

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Mitja Alič

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

Magistrsko delo

Mentor: doc. dr. Mitja Nemec

Ljubljana, 2018

Zahvala

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

Vsebina

| | |
|--|-----------|
| 1 Uvod | 5 |
| 2 Senzor RM44 | 7 |
| 3 Izpeljava gibanja sonde relativno na magnet ob nepravilni montaži | 13 |
| 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 |
| 4 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov | 19 |
| 4.1 Različne amplitude | 20 |
| 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 |
| 5 | Linearni model magnetnega polja | 33 |
| 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 |
| 6 | Realni model magnetnega polja | 55 |
| 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 |
| 7 | Meritve | 79 |
| 7.1 | Oprema in postavitev merilnega mesta | 79 |
| 7.2 | Zajem podatkov | 81 |
| 7.3 | Senzor v izhodiščni legi | 84 |
| 7.3.1 | Meritve v izhodišni legi | 86 |
| 7.4 | Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi | 88 |
| 7.4.1 | Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x | 90 |
| 7.5 | Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi | 93 |
| 7.5.1 | Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y | 95 |
| 7.6 | Meritve dinamične ekscentričnosti v smeri x-osi | 98 |
| 7.6.1 | Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x | 99 |
| 8 | Primerjava rezultatov simulacij in meritev | 105 |
| 8.1 | Statična ekscentričnost v smeri x | 105 |
| 8.2 | Statična ekscentričnost v smeri y | 106 |
| 8.3 | Dinamična ekscentričnost | 107 |
| 9 | Sklep | 109 |
| 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 | Θ | stopinja | $^\circ$ |
| pomerjeni kot | φ | stopinja | $^\circ$ |
| napaka | ε | stopinja | $^\circ$ |
| Z-komponenta gostote magnetnega polja | B_z | militesla | mT |
| statična ekscentričnost v x | Δx_s | milimetri | mm |
| statična ekscentričnost v y | Δy_s | milimetri | mm |
| dinamična ekscentričnost v x | Δx_d | milimetri | mm |
| dinamična ekscentričnost v y | Δy_d | milimetri | mm |

Tabela 1: Veličine in simboli

Povzetek

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.

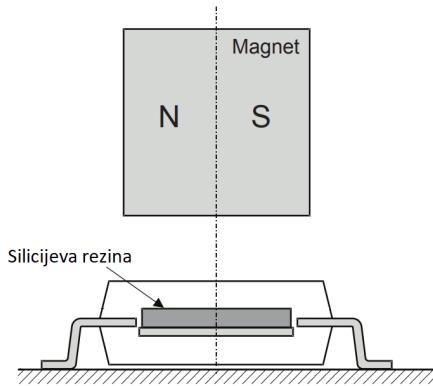
2 Senzor RM44

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.

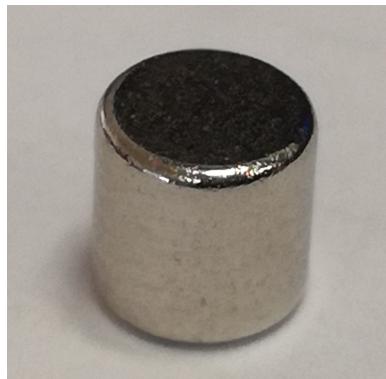


Slika 2.1: Senzor RM44

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).



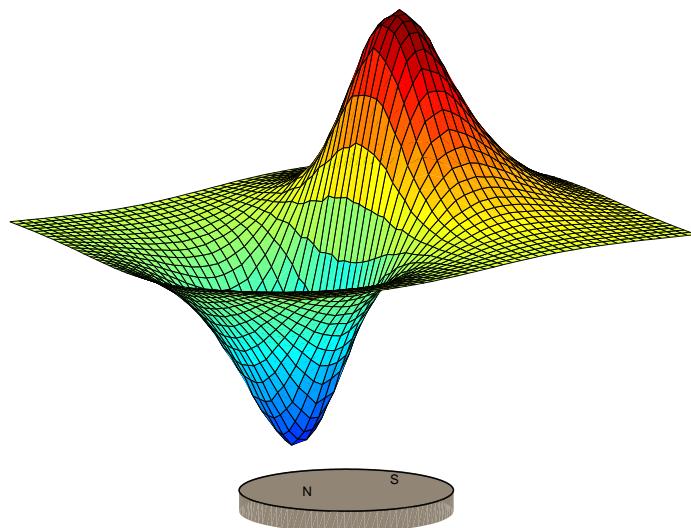
Slika 2.2: Nahajanje radialno polariziranega magneta nad čipom AM256 [7]



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).

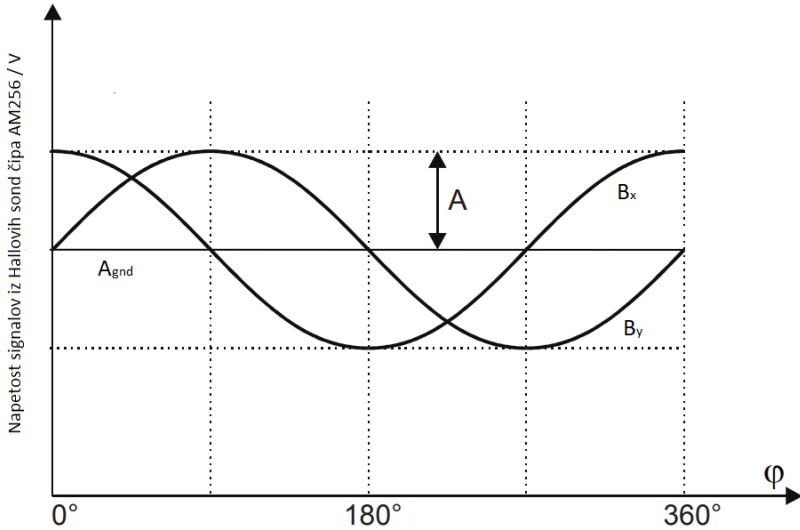


Slika 2.4: Oblika Z-komponente gostote magnetnega pretoka na poljubni ravnini nad radialno polariziranim magnetom

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° prostorsko zamaknjena drug na drugega (slika 2.5).

Prvi zajet signal, fazno prehiteva za 90° drugi signal in je v delu poimenovan B_{cos} , drugi signal, je poimenovan B_{sin} .

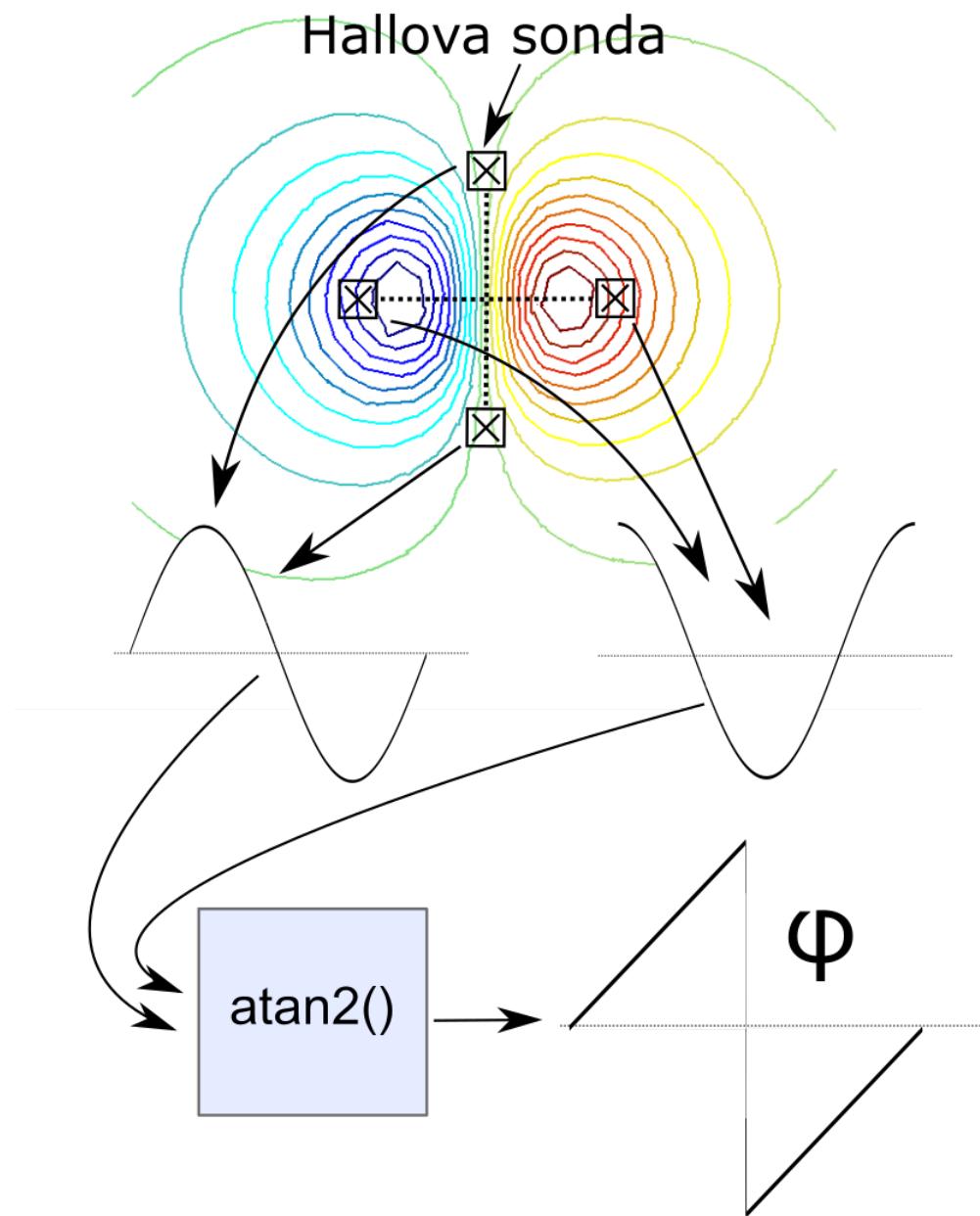


Slika 2.5: Analogna signala zajeta s Hallovimi sondami [7]

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 izračun 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.

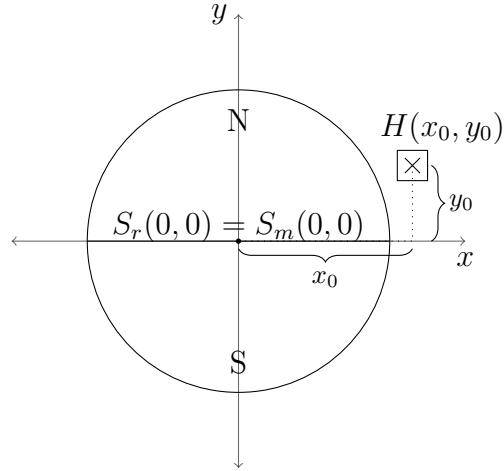
Izmik sredine senzorja iz osi vrtenja bo med spremenjanjem dejanskega kota zasuka statičen, njegova lokacija se ne bo spreminala na os vrtenja. Ta izmik je poimenovan statična ekscentričnost.

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 θ (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 θ , opiše enačba (3.1).

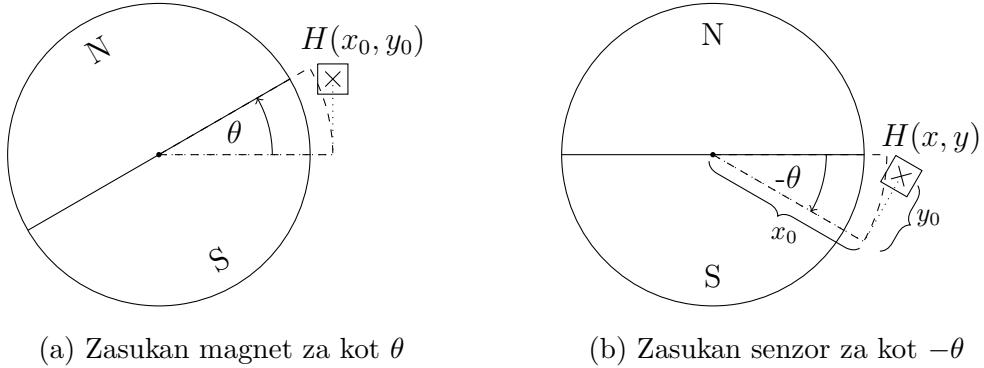
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

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

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

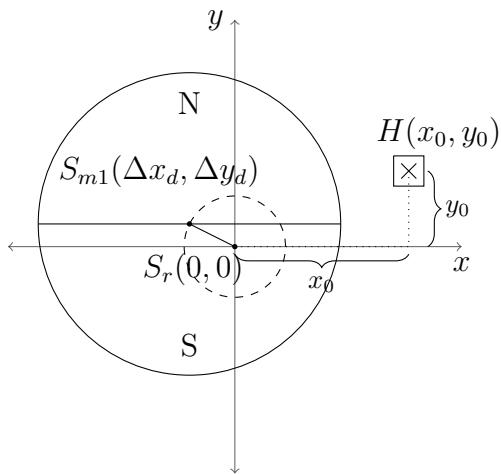
3.2 Izpeljava gibanja lokacije Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti

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 $\sqrt{\Delta x_d^2 + \Delta y_d^2}$.

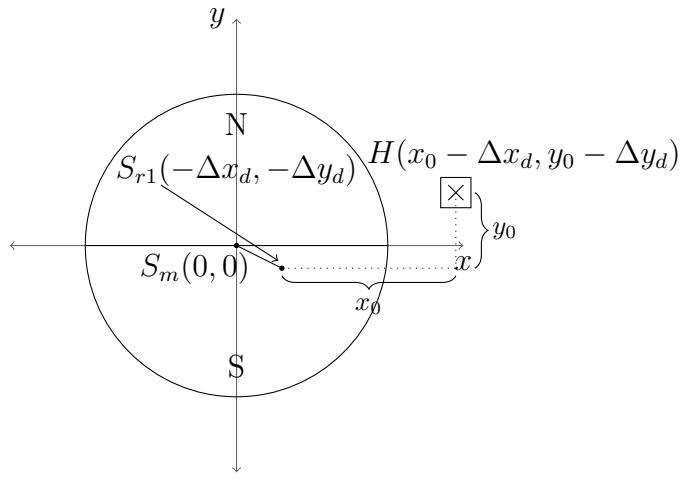


Slika 3.3: Definicije dinamične ekscentričnosti

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)

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

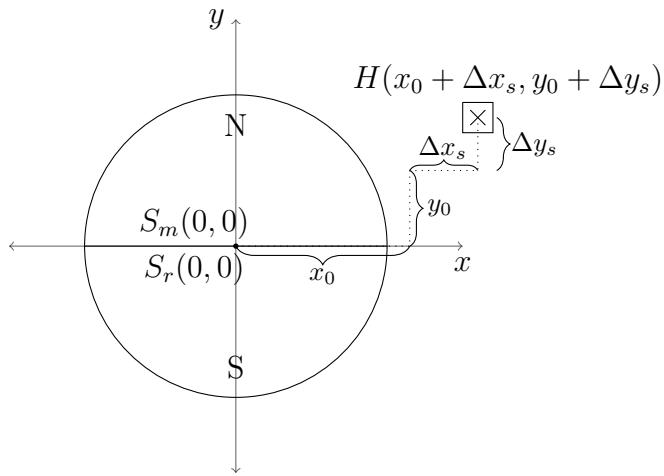


Slika 3.4: Premik osi vrtenja in sonde za velikost dinamične ekscentričnosti

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.

Pri različnih popačenjih, se je opravil FFT napake, nato je sledilo aproksimiranje posameznega harmonika napake v odvisnosti od spremenljajočega parametra. Iskalo se je funkcijo, ki bi aproksimirala amplitudo posameznega harmonika čim bolje. Z izbiro najbolj primernih funkcij, je bila napaka minimalnih kvadratov aproksimacije pri vseh potekih manjša od 0,072”.

4.1 Različne amplitude

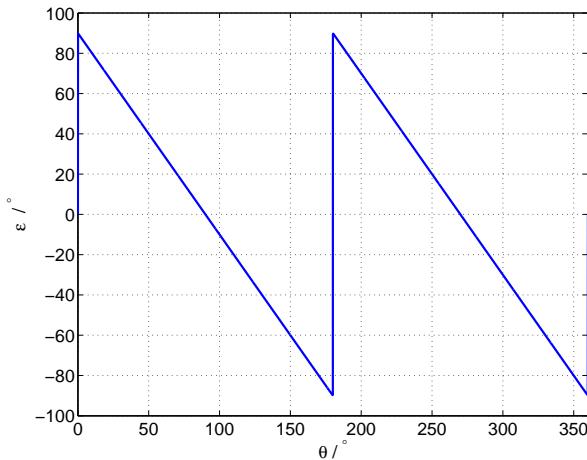
Prvi primer popačenih vhodov v funkcijo atan2d() je neenakost amplitud vhodnih signalov. Signala imata poljubne amplitude, vendar se izhod funkcije atan2d() ne bo spremenil, če se obe amplitudi deli s poljubnim številom. Če se za poljubno število vzame amplitudo signala B_{cos} , imata singala novo definirani 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(). Opravi se limito napake s pošiljanjem para-metra k v skrajno lego. Z limito se ugotovi v kakšno obliko napaka konvergira. Z limito napake, se zoži nabor funkcij na katero se aproksimira napako. Izhod atan2d() je konstanta, napaka ε je prikazana na sliki 4.1.

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



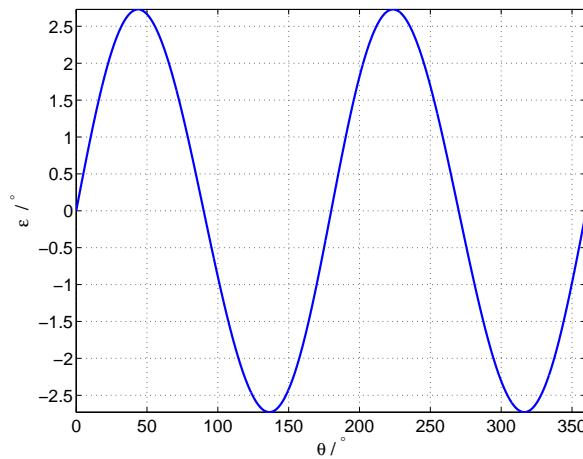
Slika 4.1: Limita napake ε ko gre k proti neskončnosti

Potek ε se lahko zapiše s Fourierovo vrsto [10]:

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

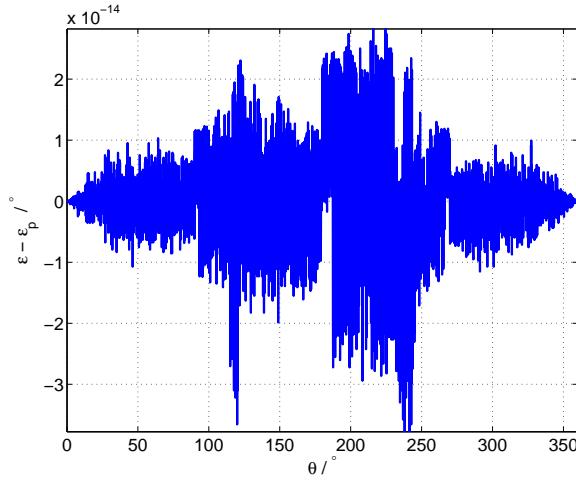
V napaki nastopajo le sodi harmoniki. Z opazovanjem sodih harmonikov napake pri različnih k -jih in uporabo Curve Fitting tool [15], je bila določena funkcija poteka napake v odvisnosti od k .

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



Slika 4.2: Napaka ε 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.

