

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

4.4	Napaka zaradi spremembe amplitude in faze zaradi enega parametra	31
5	Linearni model magnetnega polja	33
5.1	Brez ekscentričnosti	34
5.2	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi	35
5.2.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x	37
5.3	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi	41
5.3.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y	43
5.4	Dinamična ekscentričnost v smeri x osi	46
5.4.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x	48
5.5	Dinamična ekscentričnost v smeri y in sprememba razdalje Hallovih sond od magneta	51
6	Realni model magnetnega polja	53
6.1	Brez napake	54
6.2	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi	55
6.2.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x	58
6.3	Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi	61
6.3.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y	63
6.4	Dinamična ekscentričnost v smeri x	66
6.4.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x	68

6.5	Dinamična ekscentričnost v smeri y	71
6.5.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri y	73
7	Meritve	77
7.1	Oprema in postavitev merilnega mesta	77
7.2	Zajem podatkov	81
7.3	Senzor v izhodiščni legi	83
7.3.1	Meritve v izhodišni legi	84
7.4	Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi	87
7.4.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x	89
7.5	Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi	91
7.5.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y	93
7.6	Meritve dinamične ekscentričnosti v smeri x-osi	96
7.6.1	Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x	99
8	Primerjava simulacij in meritev	103
9	Sklep	105
9.1	Merjenje kota in vpliv na napako	105
9.2	Nepravilna montaža	105
9.3	Oblika napake	106
9.4	Izvedba meritev	106

9.5 Komentar rezultatov	106
-----------------------------------	-----

Seznam simbolov

V zaključnem delu so uporabljeni naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
referenčni kot	Θ	stopinja	$^\circ$
pomerjeni kot	φ	stopinja	$^\circ$
napaka	ε	stopinja	$^\circ$
z-komponenta gostote magnetnega pretoka	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

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

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

Abstract

The thesis addresses ...

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

1 Uvod

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

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

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

Kot vsak 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 pogon. S poznavanjem vplivov nepravilne montaže na napako pomerjenega položaja, se napako lahko predvidi in odpravi.

Cilj naloge je analizirtai kako različne napake pri montaži, vplivajo na napako v signalu kota. Želi se predstaviti čim bolj preprost model, ki bo dovolj točno opisal dogajanje ob prisotnosti napake in to prekontrolirati.

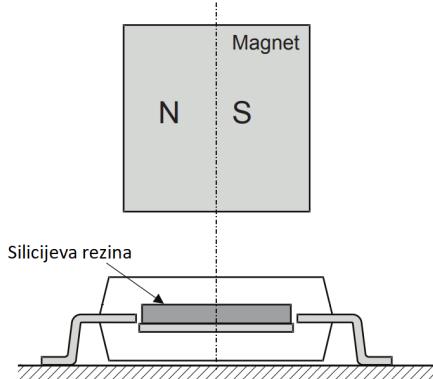
2 Senzor RM44

Senzor RM44 je 13 bitni enkoder, primeren za merjenje zasuka rotirajočega pogona[5]. Enkoder se nahaja v robustem ohišju, zato je primeren za delovanje v težkem industrijskem okolju. Oblika izhodnega podatka o zasušku, je prilagodljiva na sistem aplikacije v kateri bo uporabljen[6]. Izhod senzorja je lahko analogni v obliki sinusnega in kosinusnega signala ali linearno spreminjačje se napetosti med potencialoma GND in VDD v odvisnosti od kota zasuka. Izhod je lahko tudi v obliki inkrementalnih signalov A in B s katerih se lahko določi smer in relativni zasuk vrtenja ter signal Ri kateri določa referenčno točko. Izhod je možen tudi preko SSI vodila. Senzor ima možnost nastavljanja resolucije od 5 do 13 bitov na obrat [7][5]. Senzor na katerem so bile opravljene meritve je imel 12 bitno resolucijo in na voljo analogna signala sinus in kosinus. Točno ime senzorja je RM44AC0001S20F2E10, v delu bo poimenovan okrajšano RM44.

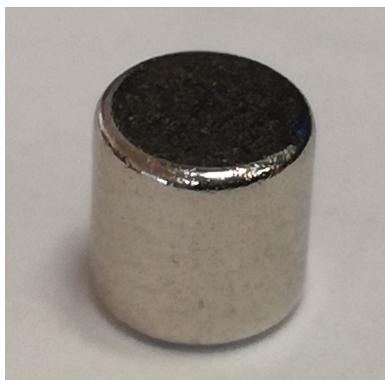


Slika 2.1: Senzor RM44

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



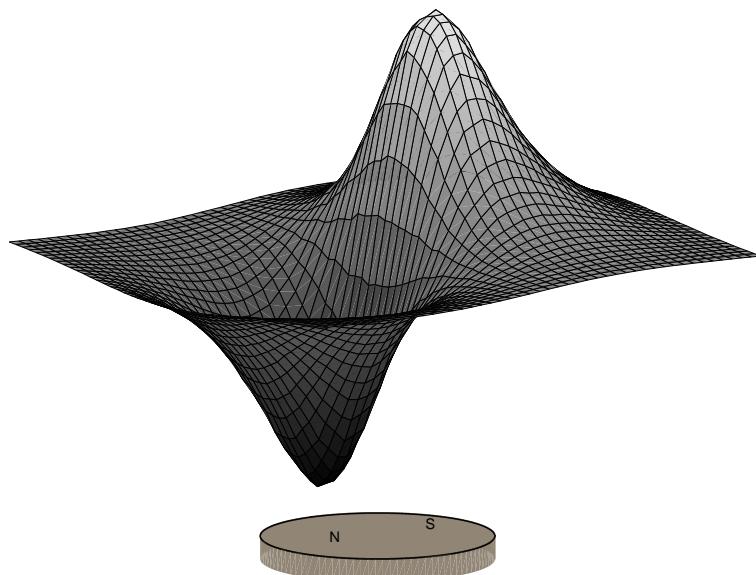
Slika 2.2: Nahajanje radialno polariziranega magneta nad čipom AM256 [7]



Slika 2.3: Primer magneta predlagan s strani proizvajalca RLS

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

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

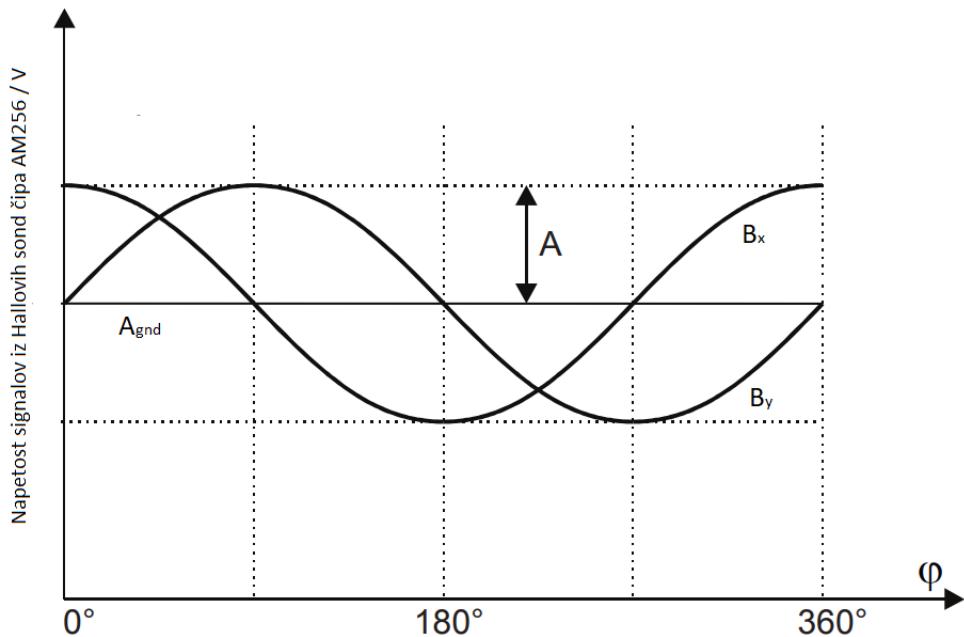


Slika 2.4: Oblika Z komponente gostote magnetnega pretoka nad magnetom

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

S pravilno postavljivo Hallovih sond in obliki Z-komponente gostote magnetnega pretoka povzročene z magnetom, se ob prostorskem zajemu zajame 2 signala kosinusne oblike, ki sta za 90° 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} .

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

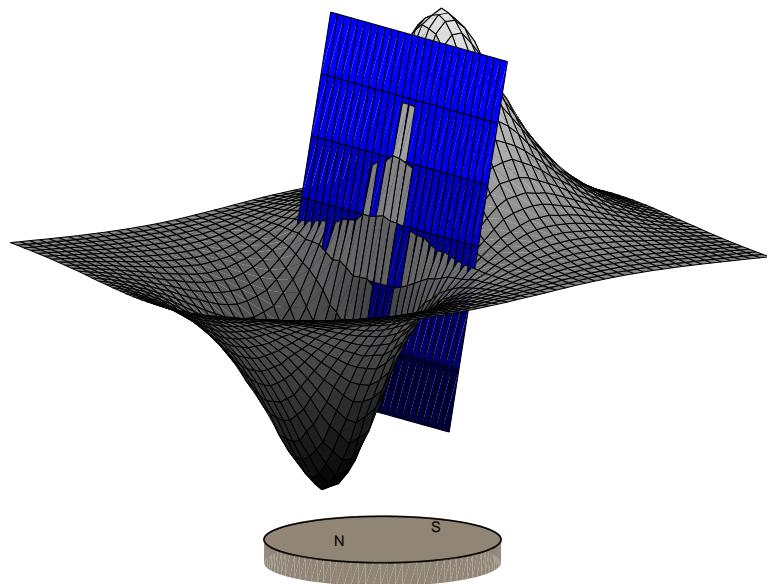


Slika 2.5: Analogna signala zajeta s Hallovimi sondami [7]

izračun kota iz podatkov kot sta signala B_{cos} in B_{sin} je več (CORDIC, SAR, sledilna metoda, itd [8]). Osnovni princip metode je izračun funkcije atan2(B_{sin} , B_{cos}) [9].

Osnovno delovanje senzorja se lahko ponazorji, z dvema Hallovima sondama. Sondi sta postavljeni na krožnico s središčem v osi vrtenja magneta in radijem r_0 .

