

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za elektrotehniko

Mitja Alič

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

Magistrsko delo

Mentor: doc. dr. Mitja Nemec

Ljubljana, 2018



## Zahvala

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



# Vsebina

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Senzor RM44</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Izpeljava gibanja sonde relativno na magnet ob nepravilni montaži</b>	<b>15</b>
3.1	Definicija koordinatnega sistema . . . . .	15
3.2	Izpeljava gibanja lokacije Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti . . . . .	17
3.3	Izpeljava gibanja lokacije Hall-ove sonde na magnet pri statični ekscentričnosti . . . . .	18
3.4	Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov</b>	<b>21</b>
4.1	Različne amplitude . . . . .	21
4.2	Različne enosmerne komponente . . . . .	24
4.2.1	Enosmerna komponenta v signalu $B_{sin}$ . . . . .	24
4.2.2	Enosmerna komponenta signala $B_{cos}$ . . . . .	25
4.2.3	Enosmerna komponenta pri obeh signalih . . . . .	27
4.3	Neorotogonalnost signalov . . . . .	28

4.4	Napaka zaradi spremembe amplitude in faze zaradi enega parametra	31
<b>5</b>	<b>Linearni model</b>	<b>33</b>
5.1	Brez ekscentričnosti . . . . .	34
5.2	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi . . . . .	35
5.2.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x . . . . .	37
5.3	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi . . . . .	41
5.3.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y . . . . .	43
5.4	Dinamična ekscentričnost v smeri x-osi . . . . .	46
5.4.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x . . . . .	48
5.5	Dinamična ekscentričnost v smeri y in sprememba razdalje Hallo- vih sond od magneta . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Realni model magnetnega polja</b>	<b>53</b>
6.1	Brez napake . . . . .	54
6.2	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi . . . . .	55
6.2.1	Sprememba $B_{sin}$ , $B_{cos}$ ter napake od $\Delta x_s$ . . . . .	58
6.3	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi . . . . .	61
6.3.1	Sprememba $B_{sin}$ , $B_{cos}$ ter napake od $\Delta y_s$ . . . . .	63
6.4	Dinamična ekscentričnost v smeri x . . . . .	65
6.4.1	Sprememba $B_{sin}$ , $B_{cos}$ ter napake od $\Delta x_d$ . . . . .	68
6.5	Dinamična ekscentričnost v smeri y . . . . .	70
6.5.1	Sprememba $B_{sin}$ , $B_{cos}$ ter napake od $\Delta y_d$ . . . . .	72

## Seznam simbolov

V zaključnem delu so uporabljeni naslednje veličine in simboli:

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

Tabela 1: Veličine in simboli





## Povzetek

V magistrski nalogi je predstavljen vpliv napačno merjene Z-komponente gostote magnetnega pretoka magnetnega enkoderja, zaradi nepravilne montaže enkoderja ali magnetnega aktuatorja. Predstavljen je simulacijski model enkoderja, ter vpliv nepravilne montaže na spreminjanje lokacije Hallove sonde relativno na magnet. Opisan je vpliv nepravilnih vhodnih signalov na napako izhoda funkcije  $\text{atan2}()$ . Simulacije so primerjane z meritvami na enkoderju RM44. Opravljene so bile simulacije na linearno aproksimirani Z-komponenti gostote magnetnega pretoka, ter na numerično izračunani Z-komponenti gostote magnetnega pretoka simuliranega realnega magneta. Tehnologija in princip senzorja RM44 je poslovna skrivnost, zato je bil postavljen lasten simulacijski model enkoderja, s pričakovanji, da bo rezultat slabši od končnih meritev.

**Ključne besede:** dajalnik položaja, Hallova sonda, napačna montaža, predvidevanje napake,  $\text{arcustangens}$



# Abstract

The thesis addresses ...

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



# 1 Uvod

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

Trenutni položaj merijo dajalniki pomika ali zasuka[1]. Pri rotacijskih dajalnikih ločimo dajalnike, ki merijo zasuk na koncu osi (angl.: on axis) in dajalnike, ki merijo zasuk na osi (angl.: through hole). Možna delitev rotacijskih dajalnikov je tudi na eno-obratne (angl.: single-turn) in več-obratne (angl.: multi-turn). Eno-obratni rotacijski dajalniki podajo položaj znotraj enega obrata, medtem ko več-obratni štejejo tudi število polnih obratov. Dajalnike položaja delimo tudi glede na uporabljeni princip zaznavanja fizikalne spremembe. Poznamo magnetne, optične, induktivne in druge[2].

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

Kot vsak merilni 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 pogon. 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 čimbolj preprost model, ki bo dovolj točno opisal dogajanje ob prisotnosti napake in to prekontrolirati.

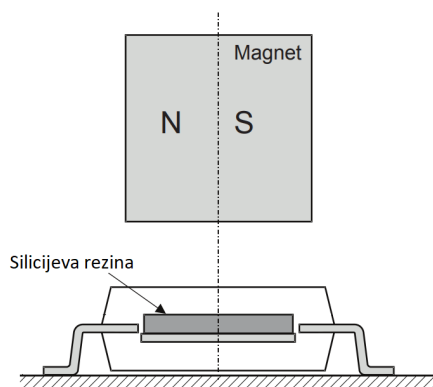
## 2 Senzor RM44

Senzor RM44 je 13 bitni enkoder, primeren za merjenje zasuka rotirajočega pogona[5]. Enkoder se nahaja v robustem ohišju, zato je primeren za delovanje v težkem industrijskem okolju. Oblika izhodnega podatka o zasuku, je prilagodljiva na sistem aplikacije v kateri bo uporabljen[6]. Izhod senzorja je lahko analogni v obliki sinusnega in kosinusnega signala ali linearno spreminjajče se napetosti med potencialoma GND in VDD v odvisnosti od kota zasuka. Izhod je lahko tudi v obliki inkrementalnih signalov A in B s katerih se lahko določi smer in relativni zasuk vrtenja ter signal Ri kateri določa referenčno točko. Izhod je možen tudi preko SSI vodila. Senzor ima možnost nastavljanja resolucije od 5 do 13 bitov na obrat [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.

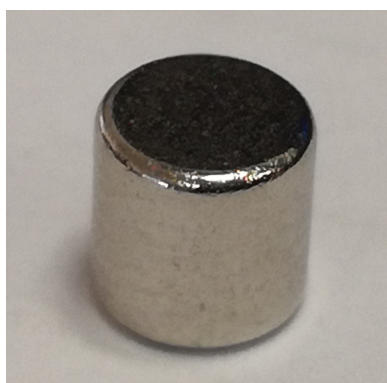


Slika 2.1: Senzor RM44

Ključni element senzorja je čip AM256. Za odčitavnaje zasuka, se mora nahajati nad radialno polariziranim cilindričnim magnetom, ki je pritrjen na os vrtenja (slika 2.2). S strani proizvajalca senzorja je priporočen radialno polariziran magnet s premerom 4 mm in višino 4 mm (slika 2.3).



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

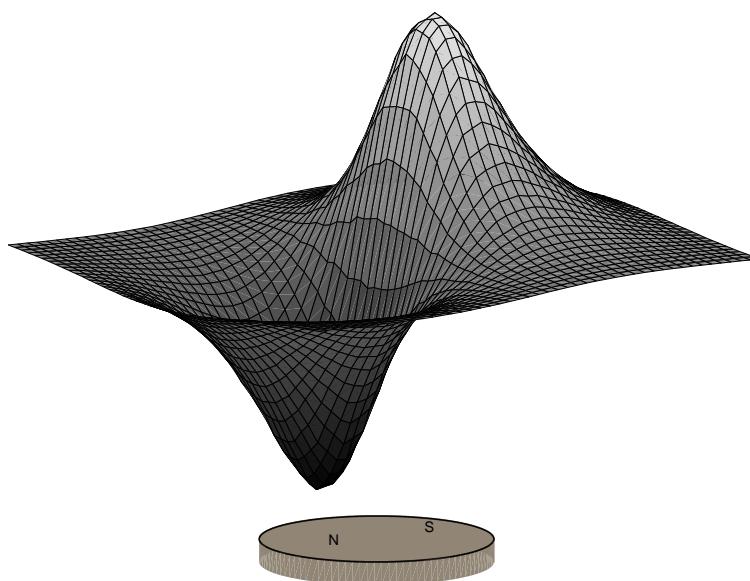


Slika 2.3: Primer magneta predlagan s strani proizvajalca RLS

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



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

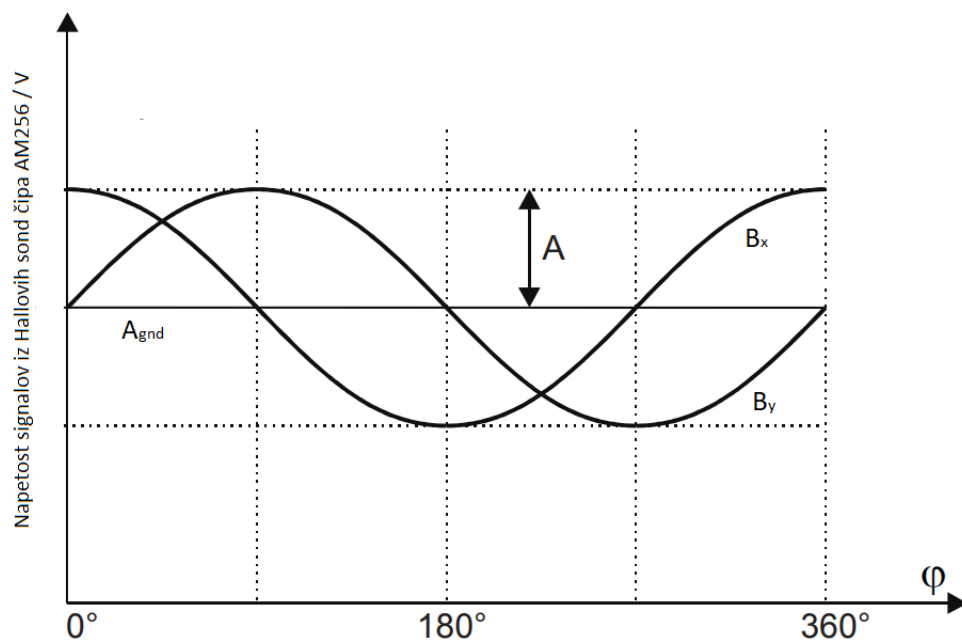


Slika 2.4: Oblika Z komponente gostote magnetnega pretoka nad magnetom

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

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

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

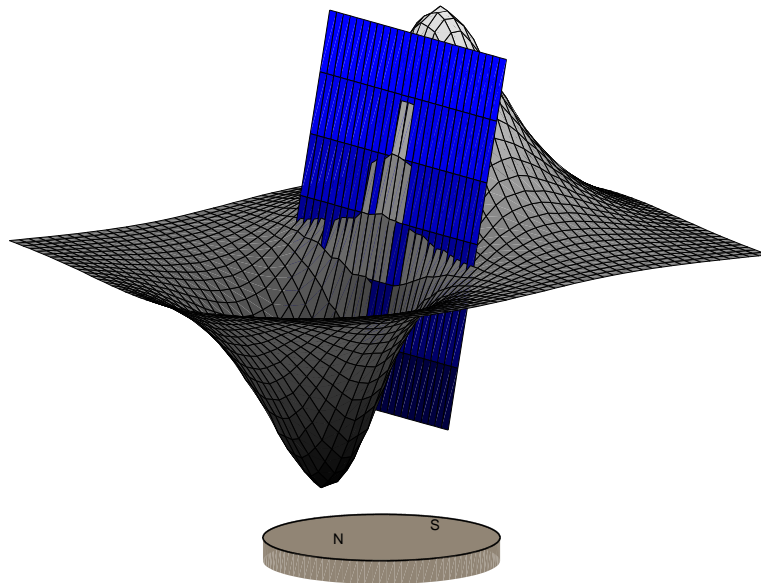


Slika 2.5: Analogna signala zajeta s Hallovimi sondami [7]

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, z dvema Halloviima sondama. Sondi sta postavljeni na krožnico s središčem v osi vrtenja magneta in radijem  $r_0$ .

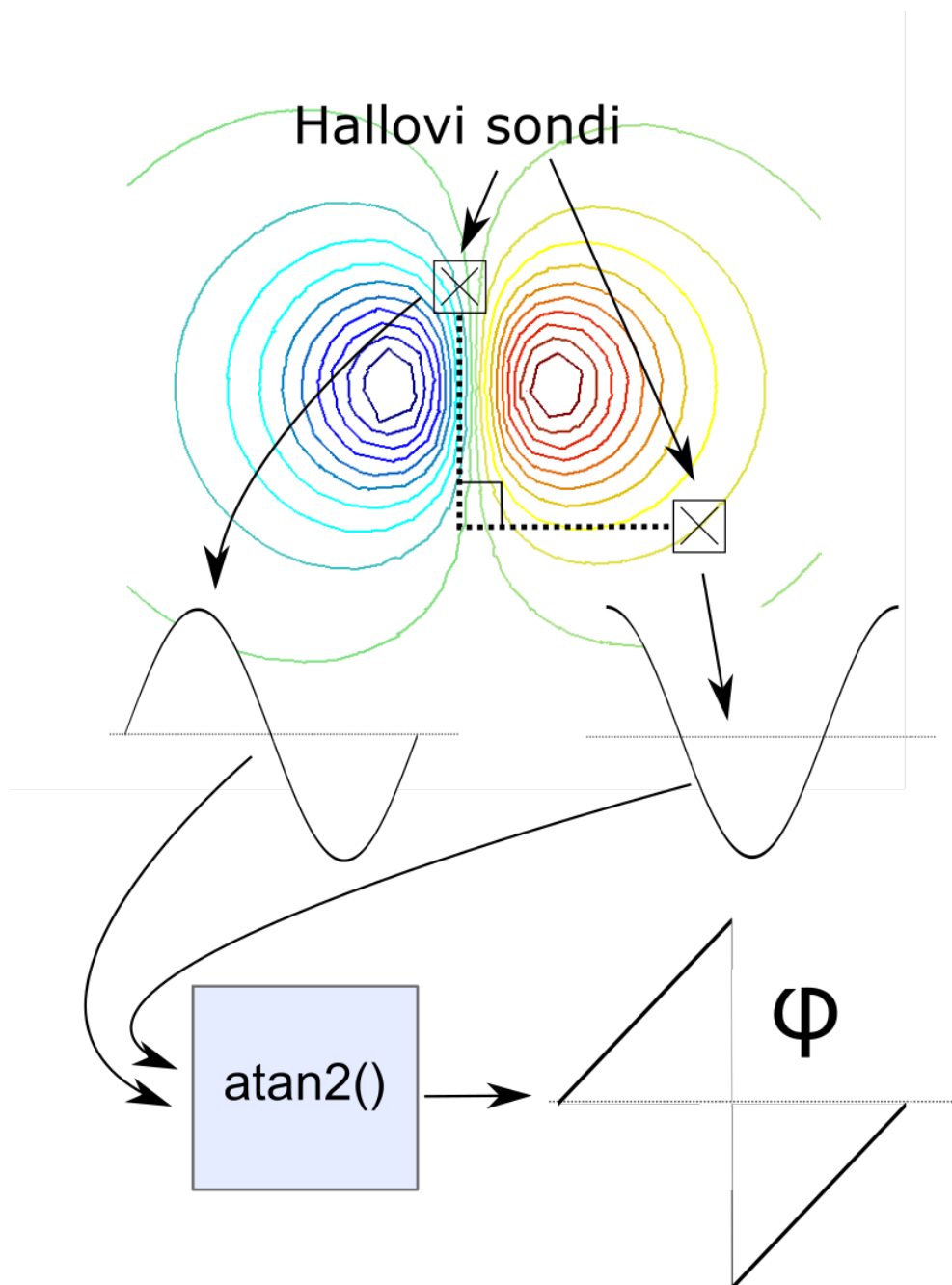
Sondi sta prostorsko zamaknjeni za  $90^\circ$  (slika 2.7). S sondama se zajame signala  $B_{cos}$  in  $B_{sin}$ . Signala sta vhodna parametra v funkcijo  $\text{atan2}()$ , ki izračuna kot zasuka (slika 2.7). Za oceno napake, se lahko Z komponento gostote magnetnega pretoka v okolici središča magneta, aproksimira z ravnino (slika 2.6).



