

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 Uvod</b>	<b>5</b>
<b>2 Senzor RM44</b>	<b>7</b>
<b>3 Izpeljava gibanja sonde relativno na magnet ob nepravilni montaži</b>	<b>15</b>
3.1 Definicija koordinatnega sistema . . . . .	15
3.2 Izpeljava gibanja lokacije Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti . . . . .	17
3.3 Izpeljava gibanja lokacije Hall-ove sonde na magnet pri statični ekscentričnosti . . . . .	18
3.4 Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde . . . . .	19
<b>4 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov</b>	<b>21</b>
4.1 Različne amplitude . . . . .	21
4.2 Različne enosmerne komponente . . . . .	24
4.2.1 Enosmerna komponenta v signalu $B_{sin}$ . . . . .	24
4.2.2 Enosmerna komponenta signala $B_{cos}$ . . . . .	25
4.2.3 Enosmerna komponenta pri obeh signalih . . . . .	27
4.3 Neorotogonalnost signalov . . . . .	28

4.4	Napaka zaradi spremembe amplitudo in faze zaradi enega parametra	31
<b>5</b>	<b>Linearni model magnetnega polja</b>	<b>33</b>
5.1	Brez ekscentričnosti . . . . .	34
5.2	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi . . . . .	36
5.2.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x . . . . .	38
5.3	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi . . . . .	42
5.3.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y . . . . .	44
5.4	Dinamična ekscentričnost v smeri x osi . . . . .	47
5.4.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x . . . . .	50
5.5	Dinamična ekscentričnost v smeri y in sprememba razdalje Hallovih sond od magneta . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Realni model magnetnega polja</b>	<b>55</b>
6.1	Brez napake . . . . .	56
6.2	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi . . . . .	58
6.2.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x . . . . .	60
6.3	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi . . . . .	63
6.3.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y . . . . .	65
6.4	Dinamična ekscentričnost v smeri x . . . . .	68
6.4.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x . . . . .	70

6.5	Dinamična ekscentričnost v smeri y . . . . .	72
6.5.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri y . . . . .	74
<b>7</b>	<b>Meritve</b>	<b>79</b>
7.1	Oprema in postavitev merilnega mesta . . . . .	79
7.2	Zajem podatkov . . . . .	83
7.3	Senzor v izhodiščni legi . . . . .	85
7.3.1	Meritve v izhodišni legi . . . . .	86
7.4	Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi . . . . .	89
7.4.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x . . . . .	91
7.5	Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi . . . . .	93
7.5.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y . . . . .	95
7.6	Meritve dinamične ekscentričnosti v smeri x-osi . . . . .	98
7.6.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x . . . . .	99
<b>8</b>	<b>Primerjava rezultatov simulacij in meritev</b>	<b>105</b>
<b>9</b>	<b>Sklep</b>	<b>107</b>
9.1	Merjenje kota in vpliv na napako . . . . .	107
9.2	Nepravilna montaža . . . . .	107
9.3	Oblika napake . . . . .	108
9.4	Izvedba meritev . . . . .	108

9.5 Komentar rezultatov . . . . .	108
-----------------------------------	-----

## 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 Z-komponente gostote magnetnega pretoka magnetnega enkoderja, zaradi nepravilne montaže enkoderja ali magnetnega aktuatorja. Predstavljen je simulacijski model enkoderja, ter vpliv nepravilne montaže na spremjanje lokacije Hallove sonde relativno na magnet. Opisan je vpliv nepravilnih vhodnih signalov na napako izhoda funkcije atan2(). Simulacije so primerjane z meritvami na enkoderju RM44. Opravljene so bile simulacije na linearno aproksimirani Z-komponenti gostote magnetnega pretoka, ter na numerično izračunani Z-komponenti gostote magnetnega pretoka simuliranega realnega magneta. Tehnologija in princip senzorja RM44 je poslovna skrivnost, zato je bil postavljen lasten simulacijski model enkoderja, s pričakovanji, da se bodo rezultati simulacij razlikovali 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 že leli 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[?]. 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. Poznamo magnetne, optične, induktivne in druge[?].

Pri magnetnem principu senzor dajalnika zaznava spremembo jakosti in smeri gostote magnetnega pretoka. Gostoto magnetnega pretoka se povzroči z magnetnim akutuatorjem. Gostoto magnetnega pretoka se meri s Hallovimi sondami, AMR senzorji ipd. Iz zajetega polja sledi izračun dejanskega položaja. Dajalnik položaja, ki pretvarja merjeno količino v informacijo imenujemo enkoder[?].

Kot vsak meritni element, ima tudi magnetni enkoder napako. Napaka se lahko pojavi ob narobe merjenem magnetnem polju[?]. 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 signalu kota. Želi se predstaviti čim bolj preprost model, ki bo dovolj točno opisal dogajanje ob prisotnosti napake in to prekontrolirati.

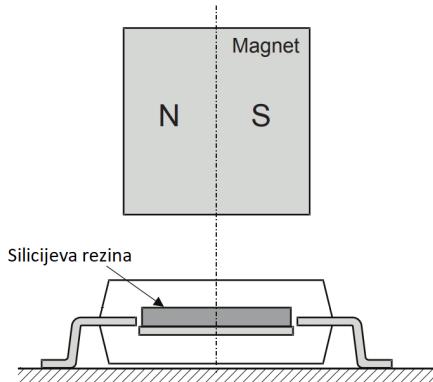
## 2 Senzor RM44

Senzor RM44 je 13 bitni enkoder, primeren za merjenje zasuka rotirajočega pogona[?]. Enkoder se nahaja v robustem ohišju, zato je primeren za delovanje v težkem industrijskem okolju. Oblika izhodnega podatka o zasušku, je prilagodljiva na sistem aplikacije v kateri bo uporabljen[?]. Izhod senzorja je lahko analogni v obliki sinusnega in kosinusnega 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 nastavljanja resolucije od 5 do 13 bitov na obrat [?][?]. Senzor na katerem so bile opravljene meritve je imel 12 bitno resolucijo in 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 vrtenja (slika 2.2). S strani proizvajalca senzorja je priporočen radialno polariziran magnet s premerom 4 mm in višino 4 mm (slika 2.3).



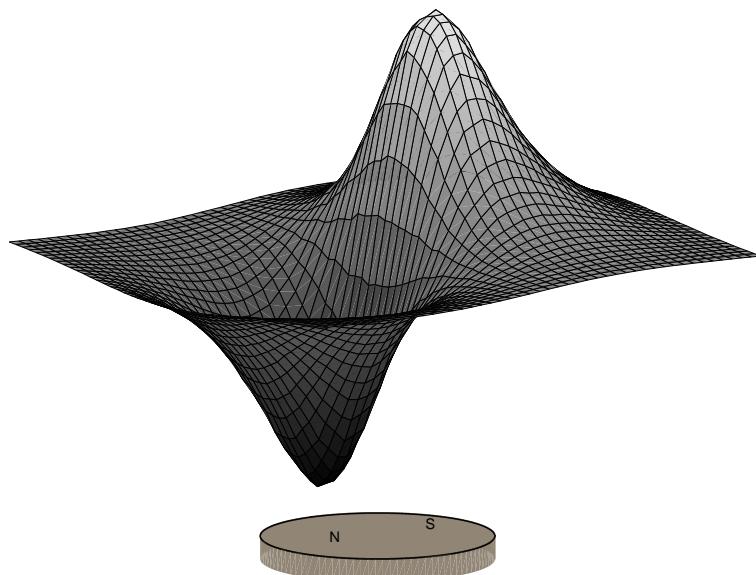
Slika 2.2: Nahajanje radialno polariziranega magneta nad čipom AM256 [?]



Slika 2.3: Primer magneta predlagan s strani proizvajalca RLS

Na siliciju čipa so razporejene Hallove sonde za meritev Z-komponento gostote magnetnega pretoka. Za merjenje Z-komponento gostote magnetnega pretoka je lahko čip obrnjen kot na sliki 2.2, ali obrnjen na glavo. Med silicijevim rezinom in magnetom se pri taki montaži nahaja še tiskanina. Tiskanina nima magnetnih lastnosti in ne vpliva na Z-komponento gostote magnetnega pretoka povzročene z magnetnim aktuatorjem. Pri montiranju senzorja je potrebno ohraniti predpisano razdaljo med magnetom in silicijevim rezinom (1,8mm).

Na sliki 2.4 je prikazana oblika Z komponente vektorja gostote magnetnega pretoka povzročene z radialno polariziranim cilindričnim magnetom. Slika 2.4

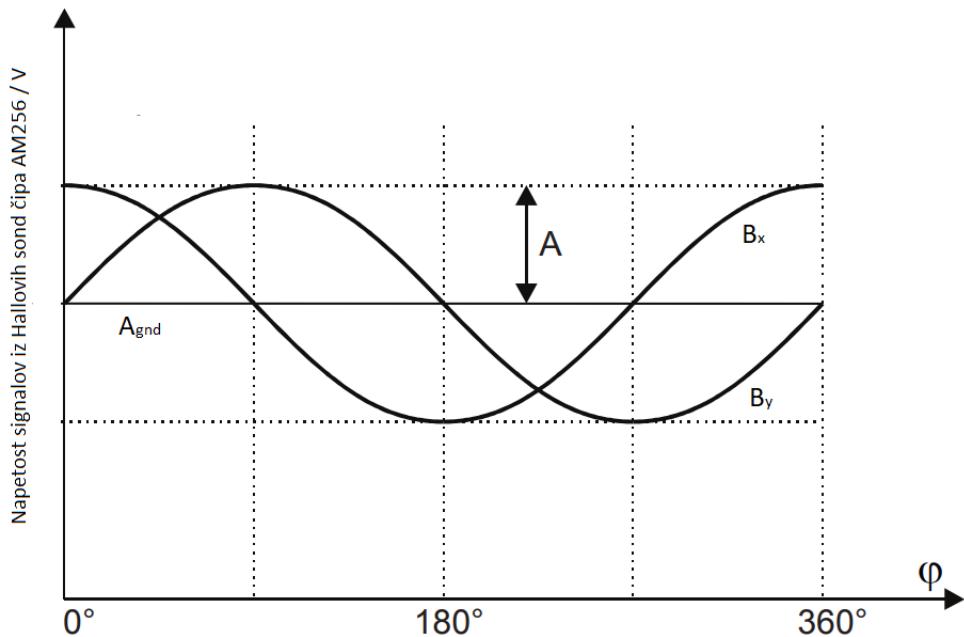


Slika 2.4: Oblika Z komponente gostote magnetnega pretoka nad magnetom

prikazuje rezultat Z-komponente gostote magnetnega pretoka simuliranega magneta, ki ga priporoča proizvajalec senzorja.

S pravilno postavljivo Hallovih sond in obliki Z-komponente gostote magnetnega pretoka povzročene z magnetom, se ob prostorskem zajemu zajame 2 signala kosinusne oblike, ki sta za  $90^\circ$  prostorsko zamaknjena drug na drugega (slika 2.5). Prvi zajet signal, fazno prehiteva za  $90^\circ$  drugi signal in je v delu poimenovan  $B_{cos}$ , drugi signal, je poimenovan  $B_{sin}$ .

Iz signalov, zajetih s Hallovih sond, se izračuna kot. Metod, za numeričen

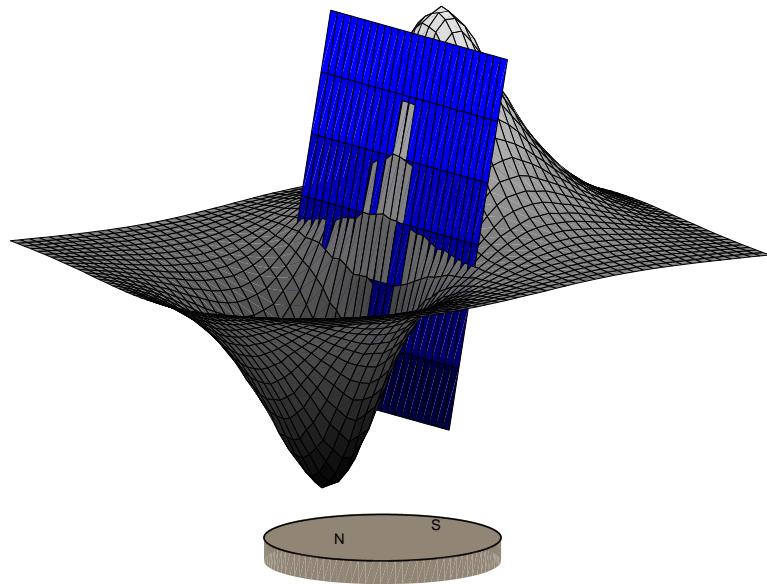


Slika 2.5: Analogna signala zajeta s Hallovimi sondami [?]

izračun kota iz podatkov kot sta signala  $B_{cos}$  in  $B_{sin}$  je več (CORDIC, SAR, sledilna metoda, itd [?]). Osnovni princip metode je izračun funkcije atan2( $B_{sin}$ ,  $B_{cos}$ ) [?].

Osnovno delovanje senzorja se lahko ponazoriti, s 4 Hallovimi. Sonde so enakomerno razporejene po krožnici s središčem v osi vrtenja in radijem  $r_0$ . Z diferencialnim odčitavanjem pomerjenih signalov nasproti ležečih Hallovih sond, se signaloma  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  odstrani enosmerno komponento in poviša amplitudo.

Signalata  $B_{cos}$  in  $B_{sin}$  sta vhodna parametra v funkcijo atan2(), ki izračuna kot zasuka (slika 2.7). Za oceno napake, se lahko Z komponento gostote magnetnega pretoka v okolici središča magneta, aproksimira z ravnino (slika 2.6).

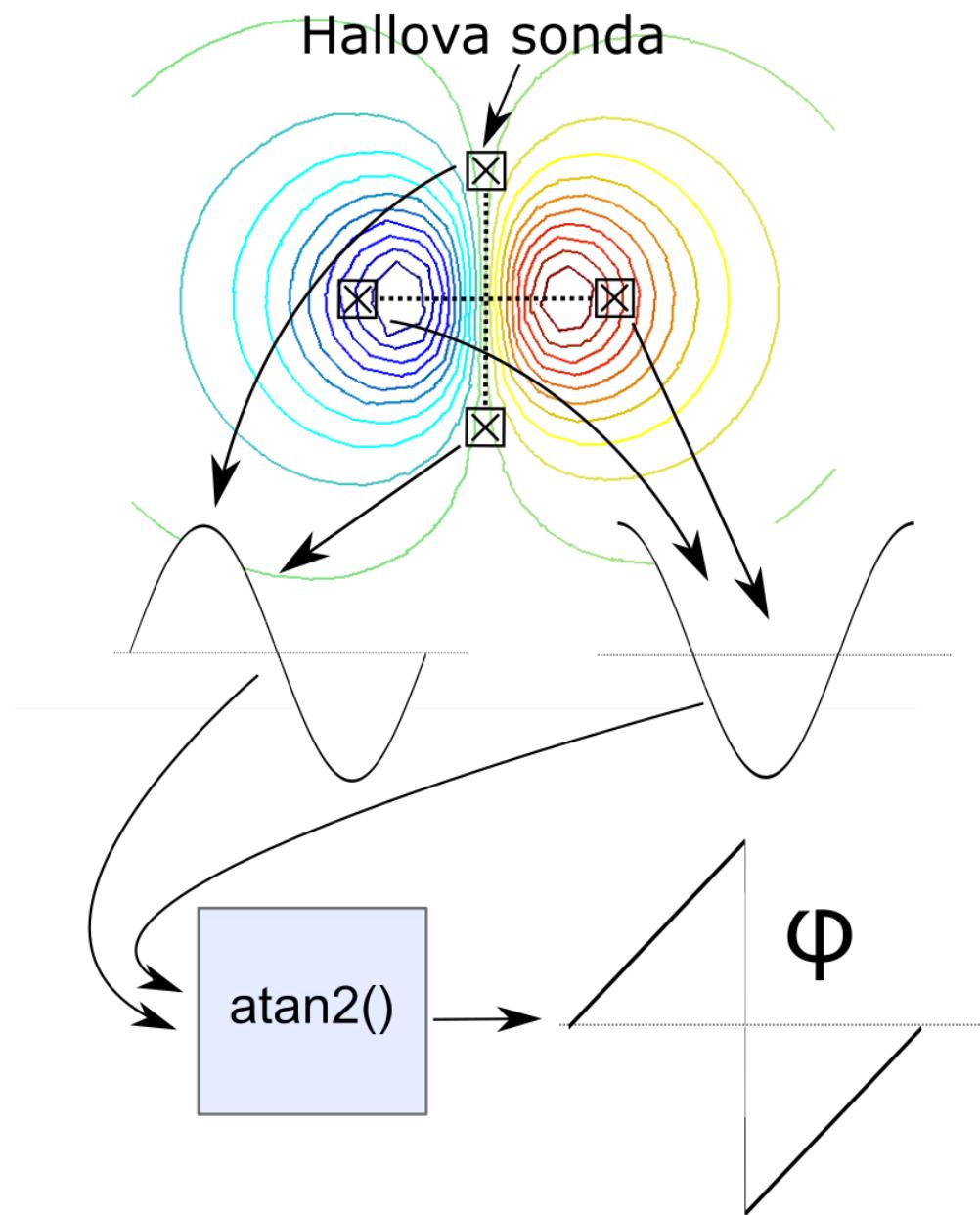


Slika 2.6: Oblika Z komponente gostote magnetnega pretoka nad magnetom in aproksimirano ravnino v središču magneta

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 (2.1). Za lažje razumevanje bo  $k$  enak  $1 \frac{\text{mT}}{\text{mm}}$ .

$$B_z(x, y) = k \cdot x. \quad (2.1)$$



Slika 2.7: Osnovni model, za izračun kot zasuka



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

Nepravilna montaža bo vplivala na Hallove sondi simulacijskega modela enako. Vpliv izmika senzorja in magneta, na relativno gibnaje sonde nad magnetom bo prikazano na eni sondi.

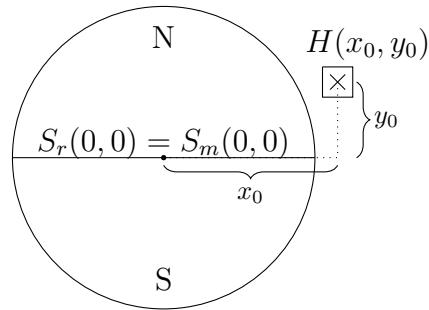
Izmik sredine senzorja iz osi vrtenja bo med spremenjanjem dejanskega kota zasuka statičen, njegova lokacija se nebo spreminja na os vrtenja. Ta izmik je poimenovan statična ekscentričnost.

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.

### 3.1 Definicija koordinatnega sistema

Naj bo definiran kartezični koordinatni sistem, z v izhodišču postavljenim radijalno polariziranim magnetom ( $S_m(0, 0)$ ). V izhodišču se nahaja tudi os vrtenja ( $S_r(0, 0)$ ). Na poljubno točko  $H(x_0, y_0)$ , vendar ne v izhodišče je postavljena Hall-ova sonda (slika 3.1).

Z zasukom magneta za kot  $\theta$ , se lokacija sonde glede na magnet spremeni. Nova lokacija sonde glede na magnet je enaka, če se namesto magnet, zavrti sondu za kot  $-\theta$ . Nova lokacija sonde glede na magnet je v točki  $(x, y)$ . Novo lokacijo sonde glede na magnet v odvisnosti od zasuka magneta za kot  $\theta$ , opiše



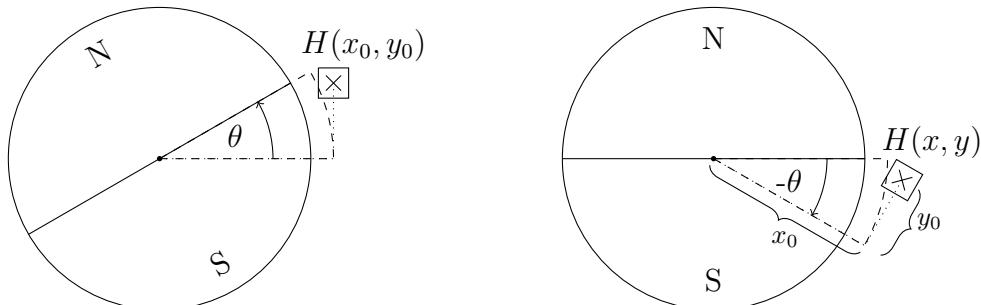
Slika 3.1: Definicija koordinatnega sistema z magnetom in Hall-ovo sondom

enačba (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[?], se (3.1) poenostavi v:

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



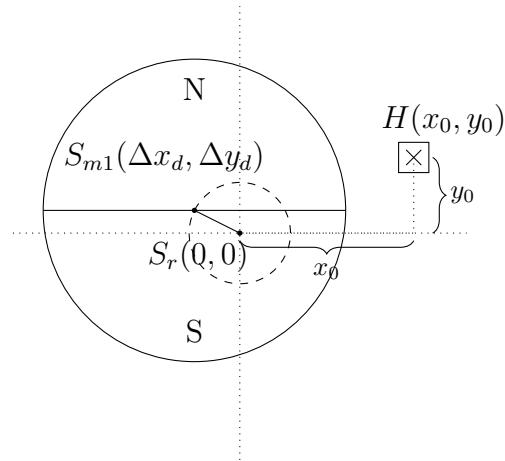
(a) Zasukan magnet za kot  $\theta$

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

Slika 3.2: Sprememba položaja glede na magnet ob rotaciji

### 3.2 Izpeljava gibanja lokacije Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti

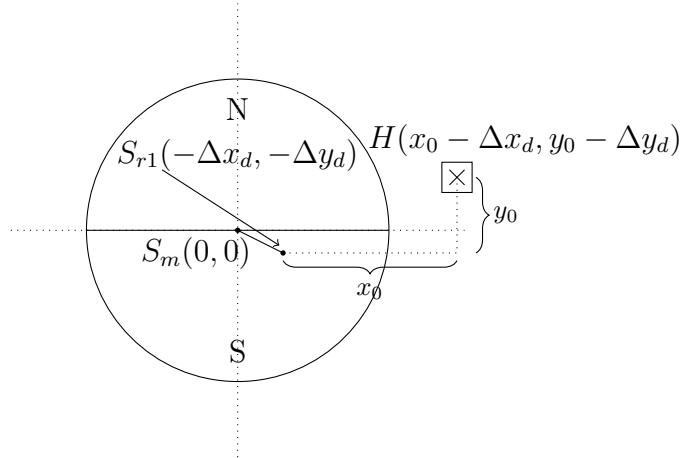
Magnet je postavljen v izhodišče koordinatnega sistema  $S_m(0, 0)$ , kjer je tudi os vrtenja  $S_r(0, 0)$ . Dinamična ekscentričnost povzroči premik središča magneta v točko  $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$  (Slika 3.3). Os vrtenja je ostaja v izhodišču koordinatnega sistema. Središce magneta  $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$  ob rotaciji opisuje okoli osi vrtenja krožnico z radijem  $\sqrt{\Delta x_d^2 + \Delta y_d^2}$ .



Slika 3.3: Definicije dinamične ekscentričnosti

Naj ostane magnet v izhodišču  $S_m(0, 0)$  in naj se spremeni lokacija Hallove sonde in os vrtnja za  $(-\Delta x_d, -\Delta y_d)$  (Slika 3.4). Sonda se tako kot v prejšnjem poglavju zavrti v nasprotno stran okoli osi vrtenja. Os vrtenja je v točki  $(-\Delta x_d, -\Delta y_d)$ . Sonda se giblje po krožnici s središčem v točki  $(-\Delta x_d, -\Delta y_d)$ . Spreminjanje lokacije sonde glede na magnet opisuje (3.3)

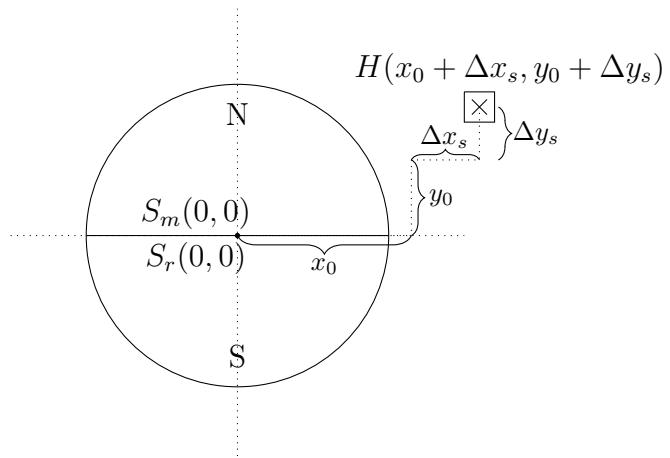
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (3.3)$$



Slika 3.4: Premik osi vrtenja in sonde za velikost dinamične ekscentričnosti

### 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  $H_1(x_0 + \Delta x_s, y_0 + \Delta y_s)$ . Z zasukom magneta je razdalja med sondom in osjo vrtenja konstantna. Z miselnim obratom vrtenja sonde v nasprotni smeri se gibanje sonde izrazi kot gibanje po krožnici z novim radijem  $\sqrt{(x_0 + \Delta x_s)^2 + (y_0 + \Delta y_s)^2}$  (3.4). Novo lokacijo sonde glede na magnet opiše (3.4). Ob povzročeni statični



Slika 3.5: Definicije statične ekscentričnosti

ekscentričnosti se sonda giblje po drugem radiju.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x_s \\ y_0 + \Delta y_s \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

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

(3.3) in (3.4) sta med seboj neodvisni zato se ju lahko združi. Z miselnim obratom rotacije sonde v nasprotno smer, kot bi se drugače vrtel magnet, so bili pridobljeni rezultati lokacije sonde relativno na magnet. Dinamična ekscentričnost vpliva na premik krožnice, po kateri se navidezno giblje sonda. Statična ekscentričnost, povzroči spremembo radija, po kateri se navidezno giblje sonda.