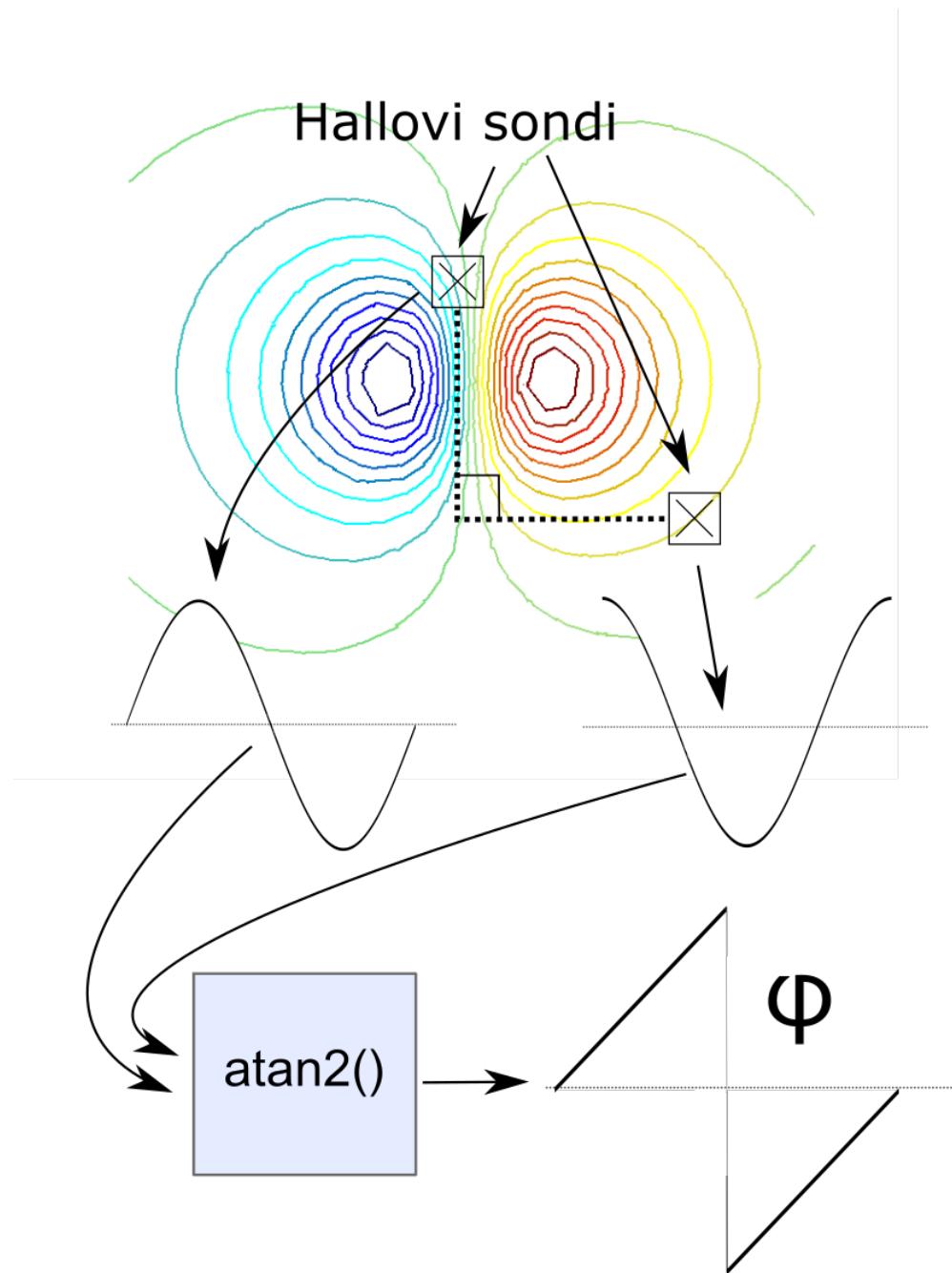
Sondi sta prostorsko zamaknjeni za 90° (slika 2.7). S sondama se zajame signala B_{cos} in B_{sin} . Signala sta vhodna parametra v funkcijo atan2(), ki izračuna kot zasuka (slika 2.7). Za oceno napake, se lahko Z komponento gostote magnetnega pretoka v okolici središča magneta, aproksimira z ravnino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



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

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

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



Slika 2.7: Osnovni model, za izračun kot zasuka

3 Izpeljava gibanja sonde relativno na magnet ob nepravilni montaži

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

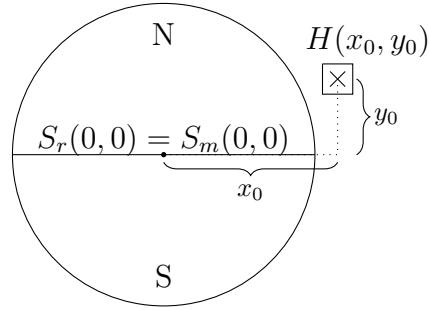
Izmik sredine senzorja iz osi vrtenja bo med spremenjanjem dejanskega kota zasuka statičen, njegova lokacija se nebo spreminja na os vrtenja. Ta izmik je poimenovan statična ekscentričnost.

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

3.1 Definicija koordinatnega sistema

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

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



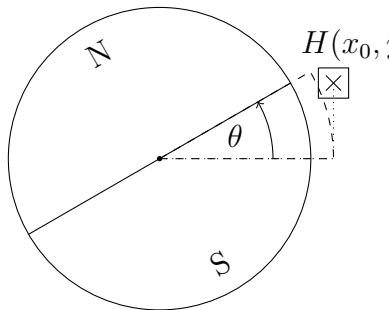
Slika 3.1: Definicija koordinatnega sistema z magnetom in Hall-ovo sondom

enačba (3.1).

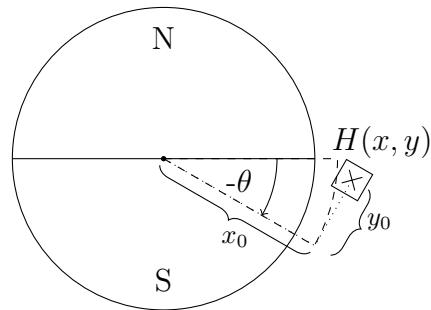
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

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

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



(a) Zasukan magnet za kot θ

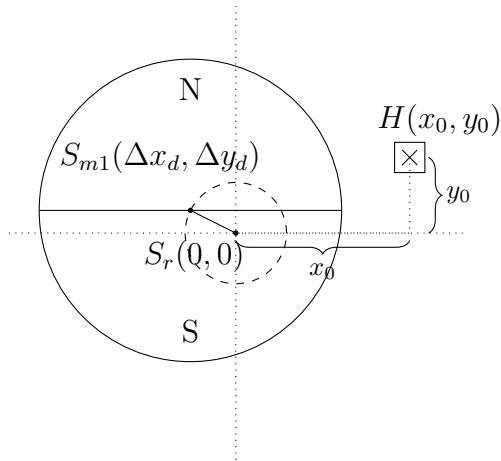


(b) Zasukan senzor za kot $-\theta$

Slika 3.2: Sprememba položaja glede na magnet ob rotaciji

3.2 Izpeljava gibanja lokacije Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti

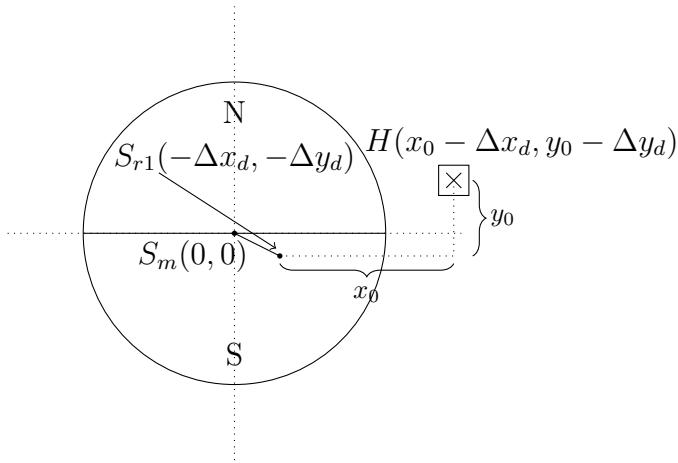
Magnet je postavljen v izhodišče koordinatnega sistema $S_m(0, 0)$, kjer je tudi os vrtenja $S_r(0, 0)$. Dinamična ekscentričnost povzroči premik središča magneta v točko $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$ (Slika 3.3). Os vrtenja je ostaja v izhodišču koordinatnega sistema. Središce magneta $S_{m1}(\Delta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



Slika 3.3: Definicije dinamične ekscentričnosti

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

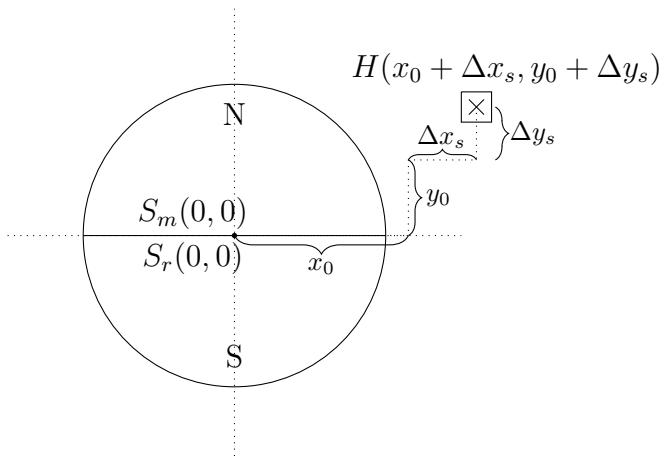
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (3.3)$$



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

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

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



Slika 3.5: Definicije statične ekscentričnosti

ekscentričnosti se sonda giblje po drugem radiju.

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

3.4 Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde

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

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

4 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov

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

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

4.1 Različne amplitude

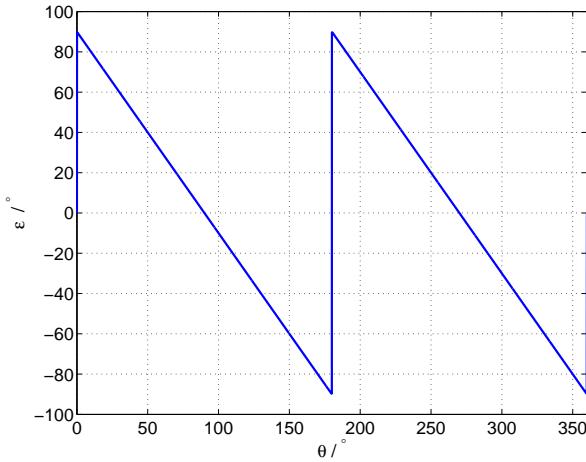
Prvi primer popačenih vhodov v funkcijo atan2d(); je neenakost amplitud vhodnih signalov. Signala imata poljubne amplitude, vendar se izhod funkcije atan2d(); nebo spremenil, če se obe amplitudi deli s poljubnim številom. Če se za poljubno število vzame amplitudo signala B_{cos} , imata singala novo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

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

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

Funkciji sta vstavljeni v atan2d(); in parameter k je limitiran v neskončnost. Izhod atan2d(); je konstanta, napaka 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: ε ob limiti k v neskončnost

