

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>13</b>
3.1 Definicija koordinatnega sistema . . . . .	13
3.2 Izpeljava gibanja lokacije Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti . . . . .	14
3.3 Izpeljava gibanja lokacije Hall-ove sonde na magnet pri statični ekscentričnosti . . . . .	16
3.4 Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde . . . . .	17
<b>4 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov</b>	<b>19</b>
4.1 Različne amplitude . . . . .	19
4.2 Različne enosmerne komponente . . . . .	22
4.2.1 Enosmerna komponenta v signalu $B_{sin}$ . . . . .	22
4.2.2 Enosmerna komponenta signala $B_{cos}$ . . . . .	24
4.2.3 Enosmerna komponenta pri obeh signalih . . . . .	26
4.3 Neorotogonalnost signalov . . . . .	27

4.4	Napaka zaradi spremembe amplitude in faze zaradi enega parametra	30
<b>5</b>	<b>Linearni model magnetnega polja</b>	<b>33</b>
5.1	Brez ekscentričnosti . . . . .	35
5.2	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi . . . . .	37
5.2.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x . . . . .	39
5.3	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi . . . . .	43
5.3.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y . . . . .	45
5.4	Dinamična ekscentričnost v smeri x osi . . . . .	48
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 . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Realni model magnetnega polja</b>	<b>55</b>
6.1	Napaka brez vplivov ekscentričnosti . . . . .	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 . . . . .	73
6.5.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri y . . . . .	75
<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 . . . . .	84
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 . . . . .	94
7.5.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y . . . . .	96
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 . . . . .	101
<b>8</b>	<b>Primerjava rezultatov simulacij in meritev</b>	<b>105</b>
8.1	Statična ekscentričnost v smeri x . . . . .	105
8.2	Statična ekscentričnost v smeri y . . . . .	106
8.3	Dinamična ekscentričnost . . . . .	107
<b>9</b>	<b>Sklep</b>	<b>109</b>
9.1	Merjenje kota in vpliv na napako . . . . .	109

9.2	Nepravilna montaža . . . . .	109
9.3	Oblika napake . . . . .	110
9.4	Izvedba meritev . . . . .	110
9.5	Komentar rezultatov . . . . .	110

## Seznam simbolov

V zaključnem delu so uporabljeni naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
napajalna napetost	$VDD$	volt	V
ničelni potencial	$GND$	volt	V
referenčni kot	$\Theta$	stopinja	$^\circ$
pomerjeni kot	$\varphi$	stopinja	$^\circ$
napaka	$\varepsilon$	stopinja	$^\circ$
Z-komponenta gostote magnetnega polja	$B_z$	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

Za regulacijo pogonov se v industriji uporablja dajalnike zasuka. Primer dajalnika zasuka je magnetni enkoder. Magnetni enkoder je zaradi svoje robustnosti primeren za delovanje v takem okolju.

S Hallovimi sonadmi enkoder meri Z-komponento magnetnega polja magneta, ki se nahaja na rotirajočem delu pogona. Iz signalov Hallovih sond enkoder pridobi signala v obliki sinusa in kosinusa. Preko matematičnega algoritma se izračuna kot zasuka. Algoritem predstavlja izračun matematične funkcije *atan2()*.

Ob nepravilni montaži enkoderja ali magneta, se prostorski zajem signalov sinusne in kosinusne oblike spremeni. Posledično se v izračunanem kotu pojavi napaka. Napaka kota se izrazi glede na nepravilno zajeto magnetno polje. V magistrskem delu je predstavljeno spremicanje zajemanja magnetnega polja posamezne Hallove sonde v odvisnosti od nepravilne montaže.

Napako zaradi nepravilne montaže, se najlažje razbere iz signalov Hallovih sond. Izhod enkoderja je le podatek o zasuku. Ker se za izračun kota potrebuje funkcijo *atan2()*, je v delu izpeljano, kako napaka v vhodnih signalih rezultira v napaki izhoda funkcije.

V programu MATLAB je bil sestavljen simulacijski model za merjenje napake enkoderja v odvisnosti od nepravilne montaže. Simulacije so bile opravljene na linearno aprokismirani Z-komponenti gostote magnetnega polja in na numerično izračunanem polju realnega magneta. Napaka ob napačni montaži je bila analizirana v frekvenčnem prostoru in je predstavljena kot potek posameznega harmonika v odvisnosti od nepravilne montaže.

Opravljene so bile meritve na enkoderju RM44, ki so bile primerjane s simulacijami. Meritve so potrdile pričakovane poteke napake predvidene s simulacijami. Na napravi je bila idealna lega določena empirično. Posledično se je to pokazalo tudi v potekih napake v odvisnosti od nepravilne montaže.

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

## Abstract

Position sensors are used for motor drive controls. Usage of magnetic encoder is appropriate for sensing position in robust industrial environment.

Magnetic encoder senses the angular position of a permanent magnet placed above the sensor. The permanent magnet must be diametrically polarized and of cylindrical shape. Encoder uses Hall sensors to detect magnetic flux density. Signals from Hall sensors are then converted to signals in shape of sine and cosine. From sine and cosine signal, an angle calculation algorithm is performed. Algorithm could be presented by mathematical function of atan2().

Incorrect installation of sensor or magnet, causes error in output angle. This work presents, how incorrect installation of sensor or magnet impact to measured magnetic field by Hall sensor.

Incorrect installation can be recognized from field measured by Hall sensors. Encoders output signal is only angle. In this thesis is demonstrated how to recognize changes of signals from Hall sensors, by knowing encoder output only.

The basic simulation model was built in MATLAB. Simulations were made by linear approximation of Z-component of magnetic field and numerical calculations by magnet model. Encoders error was analyzed in frequency spectrum.

Simulations have been compared to the encoder RM44 measurements. Simulation results of error has been confirmed by measurements. Best installation of sensor was determined empirically. Empirical determination of installation, has been resulting in the output error.

**Key words:** position encoders, Hall effect sensor, superficial implementation, anticipating an error, arcustangens

# 1 Uvod

Skozi celotno zgodovino so si ljudje želeli 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 potrebe po merjenju novih količin. V zadnjih desetletjih, je pri krmiljenju pogonov, potrebna informacija o trenutnem položaju pogona.

Trenutni položaj merijo dajalniki pomika ali zasuka[1]. Dajalnike zasuka se loči na dajalnike, ki merijo zasuk na koncu osi (angl.: on axis) in dajalnike, ki merijo zasuk na osi (angl.: through hole). Možna delitev dajalnikov zasuka je tudi na eno-obratne (angl.: single-turn) in več-obratne (angl.: multi-turn). Eno-obratni dajalnikov zasuka podajo položaj znotraj enega obrata, medtem ko več-obratni štejejo tudi število polnih obratov. Dajalnike položaja se deli glede na uporabljeni princip zaznavanja fizikalne spremembe. Obstajajo magnetni, optični, induktivni in drugi [2].

Pri magnetnem principu senzor dajalnika zaznava spremembo jakosti in smeri gostote magnetnega pretoka ali polja. Gostoto magnetnega polja se povzroči z magnetnim akutuatorjem. Gostoto magnetnega polja se meri s Hallovimi sondami, AMR senzorji ipd. Iz zajetega polja sledi izračun dejanskega položaja. Dajalnik položaja, ki pretvarja merjeno količino v informacijo se imenuje enkoder [3].

Kot vsak meritni element, ima tudi magnetni enkoder napako. Napaka se lahko pojavi ob narobe merjenem magnetnem polju [4]. Napako lahko povzroči

tudi napačno pomerjeno polje. To se zgodi ob nepravilni montaži enkoderja ali magnetnega aktuatorja na os vrtenja. S poznavanjem vplivov nepravilne montaže na napako pomerjenega položaja, se napako lahko predvidi in odpravi.

Cilj naloge je analizirati 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.

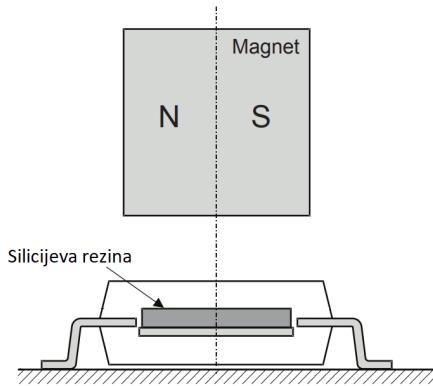
## 2 Senzor RM44

Senzor RM44 je 13 bitni enkoder, primeren za merjenje zasuka rotirajočega pogaona [5]. Enkoder se nahaja v robustem ohišju, zato je primeren za delovanje v težkem industrijskem okolju. Oblika izhodnega podatka, je prilagodljiva na sistem aplikacije v kateri bo uporabljen [6]. Izhod senzorja je lahko analogen 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 nastavitev resolucije od 5 do 13 bitov na obrat [7] [5]. 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.

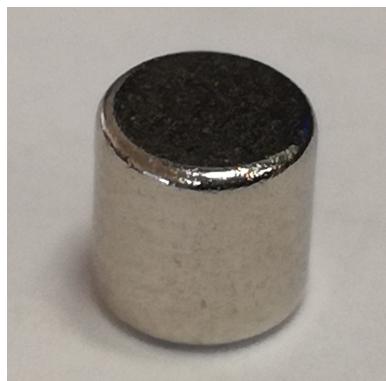


Slika 2.1: Senzor RM44

Ključni element senzorja je čip AM256. Za pravilno delovanje, se mora nahajati pod ali 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, višino 4 mm in remanenco 1050 mT (slika 2.3).



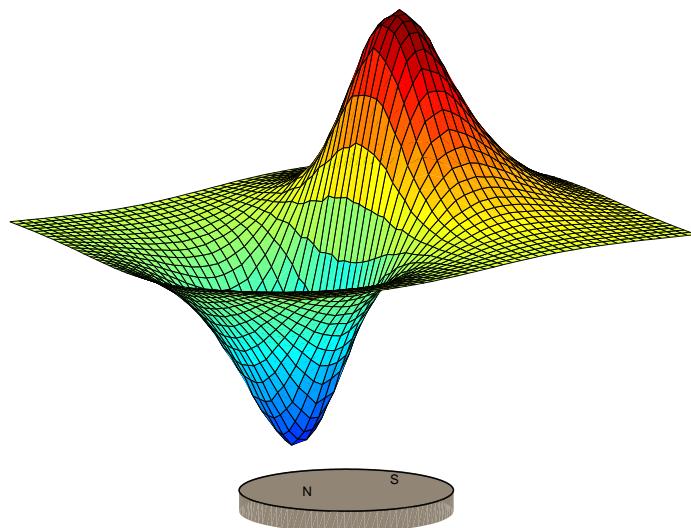
Slika 2.2: Nahajanje radialno polariziranega magneta nad čipom AM256 [7]



Slika 2.3: Primer magneta predlagan s strani proizvajalca RLS

Na siliciju čipa so razporejene Hallove sonde za meritev Z-komponente gostote magnetnega polja. Za merjenje Z-komponente gostote magnetnega polja je lahko čip montiran kot na sliki 2.2. Čip se lahko nahaja tudi nad magneto. Pomembno je le da se ohrani razdalja med silicijevim rezinom in magnetom. Med silicijevim rezinom in magnetom se lahko nahaja tudi tiskanina. Tiskanina nima magnetnih lastnosti

in ne vpliva na Z-komponento gostote magnetnega polja povzročene z magnetnim aktuatorjem. Pri montiranju senzorja je potrebno upoštevati predpisano razdaljo med magnetom in silicijevo rezino (1,8mm).

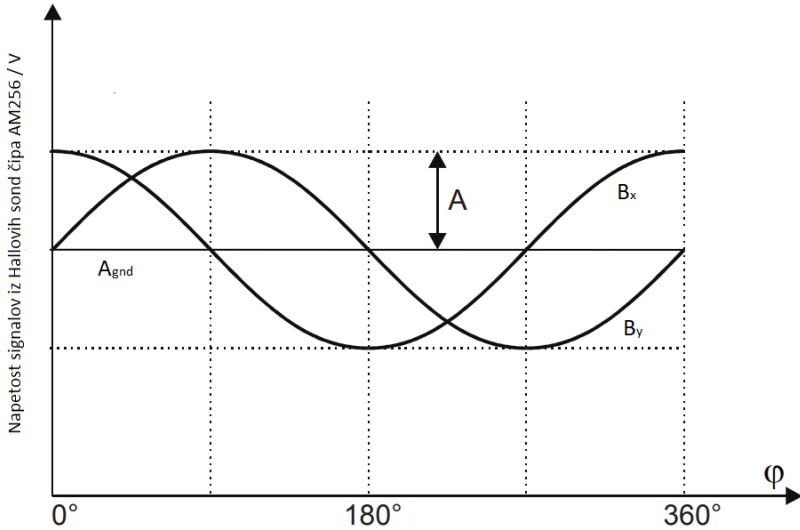


Slika 2.4: Oblika Z-komponente gostote magnetnega pretoka na poljubni ravnini nad radialno polariziranim magnetom

Slika 2.4 prikazuje obliko Z-komponento gostote magnetnega polja povzročene z radialno polariziranim cilindričnim magnetom. Amplituda komponente z odmi- kom od magneta pada, oblika se ohrani. Hallove sonde merijo le Z- komponento, zato je opazovanje X in Y komponente nepotrebno

S pravilno postavljivo Hallovih sond in obliko Z-komponente gostote magne- tnega polja 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  $B_{sin}$ .

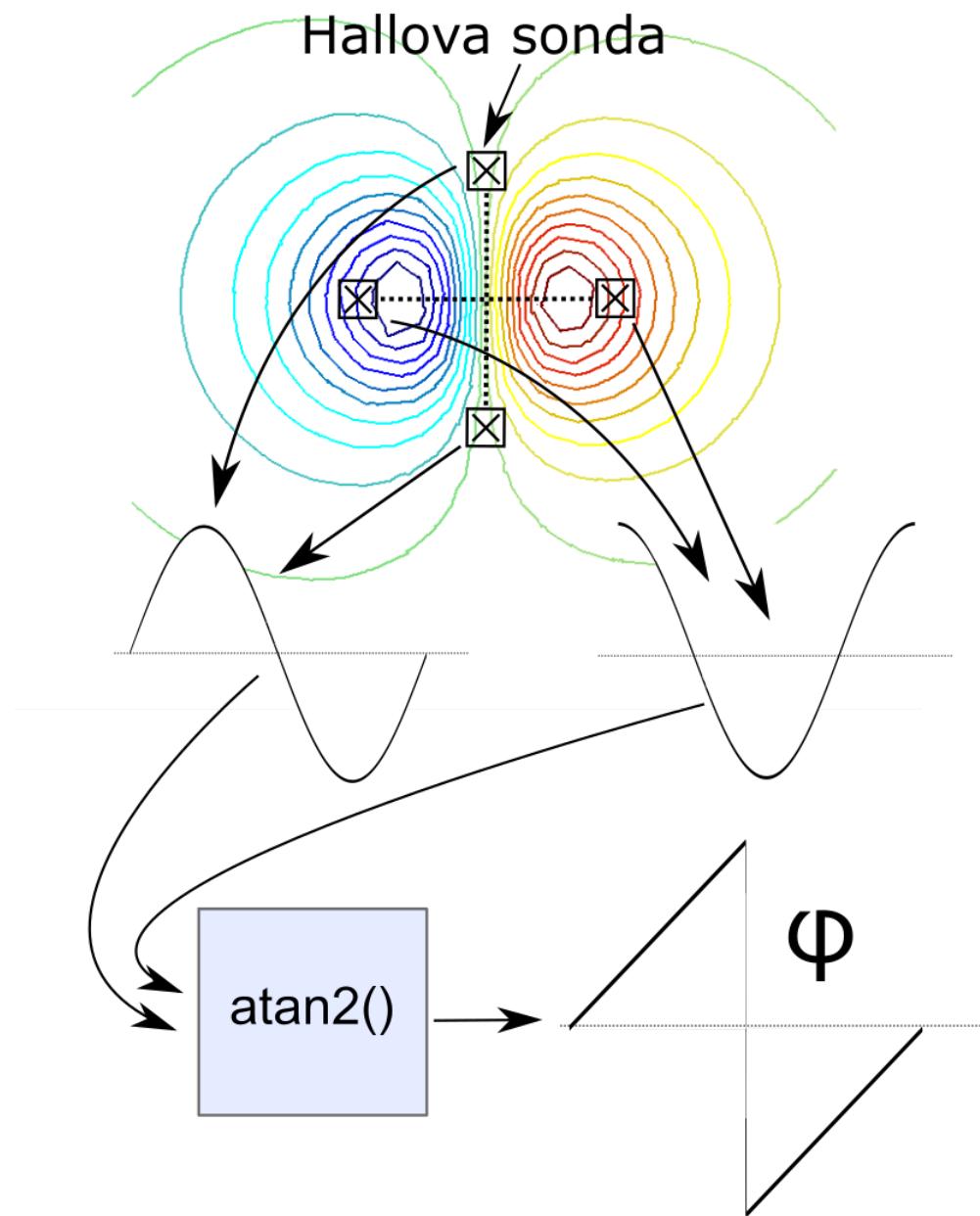


Slika 2.5: Analogna signala zajeta s Hallovimi sondami [7]

Iz signalov, zajetih s Hallovih sond, se izračuna kot. Metod, za numeričen izračun kota iz podatkov kot sta signala  $B_{cos}$  in  $B_{sin}$  je več (CORDIC, SAR, sledilna metoda, itd [8]). Osnovni princip metode je izračun funkcije  $\text{atan2}(B_{sin}, B_{cos})$  [9].

Osnovno delovanje senzorja se lahko ponazori, 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.

Signala  $B_{cos}$  in  $B_{sin}$  sta vhodna parametra v funkcijo  $\text{atan2}()$ , ki izračuna kot zasuka (slika 2.6).



Slika 2.6: Osnovni model, za izracun kot zasuka



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

Ob premiku senzorja ali magneta se spremeni polje katerega pomerijo Hallove sonde. Zajeto polje se spremeni, ker so ob izmiku senzorja ali magneta, Hallovim sondam glede na magnet spremeni lokacija. S poznavanjem lokacije sond glede na magnet, se lahko določi polje, ki ga sonda na določeni lokaciji zajame. V tem poglavju je izpeljan postopek za eno Hallovo sondu na poljubni lokaciji, v odvisnosti od rotirajočega magneta in nepravilne montaže.

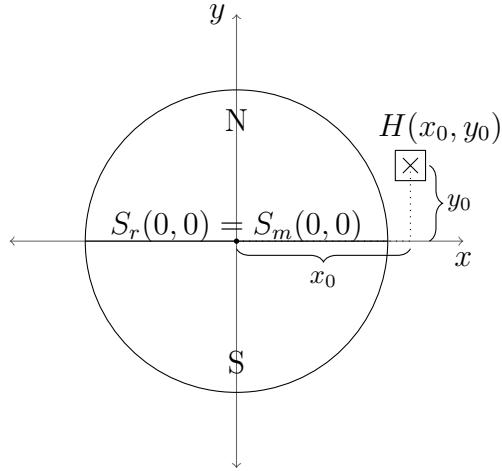
Izmik sredine senzorja iz osi vrtenja bo med spremenjanjem dejanskega kota zasuka statičen, njegova lokacija se ne bo spreminala na os vrtenja. Ta izmik je poimenovan statična ekscentričnost.

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 (slika 3.1). V izhodišču koordinatnega sistema se nahaja središče radialno polariziranega magneta označeno s  $S_m(0, 0)$ . V izhodišču se nahaja os vrtenja ( $S_r(0, 0)$ ). Na poljubno točko  $H(x_0, y_0)$ , vendar ne v izhodišče je postavljena Hall-ova sonda.

Z zasukom magneta okoli osi vrtenja za kot  $\theta$  (slika 3.2a), se lokacija sonde



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

glede na magnet spremeni. Nova lokacija sonde glede na magnet je enaka, če se namesto magnet, zavrti sondo okoli osi vrtenja za kot  $-\theta$ . Nova lokacija sonde glede na magnet je v točki  $(x, y)$ . Spremembo lokacije sonde glede na magnet v odvisnosti od zasuka magneta za kot  $\theta$ , opiše enačba (3.1).

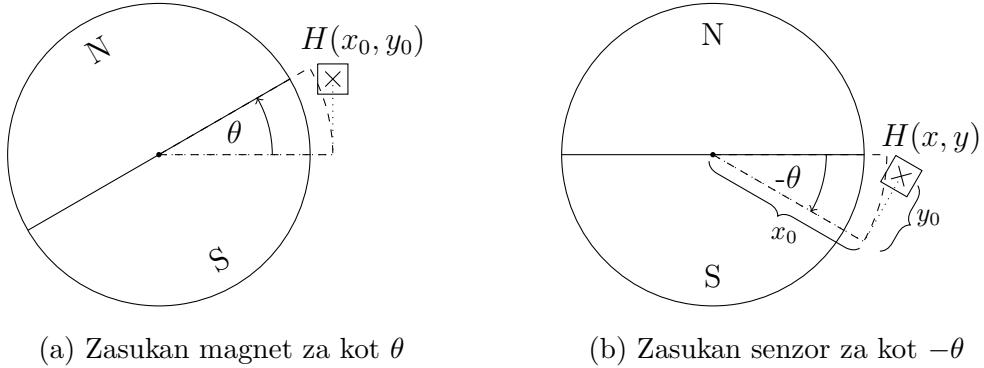
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Argument rotacijske matrike je  $-\theta$ . Z upoštevanjem lihosti funkcije sinus in sodosti funkcije kosinus[10], se (3.1) poenostavi v:

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

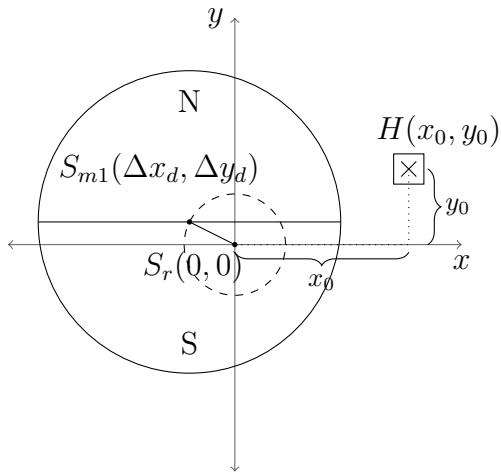
### 3.2 Izpeljava gibanja lokacije Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti

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



Slika 3.2: Sprememba položaja glede na magnet ob rotaciji

točko  $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$  (Slika 3.3). Os vrtenja ostaja v izhodišču koordinatnega sistema. Središce magneta  $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$  ob rotaciji opisuje okoli osi vrtenja krožnico z radijem  $\sqrt{\Delta x_d^2 + \Delta y_d^2}$ .