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



## 4 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov

Izhod enkoderja je podatek o zasuku. Iz pomerjene gostote magnetnega pretoka, sledi izračun kota preko inverza funkcije tangens. Funkcija se v MATLAB-u imenuje atan2();. Funkcija atan2(); vrne rezultat v radianih, funkcija atan2d(); vrne rezultat v stopinjah[?][?].

Različne literature [?] [?] [?] [?] opisujejo napake zaradi popačitve signalov  $B_{sin}$   $B_{cos}$ . Napaka je izražena v obliki enosmerne komponente ter prvega oz. drugega harmonika, kateri od primera do primera bolj izstopa. V nadaljevanju je prikazano, kako popačena signala kot vhoda v funkcijo atan2d(); vplivata na napako, ter kako se napaka odraža tudi na višjih harmonikih. Za majhna popačenja vhodnih signalov, literatura nakazuje linearno naraščanje napake.

### 4.1 Različne amplitude

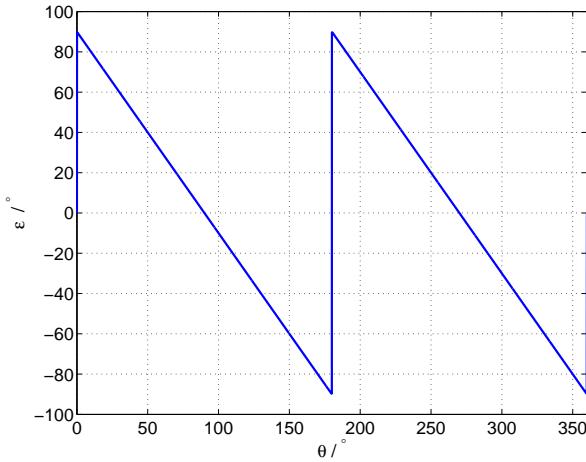
Prvi primer popačenih vhodov v funkcijo atan2d(); je neenakost amplitud vhodnih signalov. Signala imata poljubne amplitude, vendar se izhod funkcije atan2d(); nebo spremenil, če se obe amplitudi deli s poljubnim številom. Če se za poljubno število vzame amplitudo signala  $B_{cos}$ , imata singala novo definirani amplitdi. Razmerje amplitud med  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je označeno s  $k$ .

$$B_{sin} = k \sin(\theta) \quad (4.1)$$

$$B_{cos} = \cos(\theta) \quad (4.2)$$

Funkciji sta vstavljeni v atan2d(); in parameter  $k$  je limitiran v neskončnost. Izhod atan2d(); je konstanta, napaka  $\varepsilon$  je prikazana na sliki 4.1.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \text{atan2}(k \sin \theta, \cos \theta) - \theta \quad (4.3)$$



Slika 4.1:  $\varepsilon$  ob limiti  $k$  v neskončnost

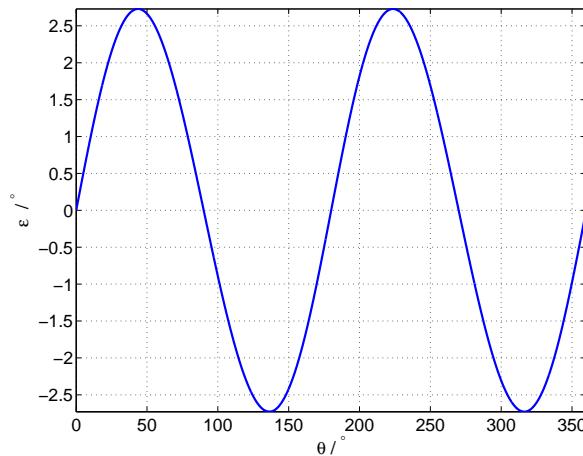
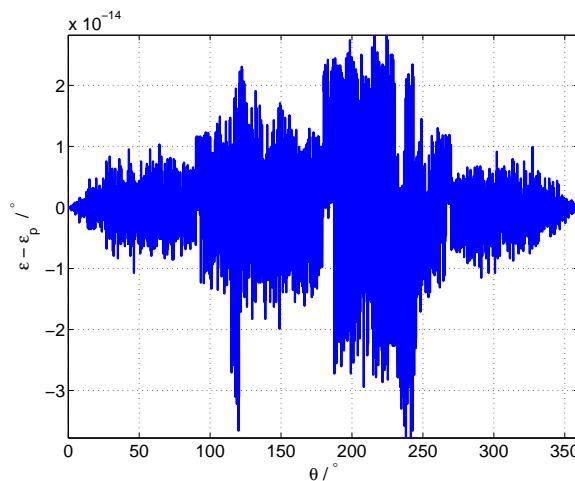
Potek  $\varepsilon$  se lahko zapiše s Fourierovo vrsto [?]:

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin 2n\theta \quad (4.4)$$

V napaki nastopajo le sodi harmoniki. Z opazovanjem sodih harmonikov napake pri različnih  $k$ -jih in uporabo Curve Fitting tool [?], je bila določena funkcija poteka napake v odvisnosti od  $k$ .

$$\varepsilon_p = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{k-1}{k+1}\right)^n \sin 2n\theta \quad (4.5)$$

Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d(); in napako izračunano z (4.5) je prikazana na sliki 4.3. Ostala je le numerična napaka. MATLAB pri

Slika 4.2: Napaka  $\varepsilon$  pri  $k=1,1$ Slika 4.3: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d(); in izračnunano napako z vrsto (4.5), pri čemer je bilo uporabljenih prvih 15 členov pri  $k = 1,1$ 

funkciji atan2d(); izračuna najprej funkcijo atan2(); in rezultat nato pomnoži z  $\frac{360}{2\pi}$ . Izhod funkcije je nato v stopinjah. Če se rezultat s slike 4.3 pomnoži z  $\frac{2\pi}{360}$  je rezultat v območju numerične napake MATLAB-a.

## 4.2 Različne enosmerne komponente

Naj imata vhdna signala enaki amplitudi enaki 1. Signaloma se definira enosmerna komponenta v velikosti  $B_0$  signalu  $B_{sin}$  in  $A_0$  signalu  $B_{cos}$ . Enosmerna komponenta se lahko pojavi v enem ali obeh vhodnih signalih.

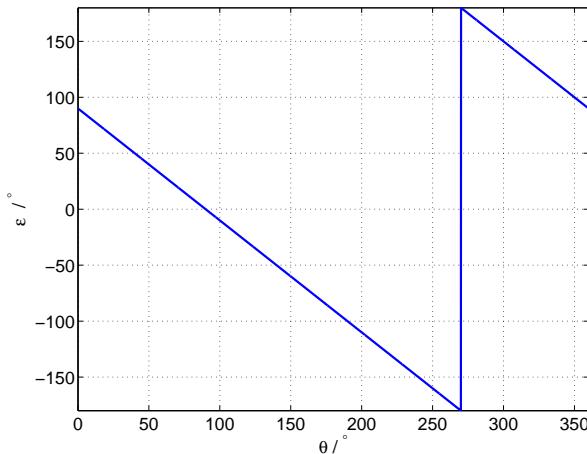
$$B_{sin} = \sin(\theta) + B_0 \quad (4.6)$$

$$B_{cos} = \cos(\theta) + A_0 \quad (4.7)$$

V podpoglavljih so obravnavani različni primeri enosmernih komponent v vhodnih signalih  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ .

### 4.2.1 Enosmerna komponenta v signalu $B_{sin}$

Z limito  $B_0$  v neskončnost in  $A_0 = 0$  ter izpeljavo napake  $\varepsilon$  v Fourierovo vrsto, se napaka izrazi kot:



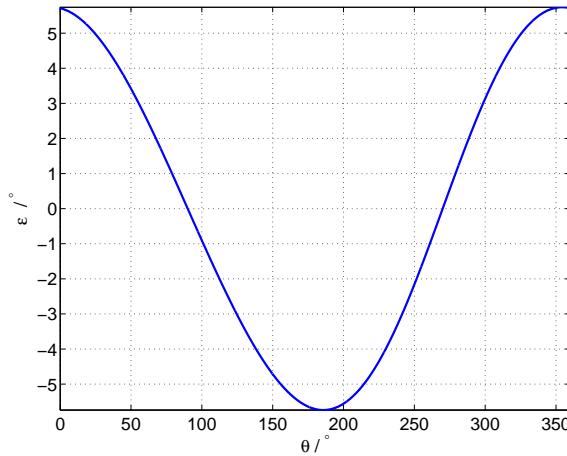
Slika 4.4:  $\varepsilon$  ob limiti  $B_0$  v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta + 90n) \quad (4.8)$$

Največjo amplitudo ima prvi harmonik, nastopajo tako lihe kot sode komponente. Z analizo potekov posameznega harmonika napake in uporabe Curve

Fitting tool je bila najdena funkcija, ki opiše odvisnost napake od enosmerne komponente v signalu  $B_{sin}$ . Definicijsko območje je bilo potrebno razdeliti na 3 dele.

$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-|B_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta - 90n), & B_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_0^n}{n} \sin(n\theta + 90n), & |B_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-B_0^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & B_0 \geq 1 \end{cases} \quad (4.9)$$



Slika 4.5:  $\varepsilon$  pri  $B_0 = 0,1$

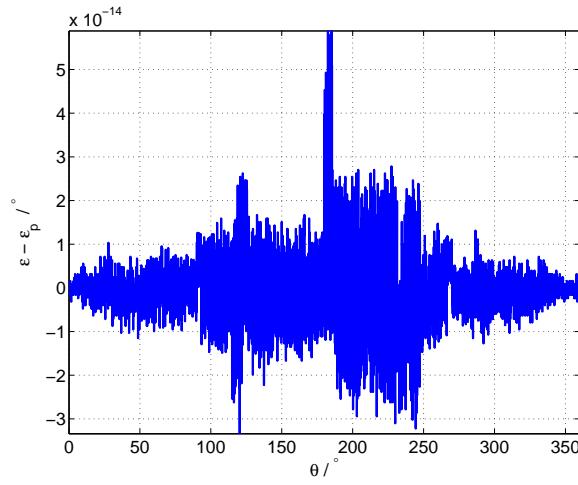
#### 4.2.2 Enosmerna komponenta signala $B_{cos}$

Enak postopek je ponovljen tudi za enosmerno komponento v signalu  $B_{cos}$

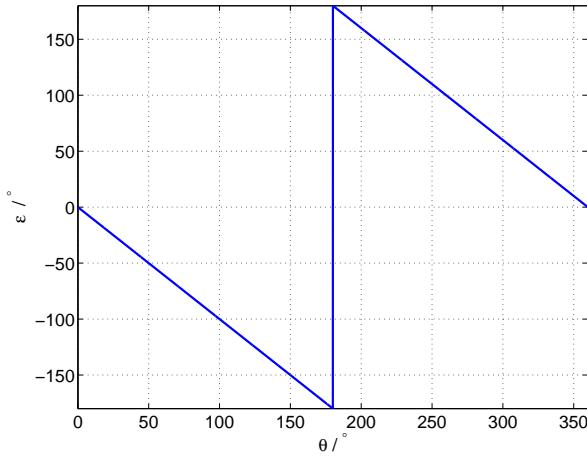
$$\lim_{a_0 \rightarrow \infty} \text{atan2}(\sin \theta, \cos \theta + A_0) \quad (4.10)$$

Napaka (slika 4.7) je proti napaki na sliki 4.4 le fazno zamaknjena. To se izrazi tudi v Fourierovi vrsti.

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta + 90n) \quad (4.11)$$



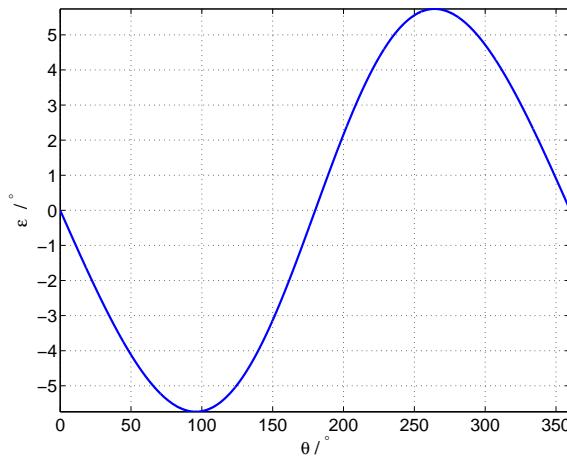
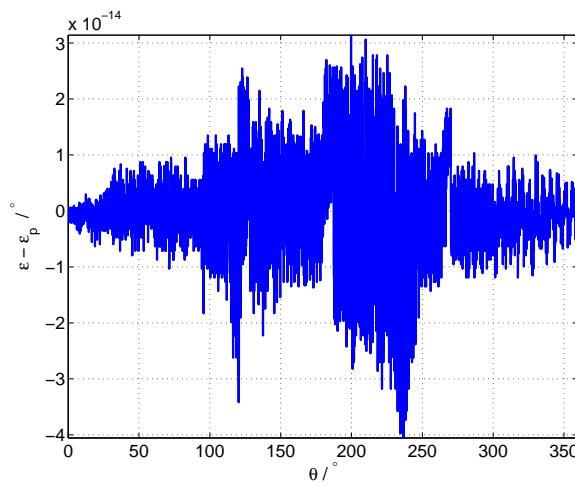
Slika 4.6: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (4.9) pri  $B_0 = 0,1$  in uporabi prvih 20 členov vrste (4.9)



Slika 4.7:  $\varepsilon$  ob limiti  $A_0$  v neskončnost

Potek napake v odvisnosti od  $A_0$  je (4.12)

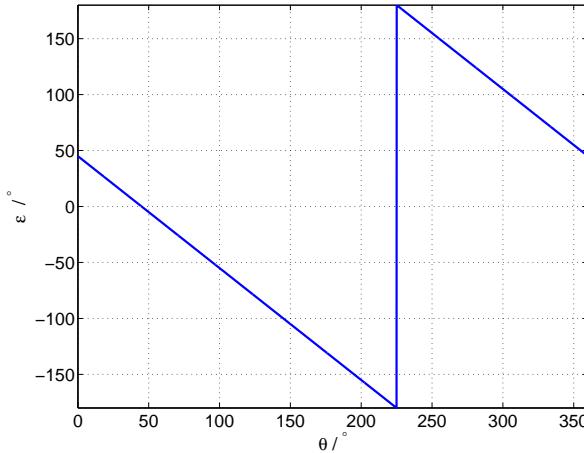
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-|A_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{A_0^n}{n} \sin(n\theta), & |A_0| \geq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-A_0^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \geq 1 \end{cases} \quad (4.12)$$

Slika 4.8:  $\varepsilon$  pri  $A_0 = 0,1$ Slika 4.9: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d(); in napako izračunano z (4.12) pri  $A_0 = 0,1$  in uporabi prvih 20 členov vrste (4.12)

#### 4.2.3 Enosmerna komponenta pri obeh signalih

Predstavljeno je tudi vsebnost enakih enosmernih komponent v obeh signalih. Naj bo enosmerna komponenta v obeh signalih označena s  $C_0$ , kjer velja  $C_0 = A_0 = B_0$ .

Limita napake ko gre  $C_0$  proti neskončnosti se v Fourierovi vrsti izrazi kot:



Slika 4.10:  $\varepsilon$  ob limiti  $C_0$  v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta - 90n) \quad (4.13)$$

Odvisnost napake ob sprememjanju enosmernih komponent pri obeh signalih se je izrazila kot:

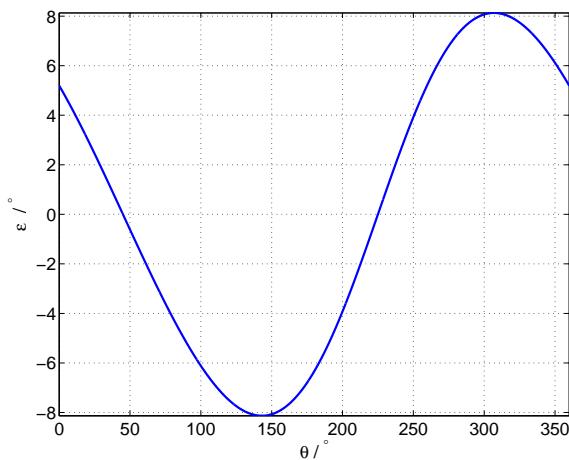
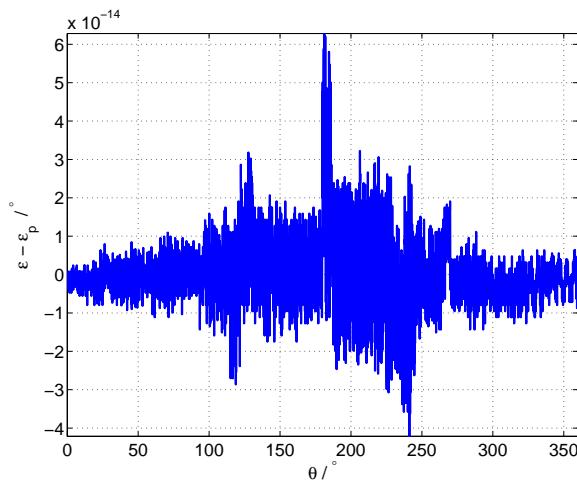
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 - |\sqrt{2}C_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & C_0 \leq -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sqrt{2}C_0)^n}{n} \sin(n\theta - 90n), & |C_0| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 - (\sqrt{2}C_0)^{-n}}{n} \sin(n\theta - 90n), & C_0 \geq \frac{\sqrt{2}}{2}. \end{cases} \quad (4.14)$$

### 4.3 Neorotogonalnost signalov

Napaka se pojavi tudi, če signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  nista fazno zamaknjena za točno  $90^\circ$ . Signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  bodita odvisna tudi od faznega zamika in sicer  $\varphi_s$  signala  $B_{sin}$  in  $\varphi_c$  signala  $B_{cos}$

$$B_{sin} = \sin(\theta + \varphi_s) \quad (4.15)$$

$$B_{cos} = \cos(\theta + \varphi_c) \quad (4.16)$$

Slika 4.11:  $\varepsilon$  pri  $C_0 = 0,1$ Slika 4.12: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d(); in napako izračunano z (4.14) pri  $C_0 = 0,1$  in uporabi prvih 20 členov vrste (4.14)

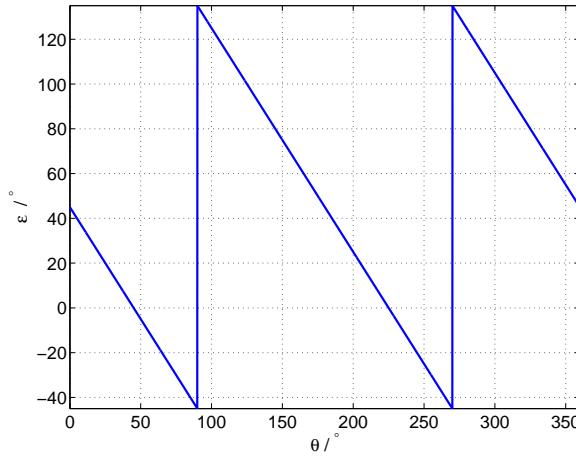
Napako se določi za vsakega od parametrov posamično. Drugi je takrat enak 0. Na koncu se enačbi združi.

Za določanje limite ni potrebno iti proti neskončnosti, ampak le do najslabše

možnosti, ki je pri  $\pm 90^\circ$ :

$$\varepsilon = \lim_{\varphi_s \rightarrow 90^\circ} \text{atan2}(Sin, Cos) - \text{atan2d}(\sin(\theta), \cos(\theta)) \quad (4.17)$$

Potek napake  $\varepsilon$  s slike 4.13 predstavi vrsta (4.18).



Slika 4.13: Napaka  $\varepsilon$  ob limiti  $\varphi_s \rightarrow 90^\circ$

$$\varepsilon = 45^\circ - \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(2n\theta) \quad (4.18)$$

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  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  na idealna signala.

$$\begin{aligned} \varepsilon(\varphi_s, \varphi_c) &= \frac{\varphi_s + \varphi_c}{2} + \\ &\quad \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \tan \frac{\varphi_s - \varphi_c}{2} \right)^n \sin(2n\theta + n(90^\circ + \varphi_s + \varphi_c)) \end{aligned} \quad (4.19)$$

## 4.4 Napaka zaradi spremembe amplitude in faze zaradi enega parametra

Bodita amplitudi signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  enaki  $C_1$ . V obeh vhodnih signalih se lahko pojavi tudi dodaten signal iste frekvence. To se lahko zapiše kot:

$$B_{sin} = C_1 \sin(\theta) + \Delta_c \cos(\theta) \quad (4.20)$$

$$B_{cos} = C_1 \cos(\theta) + \Delta_c \cos(\theta) \quad (4.21)$$

Opravljena je bila limita  $\Delta_c$  v neskončnost. V napaki nastopa enosmerna komponenta in sodi harmoniki. Funkcija, ki predstavlja odvisnost napake od  $\Delta_c$  je (4.22).

$$\varepsilon_p = \text{atan} \frac{\Delta_c}{\Delta_c + 2C_1} + \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{\Delta_c}{\sqrt{\Delta_c^2 + 2r_0\Delta_c + 2C_1^2}} \right)^n \sin(2n\theta + n(90 + \text{atan}(\frac{\Delta_c + C_1}{C_1}))) \quad (4.22)$$

Pri čemer velja:

$$\Delta_c > -C_1$$

Izračunan je bil tudi potek napake, če se pojavi signal v obliki sinusne oblike. Vhoda v funkcijo sta:

$$B_{sin} = C_1 \sin(\theta) + \Delta_s \sin(\theta) \quad (4.23)$$

$$B_{cos} = C_1 \cos(\theta) + \Delta_s \sin(\theta) \quad (4.24)$$

Pričakovani je podoben potek kot pri dodanem signalu kosinusne oblike. Izračunana vrsta napake v odvisnosti od  $\Delta_s$  je:

$$\varepsilon_p = \text{atan} \frac{-\Delta_s}{\Delta_s + 2C_1} + \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{\Delta_s}{\sqrt{\Delta_s^2 + 2C_1\Delta_s + 2r_0^2}} \right)^n \sin(2n\theta + n(90 + \text{atan}(\frac{\Delta_s + C_1}{C_1}))) \quad (4.25)$$

Pri čemer velja:

$$\Delta_s > -C_1$$

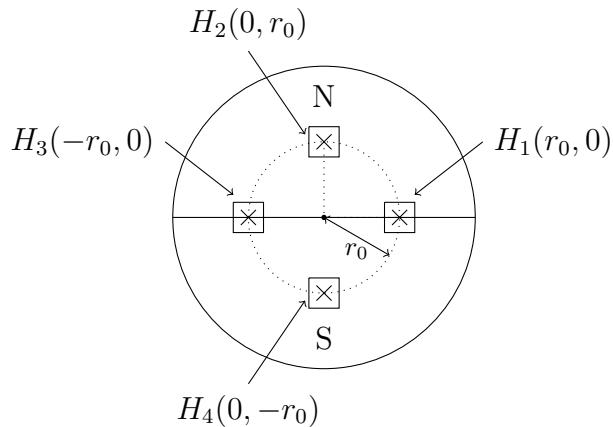
Za majhne odmike, je dovolj upoštevanje le prvega člena vrste, pri katerih se tudi predpostavi linearno naraščanje napake. V nadaljevanju bodo velikosti harmonikov v odvisnosti od povzročene ekscentričnosti aproksimirani s kubičnim polinomi.

## 5 Linearni model magnetnega polja

Prve simulacije in predvideni potek napake so opravljeni na Z-komponenti gostote magnetnega pretoka aprokimiranega z ravnino (5.1).

$$B(x, y) = x \quad (5.1)$$

Simulacijski model sestavlja 4 Hallove sonde postavljene na krožnico z radijem  $r_0$  in so prostorsko zamaknjene za  $90^\circ$  (slika 5.1). Lokacija predstavlja začetno lego Hallovih sond. Ob zasuku magneta, se sonde relativno gibljejo na magnet v nasprotni smeri kot se vrati magnet.



Slika 5.1: Shema simulacijskega modela

Z upoštevanjem vplivov ekscentričnosti iz izraza (3.5) in enačbe za izračun Z-komponente gostote magnetnega pretoka (5.1) se izrazi potek, ki ga pomeri posamezna sonda ob vrtenju.

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

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

$$B_{H_3} = -r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d \quad (5.4)$$

$$B_{H_4} = -r_0 \sin \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d \quad (5.5)$$

Z odštevanjem signalov nasprotni ležečih sond se pridobi signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ .

$$B_{sin} = B_{H_1} - B_{H_3} = 2r_0 \sin \theta \quad (5.6)$$

$$B_{cos} = B_{H_2} - B_{H_4} = 2r_0 \cos \theta \quad (5.7)$$

Z diferencialnim odčitavenjem signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ , se popačanje signalov zaradi napačne montaže izniči. Iz tega sledi zaključek, da pri linearnej apoksimaciji Z-komponente gostote magnetnega pretoka napačna montaža ne vpliva na napako.

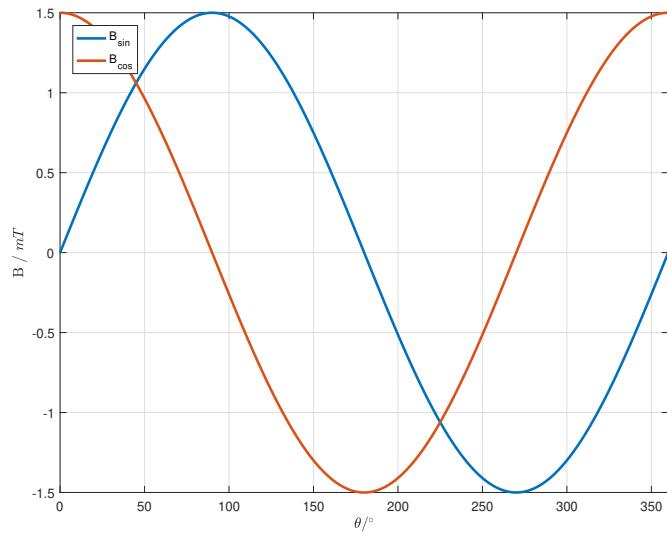
Kljub temu so bile opravljene simulacije na poenostavljenem modelu le dveh sond ( $B_{sin} = B_{H_1}$  in  $B_{cos} = B_{H_2}$ ). Na ta način je lahko bila analizirana napaka.