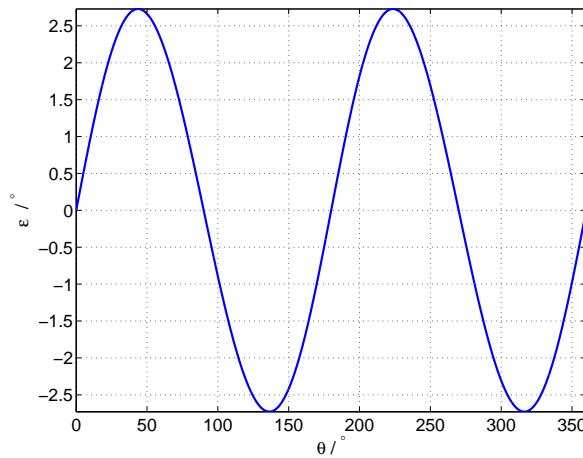
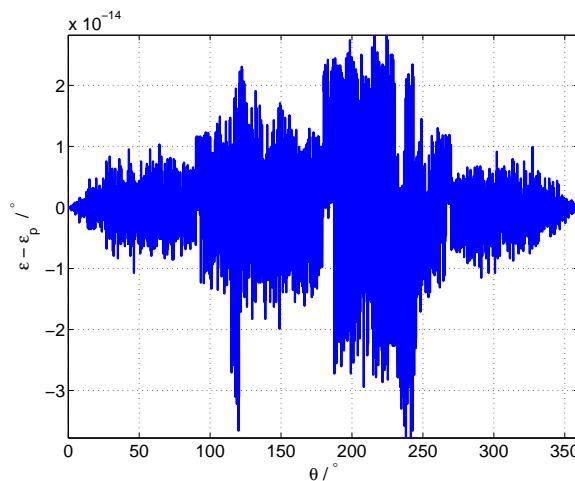
Potek ε se lahko zapiše s Fourierovo vrsto [10]:

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

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 .

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

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

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

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

4.2 Različne enosmerne komponente

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

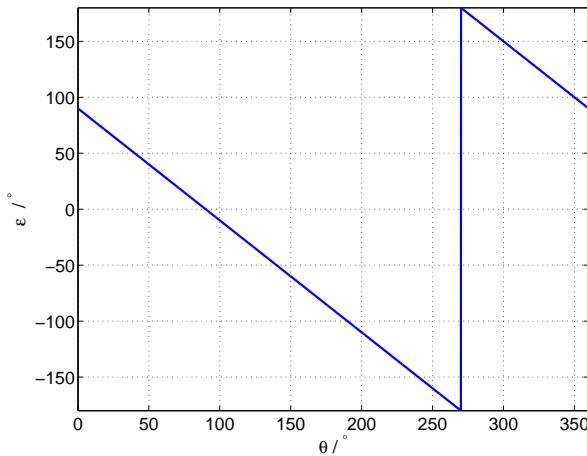
$$B_{sin} = \sin(\theta) + B_0 \quad (4.6)$$

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

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

4.2.1 Enosmerna komponenta v signalu B_{sin}

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



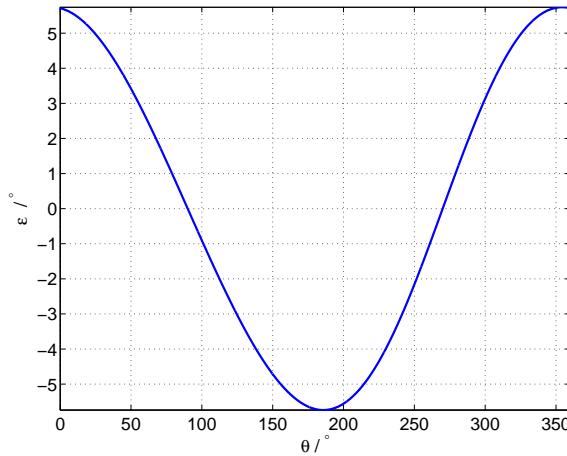
Slika 4.4: ε ob limiti B_0 v neskončnost

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

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

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

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



Slika 4.5: ε pri $B_0 = 0,1$

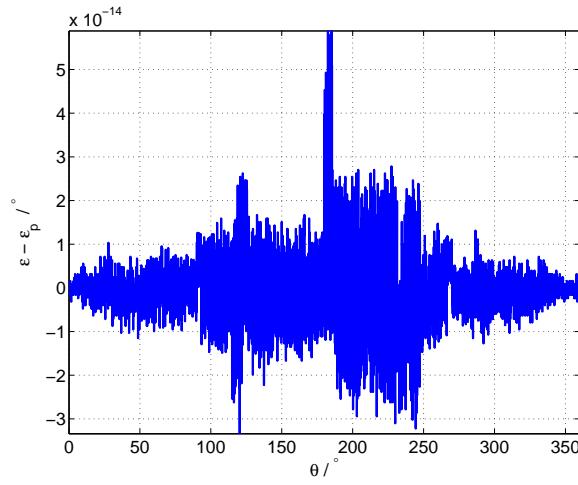
4.2.2 Enosmerna komponenta signala B_{cos}

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

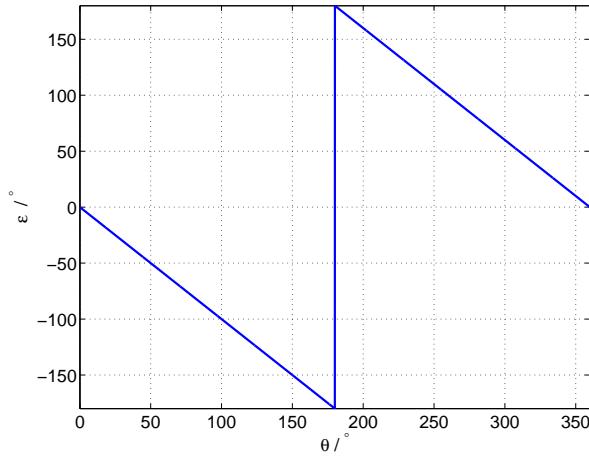
$$\lim_{a_0 \rightarrow \infty} \text{atan2}(\sin \theta, \cos \theta + A_0) \quad (4.10)$$

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

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



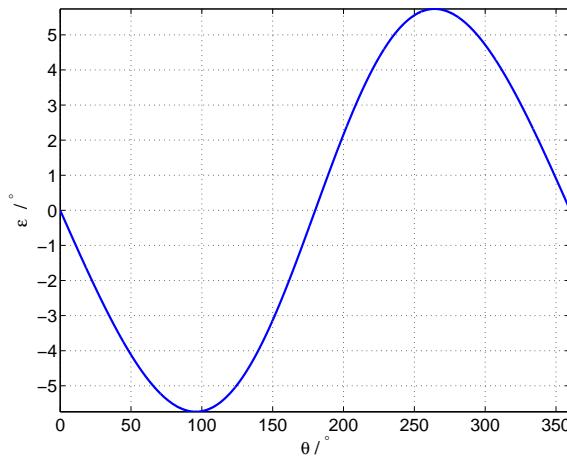
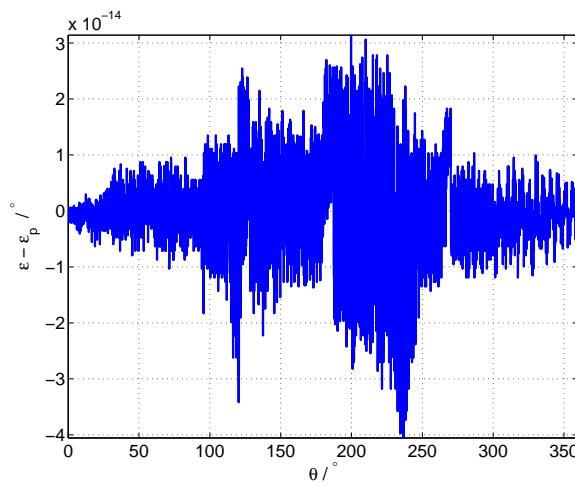
Slika 4.6: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (4.9) pri $B_0 = 0,1$ in uporabi prvih 20 členov vrste (4.9)



Slika 4.7: ε ob limiti A_0 v neskončnost

Potek napake v odvisnosti od A_0 je (4.12)

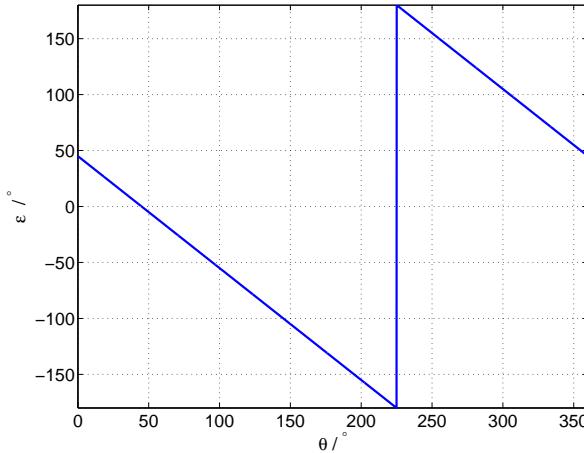
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-|A_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{A_0^n}{n} \sin(n\theta), & |A_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-A_0^{-n}}{n} \sin(n\theta),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

Slika 4.8: 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

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

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



Slika 4.10: 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 spreminjanju enosmernih komponent pri obeh signalih se je izrazila kot:

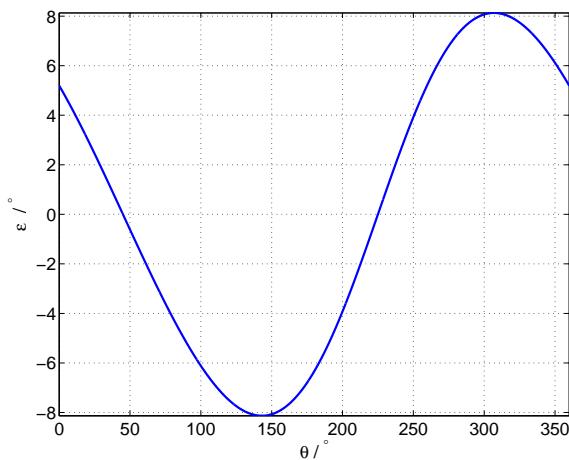
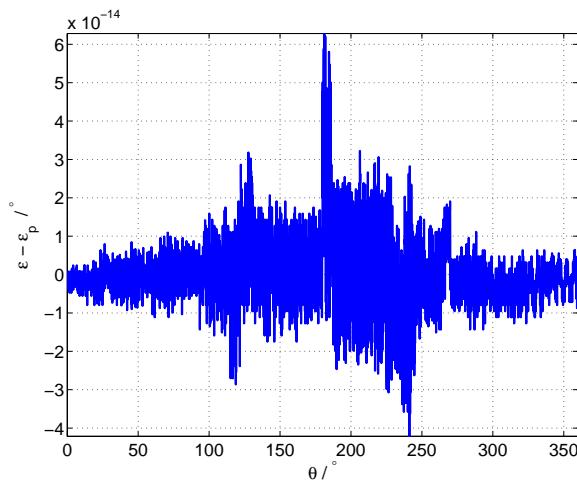
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 - |\sqrt{2}C_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & C_0 \leq -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sqrt{2}C_0)^n}{n} \sin(n\theta - 90n), & |C_0| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty}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

4.3 Neorotogonalnost signalov

Napaka se pojavi tudi, če signala B_{sin} in B_{cos} nista fazno zamaknjena za točno 90° . Signala B_{sin} in B_{cos} bodita odvisna tudi od faznega zamika in sicer φ_s signala B_{sin} in φ_c signala B_{cos}

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

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

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)

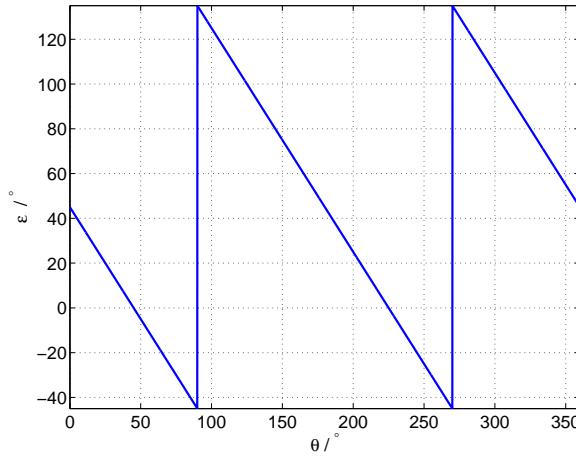
Napako se določi za vsakega od parametrov posamično. Drugi je takrat enak 0. Na koncu se enačbi združi.