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

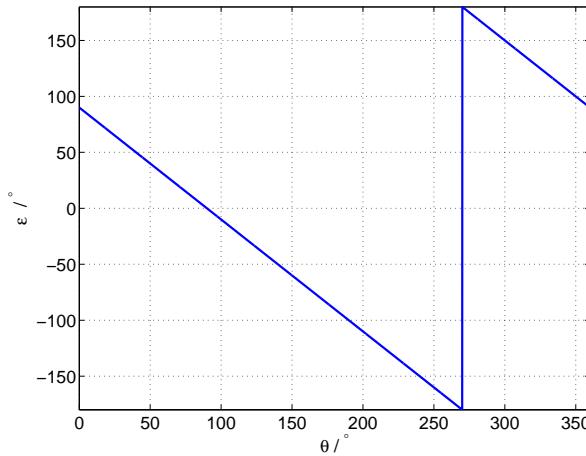
$$B_{cos} = \cos(\theta) + A_0 \quad (4.7)$$

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}

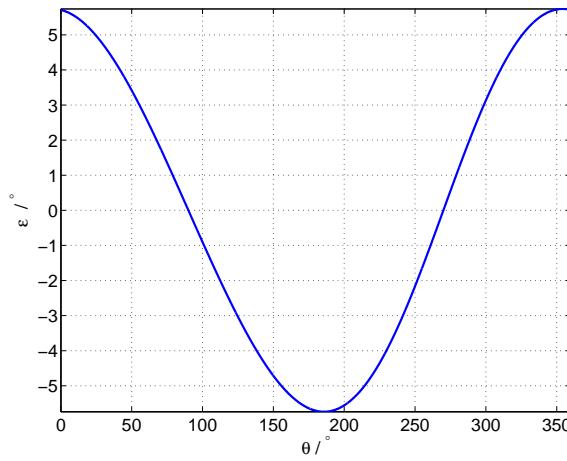
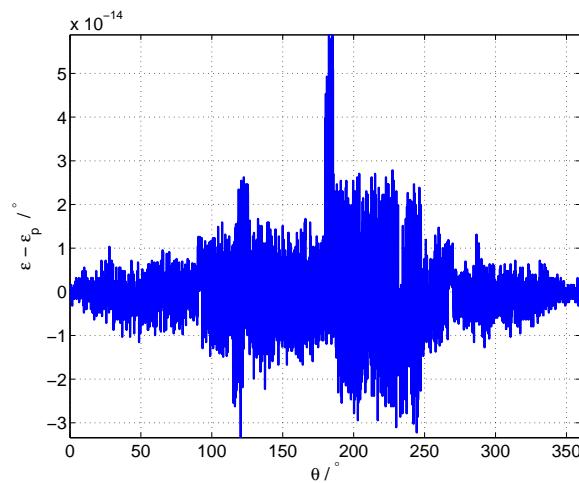
Z limito B_0 v neskončnost in $A_0 = 0$ ter izpeljavo napake ε v Fourierovo vrsto, se napaka izrazi kot:

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

Slika 4.4: ε 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 opisuje odvisnost napake od enosmerne komponente v signalu B_{sin} . Definicjsko območje je bilo potrebno razdeliti na 3 dele.

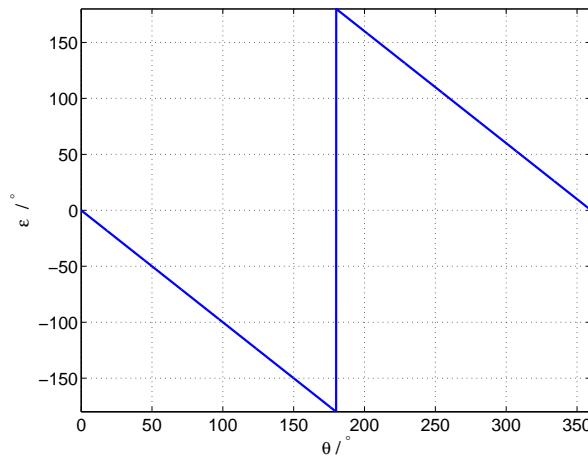
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-|B_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta - 90n), & B_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_0^n}{n} \sin(n\theta + 90n), & |B_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-B_0^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & B_0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

Slika 4.5: ε 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}

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

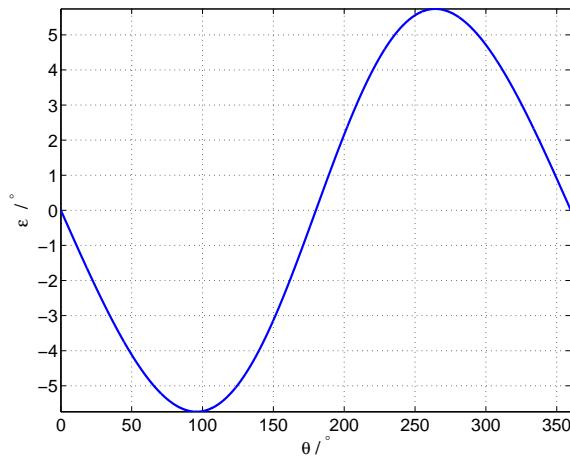
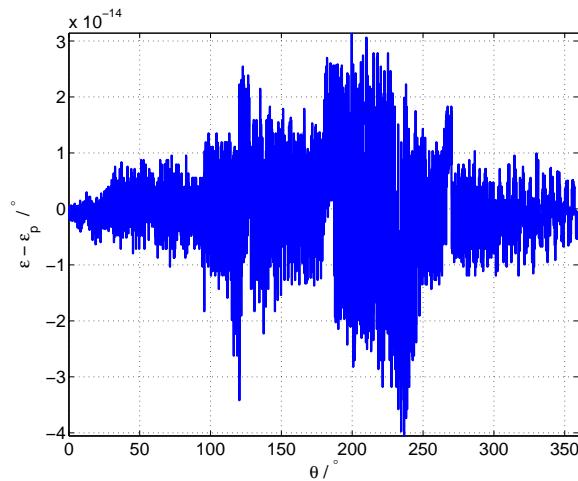
Slika 4.7: ε ob limiti A_0 v neskončnost

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)

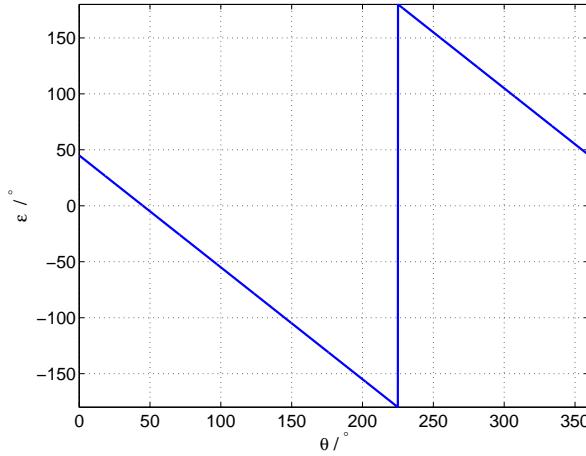
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-|A_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{A_0^n}{n} \sin(n\theta), & |A_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-A_0^{-n}}{n} \sin(n\theta),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

Slika 4.8: ε 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

Ta primer je pomemben zaradi dinamične ekscentričnosti. Pri dinamični ekscentričnosti se vsem Hallovim sondam prišteje enaka enosmerna komponenta. Po sledično enosmerne komponente Hallovih sond vplivajo na signala B_{sin} in B_{cos} .

Zato naj imata B_{sin} in B_{cos} enako enosmerno komponento označeno s C_0 . Limita napake, ko gre C_0 proti neskončnosti se v Fourierovi vrsti izrazi kot:



Slika 4.10: ε ob limiti C_0 v neskončnost

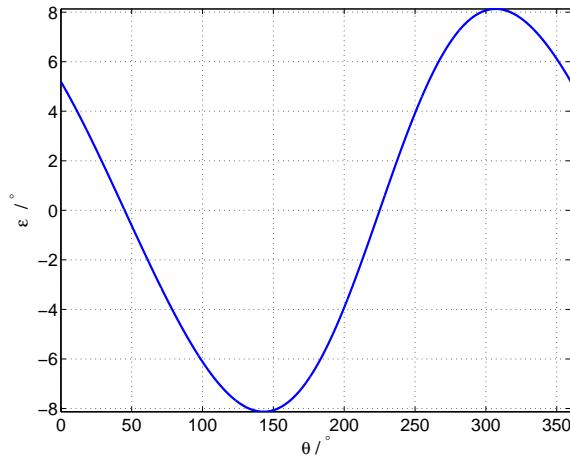
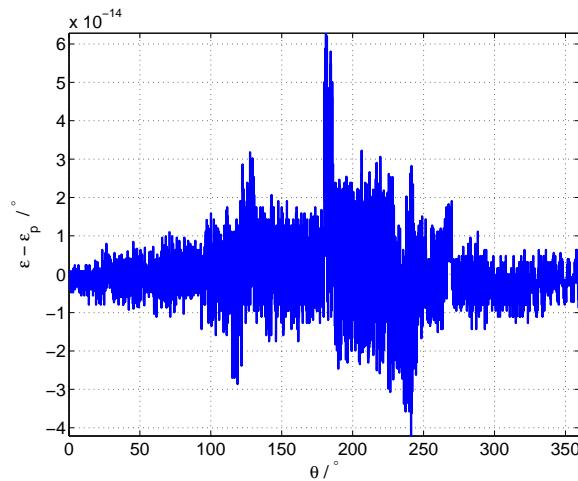
$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta - 90n). \quad (4.13)$$

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° . Signala B_{sin} in B_{cos} bodita odvisna tudi od faznega zamika in sicer φ_s signala

Slika 4.11: ε 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)

B_{sin} in φ_c signala B_{cos}

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

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

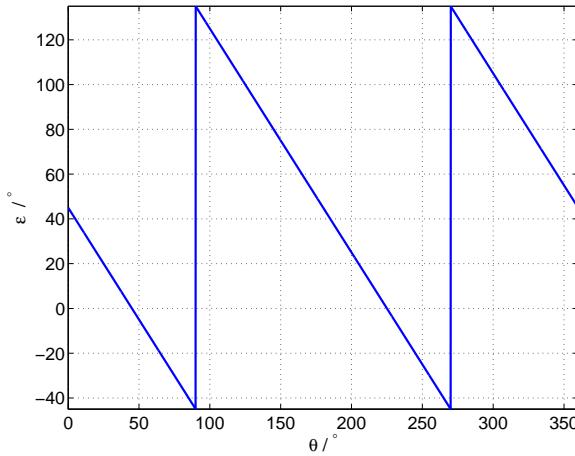
Napako se določi za vsakega od parametrov posamično. Drugi je takrat enak

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 ε s slike 4.13 predstavi vrsta (4.18).



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

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

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} .

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

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 Δ_c v neskončnost. V napaki nastopa enosmerna komponenta in sodi harmoniki. Funkcija, ki predstavlja odvisnost napake od Δ_c je (4.22).

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

Pri čemer velja:

$$\Delta_c > -C_1.$$

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 Δ_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:

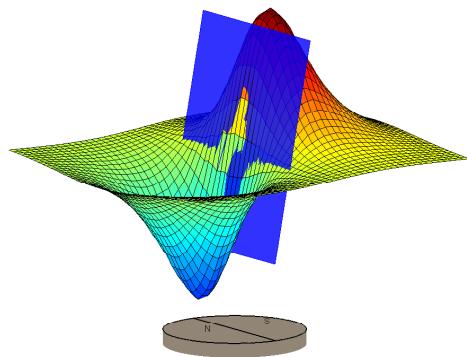
$$\Delta_s > -C_1.$$

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

5 Linearni model magnetnega polja

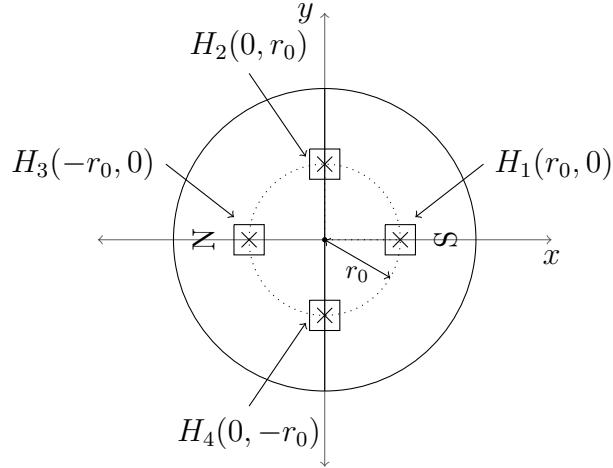
Aproksimacija polja zadostuje za oceno napake. Za oceno napake, se lahko Z komponento magnetnega polja v okolici središča magneta, aproksimira z ravnino (slika 5.1). Koordinatni sistem nad magnetom naj bo postavljen tako, da bo polje aproksimirano z enačbo (5.1).

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



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.

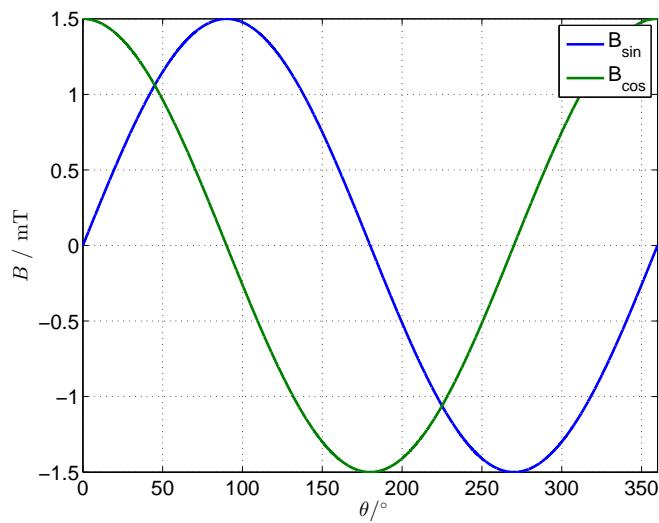
Kljub temu so bile opravljene simulacije na poenostavljenem modelu, uporabi le dveh sond ($B_{cos} = B_{H_1}$ in $B_{sin} = B_{H_2}$). Na ta način je lahko bila analizirana napaka.

Ravnina, ki aproksimira 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.

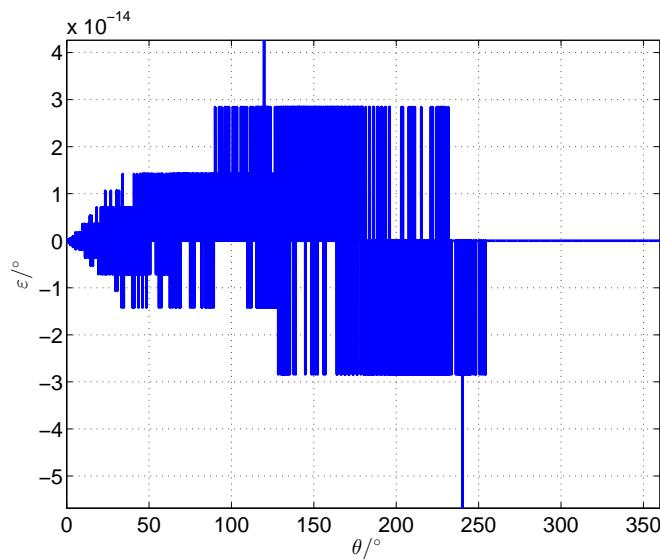
V tem poglavju so predstavljeni rezultati simulacij z upoštevanjem dveh Hall-ovih sond in uporabo linearne aproksimirane Z-komponente gostote magnetnega pretoka. Prikazan je potek napake pri različnih izmikih, ter potek amplitud posameznih harmonikov napake v odvisnosti od ekscentričnosti. Hall-ovi sondi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

5.1 Napaka brez vplivov ekscentričnost

Signala B_{sin} in B_{cos} pomerjena v stanju brez ekscentričnosti imata enaki amplitudi in sta fazno zamaknjena za 90° ter brez enosmernih komponent. Napaka ε , ki se pojavi pri izračunu je le numerična napaka funkcije *atan2d()*; (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 ε pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti

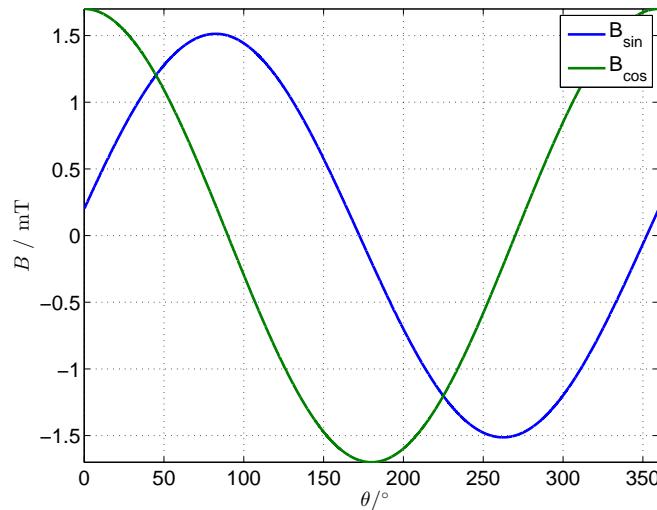
5.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

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

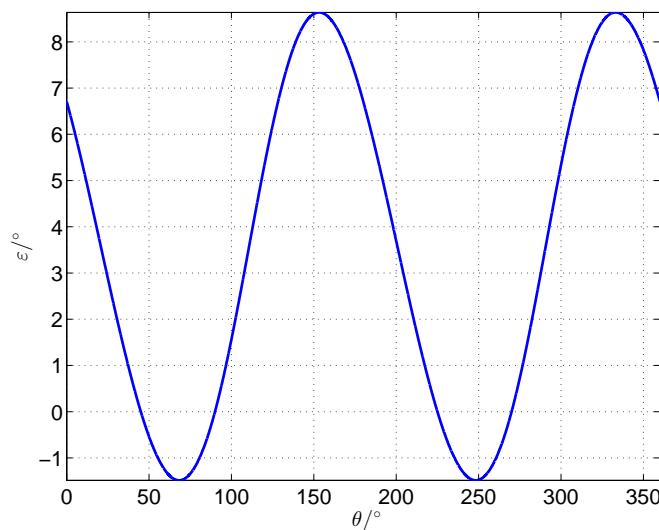
$$B_{sin} = \sqrt{(r_0 + \Delta y_s)^2 + \Delta x_s^2} \sin(\theta + \text{atan} \frac{\Delta x_s}{\Delta y_s + r_0}) - \Delta x_d \quad (5.8)$$

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

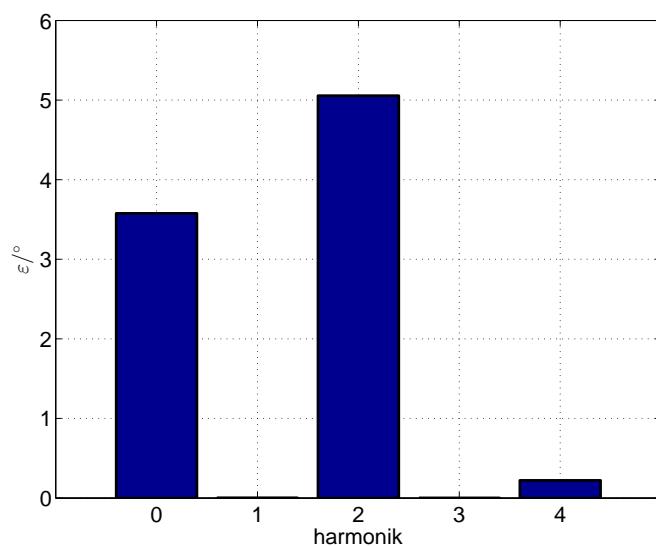
Ob upoštevanju le statične ekscentričnosti v smeri x se iz (5.8) razbere linearja sprememba amplitude signala B_{cos} . Signalu B_{sin} se poveča amplituda, vendar je sprememba manjša kot pri signalu B_{cos} . Signalu B_{sin} se spremeni tudi faza. Potek signalov B_{sin} in B_{cos} pri 0,2mm statične 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 ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.7: Amplitude harmonikov napake ε 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} , δ_{sin} , Off_{sin} , A_{cos} , δ_{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 ε 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 potek 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).