V tem poglavju so predstavljeni rezultati simulacij z upoštevanjem dveh Hall-ovih sond in uporabo linearne aprokismirane Z-komponente gostote magnetnega pretoka. Prikazan je potek napake pri različnih izmikih, ter potek amplitud posameznih harmonikov napake v odvisnosti od ekscentričnosti. Hall-ovi sondi sta postavljeni na krožnico z radijem 1,5 mm [?].

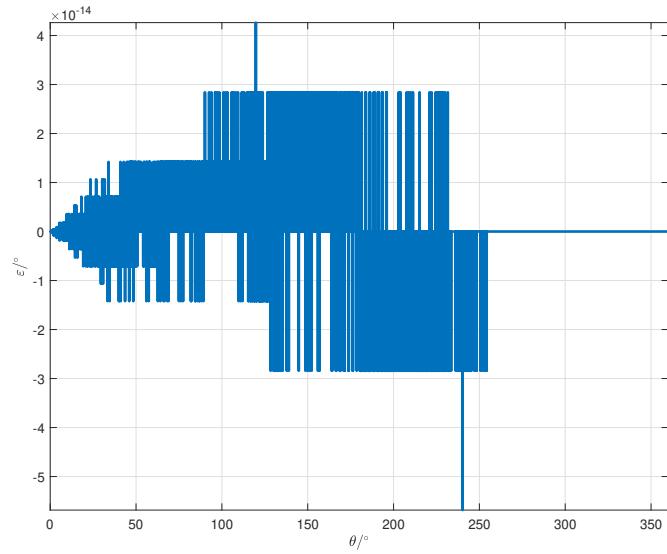
## 5.1 Brez ekscentričnosti

Signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pomerjena v stanju brez ekscentričnosti imata enaki amplitudi in sta fazno zamaknjena za  $90^\circ$  ter brez enosmernih komponent. Napaka  $\varepsilon$ , ki se pojavi pri izračunu je le numerična napaka funkcije atan2d(); (Slika 5.3). Nu-

merična napaka je proti pričakovani napaki zaradi ekscentričnosti zanemarljiva.



Slika 5.2:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



Slika 5.3: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti

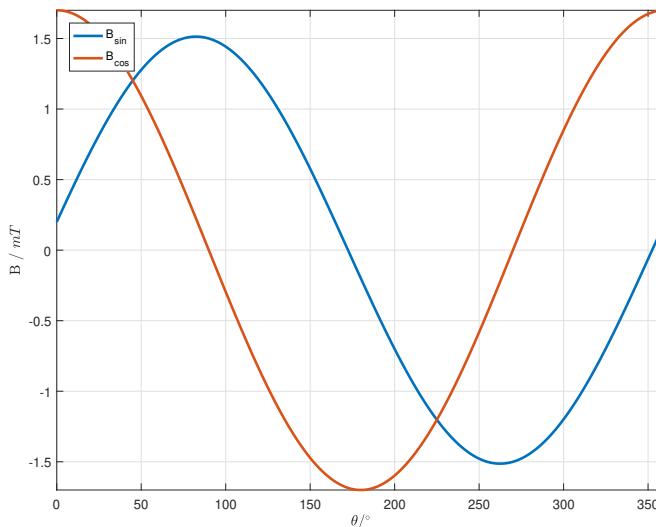
## 5.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

Izraza (5.2) in (5.3), se lahko preuredi:

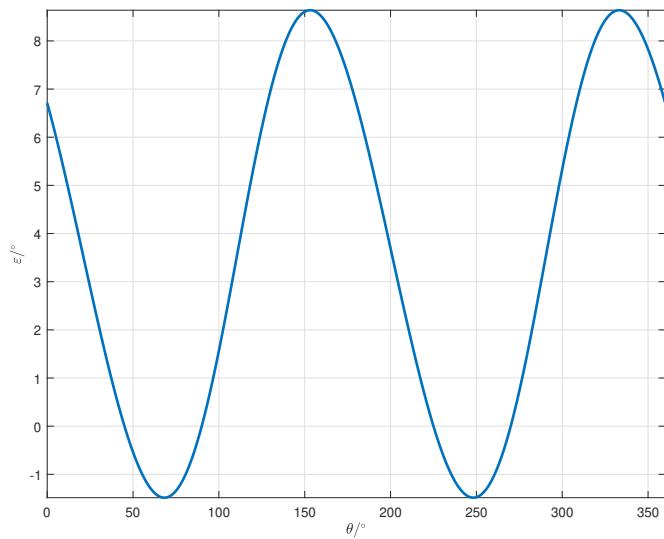
$$B_{sin} = \sqrt{(r_0 + \Delta y_s)^2 + \Delta x_s^2} \sin(\theta + \text{atan} \frac{\Delta x_s}{\Delta y_s + r_0}) - \Delta x_d \quad (5.8)$$

$$B_{cos} = \sqrt{(r_0 + \Delta x_s)^2 + \Delta y_s^2} \cos(\theta - \text{atan} \frac{\Delta y_s}{\Delta x_s + r_0}) - \Delta x_d. \quad (5.9)$$

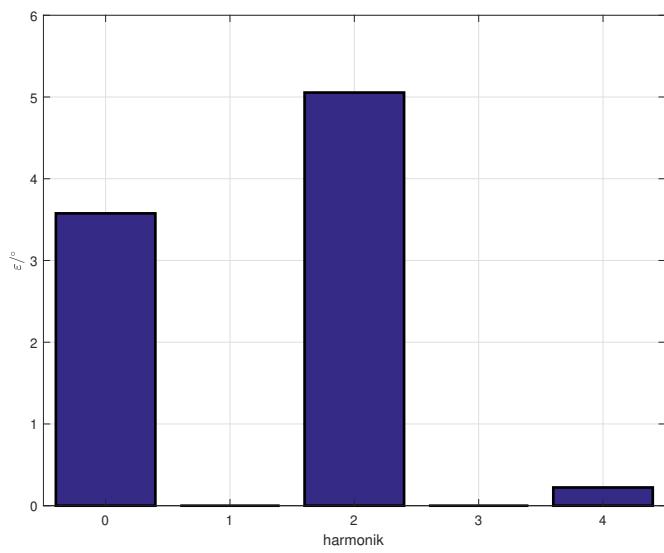
Ob upoštevanju le statične ekscentričnosti v smeri x se iz (5.8) razbere linearne spremembe amplitude signala  $B_{cos}$ . Signalu  $B_{sin}$  se poveča amplituda, vendar je sprememba manjša kot pri signalu  $B_{cos}$ . Signalu  $B_{sin}$  se spremeni tudi faza. Potek signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri 0,2mm statične ekscentričnosti v smeri x je prikazan na sliki 5.4. V poglavju 4.4 je bil predstavljen primer popačanja signalov na ta način. Napaka se je pričakovano izrazila v obliki enosmerne komponente in drugega harmonika (slika 5.5 in 5.6).



Slika 5.4:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.5: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.6: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

### 5.2.1 Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x

Signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  se pri vsaki simulirani ekscentričnosti aproksimira s funkcijo v obliki:

$$B_{sin} \simeq A_{sin} \sin(\theta + \delta_{sin}) + Off_{sin} \quad (5.10)$$

$$B_{cos} \simeq A_{cos} \cos(\theta + \delta_{cos}) + Off_{cos}. \quad (5.11)$$

V primeru linearizirane Z-komponente magnetnega pretoka bi bil v gornjih izrazih primernejši enačaj, vendar je uporabljen približek zaradi splošne aproksimacije. Poteki posameznega parametra so bili pridobljeni s FFT-jem signala in nato aproksimiranje poteka kubičnega polinoma z metodo minimalnih kvadratov. Na slikah je predstavljen potek posameznega parametra od spremenljajoče ekscentričnosti.

Napaka je pri vsaki ekscentričnosti razvita v Fourierovo vrsto. Opazovani so bili prvi štirje harmoniki in enosmerna komponenta. Napako se lahko predstavi tudi v obliki

$$\varepsilon(\Delta x_s) \simeq C_0 + C_1 \sin(\theta + \delta_1) + C_2 \sin(2\theta + \delta_2) + C_3 \sin(3\theta + \delta_3) + C_4 \sin(4\theta + \delta_4). \quad (5.12)$$

Parameter je bil aproksimiran s kubičnim polinomom v odvisnosti od ekscentričnosti. Na spodnjih slikah so predstavljeni tudi poteki amplitud posameznega harmonika napake v odvisnosti od ekscentričnosti.

Na sliki 5.7 je prikazana spremembamplitude prvega harmonika signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Razvidno iz (5.8) (5.9) linearno narašča amplituda  $B_{cos}$ . Slika 5.8 prikazuje enosmerni komponenti, ki od statične ekscentričnosti nista odvisni. Slika 5.9 prikazuje fazni zamik signala glede na njuno idealno poravnavo. Po (5.8) je pričakovano spremjanje faze  $B_{sin}$ .

Spreminjanje amplitude prvega harmonika, enosmerne komponente in faznega

zamika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je opisano z (5.13)- (5.18).

$$Off_{sin}(\Delta x_s) = 0\Delta x_s^3 + 0\Delta x_s^2 + 0\Delta x_s + 0 \quad (5.13)$$

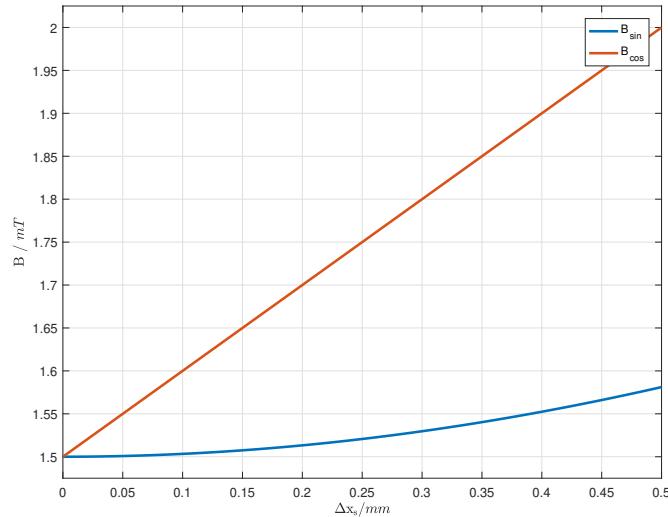
$$\begin{aligned} A_{sin}(\Delta x_s) = & -3,38 \cdot 10^{-2}\Delta x_s^3 + 3,44 \cdot 10^{-1}\Delta x_s^2 - 1,09 \cdot 10^{-3}\Delta x_s \\ & + 1,50 \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} \delta_{sin}(\Delta x_s) = & -4,71\Delta x_s^3 - 3,96 \cdot 10^{-1}\Delta x_s^2 + 3,82 \cdot 10\Delta x_s \\ & - 1,15 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (5.15)$$

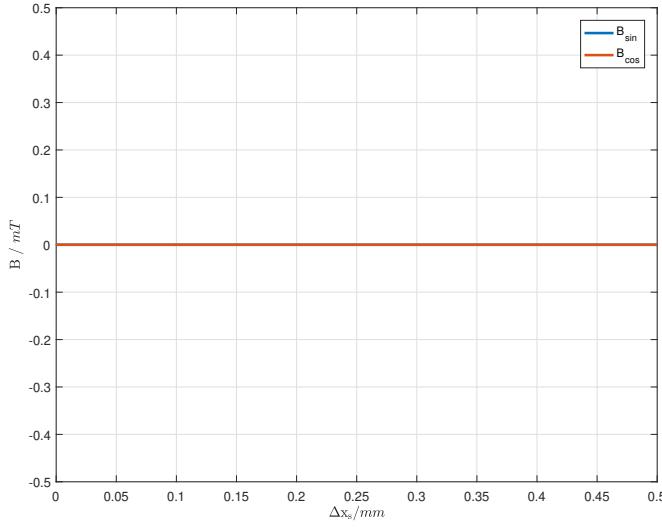
$$Off_{cos}(\Delta x_s) = 0\Delta x_s^3 + 0\Delta x_s^2 + 0\Delta x_s + 0 \quad (5.16)$$

$$A_{cos}(\Delta x_s) = 2,08 \cdot 10^{-14}\Delta x_s^3 - 3,29 \cdot 10^{-14}\Delta x_s^2 + 1,00\Delta x_s + 1,50 \quad (5.17)$$

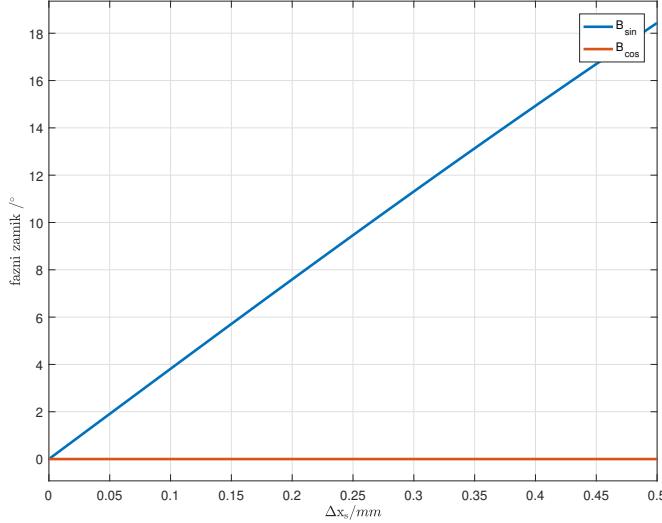
$$\begin{aligned} \delta_{cos}(\Delta x_s) = & -2,44 \cdot 10^{-15}\Delta x_s^3 + 4,14 \cdot 10^{-15}\Delta x_s^2 - 1,07 \cdot 10^{-15}\Delta x_s \\ & - 2,48 \cdot 10^{-16} \end{aligned} \quad (5.18)$$



Slika 5.7: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



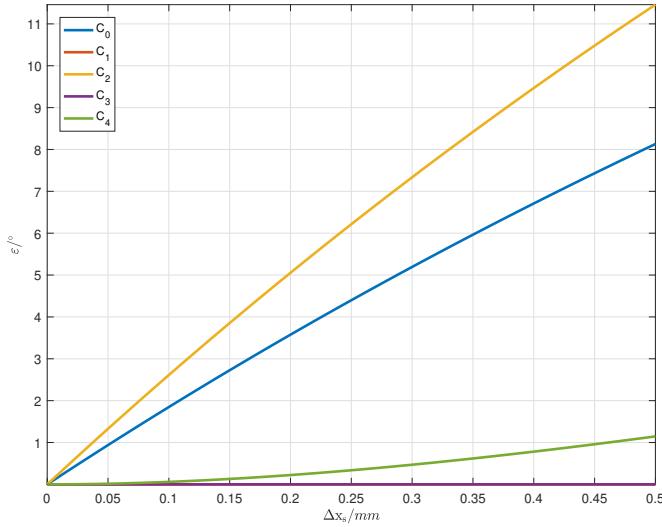
Slika 5.8: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.9: Fazni zamik  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$

Spremembi signalov  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  se odrazita tudi pri izračunu kota  $\varphi$  in napake  $\varepsilon$ . Na sliki 5.10 je odvisnost amplitud posameznega harmonika od spremenjanja statične ekscentričnosti v smeri x. Poteke s slike 5.10 aproksimirajo polinomi

(5.19) - (5.23).



Slika 5.10: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z linearnim poljem

$$C_0(\Delta x_s) = 1,32\Delta x_s^3 - 6,33\Delta x_s^2 + 1,91 \cdot 10\Delta x_s + 1,09 \cdot 10^{-4} \quad (5.19)$$

$$\begin{aligned} C_1(\Delta x_s) = & 6,18 \cdot 10^{-14}\Delta x_s^3 - 4,97 \cdot 10^{-14}\Delta x_s^2 + 1,03 \cdot 10^{-14}\Delta x_s \\ & + 5,64 \cdot 10^{-15} \end{aligned} \quad (5.20)$$

$$C_2(\Delta x_s) = 1,71\Delta x_s^3 - 9,04\Delta x_s^2 + 2,70 \cdot 10\Delta x_s - 5,20 \cdot 10^{-5} \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} C_3(\Delta x_s) = & -2,07 \cdot 10^{-14}\Delta x_s^3 + 2,00 \cdot 10^{-14}\Delta x_s^2 - 3,76 \cdot 10^{-15}\Delta x_s \\ & + 4,81 \cdot 10^{-16} \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$C_4(\Delta x_s) = -2,92\Delta x_s^3 + 5,96\Delta x_s^2 + 4,36 \cdot 10^{-2}\Delta x_s - 9,80 \cdot 10^{-4} \quad (5.23)$$

Za primerjavo, so dodane tudi enačbe potekov amplitud posameznega harmo-

nika razvitega v Taylorjevo vrsto v okolici 0, katere sledijo iz (4.22):

$$C_0(\Delta x_s) = 1,41\Delta x_s^3 - 6,37\Delta x_s^2 + 1,91 \cdot 10\Delta x_s \quad (5.24)$$

$$C_1(\Delta x_s) = 0 \quad (5.25)$$

$$C_2(\Delta x_s) = 1,50\Delta x_s^3 - 9,00\Delta x_s^2 + 2,70 \cdot 10\Delta x_s \quad (5.26)$$

$$C_3(\Delta x_s) = 0 \quad (5.27)$$

$$C_4(\Delta x_s) = -4,24\Delta x_s^3 + 6,37\Delta x_s^2 \quad (5.28)$$

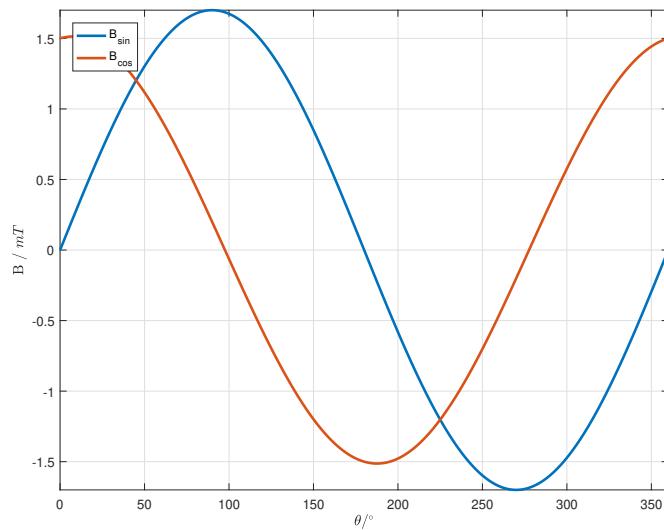
Rezultati so pričakovani. Četrti harmonik se po poteku nekoliko razlikuje. To je posledica razvite vrste okoli izhodišča. Z razvojem četrtega harmonika okoli točke 0,25mm (5.29), je iz izraza že bolj razvidno prilagajanje harmonika.

$$C_4(\Delta x_s) = -2,90\Delta x_s^3 + 5,88\Delta x_s^2 + 0,08\Delta x_s - 4,98 \cdot 10^{-3} \quad (5.29)$$

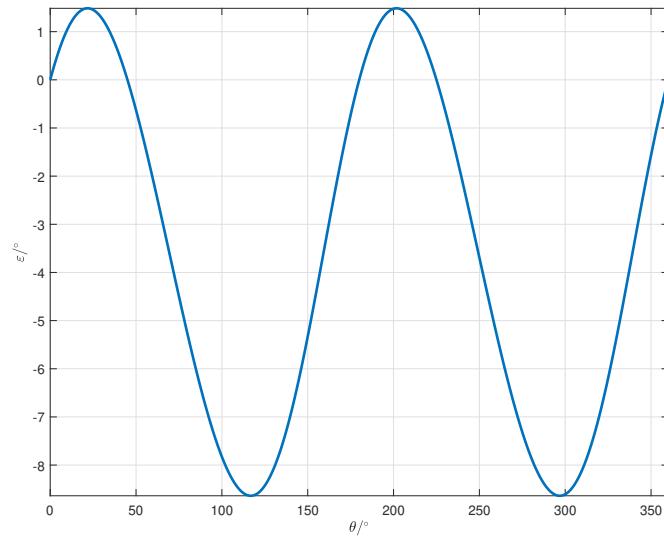
### 5.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

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

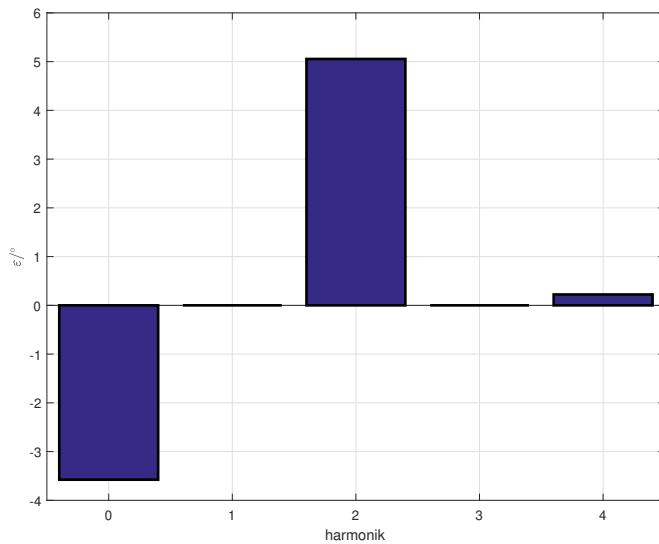
Napaka je prikazana na sliki 5.12. Sestavlja jo negativna enosmerna komponenta in izrazit drugi harmonik. Iz napake razvite v vrsto (slika 5.13) je vidna enaka amplituda drugega harmonika, kot pri ekscentričnosti v smeri x. Enosmerna komponenta se razlikuje v predznaku.



Slika 5.11:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 5.12: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 5.13: Amplitudo harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

### 5.3.1 Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y

Potek hitrejšega spremenjanja amplitude  $B_{sin}$  je pričakovani. Enosmerna komponenta signalov se prav tako ni spremenila. Fazni zamik signala  $B_{cos}$  se je zmanjševal, posledično tudi fazna razlika med signaloma. Poteki so opisani s kubičnimi polinomi. Na sliki 5.17 so prikazani potek amplitud posameznih harmonikov v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y. Potek amplitud harmonikov je enak potekom simuliranih s statično ekscentričnostjo v smeri x, raz-

likuje se le enosmerna komponenta z nasprotnim predznakom.

$$Off_{sin}(\Delta y_s) = 0\Delta y_s^3 + 0\Delta y_s^2 + 0\Delta y_s + 0 \quad (5.30)$$

$$A_{sin}(\Delta y_s) = 2,08 \cdot 10^{-14}\Delta y_s^3 - 3,29 \cdot 10^{-14}\Delta y_s^2 + 1,00\Delta y_s + 1,50 \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} \delta_{sin}(\Delta y_s) = & 6,79 \cdot 10^{-12}\Delta y_s^3 - 4,89 \cdot 10^{-12}\Delta y_s^2 + 8,24 \cdot 10^{-13}\Delta y_s \\ & -9,12 \cdot 10^{-15} \end{aligned} \quad (5.32)$$

$$Off_{cos}(\Delta y_s) = 0\Delta y_s^3 + 0\Delta y_s^2 + 0\Delta y_s + 0 \quad (5.33)$$

$$\begin{aligned} A_{cos}(\Delta y_s) = & -3,38 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^3 + 3,44 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 1,09 \cdot 10^{-3}\Delta y_s \\ & +1,50 \end{aligned} \quad (5.34)$$

$$\delta_{cos}(\Delta y_s) = 4,71\Delta y_s^3 + 3,96 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 3,82 \cdot 10\Delta y_s + 1,15 \cdot 10^{-3} \quad (5.35)$$

$$C_0(\Delta y_s) = -1,32\Delta y_s^3 + 6,33\Delta y_s^2 - 1,91 \cdot 10\Delta y_s - 1,09 \cdot 10^{-4} \quad (5.36)$$

$$\begin{aligned} C_1(\Delta y_s) = & 4,36 \cdot 10^{-14}\Delta y_s^3 - 3,81 \cdot 10^{-14}\Delta y_s^2 + 1,04 \cdot 10^{-14}\Delta y_s \\ & +5,59 \cdot 10^{-15} \end{aligned} \quad (5.37)$$

$$C_2(\Delta y_s) = 1,71\Delta y_s^3 - 9,04\Delta y_s^2 + 2,70 \cdot 10\Delta y_s - 5,20 \cdot 10^{-5} \quad (5.38)$$

$$\begin{aligned} C_3(\Delta y_s) = & -1,86 \cdot 10^{-14}\Delta y_s^3 + 1,60 \cdot 10^{-14}\Delta y_s^2 - 2,99 \cdot 10^{-15}\Delta y_s \\ & +4,59 \cdot 10^{-16} \end{aligned} \quad (5.39)$$

$$C_4(\Delta y_s) = -2,92\Delta y_s^3 + 5,96\Delta y_s^2 + 4,36 \cdot 10^{-2}\Delta y_s - 9,80 \cdot 10^{-4} \quad (5.40)$$

Tu so priloženi tudi poteki izraza (4.25), razviti v Taylorjevo vrsto okoli ničle do tretje potence. (4.25) opisuje napako funkcije atan2d() v primeru vhodnih signalov, kakršna sta  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  s statično ekscentričnostjo v smeri y.