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} na idealna signala.

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

4.4 Napaka zaradi spremembe amplitude in faze zaradi enega parametra

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

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

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

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

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

Pri čemer velja:

$$\Delta_c > -C_1$$

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

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

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

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

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

Pri čemer velja:

$$\Delta_s > -C_1$$

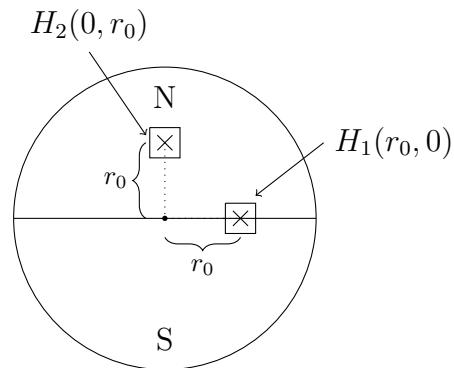
Za majhne odmike, je dovolj upoštevanje le prvega člena vrste, pri katerih se tudi predpostavi linearno naraščanje napake. V nadaljevanju bodo velikosti harmonikov v odvisnosti od povzročene ekscentričnosti aproksimirani s kubičnim polinomi.

5 Linearni model magnetnega polja

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

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

Simulacijski model sestavlja dve Hallovih sondi postavljeni na krožnico z radijem r_0 in sta prostorsko zamaknjeni za 90° (slika 5.1). Lokacija predstavlja začetno lego Hallovih sond. Ob zasuku magneta, se sondi relativno gibljeti na magnet v nasprotni smeri kot se vrati magnet.



Slika 5.1: Shema simulacijskega modela

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

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

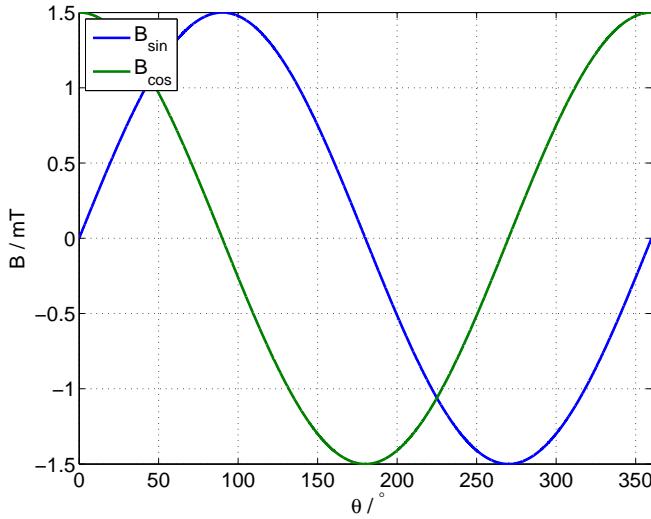
$$B_{H_1} = B_{cos} = r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d \quad (5.2)$$

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

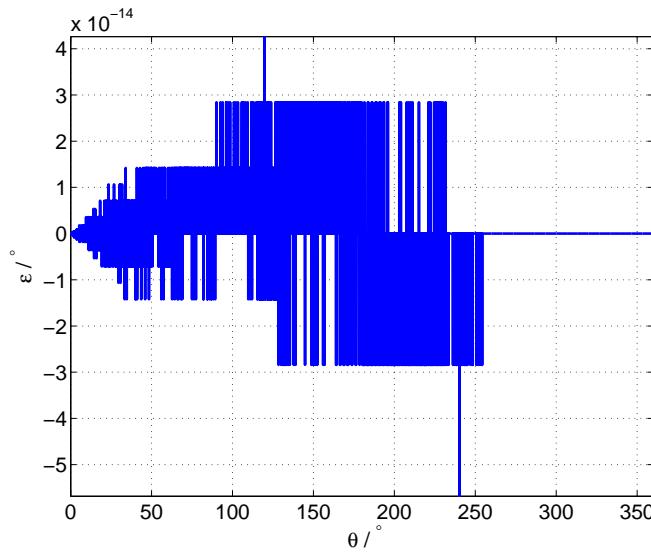
Prikazan je potek napake pri različnih izmikih, ter potek amplitud posameznih haarmonikov napake v odvisnosti od ekscentričnosti. Hall-ovi sondi sta postavljeni na krožnico z radijem 1,5 mm [7].

5.1 Brez ekscentričnosti

Signala B_{sin} in B_{cos} pomerjena v stanju brez ekscentričnosti imata enaki amplitudi in sta fazno zamaknjena za 90° ter brez enosmernih komponent. Napaka ε , ki se pojavi pri izračunu je le numerična napaka funkcije atan2d(); (Slika 5.3). Numerična napaka je proti pričakovani napaki zaradi ekscentričnosti zanemarljiva.



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



Slika 5.3: Napaka ε pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti

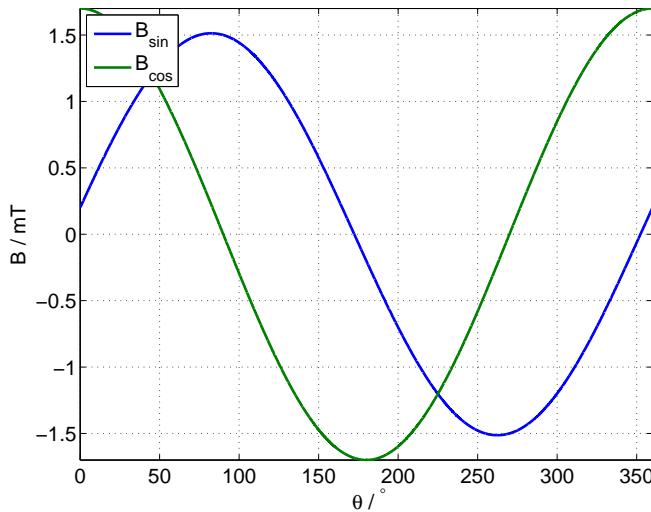
5.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

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

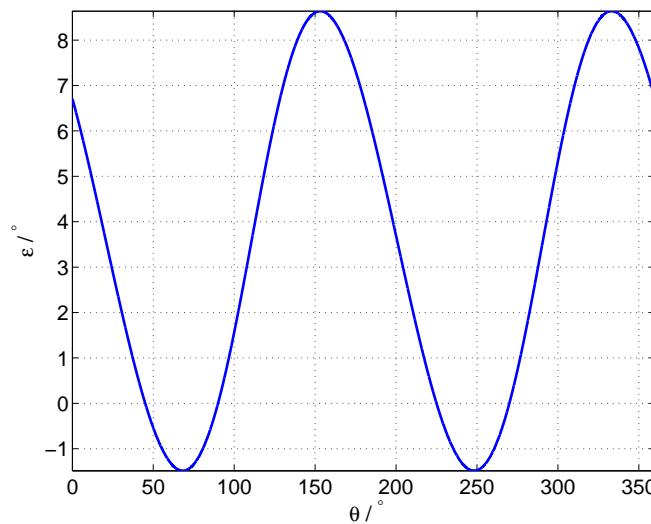
$$B_{sin} = \sqrt{(r_0 + \Delta y_s)^2 + \Delta x_s^2} \sin(\theta + \text{atan} \frac{\Delta x_s}{\Delta y_s + r_0}) - \Delta x_d \quad (5.4)$$

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

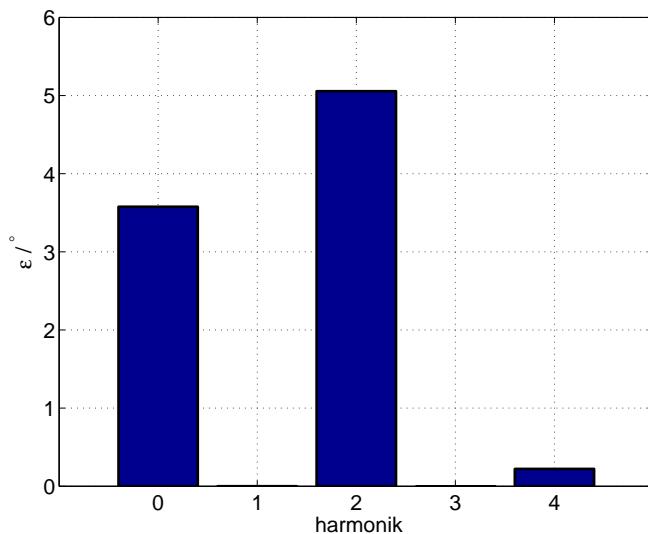
Ob upoštevanju le statične ekscentričnosti v smeri x se iz (5.4) razbere lineara sprememba amplituda signala B_{cos} . Signalu B_{sin} se poveča amplituda, vendar je sprememba manjša kot pri signalu B_{cos} . Signalu B_{sin} se spremeni tudi faza. Potek signalov B_{sin} in B_{cos} pri 0,2mm statične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



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



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



Slika 5.6: 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:

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

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

Na slikah je predstavljen potek posameznega parametra od spremenjajoče ekscentričnosti.

