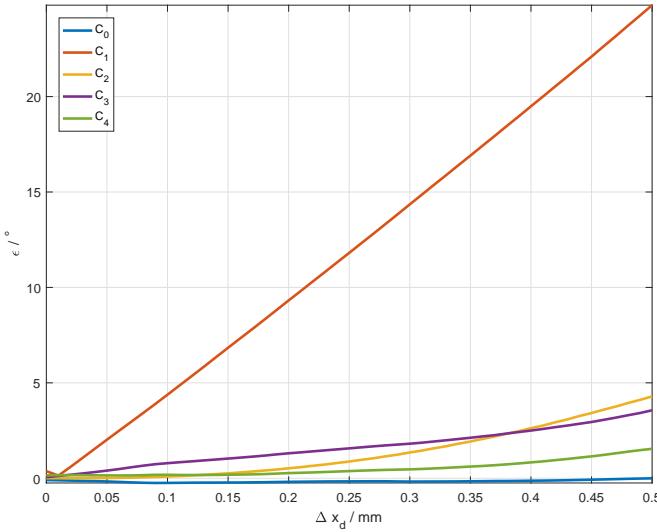


Slika 7.23: Enosmererna komponenta *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.24: 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 7.25. Po pričakovanjih najhitreje narašča prvi harmonik napake, sledi mu treji. Ostali harmoniki so zanemarljivi. Poteki so aproksimirani tudi s kubičnimi polinomi.



Slika 7.25: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od dinamične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z realnim poljem

$$C_0 = -5,61\Delta x_d^3 + 5,24\Delta x_d^2 - 9,00 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (7.29)$$

$$C_1 = -2,27\Delta x_d^3 + 3,60\Delta x_d^2 + 2,44 \cdot 10\Delta x_d - 8,53 \cdot 10^{-2} \quad (7.30)$$

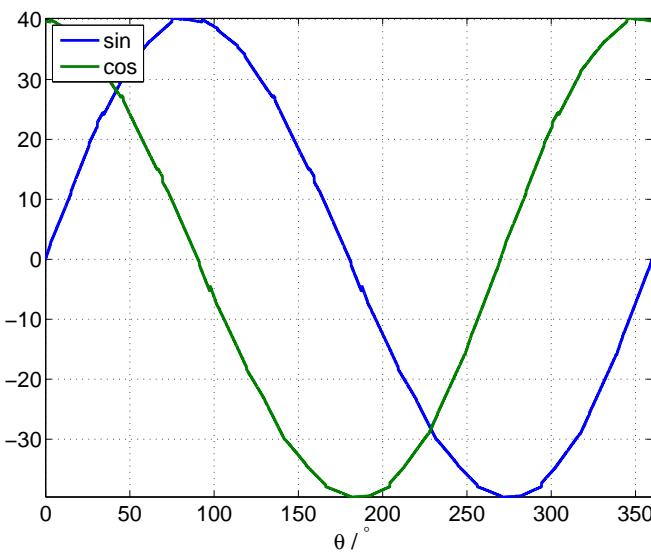
$$C_2 = -1,71\Delta x_d^3 + 2,37\Delta x_d^2 - 3,36 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 9,84 \cdot 10^{-3} \quad (7.31)$$

$$C_3 = 1,07\Delta x_d^3 - 1,37\Delta x_d^2 + 8,73\Delta x_d + 8,63 \cdot 10^{-2} \quad (7.32)$$

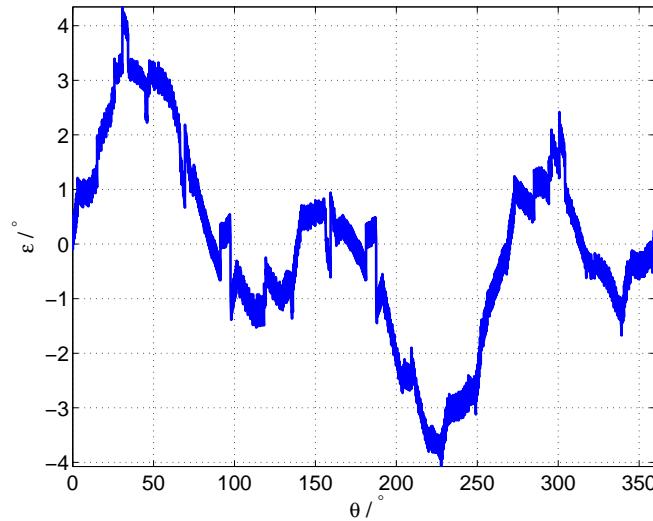
$$C_4 = 6,38\Delta x_d^3 + 4,03\Delta x_d^2 - 2,02\Delta x_d + 3,51 \cdot 10^{-1} \quad (7.33)$$

## 7.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y

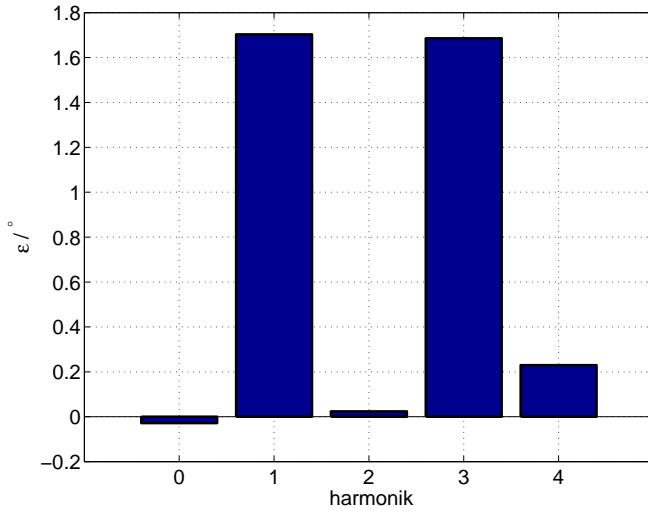
V simulacijah z linearnim poljem napaka ni bila odvisna od dinamične ekscentričnosti v smeri y. Kljub temu je bila opravljena simulacija. Rezultati so razlikujejo od pričakovanj. Spremembe v  $\sin$  in  $\cos$  ni opaziti (slika 7.26), vendar v napaki se pojavi prvi in tretji harmonik (slika 7.26). Razvoj v Fourierovo vrsto potrdi izstopanje omenjeinih harmonikov.



Slika 7.26:  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.27: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.28: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y

### 7.5.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_d$

Sprememba amplitude osnovnega harmonika od naraščanja ekscentričnosti pada (slika 7.29). Razlika amplitud ostaja nespremenjena. Enosmerna komponenta (slika 7.30) se spreminja minimalno, komponenti obeh signalov sta enaki. Vidno je tudi sofazno lezenje faznih zamikov obeh signalov (slika 7.31). Poteki so aproksimirani s kubičnimi polinomi in potrdijo enako spremenjanje.

$$A_{\sin} = +1,15\Delta y_d^3 - 2,72\Delta y_d^2 - 3,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,99 \cdot 10 \quad (7.34)$$

$$Off_{\sin} = -0,244\Delta y_d^3 - 0,292\Delta y_d^2 + 0,169\Delta y_d + 0,131 \quad (7.35)$$

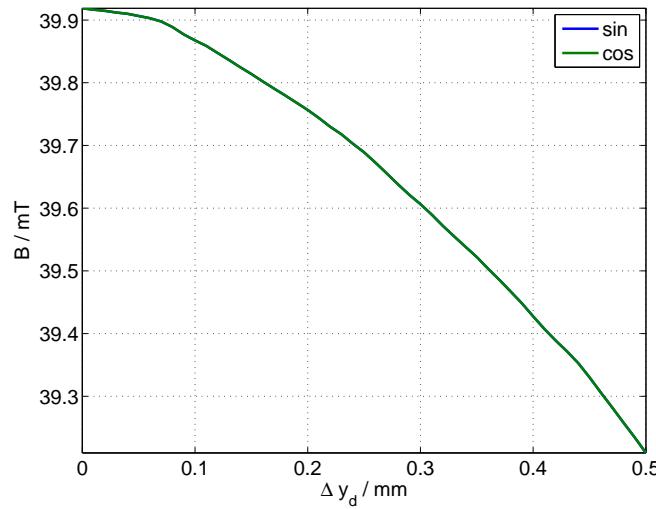
$$\delta_{\sin} = +2,39\Delta y_d^3 - 2,10\Delta y_d^2 + 9,01 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (7.36)$$

$$A_{\cos} = +1,15\Delta y_d^3 - 2,72\Delta y_d^2 - 3,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,99 \cdot 10 \quad (7.37)$$