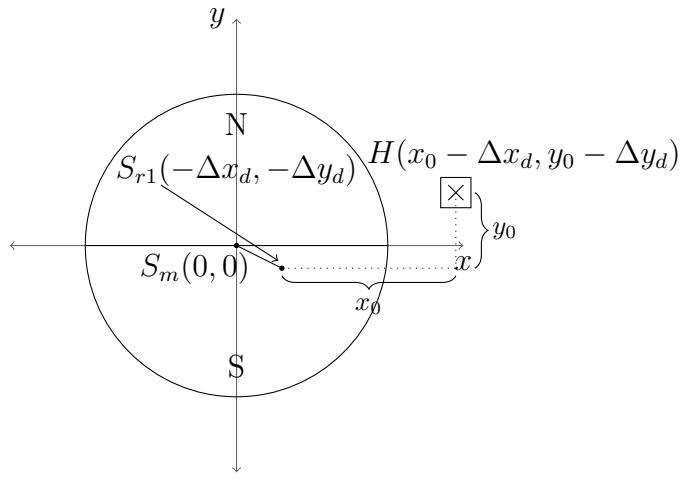


Slika 3.3: Definicije dinamične ekscentričnosti

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 opiše (3.3)

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

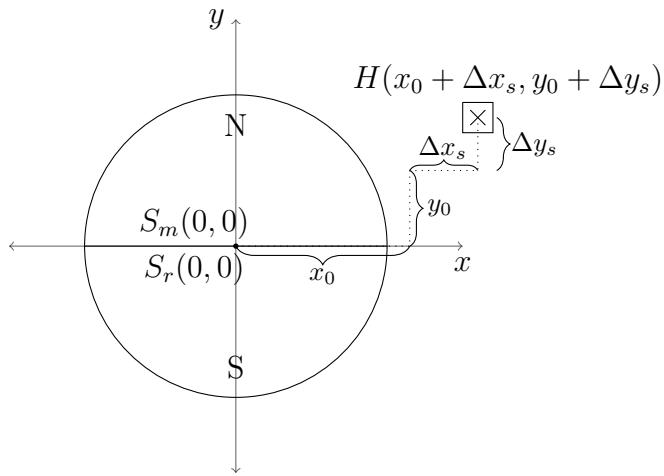


Slika 3.4: Premik osi vrtenja in sonde za velikost dinamične ekscentričnosti

### 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 nasprotno smer 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 ekscentričnosti se sonda giblje po drugem radiju.

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



Slika 3.5: Definicije statične ekscentričnosti

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

(3.3) in (3.4) sta med seboj neodvisni, zato se ju lahko združi. 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 polja, 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[9][11].

Različne literature [4] [12] [13] [14] opisujejo napako izhoda funkcije zaradi popačnosti vhodnih signalov. Napaka je izražena v obliki enosmerne komponente ter prvega oz. drugega harmonika, kateri od primera do primera bolj izstopa. V tem poglavju je prikazano, kako popačena signala kot vhoda v funkcijo atan2d() vplivata na napako. Za majhna popačenja vhodnih signalov, literatura nakazuje linearno naraščanje napake. V poglavju je predstavljeno tudi kako se popačenja vhodnih signalov odražajo na višjih harmonikih 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() ne bo spremenil, če se obe amplitudi deli s poljubnim številom. Če se za poljubno število vzame amplitudo signala  $B_{cos}$ , imata singala novo definirani amplitudi.

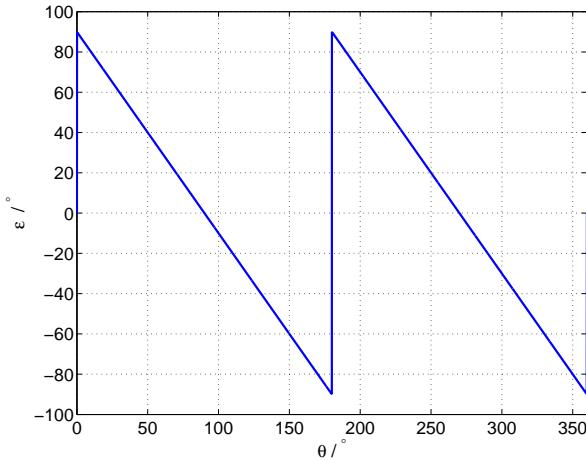
Razmerje amplitud med  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je označeno s  $k$ .

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

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

Funkciji sta vstavljeni v atan2d(). Parameter  $k$  se limitira v skrajno lego. Z limito se ugotovi v kakšno obliko napaka konvergira. Z limito v skrajnost se zoži nabor funkcij na katero se aproksimira napako. 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 [10]:

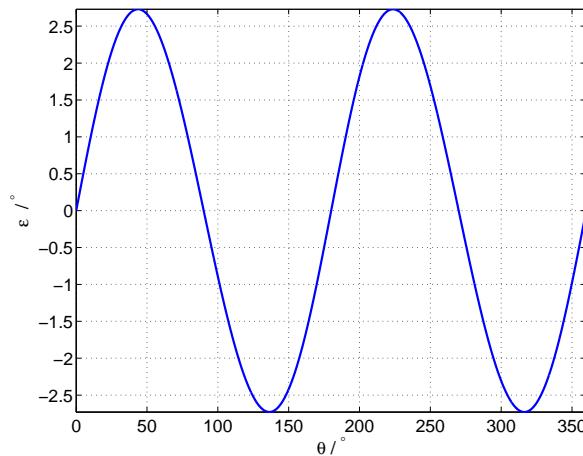
$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin 2n\theta \quad (4.4)$$

V napaki nastopajo le sodi harmoniki. Z opazovanjem sodih harmonikov napake pri različnih  $k$ -jih in uporabo Curve Fitting tool [15], je bila določena

funkcija poteka napake v odvisnosti od  $k$ .

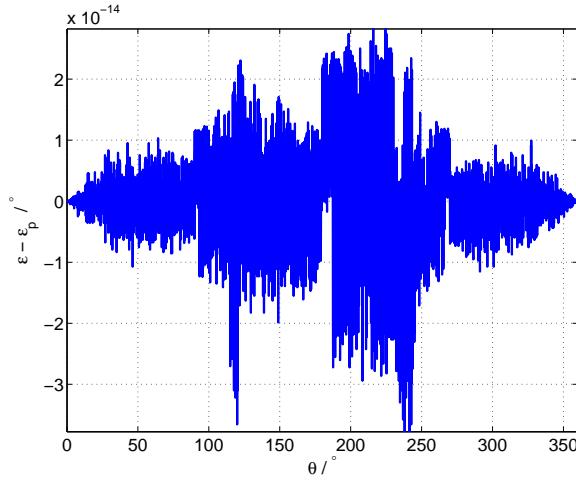
$$\varepsilon_p = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\frac{k-1}{k+1}\right)^n \sin 2n\theta \quad (4.5)$$

Funkcijo sem aproksimiral na definicijskem območju  $k \in [0, 5]$ . Napaka aproksimacije drugega harmonika po metodi najmanjših kvadratov je bila  $1,178^\circ \cdot 10^{-10}$ .



Slika 4.2: Napaka  $\varepsilon$  pri  $k=1,1$

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 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.



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

## 4.2 Različne enosmerne komponente

Naj imata vhodna signala 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.

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

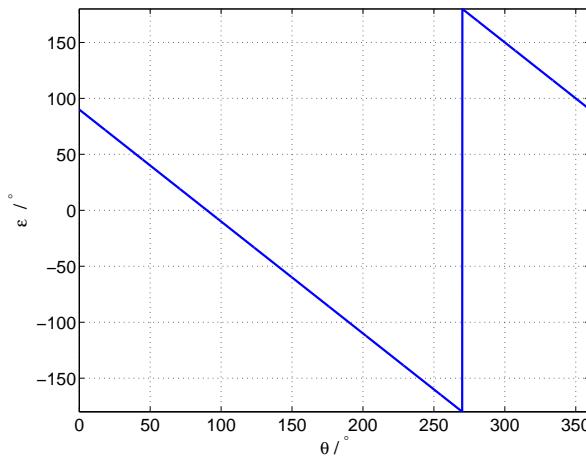
$$B_{cos} = \cos(\theta) + A_0 \quad (4.7)$$

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

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

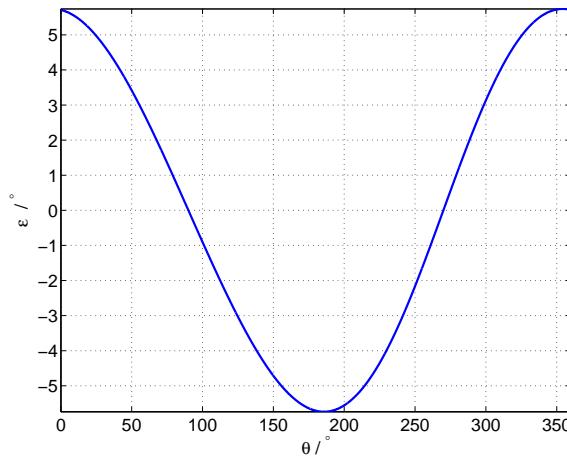
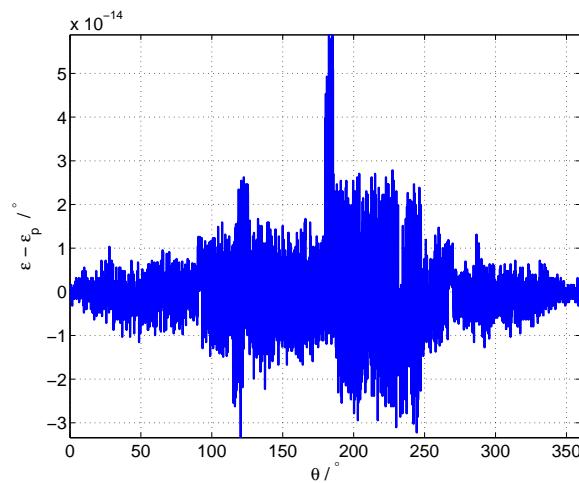
Z limito  $B_0$  v neskončnost in  $A_0 = 0$  ter izpeljavo napake  $\varepsilon$  v Fourierovo vrsto, se napaka izrazi kot:

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

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

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  $B_{sin}$ . Definicjsko območje je bilo potrebno razdeliti na 3 dele. Napaka minimalnih kvadratov prvega harmonika na območju  $B_0 \in [-1, 1]$  je bila  $1,206^\circ \cdot 10^{-7}$

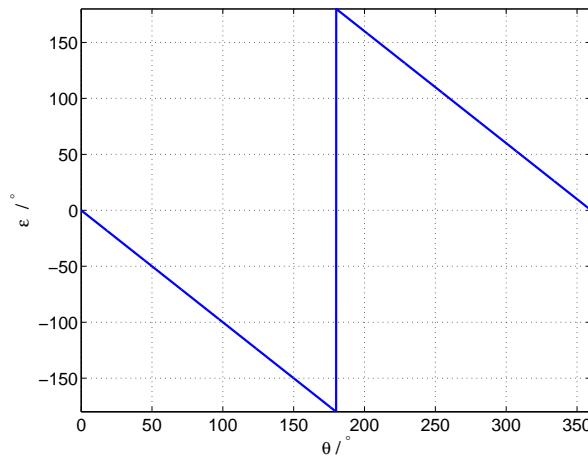
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-|B_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta - 90n), & B_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_0^n}{n} \sin(n\theta + 90n), & |B_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-B_0^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & B_0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

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

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

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

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

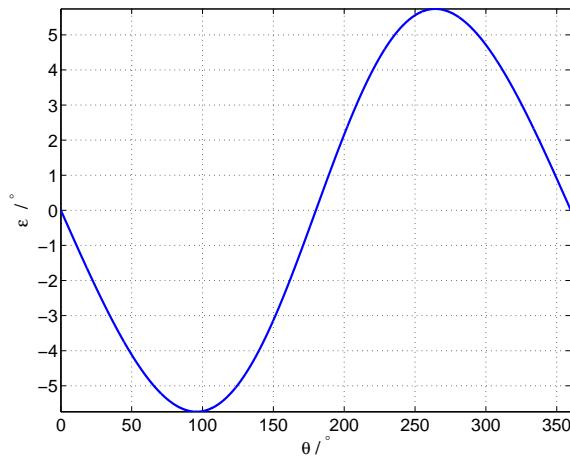
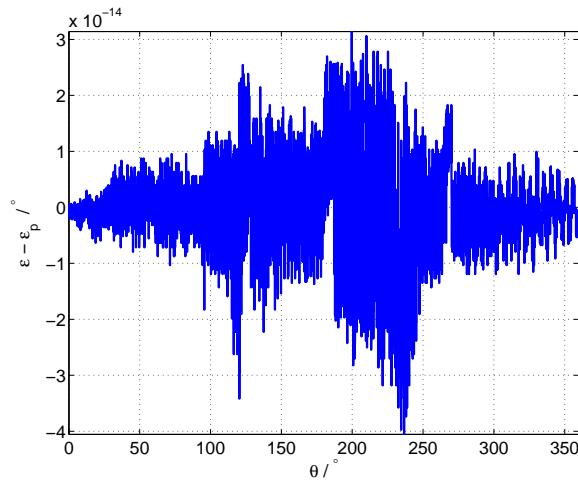
Slika 4.7:  $\varepsilon$  ob limiti  $A_0$  v neskončnost

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

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

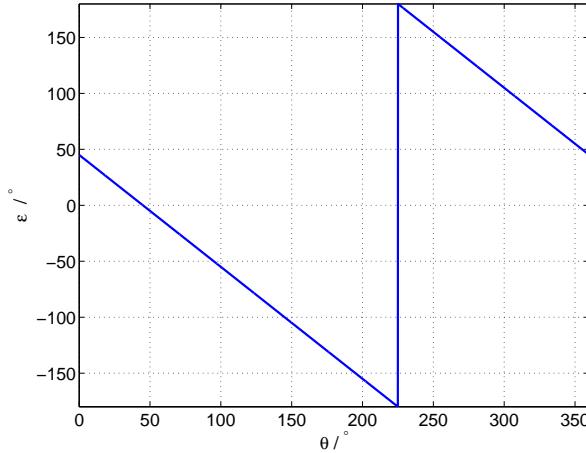
Potek napake v odvisnosti od  $A_0$  je (4.12)

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

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

Naj imata  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  enako enosmerno komponento  $C_0$ . 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 spremjanju enosmernih komponent pri obeh signalih se izrazi kot:

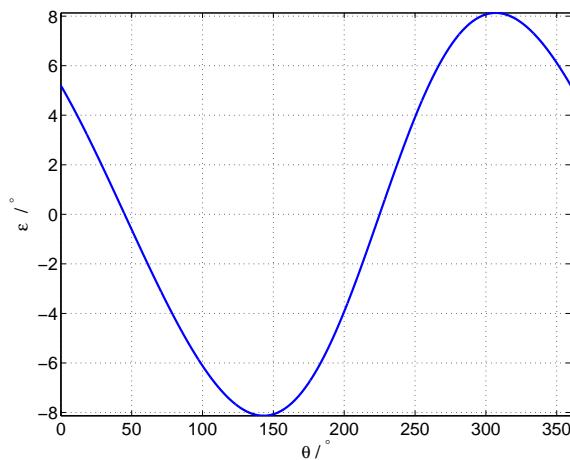
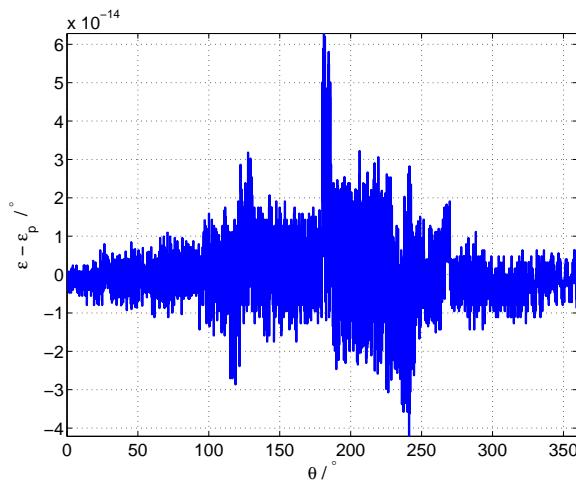
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 - |\sqrt{2}C_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & C_0 \leq -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sqrt{2}C_0)^n}{n} \sin(n\theta - 90n), & |C_0| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty}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

### 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)

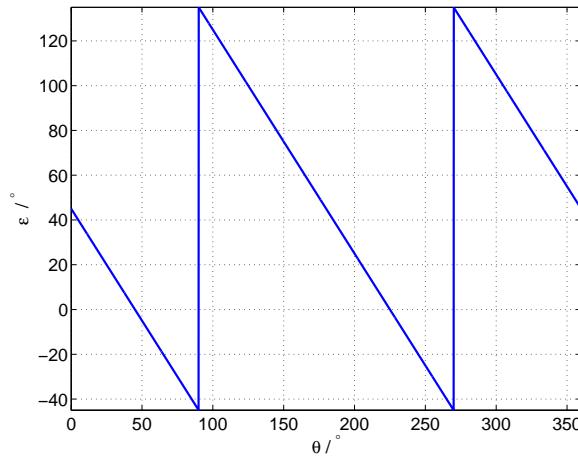
Napako se določi za vsakega od parametrov posamično. Drugi je takrat enak 0. Na koncu se enačbi združi.

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  $B_{cos}$ . Napaka minimalnih kvadratov drugega harmonika na območju  $\varphi_s \in [-90, 90]$  je bila  $5,29^\circ \cdot 10^{-9}$ .

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

Izraz velja pri pogoju:

$$|\varphi_s - \varphi_c| < 90$$

#### 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).

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

Pri čemer velja:

$$\Delta_c > -C_1.$$

Napaka minimalnih kvadratov aproksimiranega drugega harmonika napake pri  $\Delta_c \in (-1, 1]$  je bila  $1,915^\circ \cdot 10^{-5}$ .

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:

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

Pri čemer velja:

$$\Delta_s > -C_1.$$

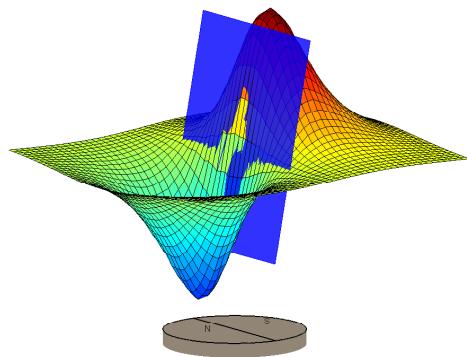
Za majhne odmike, je dovolj upoštevanje le prvega člena vrste, pri katerih se tudi predpostavi linearno naraščanje napake. V nadaljevanju bodo amplitude harmonikov v odvistnosti od povzročene ekscentričnosti aproksimirane s kubičnim polinomi.



## 5 Linearni model magnetnega polja

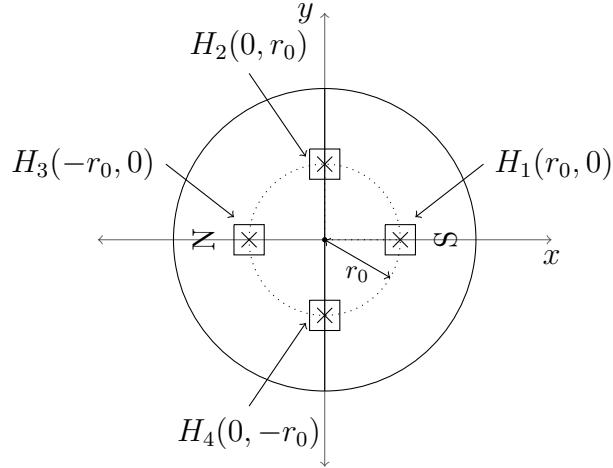
Aproksimacija polja zadostuje za oceno napake. Za oceno napake, se lahko Z komponento magnetnega polja v okolici središča magneta, aproksimira z ravnino (slika 5.1). Koordinatni sistem nad magnetom naj bo postavljen tako, da bo polje aproksimirano z enačbo (5.1).

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



Slika 5.1: Oblika Z komponente gostote magnetnega polja nad magnetom in aproksimirano ravnino v središču magneta

Simulacijski model sestavlja 4 Hallove sonde enakomerno razporejene po krožnici z radijem  $r_0$  (slika 5.2). Lokacija predstavlja začetno lego Hallovih sond. Ob zasuku magneta, se sonde relativno gibljejo na magnet v nasprotni smeri kot se vrati magnet.



Slika 5.2: 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 polja, ki ga pomeri posamezna sonda ob vrtenju.

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

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

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

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

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

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

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

Z diferencialnim odčitavenjem signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ , se popačanje signalov zaradi napačne montaže izniči. Iz tega sledi zaključek, da pri linearni apoksi-

maciji Z-komponente gostote magnetnega pretoka napačna montaža ne vpliva na napako.

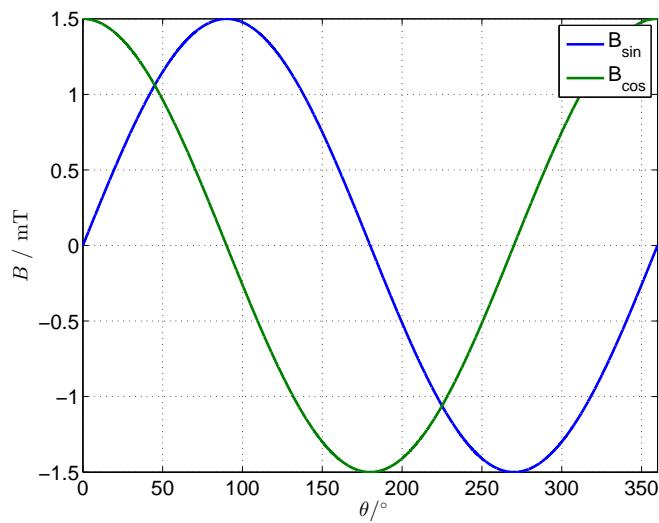
Kljub temu so bile opravljene simulacije na poenostavljenem modelu, uporabile dveh sond ( $B_{cos} = B_{H_1}$  in  $B_{sin} = B_{H_2}$ ). Na ta način je lahko bila analizirana napaka.

Ravnina, ki aproksimiran magnetno polje v središču magneta, bi lahko imela gradient tudi drugačen od 1. Izraza  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  bi bila tako le množena s poljubnim koeficientom. Za izračun kota, se znotraj funkcije *atan2()* izračuna kvocient med  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Ker bi se koeficient pojavi tako v števcu in imenovaluc, bi se izničil. Koeficient, ki predstavlja gradient napake na napako kota ne vpliva.