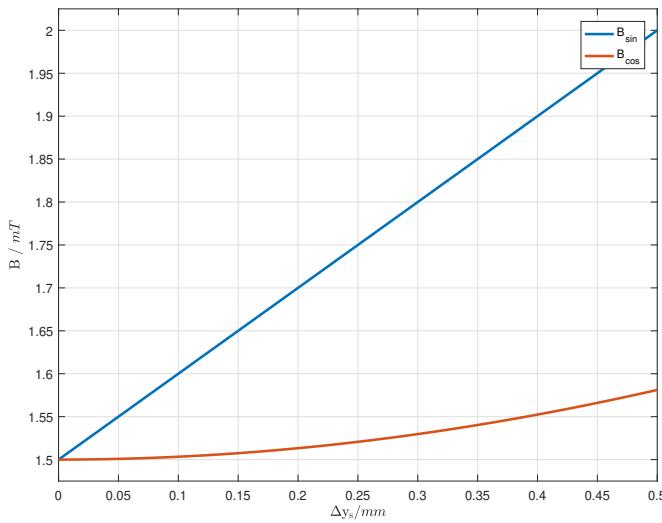
$$C_0(\Delta y_s) = -1,41\Delta y_s^3 + 6,37\Delta y_s^2 - 1,91 \cdot 10\Delta y_s \quad (5.41)$$

$$C_1(\Delta y_s) = 0 \quad (5.42)$$

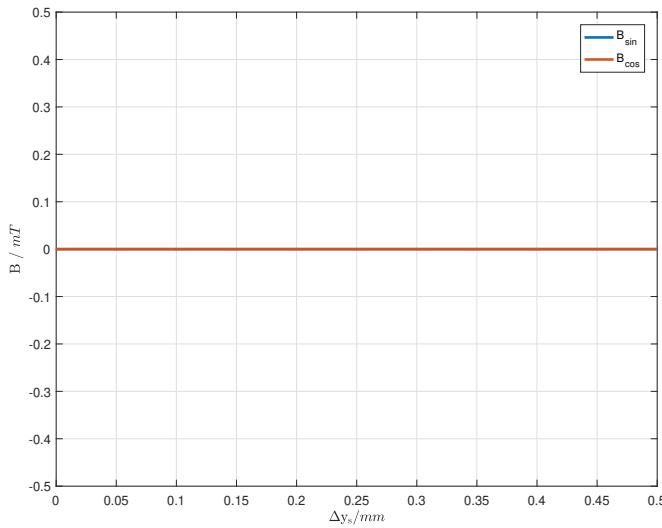
$$C_2(\Delta y_s) = 1,50\Delta y_s^3 - 9,00\Delta y_s^2 + 2,70 \cdot 10\Delta y_s \quad (5.43)$$

$$C_3(\Delta y_s) = 0 \quad (5.44)$$

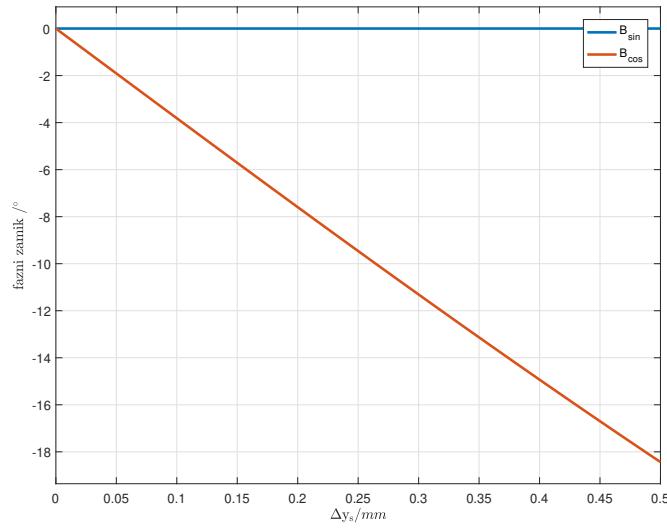
$$C_4(\Delta y_s) = -4,24\Delta y_s^3 + 6,37\Delta y_s^2 \quad (5.45)$$



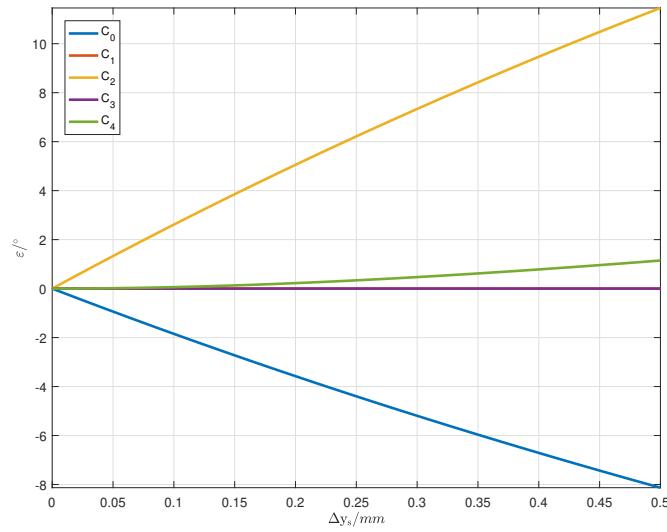
Slika 5.14: Amplituda osnovnega harmonika signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 5.15: Enosmerna komponenta  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



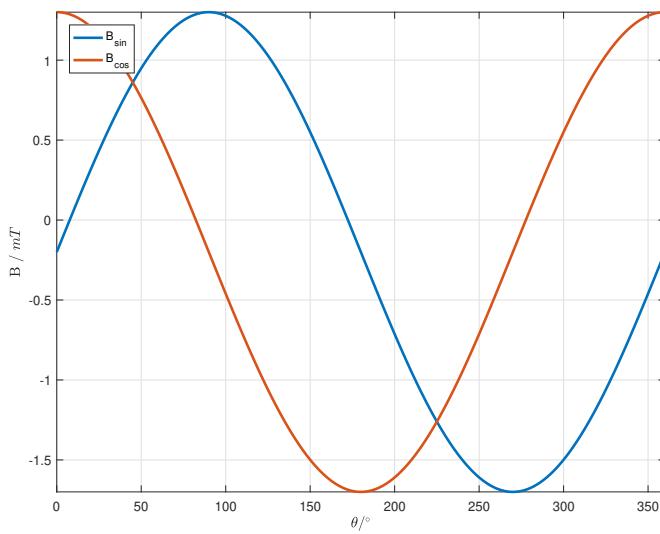
Slika 5.16: Fazni zamik  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem staticne ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$



Slika 5.17: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od staticne ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z linearnim poljem

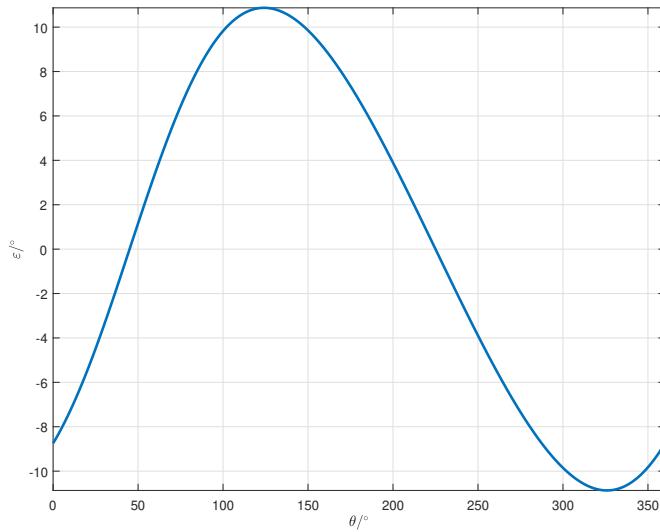
## 5.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x osi

Dinamična ekscentričnost v smeri x osi pričakovano povzroči v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  enosmerno komponento (Slika 5.18). Na sliki 5.19 je vidna napaka v obliki prvega



Slika 5.18:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

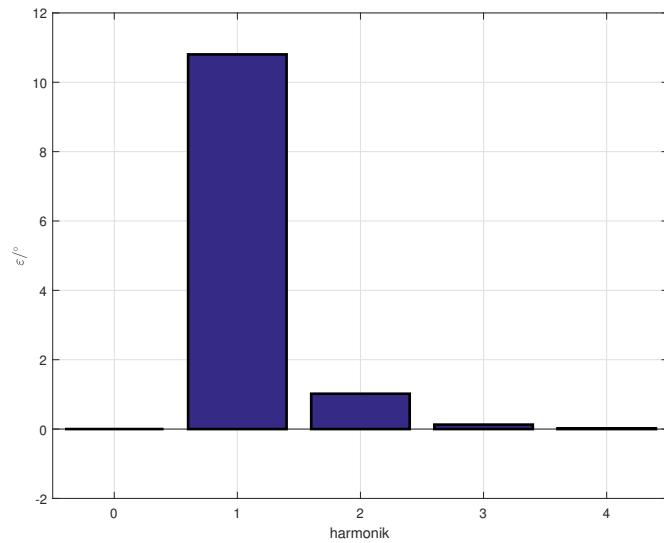
harmonika, kar je bilo pričakovati (Poglavlje 4.2.3). Z razvojem napake v Fou-



Slika 5.19: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

rierovo vrsto je najizrazitejši prvi harmonik, enosmerna komponenta je nič (slika

5.20).



Slika 5.20: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

### 5.4.1 Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x

Dinamična ekscentričnost vpliva na enosmerni komponenti  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  (slika 5.22).

Z aproksimacijo posameznega parametra  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  s kubičnim polinomom sta od dinamične ekscentričnosti odvisni le enosmerni komponenti.

$$Off_{sin}(\Delta x_d) = 3,78 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^3 - 2,47 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^2 - 10,00 \cdot 10^{-1} \Delta x_d - 2,53 \cdot 10^{-17} \quad (5.46)$$

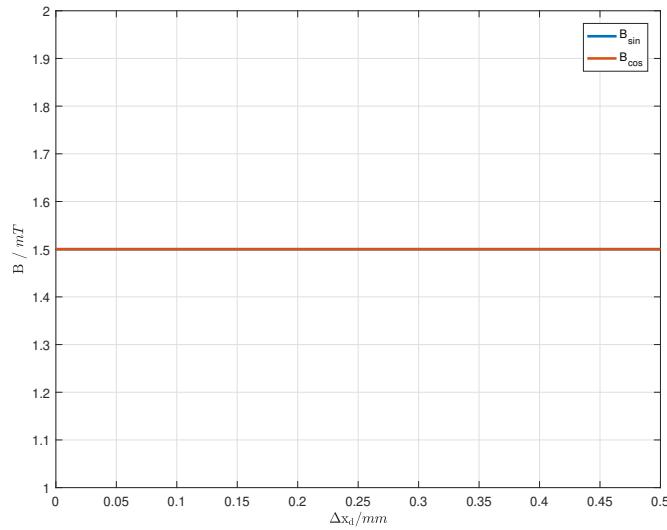
$$A_{sin}(\Delta x_d) = -8,33 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^3 + 5,76 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^2 - 8,58 \cdot 10^{-15} \Delta x_d + 1,50 \quad (5.47)$$

$$\delta_{sin}(\Delta x_d) = 6,62 \cdot 10^{-12} \Delta x_d^3 - 4,89 \cdot 10^{-12} \Delta x_d^2 + 8,24 \cdot 10^{-13} \Delta x_d - 1,47 \cdot 10^{-14} \quad (5.48)$$

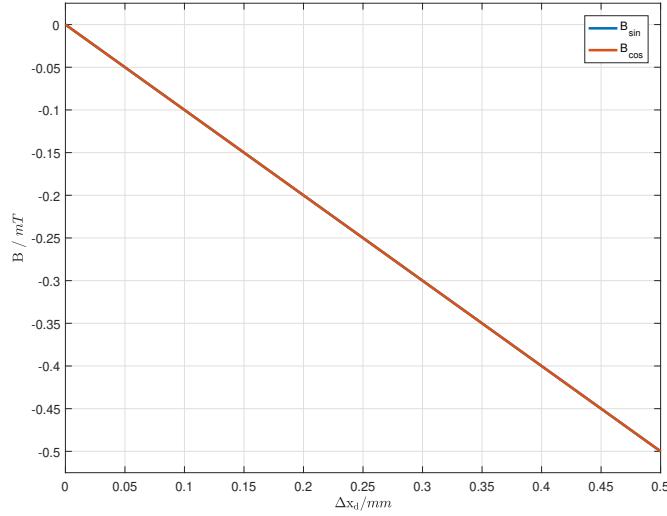
$$Off_{cos}(\Delta x_d) = 3,78 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^3 - 2,47 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^2 - 10,00 \cdot 10^{-1} \Delta x_d - 2,53 \cdot 10^{-17} \quad (5.49)$$

$$A_{cos}(\Delta x_d) = -8,33 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^3 + 5,76 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^2 - 8,58 \cdot 10^{-15} \Delta x_d + 1,50 \quad (5.50)$$

$$\delta_{cos}(\Delta x_d) = 2,72 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^3 + 1,33 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^2 - 1,00 \cdot 10^{-15} \Delta x_d - 2,16 \cdot 10^{-16} \quad (5.51)$$

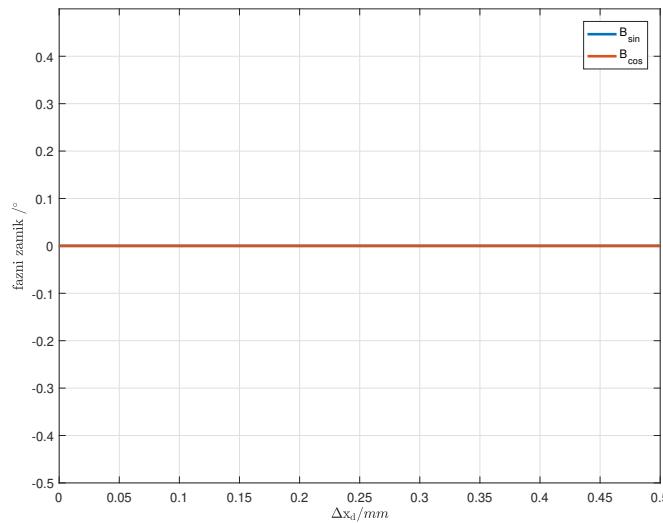


Slika 5.21: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



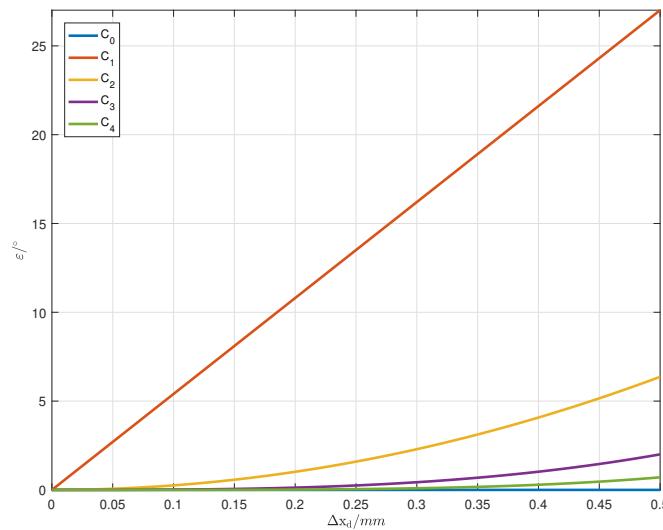
Slika 5.22: Enosmerna komponenta  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

Slika 5.24 prikazuje odvisnost amplitud napake od spremenjanja dinamične ekscentričnosti v smeri x. V napaki, se po pričakovanjih linearno povečuje prvi harmonik (4.14). Linearno se povečuje le do izmika  $\Delta x_d = r_0 \frac{\sqrt{2}}{2}$ . Poteki so



Slika 5.23: Fazni zamik  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$

bili opazovani le do 0,5 mm. V tem območju se amplituda prvega harmonika zaradi enosmerne komponente v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  spreminja linearno. Poteki opisani



Slika 5.24: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od dinamične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z linearnim poljem

s kubičnimi polinomi.

$$C_0(\Delta x_d) = -2,93 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^3 + 2,53 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^2 - 8,20 \cdot 10^{-15} \Delta x_d + 3,64 \cdot 10^{-16} \quad (5.52)$$

$$C_1(\Delta x_d) = -2,81 \cdot 10^{-13} \Delta x_d^3 + 2,11 \cdot 10^{-13} \Delta x_d^2 + 5,40 \cdot 10 \Delta x_d + 5,56 \cdot 10^{-15} \quad (5.53)$$

$$C_2(\Delta x_d) = -8,22 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^3 + 2,55 \cdot 10 \Delta x_d^2 - 1,27 \cdot 10^{-14} \Delta x_d + 7,81 \cdot 10^{-16} \quad (5.54)$$

$$C_3(\Delta x_d) = 1,60 \cdot 10 \Delta x_d^3 + 2,09 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^2 - 1,12 \cdot 10^{-15} \Delta x_d - 3,04 \cdot 10^{-16} \quad (5.55)$$

$$C_4(\Delta x_d) = 1,13 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 3,61 \Delta x_d^2 + 3,92 \cdot 10^{-1} \Delta x_d - 8,94 \cdot 10^{-3} \quad (5.56)$$

Poteki napake so enaki kot v poglavju 4.2.3. Razlikuje se le v negativnem argumentu. Poteki so razviti v Taylorjevo vrsto. Četrti harmonik je enak nič, saj Taylorjeva vrsta do tretjega člena ne zajame četrte potence zato je enaka 0.

$$C_0 = 0 \quad (5.57)$$

$$C_1 = 54,02 \Delta x_d \quad (5.58)$$

$$C_2 = 25,46 \Delta x_d^2 \quad (5.59)$$

$$C_3 = 16,01 \Delta x_d^3 \quad (5.60)$$

$$C_4 = 0 \quad (5.61)$$

## 5.5 Dinamična ekscentričnost v smeri $y$ in sprememba razdalje Hallovih sond od magneta

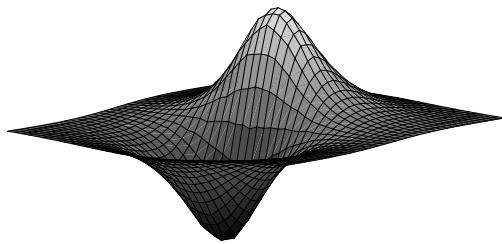
Dinamična ekscentričnost v smeri  $y$  ni povzročila nobene napake v kotu zasuka, saj ni vplivala na siganl, ki ga zajameti Halovi sondi (5.2)(5.3).

Gostota magnetnega pretoka z razdaljo od magneta upada, oblika Z komponente kljub temu ostaja enaka. Zajeto polje Hallovih sond, bo imelo le manjšo

amplitudo. Z večjo oddaljenostjo se bo spremenila le amplituda zajetega signala, faza in enosmerna komponenta se ohraniti. Tudi vpliv ekscentričnosti se bo zmanjšal proporcionalno, kot se je zmanjšala amplituda. V funkcijo atan2(); imata vhodna signala manjši amplitudi, vendar se njuno razmerje ohrani in tako v izračunih v MATLABU ne vpliva na izhodni podatek o zasuku.

## 6 Realni model magnetnega polja

S poznanjem točnejše funkcije polja, je točnejše predvidevanje potekov realnih  $B_{sin}$ ,  $B_{cos}$  in napake. Podjetje RLS, je posredovalo rezultate Z-komponente gostote magnetnega pretoka 1,80 mm nad simuliranim magnetom. Simuliran magnet je imel 4 mm premer in 4 mm višine. Definirano je imel remanenco 1050 mT in relativno permeabilnost 1. Definicijsko območje je 20x20 mm s korakom 0,02 mm (Slika 6.1). Simulacijski model je definiran s 4 sondami, kot je opisano



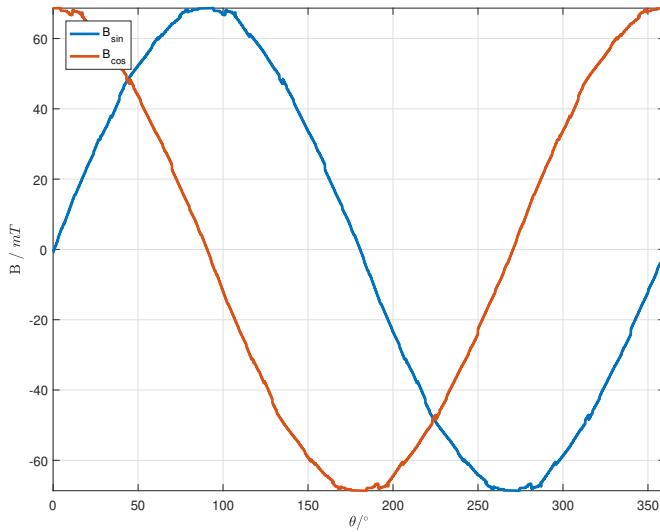
Slika 6.1: Model Z- komponente gostote magnetnega pretoka uporabljen v simulacijah

v začetku poglavja 5. Polje, ki ga pomeri posamezna Hallova sonda ob zasuku ni bilo definirano oz. izpeljano analitično kot pri linearni aproksimaciji (5.2) - (5.5). Prvo je bila izračunana relativna lokacija sonde glede na magnet. Nato se je vrednost Z-komponente gostote magnetnega pretoka aproksimiralo s pretokom, definiranim v geometrijsko najbližji točki definicijskega območja. Pomerjeno po-

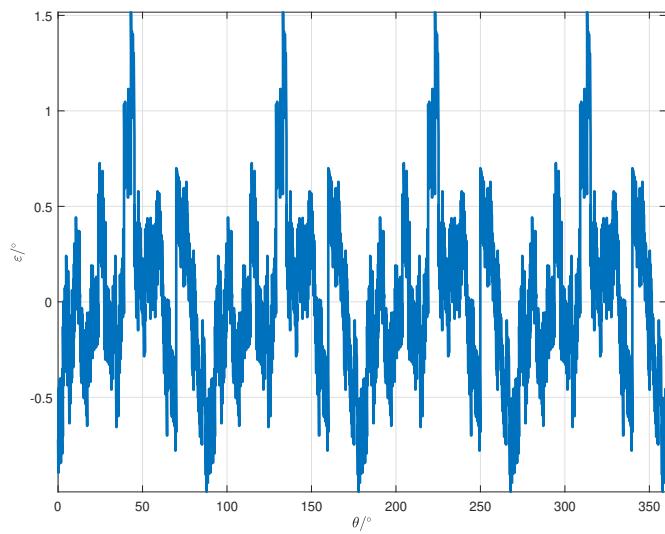
lje nasproti ležečih sond se je nato odštelno in vstavilo v funkcijo atan2d(). V tem poglavju so predstavljeni rezultati simulacij ekscentričnosti z uporabo realnega modela magnetnega polja.

## 6.1 Brez napake

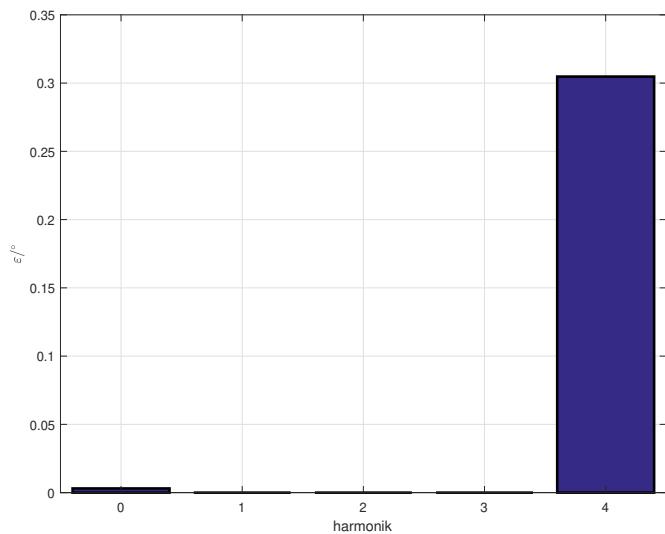
Kljub idealni montaži,  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  nista idealna signala. Signala vsebujeta višje harmonike (Slika 6.2), ki niso opazno izraziti. Višji harmoniki se izrazijo v napaki (slika 6.3). Opazi se grob potek četrtega harmonika. V napaki so špice (primer  $220^\circ$ ), ki so posledica izračuna Z-komponente gostote magnetnega pretoka v odvistnosti magneta. Napaka razvita v Fourierovo vrsto prikaže vrednosti amplitud prvih štirih harmonikov napake (slika 6.4). Izrazit je četrти harmonik, ki je pričakovani po podatkovnih listih [?]. Vzrok četrtega harmonika je tretji harmonik v signalih  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ , ki se pojavi zaradi magnetenja.