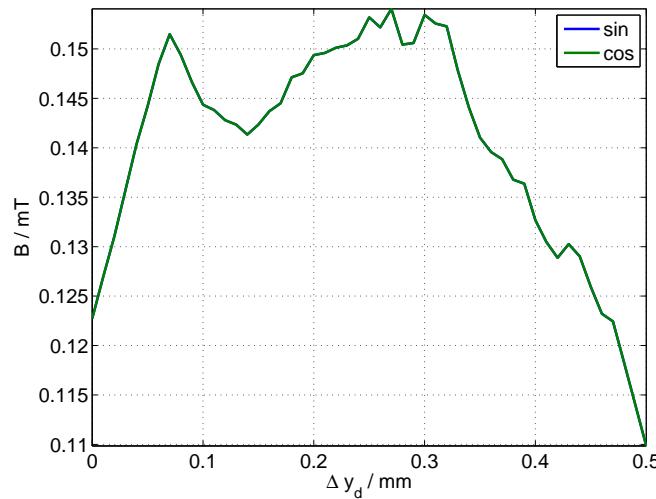
$$Off_{\cos} = -0,244\Delta y_d^3 - 0,292\Delta y_d^2 + 0,169\Delta y_d + 0,131 \quad (7.38)$$

$$\delta_{\cos} = +2,39\Delta y_d^3 - 2,10\Delta y_d^2 + 9,01 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (7.39)$$

Na sliki 7.32 je prikazana odvisnost amplitud napake ob spremjanju dinamične ekscentričnosti v smeri y. Napaka, se po pričakovanjih najbolj izrazi s prvim in

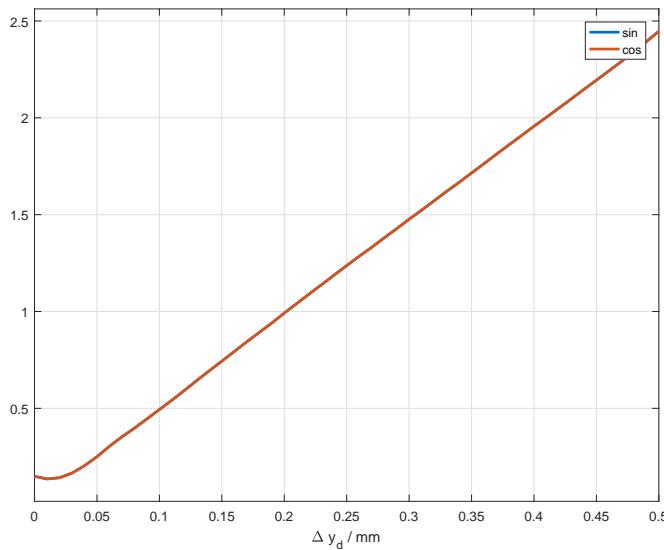


Slika 7.29: Amplituda osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y



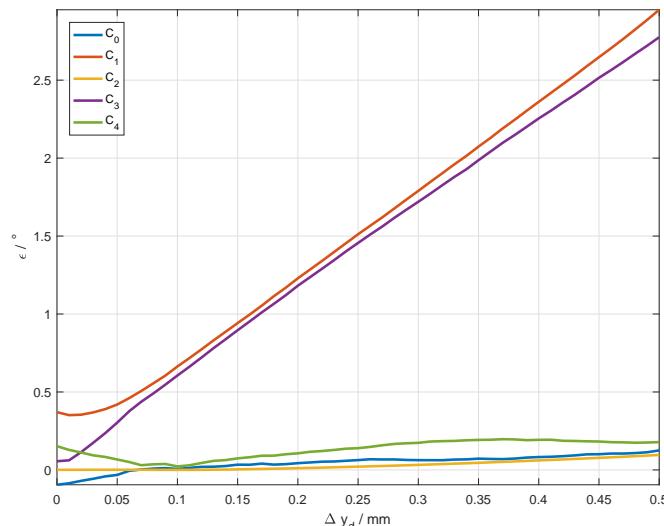
Slika 7.30: Enosmerna komponenta *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y

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 7.31: 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 7.32: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od dinamične ekscentričnosti v smeri  $y$  pri simulacijah z realnim poljem

$$C_0 = 2,50\Delta y_d^3 - 2,14\Delta y_d^2 + 8,63 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (7.40)$$

$$C_1 = -9,46\Delta y_d^3 + 7,85\Delta y_d^2 + 6,81\Delta y_d + 8,35 \cdot 10^{-2} \quad (7.41)$$

$$C_2 = -0,148\Delta y_d^3 + 0,762\Delta y_d^2 - 3,01 \cdot 10^{-2}\Delta y_d + 4,54 \cdot 10^{-4} \quad (7.42)$$

$$C_3 = -6,17\Delta y_d^3 + 4,40\Delta y_d^2 + 7,91\Delta y_d - 3,84 \cdot 10^{-2} \quad (7.43)$$

$$C_4 = 5,60\Delta y_d^3 - 1,89\Delta y_d^2 - 2,84 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,13 \cdot 10^{-1} \quad (7.44)$$

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.



# 8 Meritve

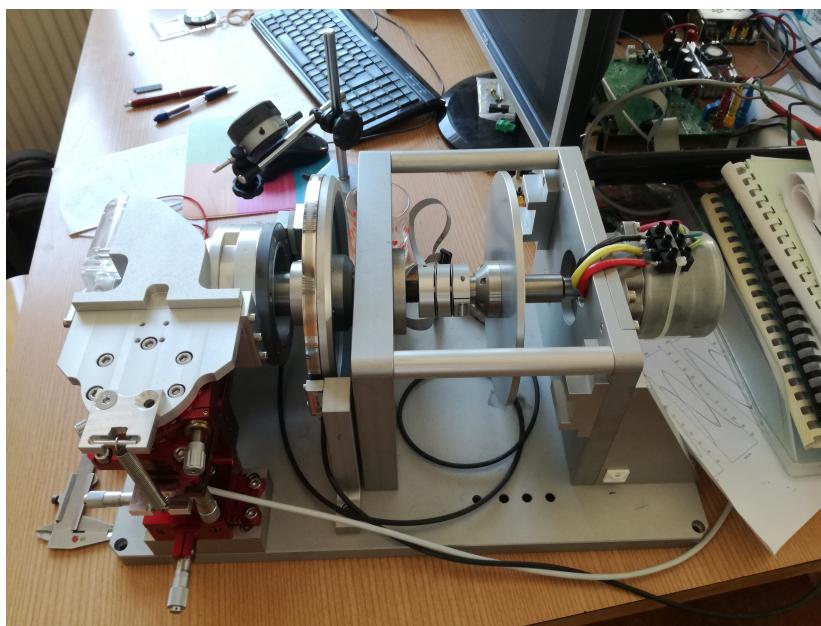
Simulacije so prikazale okvirne poteke  $\sin$  in  $\cos$  signalov ter napake ob posameznih ekscentričnostih. Na meritni napravi so bile opravljene meritve ekscentričnosti. V poglavju je opisana meritna naprava, zajem podatkov ter izvedba meritev.