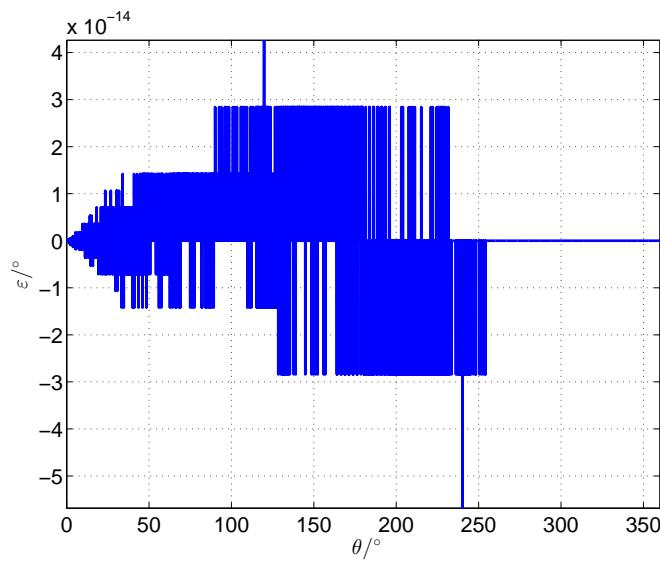
V tem poglavju so predstavljeni rezultati simulacij z upoštevanjem dveh Hall-ovih sond in uporabo linearne aproksimirane Z-komponente gostote magnetnega pretoka. Prikazan je potek napake pri različnih izmikih, ter potek amplitud posameznih harmonikov napake v odvisnosti od ekscentričnosti. Hall-ovi sondi sta postavljeni na krožnico z radijem 1,5 mm [7].

## 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 *atan2()*; (Slika 5.4). Numerična napaka je proti pričakovani napaki zaradi ekscentričnosti zanemarljiva.



Slika 5.3:  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



Slika 5.4: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti

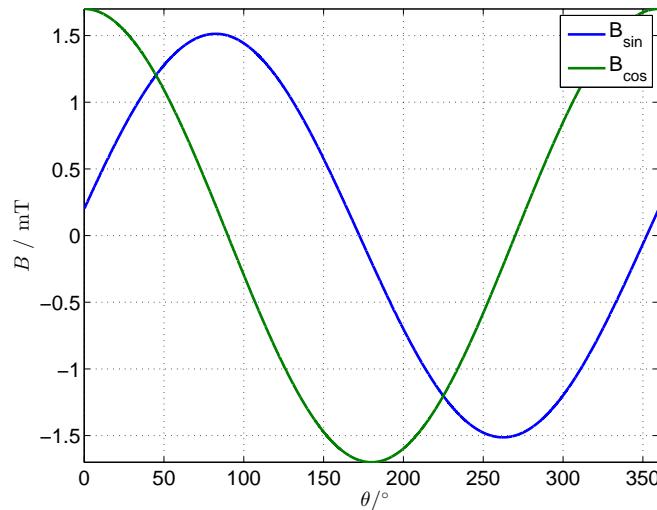
## 5.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

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

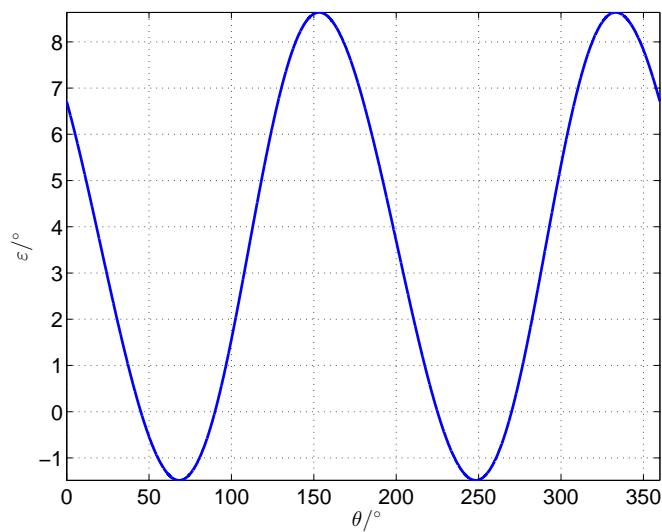
$$B_{sin} = \sqrt{(r_0 + \Delta y_s)^2 + \Delta x_s^2} \sin(\theta + \text{atan} \frac{\Delta x_s}{\Delta y_s + r_0}) - \Delta x_d \quad (5.8)$$

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

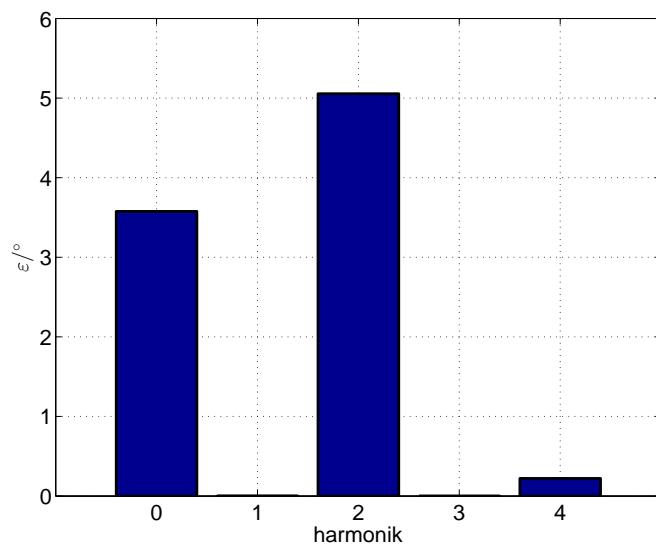
Ob upoštevanju le statične ekscentričnosti v smeri x se iz (5.8) razbere linearja sprememba amplitude signala  $B_{cos}$ . Signalu  $B_{sin}$  se poveča amplituda, vendar je sprememba manjša kot pri signalu  $B_{cos}$ . Signalu  $B_{sin}$  se spremeni tudi faza. Potek signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri 0,2mm statične ekscentričnosti v smeri x je prikazan na sliki 5.5. V poglavju 4.4 je bil predstavljen primer popačanja signalov na ta način. Napaka se je pričakovano izrazila v obliki enosmerne komponente, drugega harmonika in višjih sodih harmonikov (slika 5.6 in 5.7).



Slika 5.5:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.6: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.7: 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 polja v gornjih izrazih velja enačaj, vendar je uporabljen približek zaradi splošne aproksimacije. Parametri ( $A_{sin}$ ,  $\delta_{sin}$ ,  $Off_{sin}$ ,  $A_{cos}$ ,  $\delta_{cos}$ ,  $Off_{cos}$ ) so se s spremenjanjem posamezne ekscentričnosti spreminali. Poteki posameznega parametra v odvisnosti od ekscentričnosti so aproksimiranz kubičnimi polinomi. Na spodnjih slikah je predstavljen potek posameznega parametra od spremenjajoče ekscentričnosti.

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

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

Parameteri amplitud so aproksimirani s kubičnimi polinomimi v odvisnosti od ekscentričnosti. Na spodnjih slikah so predstavljeni tudi poteki amplitud posameznega harmonika napake v odvisnosti od ekscentričnosti.

Na sliki 5.8 je prikazana sprememba amplitude prvega harmonika signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Razvidno iz (5.8) (5.9) linearno narašča amplituda  $B_{cos}$ . Slika 5.9 prikazuje enosmerni komponenti, ki od statične ekscentričnosti nista odvisni. Slika 5.10 prikazuje fazni zamik signalov glede na njuno idealno poravnavo (slika 5.10). Po (5.8) je pričakovano spremenjanje faze  $B_{sin}$ .

Spremenjanje amplitude prvega harmonika, enosmerne komponente in faznega

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

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

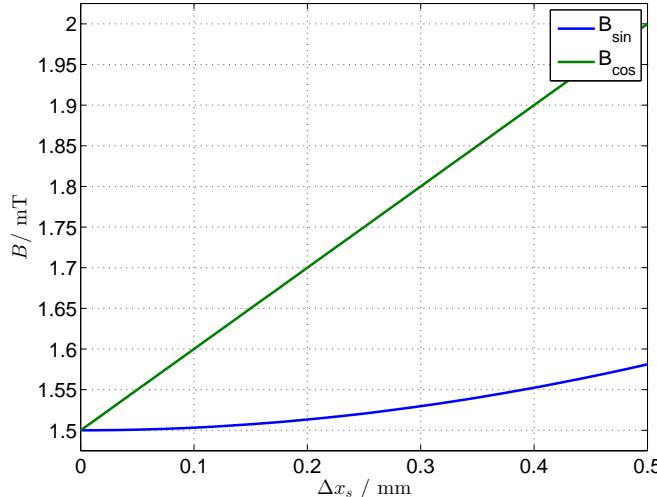
$$\begin{aligned} A_{sin}(\Delta x_s) = & -3,38 \cdot 10^{-2}\Delta x_s^3 + 3,44 \cdot 10^{-1}\Delta x_s^2 - 1,09 \cdot 10^{-3}\Delta x_s \\ & + 1,50 \end{aligned} \quad (5.14)$$

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

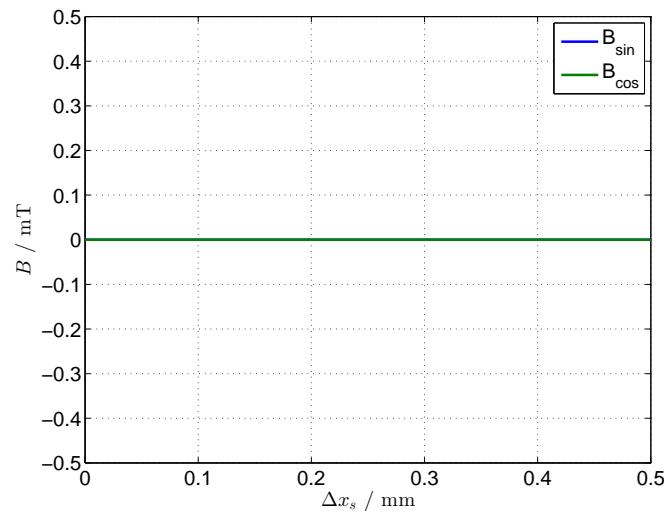
$$Off_{cos}(\Delta x_s) = 0\Delta x_s^3 + 0\Delta x_s^2 + 0\Delta x_s + 0 \quad (5.16)$$

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

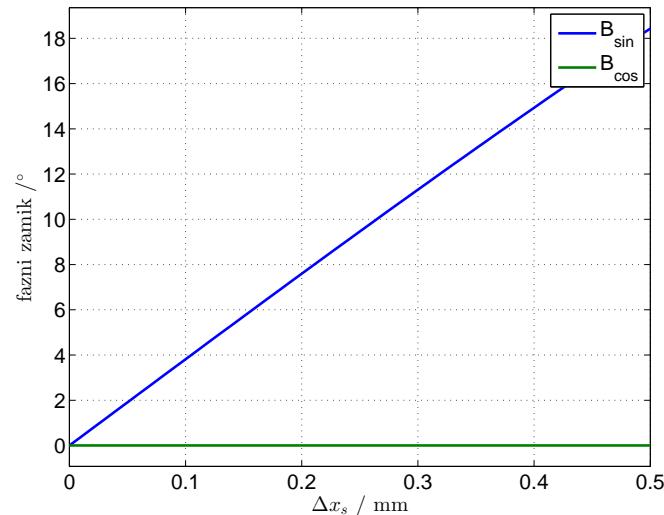
$$\begin{aligned} \delta_{cos}(\Delta x_s) = & -2,44 \cdot 10^{-15}\Delta x_s^3 + 4,14 \cdot 10^{-15}\Delta x_s^2 - 1,07 \cdot 10^{-15}\Delta x_s \\ & - 2,48 \cdot 10^{-16} \end{aligned} \quad (5.18)$$



Slika 5.8: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



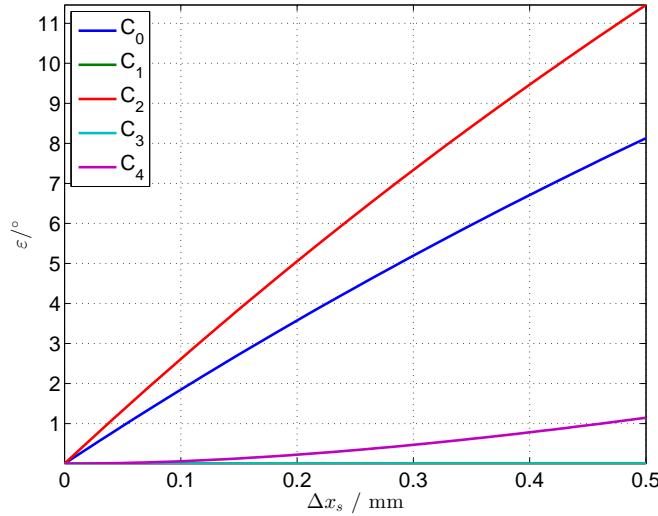
Slika 5.9: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.10: 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 5.11 je prikazana odvisnost amplitud posameznega harmonika napake od spremenjanja statične ekscentričnosti v smeri x. Poteke s slike 5.11

aproksimirajo polinomi (5.19) - (5.23).



Slika 5.11: 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):

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

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

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

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

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

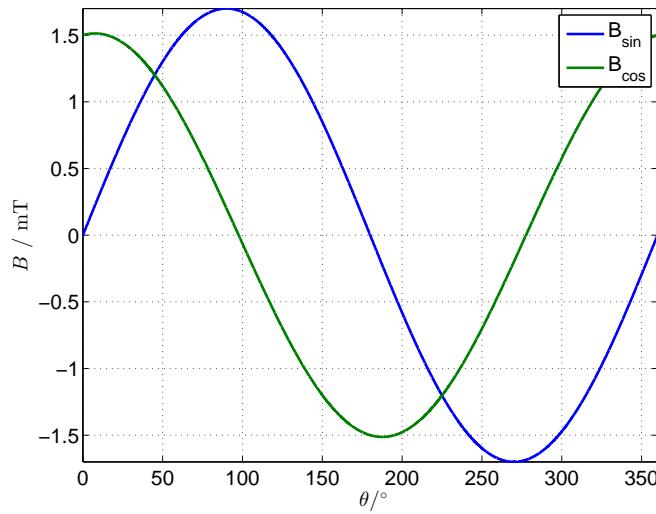
Rezultati so pričakovani. Četrти harmonik se po poteku nekoliko razlikuje. To je posledica razvite vrste okoli izhodišča. Z razvojem četrtega harmonika okoli točke 0,25mm (5.29), je iz izraza bolj razvidno prilagajanje harmonika.

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

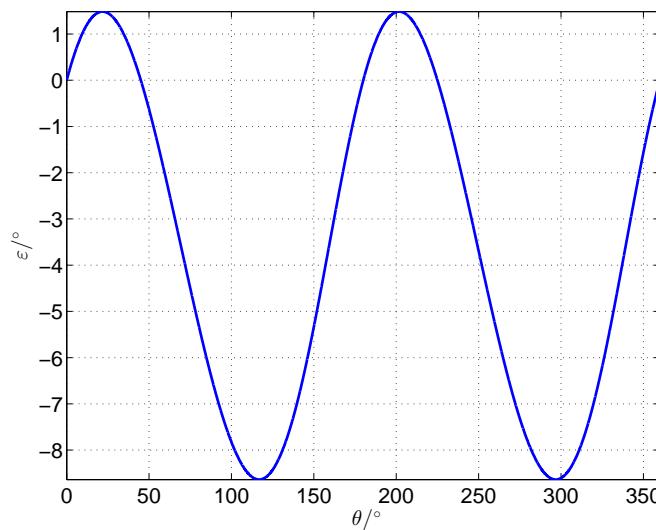
### 5.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

Pričakovani so podobni rezultati kot pri statični ekscentričnosti v smeri x, le da tu hitreje narašča amplituda  $B_{sin}$ , spreminja se fazni zamik  $B_{cos}$  (slika 5.12).

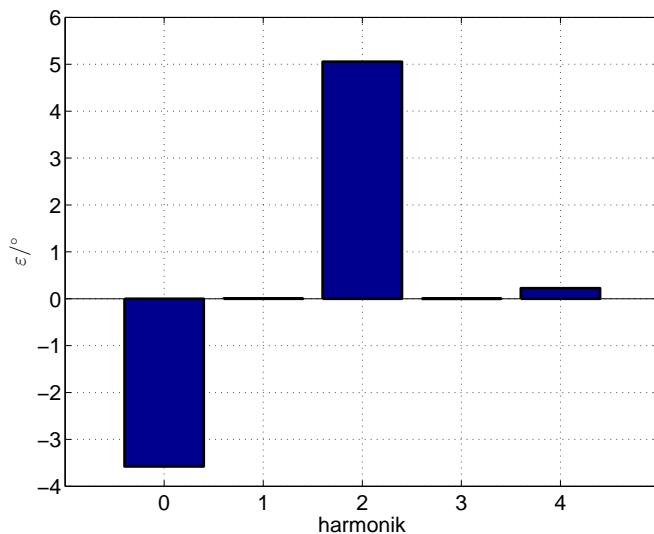
Napaka je prikazana na sliki 5.13. Sestavlja jo negativna enosmerna komponenta in izrazit drugi harmonik. Iz napake razvite v vrsto (slika 5.14) je vidna enaka amplituda drugega harmonika, kot pri ekscentričnosti v smeri x. Enosmerna komponenta se razlikuje v predznaku.



Slika 5.12:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 5.13: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 5.14: Amplitude harmonikov napake  $\epsilon$  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 ni odvisna od statične ekscentričnosti (slika 5.16). Fazni zamik signala  $B_{cos}$  se je zmanjševal, posledično tudi fazna razlika med signaloma (slika 5.17). Poteki so opisani s kubičnimi polinomi.

Na sliki 5.18 so prikazani poteki amplitud posameznih harmonikov v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y. Potek amplitud harmonikov je enak potekom simuliranih s statično ekscentričnostjo v smeri x, razlikuje se le eno-

smerna 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.

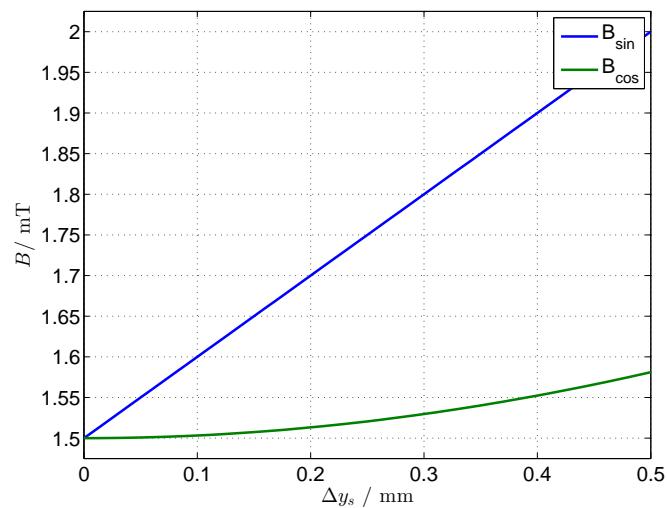
$$C_0(\Delta y_s) = -1,41\Delta y_s^3 + 6,37\Delta y_s^2 - 1,91 \cdot 10\Delta y_s \quad (5.41)$$

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

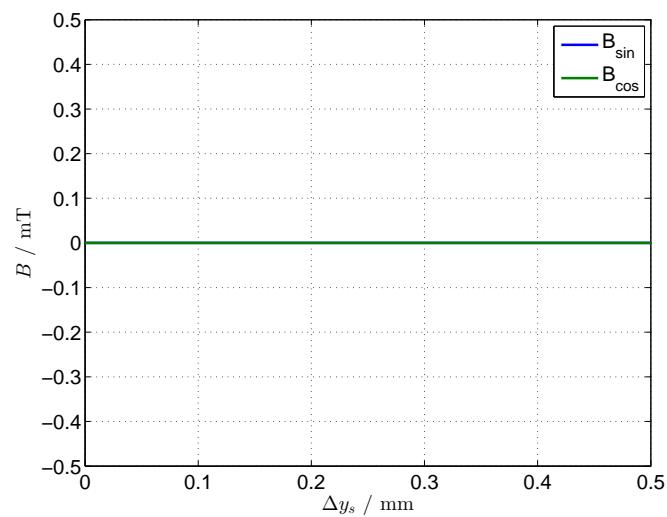
$$C_2(\Delta y_s) = 1,50\Delta y_s^3 - 9,00\Delta y_s^2 + 2,70 \cdot 10\Delta y_s \quad (5.43)$$

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

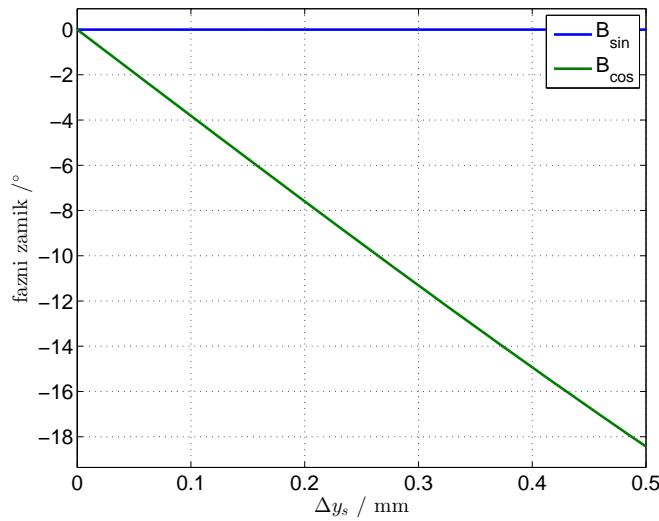
$$C_4(\Delta y_s) = -4,24\Delta y_s^3 + 6,37\Delta y_s^2 \quad (5.45)$$



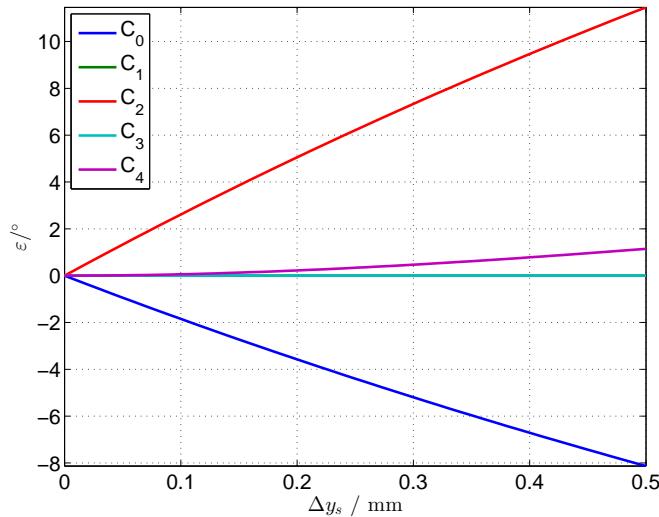
Slika 5.15: Amplituda osnovnega harmonika signalov  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 5.16: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



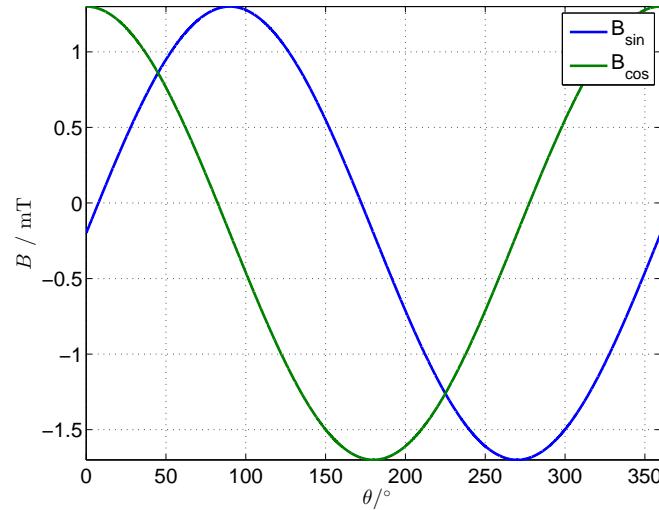
Slika 5.17: Fazni zamik  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$



Slika 5.18: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z linearnim poljem

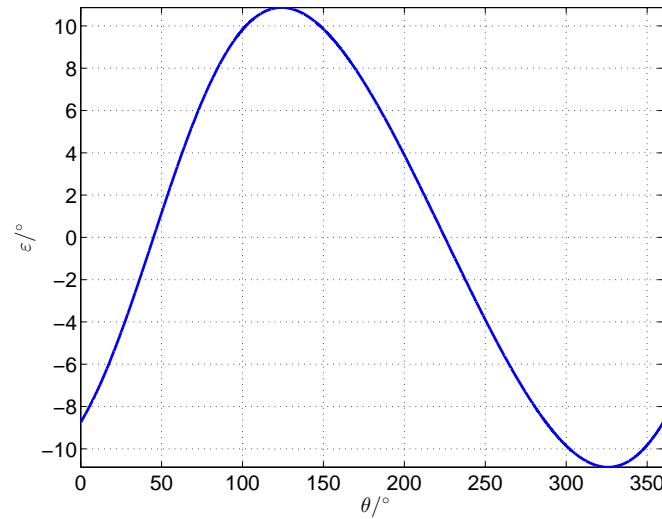
## 5.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x osi

Dinamična ekscentričnost v smeri x osi pričakovano povzroči v  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  enosmerno komponento (Slika 5.19).