Slika 6.2:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



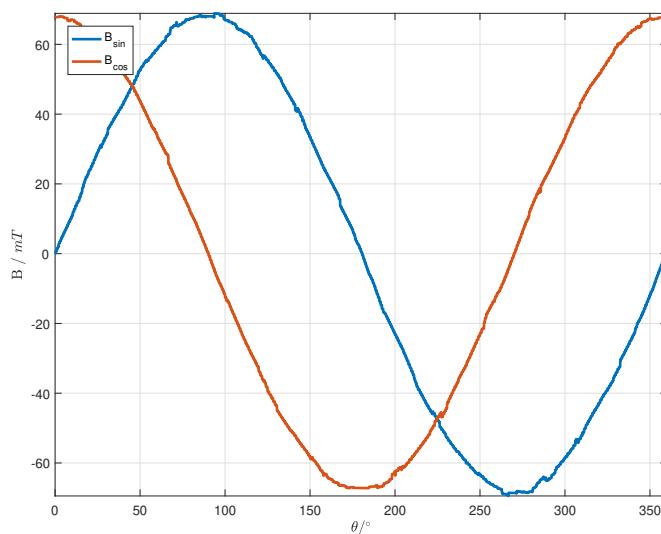
Slika 6.3: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



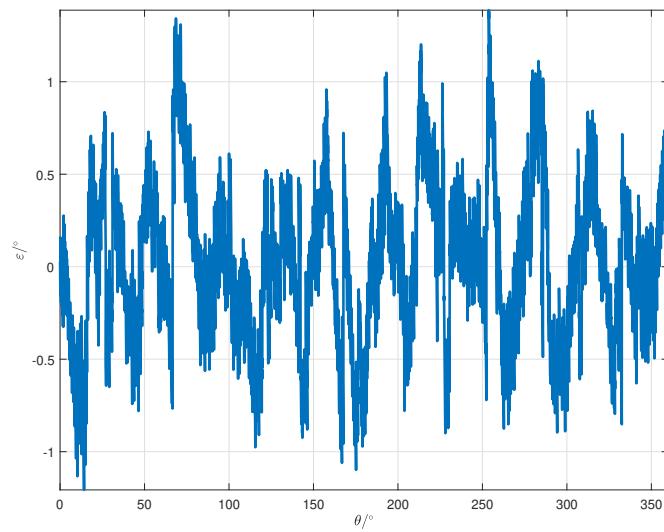
Slika 6.4: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem brez ekscentričnosti

## 6.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

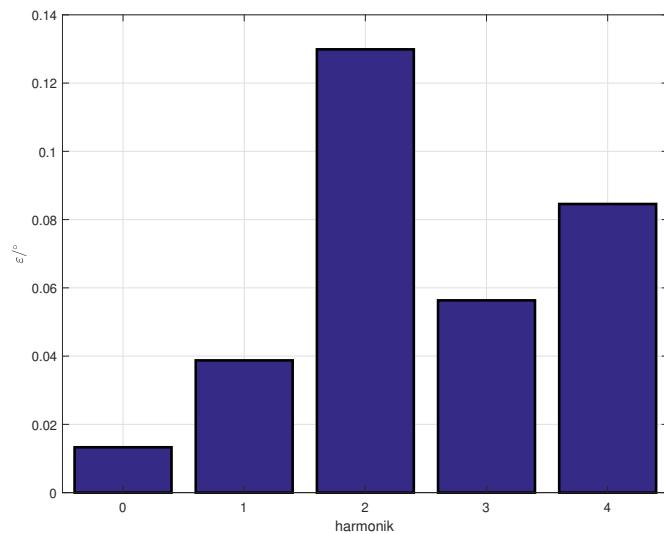
Po pričakovanjih se bo spremenila amplituda  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  signala ter zmanjšal njun fazni zamik (izraza (5.2) in 5.3). Na sliki 6.5 se opazi zmanjšano amplitudo signala  $B_{cos}$ . Na sliki 6.6 je prikazana napaka  $\varepsilon$ . Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 6.7) prikaže predvideno povišanje amplitudo drugega harmonika, kar je predvideno tudi v podatkovnih listih [?].



Slika 6.5:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x



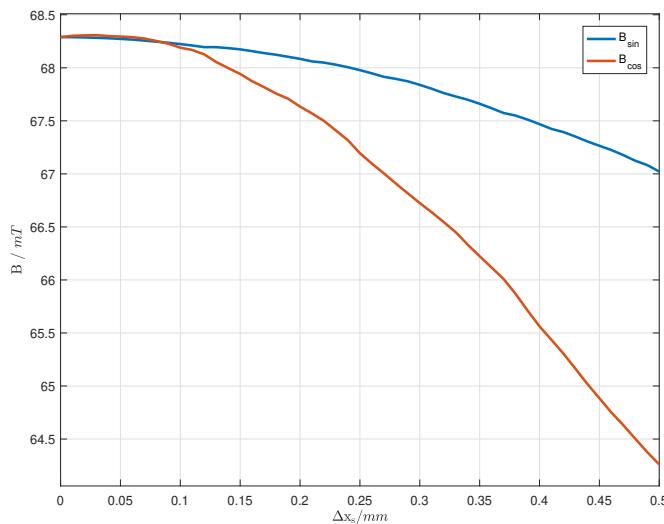
Slika 6.6: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x



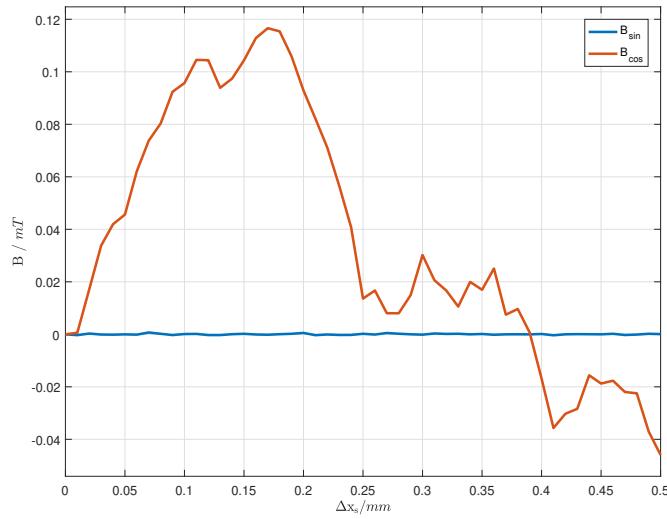
Slika 6.7: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20mm statične ekscentričnosti v smeri x

### 6.2.1 Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x

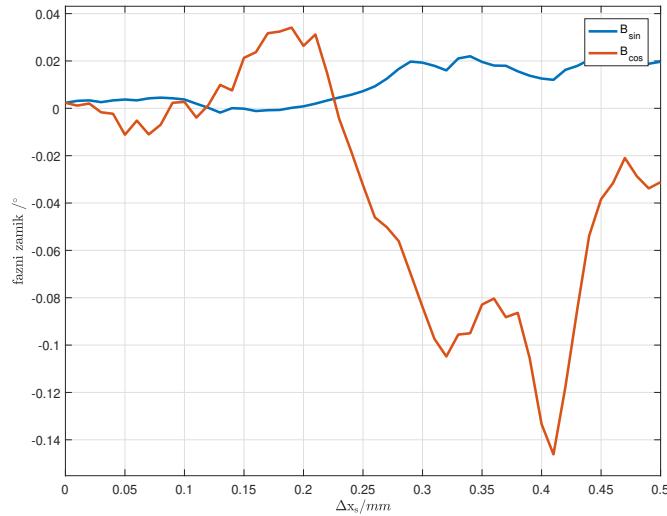
Na sliki 6.8 je prikazana sprememba amplitude prvega harmonika signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Pričakovano je hitrejše spremenjanje amplitude signala  $B_{cos}$ . Na sliki 6.9 je prikazan potek enosmerne komponente  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Po rezultatih simulacij ni bilo pričakovano spremenjanje enosmerne komponente. Enosmerna komponenta se spreminja, vendar je njen vpliv praktično zanemarljiv. Slika 6.10 prikazuje potek faznih signalov. Fazi osajati praktično konstantni.



Slika 6.8: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 6.9: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 6.10: Fazni zamik  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$

Poteke se aproksimira s kubičnimi polinomi. Na sliki 6.11 so prikazani potekи amplitud posameznega harmonika ob spremjanja statične ekscentričnosti v smeri x. Amplituda drugega harmonika narašča eksponentno, enosmerna kom-

ponenta nekoliko pada (6.7)-(6.11). Zanimiv je tudi upad četrtega harmonika, ki v delu ni posebaj obravnavan.

$$\begin{aligned} Off_{sin}(\Delta x_s) = & 1,15 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^3 - 1,67 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^2 + 6,08 \cdot 10^{-4} \Delta x_s \\ & - 2,68 \cdot 10^{-5} \end{aligned} \quad (6.1)$$

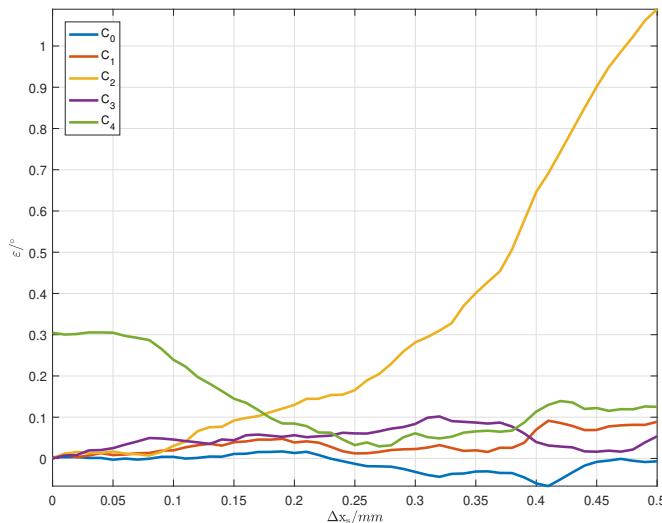
$$A_{sin}(\Delta x_s) = 1,84 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 5,17 \Delta x_s^2 + 2,24 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 6,83 \cdot 10 \quad (6.2)$$

$$\delta_{sin}(\Delta x_s) = -1,02 \Delta x_s^3 + 8,18 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 - 1,31 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 6,23 \cdot 10^{-3} \quad (6.3)$$

$$Off_{cos}(\Delta x_s) = 8,50 \Delta x_s^3 - 7,49 \Delta x_s^2 + 1,60 \Delta x_s - 4,68 \cdot 10^{-3} \quad (6.4)$$

$$A_{cos}(\Delta x_s) = 1,27 \cdot 10 \Delta x_s^3 - 2,50 \cdot 10 \Delta x_s^2 + 1,16 \Delta x_s + 6,83 \cdot 10 \quad (6.5)$$

$$\delta_{cos}(\Delta x_s) = 1,12 \cdot 10 \Delta x_s^3 - 8,16 \Delta x_s^2 + 1,34 \Delta x_s - 3,78 \cdot 10^{-2} \quad (6.6)$$



Slika 6.11: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z realnim poljem

$$C_0(\Delta x_s) = 5,02\Delta x_s^3 - 3,63\Delta x_s^2 + 5,93 \cdot 10^{-1}\Delta x_s - 1,47 \cdot 10^{-2} \quad (6.7)$$

$$C_1(\Delta x_s) = 3,79\Delta x_s^3 - 2,50\Delta x_s^2 + 5,17 \cdot 10^{-1}\Delta x_s - 4,10 \cdot 10^{-3} \quad (6.8)$$

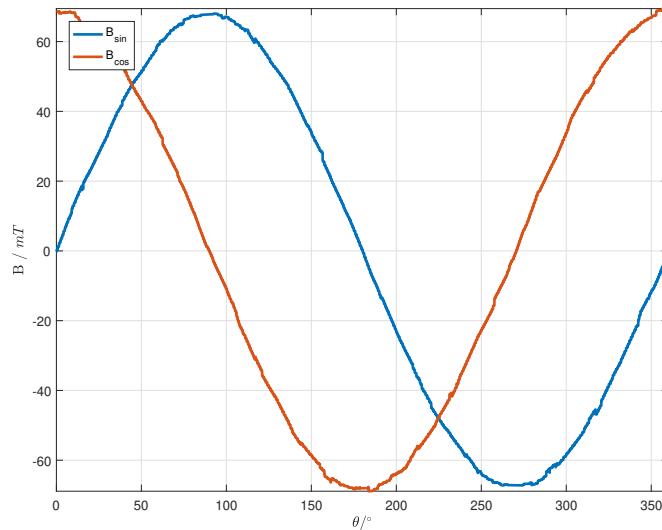
$$C_2(\Delta x_s) = 1,05 \cdot 10\Delta x_s^3 - 1,52\Delta x_s^2 + 4,53 \cdot 10^{-1}\Delta x_s - 5,39 \cdot 10^{-5} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} C_3(\Delta x_s) = & -1,41\Delta x_s^3 + 8,22 \cdot 10^{-2}\Delta x_s^2 + 3,19 \cdot 10^{-1}\Delta x_s \\ & + 7,42 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (6.10)$$

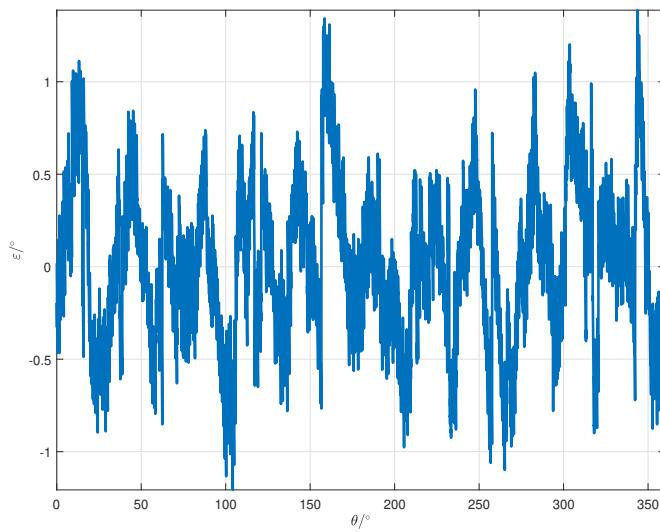
$$C_4(\Delta x_s) = 1,24\Delta x_s^3 + 2,20\Delta x_s^2 - 1,80\Delta x_s + 3,64 \cdot 10^{-1} \quad (6.11)$$

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

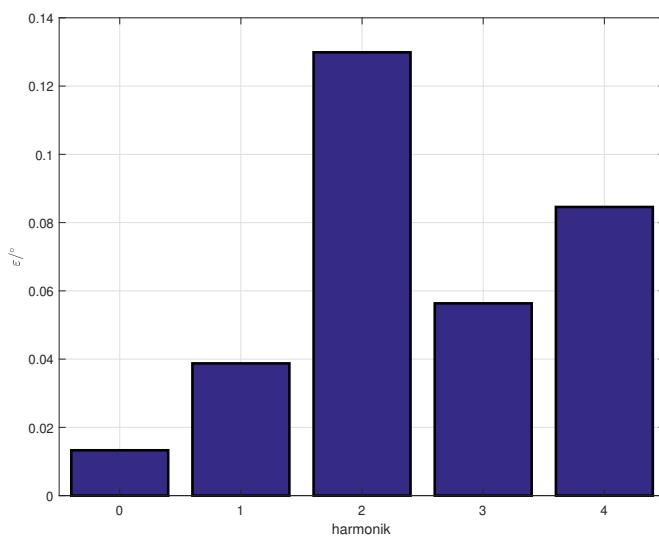
Pri statični ekscentričnosti v smeri y je pričakovano glede na prejšnje podpoglavlje, znižanje amplitude  $B_{sin}$  (slika 6.12). Napaka  $\varepsilon$  (slika 6.13) je enake oblike kot je bila pri simulacijah statične ekscentričnosti v smeri x (slika 6.6). Napaka ima le negativno enosmerno komponento. Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 6.7) potrdi pričakovanja.



Slika 6.12:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.13: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.14: Amplitudo harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri y

### 6.3.1 Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y

Potek amplitude osnovnega harmonika  $B_{sin}$  (slika 6.15) se spreminja kot se je spreminja amplituda osnovnega hamronika  $B_{cos}$  pri simulacijah statične ekscentričnosti v smeri x. Enosmerena komponenta (slika 6.16) pri  $B_{sin}$  se spreminja enako, kot enosmerna komponenta  $B_{cos}$  pri statični ekscentričnosti v smeri x (slika 6.9). Fazni zamik signala  $B_{sin}$  se spreminja, kot se je spremjal zamik  $B_{cos}$  pri ekscentričnosti v smeri x (slika 6.17). Poteki zapisani s kubičnimi polinomi.

$$Off_{sin}(\Delta y_s) = 8,50\Delta y_s^3 - 7,49\Delta y_s^2 + 1,60\Delta y_s - 4,68 \cdot 10^{-3} \quad (6.12)$$

$$A_{sin}(\Delta y_s) = 1,27 \cdot 10\Delta y_s^3 - 2,50 \cdot 10\Delta y_s^2 + 1,16\Delta y_s + 6,83 \cdot 10 \quad (6.13)$$

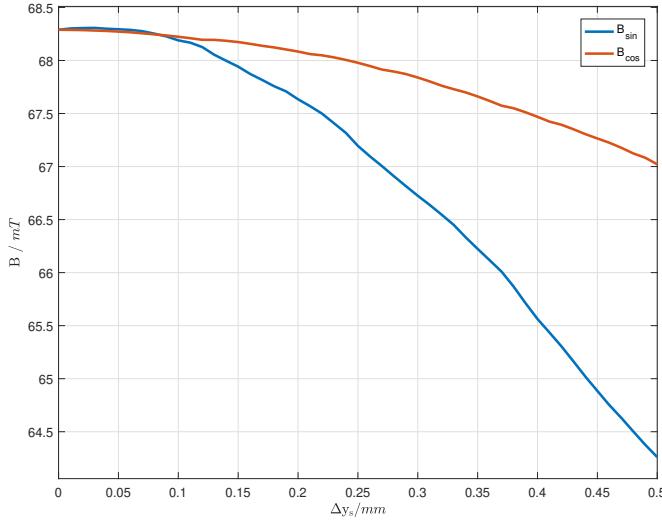
$$\delta_{sin}(\Delta y_s) = 1,12 \cdot 10\Delta y_s^3 - 8,16\Delta y_s^2 + 1,34\Delta y_s - 3,78 \cdot 10^{-2} \quad (6.14)$$

$$Off_{cos}(\Delta y_s) = -1,15 \cdot 10^{-3}\Delta y_s^3 + 1,67 \cdot 10^{-3}\Delta y_s^2 - 6,08 \cdot 10^{-4}\Delta y_s + 2,68 \cdot 10^{-5} \quad (6.15)$$

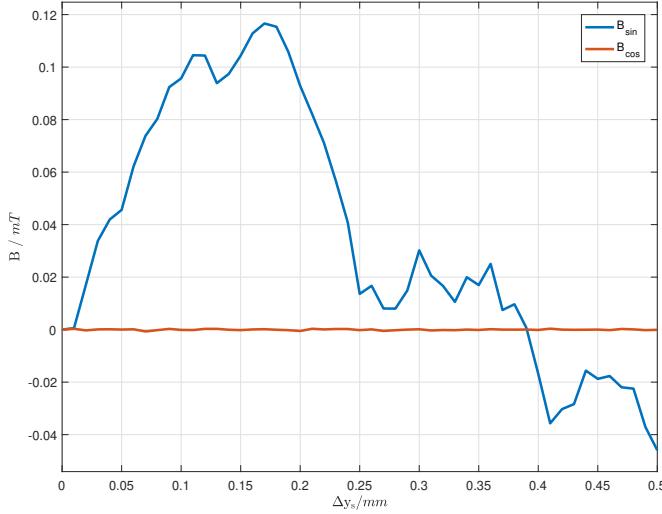
$$A_{cos}(\Delta y_s) = 1,84 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 - 5,17\Delta y_s^2 + 2,24 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 6,83 \cdot 10 \quad (6.16)$$

$$\delta_{cos}(\Delta y_s) = -1,02\Delta y_s^3 + 8,18 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 1,31 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 6,23 \cdot 10^{-3} \quad (6.17)$$

Enačbe prikazujejo enake poteke kot poteki pri statični ekscentričnosti v smeri x. 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 6.15: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.16: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

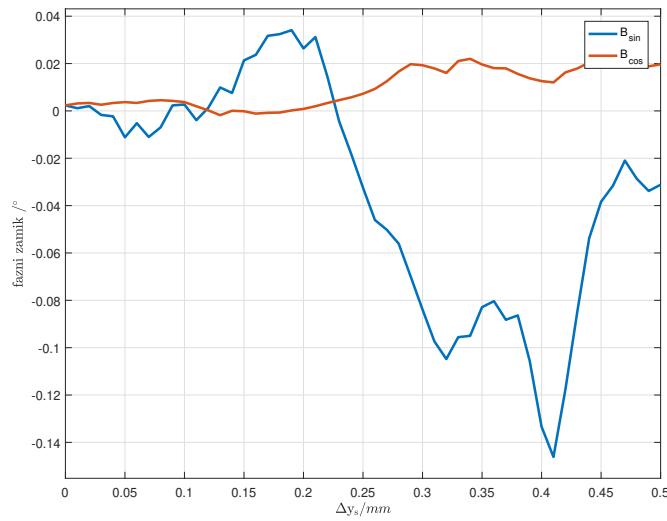
$$C_0(\Delta y_s) = 5,02\Delta y_s^3 - 3,63\Delta y_s^2 + 5,93 \cdot 10^{-1}\Delta y_s - 1,47 \cdot 10^{-2} \quad (6.18)$$

$$C_1(\Delta y_s) = 3,79\Delta y_s^3 - 2,50\Delta y_s^2 + 5,17 \cdot 10^{-1}\Delta y_s - 4,10 \cdot 10^{-3} \quad (6.19)$$

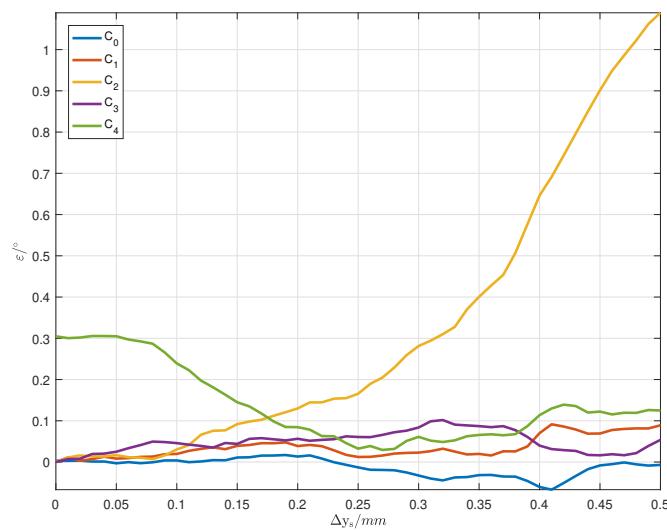
$$C_2(\Delta y_s) = 1,05 \cdot 10\Delta y_s^3 - 1,52\Delta y_s^2 + 4,53 \cdot 10^{-1}\Delta y_s - 5,39 \cdot 10^{-5} \quad (6.20)$$

$$\begin{aligned} C_3(\Delta y_s) = & -1,41\Delta y_s^3 + 8,22 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 + 3,19 \cdot 10^{-1}\Delta y_s \\ & + 7,42 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (6.21)$$

$$C_4(\Delta y_s) = 1,24\Delta y_s^3 + 2,20\Delta y_s^2 - 1,80\Delta y_s + 3,64 \cdot 10^{-1} \quad (6.22)$$



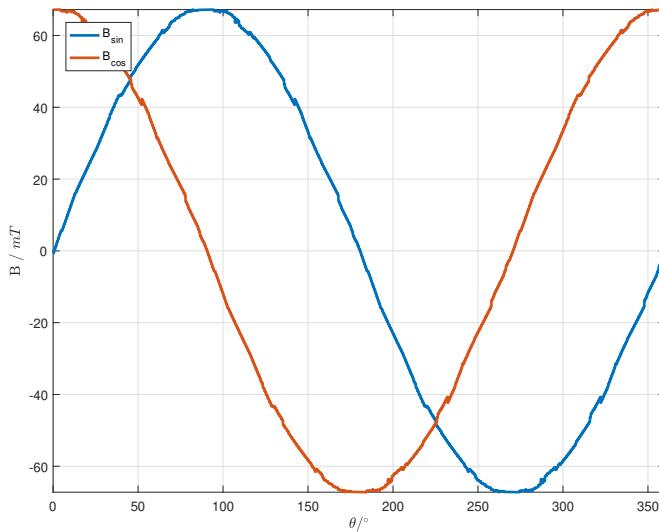
Slika 6.17: Fazni zamik  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$



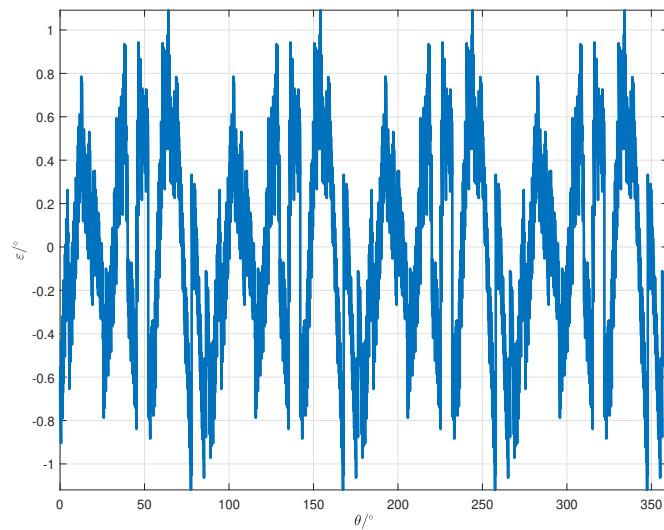
Slika 6.18: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z realnim poljem

## 6.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x

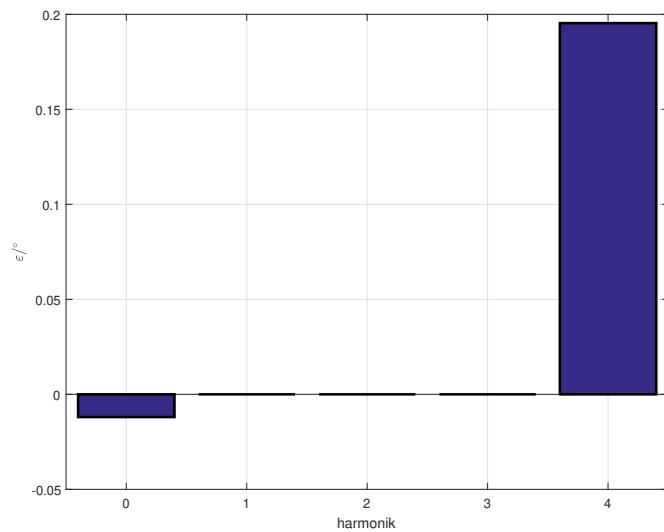
Vpliv dinamične ekscentričnosti v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je pričakovani v obliki enosmerne komponente, vendar se zaradi diferencialnega zajema lete odštejeti. Na sliki 6.19 sta  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ , kjer ni vidnih razlik. V napaki (slika 6.20) tudi ni posebnosti, razvoj napake v Fourierovo prikaže majšo spremembo (slika 6.21). V napaki se pojavi enosmerna komponenta.