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

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

Aproksimacija zadostuje za oceno napake. S poznavanjem lokacije sonde glede na magnet, se lahko izračuna merjena komponenta magnetnega polja. Aproximirano polje je linearno odvisno od x komponente (2.1). Za lažje razumevanje bo  $k$  enak  $1 \frac{\text{mT}}{\text{mm}}$ .



Slika 2.7: Osnovni model, za izračun kot zasuka



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

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

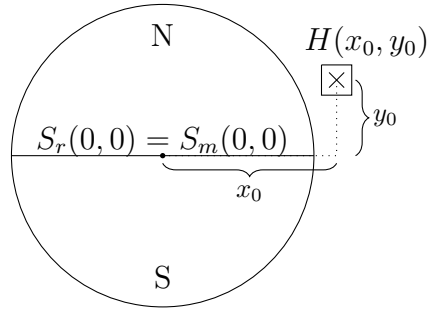
Izmik sredine senzorja iz osi vrtenja bo med spreminjanjem dejanskega kota zasuka statičen, njegova lokacija se ne bo spreminjala na os vrtenja. Ta izmik je poimenovan statična ekscentričnost.

Ob izmiku magneta iz osi vrtenja se pojavi opletanje magneta. Lokacija središča magneta se spreminja glede na določen zasuk magneta. Opletanje magneta je poimenovano dinamična ekscentričnost.

#### 3.1 Definicija koordinatnega sistema

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

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



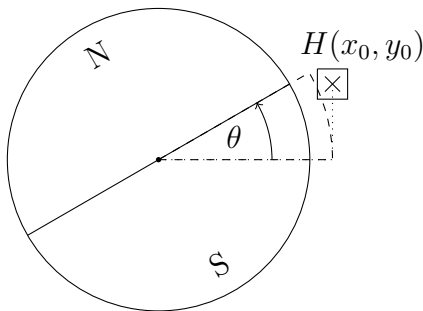
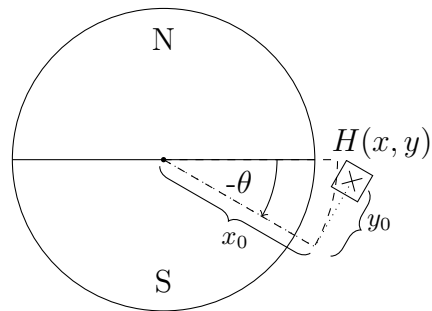
Slika 3.1: Definicija koordinatnega sistema z magnetom in Hall-ovo sondo

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:

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

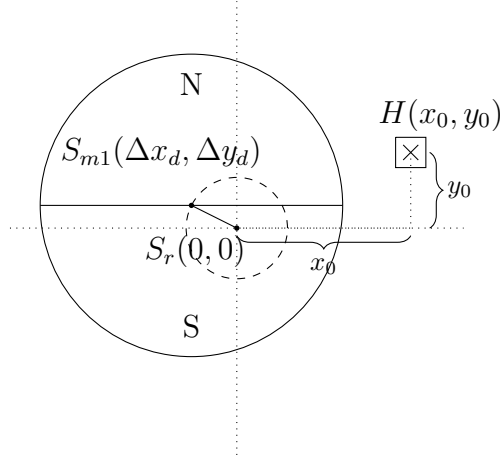
(a) Zasukan magnet za kot  $\theta$ (b) Zasukan senzor za kot  $-\theta$ 

Slika 3.2: Sprememba položaja glede na magnet ob rotaciji



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

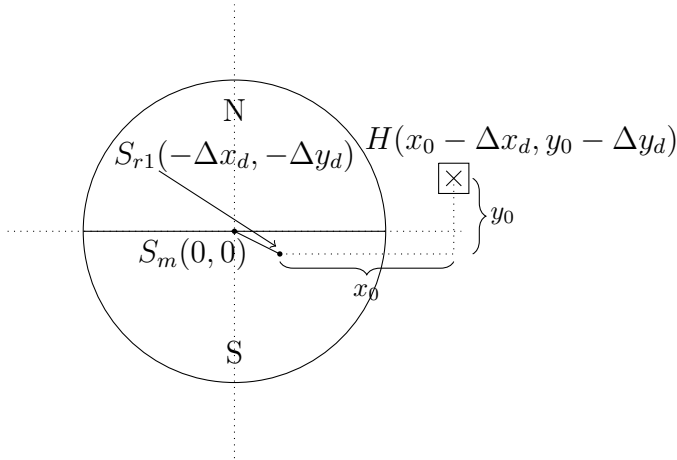
Magnet je postavljen v izhodišče koordinatnega sistema  $S_m(0,0)$ , kjer je tudi os vrtenja  $S_r(0,0)$ . Dinamična ekscentričnost povzroči premik središča magneta v točko  $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$  (Slika 3.3). Os vrtenja je ostaja v izhodišču koordinatnega sistema. Središče magneta  $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$  ob rotaciji opiše 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 vrtenja 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)

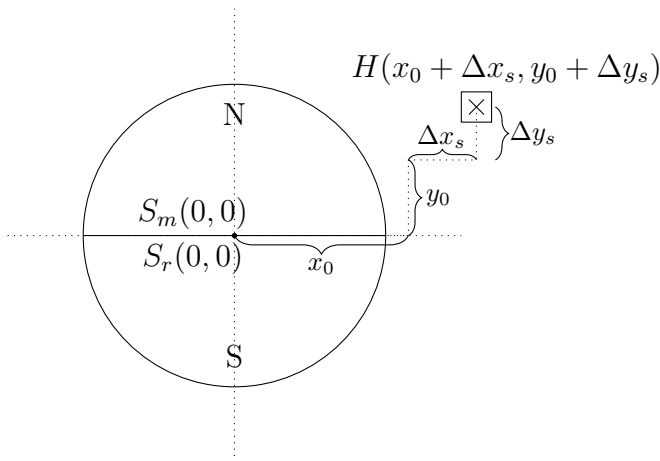
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (3.3)$$



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 sondo in osjo vrtenja konstantna. Z miselnim obratom vrtenja sonde v nasprotni smeri se gibanje sonde izrazi kot gibanje po krožnici z novim radijem  $\sqrt{(x_0 + \Delta x_s)^2 + (y_0 + \Delta y_s)^2}$  (3.4). Novo lokacijo sonde glede na magnet opiše (3.4). Ob povzročni statični



Slika 3.5: Definicije statične ekscentričnosti

ekscentričnosti se sonda giblje po drugem radiju.

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

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

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

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



## 4 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov

Izhod enkoderja je podatek o zasuku. Iz pomerjene gostote magnetnega pretoka, sledi izračun kota preko inverza funkcije tangens. Funkcija se v MATLAB-u imenuje atan2();. Funkcija atan2(); vrne rezultat v radianih, funkcija atan2d(); vrne rezultat v stopinjah[9][11].

Različne literature [4] [12] [13] [14] opisujejo napake zaradi popačitve signalov  $B_{sin}$   $B_{cos}$ . Napaka je izražena v obliki enosmerne komponente ter prvega oz. drugega harmonika, kateri od primera do primera bolj izstopa. V nadaljevanju je prikazano, kako popačena signala kot vhoda v funkcijo atan2d(); vplivata na napako, ter kako se napaka odraža tudi na višjih harmonikih. Za majhna popačenja vhodnih signalov, literatura nakazuje linearno naraščanje napake.

### 4.1 Različne amplitude

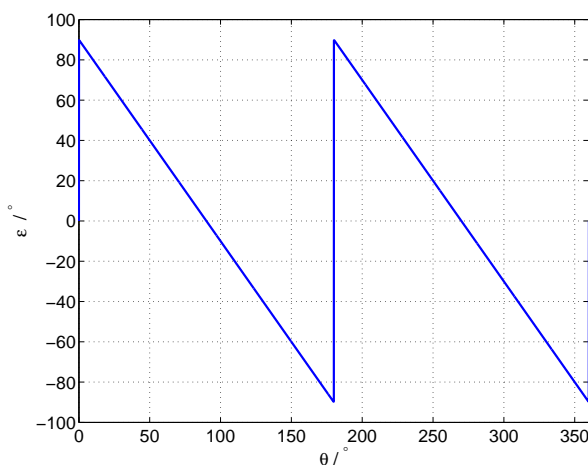
Prvi primer popačenih vhodov v funkcijo atan2d(); je neenakost amplitud vhodnih signalov. Signala imata poljubne amplitude, vendar se izhod funkcije atan2d(); nebo spremenil, če se obe amplitudi deli s poljubnim številom. Če se za poljubno število vzame amplitudo signala  $B_{cos}$ , imata signala novo 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  $\text{atan2d}()$ ; in parameter  $k$  je limitiran v neskončnost. Izhod  $\text{atan2d}()$ ; 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

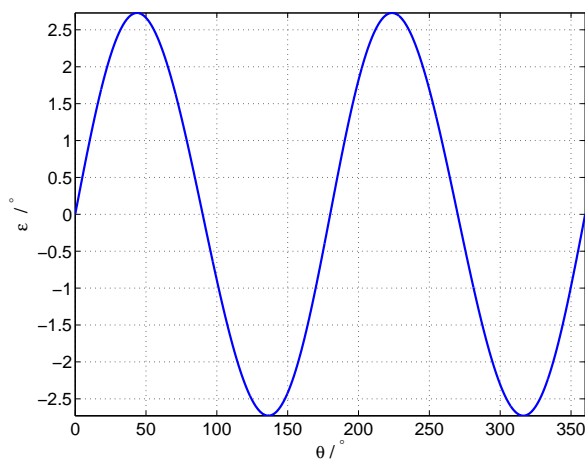
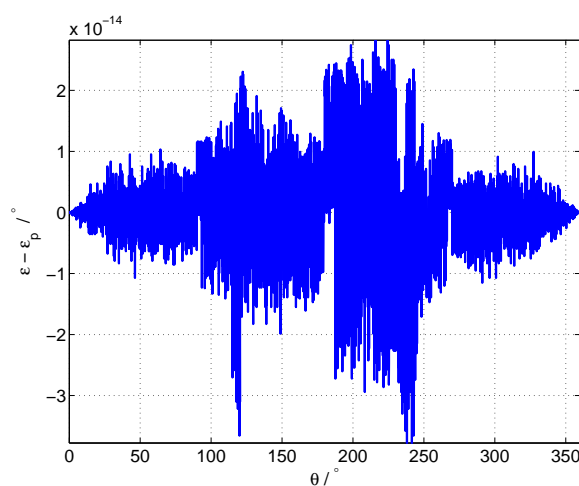
Potek  $\varepsilon$  se lahko zapiše s Fourierovo vrsto [10]:

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

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  $k$ .

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

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

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

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

## 4.2 Različne enosmerne komponente

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

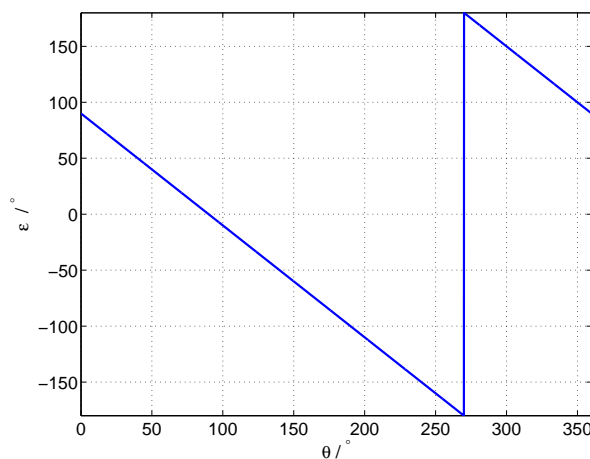
$$B_{sin} = \sin(\theta) + B_0 \quad (4.6)$$

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

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

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

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



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

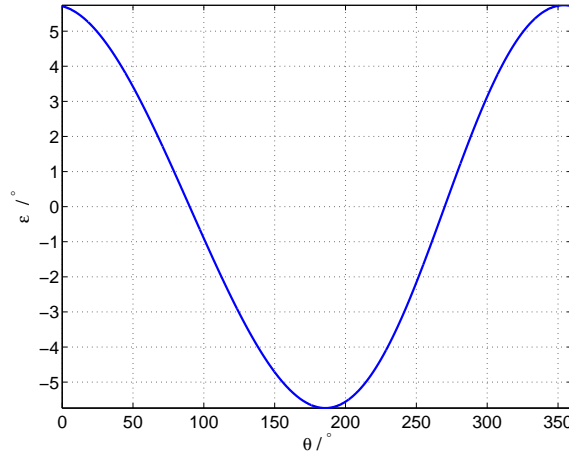
$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta + 90n) \quad (4.8)$$

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



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

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



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

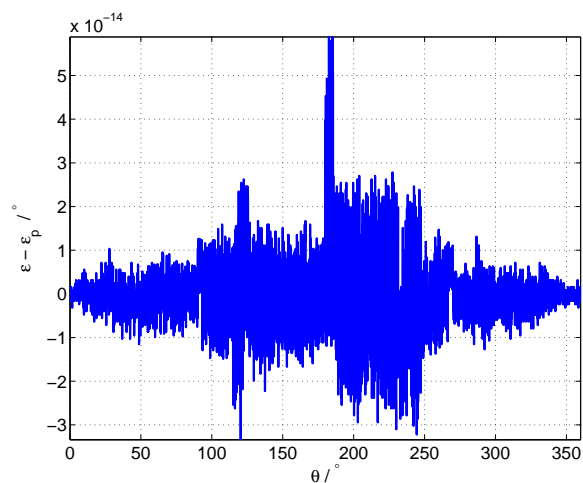
#### 4.2.2 Enosmerna komponenta signala $B_{cos}$

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

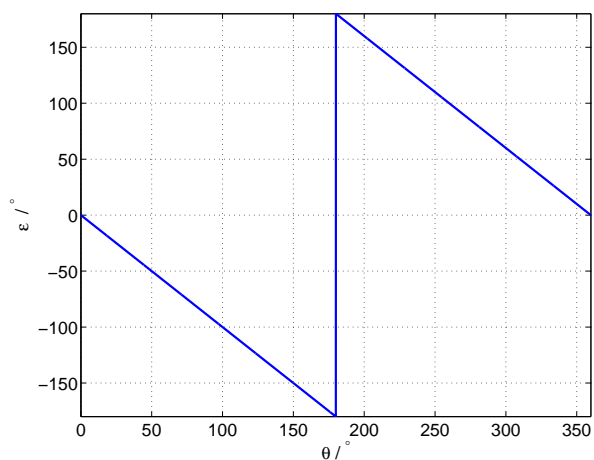
$$\lim_{a_0 \rightarrow \infty} \text{atan2}(\sin \theta, \cos \theta + A_0) \quad (4.10)$$

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

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



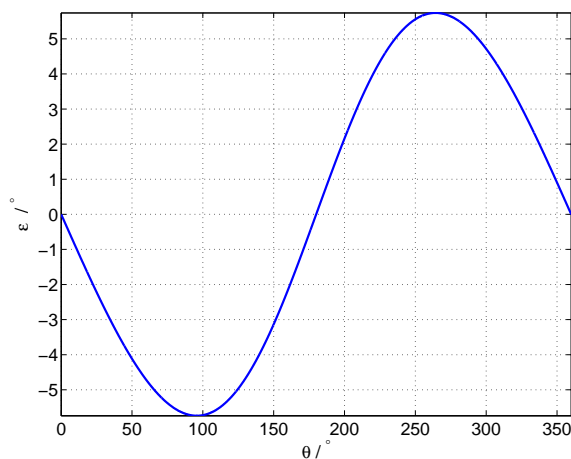
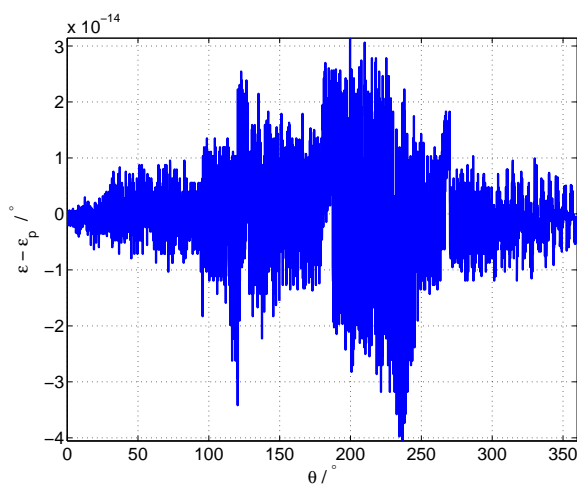
Slika 4.6: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (4.9) pri  $B_0 = 0,1$  in uporabi prvih 20 členov vrste (4.9)