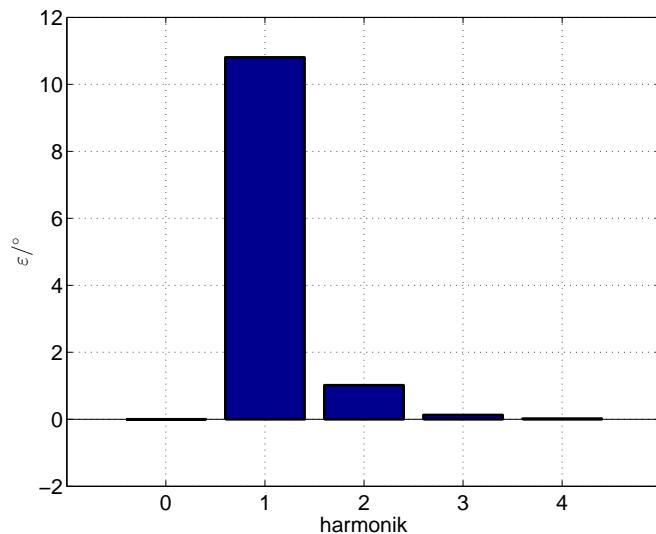
Slika 5.19:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

Na sliki 5.20 je vidna napaka v obliki prvega harmonika, kar je bilo pričakovati (Poglavlje 4.2.3). Z razvojem napake v Fourierovo vrsto je najizrazitejši prvi



Slika 5.20: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

harmonik, enosmerna komponenta je nič (slika 5.21).



Slika 5.21: 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 5.23).

Z aproksimacijo posameznega parametra  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  s kubičnim polinomom

sta od dinamične ekscentričnosti odvisni le enosmerni komponenti.

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

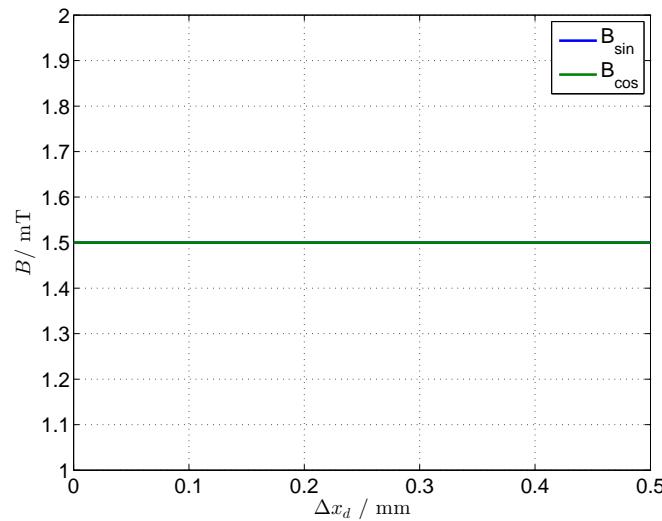
$$A_{sin}(\Delta x_d) = -8,33 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^3 + 5,76 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^2 - 8,58 \cdot 10^{-15} \Delta x_d + 1,50 \quad (5.47)$$

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

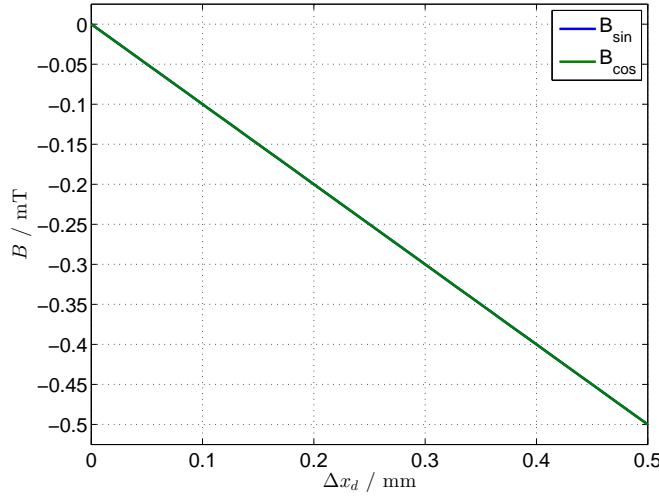
$$Off_{cos}(\Delta x_d) = 3,78 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^3 - 2,47 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^2 - 10,00 \cdot 10^{-1} \Delta x_d - 2,53 \cdot 10^{-17} \quad (5.49)$$

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

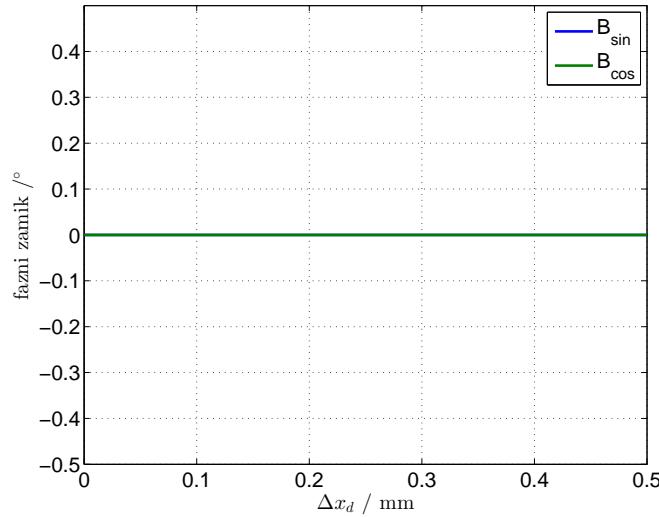
$$\delta_{cos}(\Delta x_d) = 2,72 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^3 + 1,33 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^2 - 1,00 \cdot 10^{-15} \Delta x_d - 2,16 \cdot 10^{-16} \quad (5.51)$$



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



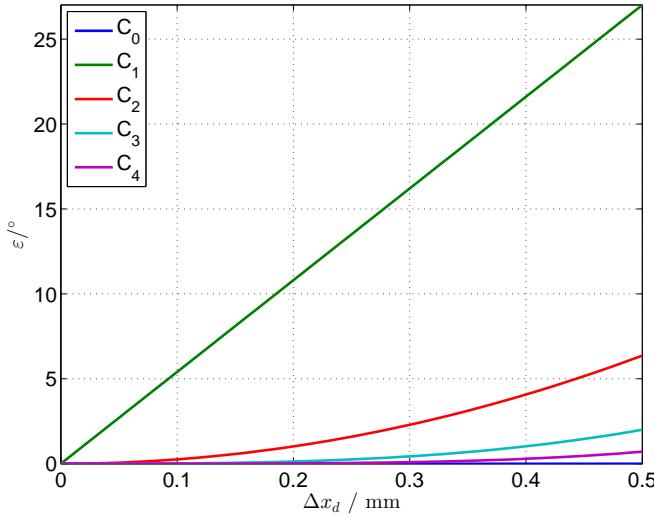
Slika 5.23: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.24: Fazni zamik  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$

Slika 5.25 prikazuje odvisnost amplitud napake od spremenjanja dinamične ekscentričnosti v smeri x. V napaki, se po pričakovanih linearno povečuje prvi harmonik (4.14). Linearno se povečuje le do izmika  $\Delta x_d = r_0 \frac{\sqrt{2}}{2}$ . Poteki so

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 5.25: 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.

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

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

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

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

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

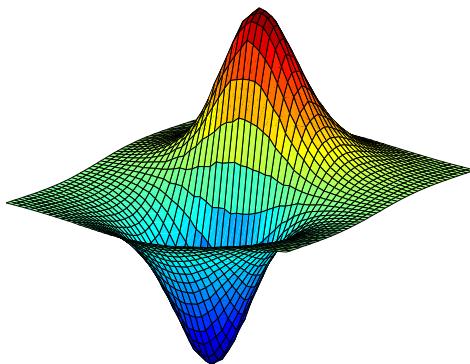
## 5.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y in sprememba razdalje Hallovih sond od magneta

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

Gostota magnetnega polja z razdaljo od magneta upada, oblika kljub temu ostaja enaka. Zajeto polje Hallovih sond, bo imelo le manjšo amplitudo. Z večjo oddaljenostjo se bo spremenila le amplituda zajetega signala in enosmerna komponenta, vendar obe za enak faktor. Faza 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. Sprememba razdalje med sondam in magnetom ne vpliva na izhodni podatek o zasu.

## 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 polja 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. Definicjsko območje je 20x20 mm s korakom 0,02 mm (Slika 6.1). Simulacijski model je definiran s 4 sondami, kot je opisano



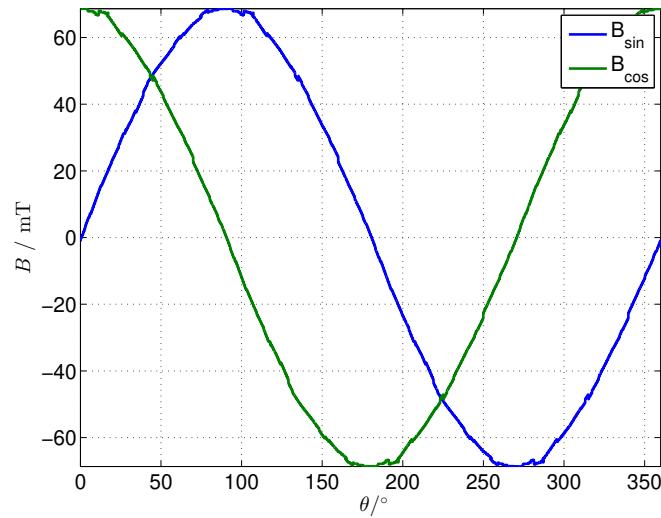
Slika 6.1: Model Z- komponente gostote magnetnega polja uporabljen v simulacijah

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) -

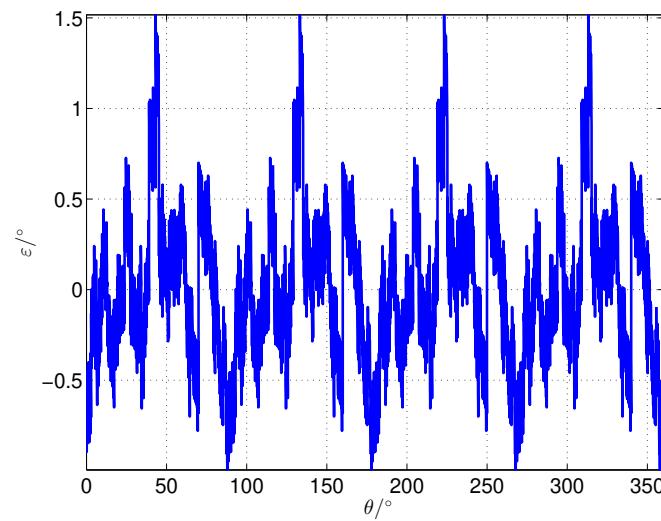
(5.5). Prvo je bila izračunana relativna lokacija sonde glede na magnet. Nato se je vrednost Z-komponente gostote magnetnega polja aproksimiralo s poljem, definiranim v geometrijsko najbližji točki definicijskega območja. Pomerjeno polje nasproti ležečih sond se je nato odštelo in vstavilo v funkcijo atan2d(). V tem poglavju so predstavljeni rezultati simulacij ekscentričnosti z uporabo realnega modela magnetnega polja.

## 6.1 Napaka brez vplivov ekscentričnosti

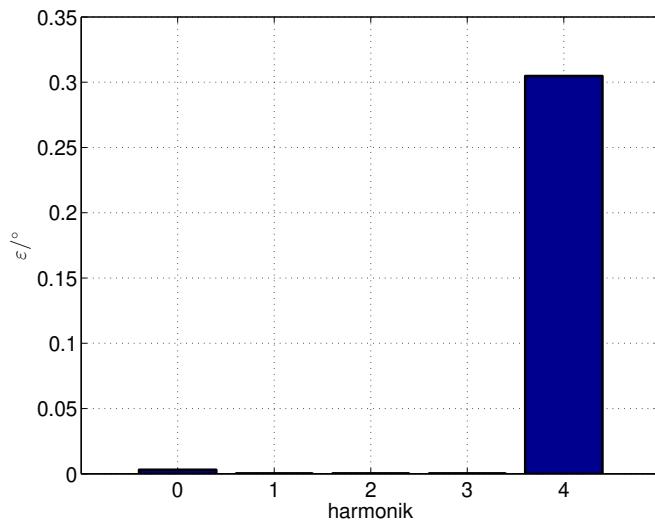
Kljub idealni montaži,  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  nista idealna signala. Signala vsebujeta višje harmonike (Slika 6.2), ki niso opazno izraziti. Višji harmoniki se izrazijo v napaki (slika 6.3). Opazi se grob potek četrtega harmonika. V napaki so špice (primer  $220^\circ$ ), ki so posledica načina izračuna Z-komponente gostote magnetnega polja simuliranega 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 [7]. 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



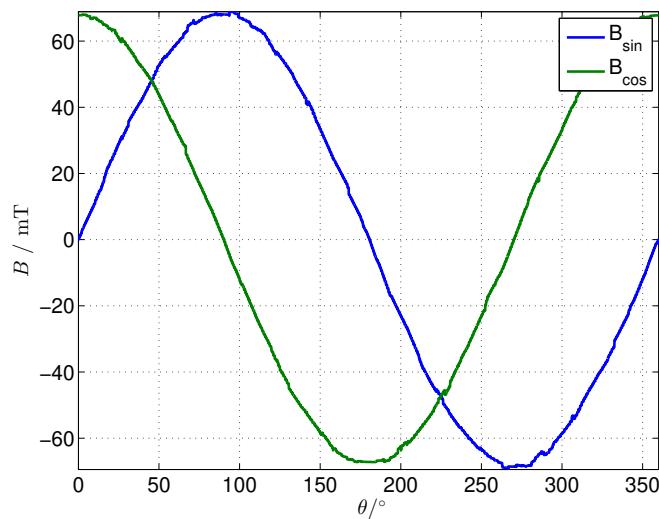
Slika 6.3: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



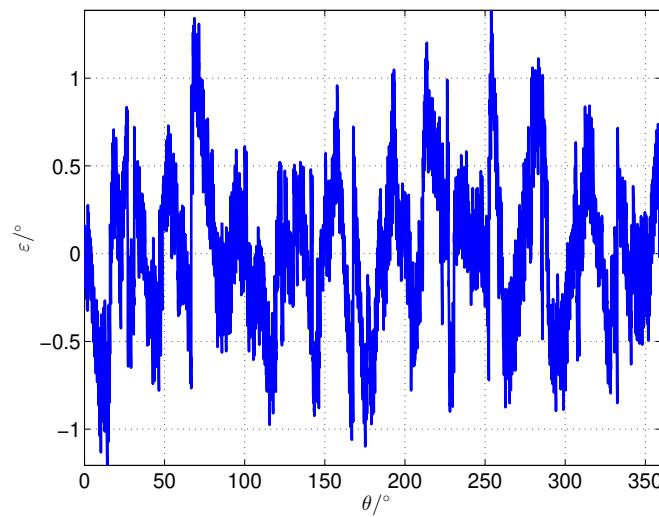
Slika 6.4: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem brez ekscentričnosti

## 6.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

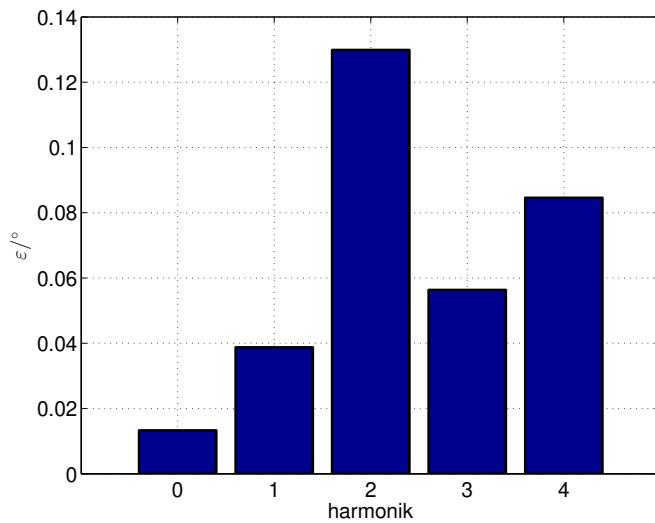
Po pričakovanjih se bo spremenila amplituda  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  signala ter zmanjšal njun fazni zamik (izraza (5.2) in 5.3). Na sliki 6.5 se opazi zmanjšano amplitudo signala  $B_{cos}$ . Na sliki 6.6 je prikazana napaka  $\varepsilon$ . Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 6.7) prikaže predvideno povišanje amplitudo drugega harmonika, kar je predvideno tudi v podatkovnih listih [7].



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



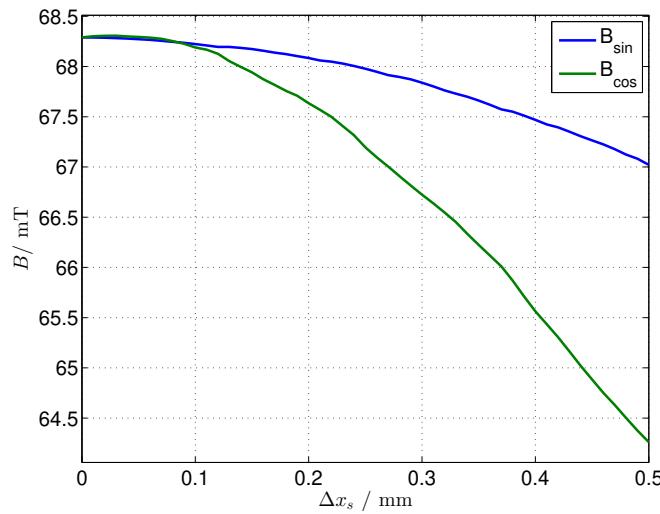
Slika 6.6: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x



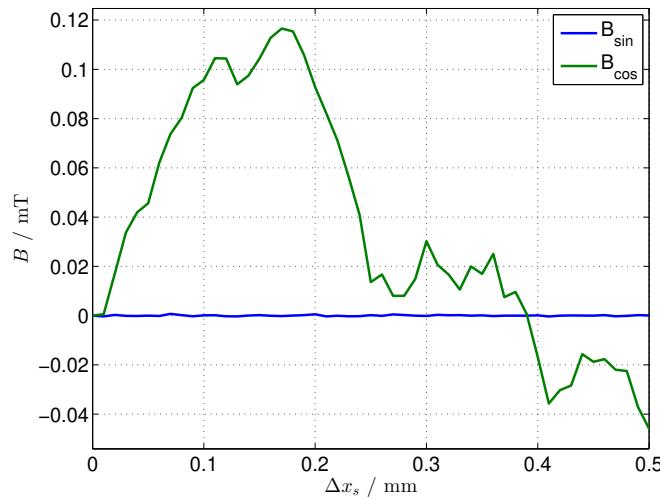
Slika 6.7: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20mm statične ekscentričnosti v smeri x

### 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.

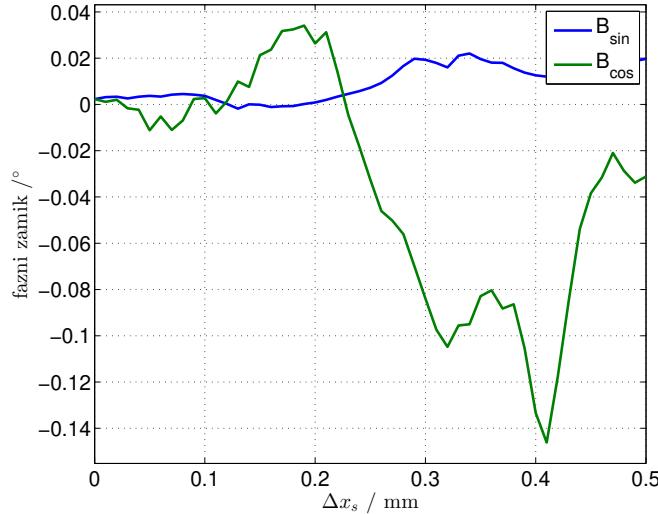


Slika 6.8: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



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

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



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  $B_{cos}$

ponenta nekoliko pada (6.7)-(6.11). Zanimiv je tudi upad četrtega harmonika.