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

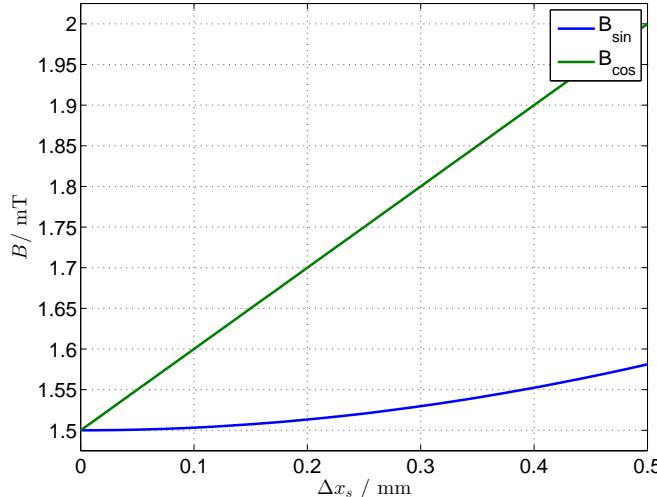
$$\begin{aligned} A_{sin}(\Delta x_s) = & -3,38 \cdot 10^{-2}\Delta x_s^3 + 3,44 \cdot 10^{-1}\Delta x_s^2 - 1,09 \cdot 10^{-3}\Delta x_s \\ & + 1,50 \end{aligned} \quad (5.14)$$

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

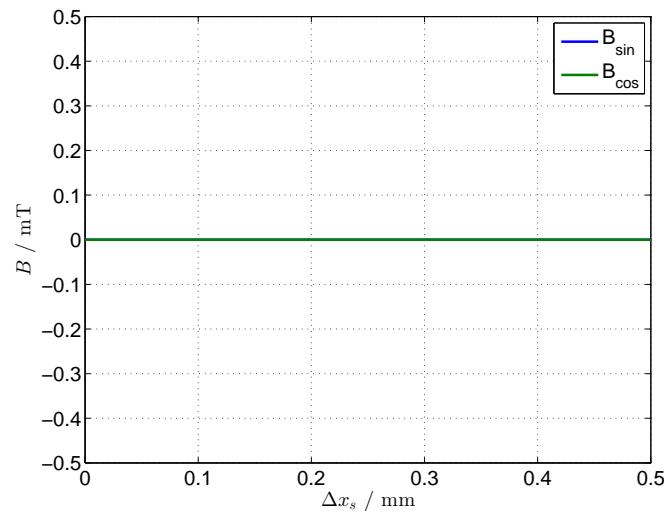
$$Off_{cos}(\Delta x_s) = 0\Delta x_s^3 + 0\Delta x_s^2 + 0\Delta x_s + 0 \quad (5.16)$$

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

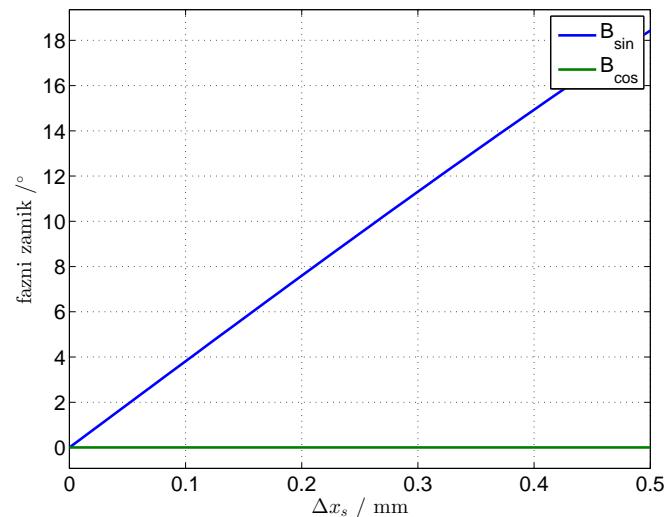
$$\begin{aligned} \delta_{cos}(\Delta x_s) = & -2,44 \cdot 10^{-15}\Delta x_s^3 + 4,14 \cdot 10^{-15}\Delta x_s^2 - 1,07 \cdot 10^{-15}\Delta x_s \\ & - 2,48 \cdot 10^{-16} \end{aligned} \quad (5.18)$$



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



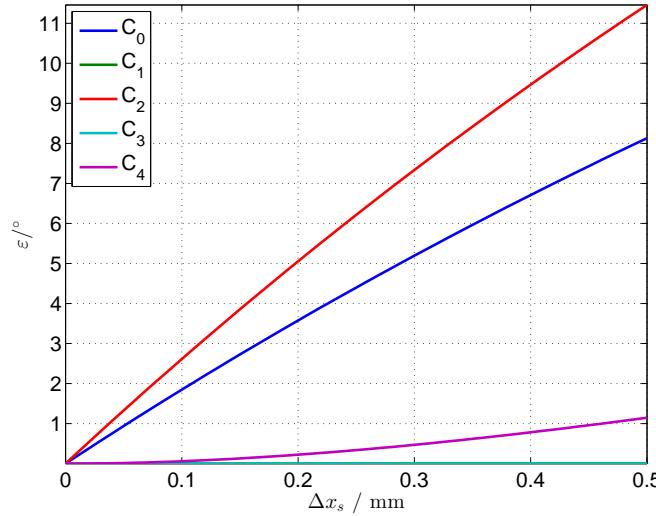
Slika 5.9: Enosmerna komponenta B_{sin} in B_{cos} pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



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}

Sprememb signalov B_{sin} in B_{cos} se odrazita tudi pri izračunu kota φ in napake ε . 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 ε 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):

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

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

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

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

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

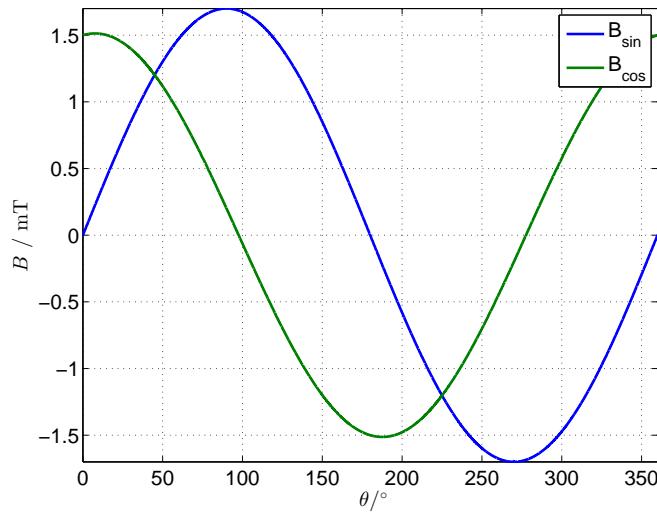
Rezultati so pričakovani. Četrти harmonik se po poteku nekoliko razlikuje. To je posledica razvite vrste okoli izhodišča. Z razvojem četrtega harmonika okoli točke 0,25mm (5.29), je iz izraza bolj razvidno prilagajanje harmonika.

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

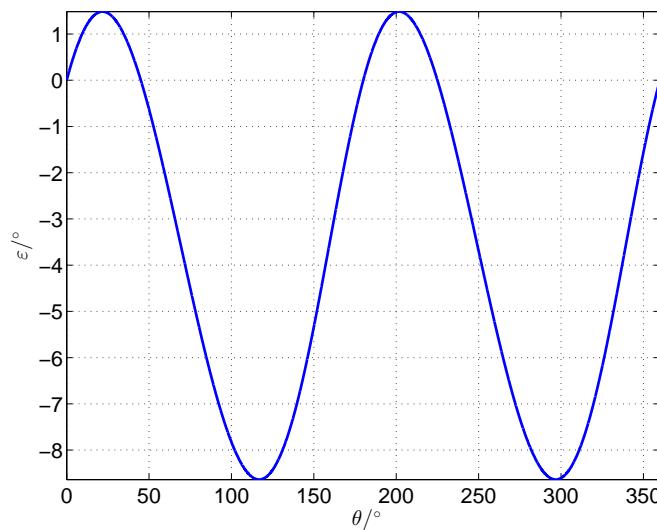
5.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

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).

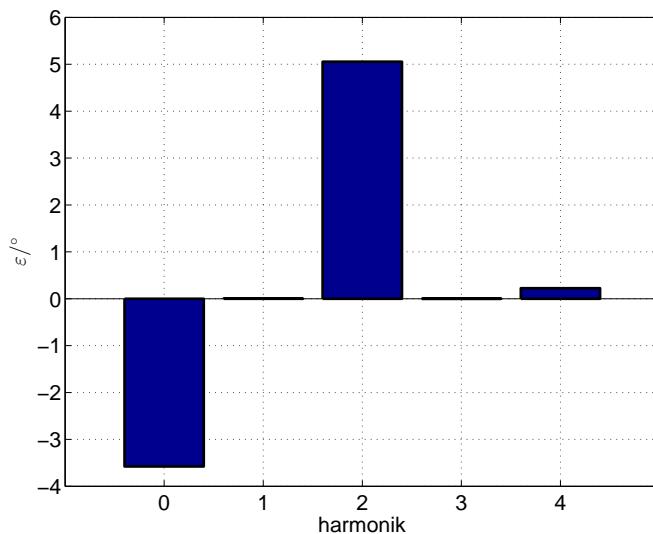
Napaka je prikazana na sliki 5.13. Sestavlja jo negativna enosmerna komponenta in izrazit drugi harmonik. Iz napake razvite v vrsto (slika 5.14) je vidna enaka amplituda drugega harmonika, kot pri ekscentričnosti v smeri x. Enosmerna komponenta se razlikuje v predznaku.



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 ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 5.14: Amplitude harmonikov napake ϵ 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.

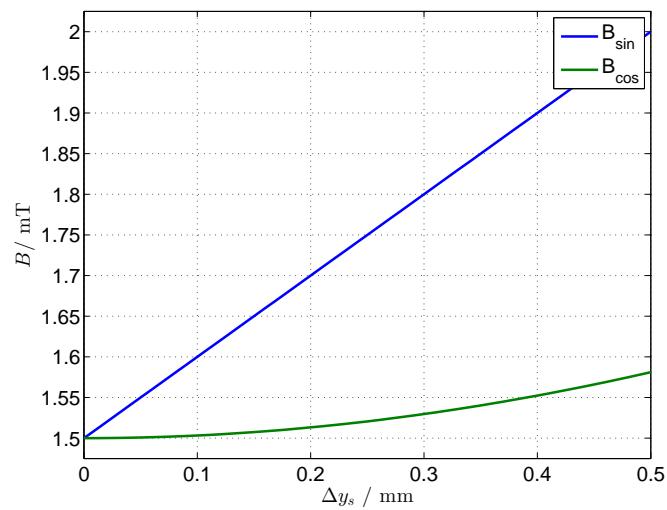
$$C_0(\Delta y_s) = -1,41\Delta y_s^3 + 6,37\Delta y_s^2 - 1,91 \cdot 10\Delta y_s \quad (5.41)$$

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

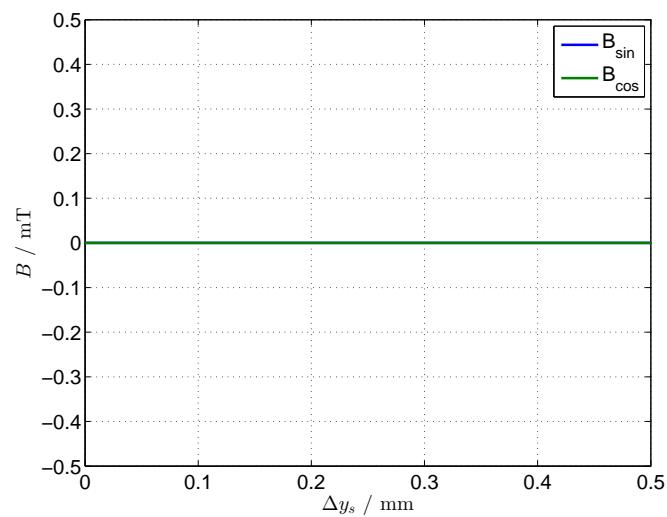
$$C_2(\Delta y_s) = 1,50\Delta y_s^3 - 9,00\Delta y_s^2 + 2,70 \cdot 10\Delta y_s \quad (5.43)$$

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

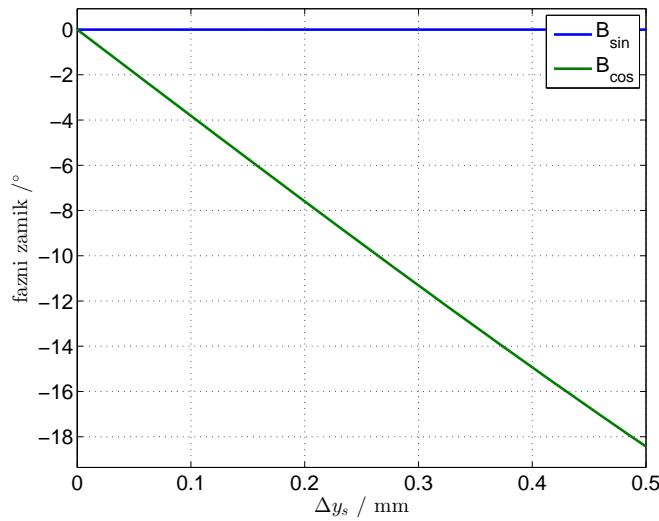
$$C_4(\Delta y_s) = -4,24\Delta y_s^3 + 6,37\Delta y_s^2 \quad (5.45)$$



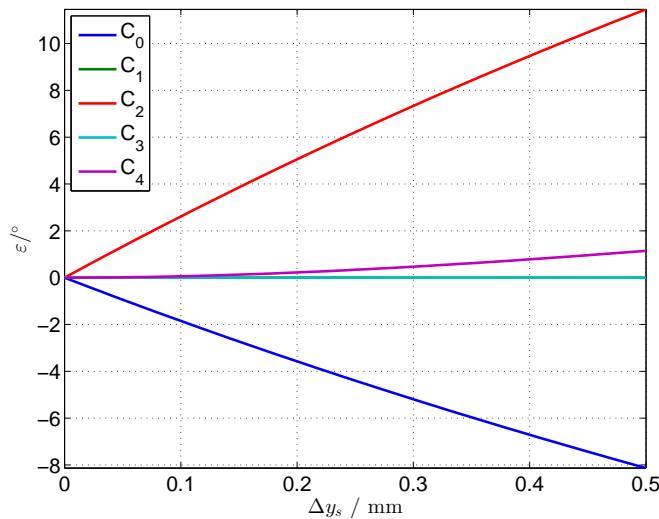
Slika 5.15: Amplituda osnovnega harmonika signalov B_{\sin} in B_{\cos} pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



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



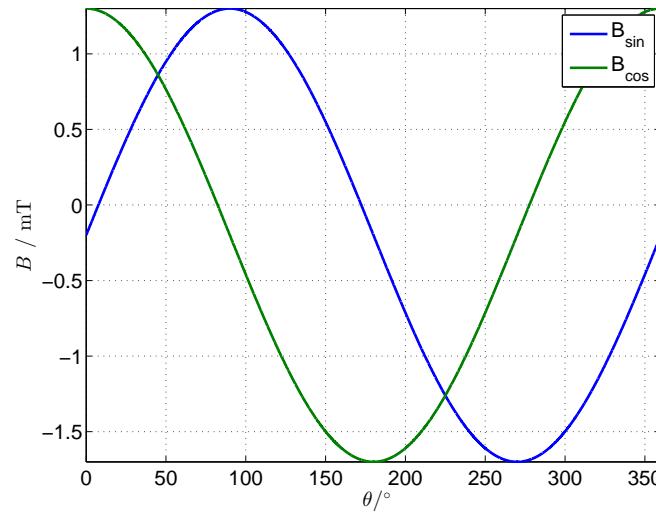
Slika 5.17: Fazni zamik B_{\sin} in B_{\cos} pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y glede na idealna signala B_{\sin} in B_{\cos}



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

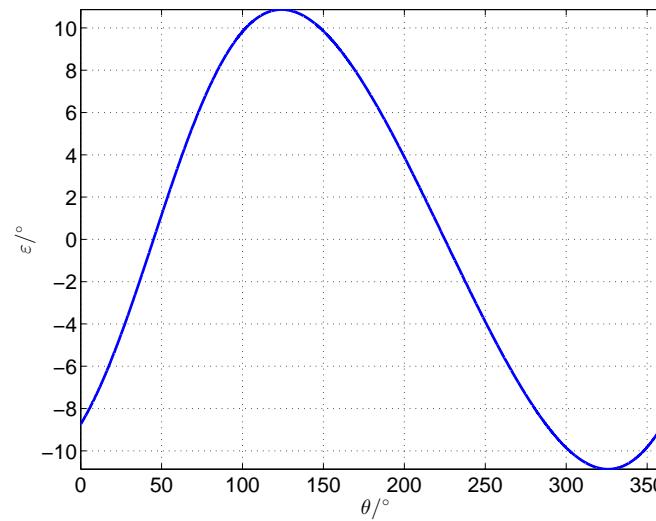
5.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x osi

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



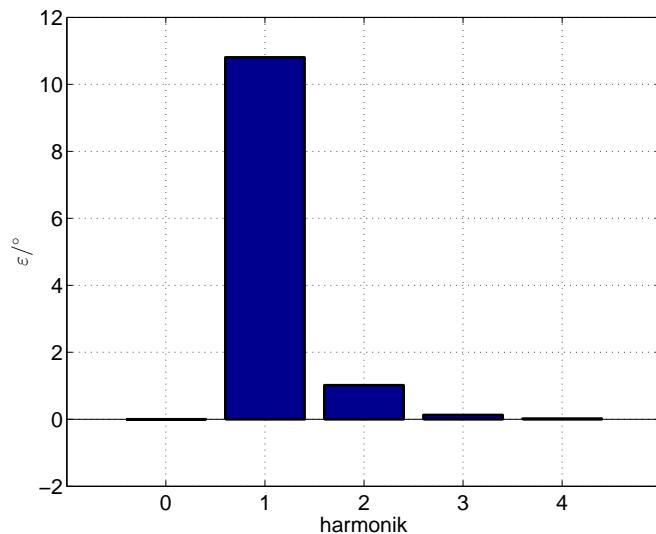
Slika 5.19: B_{sin} in B_{cos} pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

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 ε 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 ε 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.