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

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

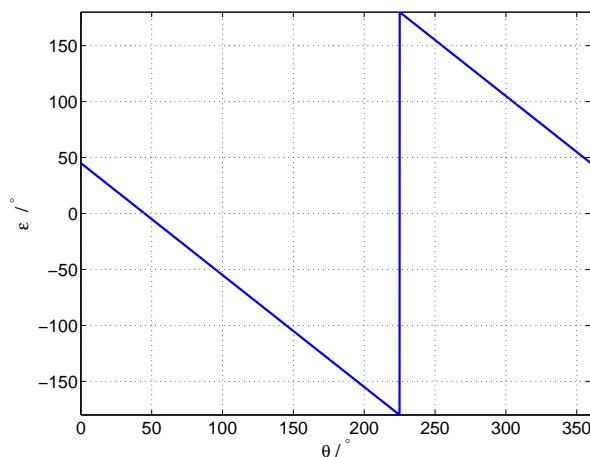
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-|A_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{A_0^n}{n} \sin(n\theta), & |A_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-A_0^{-n}}{n} \sin(n\theta),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

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

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

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



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

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

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

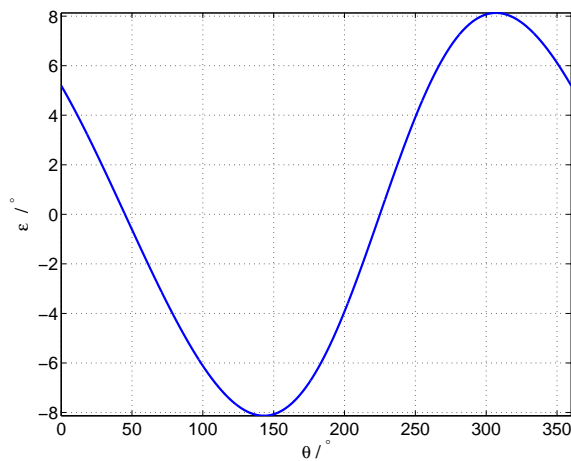
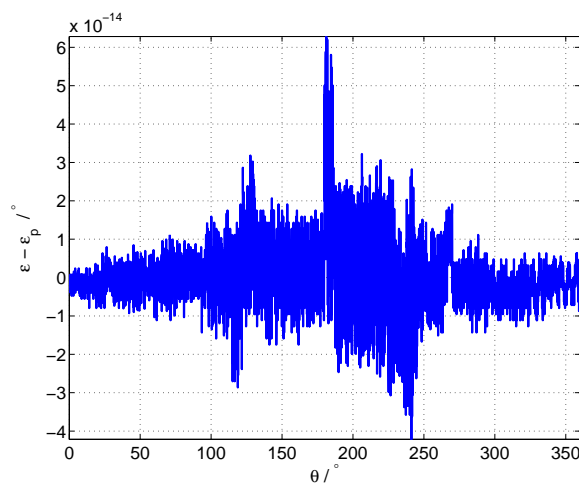
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-|\sqrt{2}C_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & C_0 \leq -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sqrt{2}C_0)^n}{n} \sin(n\theta - 90n), & |C_0| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty}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

### 4.3 Neorotogonalnost signalov

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

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

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

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

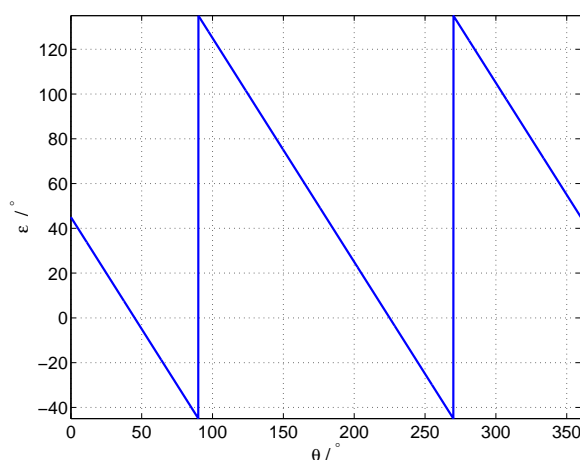
Napako se določi za vsakega od parametrov posamično. Drugi je takrat enak 0. Na koncu se enačbi združi.

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

možnosti, ki je pri  $\pm 90^\circ$ :

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Pri čemer velja:

$$\Delta_c > -C_1$$

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

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

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

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

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

Pri čemer velja:

$$\Delta_s > -C_1$$

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

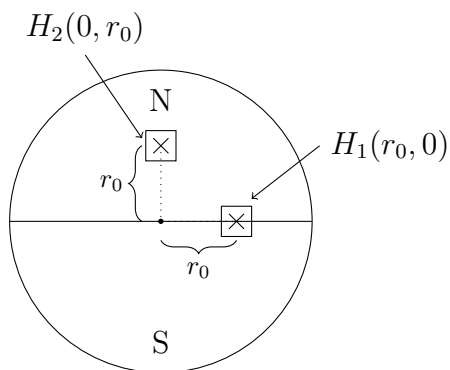


## 5 Linearni model

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

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

Simulacijski model sestavljati dve Hallovi sondi postavljeni na krožnico z radijem  $r_0$  in sta prostorsko zamaknjeni za  $90^\circ$  (slika 5.1). Lokacija predstavlja začetno lego Hallovih sond. Ob zasuku magneta, se sonde relativno gibljejo na magnet v nasprotni smeri kot se vrtil magnet.



Slika 5.1: Shema simulacijskega modela

Z upoštevanjem vplivov ekscentričnosti iz izraza (3.5) in enačbe za izračun Z- komponente gostote magnetnega pretoka (5.1) se izrazi potek, ki ga pome- riti sondi ob vrtenju. Sonda  $H_1$  brez upoštevanja ekscentričnosti zajame signal ko- sinusne oblike, zato je signal v nadaljevanju poimenovan  $B_{cos}$ . Sonda  $H_2$  brez

upoštevanja ekscentričnosti zajame signal sinusne oblike, zato je signal v nadaljevanju poimenovan  $B_{sin}$ .

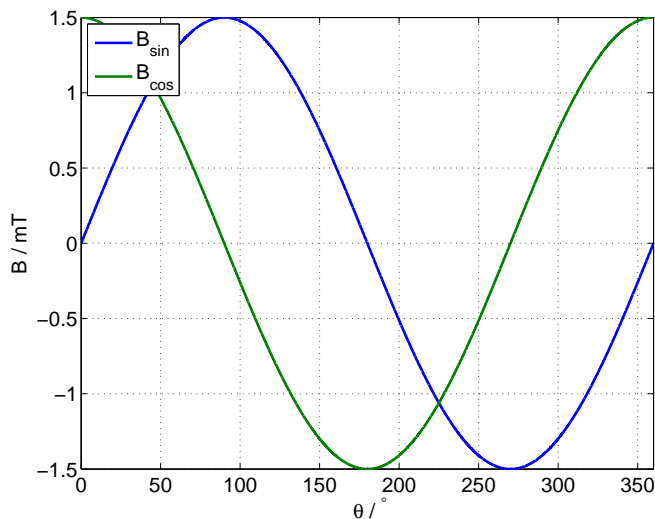
$$B_{H_1} = B_{cos} = r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d \quad (5.2)$$

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

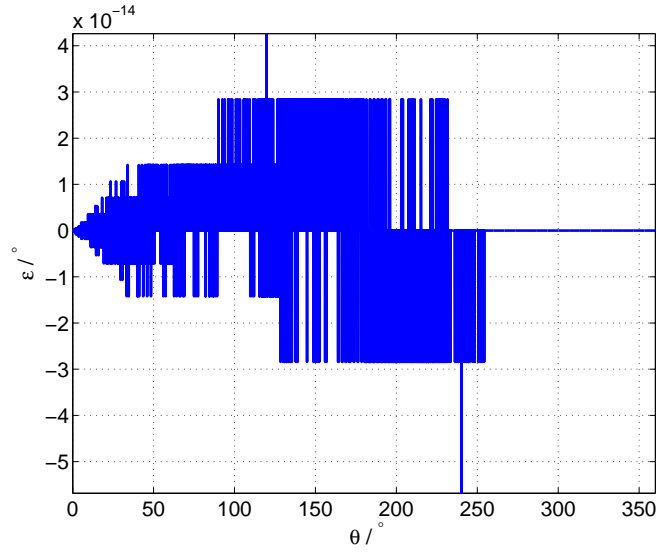
Prikazan je potek napake pri različnih izmikih, ter potek amplitud posameznih haarmonikov napake v odvisnosti od ekscentričnosti. Hall-ovi sonde sta postavljeni na krožnico z radijem 1,5 mm [7].

## 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  $\text{atan2d}()$ ; (Slika 5.3). Numerična napaka je proti pričakovani napaki zaradi ekscentričnosti zanemarljiva.



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



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

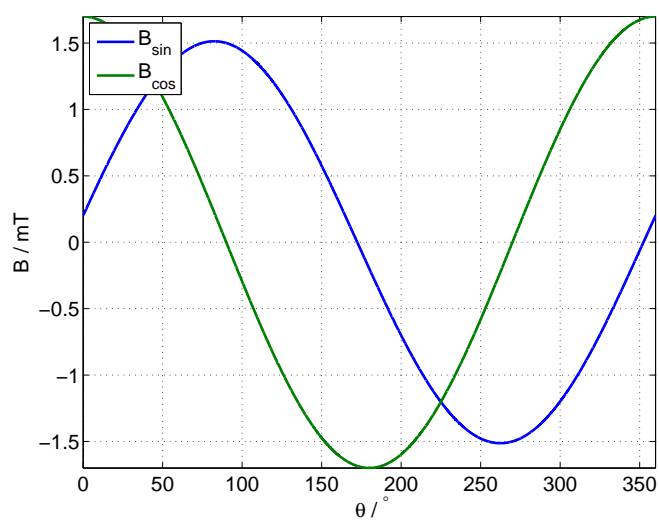
## 5.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

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

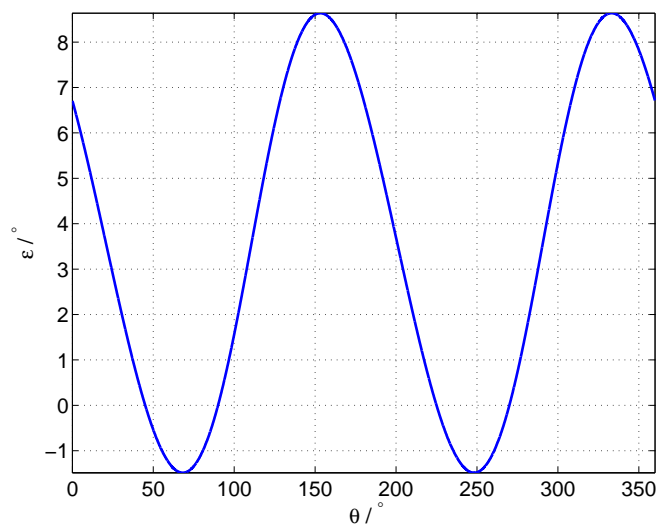
$$B_{sin} = \sqrt{(r_0 + \Delta y_s)^2 + \Delta x_s^2} \sin(\theta + \text{atan} \frac{\Delta x_s}{\Delta y_s + r_0}) - \Delta x_d \quad (5.4)$$

$$B_{cos} = \sqrt{(r_0 + \Delta x_s)^2 + \Delta y_s^2} \cos(\theta - \text{atan} \frac{\Delta y_s}{\Delta x_s + r_0}) - \Delta x_d. \quad (5.5)$$

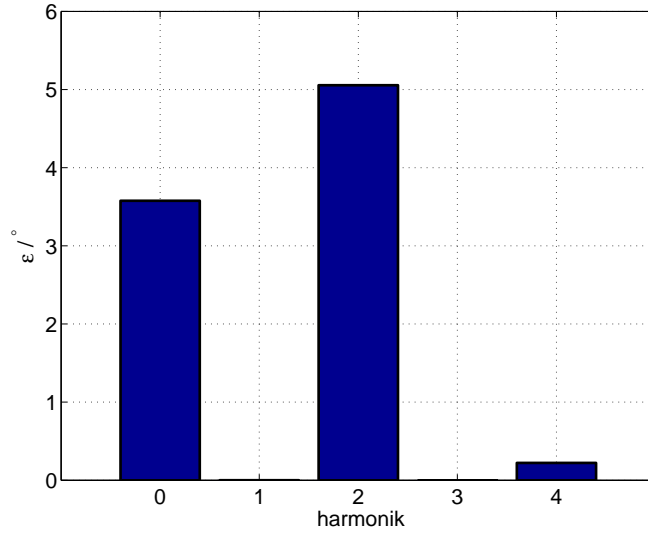
Ob upoštevanju le statične ekscentričnosti v smeri x se iz (5.4) razbere linearna sprememba amplitude signala  $B_{cos}$ . Signalu  $B_{sin}$  se poveča amplituda, vendar je sprememba manjša kot pri signalu  $B_{cos}$ . Signalu  $B_{sin}$  se spremeni tudi faza. Potek signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$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



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



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



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

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

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

$$B_{sin} \simeq A_{sin} \sin(\theta + \delta_{sin}) + Off_{sin} \quad (5.6)$$

$$B_{cos} \simeq A_{cos} \cos(\theta + \delta_{cos}) + Off_{cos}. \quad (5.7)$$

Na slikah je predstavljen potek posameznega parametra od spreminjajoče ekscentričnosti.

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

$$\varepsilon(\Delta x_s) \simeq C_0 + C_1 \sin(\theta + \delta_1) + C_2 \sin(2\theta + \delta_2) + C_3 \sin(3\theta + \delta_3) + C_4 \sin(4\theta + \delta_4). \quad (5.8)$$

Na spodnjih slikah so predstavljeni tudi poteki amplitud posameznega harmonika napake v odvisnosti od ekscentričnosti.

Na sliki 5.7 je prikazana sprememba amplitude prvega harmonika signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Razvidno iz (5.5) (5.4) linearno narašča amplituda  $B_{cos}$ . Slika 5.8 prikazuje enosmerni komponenti, ki od statične ekscentričnosti nista odvisni. Slika 5.9 prikazuje fazni zamik signalov glede na njuno idealno poravnavo. Po (5.4) je pričakovano spreminjanje faze  $B_{sin}$ .