## 8.1 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 8.1). Senzor RM44 je pritrjen na konstrukcijo 6-osnega mikrometrskoga nastavljalnika pozicije HTIMS601. Celotno meritno mesto je prikazano na sliki 8.2. Za manevriranje s HTIMS601 je potrebno nastaviti 6 osi. S postavitvijo koordinatnega sistema (slika 8.3), je vsak od vijakov definiral premik senzorja. Vsako os se nastavlja z enim od vijakov (slika 8.4). 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



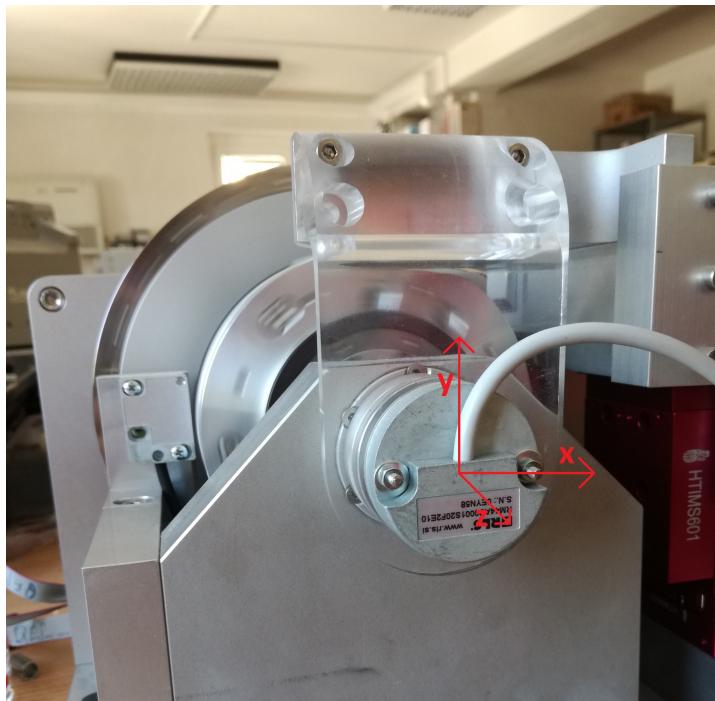
Slika 8.1: Dinamično ekscentričnost se lahko izmeri le v eni smeri



Slika 8.2: Postavitev testnega mesta

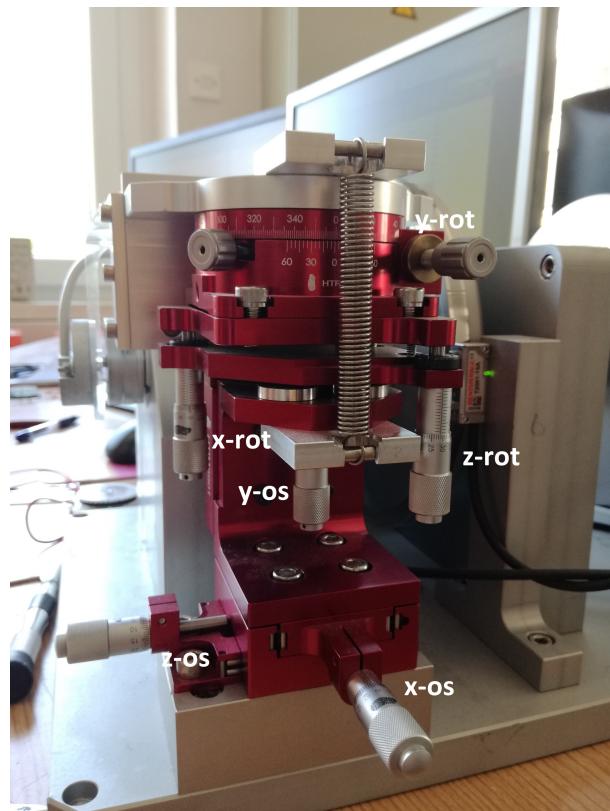
popraviti tudi nastavitev vijakov, ki senzor premikajo v translacijskih oseh.

Hitrost vrtenja pogona je nastavljiva. Hitrost vrtenja je pogona je nastavljena na 60 RPM. Hitrost ni popolnoma konstantna (slika 8.5). Vzrok je v vztrajno-

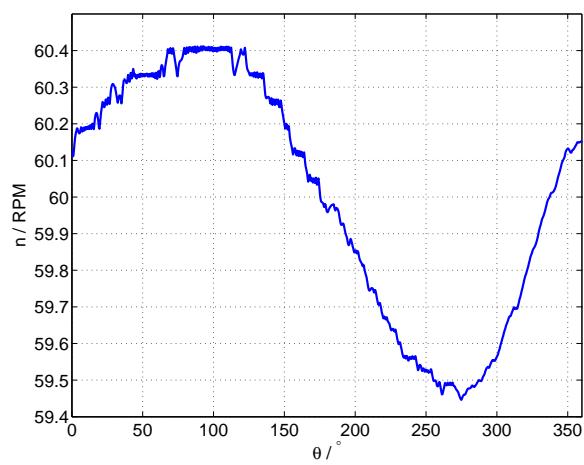


Slika 8.3: Postavitev testnega mesta

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



Slika 8.4: Naprava za nastavljanje statične ekscentričnosti

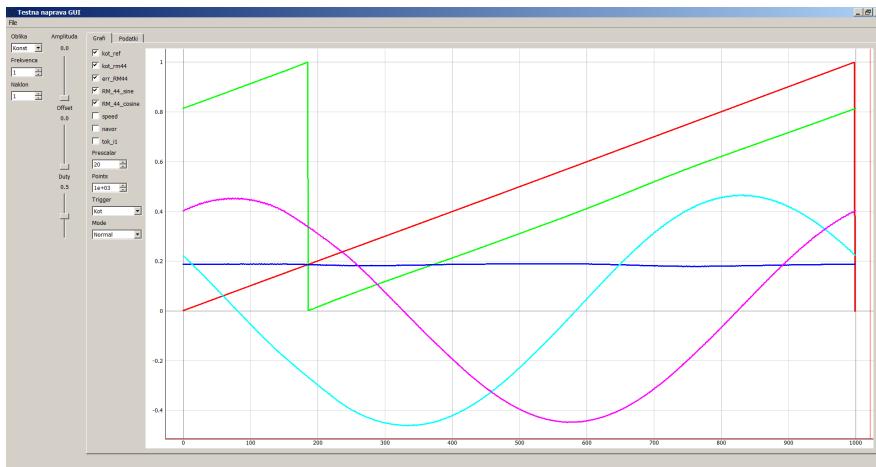


Slika 8.5: Potek hitrosti od zasuka

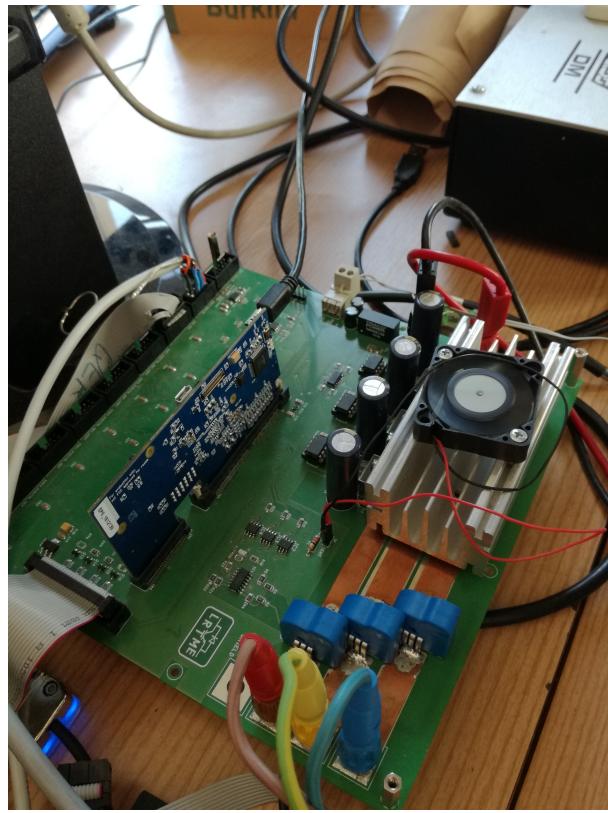
## 8.2 Zajem podatkov

Mitja Nemeč je pripravil grafični uporabniški vmesnik za prikazovanje meritvev (slika 8.6). 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 8.7) zajema podatke s pogona s frekvenco 1kHz. Referenčni inkrementalni dajalnik, se ob zagonu inicializira. V programu se podatek o kotu deli z 12595200. Definicijo 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. Definicijo območje sin in cos signala se gibljeta med  $\pm 0,5$ . Hitrost in napaka sta izračunana iz zajetih signalov. Podatki so v obliki enega paketa poslani 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 8.6 je prikazan sinusni signal prikazan kot da je zamaknjen za  $180^\circ$ . 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 8.6: Grafični vmesnik s poteki signalov