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

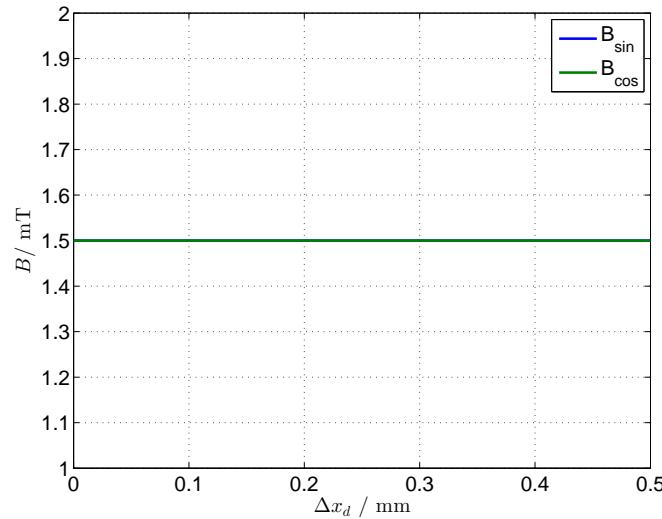
$$A_{sin}(\Delta x_d) = -8,33 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^3 + 5,76 \cdot 10^{-14} \Delta x_d^2 - 8,58 \cdot 10^{-15} \Delta x_d + 1,50 \quad (5.47)$$

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

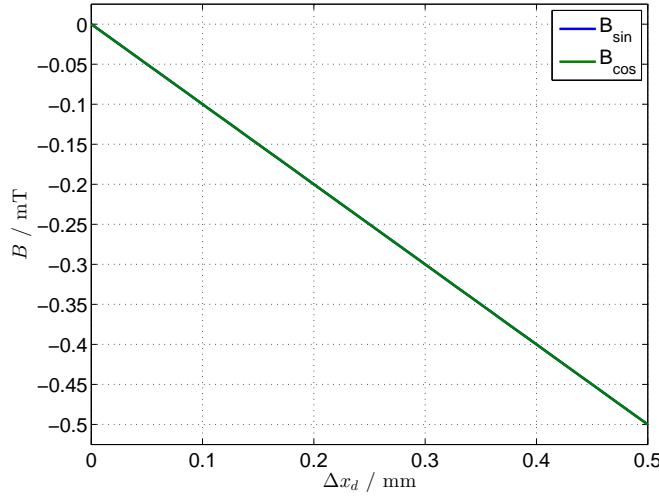
$$Off_{cos}(\Delta x_d) = 3,78 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^3 - 2,47 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^2 - 10,00 \cdot 10^{-1} \Delta x_d - 2,53 \cdot 10^{-17} \quad (5.49)$$

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

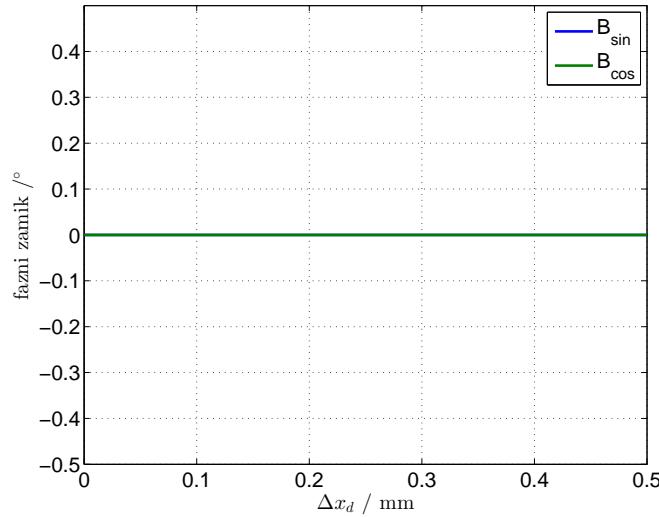
$$\delta_{cos}(\Delta x_d) = 2,72 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^3 + 1,33 \cdot 10^{-15} \Delta x_d^2 - 1,00 \cdot 10^{-15} \Delta x_d - 2,16 \cdot 10^{-16} \quad (5.51)$$



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



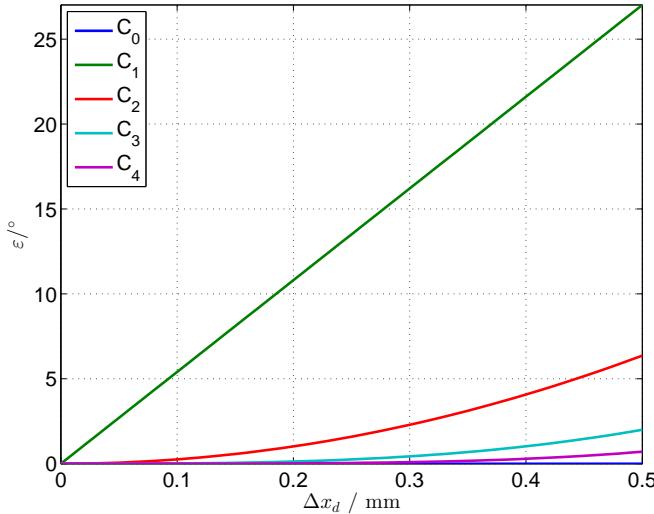
Slika 5.23: Enosmerna komponenta B_{\sin} in B_{\cos} pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



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 ε 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.

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

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

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

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

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

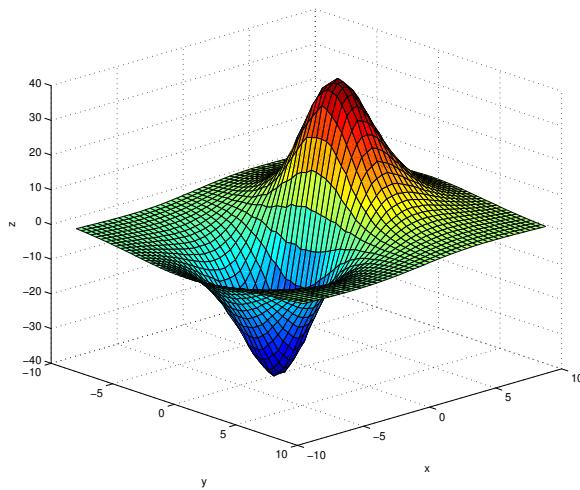
5.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y in sprememba razdalje Hallovih sond od magneta

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



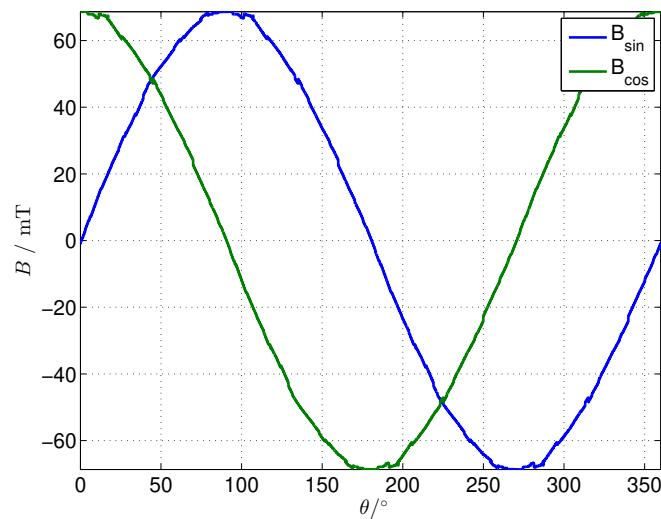
Slika 6.1: Model Z- komponente gostote magnetnega polja uporabljen v simulacijah

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) -

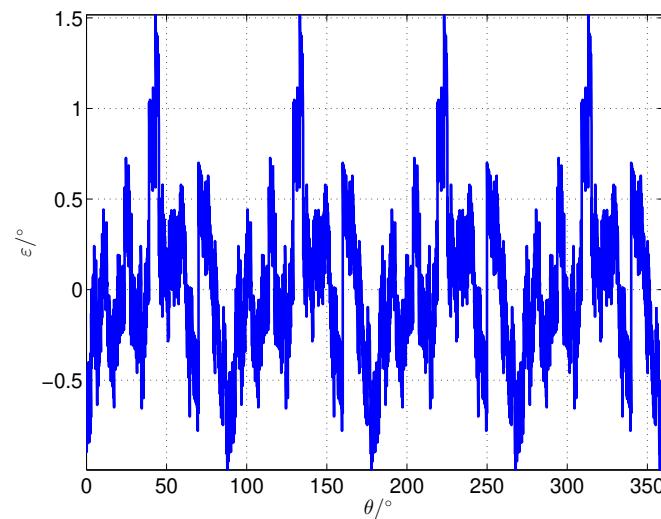
(5.5). Prvo je bila izračunana relativna lokacija sonde glede na magnet. Nato se je vrednost Z-komponente gostote magnetnega polja aproksimiralo s poljem, definiranim v geometrijsko najbližji točki definicijskega območja. Pomerjeno polje nasproti ležečih sond se je nato odštelo in vstavilo v funkcijo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

6.1 Napaka brez vplivov ekscentričnosti

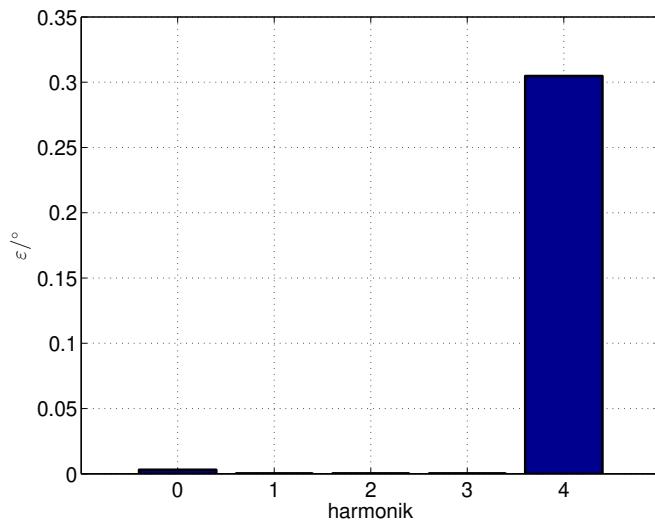
Kljub idealni montaži, B_{sin} in B_{cos} nista idealna signala. Signala vsebujeta višje harmonike (Slika 6.2), ki niso opazno izraziti. Višji harmoniki se izrazijo v napaki (slika 6.3). Opazi se grob potek četrtega harmonika. V napaki so špice (primer 220°), ki so posledica načina izračuna Z-komponente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



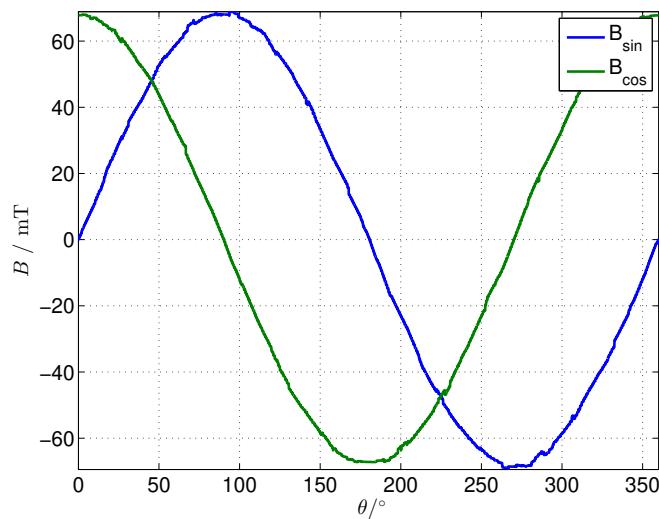
Slika 6.3: Napaka ε pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti



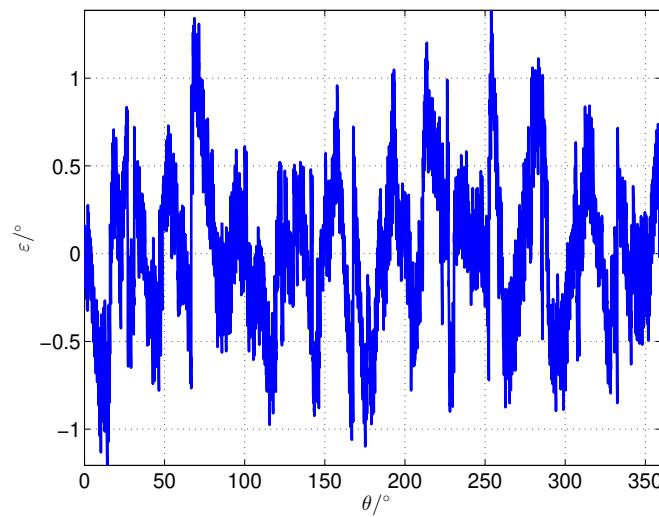
Slika 6.4: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem brez ekscentričnosti

6.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

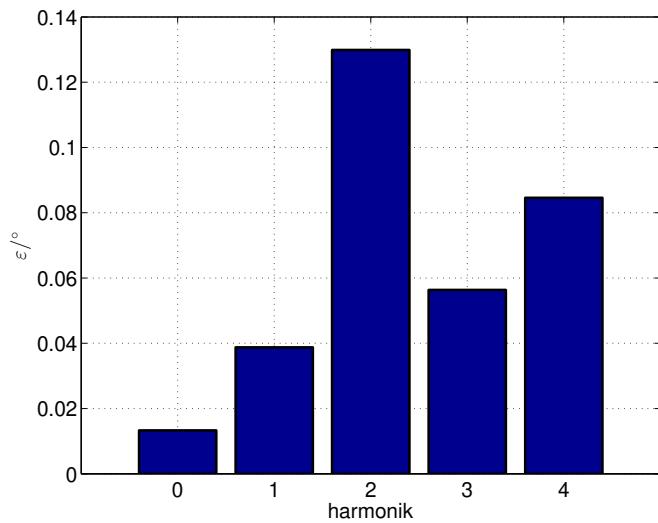
Po pričakovanjih se bo spremenila amplituda B_{sin} in B_{cos} signala ter zmanjšal njun fazni zamik (izraza (5.2) in 5.3). Na sliki 6.5 se opazi zmanjšano amplitudo signala B_{cos} . Na sliki 6.6 je prikazana napaka ε . Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 6.7) prikaže predvideno povišanje amplitudo 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



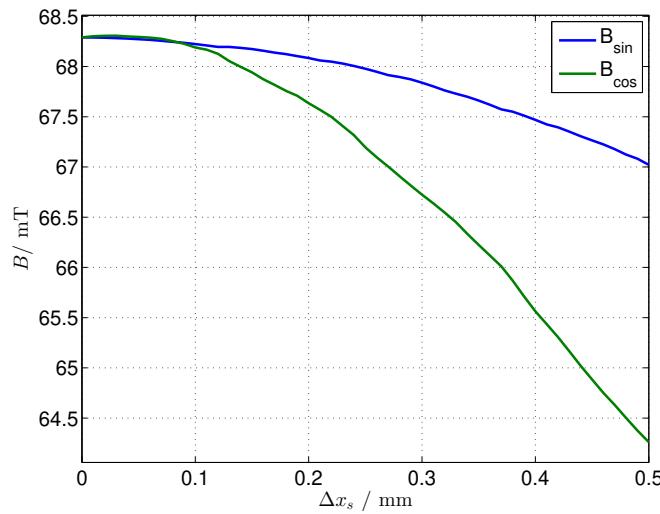
Slika 6.6: Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x



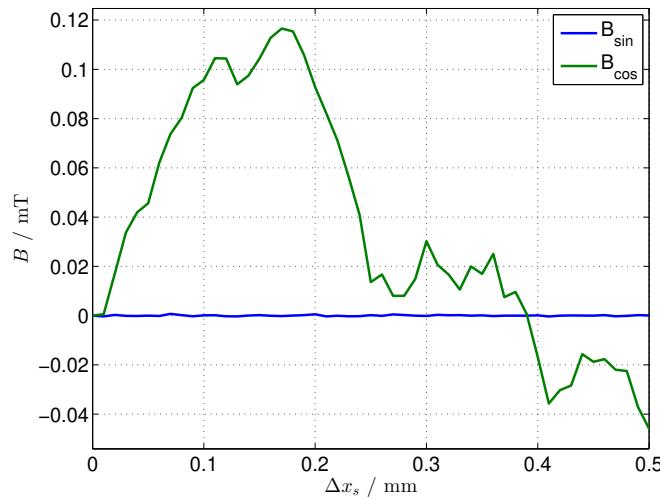
Slika 6.7: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20mm statične ekscentričnosti v smeri x

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.

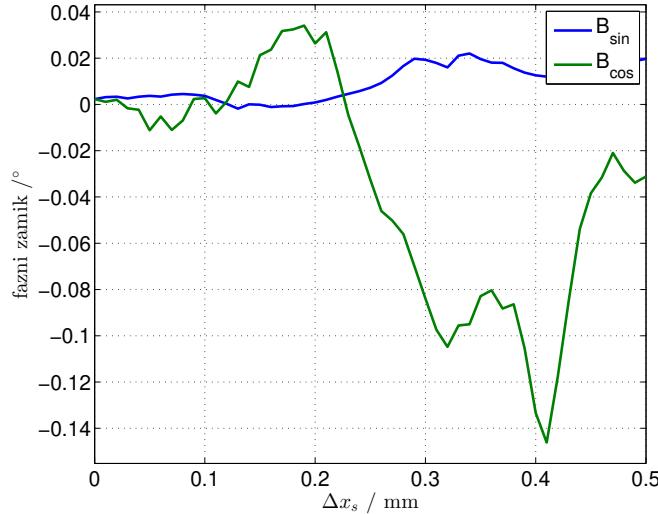


Slika 6.8: Amplituda osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



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.