Spreminjanje amplitude prvega harmonika, enosmerne komponente in faznega zamika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  je opisano z (5.4) in (5.5). Tu so poteki razviti v Taylorjevo vrsto do tretje stopnje.

$$A_{sin}(\Delta x_s) = -3,38 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 + 3,44 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 - 1,09 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 1,50 \quad (5.9)$$

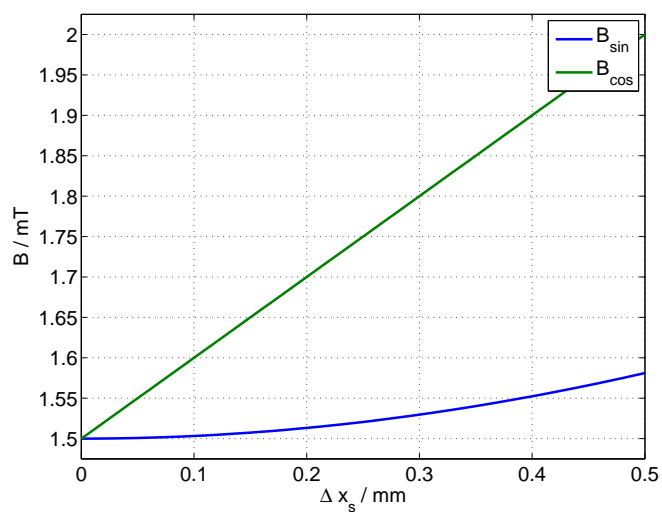
$$Off_{sin}(\Delta x_s) = 0 \quad (5.10)$$

$$\delta_{sin}(\Delta x_s) = -4,71 \Delta x_s^3 - 3,96 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 3,82 \cdot 10 \Delta x_s - 1,15 \cdot 10^{-3} \quad (5.11)$$

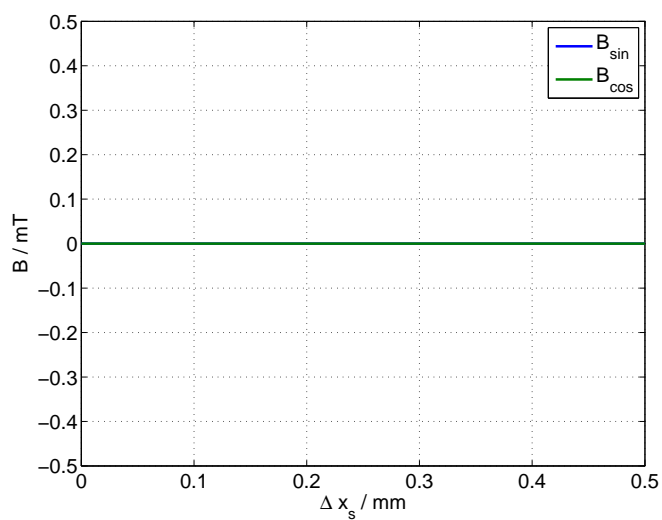
$$A_{cos}(\Delta x_s) = \Delta x_s + 1,5 \quad (5.12)$$

$$Off_{cos}(\Delta x_s) = 0 \quad (5.13)$$

$$\delta_{cos}(\Delta x_s) = 0 \quad (5.14)$$

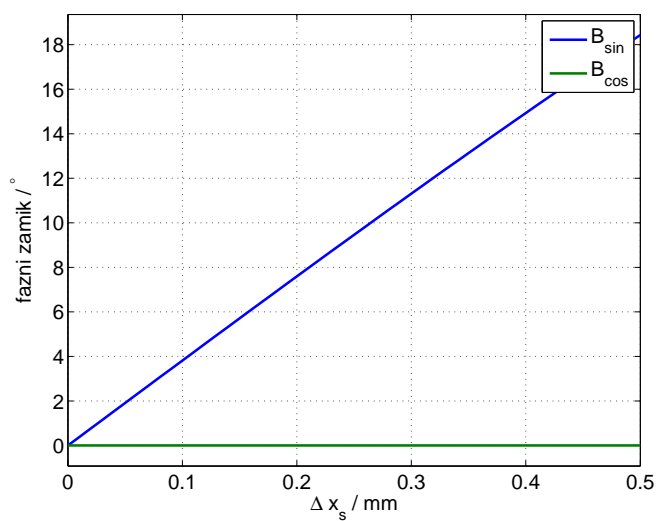


Slika 5.7: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

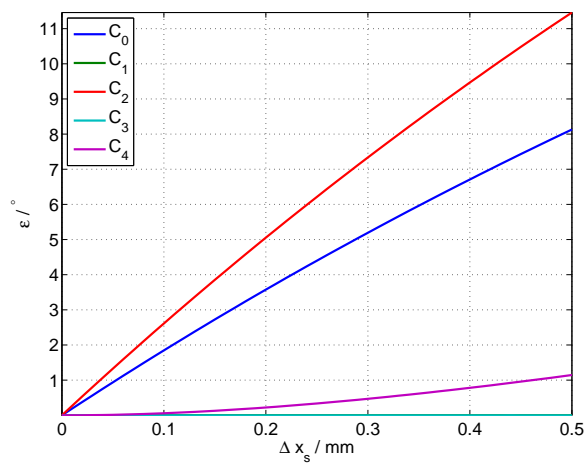


Slika 5.8: Enosmerna komponenta  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

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



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



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



$$C_0(\Delta x_s) = 1,32\Delta x_s^3 - 6,33\Delta x_s^2 + 1,91 \cdot 10\Delta x_s + 1,09 \cdot 10^{-4} \quad (5.15)$$

$$C_1(\Delta x_s) = 6,18 \cdot 10^{-14}\Delta x_s^3 - 4,97 \cdot 10^{-14}\Delta x_s^2 + 1,03 \cdot 10^{-14}\Delta x_s + 5,64 \cdot 10^{-16} \quad (5.16)$$

$$C_2(\Delta x_s) = 1,71\Delta x_s^3 - 9,04\Delta x_s^2 + 2,70 \cdot 10\Delta x_s - 5,20 \cdot 10^{-5} \quad (5.17)$$

$$C_3(\Delta x_s) = -2,07 \cdot 10^{-14}\Delta x_s^3 + 2,00 \cdot 10^{-14}\Delta x_s^2 - 3,76 \cdot 10^{-15}\Delta x_s + 4,81 \cdot 10^{-18} \quad (5.18)$$

$$C_4(\Delta x_s) = -2,92\Delta x_s^3 + 5,96\Delta x_s^2 + 4,36 \cdot 10^{-2}\Delta x_s - 9,80 \cdot 10^{-4} \quad (5.19)$$

$$(5.20)$$

Za primerjavo, so dodane tudi enačbe potekov amplitud posameznega harmonika razvitega v Taylorjevo vrsto v okolici 0, katere sledijo iz (4.22):

$$C_0(\Delta x_s) = 1,41\Delta x_s^3 - 6,37\Delta x_s^2 + 19,10\Delta x_s \quad (5.21)$$

$$C_1(\Delta x_s) = 0 \quad (5.22)$$

$$C_2(\Delta x_s) = 1,50\Delta x_s^3 - 9,00\Delta x_s^2 + 27,01\Delta x_s \quad (5.23)$$

$$C_3(\Delta x_s) = 0 \quad (5.24)$$

$$C_4(\Delta x_s) = -4,24\Delta x_s^3 + 6,37\Delta x_s^2 \quad (5.25)$$

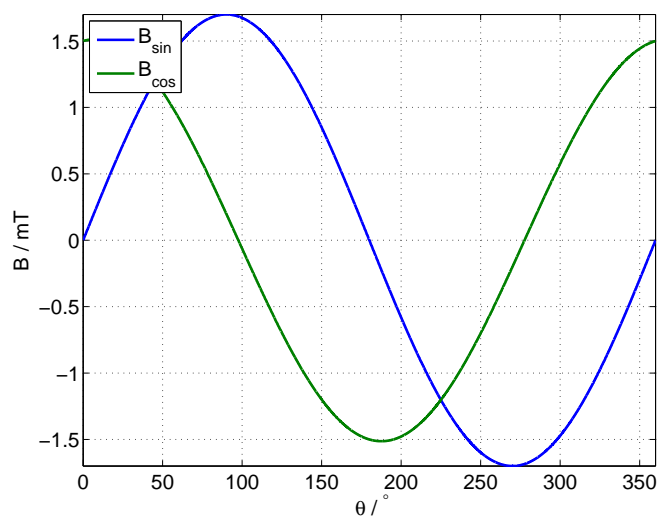
Rezultati so pričakovani. Četrty harmonik se po poteku nekoliko razlikuje. To je posledica razvite vrste okoli izhodišča. Z razvojem četrtega harmonika okoli točke 0,25mm (5.26), je iz izraza še bolj razvidno prilagajanje harmonika.

$$C_4(\Delta x_s) = -2,90\Delta x_s^3 + 5,88\Delta x_s^2 + 0,08\Delta x_s - 4,98 \cdot 10^{-3} \quad (5.26)$$

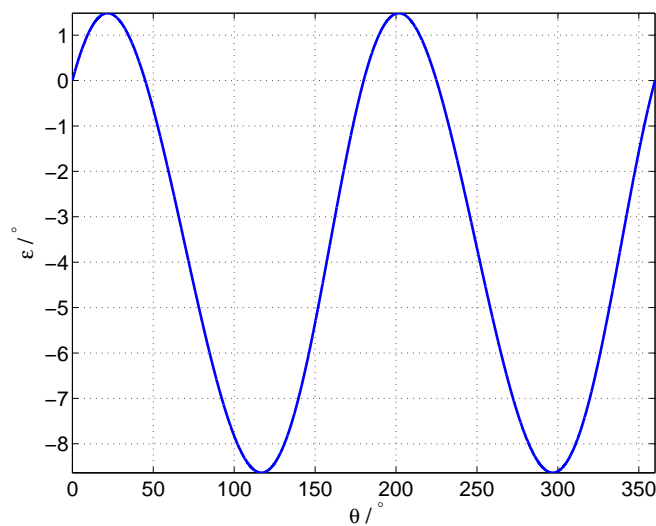
### 5.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

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

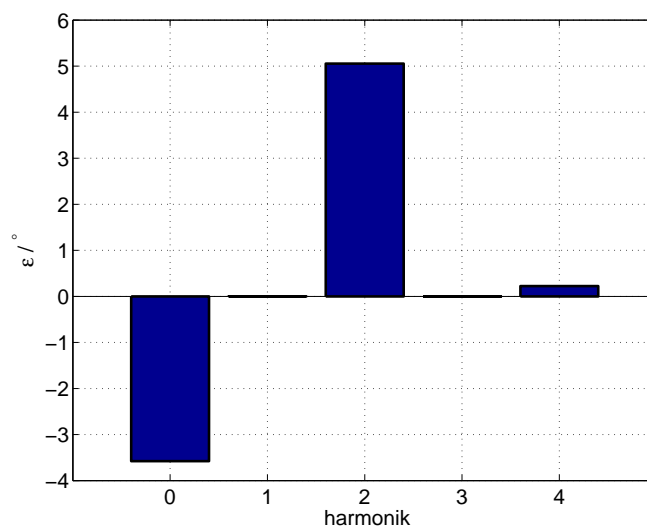
Napaka je prikazana na sliki 5.12. Sestavlja jo negativna enosmerna komponenta in izrazit drugi harmonik. Iz napake razvite v vrsto (5.13) je vidna enaka amplituda drugega harmonika, kot pri ekscentričnosti v smeri x. Enosmerna komponenta se razlikuje v predznaku.



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



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



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

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

Potek hitrejšega spreminjanja amplitude  $B_{sin}$  je pričakovan. Enosmerna komponenta signalov se prav tako ni spremenila. Fazni zamik signala  $B_{cos}$  se je zmanjševal, posledično tudi fazna razlika med signaloma. Poteki so opisani s kubičnimi polinomi. Na sliki 5.17 so prikazani 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, raz-

likuje se le enosmerna komponenta z nasprotnim predznakom.

$$A_{sin}(\Delta y_s) = \Delta y_s + 1.5 \quad (5.27)$$

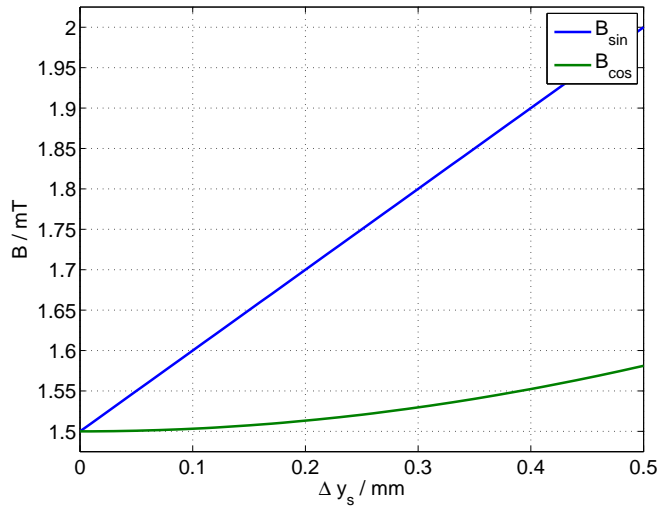
$$Off_{sin}(\Delta y_s) = 0 \quad (5.28)$$

$$\delta_{sin}(\Delta y_s) = 0 \quad (5.29)$$

$$A_{cos}(\Delta y_s) = -3,38 \cdot 10^{-3} \Delta y_s^3 - 0,344 \Delta y_s^2 - 1,09 \cdot 10^{-3} \Delta y_s + 1,5 \quad (5.30)$$

$$Off_{cos}(\Delta y_s) = 0 \quad (5.31)$$

$$\delta_{cos}(\Delta y_s) = 4,71 \Delta y_s^3 + 3,96 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^2 - 38,2 \Delta y_s + 1,15 \cdot 10^{-3} \quad (5.32)$$



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

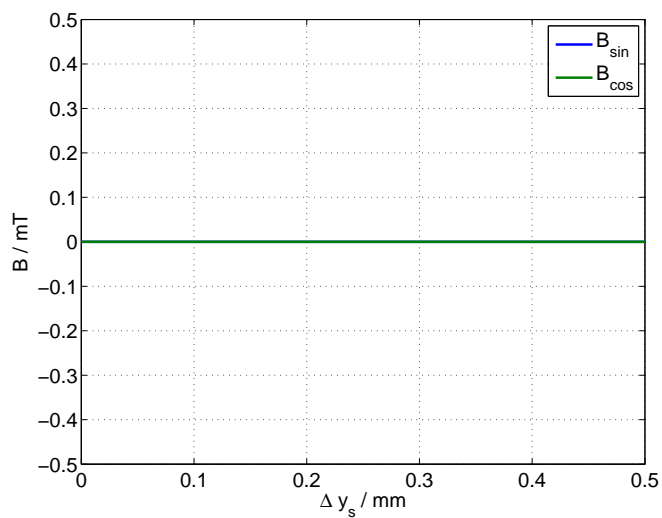
$$C_0(\Delta y_s) = -3,35 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 + 2,48 \Delta y_s^2 - 11,9 \Delta y_s - 1,22 \cdot 10^{-5} \quad (5.33)$$

$$C_1(\Delta y_s) = 0,000109 \Delta y_s^3 - 0,000869 \Delta y_s^2 + 0,00434 \Delta y_s + 7,62 \cdot 10^{-10} \quad (5.34)$$

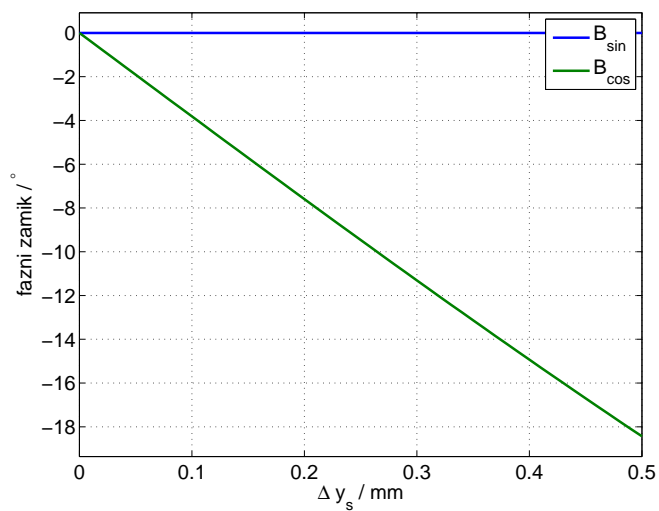
$$C_2(\Delta y_s) = 4,12 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 - 3,53 \Delta y_s^2 + 1,69 \cdot 10 \Delta y_s - 2,31 \cdot 10^{-5} \quad (5.35)$$

$$C_3(\Delta y_s) = 2,43 \cdot 10^{-4} \Delta y_s^3 - 0,00130 \Delta y_s^2 + 0,00420 \Delta y_s + 1,83 \cdot 10^{-8} \quad (5.36)$$

$$C_4(\Delta y_s) = -8,26 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 + 2,42 \Delta y_s^2 + 6,13 \cdot 10^{-3} \Delta y_s - 0,00016 \quad (5.37)$$