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

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

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

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

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

$$A_{sin}(\Delta x_s) = -3,38 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 + 3,44 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 - 1,09 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 1,5 \quad (5.9)$$

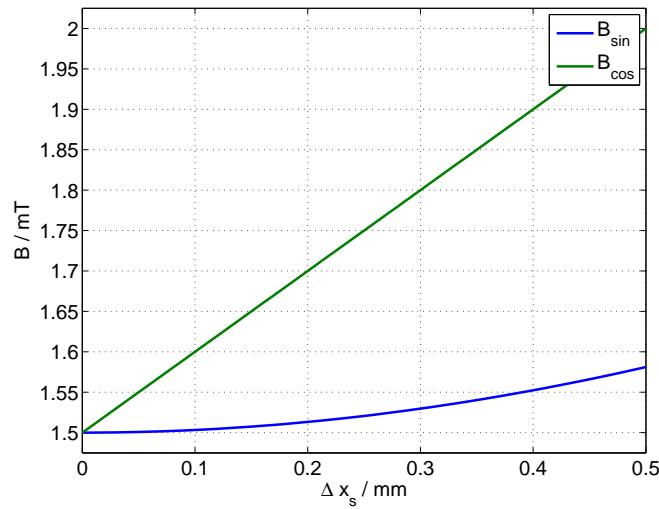
$$Off_{sin}(\Delta x_s) = 0 \quad (5.10)$$

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

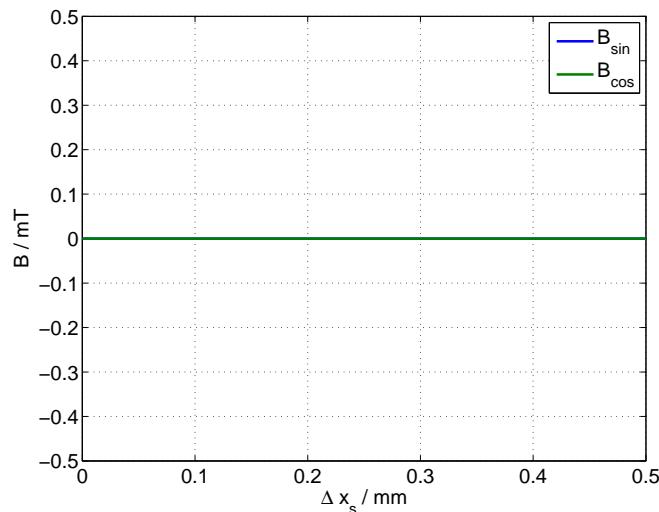
$$A_{cos}(\Delta x_s) = \Delta x_s + 1,5 \quad (5.12)$$

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

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

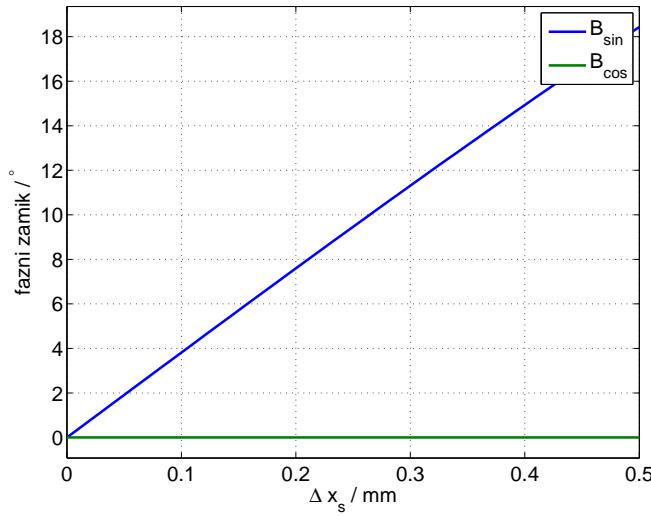


Slika 5.7: Amplituda osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



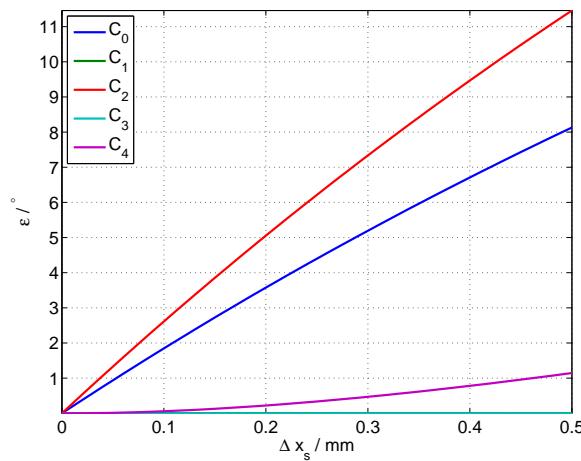
Slika 5.8: Enosmerna komponenta B_{sin} in B_{cos} pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

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



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

(5.15).



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

$$C_0(\Delta x_s) = 1,32\Delta x_s^3 - 6,33\Delta x_s^2 + 19,1\Delta x_s + 1,09 \cdot 10^{-4} \quad (5.15)$$

$$C_1(\Delta x_s) = (6,18\Delta x_s^3 - 4,97\Delta x_s^2 + 1,03\Delta x_s) \cdot 10^{-14} + 5,64 \cdot 10^{-15} \quad (5.16)$$

$$C_2(\Delta x_s) = 1,71\Delta x_s^3 - 9,04\Delta x_s^2 + 27,0\Delta x_s - 5,20 \cdot 10^{-5} \quad (5.17)$$

$$C_3(\Delta x_s) = (-20,7\Delta x_s^3 + 20,0\Delta x_s^2 - 3,76\Delta x_s) \cdot 10^{-15} + 4,81 \cdot 10^{-16} \quad (5.18)$$

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

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

$$C_0(\Delta x_s) = 1,41\Delta x_s^3 - 6,37\Delta x_s^2 + 19,10\Delta x_s \quad (5.20)$$

$$C_1(\Delta x_s) = 0 \quad (5.21)$$

$$C_2(\Delta x_s) = 1,50\Delta x_s^3 - 9,00\Delta x_s^2 + 27,01\Delta x_s \quad (5.22)$$

$$C_3(\Delta x_s) = 0 \quad (5.23)$$

$$C_4(\Delta x_s) = -4,24\Delta x_s^3 + 6,37\Delta x_s^2 \quad (5.24)$$

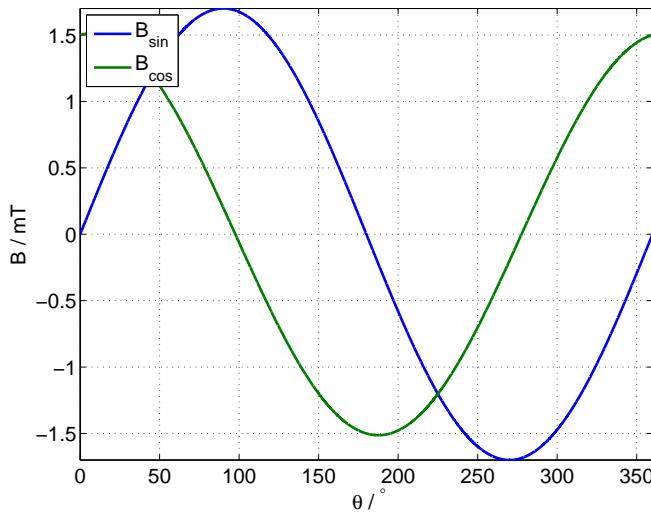
Rezultati so pričakovani. Četrtri harmonik se po poteku nekoliko razlikuje. To je posledica razvite vrste okoli izhodišča. Z razvojem četrtega harmonika okoli točke 0,25mm (5.25), je iz izraza še bolj razvidno prilagajanje harmonika.

$$C_4(\Delta x_s) = -2,90\Delta x_s^3 + 5,88\Delta x_s^2 + 0,08\Delta x_s - 4,98 \cdot 10^{-3} \quad (5.25)$$

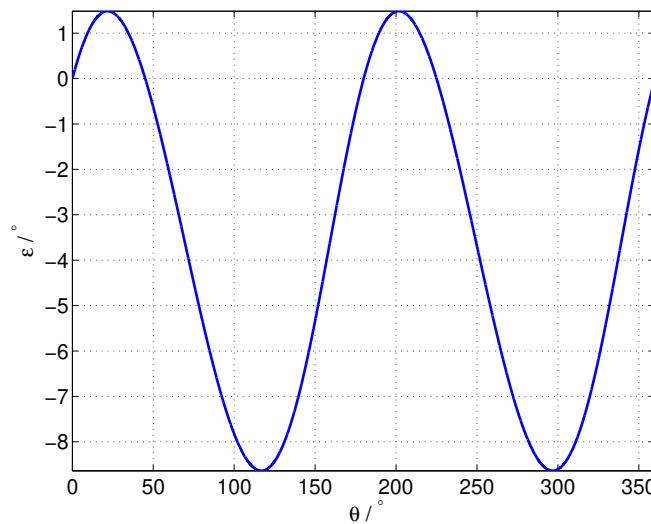
5.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

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

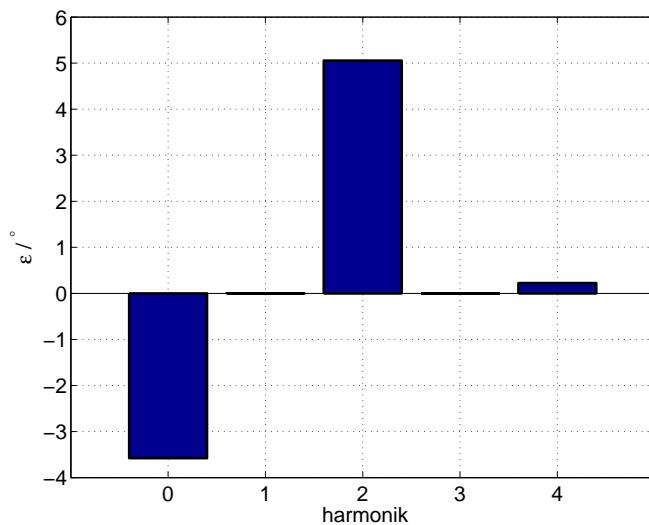
Napaka je prikazana na sliki 5.12. Sestavlja jo negativna enosmerna komponenta in izrazit drugi harmonik. Iz napake razvite v vrsto (5.13) je vidna enaka amplituda drugega harmonika, kot pri ekscentričnosti v smeri x. Enosmerna komponenta se razlikuje v predznaku.