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

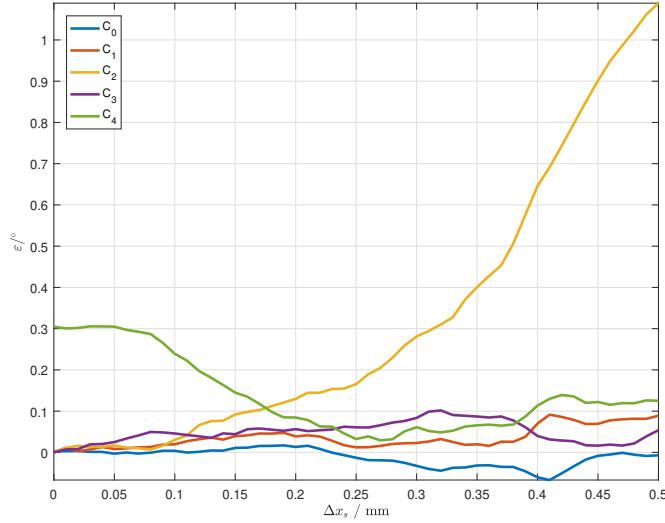
$$A_{sin}(\Delta x_s) = 1,84 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 5,17 \Delta x_s^2 + 2,24 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 6,83 \cdot 10 \quad (6.2)$$

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

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

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

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



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

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

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

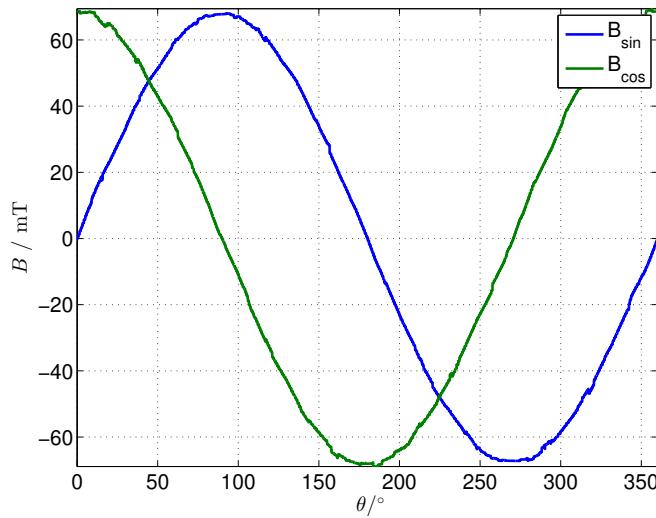
$$C_2(\Delta x_s) = 1,05 \cdot 10\Delta x_s^3 - 1,52\Delta x_s^2 + 4,53 \cdot 10^{-1}\Delta x_s - 5,39 \cdot 10^{-5} \quad (6.9)$$

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

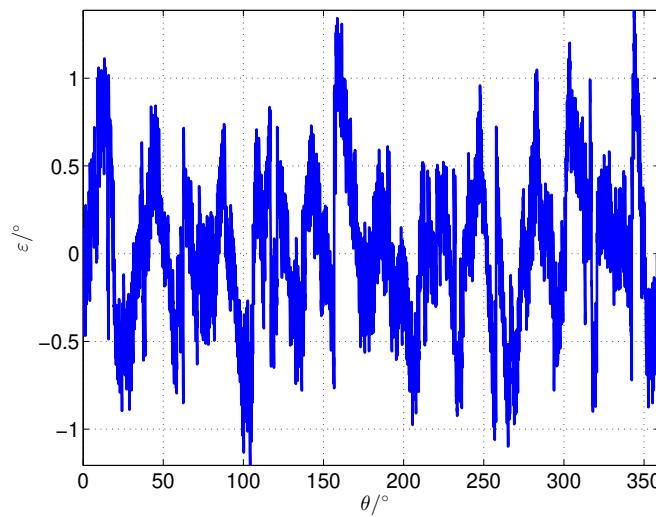
$$C_4(\Delta x_s) = 1,24\Delta x_s^3 + 2,20\Delta x_s^2 - 1,80\Delta x_s + 3,64 \cdot 10^{-1} \quad (6.11)$$

6.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

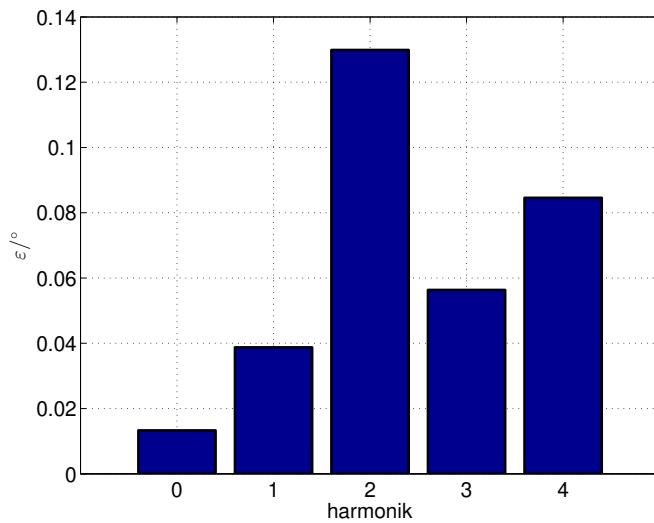
Pri statični ekscentričnosti v smeri y, je pričakovano glede na prejšnje podpoglavje, znižanje amplitude B_{sin} (slika 6.12). Napaka ε (slika 6.13) je enake oblike kot je bila pri simulacijah statične ekscentričnosti v smeri x (slika 6.6). Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 6.7) potrdi pričakovanja.



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 ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.14: Amplitude harmonikov napake ε 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.

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

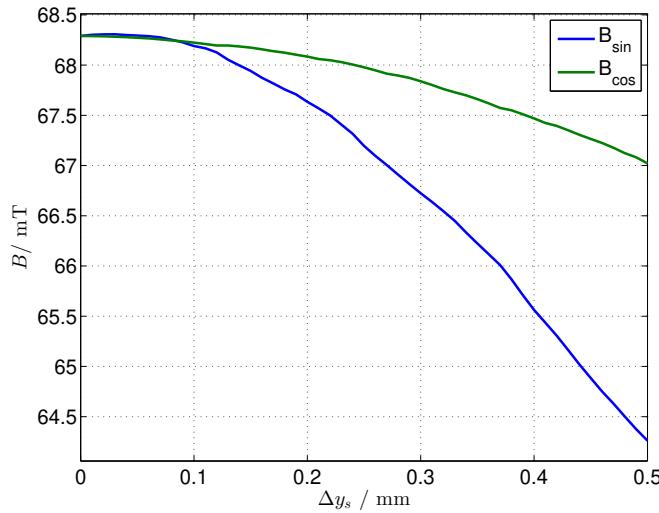
$$A_{sin}(\Delta y_s) = 1,27 \cdot 10\Delta y_s^3 - 2,50 \cdot 10\Delta y_s^2 + 1,16\Delta y_s + 6,83 \cdot 10 \quad (6.13)$$

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

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

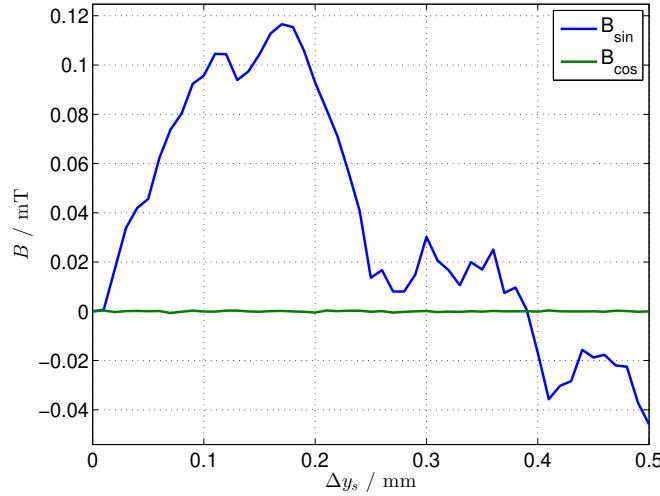
$$A_{cos}(\Delta y_s) = 1,84 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 - 5,17\Delta y_s^2 + 2,24 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 6,83 \cdot 10 \quad (6.16)$$

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

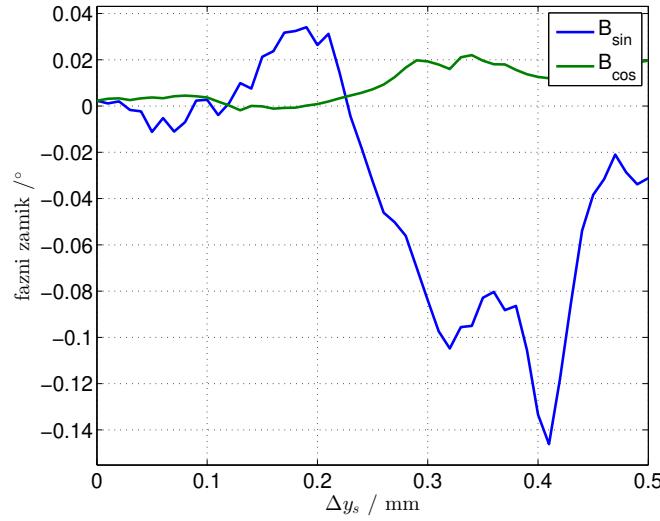


Slika 6.15: Amplituda osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

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}

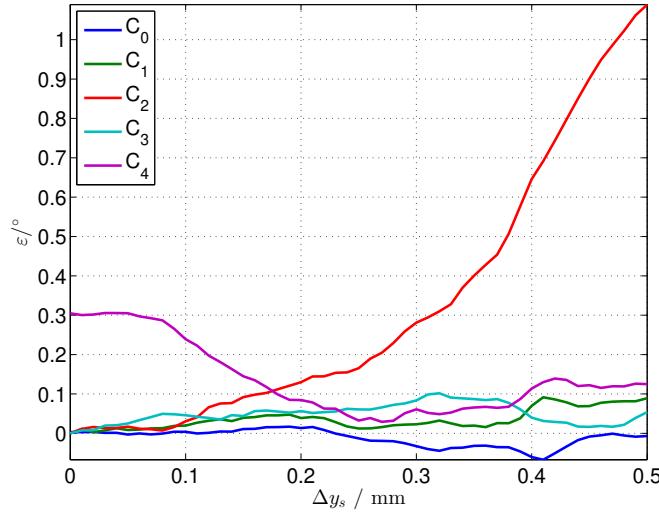
$$C_0(\Delta y_s) = 5,02\Delta y_s^3 - 3,63\Delta y_s^2 + 5,93 \cdot 10^{-1}\Delta y_s - 1,47 \cdot 10^{-2} \quad (6.18)$$

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

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

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

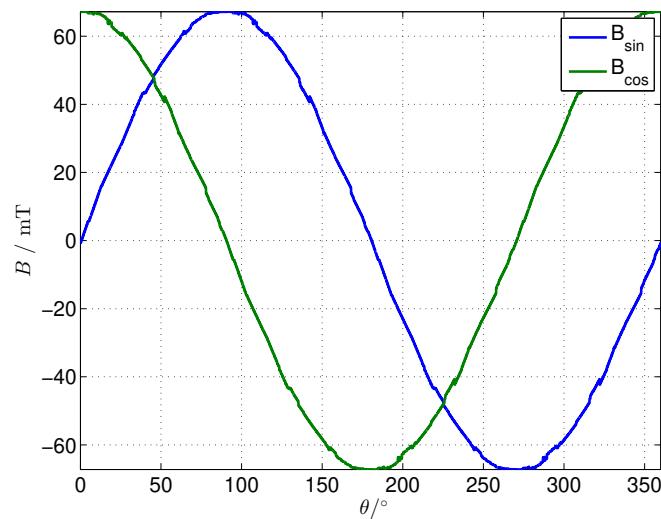
$$C_4(\Delta y_s) = 1,24\Delta y_s^3 + 2,20\Delta y_s^2 - 1,80\Delta y_s + 3,64 \cdot 10^{-1} \quad (6.22)$$



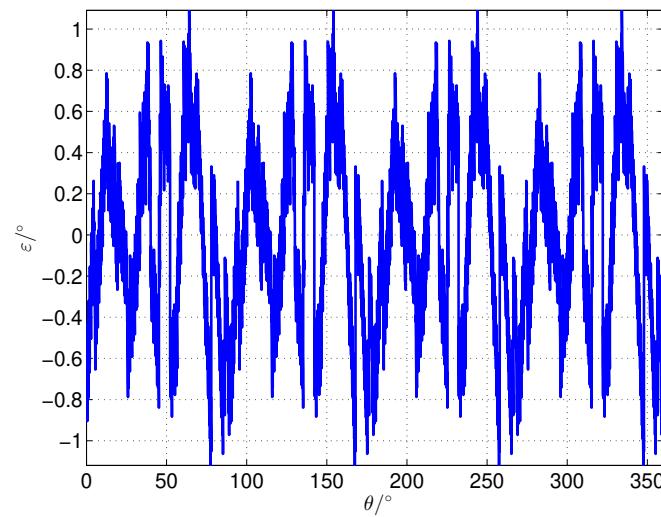
Slika 6.18: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z realnim poljem

6.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x

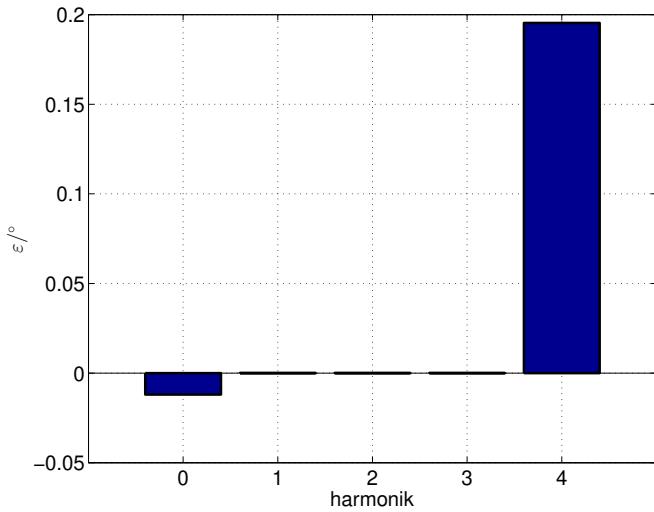
Vpliv dinamične ekscentričnosti v B_{sin} in B_{cos} je pričakovani v obliki enosmerne komponente, vendar se zaradi diferencialnega zajema odštejeti. Na sliki 6.19 sta B_{sin} in B_{cos} , kjer ni vidnih razlik. V napaki (slika 6.20) tudi ni posebnosti, razvoj napake v Fourierovo prikaže majšo spremembo (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 ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



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

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

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

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

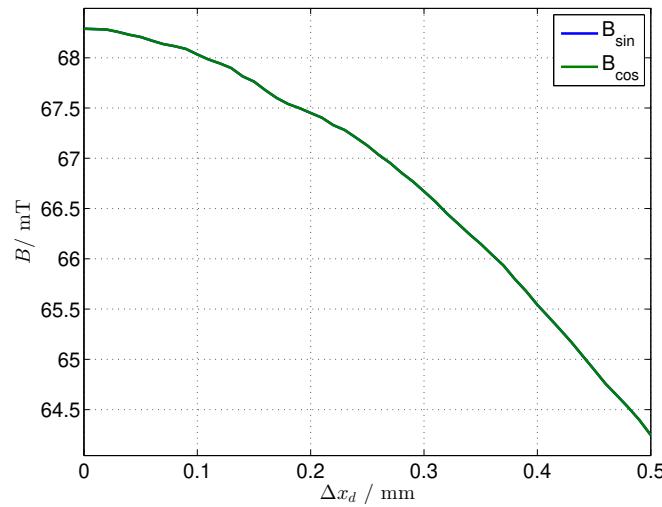
$$A_{sin}(\Delta x_d) = 2,56 \cdot 10^{-2}\Delta x_d^3 - 1,33 \cdot 10\Delta x_d^2 - 1,52\Delta x_d + 6,83 \cdot 10 \quad (6.24)$$

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

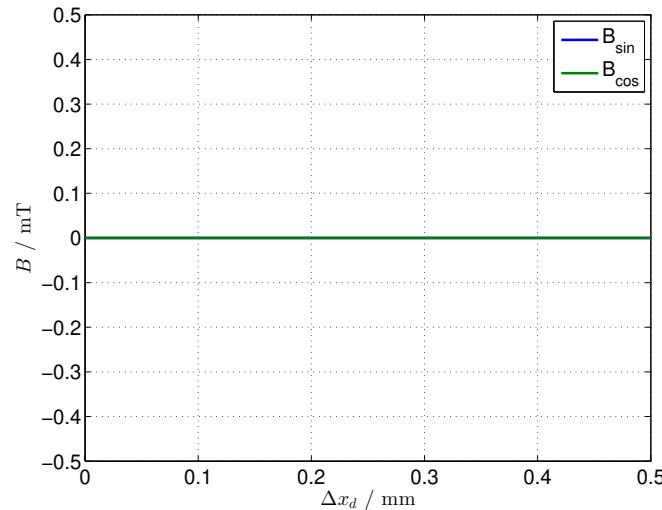
$$Off_{cos}(\Delta x_d) = 0\Delta x_d^3 + 0\Delta x_d^2 + 0\Delta x_d + 0 \quad (6.26)$$

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

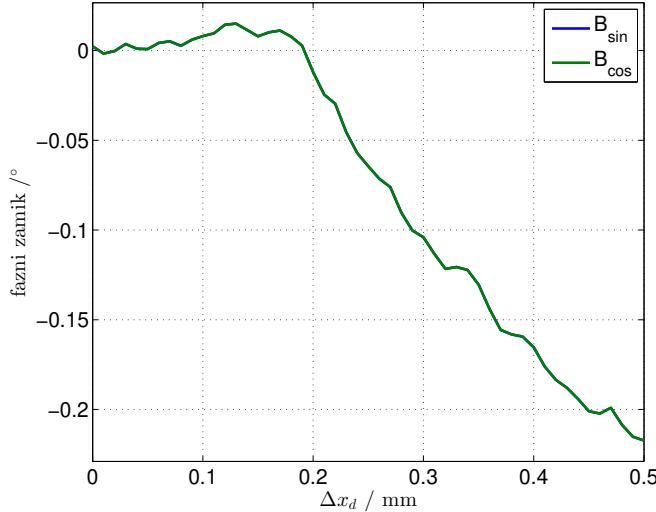
$$\delta_{cos}(\Delta x_d) = 5,79\Delta x_d^3 - 5,26\Delta x_d^2 + 7,87 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,57 \cdot 10^{-2} \quad (6.28)$$



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.

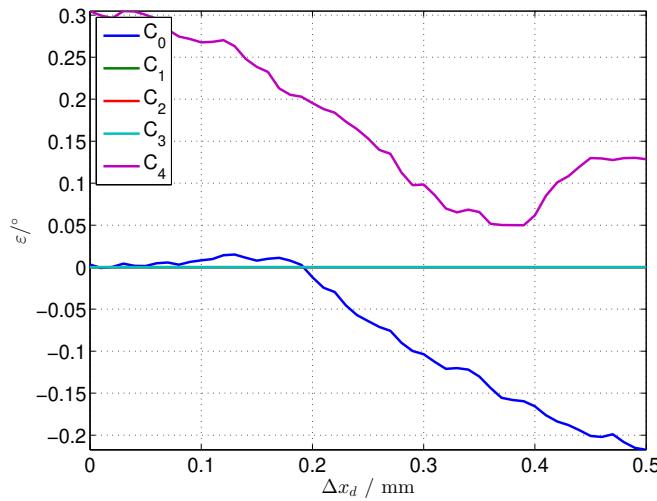
$$C_0(\Delta x_d) = 5,74\Delta x_d^3 - 5,22\Delta x_d^2 + 7,77 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,49 \cdot 10^{-2} \quad (6.29)$$

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

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

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

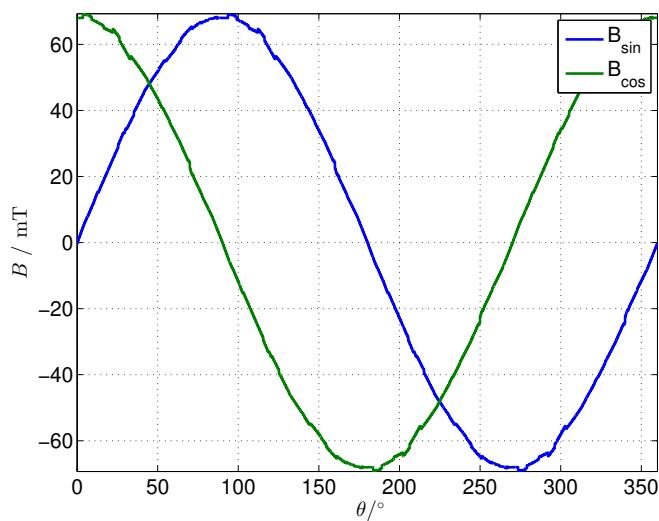
$$C_4(\Delta x_d) = 1,06 \cdot 10\Delta x_d^3 - 6,51\Delta x_d^2 + 3,46 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 2,96 \cdot 10^{-1} \quad (6.33)$$



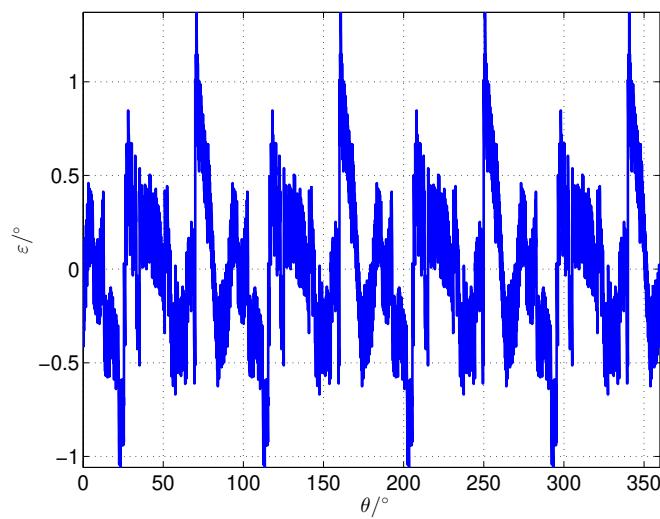
Slika 6.25: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od dinamične ekscentričnosti v smeri x pri simulacijah z realnim poljem