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

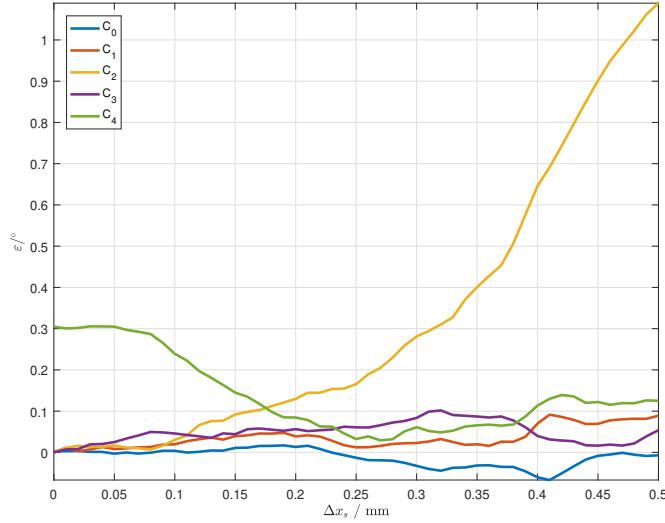
$$A_{sin}(\Delta x_s) = 1,84 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 5,17 \Delta x_s^2 + 2,24 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 6,83 \cdot 10 \quad (6.2)$$

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

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

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

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



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

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

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

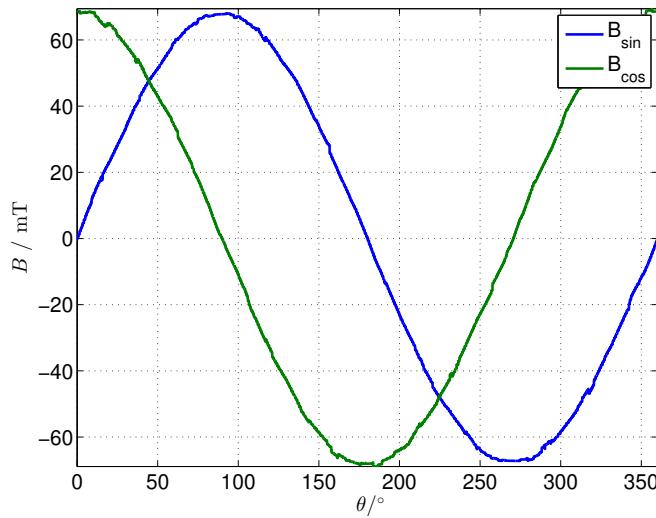
$$C_2(\Delta x_s) = 1,05 \cdot 10\Delta x_s^3 - 1,52\Delta x_s^2 + 4,53 \cdot 10^{-1}\Delta x_s - 5,39 \cdot 10^{-5} \quad (6.9)$$

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

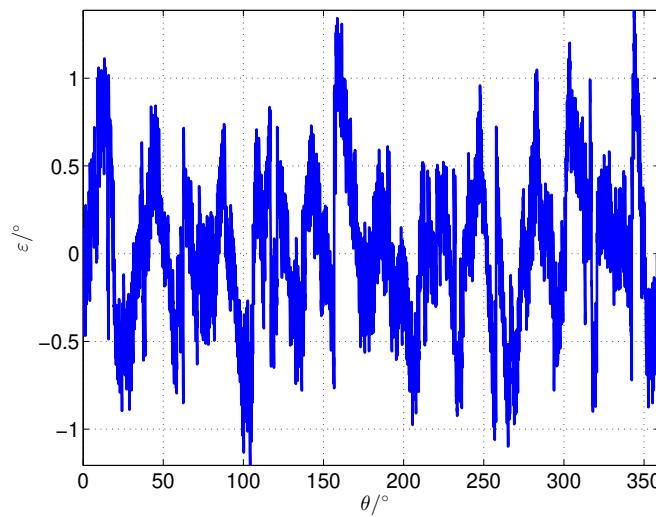
$$C_4(\Delta x_s) = 1,24\Delta x_s^3 + 2,20\Delta x_s^2 - 1,80\Delta x_s + 3,64 \cdot 10^{-1} \quad (6.11)$$

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

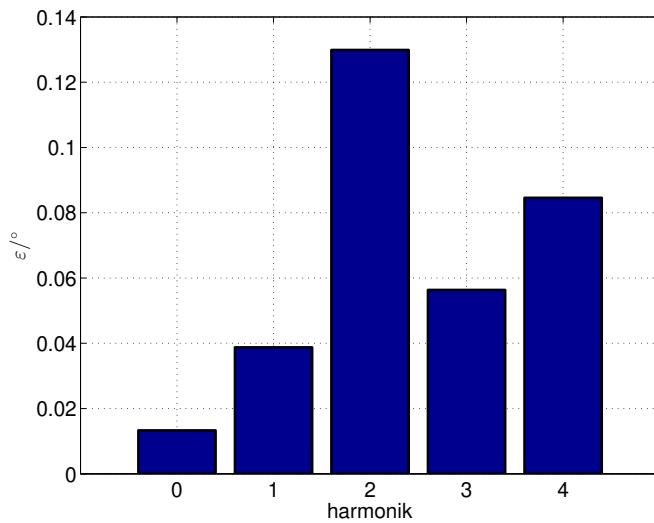
Pri statični ekscentričnosti v smeri y, je pričakovano glede na prejšnje podpoglavje, znižanje amplitude  $B_{sin}$  (slika 6.12). Napaka  $\varepsilon$  (slika 6.13) je enake oblike kot je bila pri simulacijah statične ekscentričnosti v smeri x (slika 6.6). Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 6.7) 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: Amplitude 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 spremenjala 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 spremenjal zamik  $B_{cos}$

pri ekscentričnosti v smeri x (slika 6.17). Poteki so zapisani s kubičnimi polinomi.

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

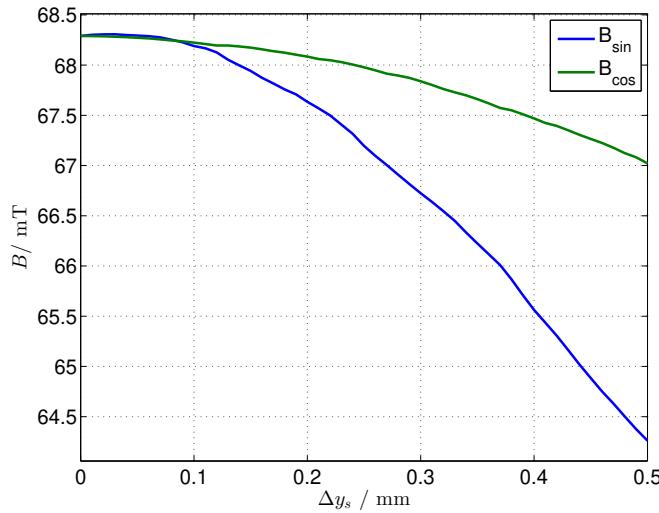
$$A_{sin}(\Delta y_s) = 1,27 \cdot 10\Delta y_s^3 - 2,50 \cdot 10\Delta y_s^2 + 1,16\Delta y_s + 6,83 \cdot 10 \quad (6.13)$$

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

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

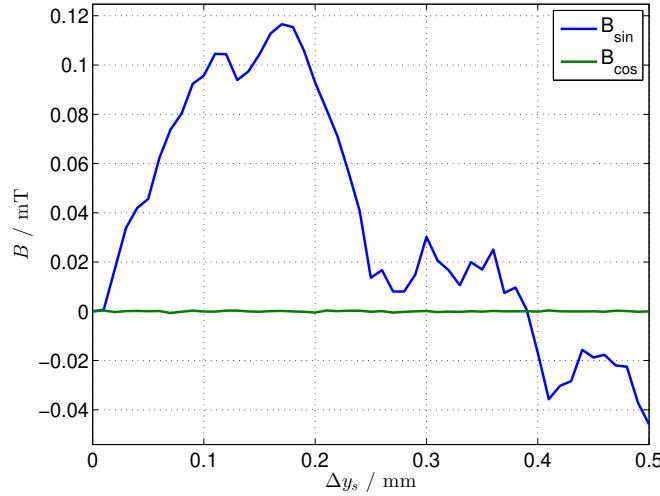
$$A_{cos}(\Delta y_s) = 1,84 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 - 5,17\Delta y_s^2 + 2,24 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 6,83 \cdot 10 \quad (6.16)$$

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

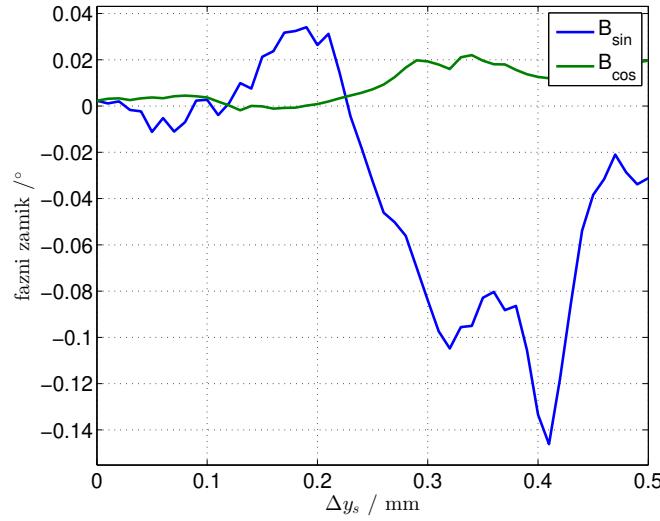


Slika 6.15: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

Enačbe prikazujejo enake poteke kot poteki pri statični ekscentričnosti v smeri x. Posledično to vpliva na posamezne harmonike napake. Amplitude harmonikov napake se izrazijo enako kot se je izrazila napaka pri statični ekscentričnosti v smeri x.



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



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  $B_{cos}$

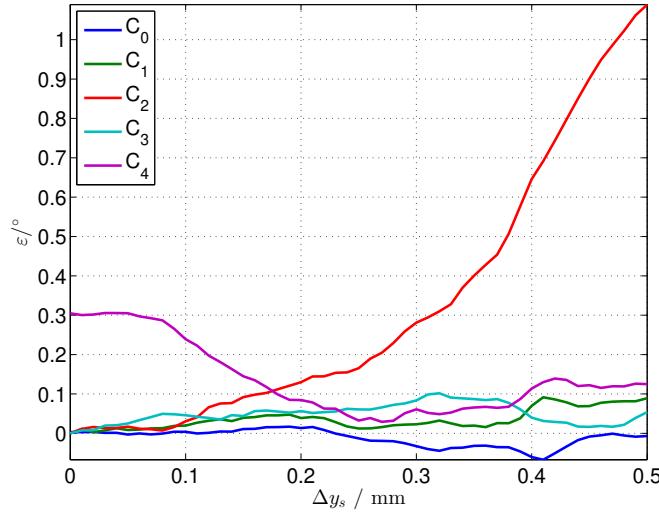
$$C_0(\Delta y_s) = 5,02\Delta y_s^3 - 3,63\Delta y_s^2 + 5,93 \cdot 10^{-1}\Delta y_s - 1,47 \cdot 10^{-2} \quad (6.18)$$

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

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

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

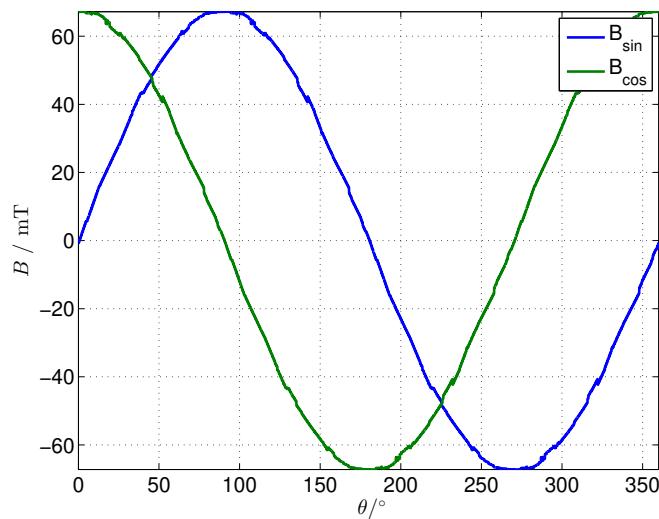
$$C_4(\Delta y_s) = 1,24\Delta y_s^3 + 2,20\Delta y_s^2 - 1,80\Delta y_s + 3,64 \cdot 10^{-1} \quad (6.22)$$



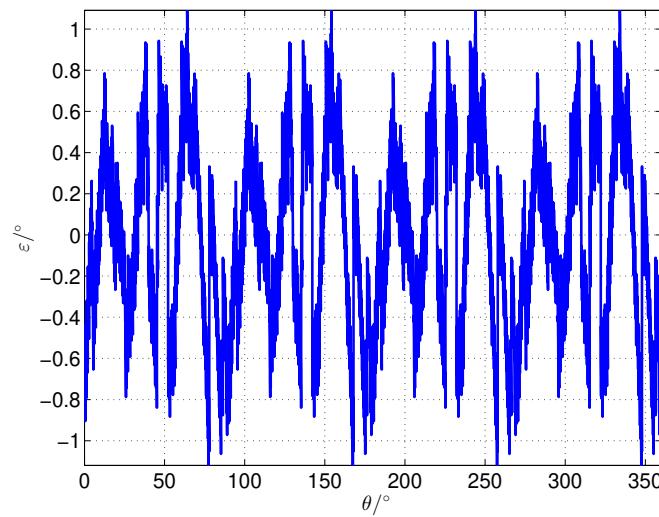
Slika 6.18: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z realnim poljem

#### 6.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x

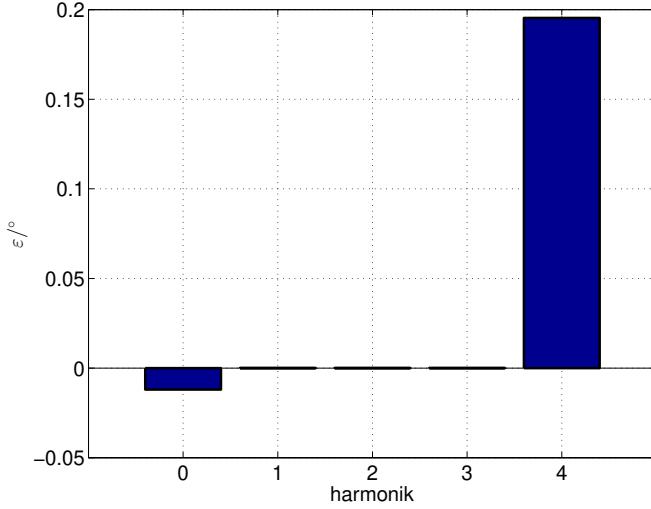
Vpliv dinamične ekscentričnosti v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je pričakovani v obliki enosmerne komponente, vendar se zaradi diferencialnega zajema odštejeti. Na sliki 6.19 sta  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ , kjer ni vidnih razlik. V napaki (slika 6.20) tudi ni posebnosti, razvoj napake v Fourierovo prikaže 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: Amplitudo 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 amplitudo 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 polinomi predstavijo enako spremembo signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ .

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

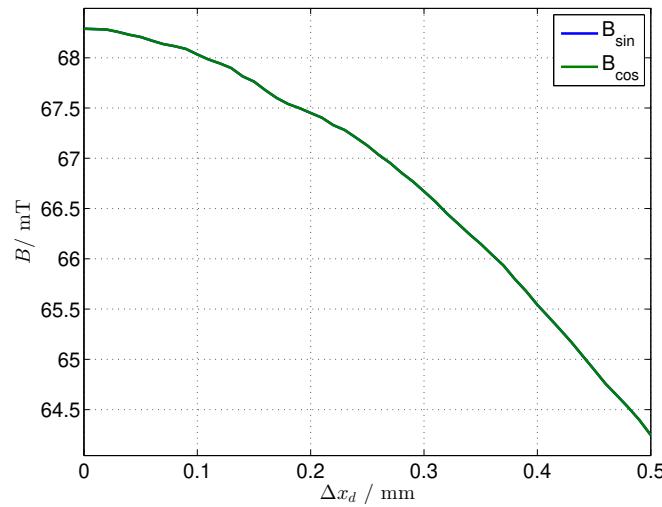
$$A_{sin}(\Delta x_d) = 2,56 \cdot 10^{-2}\Delta x_d^3 - 1,33 \cdot 10\Delta x_d^2 - 1,52\Delta x_d + 6,83 \cdot 10 \quad (6.24)$$

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

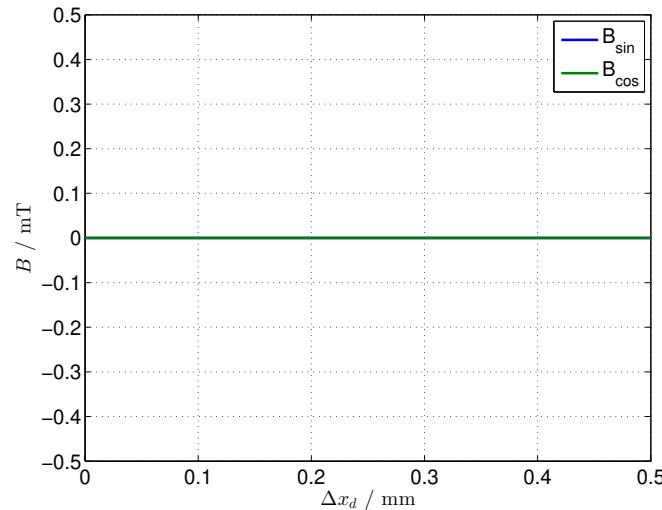
$$Off_{cos}(\Delta x_d) = 0\Delta x_d^3 + 0\Delta x_d^2 + 0\Delta x_d + 0 \quad (6.26)$$

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

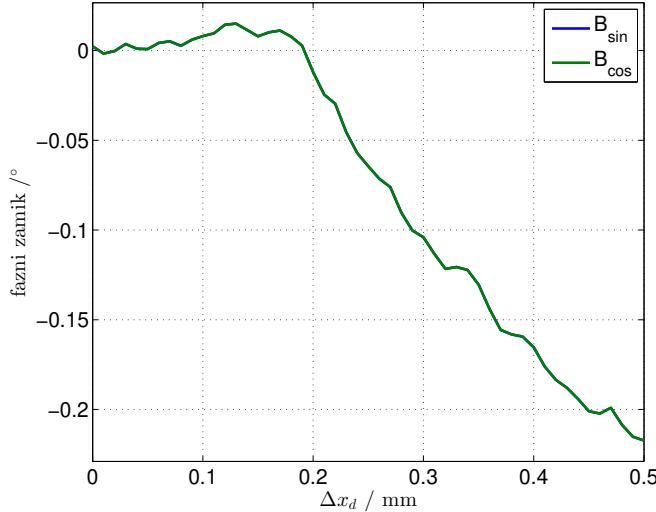
$$\delta_{cos}(\Delta x_d) = 5,79\Delta x_d^3 - 5,26\Delta x_d^2 + 7,87 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,57 \cdot 10^{-2} \quad (6.28)$$



Slika 6.22: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x. Poteka amplitud sta enaka in se na sliki prekrivata.



Slika 6.23: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x. Zaradi diferencialnega zajema sta obe enosmerni komponenti enaki 0.



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  $B_{cos}$ . Poteka faznega zamika signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  sta enaka.

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. Enosmerna komponenta je posledica spremenjanja začetne lege Hallovih sond. Poteki so aproksimirani s kubičnimi polinomi.