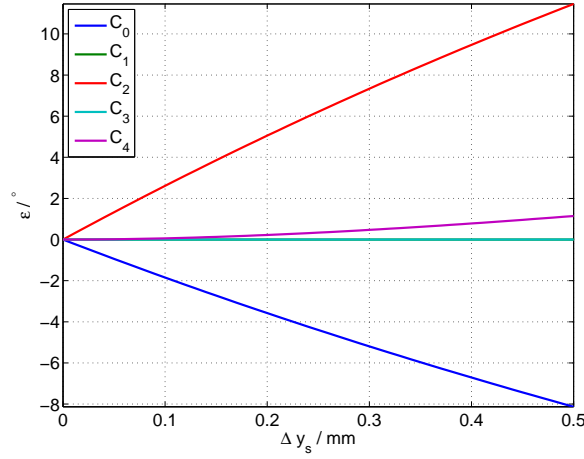


Slika 5.15: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



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

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



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

signalov, kakršna sta  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  s statično ekscentričnostjo v smeri y.

$$C_0(\Delta y_s) = -1,41\Delta y_s^3 + 6,37\Delta y_s^2 - 19,10\Delta y_s \quad (5.38)$$

$$C_1(\Delta y_s) = 0 \quad (5.39)$$

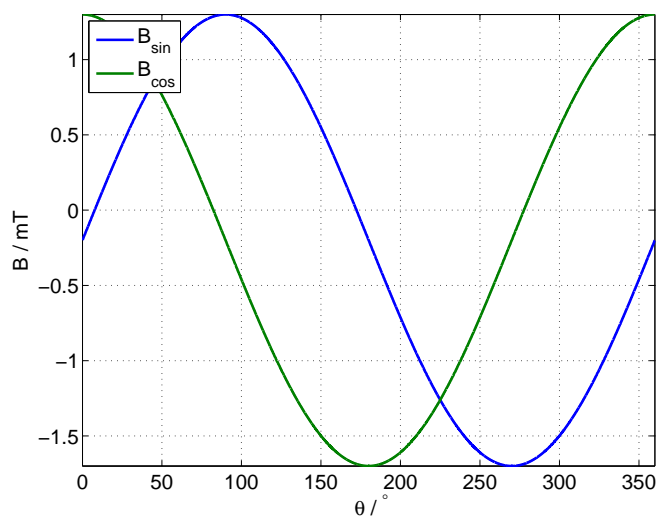
$$C_2(\Delta y_s) = 1,50\Delta y_s^3 - 9,00\Delta y_s^2 + 27,01\Delta y_s \quad (5.40)$$

$$C_3(\Delta y_s) = 0 \quad (5.41)$$

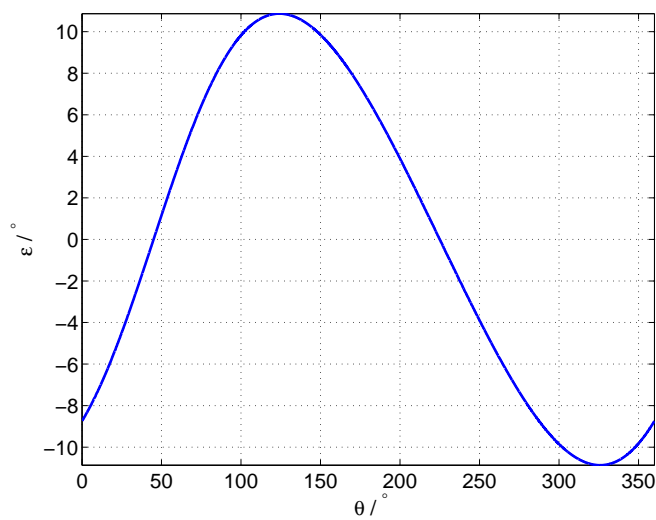
$$C_4(\Delta y_s) = -4,24\Delta y_s^3 + 6,37\Delta y_s^2 \quad (5.42)$$

## 5.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x osi

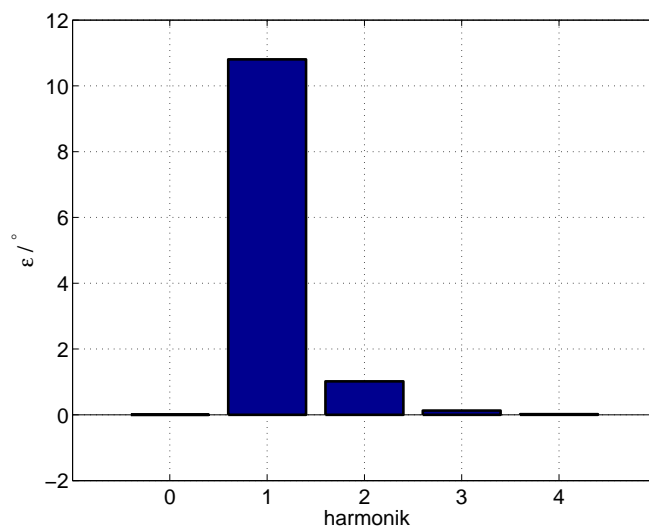
Dinamična ekscentričnost v smeri x osi pričakovano povzroči v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  enosmerno komponento (Slika 5.18). Na sliki 5.19 je vidna napaka v obliki prvega harmonika, kar je bilo pričakovati (Poglavje 4.2.3). Z razvojem napake v Fourierovo vrsto je najizrazitejši prvi harmonik, enosmerna komponenta je nič (slika 5.20).



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



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



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

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

Dinamična ekscentričnost vpliva na enosmerni komponenti  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  (slika 5.22). Z aproksimacijo posameznega parametra  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  s kubičnim polinomom sta od dinamične ekscentričnosti odvisni le enosmerni komponenti.

$$A_{sin} = 1,5 \quad (5.43)$$

$$Off_{sin} = -\Delta x_d \quad (5.44)$$

$$\delta_{sin} = 0 \quad (5.45)$$

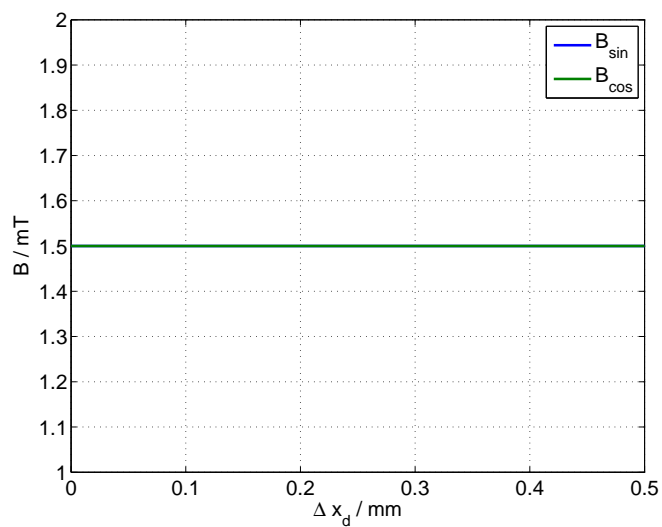
$$A_{cos} = 1,5 \quad (5.46)$$

$$Off_{cos} = -\Delta x_d \quad (5.47)$$

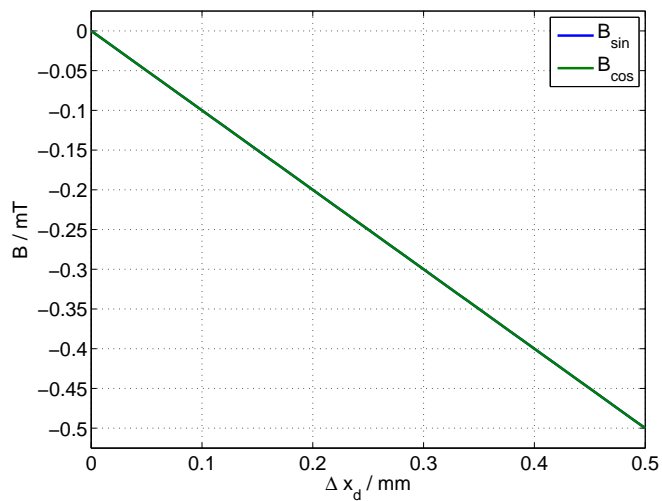
$$\delta_{cos} = 0 \quad (5.48)$$

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



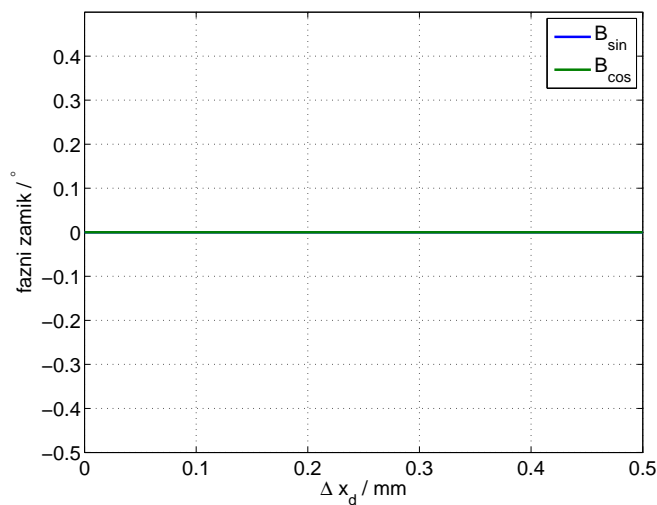


Slika 5.21: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

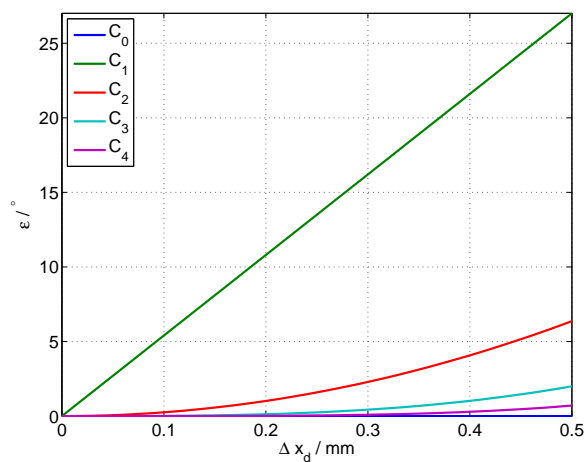


Slika 5.22: Enosmerna komponenta  $B_{\sin}$  in  $B_{\cos}$  pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

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 s



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



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

kubičnimi polinomi.

$$C_0(\Delta x_d) = (-293\Delta x_d^3 + 253\Delta x_d^2 - 82\Delta x_d + 3,64) \cdot 10^{-16} \quad (5.49)$$

$$C_1(\Delta x_d) = 54,00\Delta x_d + (-281\Delta x_d^3 + 211\Delta x_d^2 + 5,56) \cdot 10^{-15} \quad (5.50)$$

$$C_2(\Delta x_d) = 25,5\Delta x_d^2 + (-822\Delta x_d^3 + -127\Delta x_d + 7,81) \cdot 10^{-16} \quad (5.51)$$

$$C_3(\Delta x_d) = 1,60 \cdot 10\Delta x_d^3 + 2,09 \cdot 10^{-14}\Delta x_d^2 - 1,12 \cdot 10^{-15}\Delta x_d - 3,04 \cdot 10^{-16} \quad (5.52)$$

$$C_4(\Delta x_d) = 1,13 \cdot 10\Delta x_d^3 - 3,61\Delta x_d^2 + 3,92 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 8,94 \cdot 10^{-3} \quad (5.53)$$

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

$$C_0 = 0 \quad (5.54)$$

$$C_1 = -54,02\Delta x_d \quad (5.55)$$

$$C_2 = 25,46\Delta x_d^2 \quad (5.56)$$

$$C_3 = -16,01\Delta x_d^3 \quad (5.57)$$

$$C_4 = 0 \quad (5.58)$$

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

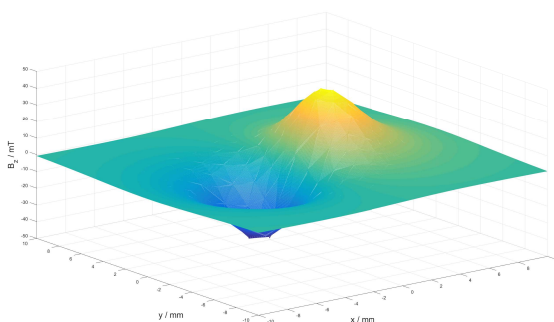
Dinamična ekscentričnost v smeri y ni povzročila nobene napake v kotu zasuka, saj ni vplivala na signal, ki ga zajamejo Hallovi sonde (5.2)5.3).

Gostota magnetnega pretoka z razdaljo od magneta upada, oblika Z komponente kljub temu ostaja enaka. Zajeto polje Hallovih sond, bo imelo le manjšo amplitudo. Z večjo oddaljenostjo se bo spremenila le amplituda zajetega signala, faza in enosmerna komponenta se ohraniti. Tudi vpliv ekscentričnosti se bo zmanjšal proporcionalno, kot se je zmanjšala amplituda. V funkcijo atan2(); imata vhodna signala manjši amplitudi, vendar se njuno razmerje ohrani in tako v izračunih v MATLABU ne vpliva na izhodni podatek o zasuku.



## 6 Realni model magnetnega polja

S poznavanjem točnejše funkcije polja, je točnejše predvidevanje potekov realnih  $B_{sin}$   $B_{cos}$  in napake. Podjetje RLS, je posredovalo rezultate z-komponente gostote magnetnega polja 2,55 mm nad simuliranim magnetom. Definijsko območje je 20x20 mm s korakom 0,02 mm (Slika 6.1). Polje, ki ga pomeri Hallova sonda v

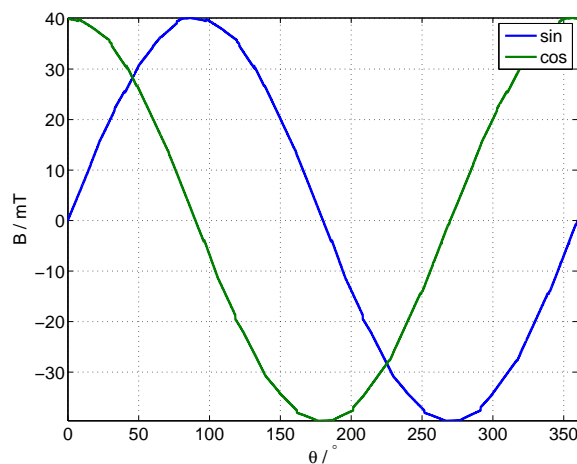


Slika 6.1: Model z- komponente gostote magnetnega polja uporabljen v simulacijah

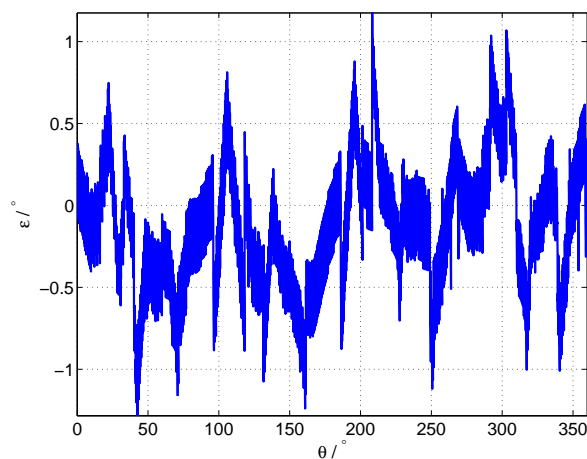
poljubni točki, je bilo aproksimirano s poljem, definiranim v geometrijsko najbližji točki definicijskega območja. V tem poglavju so predstavljeni rezultati simulacij ekscentričnosti z uporabo realnega modela magnetnega polja.