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



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



Slika 5.13: 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 se prav tako ni spremenila. Fazni zamik signala B_{cos} se je zmanjševal, posledično tudi fazna razlika med signaloma. Poteki so opisani s kubičnimi polinomi. Na sliki 5.17 so prikazani poteki amplitud posameznih harmonikov v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri y. Potek amplitud harmonikov je enak potekom simuliranih s statično ekscentričnostjo v smeri x, raz-

likuje se le enosmerna komponenta z nasprotnim predznakom.

$$A_{sin}(\Delta y_s) = \Delta y_s + 1.5 \quad (5.26)$$

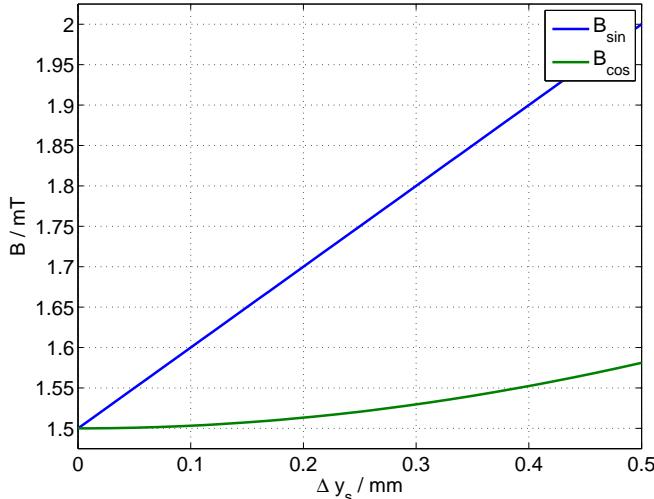
$$Off_{sin}(\Delta y_s) = 0 \quad (5.27)$$

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

$$A_{cos}(\Delta y_s) = -3,38 \cdot 10^{-3} \Delta y_s^3 - 0,344 \Delta y_s^2 - 1,09 \cdot 10^{-3} \Delta y_s + 1,5 \quad (5.29)$$

$$Off_{cos}(\Delta y_s) = 0 \quad (5.30)$$

$$\delta_{cos}(\Delta y_s) = 4,71 \Delta y_s^3 + 3,96 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^2 - 38,2 \Delta y_s + 1,15 \cdot 10^{-3} \quad (5.31)$$



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

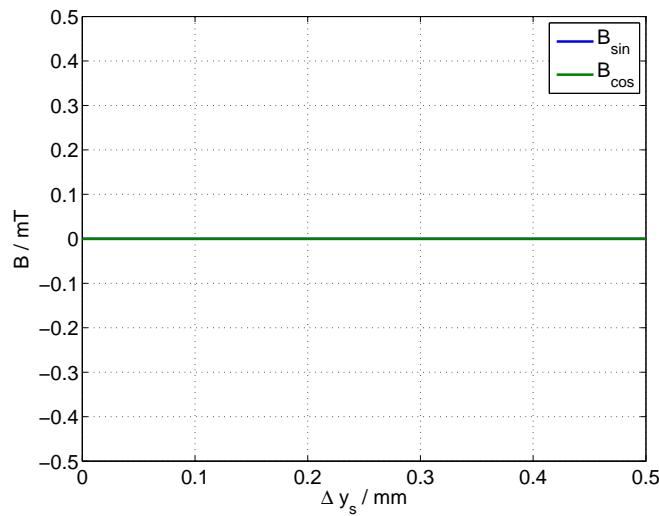
$$C_0(\Delta y_s) = -1,32 \Delta y_s^3 + 6,33 \Delta y_s^2 - 1,91 \cdot 10 \Delta y_s - 1,09 \cdot 10^{-4} \quad (5.32)$$

$$C_1(\Delta y_s) = (4,36 \Delta y_s^3 - 3,81 \Delta y_s^2 + 1,04 \Delta y_s + 0,559) \cdot 10^{-14} \quad (5.33)$$

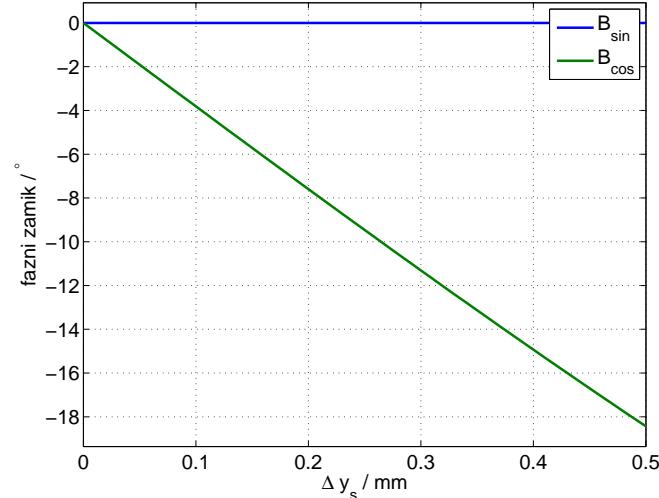
$$C_2(\Delta y_s) = 1,71 \Delta y_s^3 - 9,04 \Delta y_s^2 + 2,70 \cdot 10 \Delta y_s - 5,20 \cdot 10^{-5} \quad (5.34)$$

$$C_3(\Delta y_s) = (-1,86 \Delta y_s^3 + 1,60 \Delta y_s^2 - 0,299 \Delta y_s) \cdot 10^{-14} + 4,59 \cdot 10^{-16} \quad (5.35)$$

$$C_4(\Delta y_s) = -2,92 \Delta y_s^3 + 5,96 \Delta y_s^2 + 4,36 \cdot 10^{-2} \Delta y_s - 9,80 \cdot 10^{-4} \quad (5.36)$$

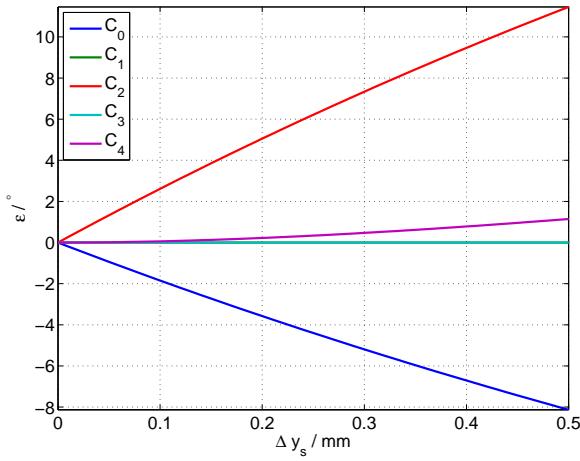


Slika 5.15: Enosmerna komponenta B_{\sin} in B_{\cos} pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



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

Tu so priloženi tudi poteki izraza (4.25), razviti v Taylorjevo vrsto okoli ničle do tretje potence. (4.25) opisuje napako funkcije atan2d() v primeru vhodnih



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

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

$$C_0(\Delta y_s) = -1,41\Delta y_s^3 + 6,37\Delta y_s^2 - 19,10\Delta y_s \quad (5.37)$$

$$C_1(\Delta y_s) = 0 \quad (5.38)$$

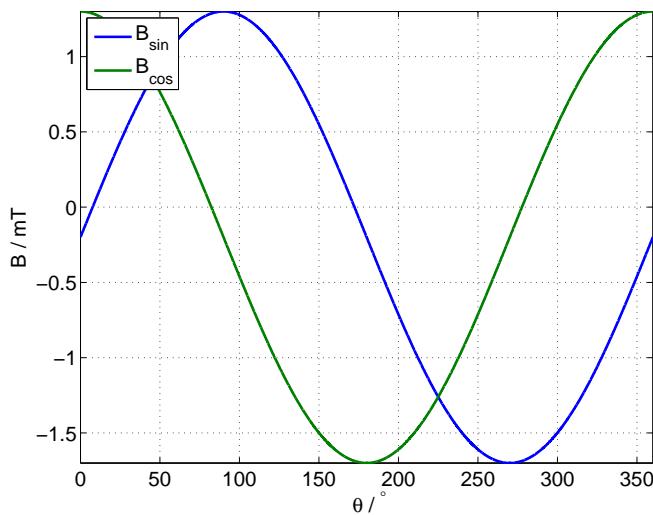
$$C_2(\Delta y_s) = 1,50\Delta y_s^3 - 9,00\Delta y_s^2 + 27,01\Delta y_s \quad (5.39)$$

$$C_3(\Delta y_s) = 0 \quad (5.40)$$

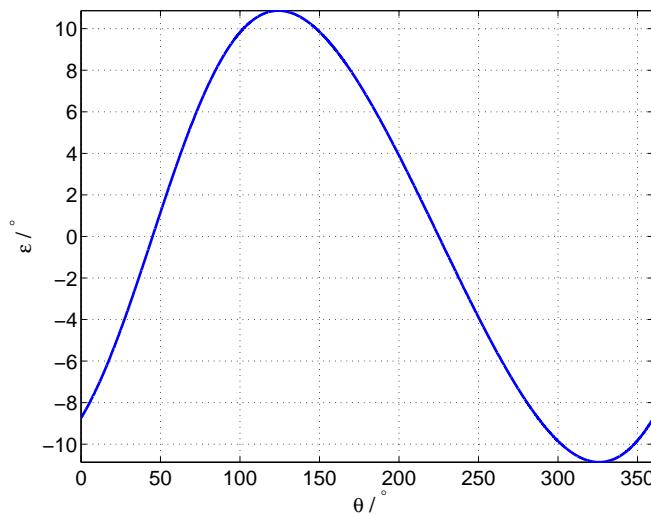
$$C_4(\Delta y_s) = -4,24\Delta y_s^3 + 6,37\Delta y_s^2 \quad (5.41)$$

5.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x osi

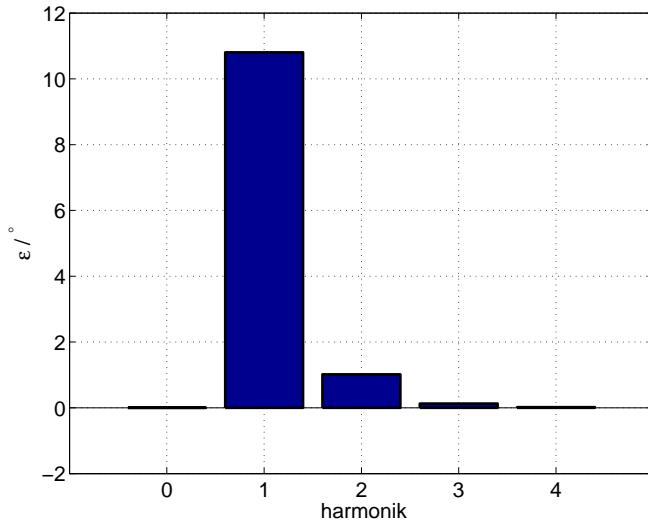
Dinamična ekscentričnost v smeri x osi pričakovano povzroči v B_{sin} in B_{cos} enosmerno komponento (Slika 5.18). Na sliki 5.19 je vidna napaka v obliki prvega harmonika, kar je bilo pričakovati (Poglavlje 4.2.3). Z razvojem napake v Fourierovo vrsto je najizrazitejši prvi harmonik, enosmerna komponenta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



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



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



Slika 5.20: 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 Spremembra signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x