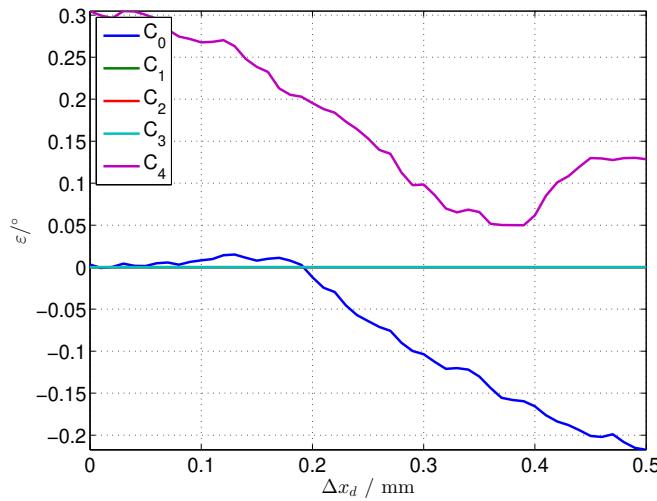
$$C_0(\Delta x_d) = 5,74\Delta x_d^3 - 5,22\Delta x_d^2 + 7,77 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,49 \cdot 10^{-2} \quad (6.29)$$

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

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

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

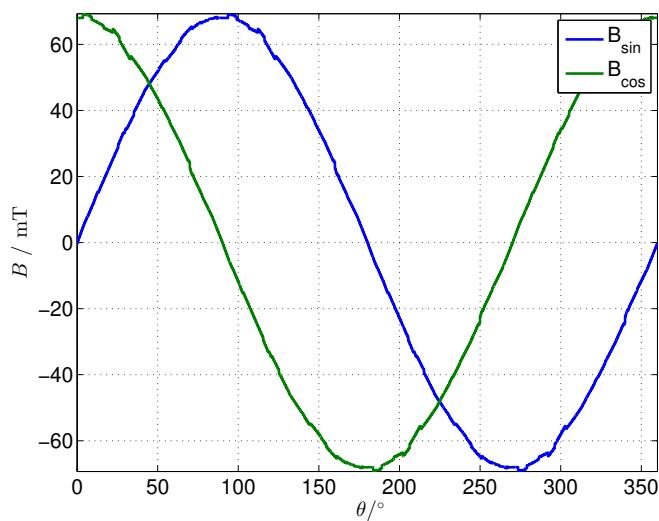
$$C_4(\Delta x_d) = 1,06 \cdot 10\Delta x_d^3 - 6,51\Delta x_d^2 + 3,46 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 2,96 \cdot 10^{-1} \quad (6.33)$$



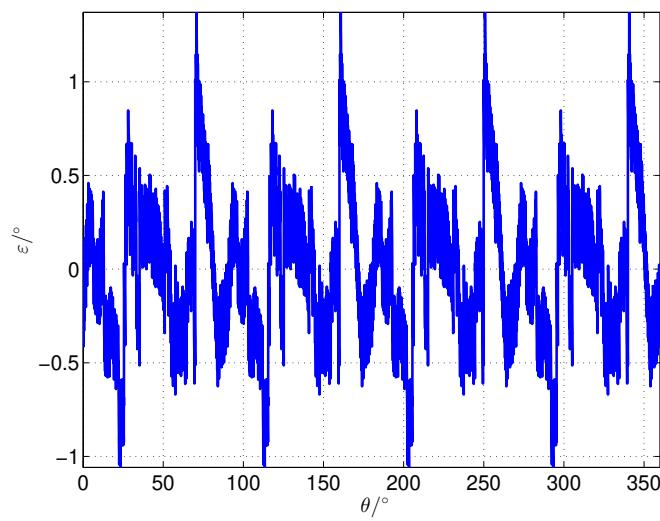
Slika 6.25: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od dinamične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z realnim poljem

## 6.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y

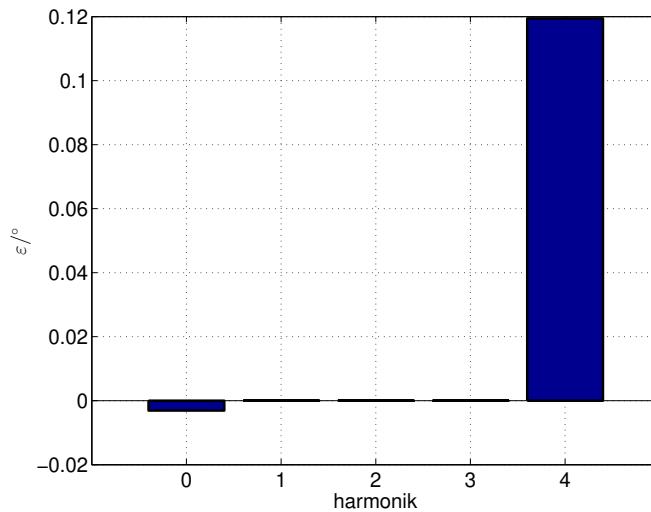
V simulacijah z linearno aproksimacijo polja signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  ter posledično tudi napaka, ni bila odvisna od dinamične ekscentričnosti v smeri y. Tu je bila kljub temu opravljena simulacija. Rezultati so podobni dinamični ekscentričnosti v smeri x. Spremembe v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  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: Amplitude 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 amplitude osnovnega harmonika od naraščanja ekscentričnosti pada (slika 6.29). Razlika amplitud ostaja nespremenjena. Enosmerni komponenti se odstejeti (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 sprememjanju di-

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

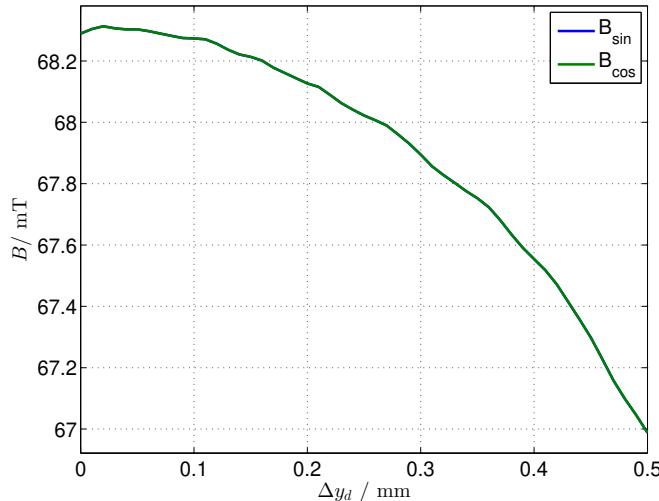
$$C_0(\Delta y_d) = 6,53\Delta y_d^3 - 5,39\Delta y_d^2 + 8,75 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 2,59 \cdot 10^{-2} \quad (6.40)$$

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

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

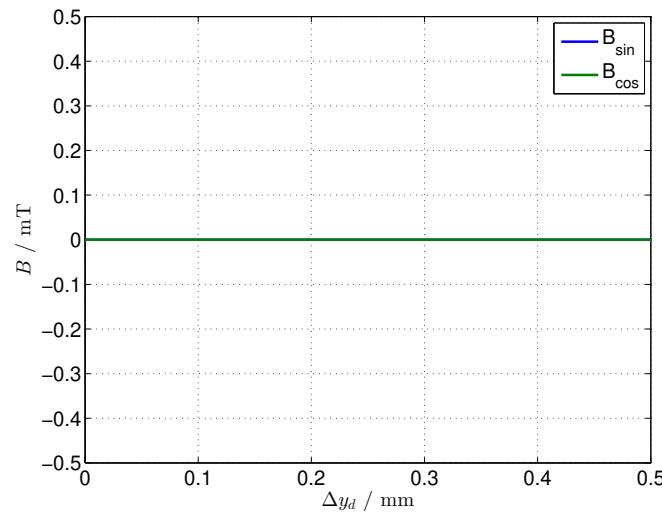
$$C_3(\Delta y_d) = -9,53 \cdot 10^{-15}\Delta y_d^3 + 7,01 \cdot 10^{-15}\Delta y_d^2 - 1,24 \cdot 10^{-15}\Delta y_d + 7,33 \cdot 10^{-16} \quad (6.43)$$

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

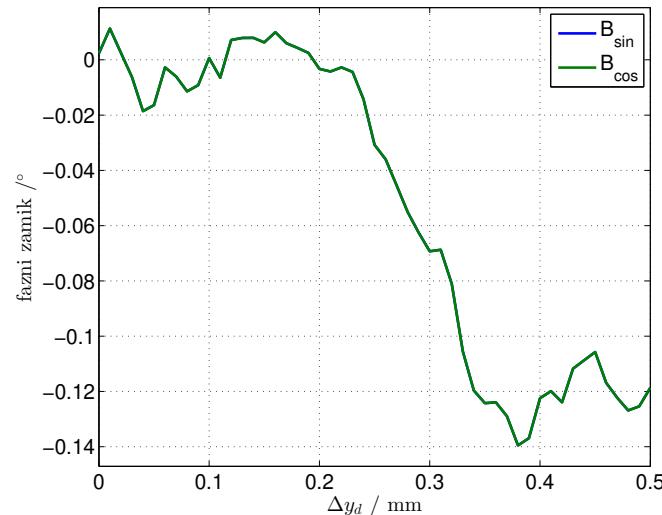


Slika 6.29: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y. Poteka amplitud sta enaka in se na sliki prekrivata.

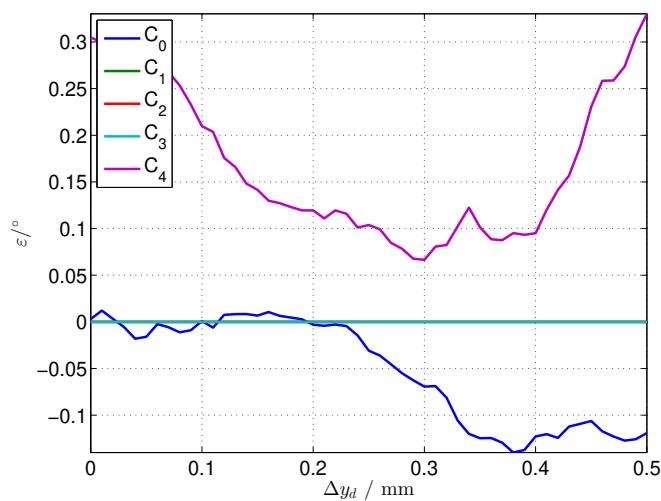
V tem poglavju so bile prikazane simulacije z uporabo realnega polja, ki ga merijo Hall-ove sonde. Rezultati podajo manjšo napako kot pri simulacijah z aproksimiranim linearnim magnetnim poljem. Z diferencialnim merjenjem, se odstrani enosmerno komponento v signalih  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$ .



Slika 6.30: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y. Zaradi diferencialnega zajema sta obe enosmerni komponenti enaki 0.



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  $B_{\cos}$ . Poteka faznega zamika signalov  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  sta enaka.



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

# 7 Meritve

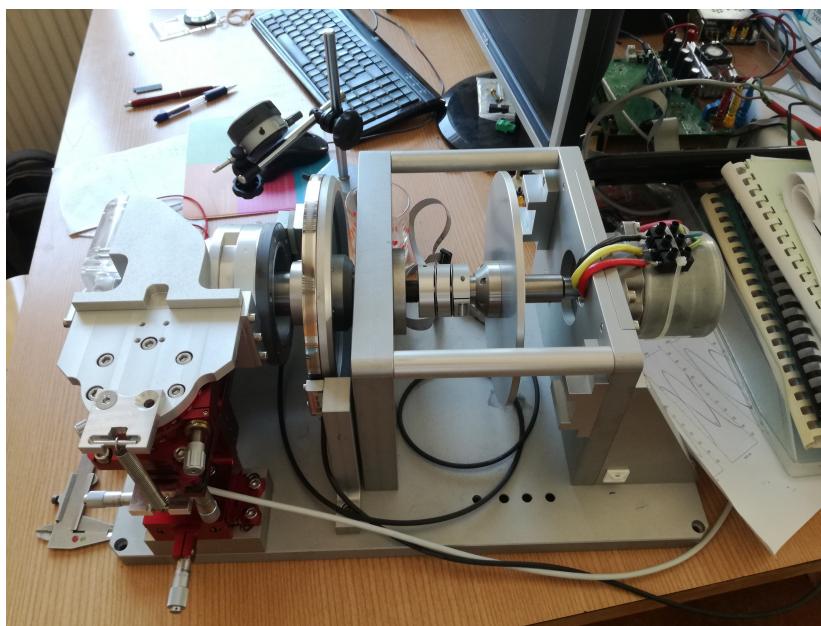
Simulacije so prikazale okvirne poteke  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  signalov ter napake ob posameznih ekscentričnostih. Na merilni napravi so bile opravljene meritve ekscentričnosti. V poglavju je opisana merilna naprava, zajem podatkov ter izvedba meritvev.

## 7.1 Oprema in postavitev merilnega mesta

Merilno 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 merilno mizico s šestimi prostorskimi stopnjami HTIMS601. Celotno merilno mesto je prikazano na sliki 7.2. Za manevriranje merilne mizice 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 translacijo merjenca, x-rot, y-rot in z-rot so za nastavljanje rotacije premikajoče plošče na vrhu merilne mizice. S spremembjo vrtenja vijakov translacijskih osi, se je lokacija senzorja pred magnetom spremenjala za enako spremembbo. S spremembjo vrtenja rotacijskih vijakov, se je zaradi ročice na katero je pritrjen senzor, senzor zarotira in hkrati tudi premakne iz dotedanje lege. S spremembbo rotacije je potrebno popraviti tudi nastavitev



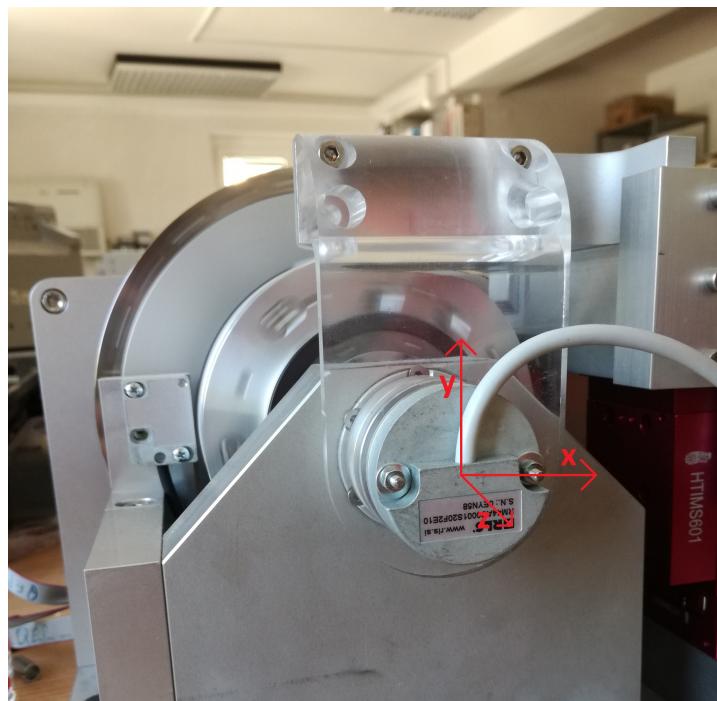
Slika 7.1: Dinamično ekscentričnost se lahko spreminja le v eni smeri



Slika 7.2: Postavitev testnega mesta

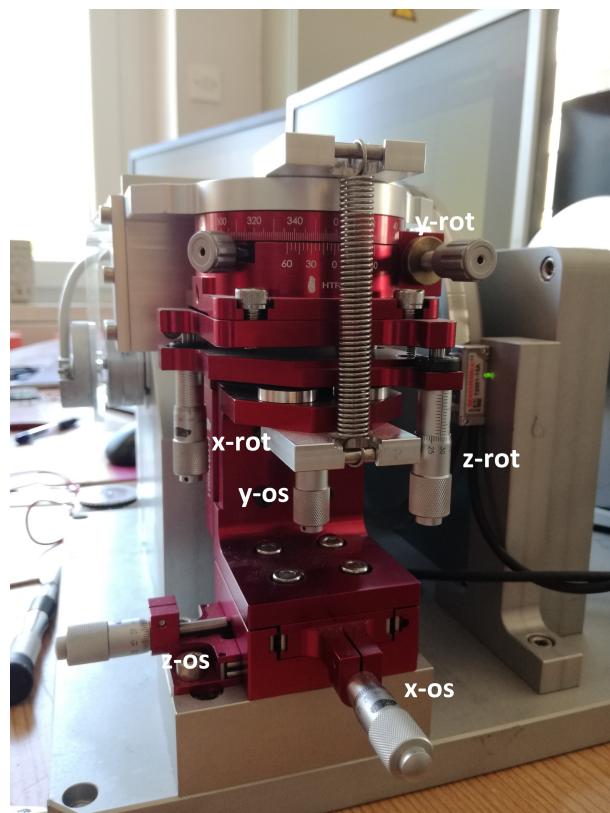
vijakov, ki senzor premikajo v translacijskih oseh.

Pogon se vrati s 60 RPM. Vrtilna hitrost tekom obrata niha (slika 7.5). Vzrok je v vztrajnosti pogona. Z dodajanjem uteži na vztrajnik, se je oscilacije znižalo

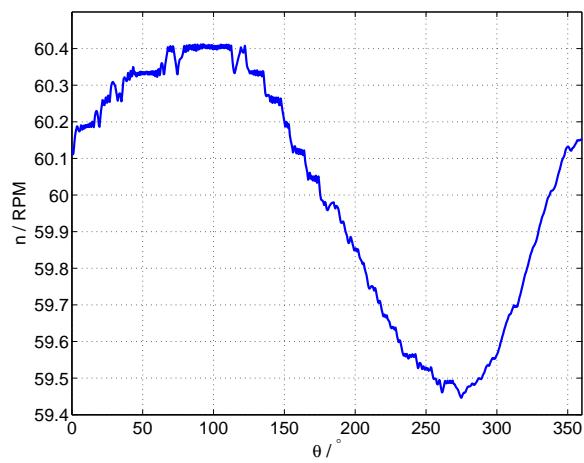


Slika 7.3: Postavitev testnega mesta

na minimalne.



Slika 7.4: Naprava za nastavljanje statične ekscentričnosti

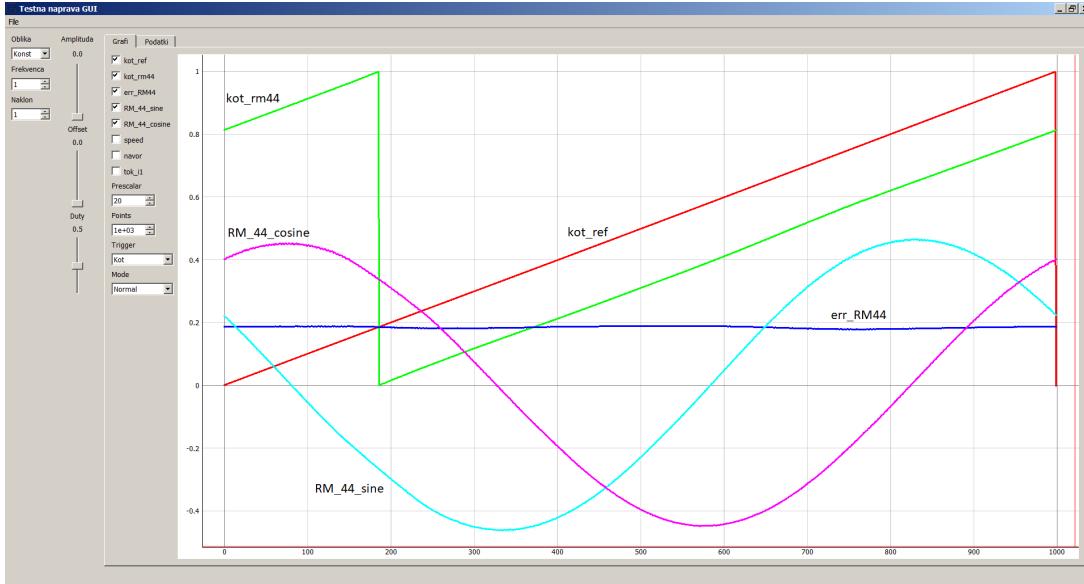


Slika 7.5: Potek hitrosti od zasuka

## 7.2 Zajem podatkov

Za merilno napravo je bil sestavljen grafični uporabniški vmesnik za prikazovanje meritev (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 signala.

Krmilna plošča (slika 7.7) zajema podatke 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  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  se na krmilni plošči ojačata in pretvorita z 12 bitnim AD pretvornikom. Izhod AD pretvornika se odšteje 2048 in deli s 4096. Definicjsko območje  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  signala se gibljeta med  $\pm 0,5$ . Hitrost in napaka sta izračunana iz zajetih signalov. Podatki so v obliki enega paketa poslani s krmilne plošče na 1 sekundo. Pri frekvenci vrtenja 1 Hz, grafični vmesnik prikaže en obrat. Podatke se lahko izvozi v obliki .csv datoteke in nato poljubno obdelava. Na sliki 7.6 je prikazan sinusni signal prikazan kot da je zamaknjen za  $180^\circ$ . To je posledica definicije pozitvne smeri vrtenja za senzor [5]. Senzor ima nasprotno definirano pozitivno smer vrtenja. To sem rešil tako, da sem obrnil podatke. Popraviti je bilo potrebno tudi potek referenčnega dajalnika.

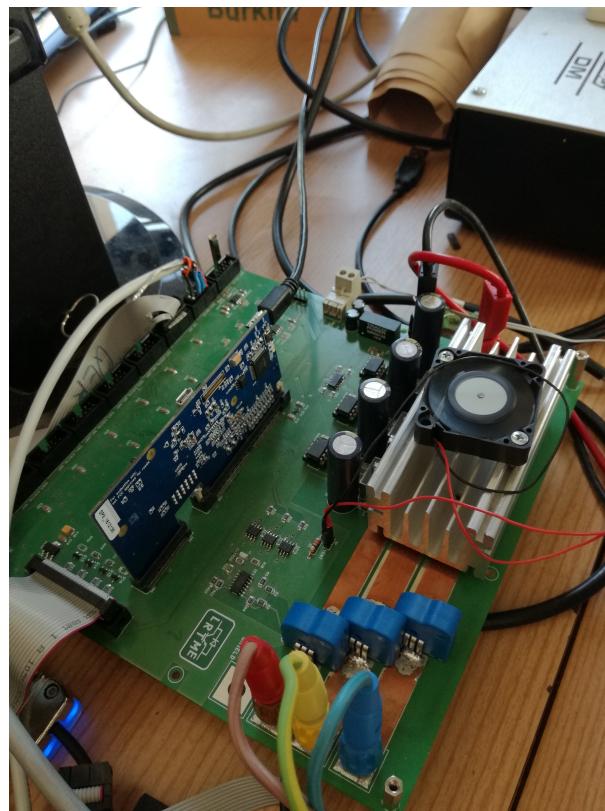


Slika 7.6: Grafični vmesnik s poteki signalov

### 7.3 Senzor v izhodiščni legi

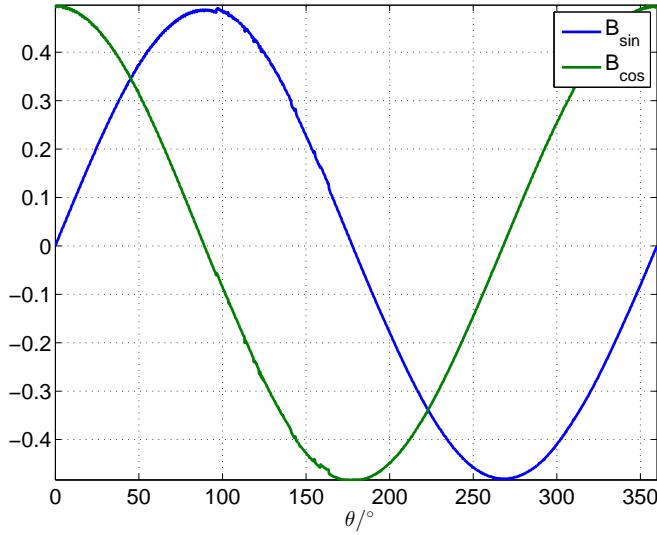
Senzor in magnet se lahko gibljeta, najprimernejša, izhodiščna lega, ni definirana. Z merilno urico Mitutoyo 543-391B se je dinamično ekscentričnost magneta nastavilo na najmanjšo. Oplet z merilno urico je bil pomerjen  $\pm 3\mu\text{m}$ . S prilaganjem vijakov HTIMS601, opazovanjem  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  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 pretvornnika.

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 enosmernih komponent  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Z matematično obdelavo siganlov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  sem enosmerni komponenti odstranil, vendar se prvi

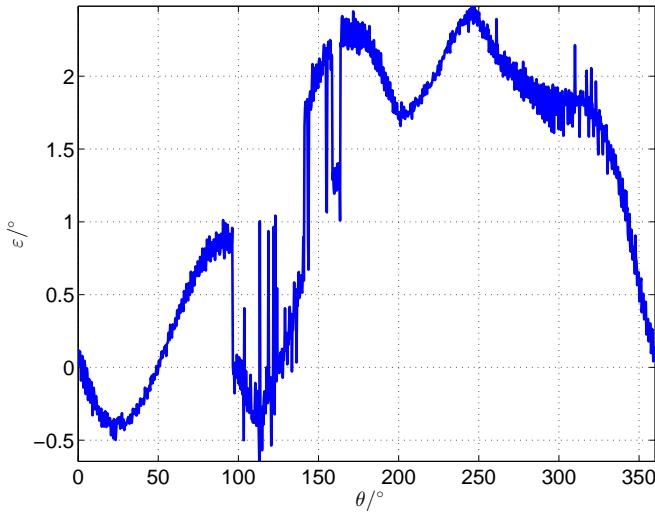


Slika 7.7: Elektronika za krmiljenje pogona in zajem podatkov z dajalnikov zasuka

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 matematično obdelana. Spreminjanje signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  in napake se bo opazovalo glede na potek, ki je bil pomerjen v izhodiščni legi.