## 6.1 Brez napake

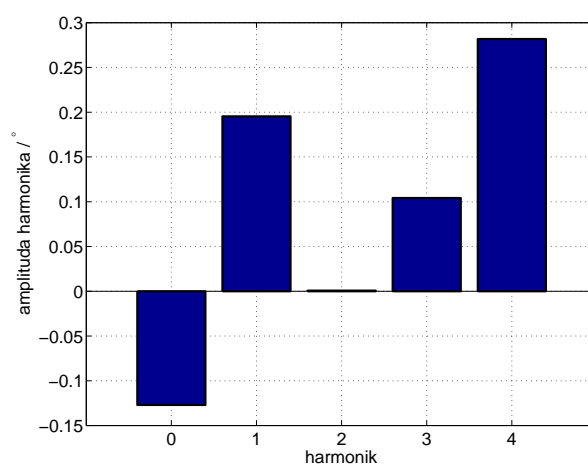
Kljub idealni montaži, Hallovi sondi ne zajameti idealnih signalov. Signala nimata popolnoma enakih amplitudi osnovnega harmonika, idealnega faznega zamika, vsebujeta tudi enosmerne komponente. Vsebujeta tudi višje harmonike (Slika 6.2). To se izrazi na napaki (Slika 6.3). V napaki se pojavijo skoki ( $105^\circ$ ), ki so posledica nepopolnega numerično izračunanega modela magnetnega polja. Napaka razvita v Fourierova vrsto prikaže vrednosti amplitud posameznih harmonikov napake (Slika 6.4). Izrazit je četrti harmonik, ki je pričakovan po podatkovnih listih [7].



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

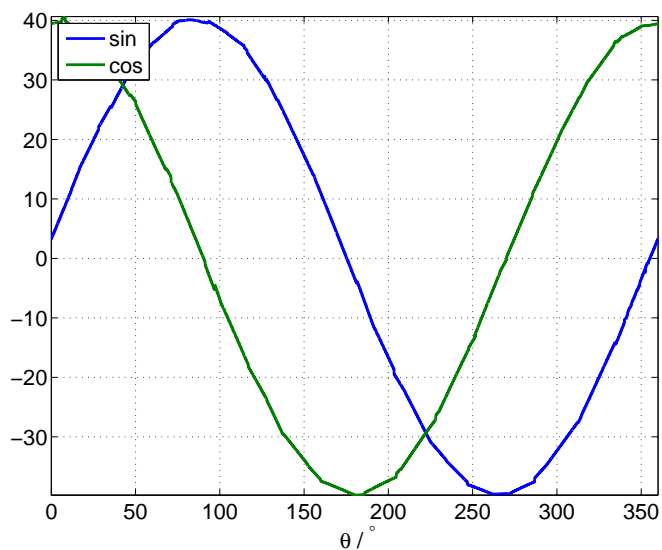


Slika 6.4: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem brez ekscentričnosti

## 6.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

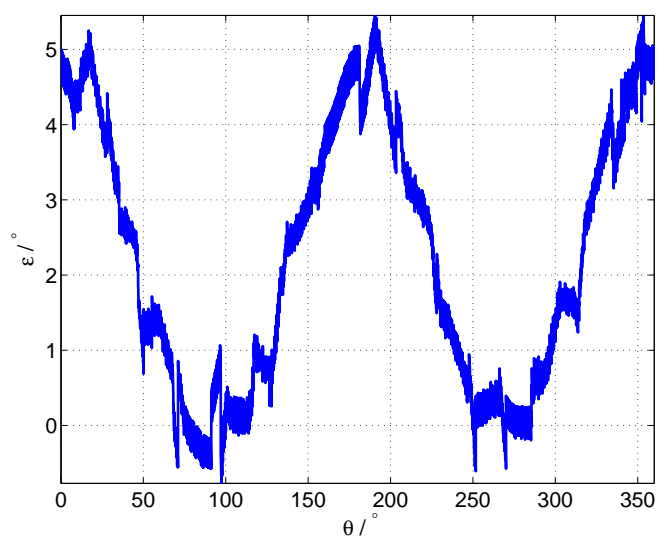
Po pričakovanjih se bo spremenila amplituda  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  signala ter zmanjšal njun fazni zamik (izraza (??) in ??). Na sliki 6.5 ni opaziti razlik, v primerjavi s

$B_{sin}$  in  $B_{cos}$  brez vpliva ekscentričnosti. Na sliki 6.6 je prikazana napaka  $\varepsilon$ . Oblika je bila pričakovana [7]. Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 6.7) prikaže enako velikost enosmerne komponente in nižjo amplituda drugega harmonika, kot pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem.

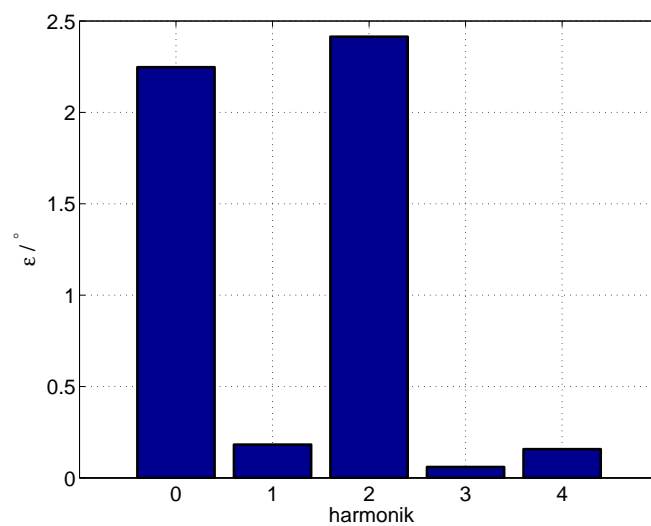


Slika 6.5:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x





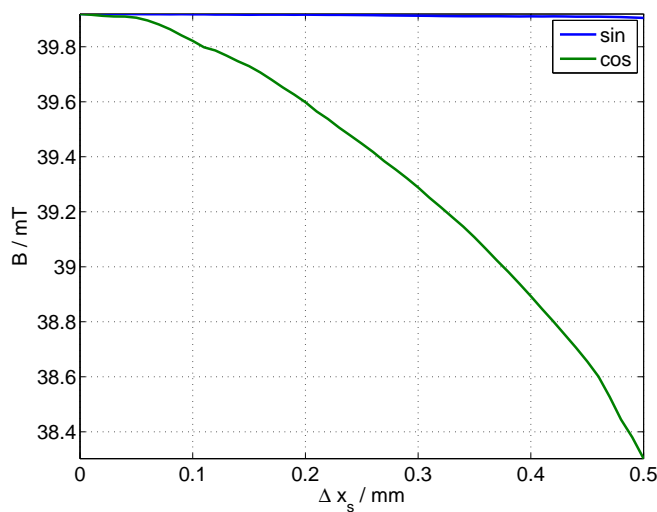
Slika 6.6: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 6.7: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x

### 6.2.1 Sprememba $B_{sin}$ , $B_{cos}$ ter napake od $\Delta x_s$

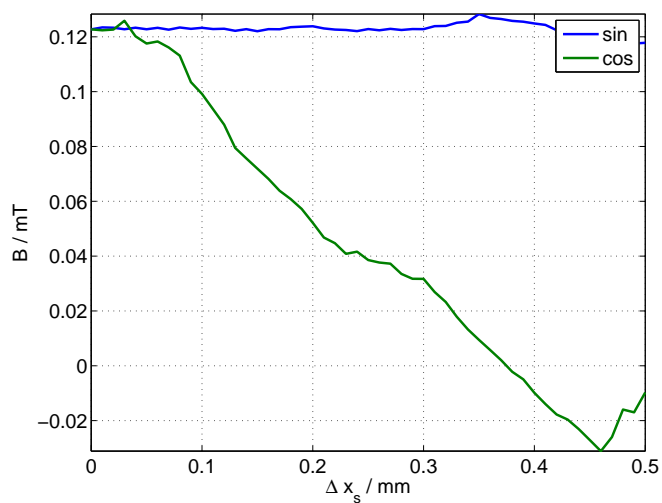
Na sliki 6.8 je prikazana sprememba amplitude prvega harmonika signalov  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Pričakovano je bilo hitrejše spreminjanje amplitude signala  $B_{cos}$ . Amplituda z višanjem ekscentričnosti pada, kar je razumljivo. Senzor je predviden za uporabo priporočenega magneta s premerom 4mm. S pravilno postavitvijo sond, je v najboljši legi pomerjeno polje z najvišjo amplitudo. Z ekscentričnostjo Hallova sonda pomeri polje z nižjo maksimalno vrednostjo. Na sliki 6.9 je prikazan potek enosmerne komponente  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Po rezultatih simulacij ni bilo pričakovano spreminjanje enosmerne komponente v  $B_{cos}$ . Zanimivo je tudi, naraščanje enosmerne komponente  $B_{cos}$  signala pri ekscentričnostih višjih od 0,45 mm. Slika 6.10 prikazuje potek faznih signalov. Rezultat je bil pričakovan. Poteke



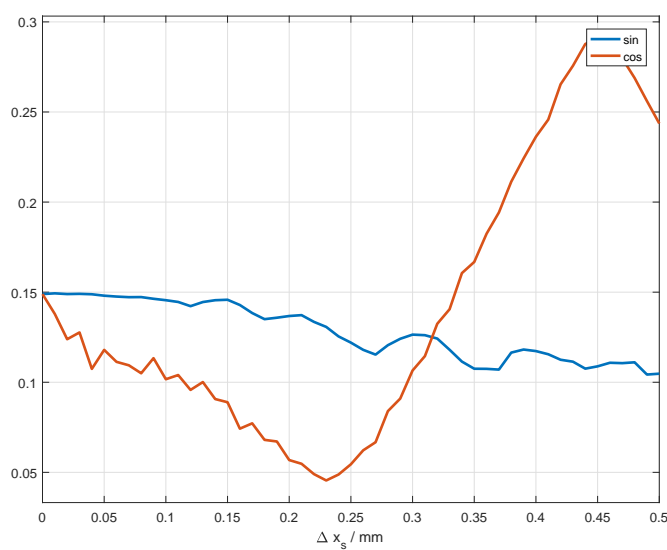
Slika 6.8: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

se aproksimira s kubičnimi polinomi. Enačbe potrdijo konstantnost amplitude prvega harmonika in enosmerne komponente signala  $B_{sin}$ , ter linearno naraščanje faznega zamika.

Na sliki 6.11 so prikazani poteki amplitud posameznega harmonika ob spremi-



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



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

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

amplitudo (6.7)-(6.11).

$$A_{sin} = +4,18 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 6,17 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 3,60 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 39,9 \quad (6.1)$$

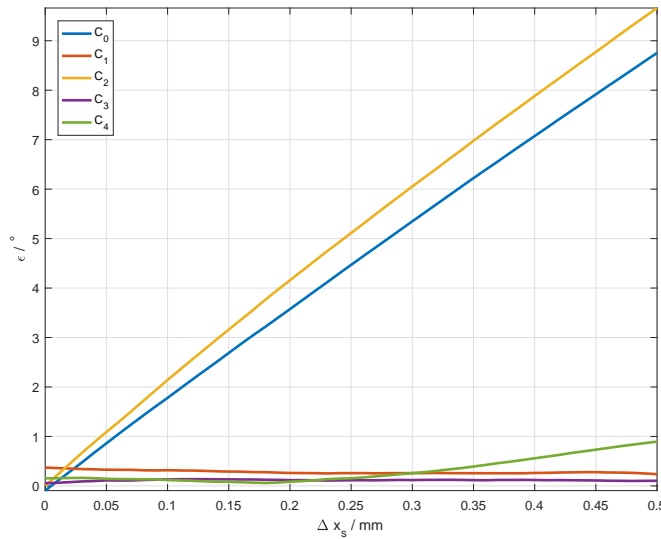
$$Off_{sin} = -0,545 \Delta x_s^3 + 0,343 \Delta x_s^2 - 5,33 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 0,125 \quad (6.2)$$

$$\delta_{sin} = -2,29 \Delta x_s^3 + 0,365 \Delta x_s^2 + 23,80 \Delta x_s - 0,125 \quad (6.3)$$

$$A_{cos} = -2,39 \Delta x_s^3 - 3,28 \Delta x_s^2 - 0,966 \Delta x_s + 39,9 \quad (6.4)$$

$$Off_{cos} = +0,868 \Delta x_s^3 - 0,423 \Delta x_s^2 - 0,316 \Delta x_s + 0,131 \quad (6.5)$$

$$\delta_{cos} = -2,71 \Delta x_s^3 + 3,54 \Delta x_s^2 - 0,597 \Delta x_s - 0,146 \quad (6.6)$$



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

$$C_0 = -1,30 \Delta x_s^3 + 1,66 \Delta x_s^2 + 1,16 \cdot 10 \Delta x_s - 1,37 \cdot 10^{-1} \quad (6.7)$$

$$C_1 = -5,99 \Delta x_s^3 + 3,85 \Delta x_s^2 - 6,20 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 2,05 \cdot 10^{-1} \quad (6.8)$$

$$C_2 = -3,28 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 5,20 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 + 12,0 \Delta x_s + 1,66 \cdot 10^{-2} \quad (6.9)$$

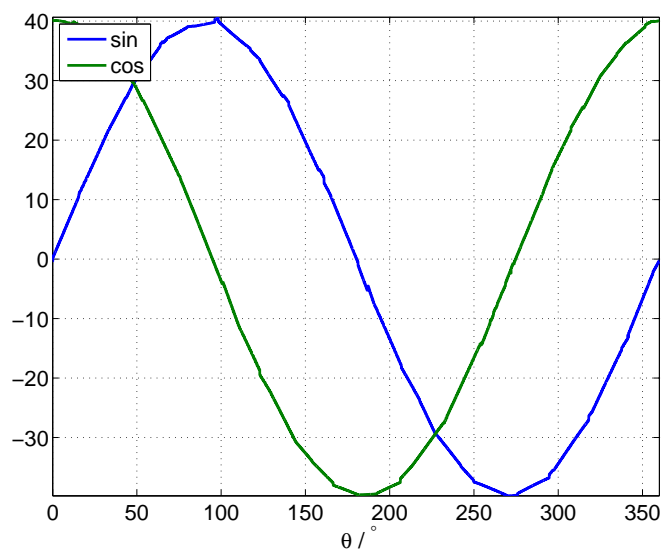
$$C_3 = -1,84 \Delta x_s^3 + 1,50 \Delta x_s^2 - 4,91 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 1,16 \cdot 10^{-1} \quad (6.10)$$

$$C_4 = 8,53 \Delta x_s^3 - 3,17 \Delta x_s^2 - 4,72 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 3,20 \cdot 10^{-1} \quad (6.11)$$

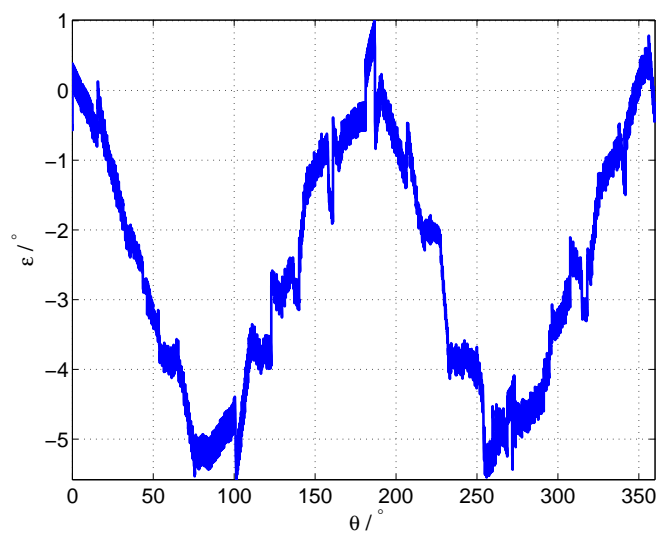
Enosmerna komponenta narašča enako kot pri simulacijah z linearnim poljem. Drugi harmonik narašča nekoliko počasneje, kot je naraščal pri simulacijah z linearnim poljem.