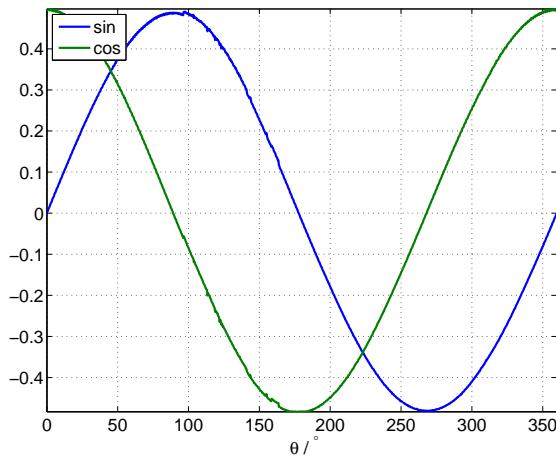


Slika 8.7: Krmilna plošča za krmiljenje pogona in obdelavo signalov s dajalnikov položaja

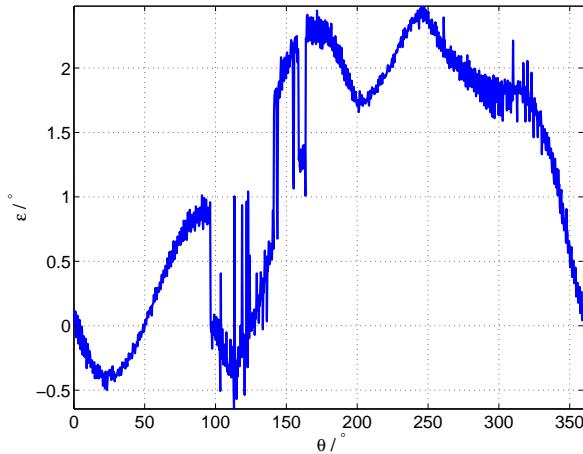
### 8.3 Senzor v izhodiščni legi

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 8.8 sta prikazana *sin* in *cos*. Enosmerni komponenti sta prisotni v obeh signalih, posledično se izrazi v napaki prvi harmonik (slika 8.9). V napaki se pojavi med  $95^\circ$  in  $140^\circ$  preskok napake. V signalih *sin* in *cos* se v tem območju pojavi fazni zamik, *sin* pri  $95^\circ$  in nato *cos* pri  $160^\circ$ . Vzroka nisem raziskoval. Z razvojem napake v Fourierovo vrsto (slika 8.10) 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.



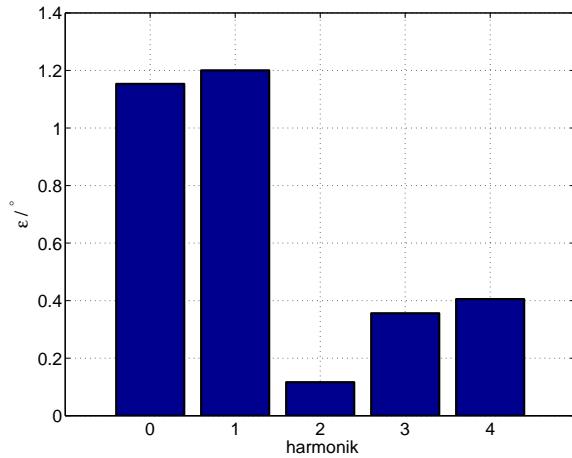
Slika 8.8: Signalna  $\sin$  in  $\cos$  pomerjena v izhodiščni legi



Slika 8.9: Napaka  $\varepsilon$  pomerjena v izhodiščni legi

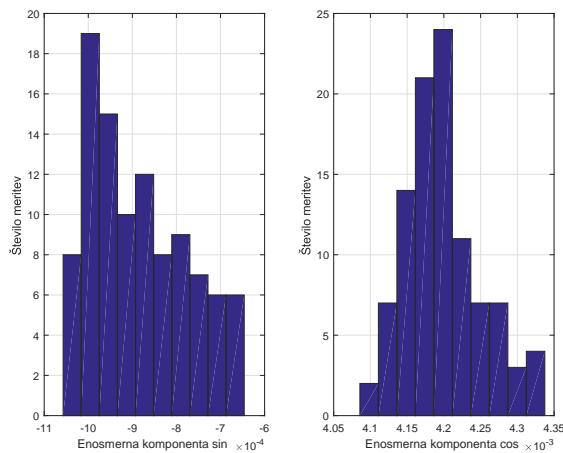
### 8.3.1 Meritve v izhodiščni legi

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 8.11. Srednja vrednost enosmerne komponente  $\sin$  je  $-8,85 \cdot 10^{-4}$ , standardna deviacija je



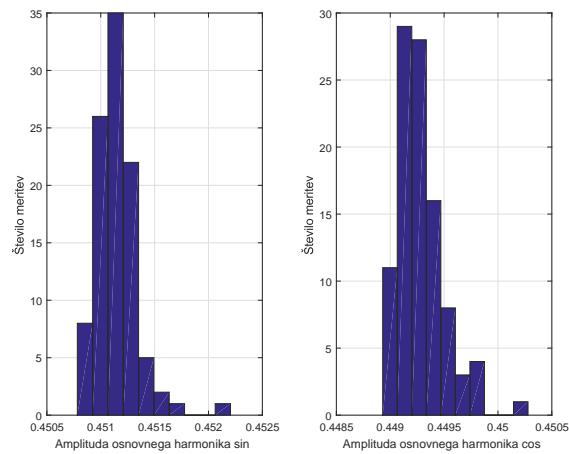
Slika 8.10: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri meritvah v izhodiščni legi

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



Slika 8.11: Porazdelitev meritev enosmerne komponente signalov  $\sin$  in  $\cos$

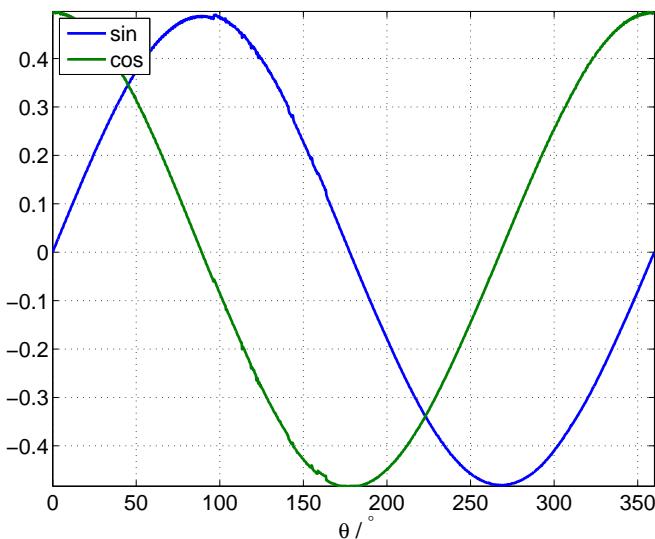
signala  $\sin$  in  $\cos$  je prikazana na sliki 8.11. Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika  $\sin$  je  $0,451$ , standardna deviacija je  $2,20 \cdot 10^{-4}$ . Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika  $\cos$  je  $0,449$ , standardna deviacija je  $1,95 \cdot 10^{-4}$ .