6.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y

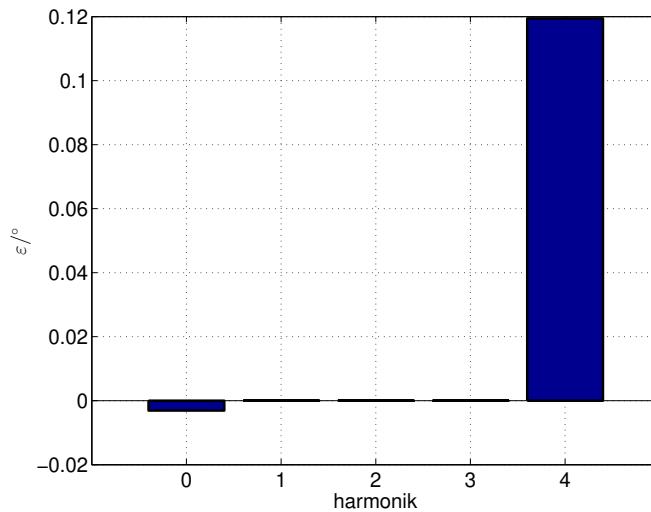
V simulacijah z linearno aproksimacijo polja signala B_{sin} in B_{cos} ter posledično tudi napaka, ni bila odvisna od dinamične ekscentričnosti v smeri y. Tu je bila kljub temu opravljena simulacija. Rezultati so podobni dinamični ekscentričnosti v smeri x. Spremembe v B_{sin} in B_{cos} ni opaziti (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 ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 6.28: Amplitude harmonikov napake ϵ 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 spremjanju di-

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

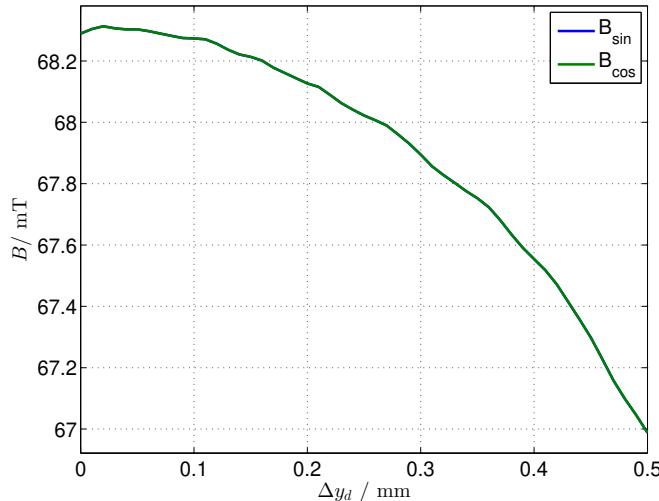
$$C_0(\Delta y_d) = 6,53\Delta y_d^3 - 5,39\Delta y_d^2 + 8,75 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 2,59 \cdot 10^{-2} \quad (6.40)$$

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

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

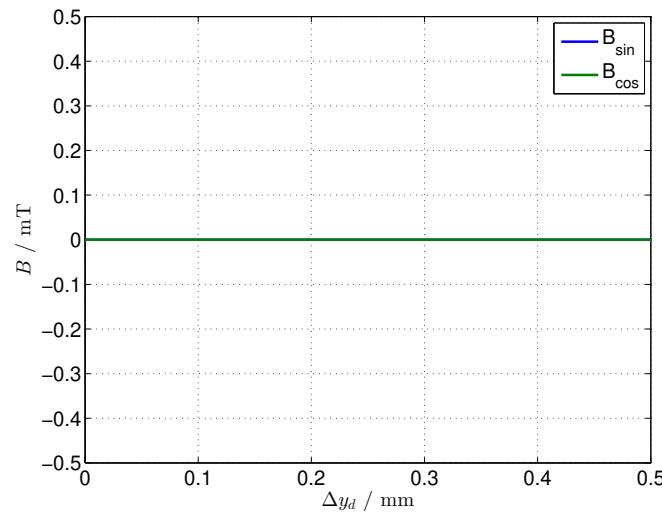
$$C_3(\Delta y_d) = -9,53 \cdot 10^{-15}\Delta y_d^3 + 7,01 \cdot 10^{-15}\Delta y_d^2 - 1,24 \cdot 10^{-15}\Delta y_d + 7,33 \cdot 10^{-16} \quad (6.43)$$

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

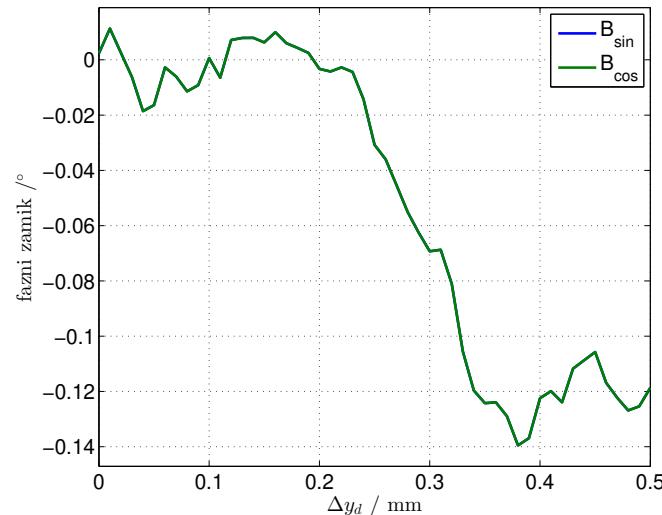


Slika 6.29: Amplituda osnovnega harmonika B_{\sin} in B_{\cos} pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y. Poteka amplitud sta enaka in se na sliki prekrivata.

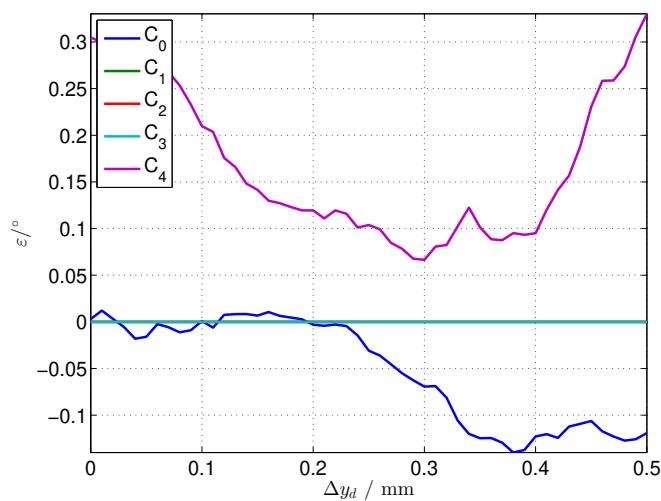
V tem poglavju so bile prikazane simulacije z uporabo realnega polja, ki ga merijo Hall-ove sonde. Rezultati podajo manjšo napako kot pri simulacijah z aproksimiranim linearnim magnetnim poljem. Z diferencialnim merjenjem, se odstrani enosmerno komponento v signalih B_{\sin} in B_{\cos} .



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 ε od dinamične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z realnim poljem

7 Meritve

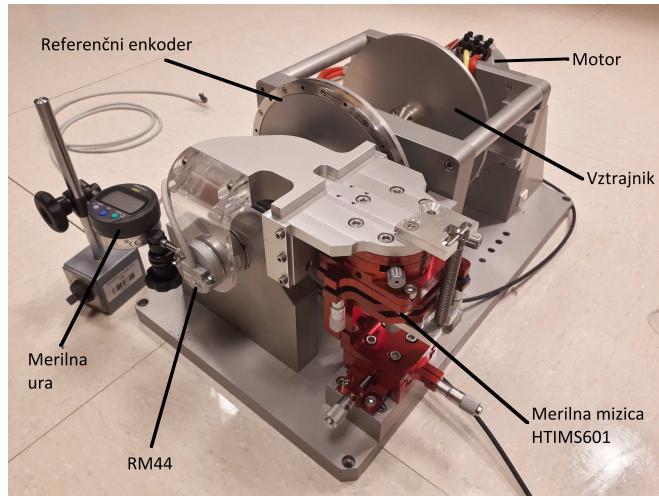
Simulacije so prikazale okvirne poteke B_{sin} in B_{cos} signalov ter napake ob posameznih ekscentričnostih. Na merilni napravi so bile opravljene meritve ekscentričnosti. V poglavju je opisana merilna naprava, zajem podatkov ter izvedba meritvev.

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. Mehanski del merilne naprave je prikazan 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 translacijskih osi, 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 spremembo. S spremembjo vrtenja rotacijskih vijakov, se je zaradi ročice na katero je pritrjen senzor, senzor zarotira in hkrati tudi premakne iz dotedanje lege. S spremembjo rotacije je potrebno popraviti tudi



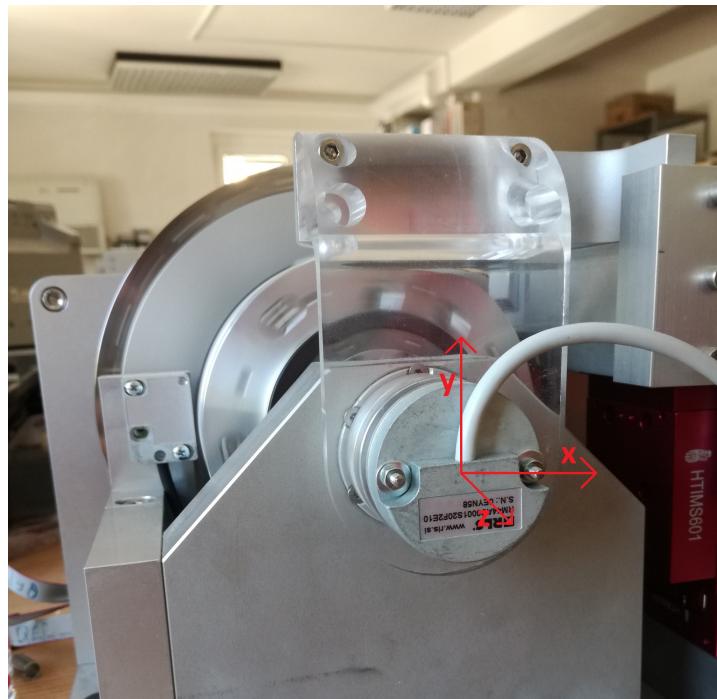
Slika 7.1: Dinamično ekscentričnost se lahko spreminja le v eni smeri



Slika 7.2: Mehanski del merilne naprave

nastavitev 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 na minimalne.

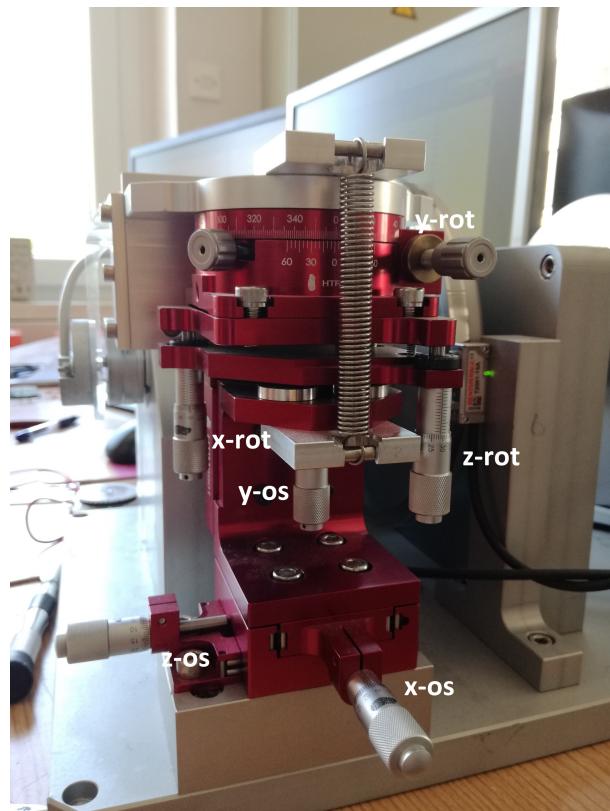


Slika 7.3: Postavitev testnega mesta

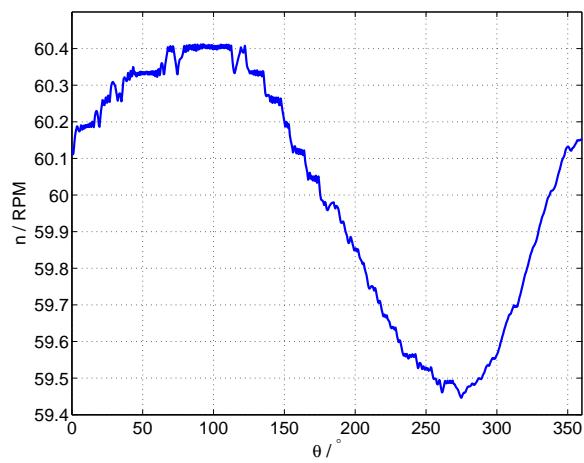
7.2 Zajem podatkov

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. Definicijsko 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. Definicijsko območje B_{sin} in B_{cos} signala se gibljetva med $\pm 0,5$. Hitrost in napaka sta izračunana iz zajetih signalov. Podatki so v obliki enega paketa poslani s

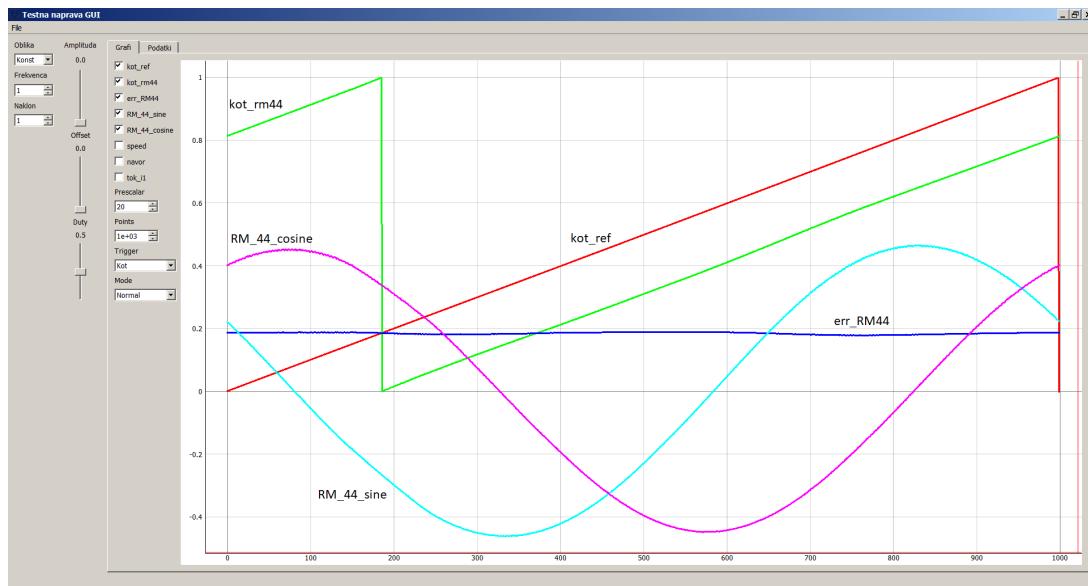


Slika 7.4: Naprava za nastavljanje statične ekscentričnosti

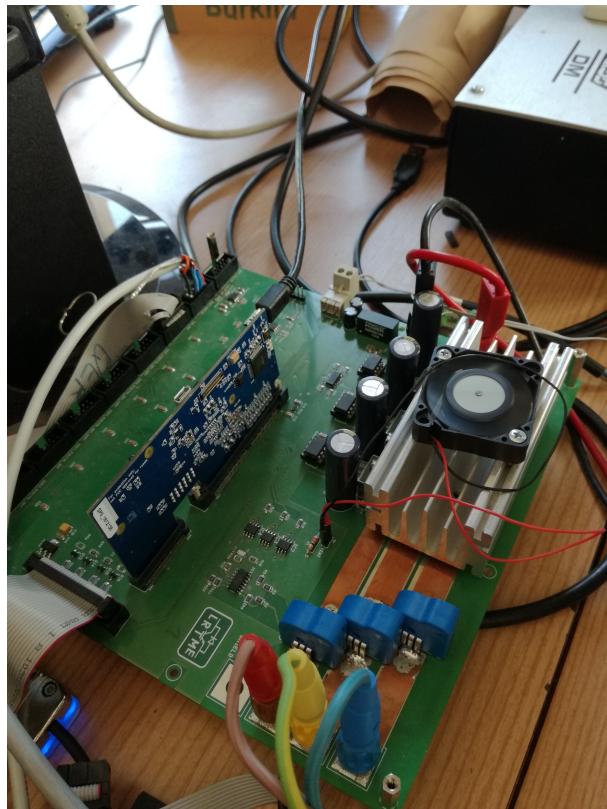


Slika 7.5: Potek hitrosti od zasuka

krmilne plošče na 1 sekundo. Pri frekvenci vrtenja 1 Hz, grafični vmesnik prikaže en obrat. Podatke se lahko izvozi v obliki .csv datoteke in nato poljubno obdela. Na sliki 7.6 je prikazan sinusni signal prikazan kot da je zamaknjen za 180° . 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



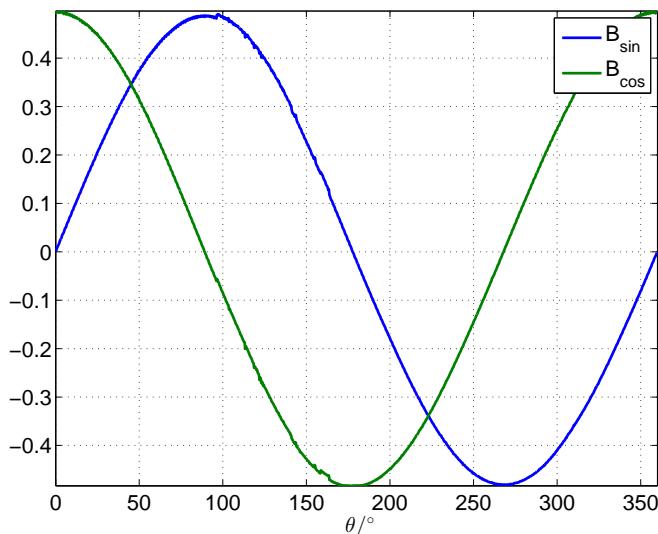
Slika 7.7: Elektronika za krmiljenje pogona in zajem podatkov z dajalnikov zasuka

7.3 Senzor v izhodiščni legi

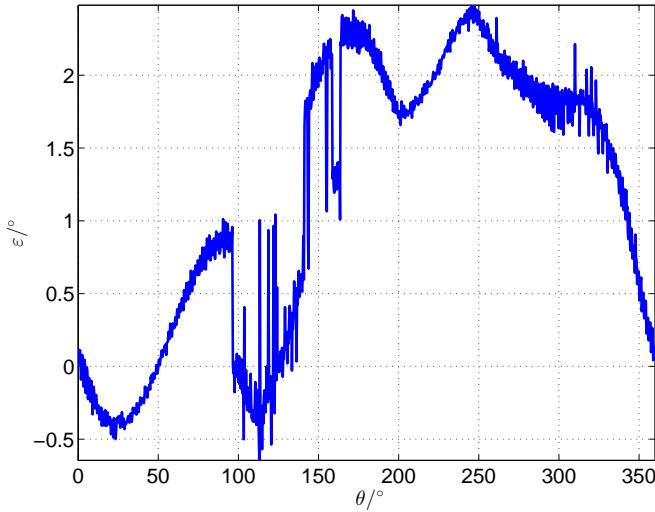
Senzor in magnet se lahko gibljeta, najprimernejša, izhodiščna lega, ni definirana. Z merilno urico Mitutoyo 543-391B se je dinamično ekscentričnost magneta nastavilo na najmanjšo. Oplet z merilno urico je bil pomerjen $\pm 3\mu\text{m}$. S prilaganjem vijakov HTIMS601, opazovanjem B_{sin} in B_{cos}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