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

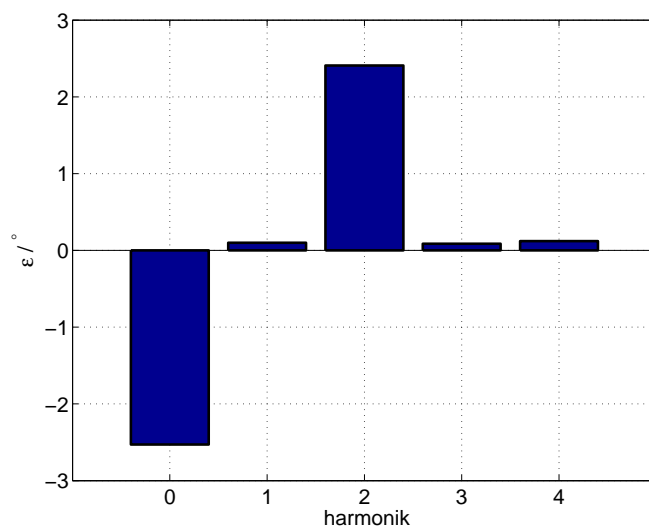
Tako kot pri statični ekscentričnosti v smeri x, se tudi na  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  signalih ob povzročni ekscentričnosti ne opazi vidne razlike (slika 6.12). Napaka  $\varepsilon$  (slika 6.13) je enake oblike kot je bila pri simulacijah statične ekscentričnosti v smeri x (slika 6.6). Napaka ima le negativno enosmerno komponento. Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 6.7) potrdi pričakovanja.



Slika 6.12:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y



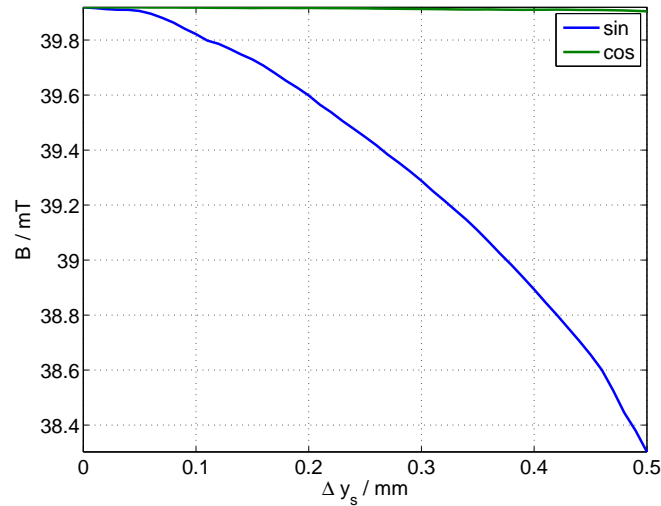
Slika 6.13: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.14: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

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

Potek amplitude osnovnega harmonika  $B_{sin}$  (slika 6.15) se spreminja kot se je spreminjala amplituda osnovnega harmonika  $B_{cos}$  pri simulacijah statične ekscentričnosti v smeri x. Sprememba  $B_{cos}$  od statične ekscentričnosti v smeri y je proti spremembi  $B_{sin}$  zanemarljiva. Enosmerena komponenta (slika 6.16) pri  $B_{sin}$  se spreminja enako, kot enosmerena komponenta  $B_{cos}$  pri statični ekscentričnosti v smeri x (slika 6.9). Fazni zamik signalov se spreminja po pričakovanjih (slika 6.17). Fazni zamik se manjša, pri čemer pada fazni zamik  $B_{cos}$  signala. Poteki



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

zapisani s kubičnimi polinomi.

$$A_{sin} = -2,39\Delta y_s^3 - 3,28\Delta y_s^2 - 0,966\Delta y_s + 39,9 \quad (6.12)$$

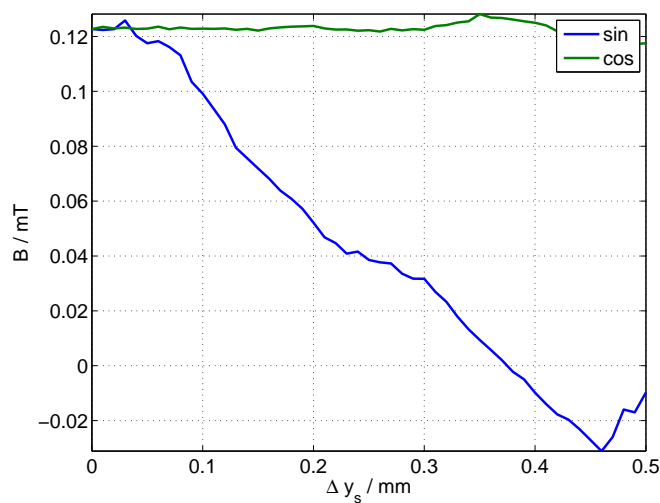
$$Off_{sin} = +0,868\Delta y_s^3 - 0,423\Delta y_s^2 - 0,316\Delta y_s + 0,131 \quad (6.13)$$

$$\delta_{sin} = -2,71\Delta y_s^3 + 3,54\Delta y_s^2 - 5,97 \cdot 10^{-1}\Delta y_s - 1,46 \cdot 10^{-1} \quad (6.14)$$

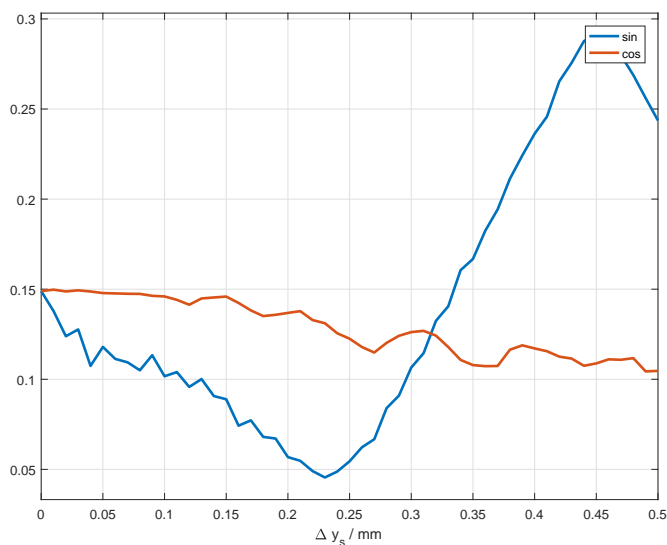
$$A_{cos} = +3,76 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^3 - 5,99 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 - 3,87 \cdot 10^{-3}\Delta y_s + 39,9 \quad (6.15)$$

$$Off_{cos} = -0,545\Delta y_s^3 + 0,342\Delta y_s^2 - 5,30 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 0,124 \quad (6.16)$$

$$\delta_{cos} = +0,229\Delta y_s^3 + 0,473\Delta y_s^2 - 24,0\Delta y_s - 0,124 \quad (6.17)$$



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

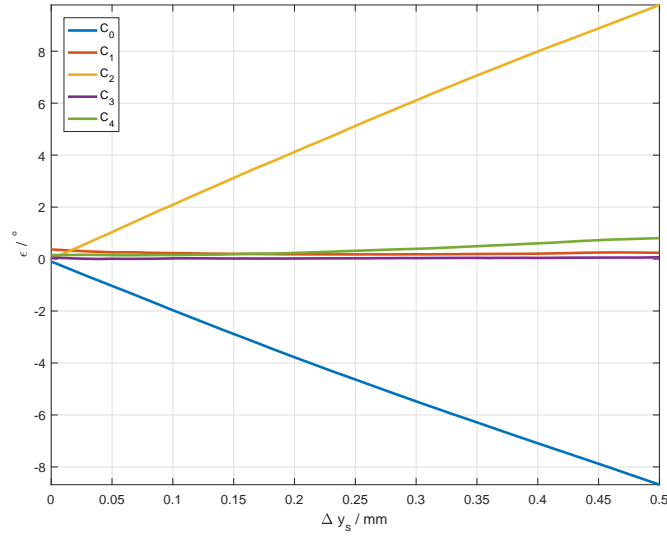


Slika 6.17: Fazni zamik  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$

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



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



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

$$C_0 = -2,56\Delta y_s^3 + 2,36\Delta y_s^2 - 1,24 \cdot 10\Delta y_s - 1,33 \cdot 10^{-1} \quad (6.18)$$

$$C_1 = -2,46\Delta y_s^3 + 3,57\Delta y_s^2 - 1,19\Delta y_s + 2,14 \cdot 10^{-1} \quad (6.19)$$

$$C_2 = 2,92\Delta y_s^3 - 1,53\Delta y_s^2 + 1,23 \cdot 10\Delta y_s - 2,78 \cdot 10^{-2} \quad (6.20)$$

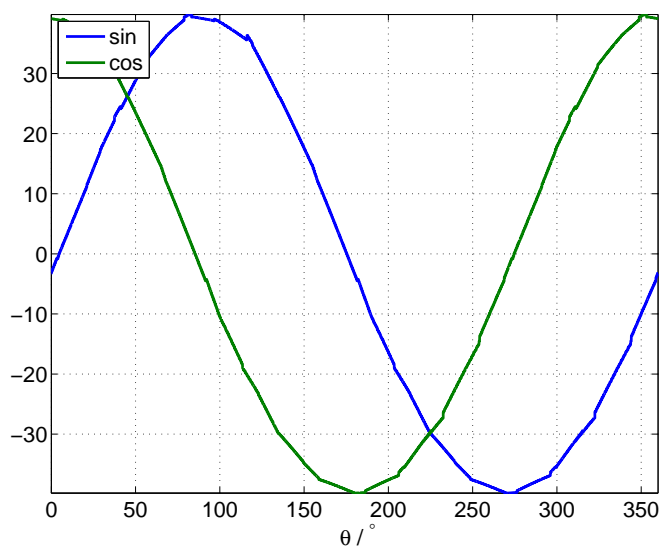
$$C_3 = -2,93\Delta y_s^3 + 2,15\Delta y_s^2 - 4,19 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 1,07 \cdot 10^{-1} \quad (6.21)$$

$$C_4 = 8,63\Delta y_s^3 - 2,82\Delta y_s^2 - 7,73 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 3,33 \cdot 10^{-1} \quad (6.22)$$

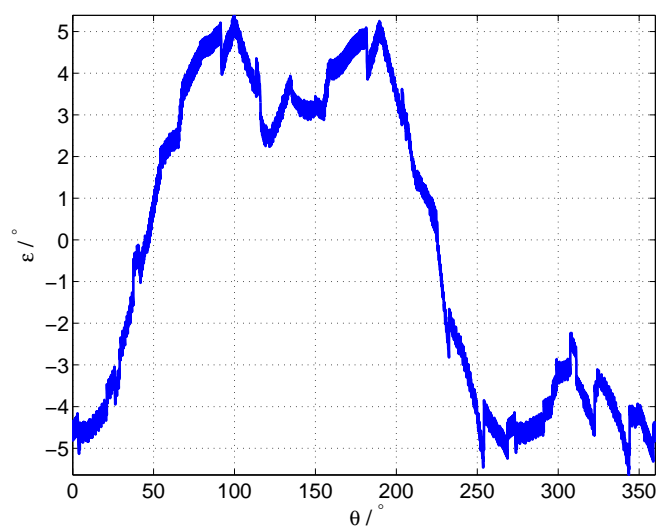
## 6.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x

Vpliv dinamične ekscentričnosti v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  bo viden v enosmerni komponenti. Na sliki 6.19 sprememba ni opazna, posledica enosmerne komponente v  $B_{sin}$  in

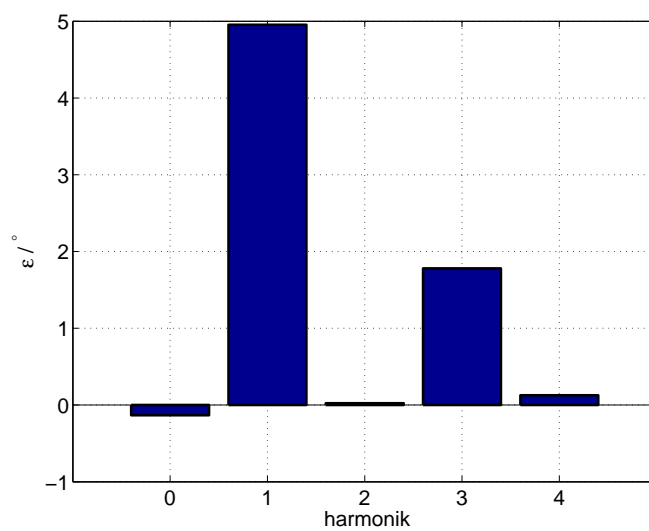
$B_{cos}$  je vidna v napaki (Slika 6.20). Napaka se izrazi v obliki prvega harmonika, ki je posledica enosmerne komponente. V napaki je viden tudi tretji harmonik saj enosmerna komponenta vpliva tudi nanj (4.9). Razvoj napake v Fourierovo vrsto potrди pričakovanja (Slika 6.21). Poglejmo si še fft napake s slike 6.20, prikazanega na sliki 6.21.



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



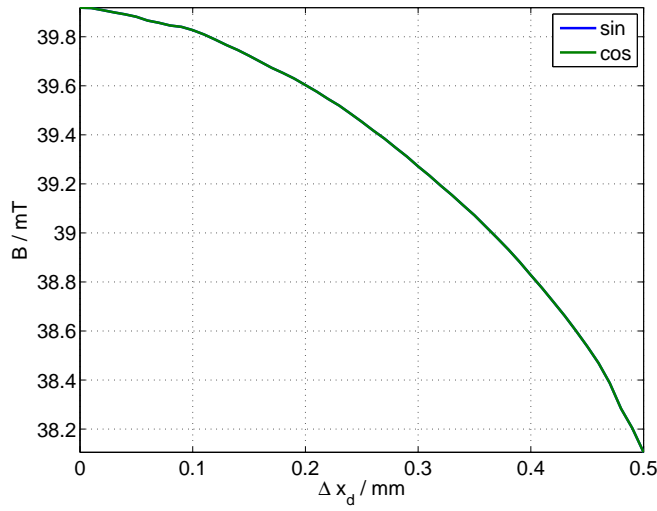
Slika 6.20: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



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

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

Spremembe amplitude osnovnega harmonika pri  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  po pričakovanjih iz rezultatov statične ekscentričnosti simulacij z realnim poljem pada. Zanimivo je, enako spreminjanje amplitude osnovnega harmonika (slika 6.22). Enako se spreminjata tudi enosmerni komponenti signalov (slika 6.23). Fazna razlika signalov ostaja konstantna, vendar je opazno lezenje obeh signalov in posledično naraščanje enosmerne komponente napake. Poteki zapisani s kubičnimi



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

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

$$A_{sin} = -6,54\Delta x_d^3 - 1,78\Delta x_d^2 - 1,04\Delta x_d + 39,9 \quad (6.23)$$

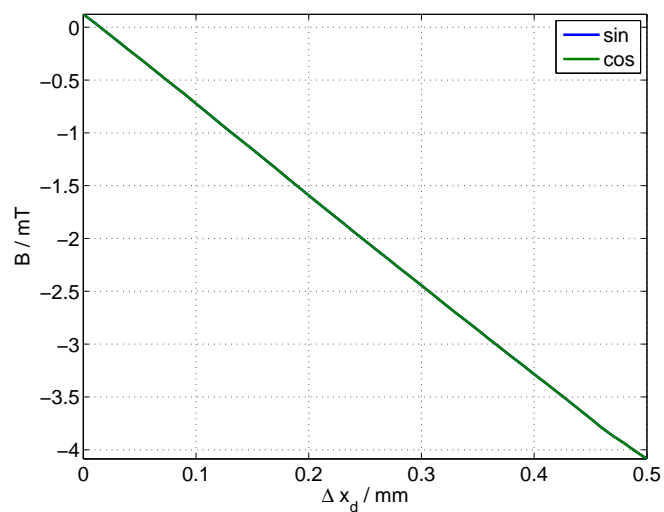
$$Off_{sin} = 2,20\Delta x_d^3 - 1,11\Delta x_d^2 - 8,45\Delta x_d + 1,28 \cdot 10^{-1} \quad (6.24)$$

$$\delta_{sin} = -4,82\Delta x_d^3 + 4,73\Delta x_d^2 - 8,49 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (6.25)$$