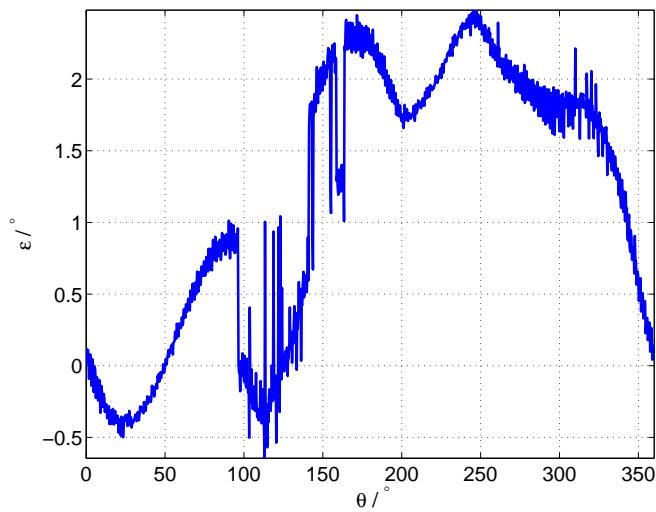
Slika 8.12: Porazdelitev meritev amplitude osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos*

## 8.4 Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi

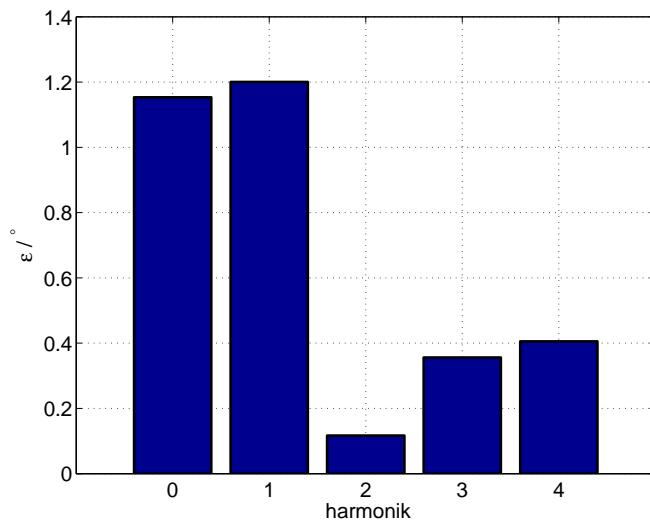
Pri meritvi je pričakovati spremembo amplitud in faznih zamikov signalov  $\sin$  in  $\cos$ . Na sliki 8.13 sta prikazana  $\sin$  in  $\cos$  pomerjena pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x. Na signalih, med 95 in  $175^\circ$  se pojavijo nenavadni skoki. Izrazijo se tudi na napaki, ki je prikazana na sliki 8.14. Med 95 in  $175^\circ$  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 8.13: Signala  $\sin$  in  $\cos$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.14: Napaka  $\varepsilon$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

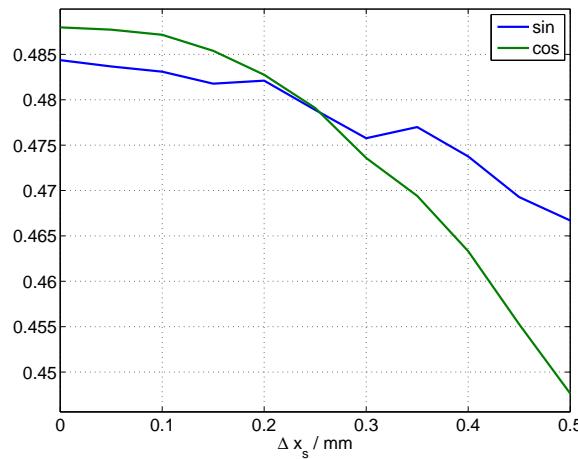


Slika 8.15: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

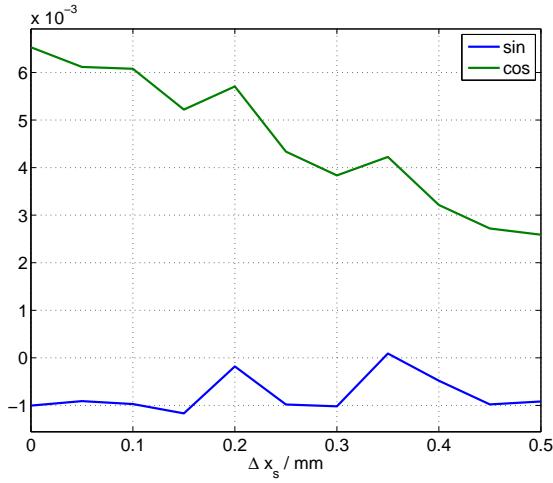
#### 8.4.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_s$

Iz simulacij se pričakuje zmanjševanje amplitude osnovnega harmonika  $\cos$  signala- Sprememba amplitud osnovnih harmonikov je prikazana na sliki 8.16.

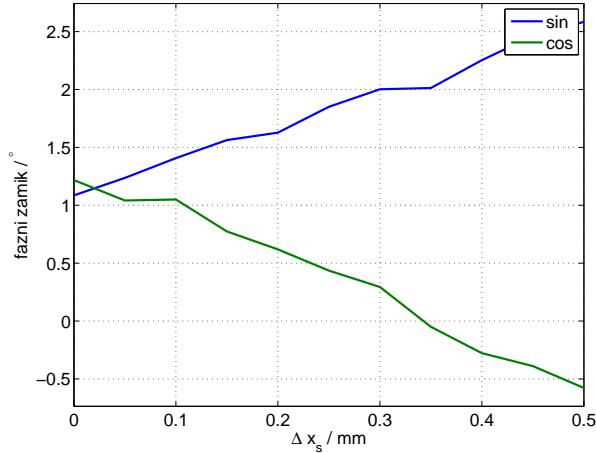
Amplituda signala  $\cos$  pada pričakovano, pada tudi amplituda signala  $\sin$ . Signala nimata enake amplitude v izhodišču, kar je posledica neidealne izhodiščne lege. Potek enosmerne komponente je prikazan na sliki 8.17. Komponenta  $\cos$  signala pada kot je bilo predvideno v simulacijah. Fazni zamik signalov je prikazan na sliki 8.18. 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 8.16: Potek amplitude osnovnega harmonika  $\sin$  in  $\cos$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.17: Potek enosmerne komponente  $\sin$  in  $\cos$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.18: Fazni zamik osnovnega harmonika  $\sin$  in  $\cos$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala  $\sin$  in  $\cos$

$$A_{\sin} = -6,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 1,71 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 1,17 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 0,484 \quad (8.1)$$

$$Off_{\sin} = -0,0388 \Delta x_s^3 + 0,0237 \Delta x_s^2 - 2,25 \cdot 10^{-3} \Delta x_s - 9,53 \cdot 10^{-4} \quad (8.2)$$

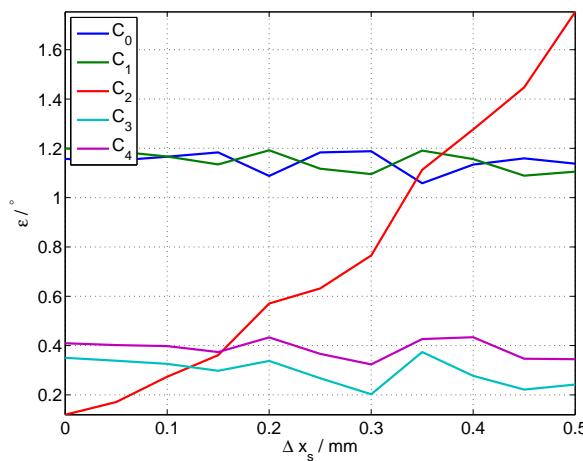
$$\delta_{\sin} = 5,32 \Delta x_s^3 - 3,55 \Delta x_s^2 + 3,49 \Delta x_s + 1,08 \quad (8.3)$$

$$A_{\cos} = 7,46 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^3 - 0,185 \Delta x_s^2 + 1,01 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 0,488 \quad (8.4)$$

$$Off_{\cos} = 0,0221 \Delta x_s^3 - 0,191 \Delta x_s^2 - 3,91 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 6,48 \cdot 10^{-3} \quad (8.5)$$

$$\delta_{\cos} = 11,5 \Delta x_s^3 - 10,6 \Delta x_s^2 - 1,14 \Delta x_s + 1,19 \quad (8.6)$$