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

$$A_{sin} = 1,5 \quad (5.42)$$

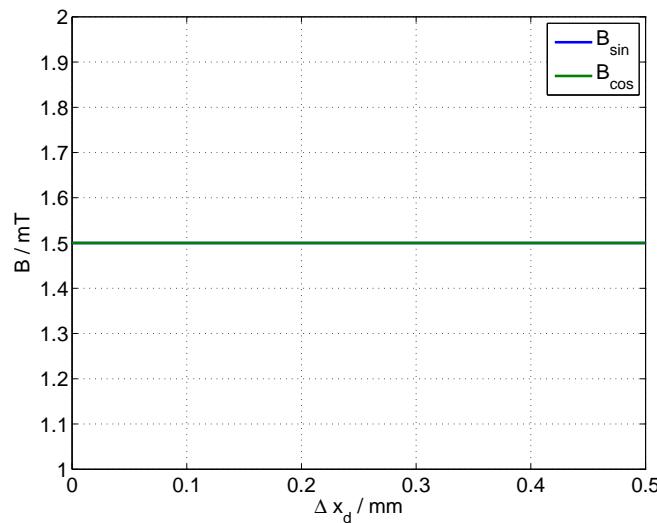
$$Off_{sin} = -\Delta x_d \quad (5.43)$$

$$\delta_{sin} = 0 \quad (5.44)$$

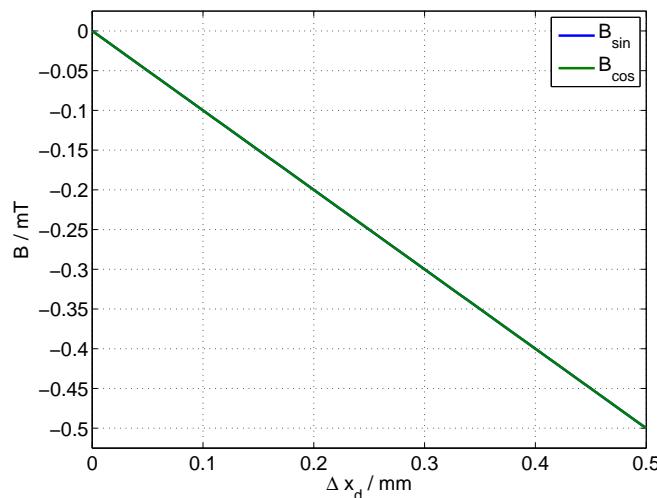
$$A_{cos} = 1,5 \quad (5.45)$$

$$Off_{cos} = -\Delta x_d \quad (5.46)$$

$$\delta_{cos} = 0 \quad (5.47)$$

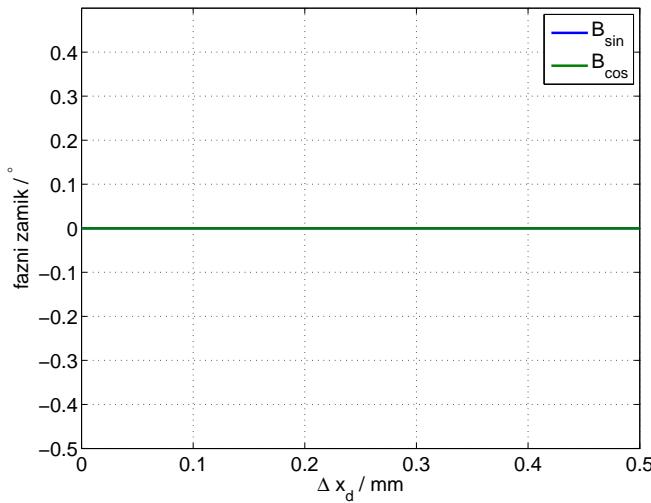


Slika 5.21: Amplituda osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



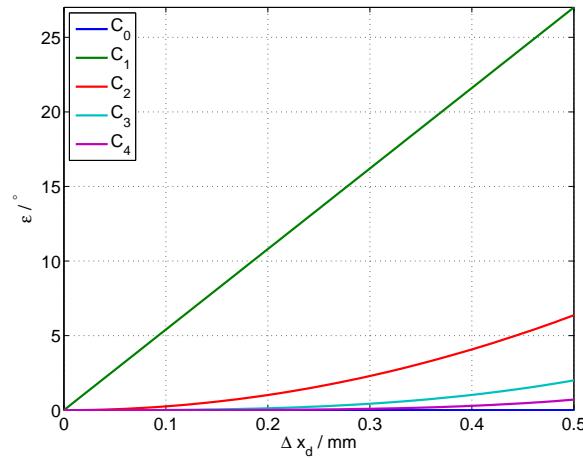
Slika 5.22: Enosmerna komponenta B_{sin} in B_{cos} pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

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



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

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



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

s kubičnimi polinomi.

$$C_0(\Delta x_d) = (-293\Delta x_d^3 + 253\Delta x_d^2 - 82\Delta x_d + 3, 64) \cdot 10^{-16} \quad (5.48)$$

$$C_1(\Delta x_d) = 54, 00\Delta x_d + (-281\Delta x_d^3 + 211\Delta x_d^2 + 5, 56) \cdot 10^{-15} \quad (5.49)$$

$$C_2(\Delta x_d) = 25, 5\Delta x_d^2 + (-822\Delta x_d^3 + -127\Delta x_d + 7, 81) \cdot 10^{-16} \quad (5.50)$$

$$C_3(\Delta x_d) = 16, 0\Delta x_d^3 + (209\Delta x_d^2 - 11, 2\Delta x_d - 3, 04) \cdot 10^{-16} \quad (5.51)$$

$$C_4(\Delta x_d) = 11, 3\Delta x_d^3 - 3, 61\Delta x_d^2 + 3, 92 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 8, 94 \cdot 10^{-3} \quad (5.52)$$

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

$$C_0 = 0 \quad (5.53)$$

$$C_1 = 54, 02\Delta x_d \quad (5.54)$$

$$C_2 = 25, 46\Delta x_d^2 \quad (5.55)$$

$$C_3 = 16, 01\Delta x_d^3 \quad (5.56)$$

$$C_4 = 0 \quad (5.57)$$

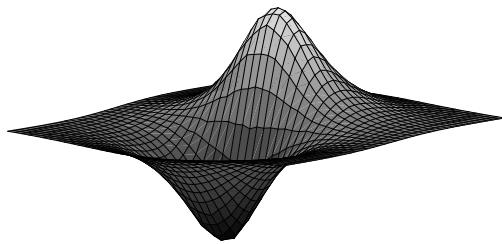
5.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y in sprememba razdalje Hallovih sond od magneta

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

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

6 Realni model magnetnega polja

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



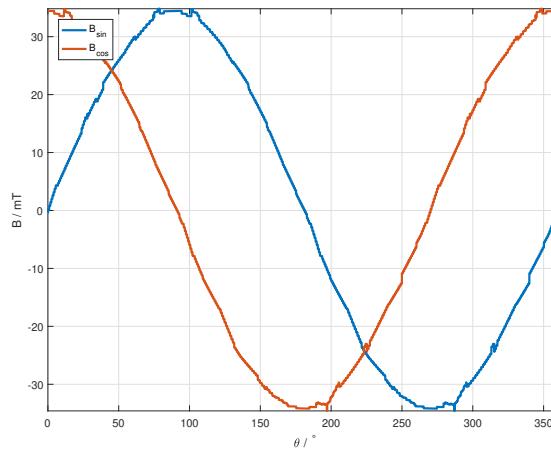
Slika 6.1: Model Z- komponente gostote magnetnega pretoka uporabljen v simulacijah

polju. Polje, ki ga pomeri Hallova sonda ob zasuku ni bilo definirano oz. izpeljano analitično kot pri linearni aproksimaciji (5.2) in (5.3). Prvo je bila izračunana relativna lokacija sonde glede na magnet. Nato se je vrednost Z-komponente gostote magnetnega pretoka aproksimiralo s pretokom, definiranim v geometrijsko najbližji točki definicijskega območja. V tem poglavju so predstavljeni rezultati

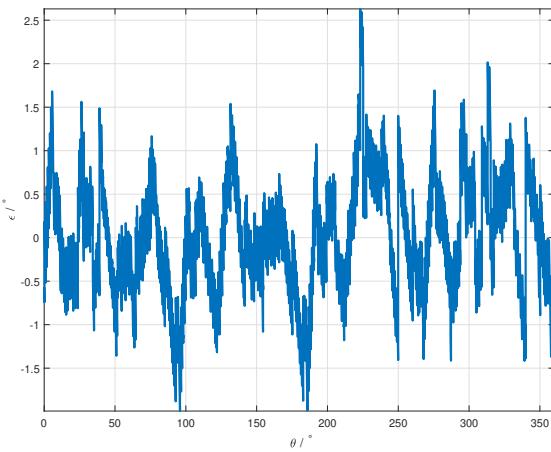
simulacij ekscentričnosti z uporabo realnega modela magnetnega polja.

6.1 Brez napake

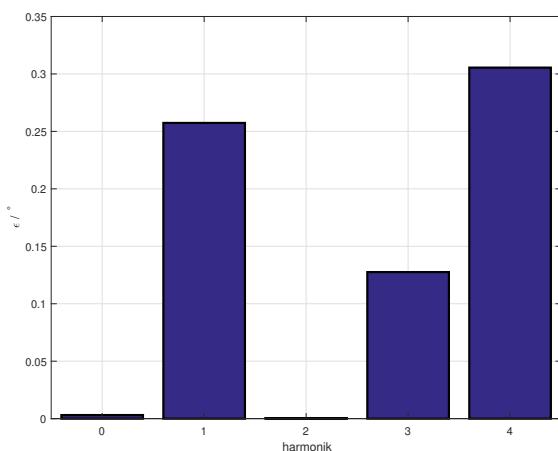
Kljub idealni montaži, Hallovi sondi ne zajameti idealnih signalov. Signala nimata enakih amplitudi osnovnega harmonika, idealnega faznega zamika, vsebujeta tudi enosmerne komponente. Vsebujeta tudi višje harmonike (Slika 6.2). To se izrazi v napaki (slika 6.3). V napaki so špicei (primer 220°), ki so posledica simulacije Z-komponente gostote magnetnega pretoka. 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].