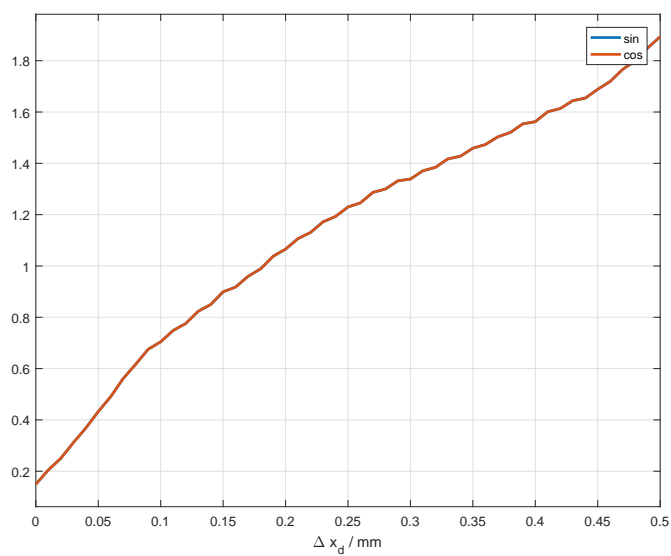
$$A_{cos} = -6,54\Delta x_d^3 - 1,78\Delta x_d^2 - 1,04\Delta x_d + 39,9 \quad (6.26)$$

$$Off_{cos} = 2,20\Delta x_d^3 - 1,11\Delta x_d^2 - 8,45\Delta x_d + 1,28 \cdot 10^{-1} \quad (6.27)$$

$$\delta_{cos} = -4,82\Delta x_d^3 + 4,73\Delta x_d^2 - 8,49 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (6.28)$$

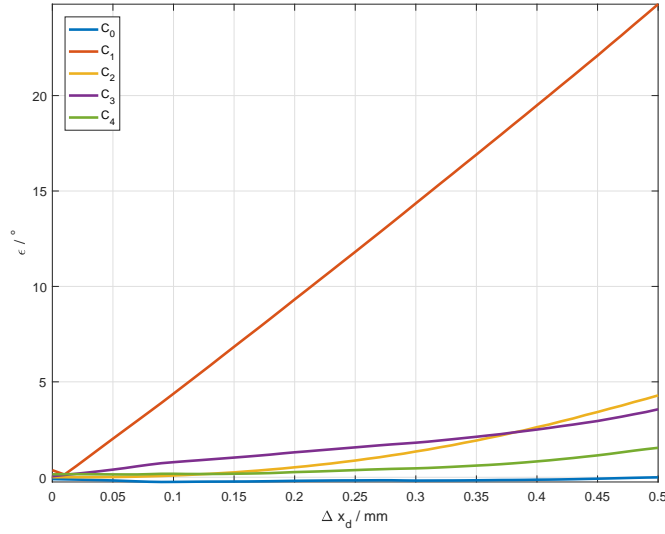


Slika 6.23: Enosmerna komponenta  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



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

Potek posameznih harmonikov napake je viden na sliki 6.25. Po pričakovanjih najhitreje narašča prvi harmonik napake, sledi mu treji. Ostali harmoniki so zanemarljivi. Poteki so aproksimirani tudi s kubičnimi polinomi.



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

$$C_0 = -5,61\Delta x_d^3 + 5,24\Delta x_d^2 - 9,00 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (6.29)$$

$$C_1 = -2,27\Delta x_d^3 + 3,60\Delta x_d^2 + 2,44 \cdot 10\Delta x_d - 8,53 \cdot 10^{-2} \quad (6.30)$$

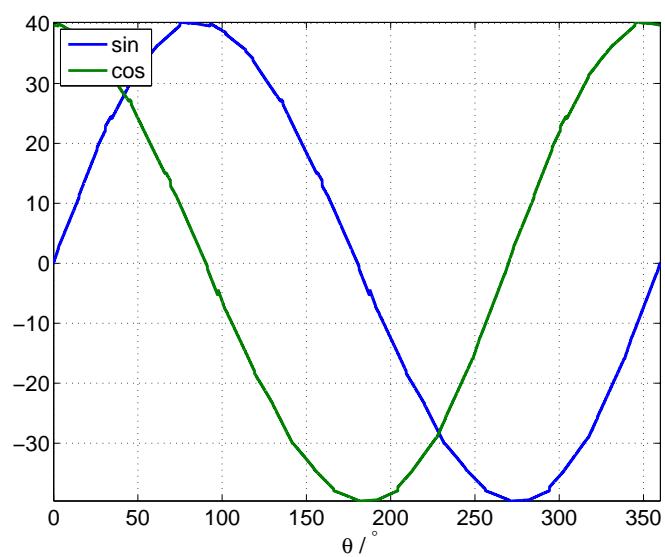
$$C_2 = -1,71\Delta x_d^3 + 2,37\Delta x_d^2 - 3,36 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 9,84 \cdot 10^{-3} \quad (6.31)$$

$$C_3 = 1,07\Delta x_d^3 - 1,37\Delta x_d^2 + 8,73\Delta x_d + 8,63 \cdot 10^{-2} \quad (6.32)$$

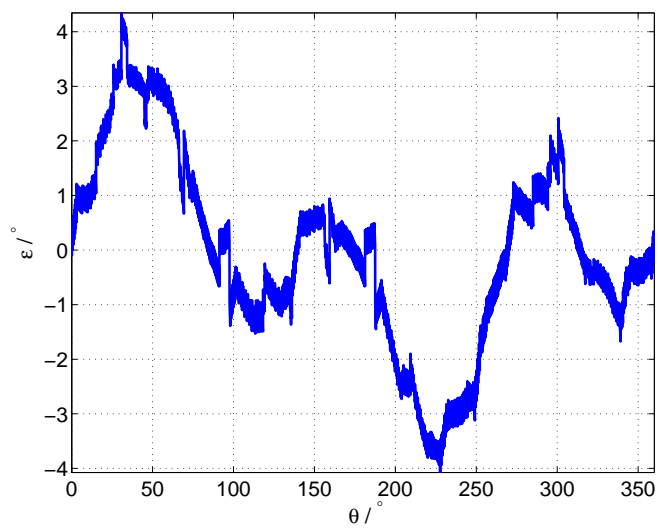
$$C_4 = 6,38\Delta x_d^3 + 4,03\Delta x_d^2 - 2,02\Delta x_d + 3,51 \cdot 10^{-1} \quad (6.33)$$

## 6.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y

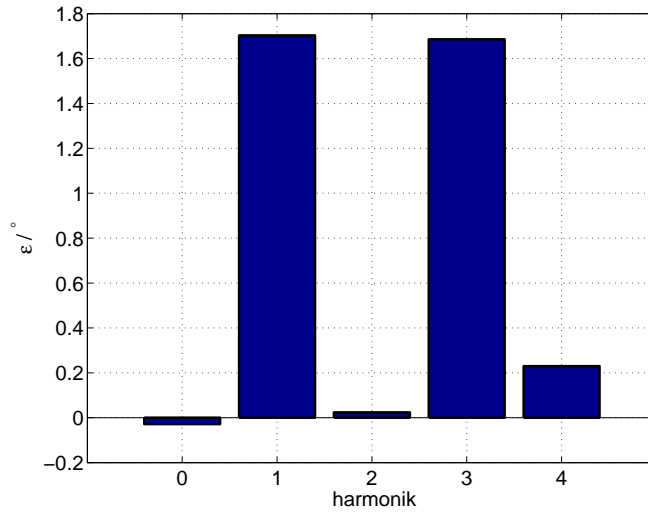
V simulacijah z linearnim poljem napaka ni bila odvisna od dinamične ekscentričnosti v smeri y. Kljub temu je bila opravljena simulacija. Rezultati so razlikujejo od pričakovanj. Spremembe v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  ni opaziti (slika 6.26), vendar v napaki se pojavi prvi in tretji harmonik (slika 6.26). Razvoj v Fourierovo vrsto potrди izstopanje omenjenih harmonikov.



Slika 6.26:  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.27: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.28: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y

### 6.5.1 Sprememba $B_{sin}$ , $B_{cos}$ ter napake od $\Delta y_d$

Sprememba amplitude osnovnega harmonika od naraščanja ekscentričnosti pada (slika 6.29). Razlika amplitud ostaja nespremenjena. Enosmerna komponenta (slika 6.30) se spreminja minimalno, komponenti obeh signalov sta enaki. Vidno je tudi sofazno lezenje faznih zamikov obeh signalov (slika 6.31). Poteki so aproksimirani s kubičnimi polinomi in potrdijo enako spreminjanje.

$$A_{sin} = +1,15\Delta y_d^3 - 2,72\Delta y_d^2 - 3,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,99 \cdot 10 \quad (6.34)$$

$$Off_{sin} = -0,244\Delta y_d^3 - 0,292\Delta y_d^2 + 0,169\Delta y_d + 0,131 \quad (6.35)$$

$$\delta_{sin} = +2,39\Delta y_d^3 - 2,10\Delta y_d^2 + 9,01 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (6.36)$$

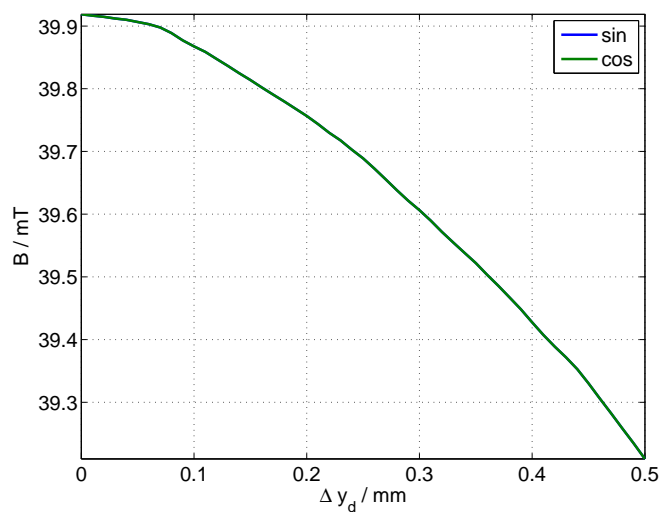
$$A_{cos} = +1,15\Delta y_d^3 - 2,72\Delta y_d^2 - 3,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,99 \cdot 10 \quad (6.37)$$

$$Off_{cos} = -0,244\Delta y_d^3 - 0,292\Delta y_d^2 + 0,169\Delta y_d + 0,131 \quad (6.38)$$

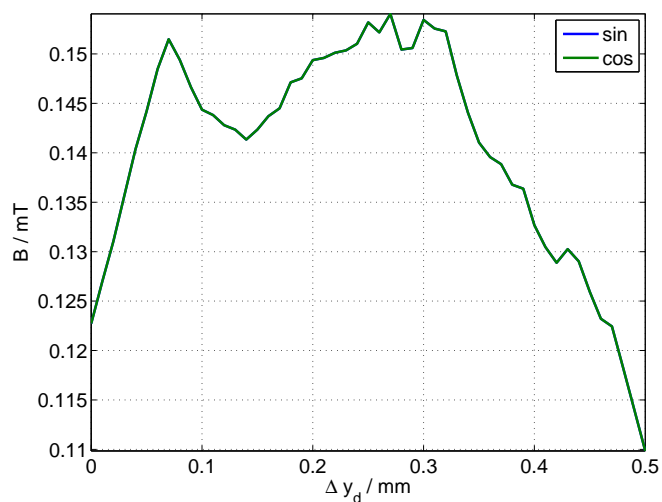
$$\delta_{cos} = +2,39\Delta y_d^3 - 2,10\Delta y_d^2 + 9,01 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (6.39)$$

Na sliki 6.32 je prikazana odvisnost amplitud napake ob spreminjanju dinamične ekscentričnosti v smeri y. Napaka, se po pričakovanjih najbolj izrazi s prvim in



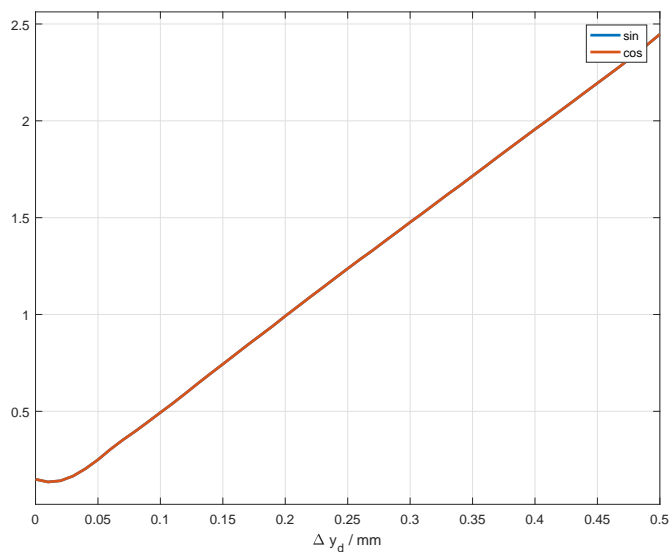


Slika 6.29: Amplituda osnovnega harmonika  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y



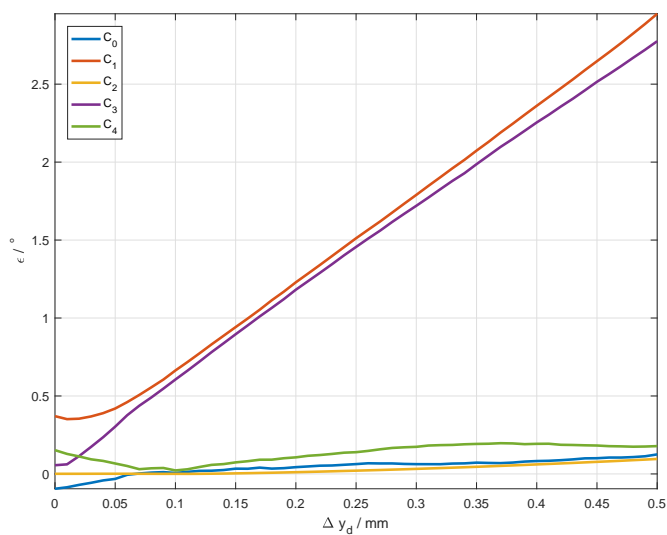
Slika 6.30: Enosmerna komponenta  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y

tretjim harmonikom. Oblika napake ni posledica spremembe amplitude osnovnega harmonika, enosmerne komponente ali spremembe faznega zamika v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Naraščanje prvega in tretjega harmonika je posledica vpliva drugega



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  $B_{cos}$

harmonika, ki se pojavi v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$ . Drugi harmonik v  $B_{sin}$  in  $B_{cos}$  se pojavi zaradi magnetnega polja, kar v tem delu ni raziskano zakaj.



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

$$C_0 = 2,50\Delta y_d^3 - 2,14\Delta y_d^2 + 8,63 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (6.40)$$

$$C_1 = -9,46\Delta y_d^3 + 7,85\Delta y_d^2 + 6,81\Delta y_d + 8,35 \cdot 10^{-2} \quad (6.41)$$

$$C_2 = -0,148\Delta y_d^3 + 0,762\Delta y_d^2 - 3,01 \cdot 10^{-2}\Delta y_d + 4,54 \cdot 10^{-4} \quad (6.42)$$

$$C_3 = -6,17\Delta y_d^3 + 4,40\Delta y_d^2 + 7,91\Delta y_d - 3,84 \cdot 10^{-2} \quad (6.43)$$

$$C_4 = 5,60\Delta y_d^3 - 1,89\Delta y_d^2 - 2,84 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,13 \cdot 10^{-1} \quad (6.44)$$

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



## 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, “Diplomsko delo absolutni magnetni dajalnik zasuka z uporabo principa nonij,” Master’s thesis, Univerza v Ljubljani.
- [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*.
- [4] M. Demierre, *Improvements of CMOS Hall Microsystems and Application for Absolute Angular Position Measurements*. PhD thesis, Federal Polytechnic School of Lausanne, Switzerland.
- [5] RLS Merilna tehnika d.o.o., “Rm44 magnetic encoder base unit.” Dosegljivo: [https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FRM44D01\\_10.pdf](https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FRM44D01_10.pdf).
- [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.” Dosegljivo: [https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FAM256D01\\_13\\_bookmark.pdf](https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FAM256D01_13_bookmark.pdf).

- [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>.