Slika 8.19 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 8.19: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x

$$C_0 = 2,42\Delta x_s^3 - 1,71\Delta x_s^2 + 2,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,15 \quad (8.7)$$

$$C_1 = -3,01\Delta x_s^3 + 2,35\Delta x_s^2 - 6,35 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,21 \quad (8.8)$$

$$C_2 = -1,11\Delta x_s^3 + 5,06\Delta x_s^2 + 9,95 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,18 \cdot 10^{-1} \quad (8.9)$$

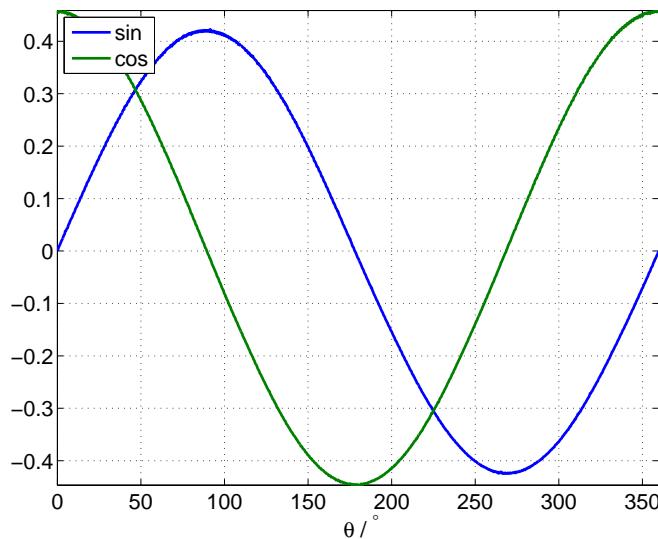
$$C_3 = -2,10\Delta x_s^3 + 1,61\Delta x_s^2 - 5,25 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 3,57 \cdot 10^{-1} \quad (8.10)$$

$$C_4 = -3,24\Delta x_s^3 + 2,29\Delta x_s^2 - 4,73 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 4,17 \cdot 10^{-1} \quad (8.11)$$

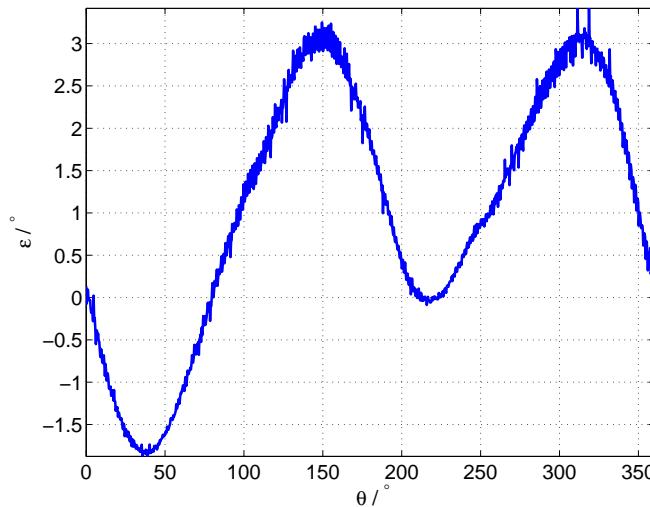
## 8.5 Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi

Slika 8.20 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 8.21). Z razvojem napake v

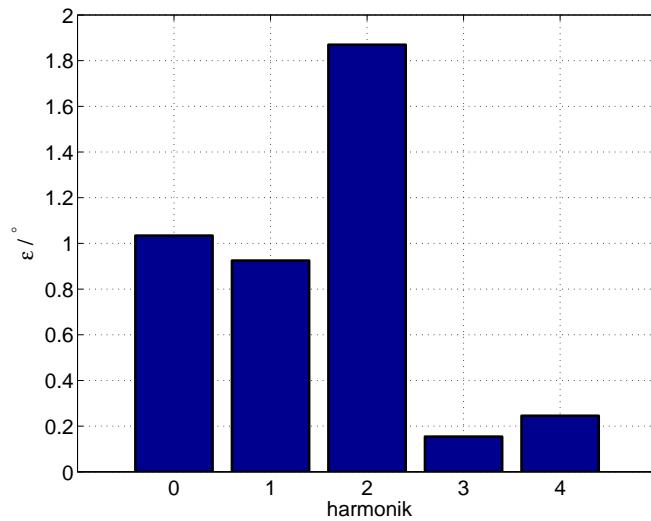
Fourierovo vrsto se potrdi povišanje drugega harmonika. Enosmerna komponenta in prvi harmonik sta nekoliko nižja.



Slika 8.20: Signala  $\sin$  in  $\cos$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



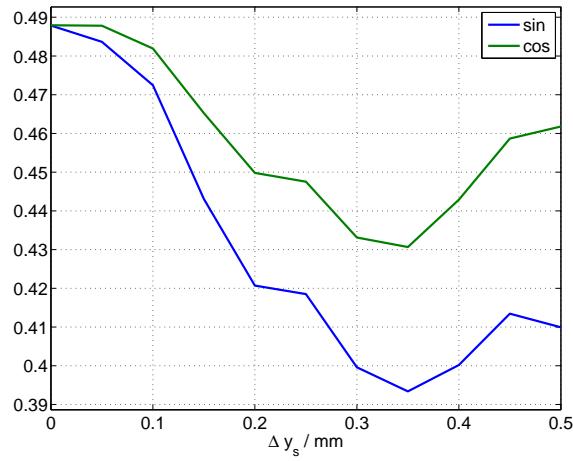
Slika 8.21: Napaka  $\varepsilon$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



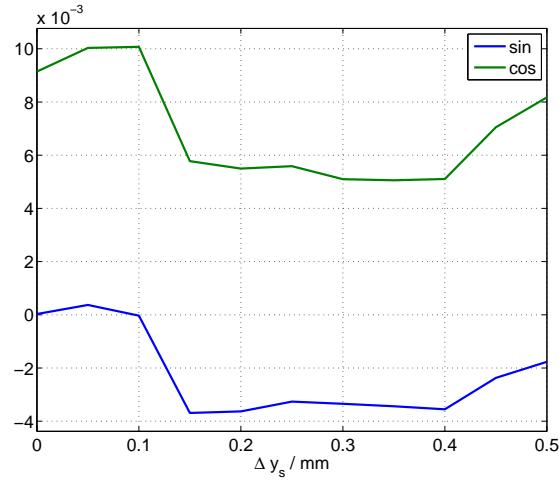
Slika 8.22: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

### 8.5.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_s$

Slika 8.23 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 8.24 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 8.23: Potek amplitude osnovnega harmonika  $\sin$  in  $\cos$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 8.24: Potek enosmerne komponente  $\sin$  in  $\cos$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y

$$A_{\sin} = 1,73\Delta y_s^3 - 6,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 2,60 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 4,94 \cdot 10^{8,1} \\ Off_{\sin} = +0,0469\Delta y_s^3 + 0,0132 \quad (8.1)$$