Na sliki 7.8 sta prikazana B_{sin} in B_{cos} . Enosmerni komponenti sta prisotni v obeh signalih, posledično se izrazi v napaki prvi harmonik (slika 7.9). V napaki se pojavi med 95° in 140° preskok napake. Vzroka nisem raziskoval. Z razvojem na-

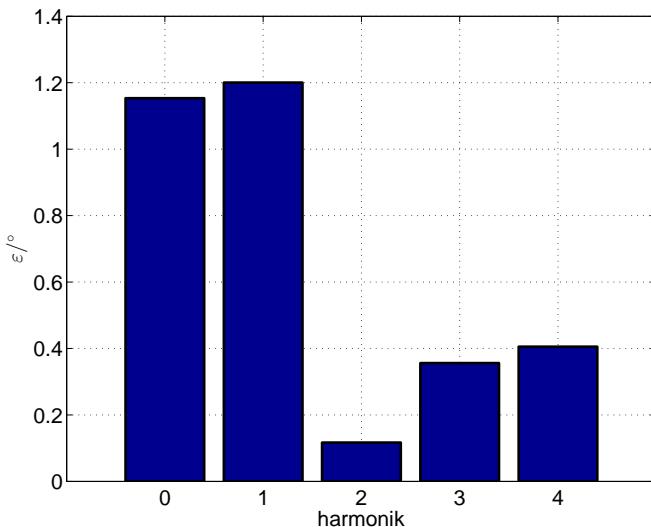
pake v Fourierovo vrsto (slika 7.10) vidimo velikosti posameznih amplitud napake. Enosmerna komponenta je posledica sofaznih zamikov obeh signalov B_{sin} in B_{cos} . Prvi harmonik je posledica ensmernih komponent B_{sin} in B_{cos} . Z matematično obdelavo signalov B_{sin} in B_{cos} sem enosmerni komponenti odstranil, vendar se prvi harmonik napake še vedno izrazi. Prvi harmonik napake je odvisen tudi od drugega harmonika v signalih B_{sin} in B_{cos} . Z odstranitvijo tudi drugega harmonika iz signalov B_{sin} in B_{cos} je bil prvi harmonik v napaki odstranjen. Signala B_{sin} in B_{cos} med izvajanjem meritev ne bosta 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 ε pomerjena v izhodiščni legi

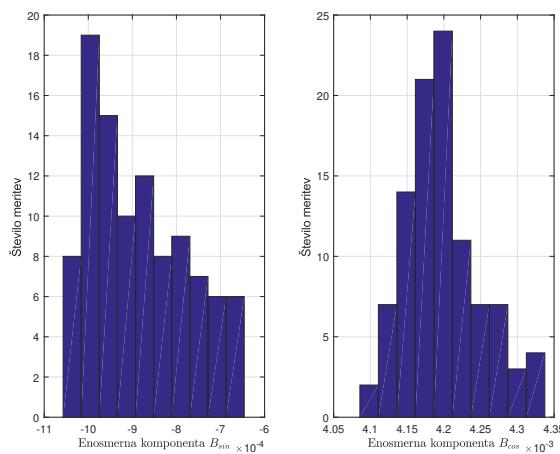


Slika 7.10: Amplitudo harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri meritvah v izhodiščni legi

7.3.1 Meritve v izhodiščni legi

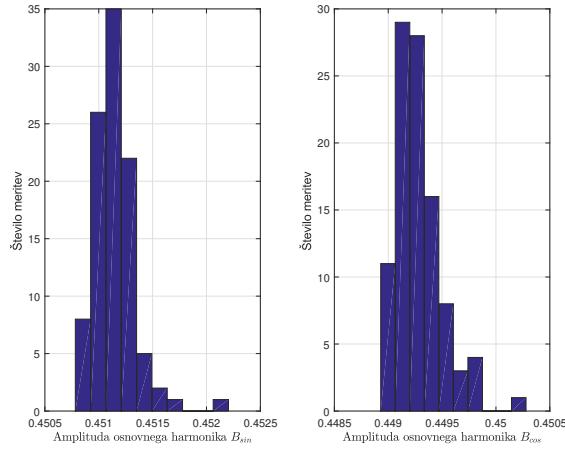
V izhodiščni legi je bilo opravljenih več meritev. Osredotočil sem se na enosmerni komponenti in amplitudi osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} . Porazdelitev

enosmerne komponente signala B_{sin} in B_{cos} je prikazana na sliki 7.11. Srednja vrednost enosmerne komponente B_{sin} je $-8,85 \cdot 10^{-4}$, standardna deviacija je $1,08 \cdot 10^{-4}$. Srednja vrednost enosmerne komponente B_{cos} je $4,20 \cdot 10^{-3}$, standardna deviacija je $5,20 \cdot 10^{-5}$. Porazdelitev amplitude osnovnega harmonika signala



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

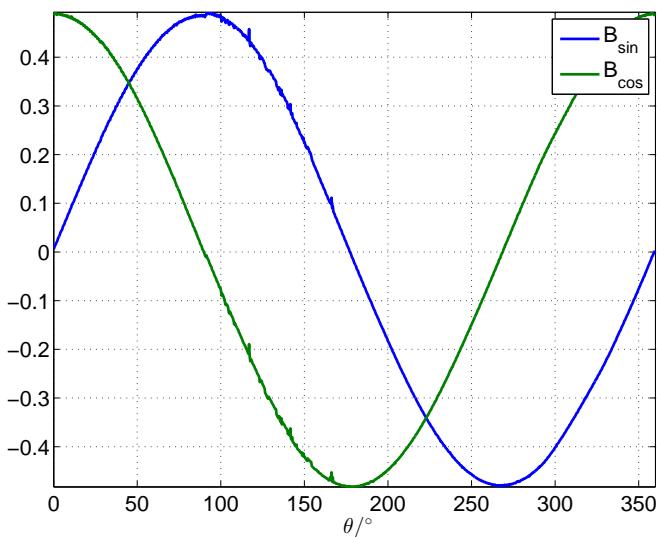
B_{sin} in B_{cos} je prikazana na sliki 7.11. Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika B_{sin} je $0,451$, standardna deviacija je $2,20 \cdot 10^{-4}$. Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika B_{cos} je $0,449$, standardna deviacija je $1,95 \cdot 10^{-4}$.



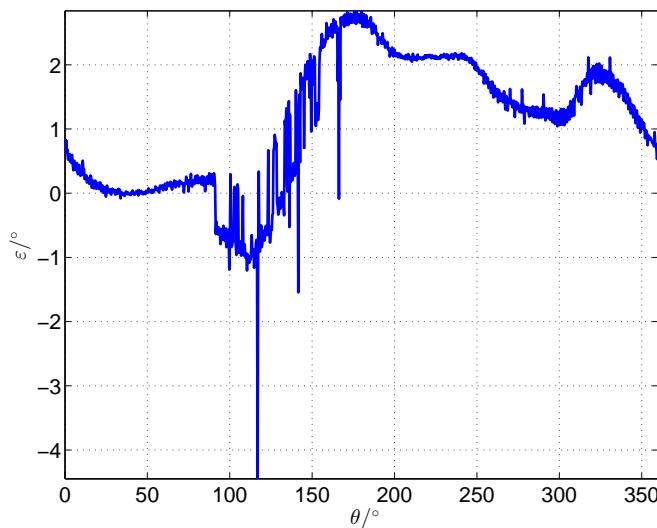
Slika 7.12: Porazdelitev meritov amplitude osnovnega harmonika signalov B_{sin} in B_{cos}

7.4 Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi

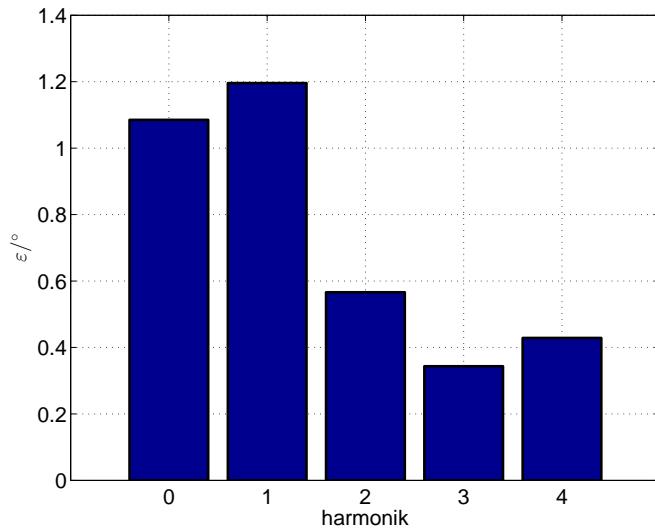
Pri meritvi je pričakovati spremembo amplitud in faznih zamikov signalov B_{sin} in B_{cos} . Na sliki 7.13 sta prikazana B_{sin} in B_{cos} pomerjena pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x. Na signalih, med 95 in 175° se pojavijo nenavadni skoki. Izrazijo se tudi na napaki, ki je prikazana na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



Slika 7.15: Amplitudo harmonikov napake ε 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.

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

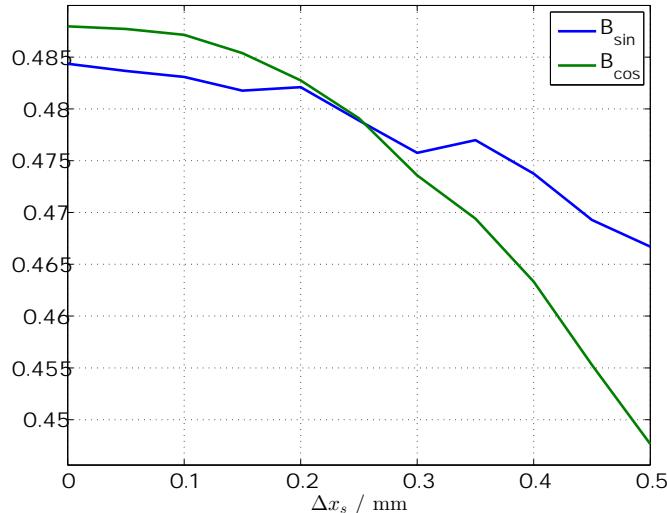
$$A_{sin}(\Delta x_s) = -6,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 1,71 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 1,17 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 4,84 \cdot 10^{-1} \quad (7.2)$$

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

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

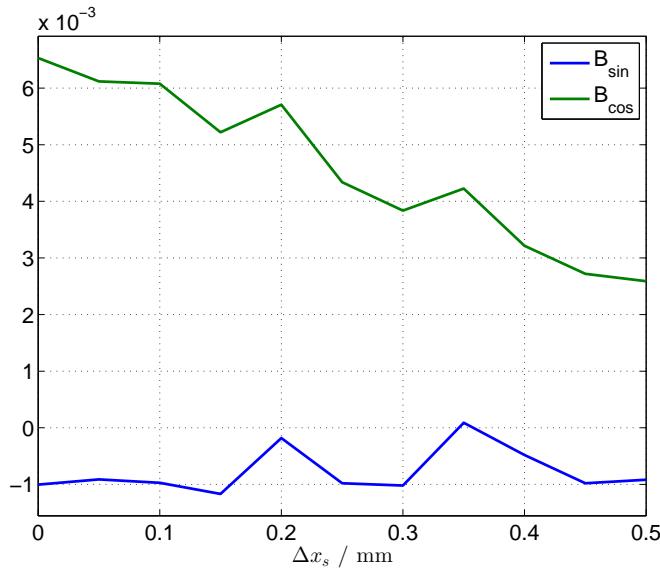
$$A_{cos}(\Delta x_s) = 7,46 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^3 - 1,85 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 1,01 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 4,88 \cdot 10^{-1} \quad (7.5)$$

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

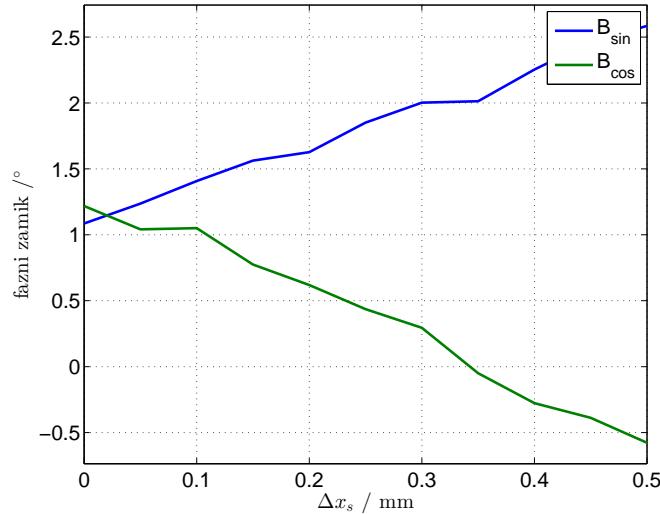


Slika 7.16: Potek amplitude osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x

Slika 7.19 prikazuje poteke amplitud posameznih harmonikov napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x. Kvadratično narašča amplituda

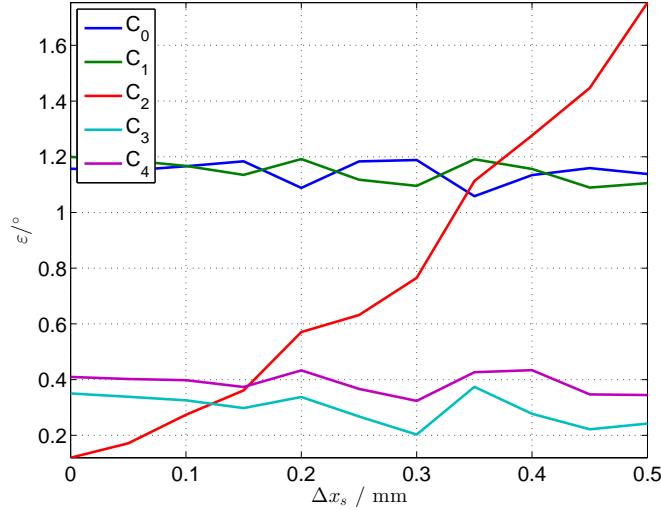


Slika 7.17: Potek enosmerne komponente B_{\sin} in B_{\cos} pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x



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}

drugega harmonika, medtem ko so enosmerna komponenta in ostali harmoniki konstantni. Poteki so aproksimirani s kubičnimi polinomi.



Slika 7.19: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x

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

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

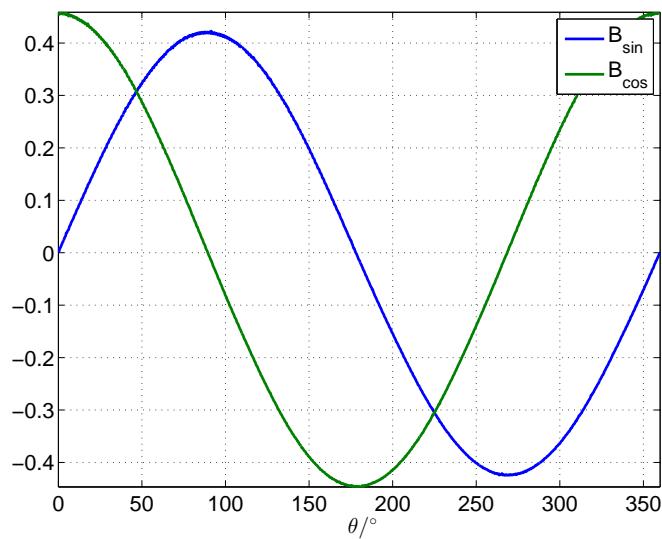
$$C_2(\Delta x_s) = -1,11\Delta x_s^3 + 5,06\Delta x_s^2 + 9,95 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,18 \cdot 10^{-1} \quad (7.9)$$

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

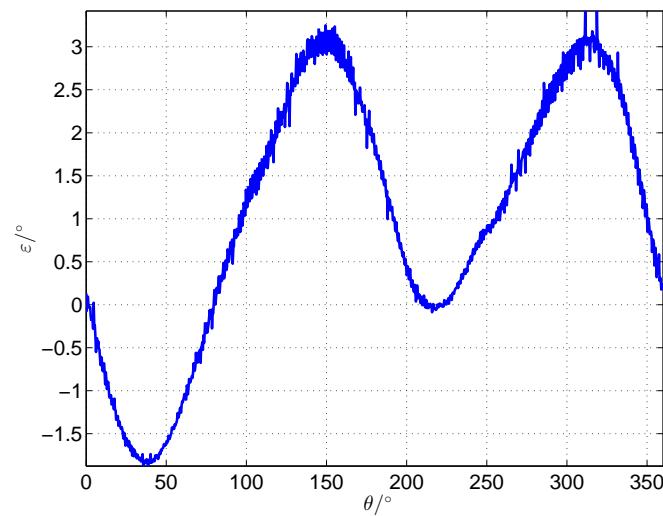
$$C_4(\Delta x_s) = -3,24\Delta x_s^3 + 2,29\Delta x_s^2 - 4,73 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 4,17 \cdot 10^{-1} \quad (7.11)$$

7.5 Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi

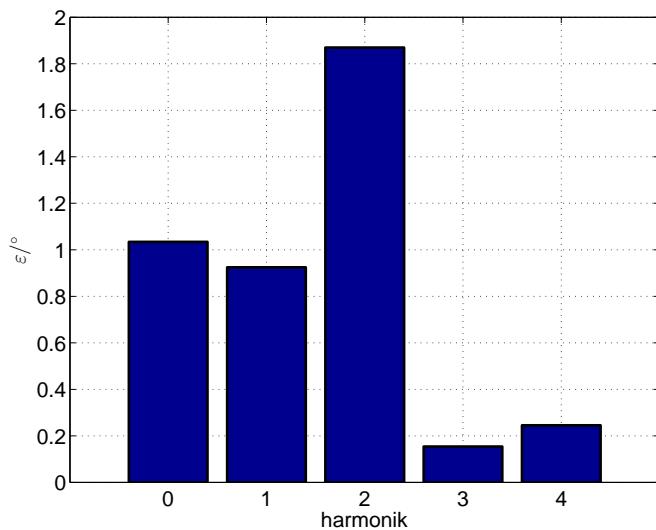
Slika 7.20 prikazuje zajeta signala B_{sin} in B_{cos} pri statični ekscentričnosti v smeri y. Amplituda B_{sin} se je zmanjšala, kot je bilo pričakovati po rezultatih simulacij. Posledično se izrazi v napaki drugi harmonik (slika 7.21). Z razvojem napake v Fourierovo vrsto se potrdi povišanje drugega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



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



Slika 7.21: Napaka ε merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.22: Amplitude harmonikov napake ε 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 harmonika napake v odvisnosti statične ekscentričnosti v smeri y. S potekom se opazi padanje amplitud. Slika 7.24 prikazuje potek enosmernih komponent. Pri meritvi 0,15 mm se pojavi skok enosmernih komponent, vendar razlika ostaja enaka. Pričakovana je bila manjša

variacija faznega kota.