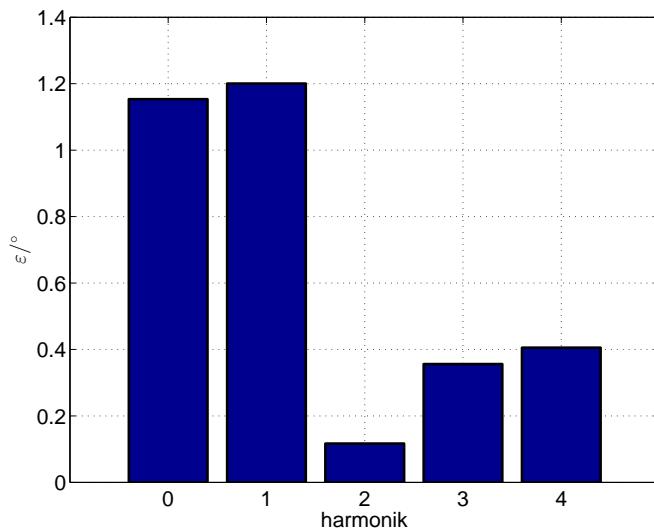
Slika 7.8: Signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pomerjena v izhodiščni legi



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

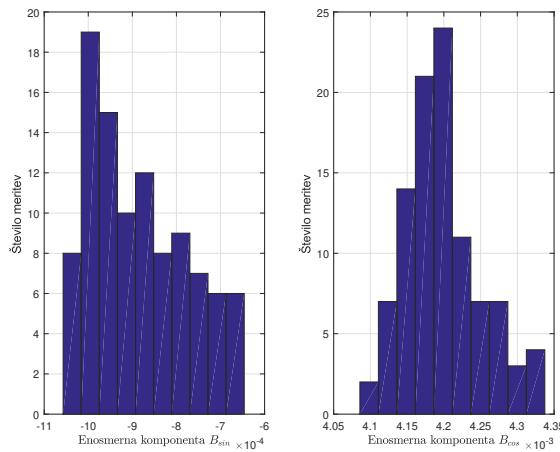
### 7.3.1 Meritve v izhodiščni legi

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



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

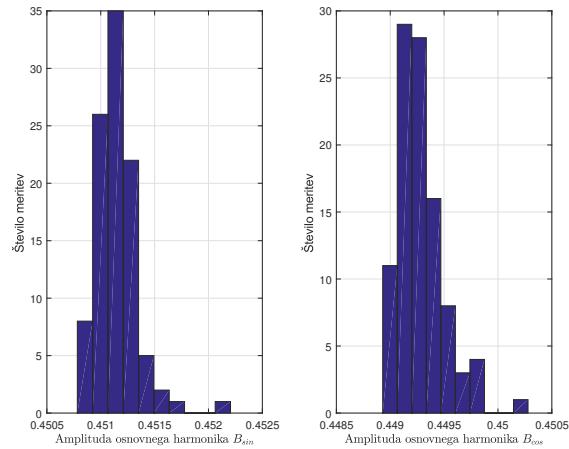
vrednost enosmerne komponente  $B_{sin}$  je  $-8,85 \cdot 10^{-4}$ , standardna deviacija je  $1,08 \cdot 10^{-4}$ . Srednja vrednost enosmerne komponente  $B_{cos}$  je  $4,20 \cdot 10^{-3}$ , standar-dna deviacija je  $5,20 \cdot 10^{-5}$ . Porazdelitev amplitude osnovnega harmonika signala



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

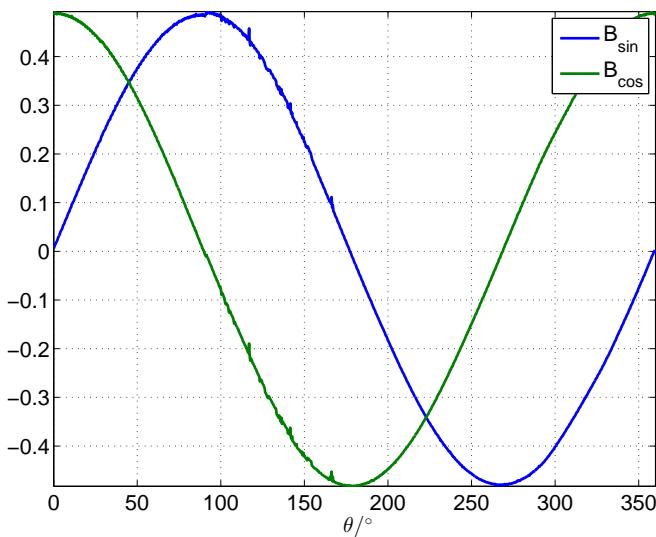
harmonika  $B_{sin}$  je  $0,451$ , standardna deviacija je  $2,20 \cdot 10^{-4}$ . Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika  $B_{cos}$  je  $0,449$ , standardna deviacija je  $1,95 \cdot 10^{-4}$ .



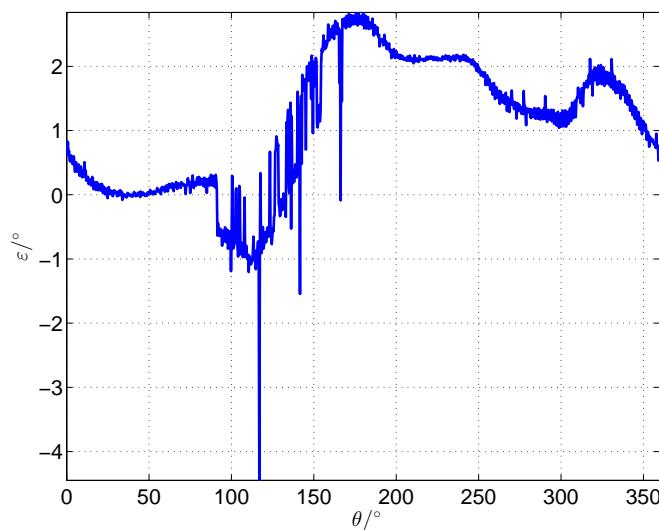
Slika 7.12: Porazdelitev meritve amplitude osnovnega harmonika signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$

## 7.4 Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi

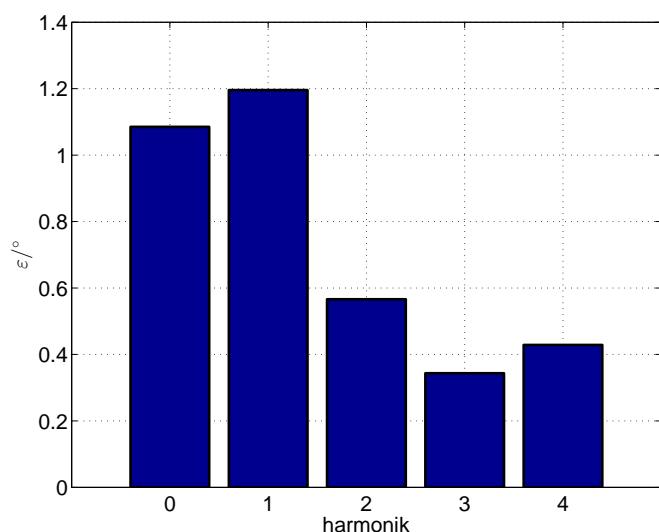
Pri meritvi je pričakovati spremembo amplitud in faznih zamikov signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Na sliki 7.13 sta prikazana  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pomerjena pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x. Na signalih, med 95 in 175° se pojavijo nenavadni skoki. Izrazijo se tudi na napaki, ki je prikazana na sliki 7.14. Vzrok tega pojava ni sem raziskoval. Napaka razvita v Fourierovo vrsto prikaže pričakovano povišanje drugega harmonika.



Slika 7.13: Signala  $B_{sin}$  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.

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

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

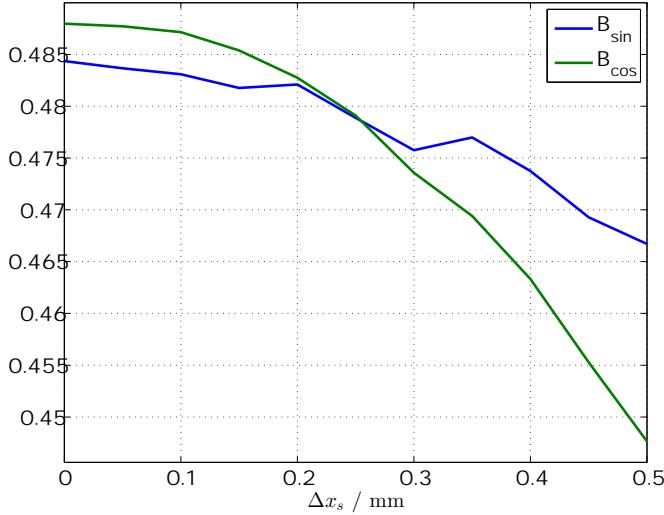
$$\delta_{sin}(\Delta x_s) = 5,32 \Delta x_s^3 - 3,55 \Delta x_s^2 + 3,49 \Delta x_s + 1,08 \quad (7.3)$$

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

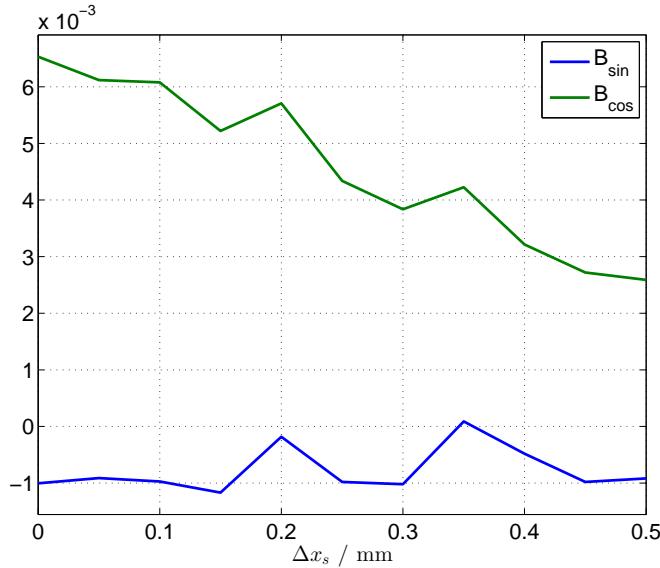
$$A_{cos}(\Delta x_s) = 7,46 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^3 - 1,85 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 1,01 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 4,88 \cdot 10^{-1} \quad (7.5)$$

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

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. Poteki so aproksimirani 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

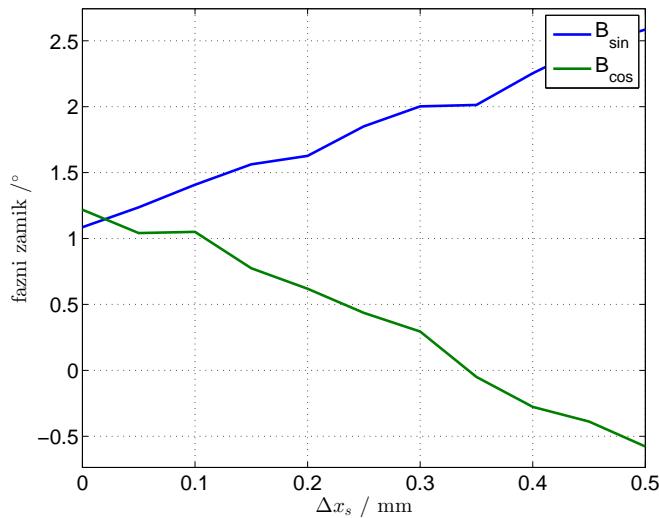
$$C_0(\Delta x_s) = 2,42\Delta x_s^3 - 1,71\Delta x_s^2 + 2,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,15 \quad (7.7)$$

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

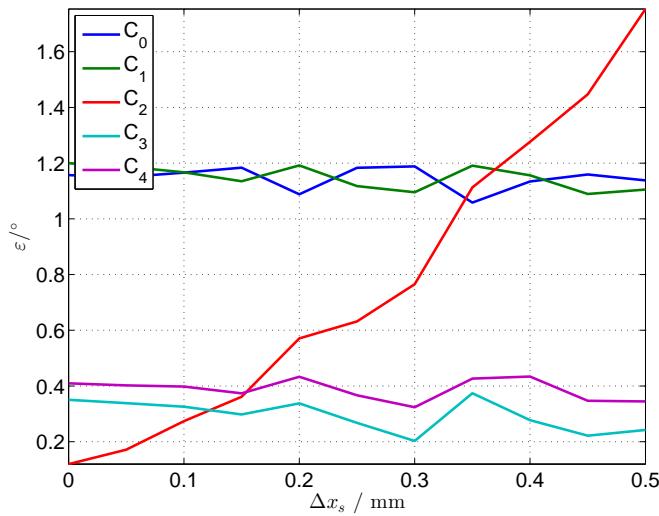
$$C_2(\Delta x_s) = -1,11\Delta x_s^3 + 5,06\Delta x_s^2 + 9,95 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,18 \cdot 10^{-1} \quad (7.9)$$

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

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



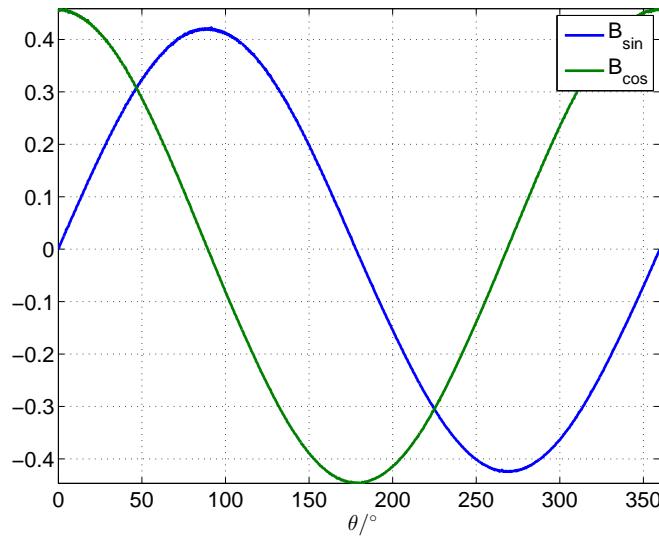
Slika 7.18: Fazni zamik osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x glede na idealna signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$



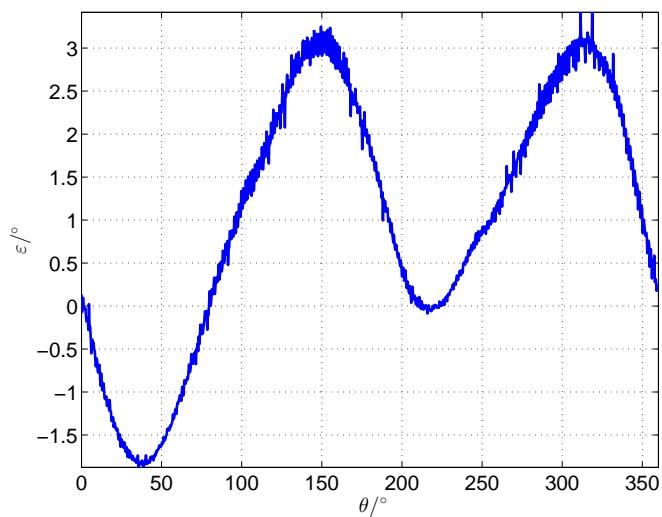
Slika 7.19: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x

## 7.5 Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi

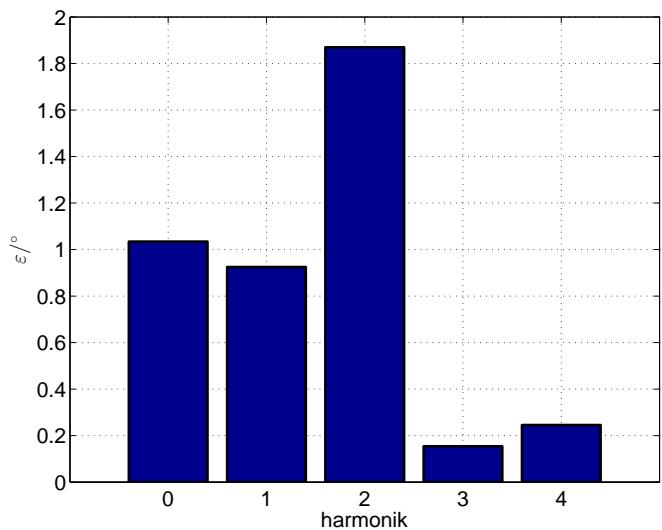
Slika 7.20 prikazuje zajeta signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri statični ekscentričnosti v smeri y. Amplituda  $B_{sin}$  se je zmanjšala, kot je bilo pričakovati po rezultatih simulacij. Posledično se izrazi v napaki druge harmonik (slika 7.21). Z razvojem napake v Fourierovo vrsto se potrdi povišanje drugega harmonika.



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 potekov 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.

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

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

$$\delta_{sin}(\Delta y_s) = 3,37 \cdot 10 \Delta y_s^3 - 2,12 \cdot 10 \Delta y_s^2 + 3,81 \Delta y_s + 8,82 \cdot 10^{-1} \quad (7.14)$$

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

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

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

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

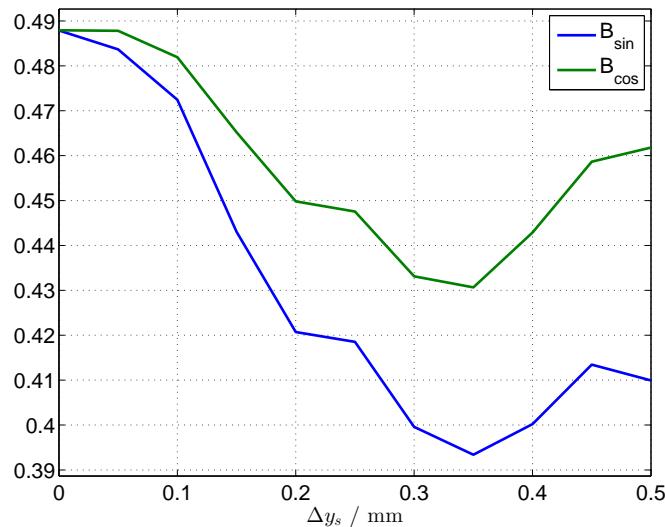
$$C_0(\Delta y_s) = -3,26 \Delta y_s^3 - 3,10 \Delta y_s^2 + 2,68 \Delta y_s + 6,00 \cdot 10^{-1} \quad (7.18)$$

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

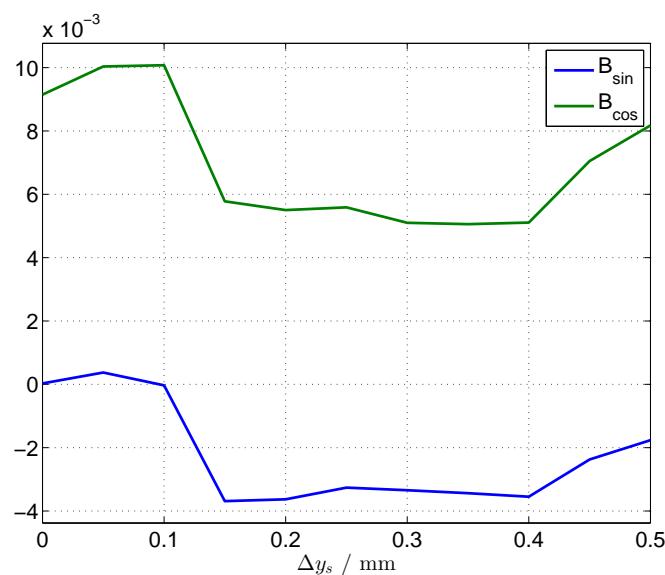
$$C_2(\Delta y_s) = -4,15 \Delta y_s^3 - 1,64 \Delta y_s^2 + 8,22 \Delta y_s + 8,04 \cdot 10^{-2} \quad (7.20)$$

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

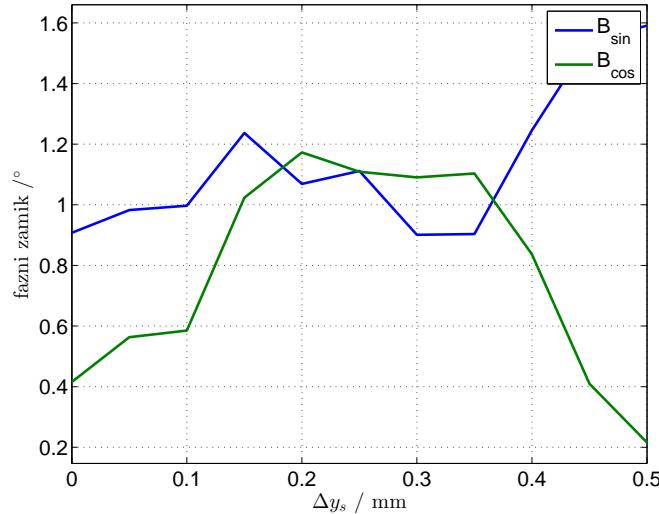
$$\begin{aligned} C_4(\Delta y_s) = & 7,11 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 - 7,96 \cdot 10^{-2} \Delta y_s^2 - 3,14 \cdot 10^{-1} \Delta y_s \\ & + 3,21 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.22)$$



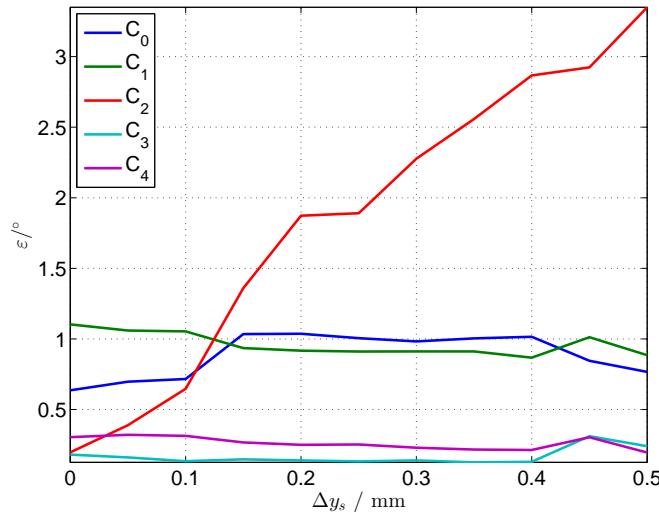
Slika 7.23: Potek amplitude osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y



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



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 zaročenem 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.