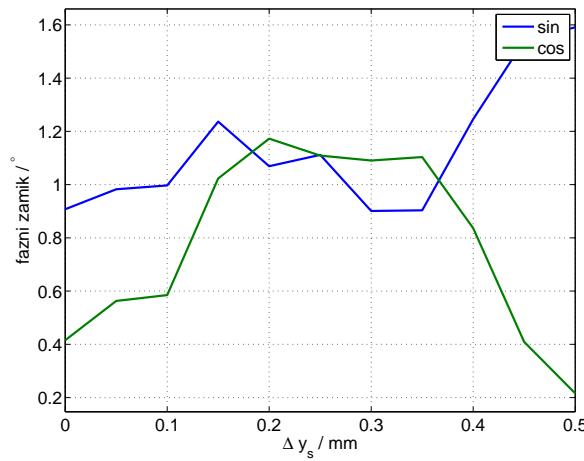
$$Deltay_s^2 - 0,0229\Delta y_s + 7,08 \cdot 10^{-4} \quad (8.1)$$

$$\delta_{\sin} = +3,37 \cdot 10\Delta y_s^3 - 2,12 \cdot 10^1\Delta y_s^2 + 3,81\Delta y_s^1 + 8,82 \cdot 10^{8,1} \quad (8.1)$$

$$A_{\cos} = +1,99\Delta y_s^3 - 9,29 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 7,82 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 4,91 \cdot 10^{8,1} \quad (8.1)$$

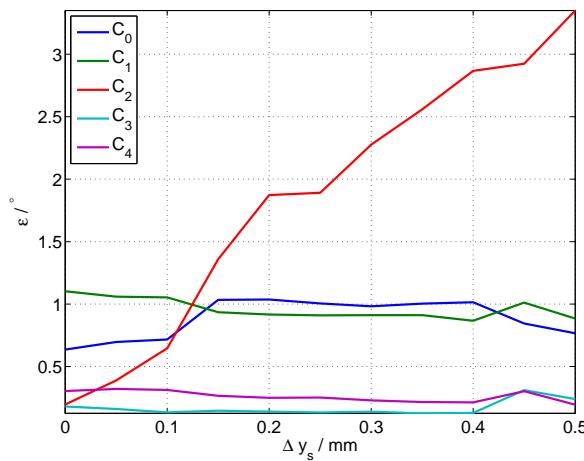
$$Off_{\cos} = 0,187\Delta y_s^3 - 0,0792\Delta y_s^2 - 9,87 \cdot 10^{-3}\Delta y_s + 9,94 \cdot 10^{8,1} \quad (8.1)$$

$$\delta_{\cos} = -1,76 \cdot 10\Delta y_s^3 - 9,77 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 + 4,42\Delta y_s + 3,59 \cdot 10^{8,1} \quad (8.1)$$



Slika 8.25: Fazni zamik osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y glede na izhodiščno lego

Slika 8.26 prikazuje poteke amplitude posameznih harmonikov napake. Kot je bilo pričakovano se spreminja le amplituda drugega harmonika.



Slika 8.26: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y

$$C_0 = -3,26\Delta y_s^3 - 3,10\Delta y_s^2 + 2,68\Delta y_s + 6,00 \cdot 10^{-1} \quad (8.19)$$

$$C_1 = -2,38\Delta y_s^3 + 3,50\Delta y_s^2 - 1,54\Delta y_s + 1,12 \quad (8.20)$$

$$C_2 = -4,15\Delta y_s^3 - 1,64\Delta y_s^2 + 8,22\Delta y_s + 8,04 \cdot 10^{-2} \quad (8.21)$$

$$C_3 = 2,30\Delta y_s^3 - 1,37 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 3,13 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 1,78 \cdot 10^{-1} \quad (8.22)$$

$$C_4 = 7,11 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 - 7,96 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 - 3,14 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 3,21 \cdot 10^{-1} \quad (8.23)$$

## 8.6 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  $\Delta x_d$ , z zavedanjem, da je mišljen potek z zasukanim magnetom.

$$A_{\sin} = 1,03\Delta x_d^3 - 5,83 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 3,77 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 3,99 \cdot 10 \quad (8.24)$$

$$Off_{\sin} = 4,24 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^3 + 6,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 - 7,57\Delta x_d + 1,29 \cdot 10^{-1} \quad (8.25)$$

$$\delta_{\sin} = -4,59\Delta x_d^3 + 7,50 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 4,12 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,38 \cdot 10^{-1} \quad (8.26)$$

$$A_{\cos} = 1,03\Delta x_d^3 - 5,83 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 3,77 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 3,99 \cdot 10 \quad (8.27)$$

$$Off_{\cos} = 4,24 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^3 + 6,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 - 7,57\Delta x_d + 1,29 \cdot 10^{-1} \quad (8.28)$$

$$\delta_{\cos} = -4,59\Delta x_d^3 + 7,50 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 4,12 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,38 \cdot 10^{-1} \quad (8.29)$$

$$C_0 = -4,95\Delta x_d^3 + 6,52\Delta x_d^2 - 4,16 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,37 \cdot 10^{-1} \quad (8.30)$$

$$C_1 = -2,62\Delta x_d^3 + 2,78\Delta x_d^2 + 2,11 \cdot 10\Delta x_d - 2,89 \cdot 10^{-2} \quad (8.31)$$

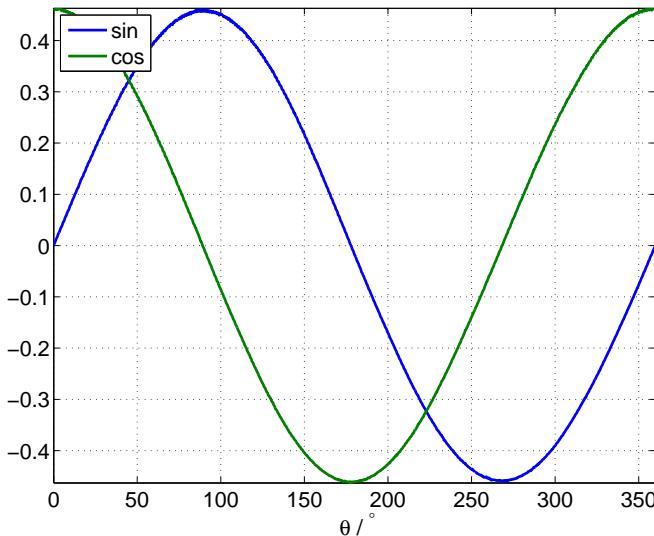
$$C_2 = 4,68 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^3 + 5,21 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 - 2,03 \cdot 10^{-2}\Delta x_d + 2,54 \cdot 10^{-3} \quad (8.32)$$

$$C_3 = -4,90 \cdot 10^{-2}\Delta x_d^3 + 8,11 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 + 7,89\Delta x_d + 1,25 \cdot 10^{-1} \quad (8.33)$$

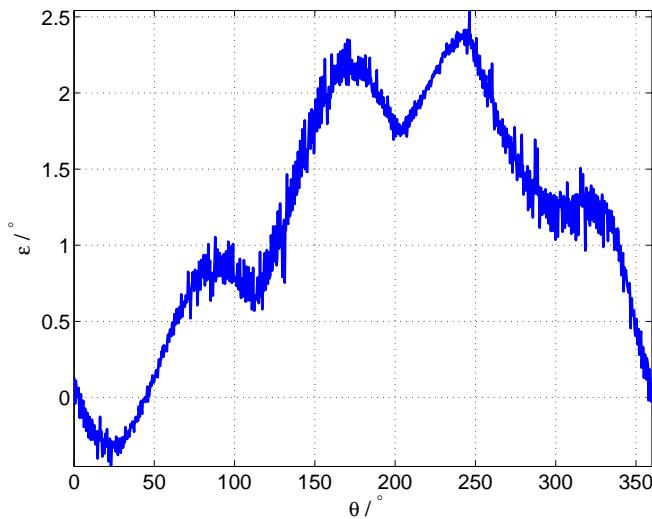
$$C_4 = 1,04 \cdot 10\Delta x_d^3 - 2,55\Delta x_d^2 - 2,82 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 2,96 \cdot 10^{-1} \quad (8.34)$$