Slika 6.19:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



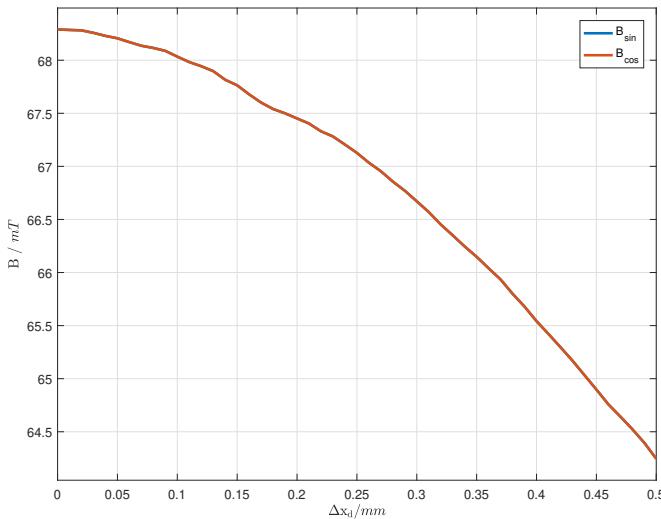
Slika 6.20: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 6.21: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

#### 6.4.1 Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x

Spremembe amplitude osnovnega harmonika pri  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  ni bila pričakovana. Na napako zmanjšanje obeh amplitud ne vpliva. Enosmerni komponenti signalov (slika 6.23) se zaradi diferencialnega zajema odštejeti. Fazna razlika signalov ostaja konstantna, vendar je opazno lezenje obeh signalov in posledično naraščanje enosmerne komponente napake. Poteki zapisani s kubičnimi



Slika 6.22: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

polinomi predstavijo enako spremenjanje signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ .

$$Off_{sin}(\Delta x_d) = 0\Delta x_d^3 + 0\Delta x_d^2 + 0\Delta x_d + 0 \quad (6.23)$$

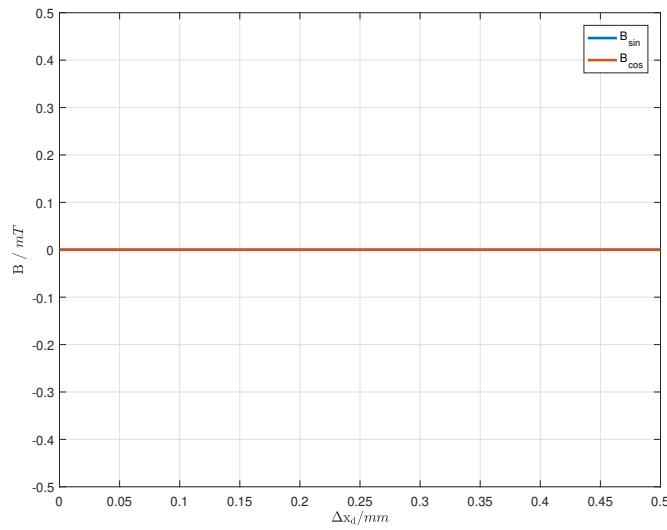
$$A_{sin}(\Delta x_d) = 2,56 \cdot 10^{-2}\Delta x_d^3 - 1,33 \cdot 10\Delta x_d^2 - 1,52\Delta x_d + 6,83 \cdot 10 \quad (6.24)$$

$$\delta_{sin}(\Delta x_d) = 5,79\Delta x_d^3 - 5,26\Delta x_d^2 + 7,87 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 6,23 \cdot 10^{-3} \quad (6.25)$$

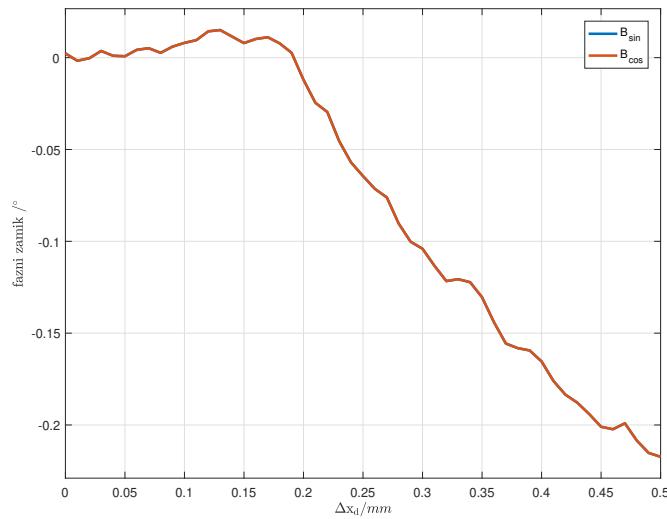
$$Off_{cos}(\Delta x_d) = 0\Delta x_d^3 + 0\Delta x_d^2 + 0\Delta x_d + 0 \quad (6.26)$$

$$A_{cos}(\Delta x_d) = 2,56 \cdot 10^{-2}\Delta x_d^3 - 1,33 \cdot 10\Delta x_d^2 - 1,52\Delta x_d + 6,83 \cdot 10 \quad (6.27)$$

$$\delta_{cos}(\Delta x_d) = 5,79\Delta x_d^3 - 5,26\Delta x_d^2 + 7,87 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,57 \cdot 10^{-2} \quad (6.28)$$

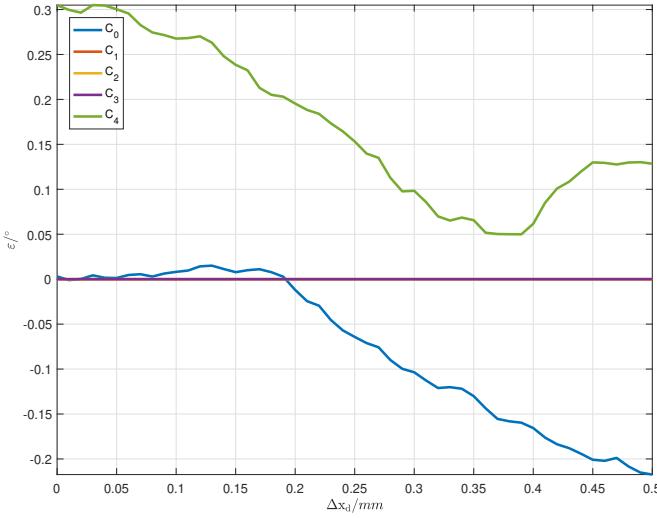


Slika 6.23: Enosmerna komponenta  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 6.24: Fazni zamik  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$

Potek posameznih harmonikov napake je viden na sliki 6.25. Iz potekov parametrov signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ , so pričakovane sprembe v enosmerni komponenti. Poteiki so aproksimirani s kubičnimi polinomi.



Slika 6.25: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od dinamične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z realnim poljem

$$C_0(\Delta x_d) = 5,74\Delta x_d^3 - 5,22\Delta x_d^2 + 7,77 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,49 \cdot 10^{-2} \quad (6.29)$$

$$\begin{aligned} C_1(\Delta x_d) = & 1,51 \cdot 10^{-14}\Delta x_d^3 - 1,72 \cdot 10^{-14}\Delta x_d^2 + 5,51 \cdot 10^{-15}\Delta x_d \\ & + 5,84 \cdot 10^{-15} \end{aligned} \quad (6.30)$$

$$\begin{aligned} C_2(\Delta x_d) = & -2,86 \cdot 10^{-15}\Delta x_d^3 + 3,37 \cdot 10^{-15}\Delta x_d^2 - 3,04 \cdot 10^{-16}\Delta x_d \\ & + 2,91 \cdot 10^{-15} \end{aligned} \quad (6.31)$$

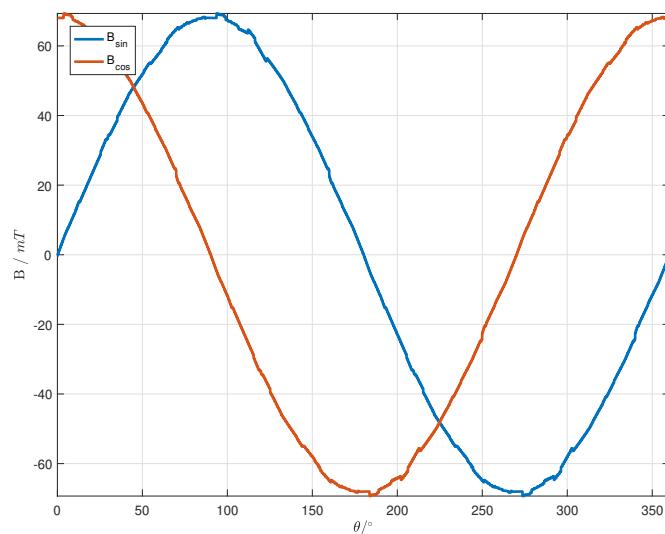
$$\begin{aligned} C_3(\Delta x_d) = & 1,36 \cdot 10^{-14}\Delta x_d^3 - 8,85 \cdot 10^{-15}\Delta x_d^2 + 1,03 \cdot 10^{-15}\Delta x_d \\ & + 7,33 \cdot 10^{-16} \end{aligned} \quad (6.32)$$

$$C_4(\Delta x_d) = 1,06 \cdot 10\Delta x_d^3 - 6,51\Delta x_d^2 + 3,46 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 2,96 \cdot 10^{-1} \quad (6.33)$$

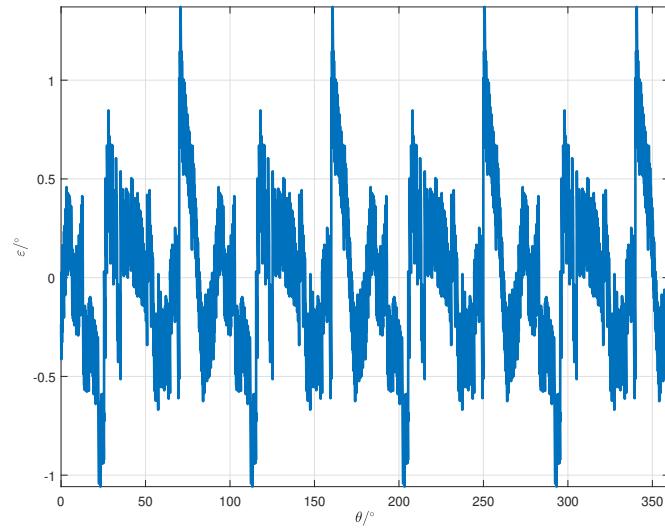
## 6.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y

V simulacijah z linearno aproksimacijo polja signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  ter posledično tudi napaka, ni bila odvisna od dinamične ekscentričnosti v smeri y. Tu je bila kljub temu opravljena simulacija. Rezultati so podobni dinamični ekscentričnosti v smeri x. Spremembe v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  ni opaziti (slika 6.26), prav tako ne v

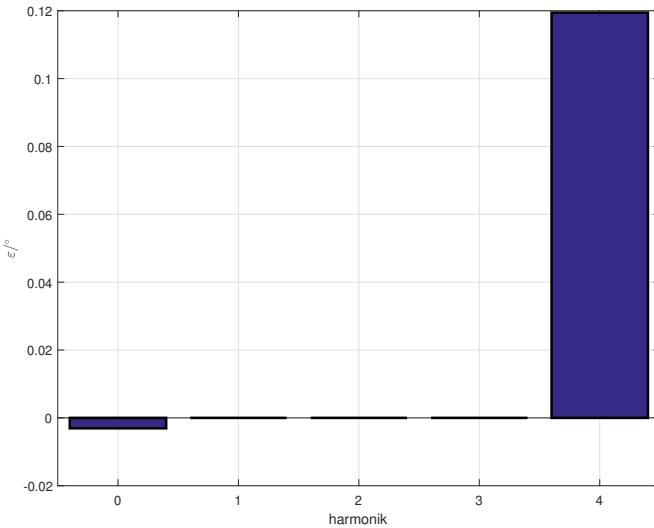
napaki (slika 6.26). Razvoj v Fourierovo vrsto prikaže spremembo enosmerne komponente.



Slika 6.26:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.27: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.28: Amplitudo harmonikov napake  $\epsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y

### 6.5.1 Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri y

Sprememba amplituda osnovnega harmonika od naraščanja ekscentričnosti pada (slika 6.29). Razlika amplitud ostaja nespremenjena. Enosmerni komponenti se odštejeti (slika 6.30). Opaziti je tudi fazno lezenje obeh signalov (slika 6.31). Poteki so aproksimirani s kubičnimi polinomi.

$$Off_{sin}(\Delta y_d) = 0\Delta y_d^3 + 0\Delta y_d^2 + 0\Delta y_d + 0 \quad (6.34)$$

$$A_{sin}(\Delta y_d) = -6,30\Delta y_d^3 - 1,34\Delta y_d^2 - 4,05 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 6,83 \cdot 10 \quad (6.35)$$

$$\delta_{sin}(\Delta y_d) = 6,51\Delta y_d^3 - 5,38\Delta y_d^2 + 8,76 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 2,65 \cdot 10^{-2} \quad (6.36)$$

$$Off_{cos}(\Delta y_d) = 0\Delta y_d^3 + 0\Delta y_d^2 + 0\Delta y_d + 0 \quad (6.37)$$

$$A_{cos}(\Delta y_d) = -6,30\Delta y_d^3 - 1,34\Delta y_d^2 - 4,05 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 6,83 \cdot 10 \quad (6.38)$$

$$\delta_{cos}(\Delta y_d) = 6,51\Delta y_d^3 - 5,38\Delta y_d^2 + 8,76 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 2,65 \cdot 10^{-2} \quad (6.39)$$

Na sliki 6.32 je prikazana odvisnost amplitud napake ob spremjanju di-

namične ekscentričnosti v smeri y. Napaka se izrazi le v enosmerni komponenti.

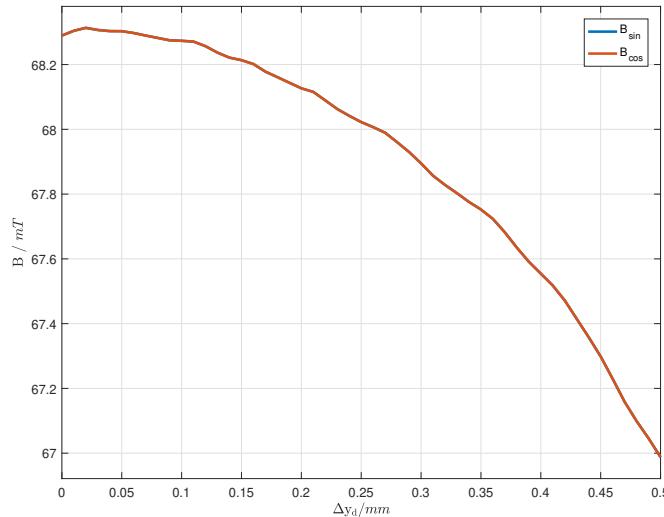
$$C_0(\Delta y_d) = 6,53\Delta y_d^3 - 5,39\Delta y_d^2 + 8,75 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 2,59 \cdot 10^{-2} \quad (6.40)$$

$$\begin{aligned} C_1(\Delta y_d) = & -3,87 \cdot 10^{-14}\Delta y_d^3 + 2,37 \cdot 10^{-14}\Delta y_d^2 - 3,01 \cdot 10^{-15}\Delta y_d \\ & + 6,30 \cdot 10^{-15} \end{aligned} \quad (6.41)$$

$$\begin{aligned} C_2(\Delta y_d) = & 6,08 \cdot 10^{-14}\Delta y_d^3 - 4,53 \cdot 10^{-14}\Delta y_d^2 + 8,57 \cdot 10^{-15}\Delta y_d \\ & + 2,79 \cdot 10^{-15} \end{aligned} \quad (6.42)$$

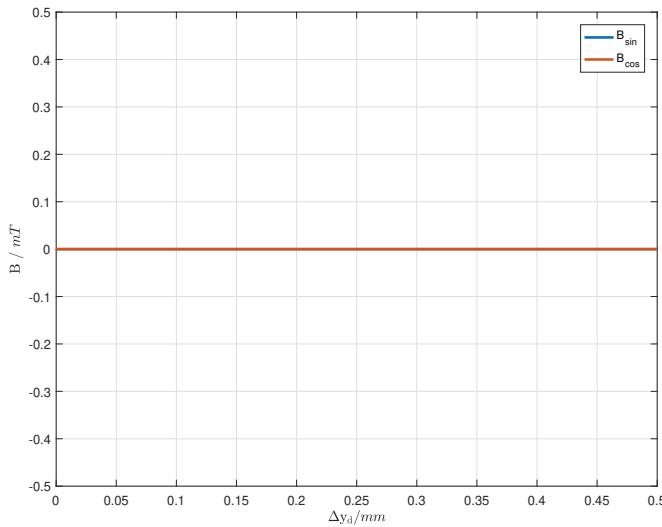
$$\begin{aligned} C_3(\Delta y_d) = & -9,53 \cdot 10^{-15}\Delta y_d^3 + 7,01 \cdot 10^{-15}\Delta y_d^2 - 1,24 \cdot 10^{-15}\Delta y_d \\ & + 7,33 \cdot 10^{-16} \end{aligned} \quad (6.43)$$

$$C_4(\Delta y_d) = 7,51\Delta y_d^3 - 1,78\Delta y_d^2 - 9,72 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,24 \cdot 10^{-1} \quad (6.44)$$

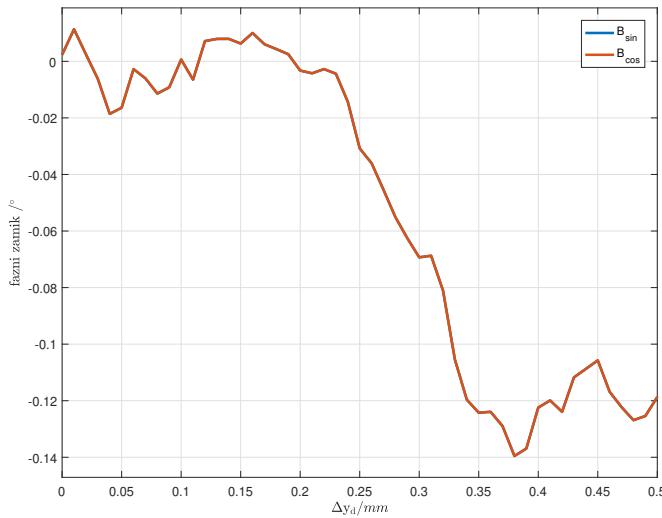


Slika 6.29: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y

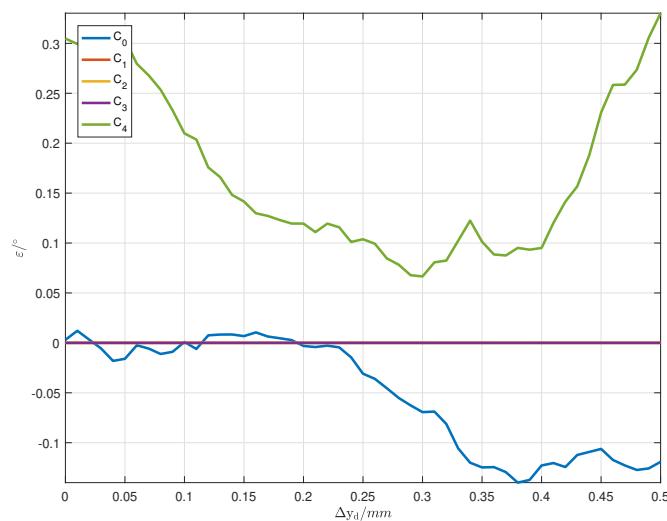
V tem poglavju so bile prikazane simulacije z uporabo realnega polja, ki ga merijo Hall-ove sonde. Rezultati podajo manjšo napako kot pri simulacijah z aproksimiranim linearnim magnetnim poljem. Z diferencialnim merjenjem, se odstrani enosmerno komponento v signalih  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$ .



Slika 6.30: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.31: Fazni zamik  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$



Slika 6.32: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od dinamične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z realnim poljem



# 7 Meritve

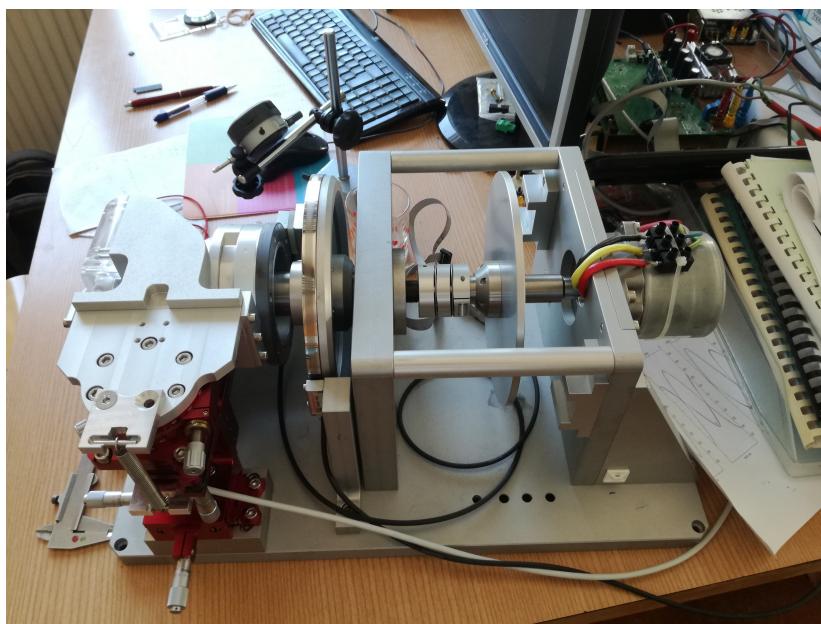
Simulacije so prikazale okvirne poteke  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  signalov ter napake ob posameznih ekscentričnostih. Na meritni napravi so bile opravljene meritve ekscentričnosti. V poglavju je opisana meritna naprava, zajem podatkov ter izvedba meritev.

## 7.1 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 7.1). Senzor RM44 je pritrjen na konstrukcijo 6-osnega mikrometrskoga nastavljalnika pozicije HTIMS601. Celotno meritno mesto je prikazano na sliki 7.2. Za manevriranje s HTIMS601 je potrebno nastaviti 6 osi. S postavitvijo koordinatnega sistema (slika 7.3), je vsak od vijakov definiral premik senzorja. Vsako os se nastavlja z enim od vijakov (slika 7.4). 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



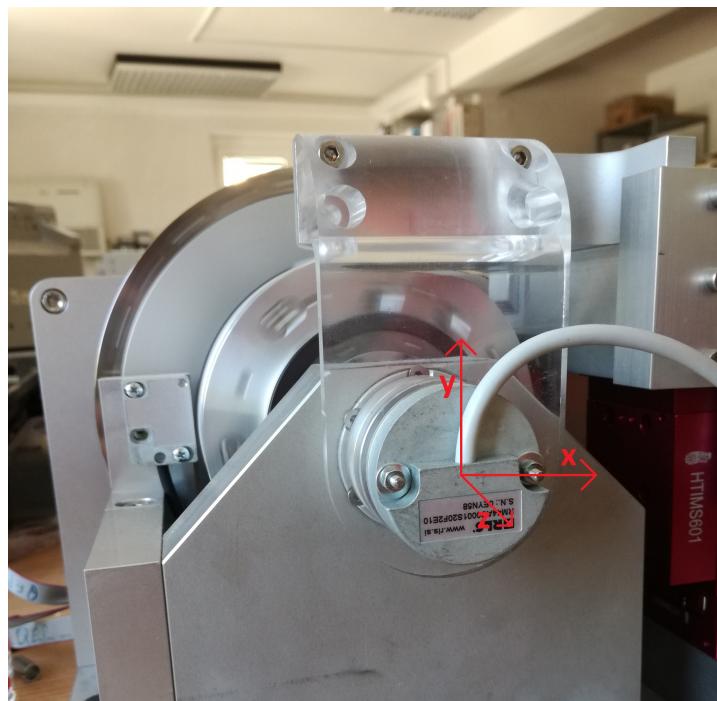
Slika 7.1: Dinamično ekscentričnost se lahko izmeri le v eni smeri



Slika 7.2: Postavitev testnega mesta

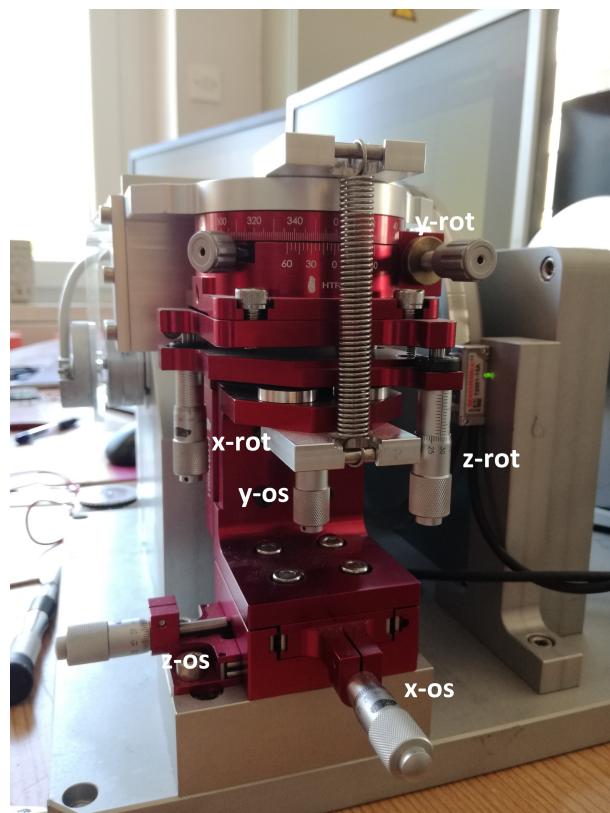
popraviti tudi nastavitev vijakov, ki senzor premikajo v translacijskih oseh.