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

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

$$\delta_{sin}(\Delta x_d) = 8,95\Delta x_d^3 - 1,06\Delta x_d^2 + 7,09 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,73 \cdot 10^{-2} \quad (7.25)$$

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

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

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

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

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

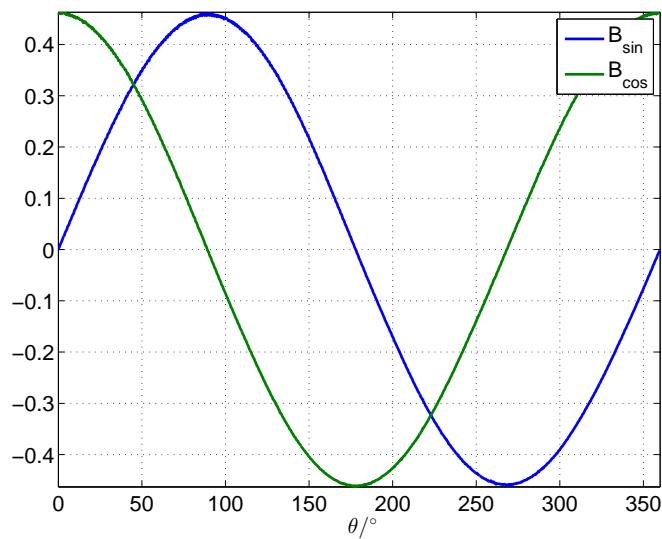
$$C_2(\Delta x_d) = 8,94 \cdot 10^{-15}\Delta x_d^3 - 7,96 \cdot 10^{-15}\Delta x_d^2 + 1,84 \cdot 10^{-15}\Delta x_d + 2,87 \cdot 10^{-15} \quad (7.31)$$

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

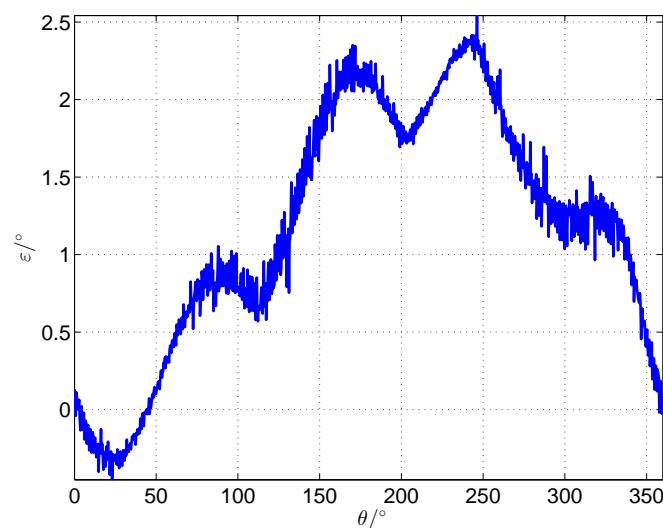
$$C_4(\Delta x_d) = -1,16 \cdot 10\Delta x_d^3 + 1,13 \cdot 10\Delta x_d^2 - 3,03\Delta x_d + 3,99 \cdot 10^{-1} \quad (7.33)$$

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

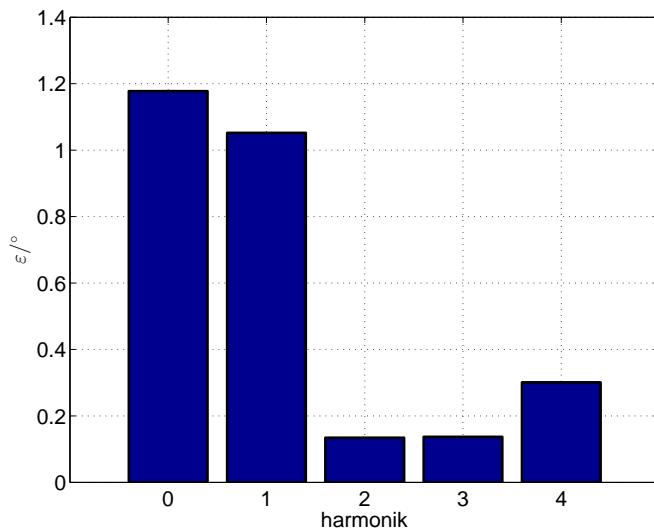
Pri dinamični ekscentričnosti v povzročeni smeri se signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  nista opazno spremenila (slika 7.27). Sprememb ni niti na napaki (slika 7.28). Sprememba se opazi v napaki razviti v Fourierovo vrsto (slika 7.29). Nekoliko se je povišala enosmerna komponenta.



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



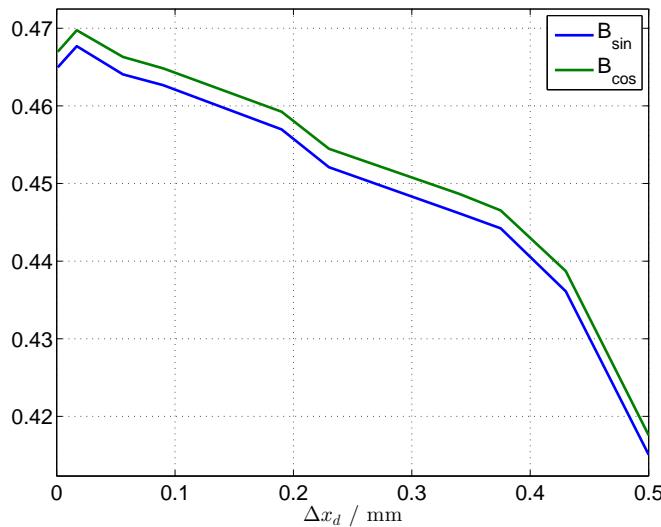
Slika 7.28: Napaka  $\varepsilon$  merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



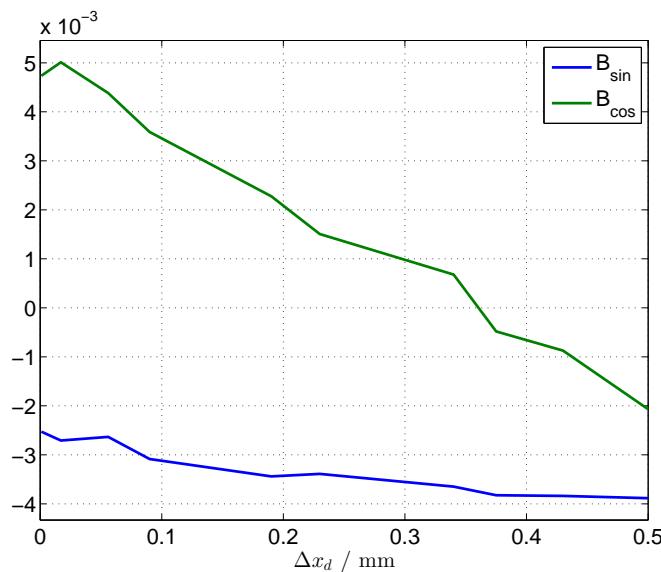
Slika 7.29: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

### 7.6.1 Sprememba 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 ostaja tekom spremnjanja dinamične ekscentričnosti enaka. Enosmerni komponenti  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  padati, vendar vsaka s svojim gradientom. Sprememba enosmerne komponente je večja, kot je bila predvidena v simulacijah. Sprememba faznega zamika osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je prikazana na sliki 7.32. Fazna zamika s spremebo dinamične ekscentričnosti naraščata. V simulacijah tako velika sprememba enosmerne komponente ni bila pričakovana.

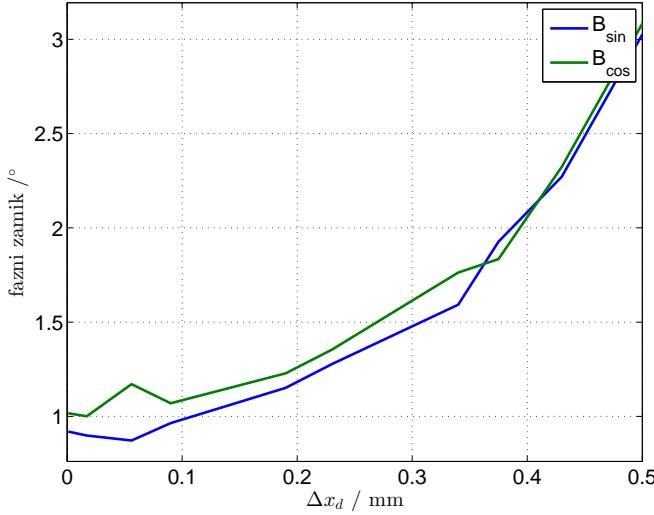


Slika 7.30: Potek amplitude osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x



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

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



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

polinomi.

$$\begin{aligned} Off_{\sin}(\Delta x_d) = & -3,42 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^3 + 7,48 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^2 - 5,61 \cdot 10^{-3} \Delta x_d \\ & - 2,53 \cdot 10^{-3} \end{aligned} \quad (7.34)$$

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

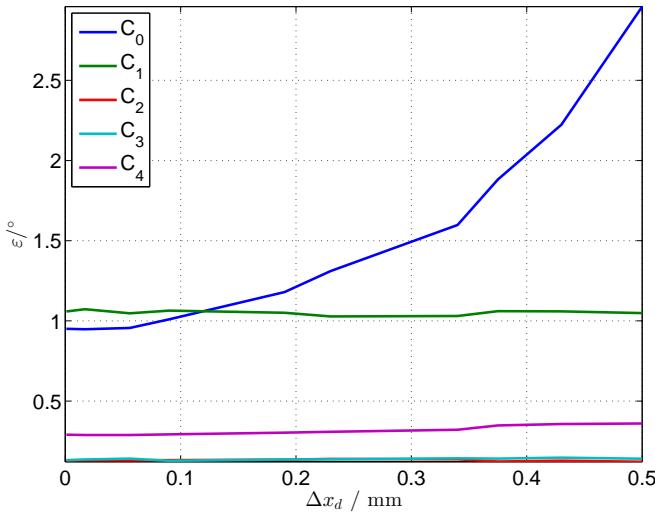
$$\delta_{\sin}(\Delta x_d) = 1,76 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 2,62 \Delta x_d^2 + 1,18 \Delta x_d + 8,78 \cdot 10^{-1} \quad (7.36)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

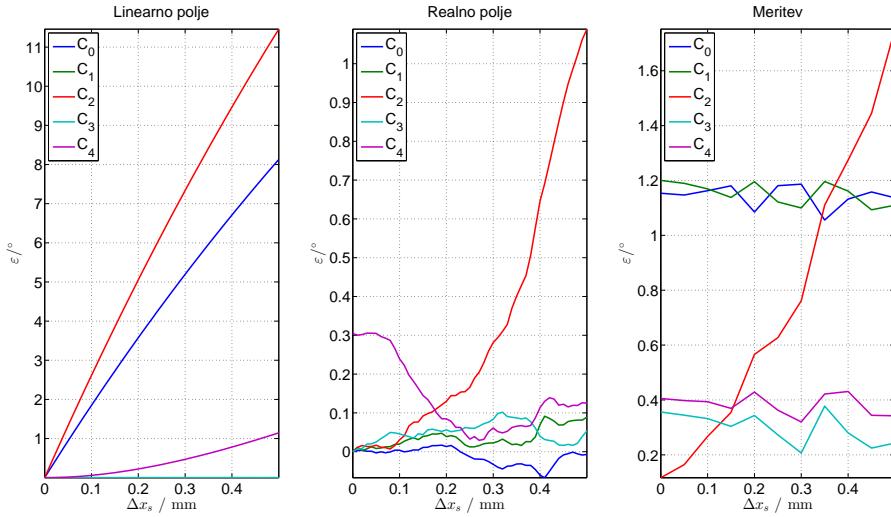
$$\begin{aligned} C_4(\Delta x_d) = & -9,91 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 9,61 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 8,81 \cdot 10^{-2} \Delta x_d \\ & + 2,91 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.44)$$

# 8 Primerjava rezultatov simulacij in meritov

## 8.1 Statična ekscentričnost v smeri x

Slika 8.1 prikazuje poteke amplitud harmonikov napake v odvisnosti od ekscentričnosti v smeri x. Rezultati kjer je bil simulacijski model poenostavljen na dve Hallovih sondi in linearno Z-komponento gostote magnetnega polja, je nakazoval, da se bo napaka izrazila v obliki drugega harmonika ter enosmerne komponente. Točnejši model z uporabo 4 Hallovih sond in numerično izračunane Z-komponente gostote magnetnega polja, je rezultate prvih simulacij nekaj potrdil in nekaj ovrgel. V napaki nastopa drugi harmonik, enosmerna komponenta je manjša. V napaki se je pojavil četrти harmonik, ki je posledica magneta. V meritvah je bilo tako pričakovano spremjanje le drugega harmonika.

Pri meritvah je bilo prvo potrebno najti izhodiščno lego. Kljub najdeni legi, je v napaki ostala enosmerna komponenta, ki se tekom spremjanja ekscentričnosti ni posebaj spremnjala. Napaka vsebuje konstanten prvi harmonik, ki je posledica enosmernih komponent v signalih  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Prvi harmonik napake tako ni odvisen od statične ekscentričnosti.



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

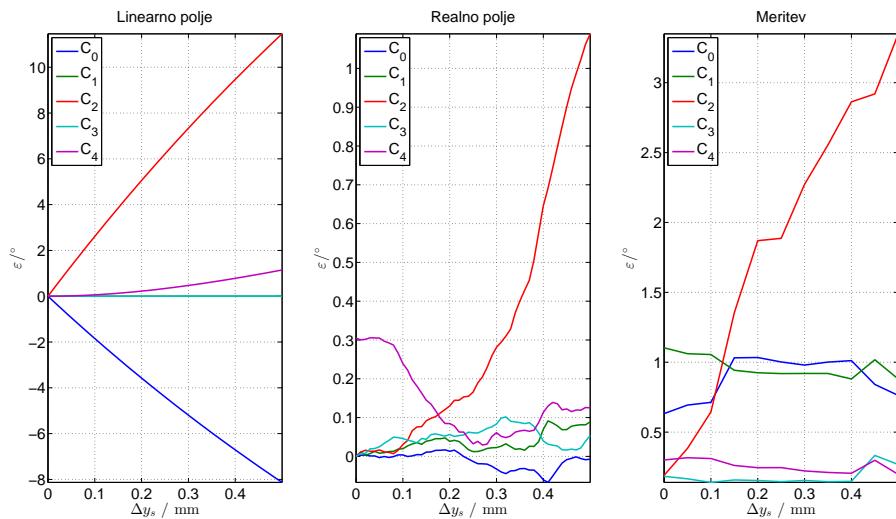
## 8.2 Statična ekscentričnost v smeri y

Rezultati statične ekscentričnosti v smeri y so predstavljeni na sliki 8.2. Simulacijski model z dvema sondama in linearno Z-komponento gostote magnetnega polja je pri statični ekscentričnosti v smeri y napovedoval negativno enosmerno komponento. Potek drugega harmonika je enak kot je bil simuliran pri statični ekscentričnosti v smeri x. Model s 4 sondami je v simulacijah prikazal enake poteke amplitud posameznega harmonika napake, kot so bili posimulirani v smeri x. To je na nek način pričakovano, saj se napaka pri izmiku v smeri x in y po amplitudi nebi smela razlikovati. Enosmerna komponenta je zanemarljiva.

Meritve so pokazale drugačen potek drugega harmonika, ne po obliki naraščanja temveč po velikosti. Senzor ni bil postavljen v pravilno izhodiščno lego, saj je z opremo ki je bila na voljo ni bilo mogoče določiti. Znotraj senzorja, na čipu AM256 je pin Error, s katerim si uporabnik lahko pomaga najti izhodiščno lego. Senzor, tega pina nima na voljo zato je bila izhodiljščna lega iskana na podlagi analognih signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  ter napake. Rezultati meritev

prikazani na sliki 8.2, a z zavedanjem da bi morala biti amplituda drugega harmonika nižja. Potek amplitude prvega harmonika in enosmerne komponente je dokaj konstanten, kar nakazuje na neodvisnost od statične ekscentričnosti.

Pri statični ekscentričnosti so simulacije z dvema sondama podale osnovne trende napake. Simulacije statične ekscentričnosti z realnim poljem so se dobro približale končnim meritvam.



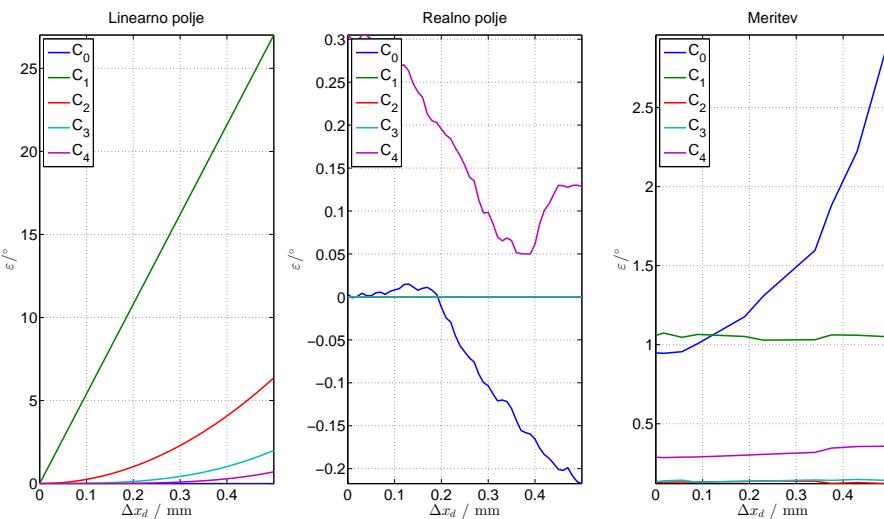
Slika 8.2: Primerjave potekov amplitud harmonikov napake statične ekscentričnosti v smeri y

### 8.3 Dinamična ekscentričnost

Rezultati dinamične ekscentričnosti v smeri x so predstavljeni na sliki 8.3. Dinamična ekscentričnost je vpliva na enosmerno komponento signala, ki ga zajame sonda. V simulacijah z dvema sondama in linearnim poljem je zato v napaki naraščal prvi harmonik napake. V simulacijah s 4 sondami in diferencialnim merjenjem se je enosmerno komponento v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  izničilo. V napaki se je spremenjala enosmerna komponenta. Razlog zato je nova začetna točka.

Enosmerna komponenta se je v meritvah izrazila očitnejše, kar ni bilo pričakovano. Ostali harmoniki so ohranili svojo vrednost.

Simulacije dinamične ekscentričnosti končnih meritev ne opišejo dovolj zadovoljivo.



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, lahko zasuk 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 enosmerno komponento odstrani.

### 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 enosmerno komponento.

### 9.4 Izvedba meritvev

Delovnje senzorja nam je nepoznano (black-box). Senzor vrne izmerjena signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Na napravi izdelani v LRTME na fakulteti, so bile opravljene meritve. Meritve so potrdile pričakovana. 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 ena čip AM256, uporabniku pa so na voljo vsi pini čipa. Čip ima analogni pin 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. Meritve so pokazale, višje amplitude napake, kot so bile posimulirane. Simulacijski model je bil sestavljen iz štirih Hallovih sond, neposredno iz zajetega polja je bil izračunan kot. Tak simulacijski model je v primerjavi z realnim dajalnikom položaja, močno poenostavljen. Veliko stranskih vplivov je bilo zanemarjenih. Podobni senzorji [16], omogočajo popravljanje enosmernih komponent in razmerija 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, amplitudo in faze osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Signala vsebujeta tudi višje harmonike, kateri tu niso bili obravnavani. V prihodnosti se lahko nameni pozornost tudi višjim harmonikom.



## Literatura

- [1] J. Gachter, M. Hirz in R. Seebacher, Impact of rotor position sensor errors on speed controlled permanent magnetized synchronous machines v *IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, str. pp.822–830, Dec. 2017.
- [2] B. Killer, Absolutni magnetni dajalnik z uporabo principa nonij, diplomsko delo, Univerza v Ljubljani, 2008.
- [3] Z. Zhang, F. Ni, H. Liu in M. Jin, Theory analysis of a new absolute position sensor based on electromagnetism v *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence*, str. pp.2204–208.
- [4] M. Demierre, Improvements of CMOS Hall microsystems and application for absolute angular position measurements, doktorska dizertacija, Federal Polytechnic School of Lausanne, Switzerland, 2003.
- [5] RLS Merilna tehnika d.o.o., RM44 magnetic encoder base unit, Dose-gljivo: [https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FRM44D01\\_10.pdf](https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FRM44D01_10.pdf).
- [6] V. Ambrožič in P. Zajec, *Električni servo pogoni*, Slovensko Združenje elektroenergetikov CIGRÉ-CIRED.
- [7] RLS Merilna tehnika d.o.o., AM256 – angular magnetic encoder, IC, Dose-gljivo: [https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FAM256D01\\_13\\_bookmark.pdf](https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FAM256D01_13_bookmark.pdf).

- [8] iC Haus, High-precision sine/cosine interpolation-White paper, Dosegljivo: [http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP7en\\_High-Precision\\_Interpolation\\_140124.pdf](http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP7en_High-Precision_Interpolation_140124.pdf).
- [9] MathWorks, Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2d.html>.
- [10] G. Dolinar, *Matematika 1*, Založba FE in FRI.
- [11] MathWorks. Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2d.html>.
- [12] J. Lara, Position error compensation in quadrature analog magnetic encoders through an iterative optimization algorithm v *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- [13] Q. Lin, T. Li in Z. Zhou, Error analysis and compensation of the orthogonal magnetic encoder v *IEEE ICMCC Conference*.
- [14] D. Hanselman, Resolver signal requirements for high accuracy resolver-to-digital conversion, *37*.
- [15] MathWorks. Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/products/curvefitting.html>.
- [16] iCHaus, 14-bit absolute angle Hall encoder. Dosegljivo: [http://www.ichaus.de/upload/pdf/MHM\\_datasheet\\_D2en.pdf](http://www.ichaus.de/upload/pdf/MHM_datasheet_D2en.pdf).