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

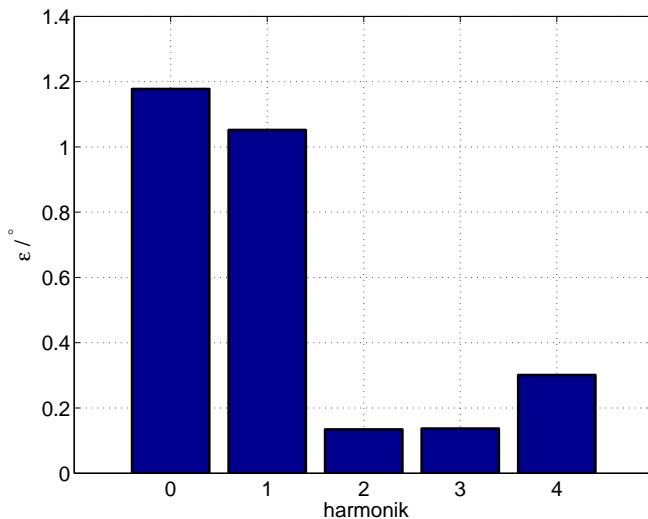
Pri dinamični ekscentričnosti v povzročeni smeri se signala *sin* in *cos* nista opazno spremenila (slika 8.27). Sprememb ni niti na napaki (slika 8.28). Spremembe niso opazne niti na napaki razviti v Fourierovo vrsto (slika 8.29).



Slika 8.27: Signala *sin* in *cos* merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.28: Napaka  $\varepsilon$  merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

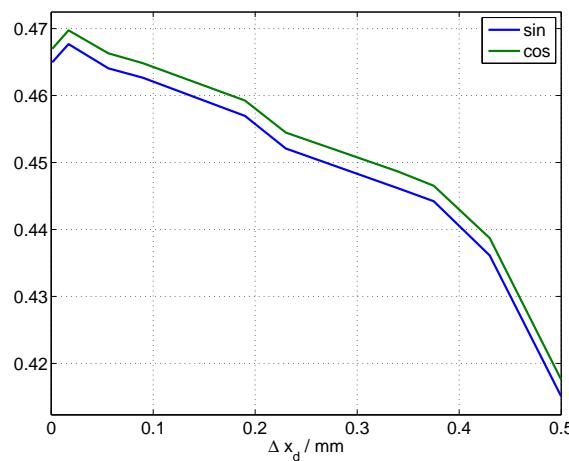


Slika 8.29: Amplitudo harmonik napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

### 8.6.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_d$

Potek spremenjanja amplitude osnovnega harmonika  $\sin$  in  $\cos$  glede na dinamično ekscentričnost pričakovano pada (Slika 8.30). 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 8.32. Fazna zamika s spremebo dinamične ekscentričnosti naraščata. V simulacijah tako velika spremembra enosmerne komponente ni bila pričakovana.



Slika 8.30: Potek amplitude osnovnega harmonika  $\sin$  in  $\cos$  pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x

Poteke prikazane na slikah 8.30 8.31 in 8.32, se lahko aproksimira s kubičnimi polinomi.

$$A_{\sin} = -0,795\Delta x_d^3 + 0,405\Delta x_d^2 - 0,106\Delta x_d + 0,468 \quad (8.35)$$

$$Off_{\sin} = (-3,42\Delta x_d^3 + 7,48\Delta x_d^2 - 5,61\Delta x_d - 2,53) \cdot 10^{-3} \quad (8.36)$$

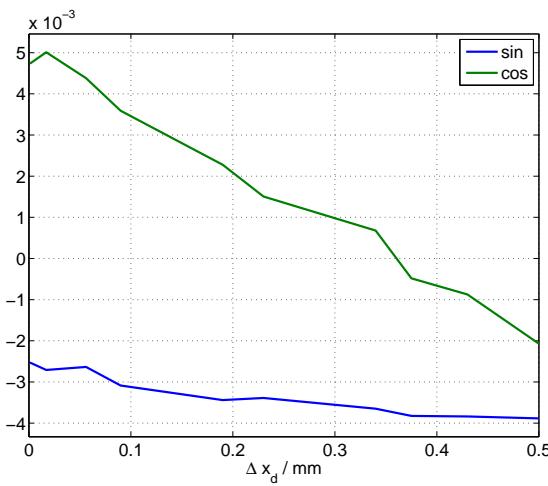
$$\delta_{\sin} = 17,6\Delta x_d^3 - 2,62\Delta x_d^2 + 1,18\Delta x_d + 8,78 \cdot 10^{-1} \quad (8.37)$$

$$A_{\cos} = -0,790\Delta x_d^3 + 0,400\Delta x_d^2 - 0,104\Delta x_d + 0,470 \quad (8.38)$$

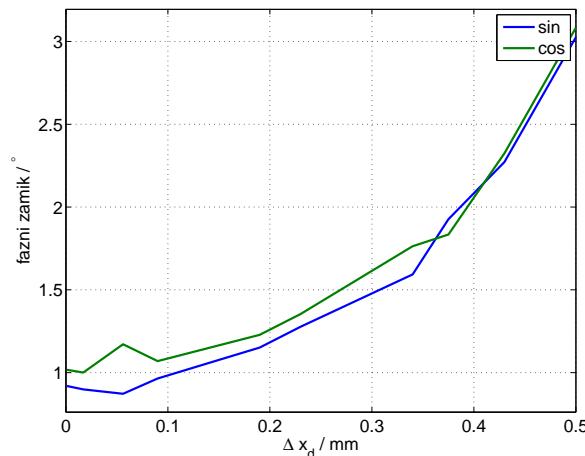
$$Off_{\cos} = (-1,5,8\Delta x_d^3 + 1,22\Delta x_d^2 - 1,63\Delta x_d + 0,505) \cdot 10^{-3} \quad (8.39)$$

$$\delta_{\cos} = 25,8\Delta x_d^3 - 8,64\Delta x_d^2 + 2,01\Delta x_d + 1,00 \quad (8.40)$$

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

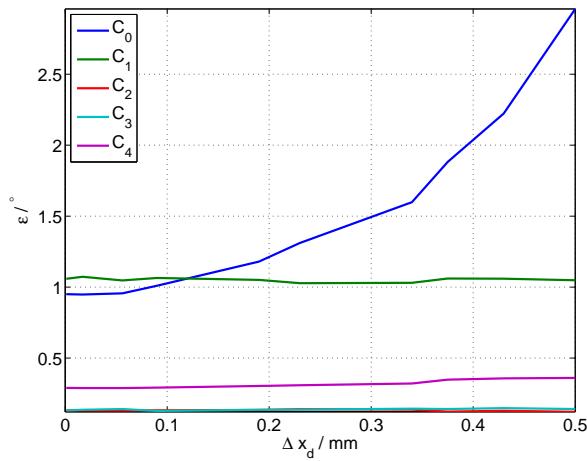


Slika 8.31: Potek enosmerne komponente  $\sin$  in  $\cos$  pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.32: 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 8.33: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x

$$C_0 = 2,03 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 5,17 \Delta x_d^2 + 1,57 \Delta x_d + 9,20 \cdot 10^{-1} \quad (8.41)$$

$$C_1 = -4,97 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 6,69 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 2,36 \cdot 10^{-1} \Delta x_d + 1,07 \quad (8.42)$$

$$C_2 = 3,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^3 - 0,188 \Delta x_d^2 + 7,10 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 0,129 \quad (8.43)$$

$$C_3 = -0,591 \Delta x_d^3 + 0,451 \Delta x_d^2 - 6,48 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 0,135 \quad (8.44)$$

$$C_4 = -0,991 \Delta x_d^3 + 0,961 \Delta x_d^2 - 8,81 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 0,291 \quad (8.45)$$



# 9 Sklep

## 9.1 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.

## 9.2 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.

### 9.3 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.

### 9.4 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.

### 9.5 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](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](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](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](http://www.ichaus.de/upload/pdf/MHM_datasheet_D2en.pdf).