Hitrost vrtenja pogona je nastavljiva. Hitrost vrtenja je pogona je nastavljena na 60 RPM. Hitrost ni popolnoma konstantna (slika 7.5). Vzrok je v vztrajno-

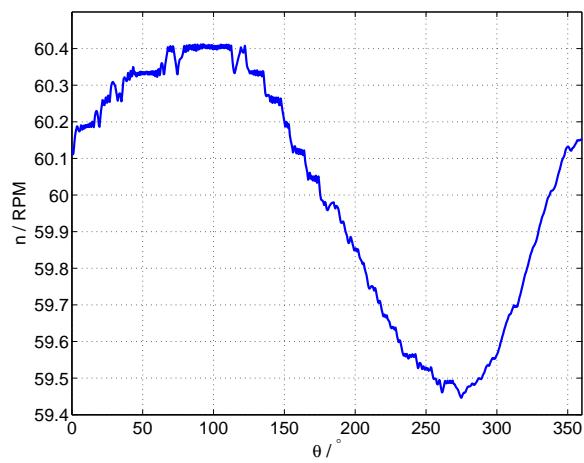


Slika 7.3: Postavitev testnega mesta

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



Slika 7.4: Naprava za nastavljanje statične ekscentričnosti



Slika 7.5: Potek hitrosti od zasuka

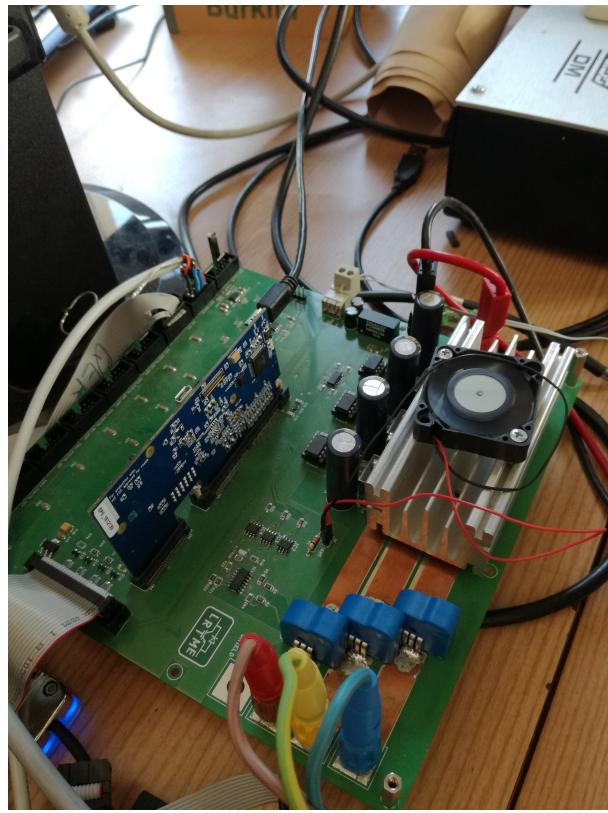
## 7.2 Zajem podatkov

Mitja Nemeč je pripravil grafični uporabniški vmesnik za prikazovanje meritvev (slika 7.6). Vmesnik lahko prikazuje potek refernečnega kota,  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  senzorja RM44, izračunanega kota iz  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  signala, napako med izračunanim kotom senzorja in referenčnim dajalnikom, hitrost vrtenja ter tok prve faze motorskega pogona. Signaloma  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  se v programu prišteje enosmerna komponenta, ki bi popravila izhodna signala.

Krmilna plošča (slika 7.7) zajema podatke s pogona s frekvenco 1kHz. Referenčni inkrementalni dajalnik, se ob zagonu inicializira. V programu se podatek o kotu deli z 12595200. Definicjsko območje referenčnega kota se giblje med 0 in 1. Signala sin in cos se na krmilni plošči ojačata in pretvorita z 12 bitnim AD pretvornikom. Izhodu AD pretvornika se odšteje 2048 in deli s 4096. Definicjsko območje sin in cos signala se 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 obdela. Na sliki 7.6 je prikazan sinusni signal prikazan kot da je zamaknjen za  $180^\circ$ . To je posledica definicije pozitvne smeri vrtenja za senzor [?]. Senzor ima nasproto definirano pozitivno smer vrtenja. To sem rešil tako, da sem obrnil podatke. Popraviti je bilo potrebno tudi potek referenčnega dajalnika.



Slika 7.6: Grafični vmesnik s poteki signalov

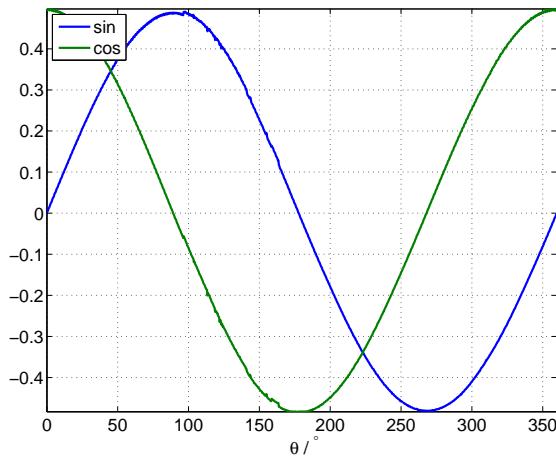


Slika 7.7: Krmilna plošča za krmiljenje pogona in obdelavo signalov s dajalnikov položaja

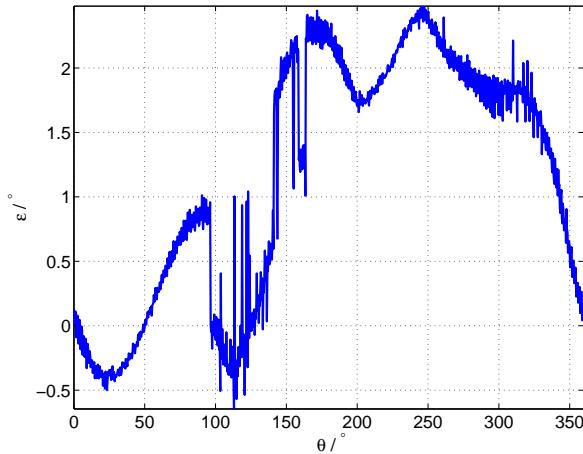
### 7.3 Senzor v izhodiščni legi

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  $\pm 3^\circ$  m<sub>pp</sub>. S prilagajanjem vijakov HTIMS601, opazovanjem  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  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  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  morata ustrezati definicijskem območju zajema AD pretvornika.

Na sliki 7.8 sta prikazana  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Enosmerni komponenti sta prisotni v obeh signalih, posledično se izrazi v napaki prvi harmonik (slika 7.9). V napaki se pojavi med  $95^\circ$  in  $140^\circ$  preskok napake. Vzroka nisem raziskoval. Z razvojem napake v Fourierovo vrsto (slika 7.10) vidimo velikosti posameznih amplitud napake. Enosmerna komponenta je posledica sofaznih zamikov obeh signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Prvi harmonik je posledica ensmernih komponent  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Z matematično obdelavo siganlov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  sem enosmerni komponenti odstranil, vendar se prvi harmonik napake še vedno izrazi. Prvi harmonik napake je odvisen tudi od drugega harmonika v signalih  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Z odstranitvijo tudi drugega harmonika iz signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je bil prvi harmonik v napaki odstranjen. Signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  med izvajanjem meritev ne bosta spremenjena zaradi matematične obdelave. Spreminjanje signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  in napake se bo opazovalo glede na potek, ki je bil pomerjen v izhodiščni legi.



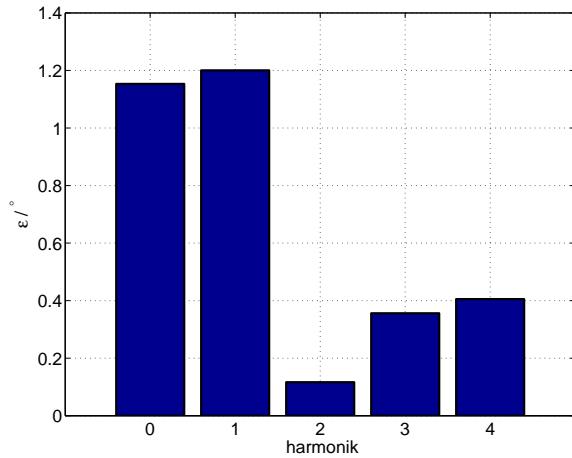
Slika 7.8: Signalna  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pomerjena v izhodiščni legi



Slika 7.9: Napaka  $\varepsilon$  pomerjena v izhodiščni legi

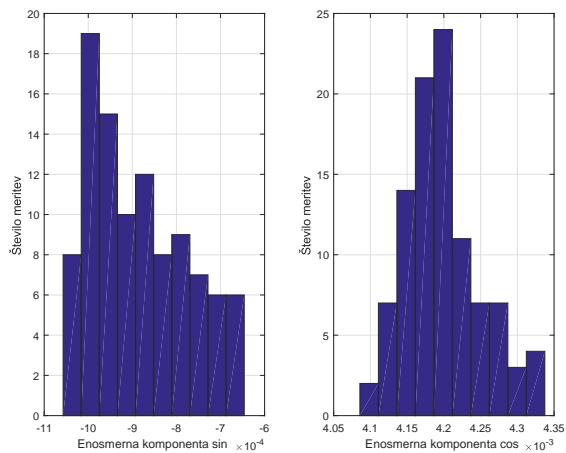
### 7.3.1 Meritve v izhodiščni legi

V izhodiščni legi je bilo opravljenih več meritov. Osredotočil sem se na enosmerni komponenti in amplitudi osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Porazdelitev enosmerne komponente signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je prikazana na sliki 7.11. Srednja vrednost enosmerne komponente  $B_{sin}$  je  $-8,85 \cdot 10^{-4}$ , standardna deviacija je



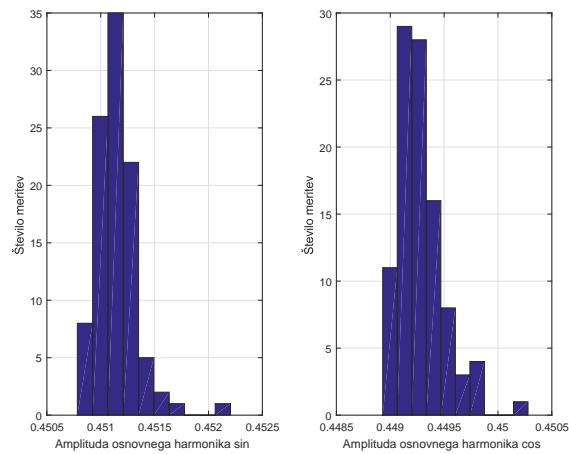
Slika 7.10: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri meritvah v izhodiščni legi

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



Slika 7.11: Porazdelitev meritev enosmerne komponente signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$

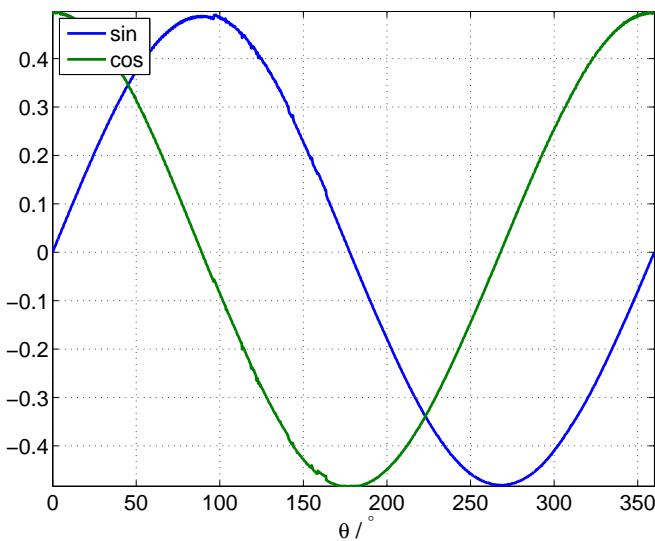
$B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je prikazana na sliki 7.11. Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika  $B_{sin}$  je  $0,451$ , standardna deviacija je  $2,20 \cdot 10^{-4}$ . Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika  $B_{cos}$  je  $0,449$ , standardna deviacija je  $1,95 \cdot 10^{-4}$ .



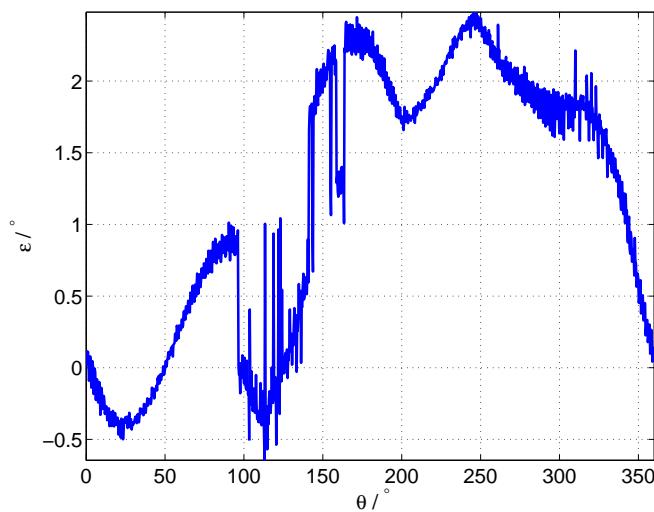
Slika 7.12: Porazdelitev meritev amplitude osnovnega harmonika signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$

## 7.4 Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi

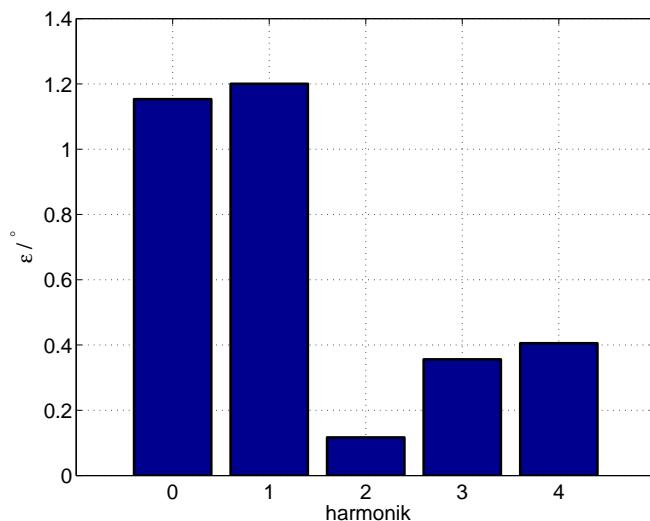
Pri meritvi je pričakovati spremembo amplitud in faznih zamikov signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Na sliki 7.13 sta prikazana  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pomerjena pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x. Na signalih, med 95 in 175° se pojavijo nenavadni skoki. Izrazijo se tudi na napaki, ki je prikazana na sliki 7.14. 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 7.13: Signalna  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.14: Napaka  $\varepsilon$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.15: Amplitudo harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

### 7.4.1 Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x

Iz simulacij se pričakuje hitrejše sprememjanje amplitude osnovnega harmonika  $B_{cos}$  signala. Sprememba amplitud osnovnih harmonikov je prikazana na sliki 7.16. Amplituda signala  $B_{cos}$  pada, pada tudi amplituda signala  $B_{sin}$ . Signala nimata enake amplitude v izhodišču, kar je posledica neidealne izhodiščne lege. Potek enosmerne komponente je prikazan na sliki 7.17. Fazni zamik signalov je prikazan na sliki 7.18. Pričakovano po simulacijah se fazna razlika med signaloma zmanjšuje. Pri meritvah se je fazni kot  $B_{cos}$  zmanjševal, fazni kot  $B_{sin}$  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  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  so aproksimirani s kubičnimi polinomi.

$$Off_{sin}(\Delta x_s) = -3,88 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 + 2,37 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 2,25 \cdot 10^{-3} \Delta x_s - 9,53 \cdot 10^{-4} \quad (7.1)$$

$$A_{sin}(\Delta x_s) = -6,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 1,71 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 1,17 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 4,84 \cdot 10^{-1} \quad (7.2)$$

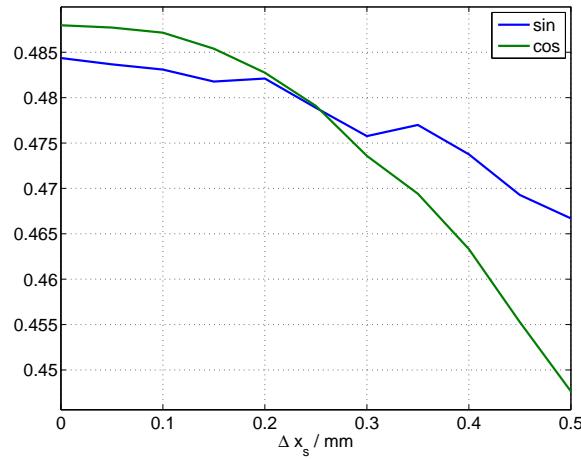
$$\delta_{sin}(\Delta x_s) = 5,32 \Delta x_s^3 - 3,55 \Delta x_s^2 + 3,49 \Delta x_s - 8,89 \cdot 10 \quad (7.3)$$

$$Off_{cos}(\Delta x_s) = 2,21 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 1,91 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 3,91 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 6,48 \cdot 10^{-3} \quad (7.4)$$

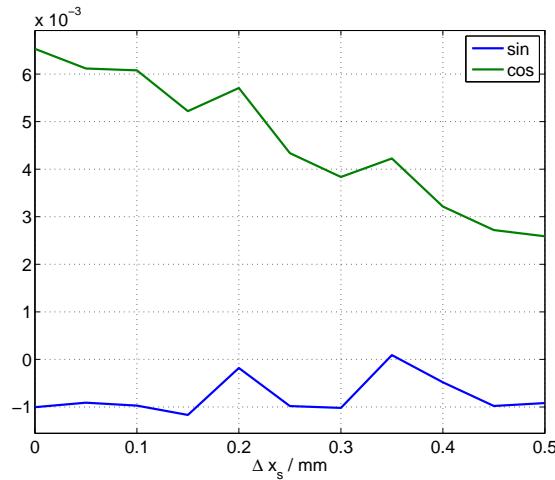
$$A_{cos}(\Delta x_s) = 7,46 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^3 - 1,85 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 1,01 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 4,88 \cdot 10^{-1} \quad (7.5)$$

$$\delta_{cos}(\Delta x_s) = 1,15 \cdot 10 \Delta x_s^3 - 1,06 \cdot 10 \Delta x_s^2 - 1,14 \Delta x_s + 1,19 \quad (7.6)$$

Slika 7.19 prikazuje poteke amplitud posameznih harmonikov 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 7.16: Potek amplitude osnovnega harmonika  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.17: Potek enosmerne komponente  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x

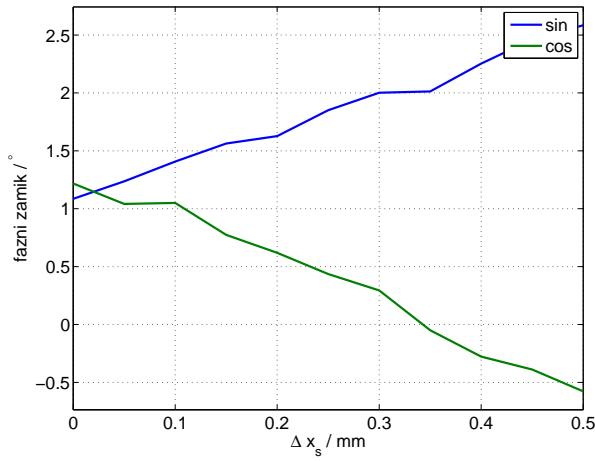
$$C_0(\Delta x_s) = 2,42\Delta x_s^3 - 1,71\Delta x_s^2 + 2,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,15 \quad (7.7)$$

$$C_1(\Delta x_s) = -3,01\Delta x_s^3 + 2,35\Delta x_s^2 - 6,35 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,21 \quad (7.8)$$

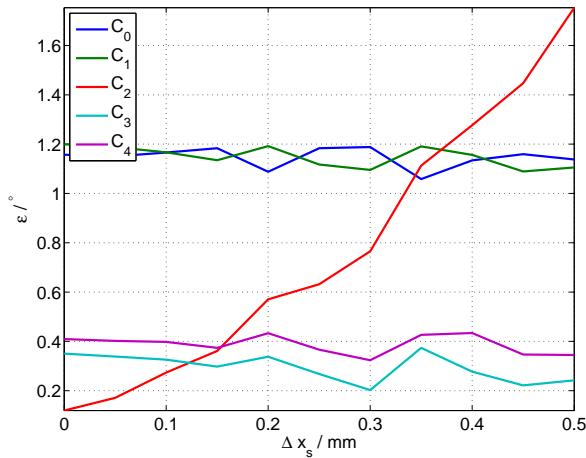
$$C_2(\Delta x_s) = -1,11\Delta x_s^3 + 5,06\Delta x_s^2 + 9,95 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,18 \cdot 10^{-1} \quad (7.9)$$

$$C_3(\Delta x_s) = -2,10\Delta x_s^3 + 1,61\Delta x_s^2 - 5,25 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 3,57 \cdot 10^{-1} \quad (7.10)$$

$$C_4(\Delta x_s) = -3,24\Delta x_s^3 + 2,29\Delta x_s^2 - 4,73 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 4,17 \cdot 10^{-1} \quad (7.11)$$



Slika 7.18: Fazni zamik osnovnega harmonika  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$

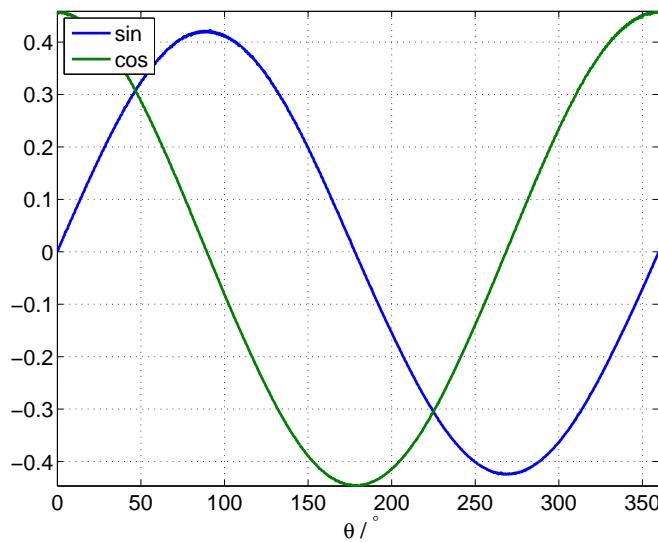


Slika 7.19: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x

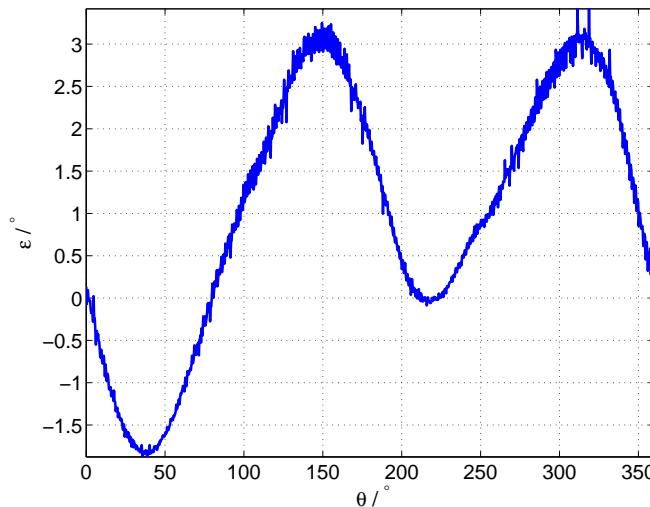
## 7.5 Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi

Slika 7.20 prikazuje zajeta signala  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri statični ekscentričnosti v smeri y. Amplituda  $B_{\sin}$  se je zmanjšala, kot je bilo pričakovati po rezultatih simula-

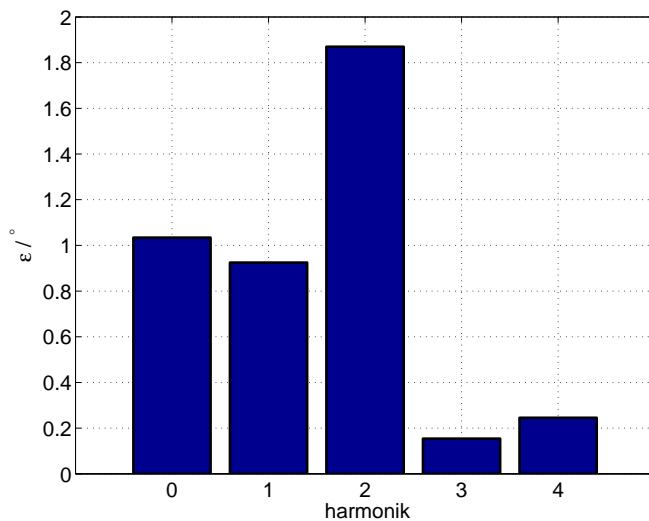
cij. Posledično se izrazi v napaki višji drugi harmonik (slika 7.21). Z razvojem napake v Fourierovo vrsto se potrdi povišanje drugega harmonika. Enosmerna komponenta in prvi harmonik sta nekoliko nižja.