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

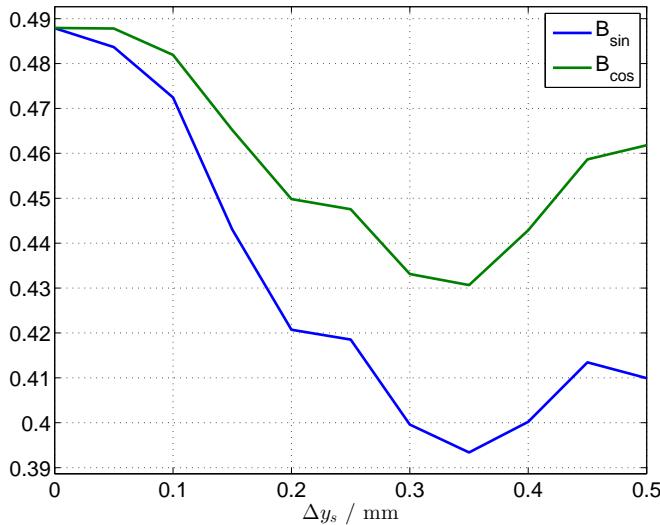
$$\begin{aligned} A_{sin}(\Delta y_s) = & 1,73 \Delta y_s^3 - 6,47 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^2 - 2,60 \cdot 10^{-1} \Delta y_s \\ & + 4,94 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.13)$$

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

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

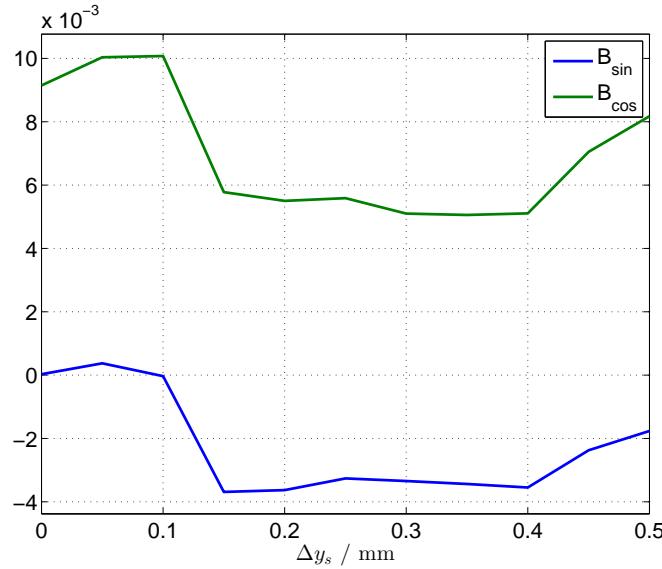
$$\begin{aligned} A_{cos}(\Delta y_s) = & 1,99 \Delta y_s^3 - 9,29 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^2 - 7,82 \cdot 10^{-2} \Delta y_s \\ & + 4,91 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.16)$$

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

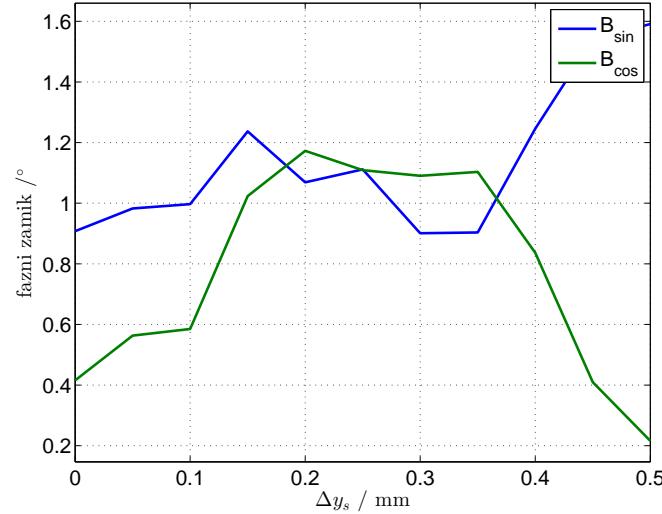


Slika 7.23: Potek amplitude osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y

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



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



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

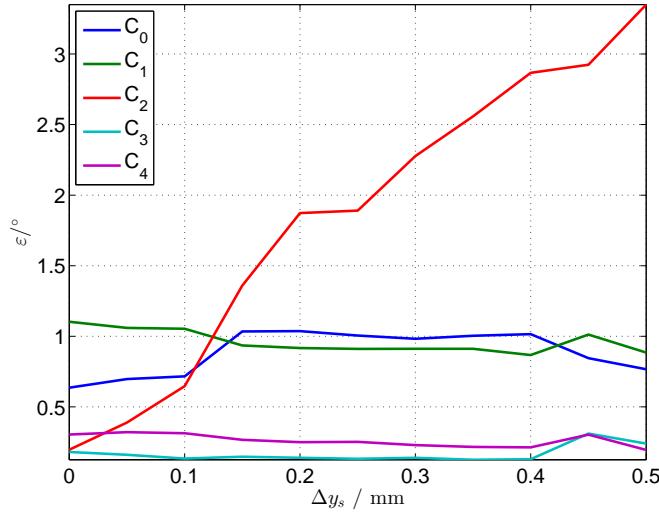
$$C_0(\Delta y_s) = -3,26\Delta y_s^3 - 3,10\Delta y_s^2 + 2,68\Delta y_s + 6,00 \cdot 10^{-1} \quad (7.18)$$

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

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

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

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



Slika 7.26: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε 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 napke pri dinamični ekscentričnosti v smeri x in zarotiranem magnetu za $32,4^\circ$ pri simulacijah z realnim magnetnim poljem. V enačbah je ekscentričnost označena z Δx_d , z zavedanjem, da je mišljen potek z zasukanim

magnetom.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

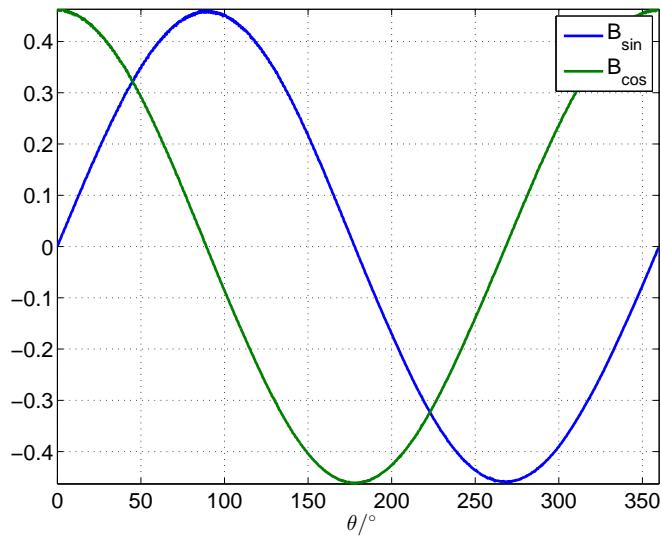
$$C_4(\Delta x_d) = -1,16 \cdot 10\Delta x_d^3 + 1,13 \cdot 10\Delta x_d^2 - 3,03\Delta x_d + 3,99 \cdot 10^{-1} \quad (7.33)$$

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

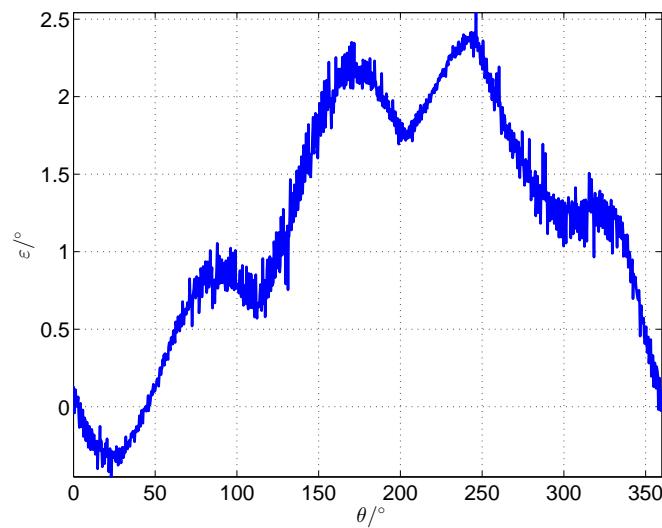
Pri dinamični ekscentričnosti v povzročeni smeri se signala B_{sin} in B_{cos} nista opazno spremenila (slika 7.27). Sprememb ni niti na napaki (slika 7.28). Sprememb se opazi v napaki razviti v Fourierovo vrsto (slika 7.29). Nekoliko se je povišala enosmerna komponenta.

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

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

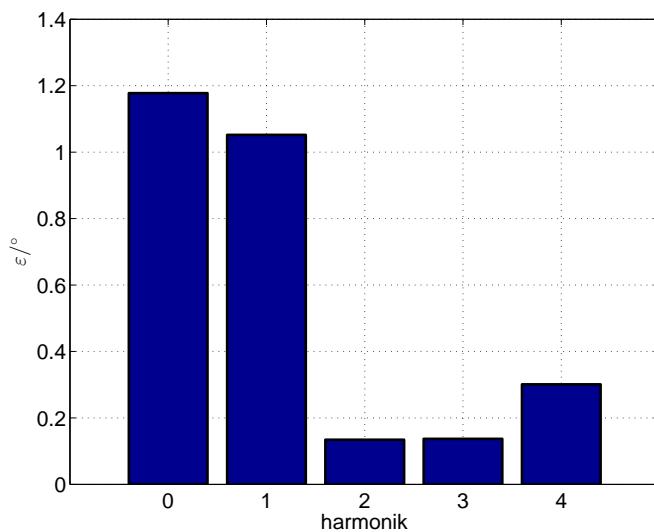


Slika 7.27: Signala B_{sin} in B_{cos} merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



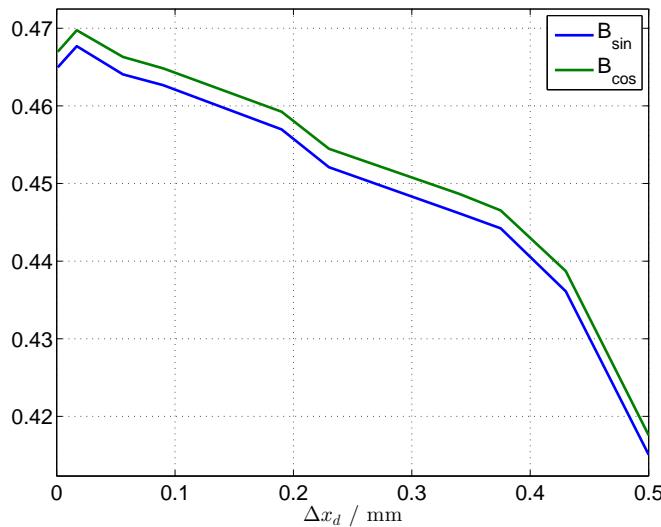
Slika 7.28: Napaka ε merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

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

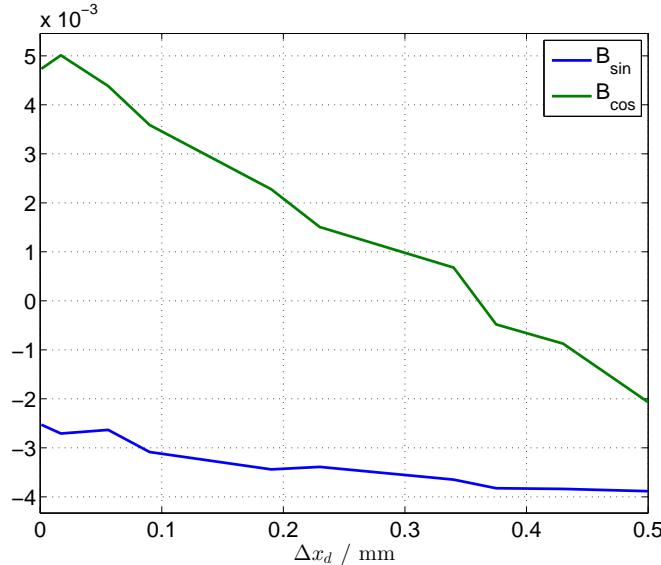


Slika 7.29: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

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

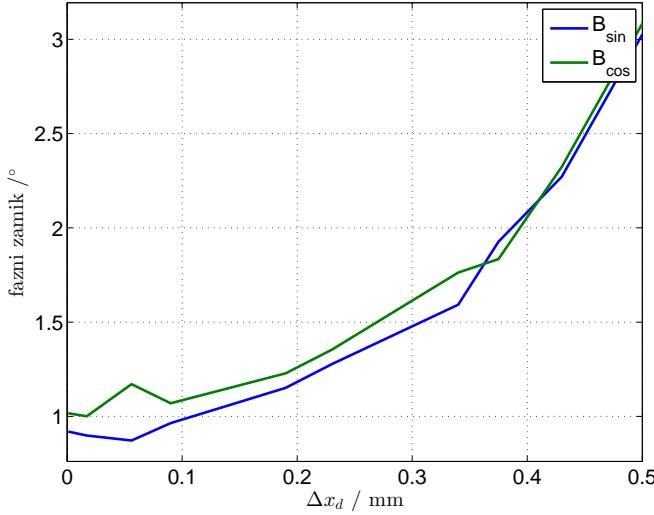


Slika 7.30: Potek amplitude osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x



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

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.

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

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

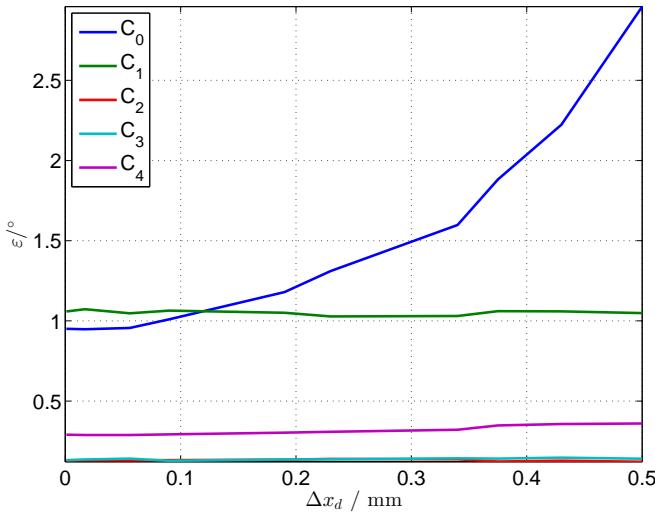
$$\delta_{\sin}(\Delta x_d) = 1,76 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 2,62 \Delta x_d^2 + 1,18 \Delta x_d + 8,78 \cdot 10^{-1} \quad (7.36)$$

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

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

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

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 ε pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x

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

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

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

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

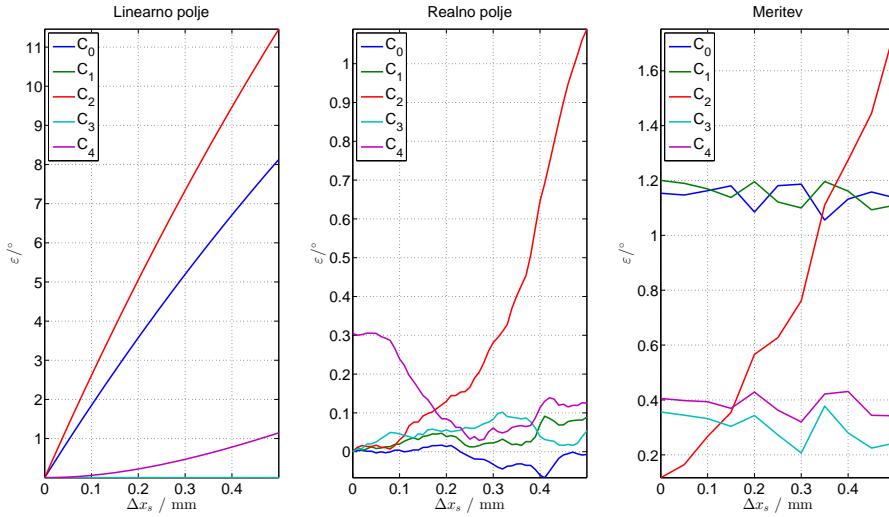
$$\begin{aligned} C_4(\Delta x_d) = & -9,91 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 9,61 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 8,81 \cdot 10^{-2} \Delta x_d \\ & + 2,91 \cdot 10^{-1} \end{aligned} \quad (7.44)$$

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

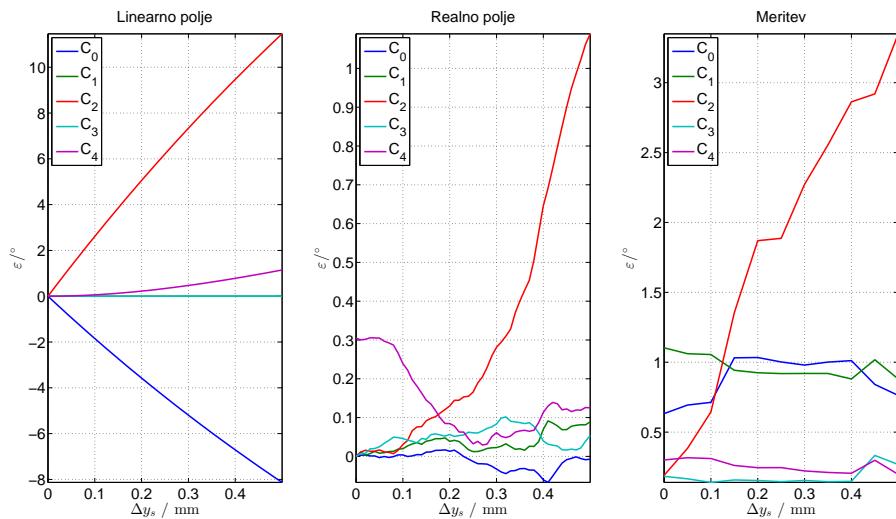
8.2 Statična ekscentričnost v smeri y

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.



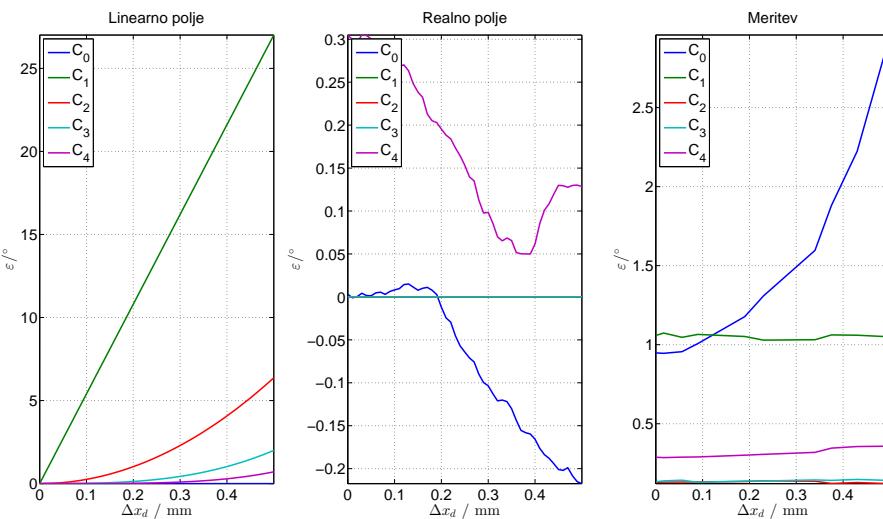
Slika 8.2: Primerjave potekov amplitud harmonikov napake statične ekscentričnosti v smeri y

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.
- [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.

- [8] iC Haus, High-precision sine/cosine interpolation-White paper, Dosegljivo: http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP7en_High-Precision_Interpolation_140124.pdf.
- [9] MathWorks, Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2d.html>.
- [10] 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.