Slika 7.20: Signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.21: Napaka  $\varepsilon$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.22: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

### 7.5.1 Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y

Slika 7.23 prikazuje potek amplitud osnovnega hamonika napake v odvisnosti statične ekscentričnosti v smeri y. S potekom se opazi padanje amplitud. Slika 7.24 prikazuje potek enosmernih komponent. Pri meritvi 0,15 mm se pojavi skok enosmernih komponent, vendar razlika ostaja enaka. Pričakovana je bila manjša

variacija faznega kota.

$$\begin{aligned} Off_{sin}(\Delta y_s) = & 4,69 \cdot 10^{-2} \Delta y_s^3 + 1,32 \cdot 10^{-2} \Delta y_s^2 - 2,29 \cdot 10^{-2} \Delta y_s \\ & + 7,08 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (7.12)$$

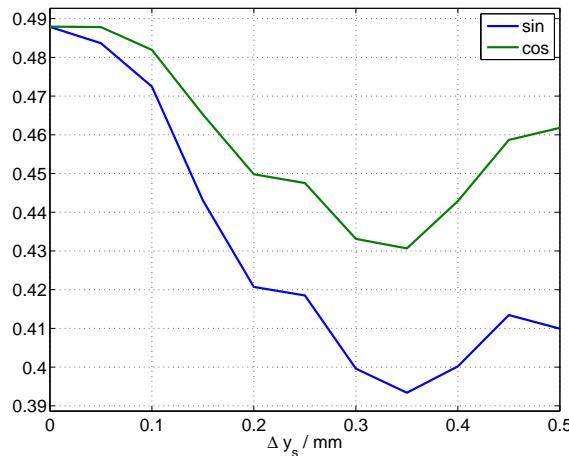
$$\begin{aligned} A_{sin}(\Delta y_s) = & 1,73 \Delta y_s^3 - 6,47 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^2 - 2,60 \cdot 10^{-1} \Delta y_s \\ & + 4,94 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.13)$$

$$\delta_{sin}(\Delta y_s) = 3,37 \cdot 10 \Delta y_s^3 - 2,12 \cdot 10 \Delta y_s^2 + 3,81 \Delta y_s - 8,91 \cdot 10 \quad (7.14)$$

$$\begin{aligned} Off_{cos}(\Delta y_s) = & 1,87 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 - 7,92 \cdot 10^{-2} \Delta y_s^2 - 9,87 \cdot 10^{-3} \Delta y_s \\ & + 9,94 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (7.15)$$

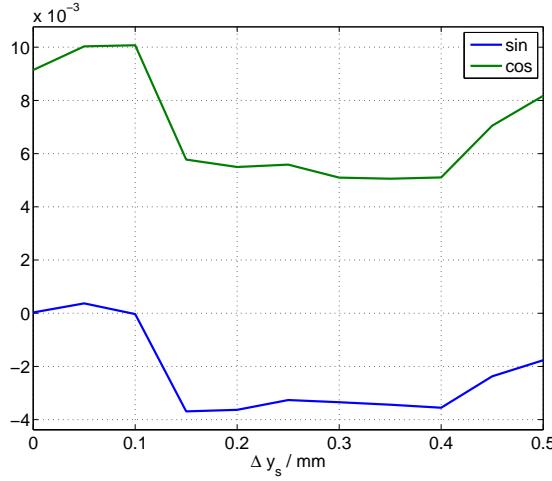
$$\begin{aligned} A_{cos}(\Delta y_s) = & 1,99 \Delta y_s^3 - 9,29 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^2 - 7,82 \cdot 10^{-2} \Delta y_s \\ & + 4,91 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.16)$$

$$\delta_{cos}(\Delta y_s) = -1,76 \cdot 10 \Delta y_s^3 - 9,77 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^2 + 4,42 \Delta y_s + 3,59 \cdot 10^{-1} \quad (7.17)$$

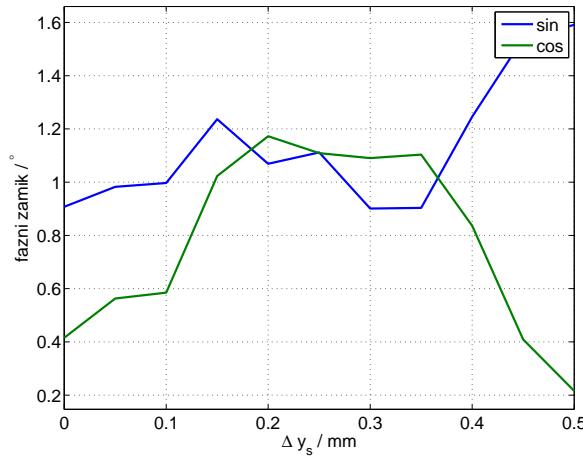


Slika 7.23: Potek amplitude osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y

Slika 7.26 prikazuje poteke amplitude posameznih harmonikov napake. Kot je bilo pričakovano se spreminja le amplituda drugega harmonika.



Slika 7.24: Potek enosmerne komponente  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.25: Fazni zamik osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y glede na izhodiščno lego

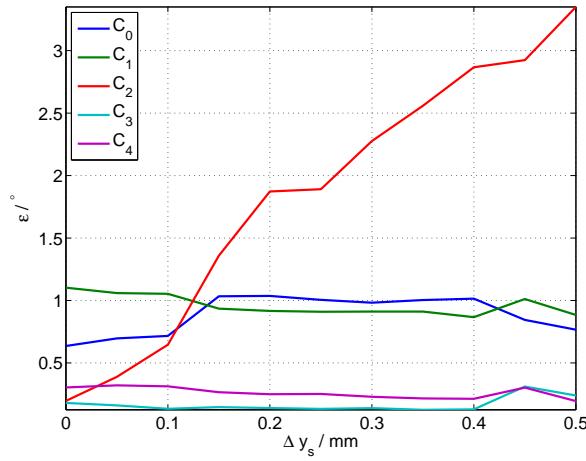
$$C_0(\Delta y_s) = -3,26\Delta y_s^3 - 3,10\Delta y_s^2 + 2,68\Delta y_s + 6,00 \cdot 10^{-1} \quad (7.18)$$

$$C_1(\Delta y_s) = -2,38\Delta y_s^3 + 3,50\Delta y_s^2 - 1,54\Delta y_s + 1,12 \quad (7.19)$$

$$C_2(\Delta y_s) = -4,15\Delta y_s^3 - 1,64\Delta y_s^2 + 8,22\Delta y_s + 8,04 \cdot 10^{-2} \quad (7.20)$$

$$C_3(\Delta y_s) = 2,30\Delta y_s^3 - 1,37 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 3,13 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 1,78 \cdot 10^{-1} \quad (7.21)$$

$$\begin{aligned} C_4(\Delta y_s) = & 7,11 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 - 7,96 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 - 3,14 \cdot 10^{-1}\Delta y_s \\ & + 3,21 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.22)$$



Slika 7.26: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y

## 7.6 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  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ , 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.

$$Off_{sin}(\Delta x_d) = 0\Delta x_d^3 + 0\Delta x_d^2 + 0\Delta x_d + 0 \quad (7.23)$$

$$A_{sin}(\Delta x_d) = -1,39 \cdot 10\Delta x_d^3 - 2,47\Delta x_d^2 - 2,24\Delta x_d + 6,83 \cdot 10 \quad (7.24)$$

$$\delta_{sin}(\Delta x_d) = 8,95\Delta x_d^3 - 1,06\Delta x_d^2 + 7,09 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 9,00 \cdot 10 \quad (7.25)$$

$$Off_{cos}(\Delta x_d) = 0\Delta x_d^3 + 0\Delta x_d^2 + 0\Delta x_d + 0 \quad (7.26)$$

$$A_{cos}(\Delta x_d) = -1,39 \cdot 10\Delta x_d^3 - 2,47\Delta x_d^2 - 2,24\Delta x_d + 6,83 \cdot 10 \quad (7.27)$$

$$\delta_{cos}(\Delta x_d) = 8,95\Delta x_d^3 - 1,06\Delta x_d^2 + 7,09 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,73 \cdot 10^{-2} \quad (7.28)$$

$$C_0(\Delta x_d) = 8,77\Delta x_d^3 - 9,23 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 + 6,83 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,59 \cdot 10^{-2} \quad (7.29)$$

$$C_1(\Delta x_d) = 2,73 \cdot 10^{-14}\Delta x_d^3 - 2,75 \cdot 10^{-14}\Delta x_d^2 + 7,03 \cdot 10^{-15}\Delta x_d + 5,79 \cdot 10^{-15} \quad (7.30)$$

$$C_2(\Delta x_d) = 8,94 \cdot 10^{-15}\Delta x_d^3 - 7,96 \cdot 10^{-15}\Delta x_d^2 + 1,84 \cdot 10^{-15}\Delta x_d + 2,87 \cdot 10^{-15} \quad (7.31)$$

$$C_3(\Delta x_d) = -5,57 \cdot 10^{-14}\Delta x_d^3 + 4,29 \cdot 10^{-14}\Delta x_d^2 - 8,87 \cdot 10^{-15}\Delta x_d + 1,06 \cdot 10^{-15} \quad (7.32)$$

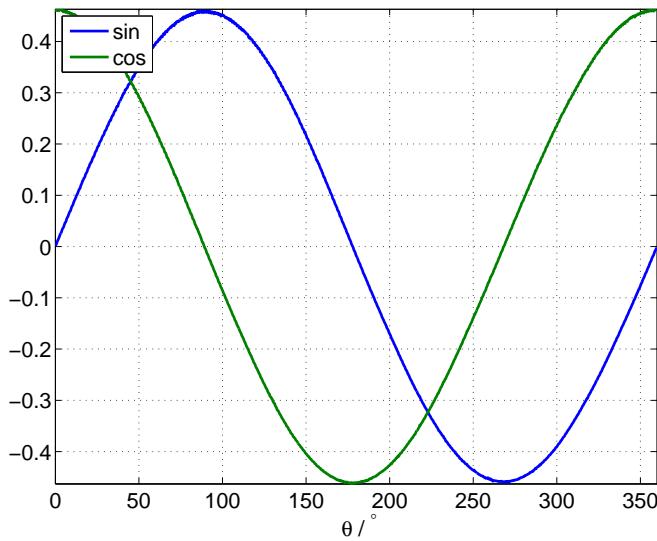
$$C_4(\Delta x_d) = -1,16 \cdot 10\Delta x_d^3 + 1,13 \cdot 10\Delta x_d^2 - 3,03\Delta x_d + 3,99 \cdot 10^{-1} \quad (7.33)$$

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

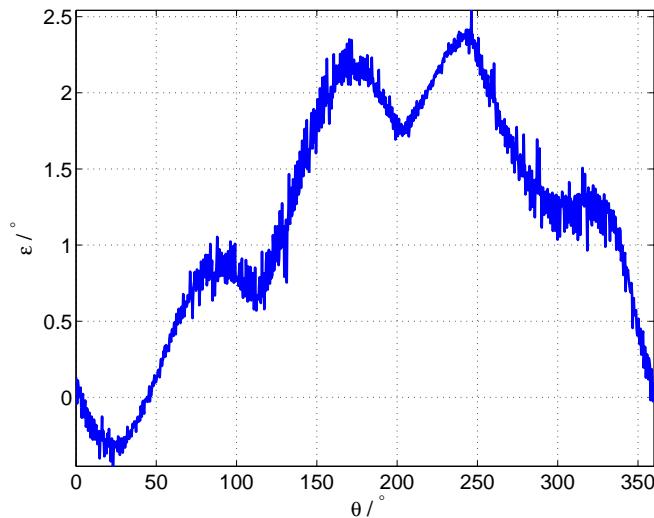
Pri dinamični ekscentričnosti v povzročeni smeri se signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  nista opazno spremenila (slika 7.27). Sprememb ni niti na napaki (slika 7.28). Sprememb se opazi v napaki razviti v Fourierovo vrsto (slika 7.29). Nekoliko se je povišala enosmerna komponenta.

### 7.6.1 Sprememb signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x

Potek spremnjanja amplitude osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  glede na dinamično ekscentričnost pričakovano pada (Slika 7.30). Razlika med amplitudama

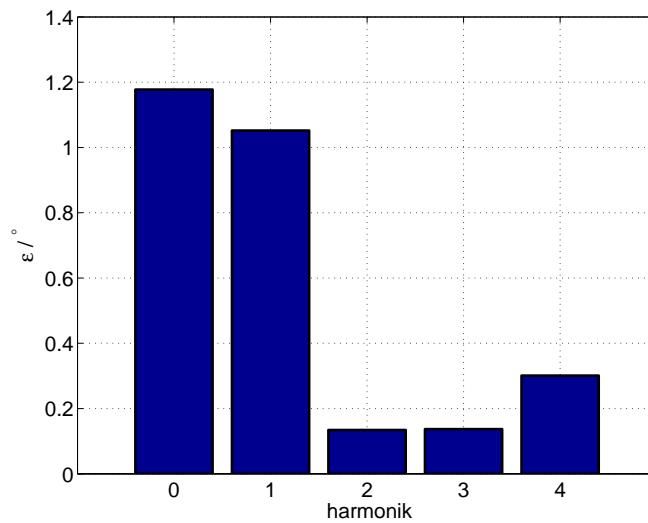


Slika 7.27: Signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



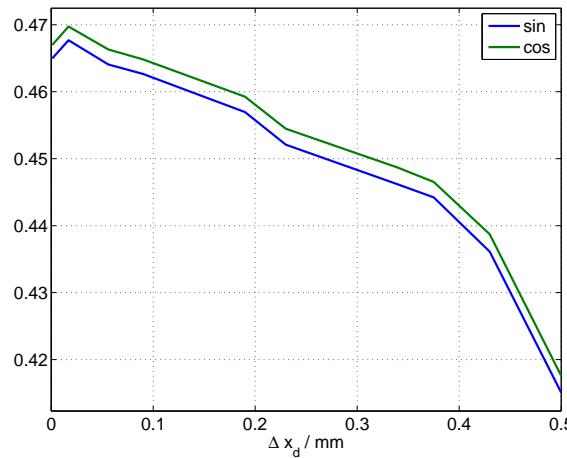
Slika 7.28: Napaka  $\varepsilon$  merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

ostaja tekom spremnjanja dinamične ekscentričnosti enaka. Enosmerni komponenti  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  padati, vendar vsaka s svojim gradientom. Sprememba enosmerne komponente je manjša, kot je bila predvidena v simulacijah. Sprememba

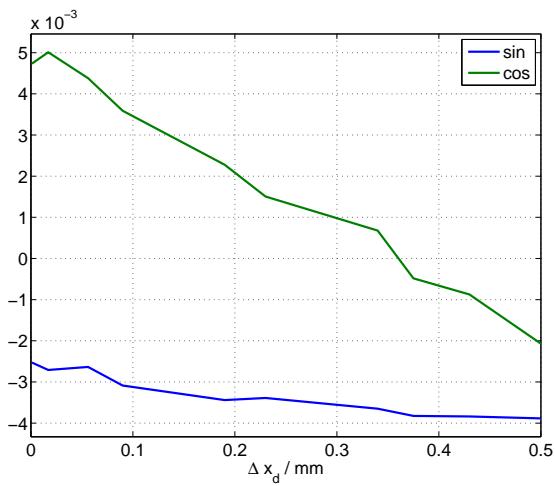


Slika 7.29: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

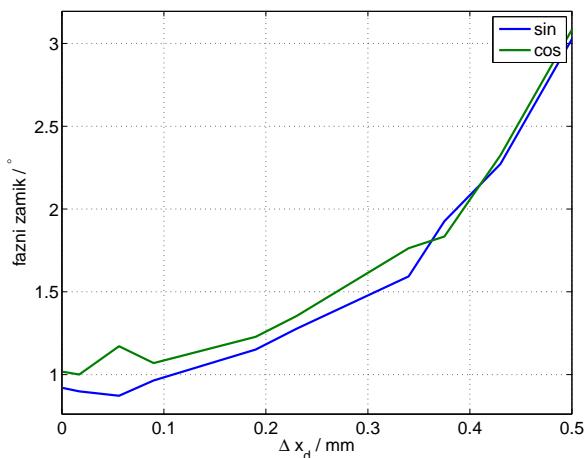
faznega zamika osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je prikazana na sliki 7.32. Fazna zamika s spremepo dinamične ekscentričnosti naraščata. V simulacijah tako velika sprememba enosmerne komponente ni bila pričakovana.



Slika 7.30: Potek amplitude osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.31: Potek enosmerne komponente  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.32: Fazni zamik osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na izhodiščno lego

Poteke prikazane na slikah 7.30 7.31 in 7.32, se lahko aproksimira s kubičnimi

polinomi.

$$\text{Off}_{\sin}(\Delta x_d) = -3,42 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^3 + 7,48 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^2 - 5,61 \cdot 10^{-3} \Delta x_d - 2,53 \cdot 10^{-3} \quad (7.34)$$

$$\begin{aligned} A_{\sin}(\Delta x_d) = & -7,95 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 4,05 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 1,06 \cdot 10^{-1} \Delta x_d \\ & + 4,68 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.35)$$

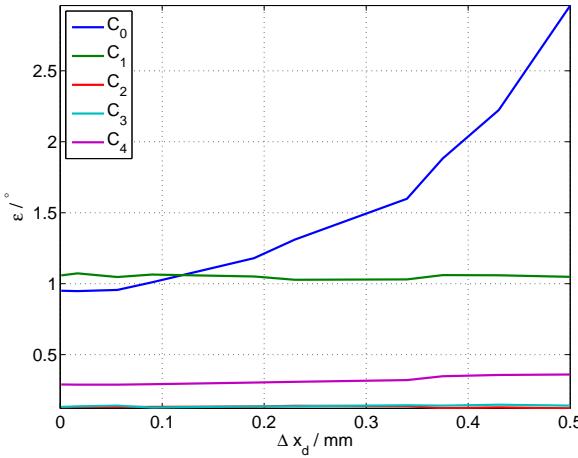
$$\delta_{\sin}(\Delta x_d) = 1,76 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 2,62 \Delta x_d^2 + 1,18 \Delta x_d - 8,91 \cdot 10 \quad (7.36)$$

$$\begin{aligned} \text{Off}_{\cos}(\Delta x_d) = & -1,58 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^3 + 1,22 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^2 - 1,63 \cdot 10^{-2} \Delta x_d \\ & + 5,05 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (7.37)$$

$$\begin{aligned} A_{\cos}(\Delta x_d) = & -7,90 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 4,00 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 1,04 \cdot 10^{-1} \Delta x_d \\ & + 4,70 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.38)$$

$$\delta_{\cos}(\Delta x_d) = 2,58 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 8,64 \Delta x_d^2 + 2,01 \Delta x_d + 1,00 \quad (7.39)$$

Iz potekov  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  signala je bila najbolj opazna sprememba faznega zamika obeh signalov. To se izrazi tudi v napaki izhodnega kota, ki pridobi enosmerno komponento. Ostali harmoniki napake so konstantni.



Slika 7.33: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x

$$C_0(\Delta x_d) = 2,03 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 5,17 \Delta x_d^2 + 1,57 \Delta x_d + 9,20 \cdot 10^{-1} \quad (7.40)$$

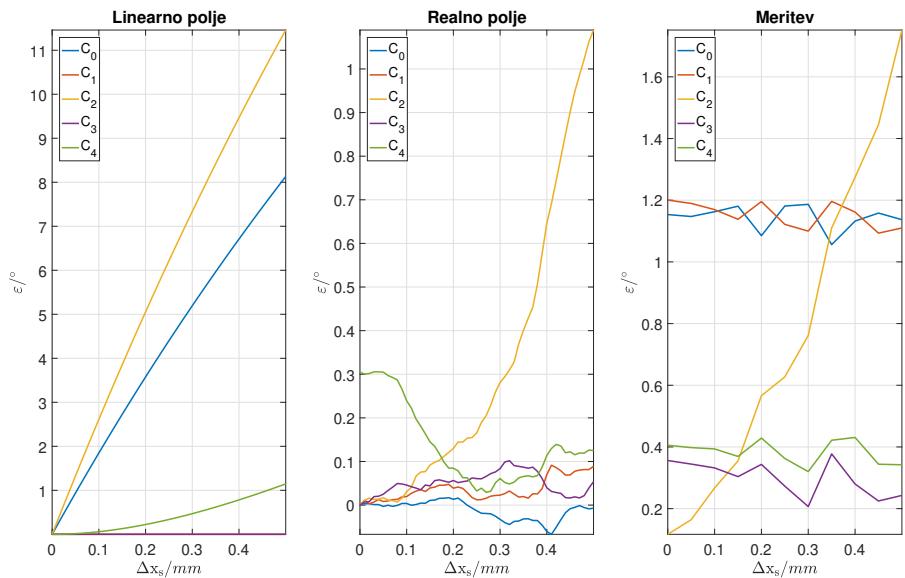
$$\begin{aligned} C_1(\Delta x_d) = & -4,97 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 6,69 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 2,36 \cdot 10^{-1} \Delta x_d \\ & + 1,07 \end{aligned} \quad (7.41)$$

$$\begin{aligned} C_2(\Delta x_d) = & 3,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^3 - 1,88 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 + 7,10 \cdot 10^{-2} \Delta x_d \\ & + 1,29 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.42)$$

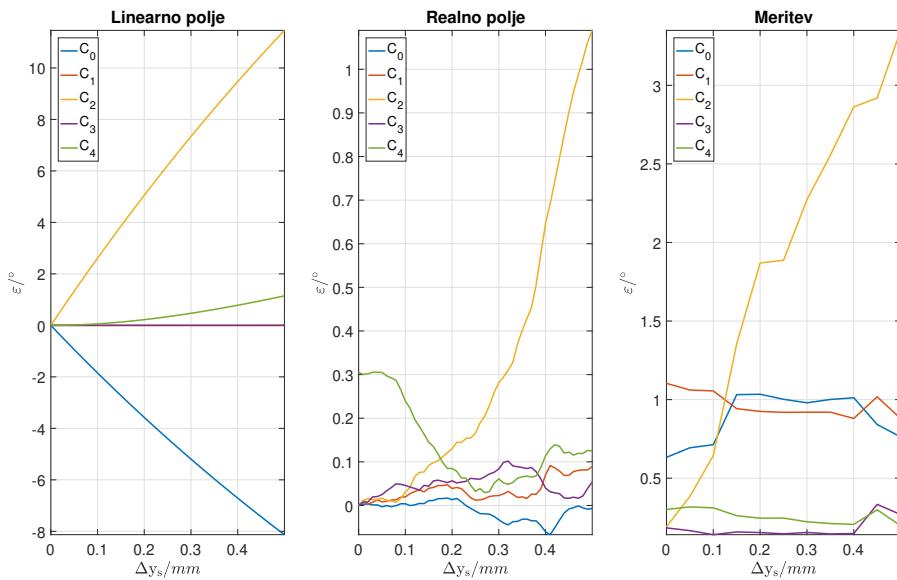
$$\begin{aligned} C_3(\Delta x_d) = & -5,91 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 4,51 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 6,48 \cdot 10^{-2} \Delta x_d \\ & + 1,35 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.43)$$

$$\begin{aligned} C_4(\Delta x_d) = & -9,91 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 9,61 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 8,81 \cdot 10^{-2} \Delta x_d \\ & + 2,91 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.44)$$

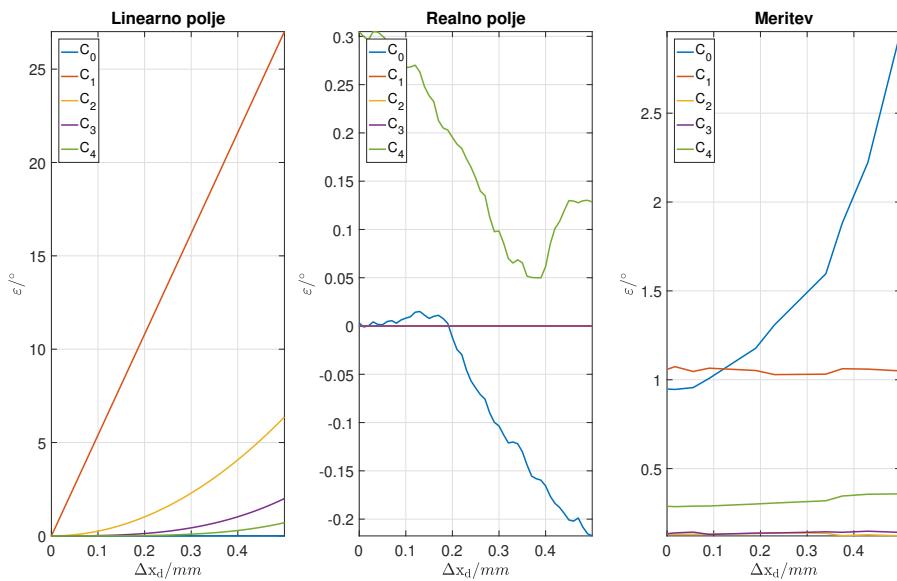
## 8 Primerjava rezultatov simulacij in meritev



Slika 8.1: Primerjave potekov amplitud harmonikov napake statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.2: Primerjave potekov amplitud harmonikov napake statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 8.3: Primerjave potekov amplitud harmonikov napake dinamične ekscentričnosti v smeri x

# 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 robusten 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 montriran senzor, se izrazi kot statična ekscentričnost. Hallova sonda v senzorju zajame magnetno polje s spremenjeno amplitudo in s spremenjenim faznim zamikom. Nepravilno montiran aktuator se izrazi kot dinamična ekscentričnost. Hallova sonda v senzorju pomeri dodatno enosmerno komponento magnetnega polja. Z diferencialnim odčitavanjem polja se odstrani enosmerno komponento.

### 9.3 Oblika napake

Zaradi nepravilnega zajema magnetnega polja, podatek o kotu vsebuje napako. Napaka zaradi dinamične ekscentričnosti se izrazi kot sinusni signal. Z diferencialnim odčitavanjem napaka ne vsebuje prvega harmonika temveč le enosmerno komponeto. Napaka zaradi statične ekscentričnosti se izrazi s sinusnim signalom dvojne frekvence in dodano enosmerno komponento.

### 9.4 Izvedba meritov

Delovnje senzorja nam je nepoznano (black-box). Senzor vrne izmerjena signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  iz katerih se z alogritmom, ki je v osnovi funkcija *atan2* izračuna kot. Na napravi izdelani v LRTME na fakulteti, so bile opravljene meritve. Meritve so potrdile pričlakovanja. Senzor ni bil postavljen v pravilno izhodiščno lego, zato se poteki statične ekscentričnosti v smeri x in y razlikujejo. Pravilno izhodiščno lego bi našel z uporabo razvojne plošče RMK2. RMK2 vsebuje enka čip AM256, uporabniku so navoljo vsi pini čipa. Čip ima analogni signal Error, s katerim se lahko preveri poravnava med osjo vrtenja, 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 štirih Hallovih sond, neposredno iz zatega polja je bil izračunan kot. Podobni senzorji [?], omogočajo popravljanje enosmernih komponent in razmerja amplitud osnovega harmonika signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . S kalibracijo senzorja bi bila napaka manjša.

Pri projektu sem se osredotočil le na parametre enosmerne komponente, amplitude in faze osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Signala vsebujeta tudi višje harmonike, kateri tu niso bili obravnavani.