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

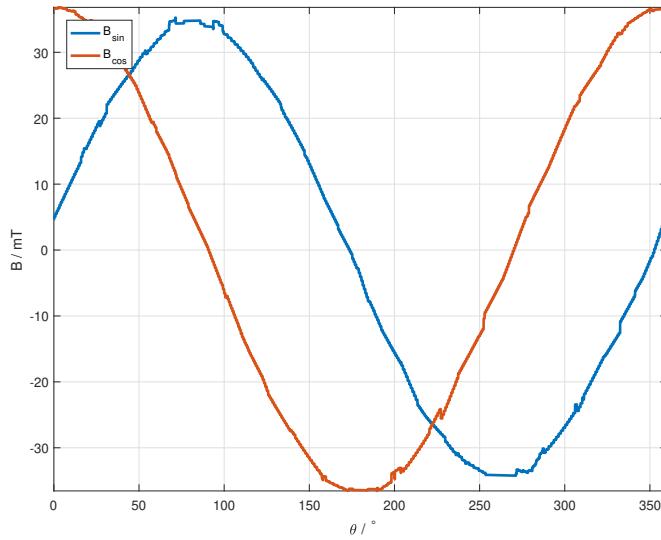


Slika 6.4: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem brez ekscentričnosti

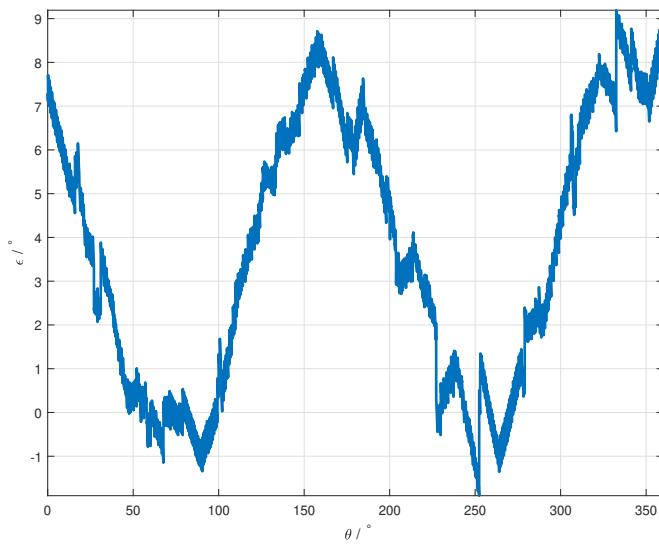
6.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

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 višjo amplitudo

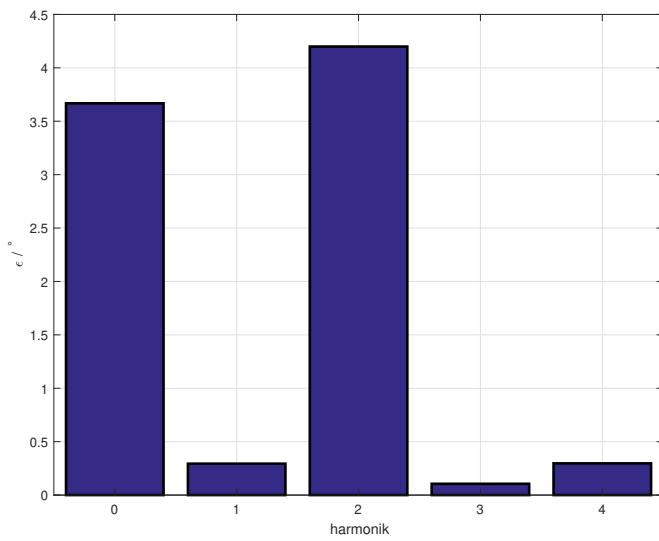
signalna B_{cos} , ter fazni zamik B_{sin} . Na sliki 6.6 je prikazana napaka ε . Oblika napake je pričakovana [7]. Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 6.7) prikaže enako velikost enosmerne komponente in nižjo amplitudo drugega harmonika, kot pri simulacijah z linearnim modelom.



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



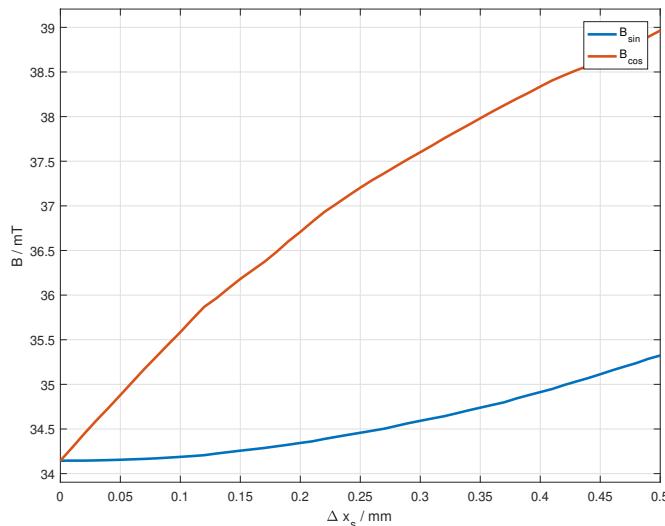
Slika 6.6: Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x



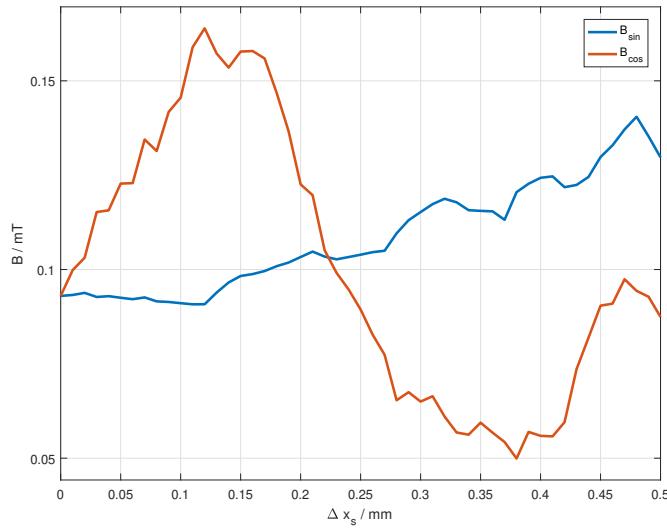
Slika 6.7: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20mm statične ekscentričnosti v smeri x

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

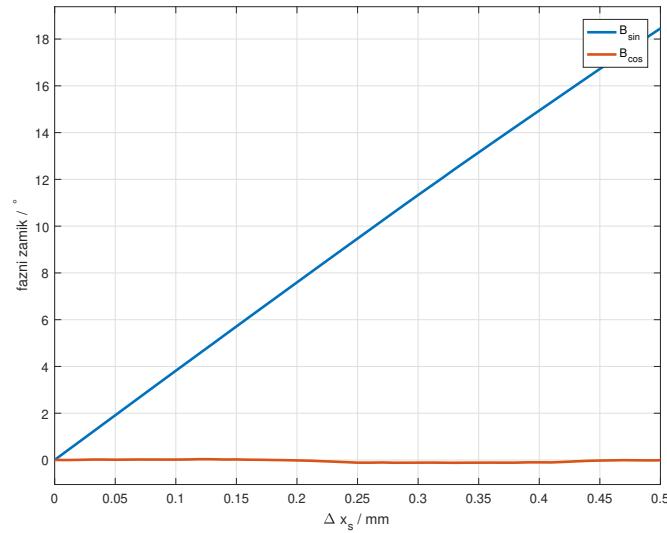
Na sliki 6.8 je prikazana sprememba amplitude prvega harmonika signalov B_{sin} in B_{cos} . Pričakovano je hitrejše spreminjanje amplitude signala B_{cos} . Amplitude B_{cos} z večjim odmikom narašča počasnejše, saj Hall-ova sonda meri Z-komponento gostote magnetnega pretoka v okolini maksimuma. Na sliki 6.9 je prikazan potek enosmerne komponente B_{sin} in B_{cos} . Po rezultatih simulacij ni bilo pričakovano spreminjanje enosmerne komponente. Enosmerna komponenta se spreminja, vendar je njen vpliv praktično zanemarljiv. Slika 6.10 prikazuje potek faznih signalov. Rezultat je bil pričakovan.



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



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



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

Poteke se aproksimira s kubičnimi polinomi. Enačbe potrdijo konstantnost amplitude prvega harmonika in enosmerne komponente signala B_{sin} , ter linearno naraščanje faznega zamika. Na sliki 6.11 so prikazani poteki amplitud posame-

znega harmonika ob spremjanja statične ekscentričnosti v smeri x. Enosmerna komponenta in amplituda drugega harmonika naraščata linearno, ostali harmoniki ohranjajo konstantno amplitudo (6.7)-(6.11).

$$A_{sin}(\Delta x_s) = -1,21\Delta x_s^3 + 5,40\Delta x_s^2 - 3,07 \cdot 10^{-2}\Delta x_s + 34,1 \quad (6.1)$$

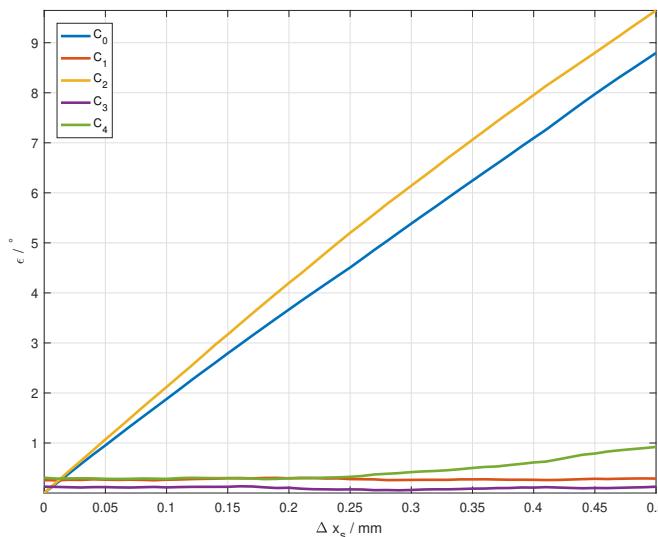
$$Off_{sin}(\Delta x_s) = -0,347\Delta x_s^3 + 0,388\Delta x_s^2 - 2,17 \cdot 10^{-2}\Delta x_s^1 + 9,24 \cdot 10^{-2} \quad (6.2)$$

$$\delta_{sin}(\Delta x_s) = -5,73\Delta x_s^3 + 4,18 \cdot 10^{-1}\Delta x_s^2 + 38,1\Delta x_s + 4,78 \cdot 10^{-3} \quad (6.3)$$

$$A_{cos}(\Delta x_s) = 12,0\Delta x_s^3 - 19,4\Delta x_s^2 + 16,4\Delta x_s + 34,1 \quad (6.4)$$

$$Off_{cos}(\Delta x_s) = 9,67\Delta x_s^3 - 7,21\Delta x_s^2 + 1,25\Delta x_s + 8,47 \cdot 10^{-2} \quad (6.5)$$

$$\delta_{cos}(\Delta x_s) = 12,9\Delta x_s^3 - 8,25\Delta x_s^2 + 9,90 \cdot 10^{-1}\Delta x_s - 4,74 \cdot 10^{-3} \quad (6.6)$$



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

$$C_0(\Delta x_s) = 6,41\Delta x_s^3 - 6,66\Delta x_s^2 + 19,4\Delta x_s + 4,39 \cdot 10^{-3} \quad (6.7)$$

$$C_1(\Delta x_s) = 3,66\Delta x_s^3 - 2,92\Delta x_s^2 + 6,43 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 2,44 \cdot 10^{-1} \quad (6.8)$$

$$C_2(\Delta x_s) = -3,77\Delta x_s^3 - 3,17\Delta x_s^2 + 21,8\Delta x_s - 9,98 \cdot 10^{-3} \quad (6.9)$$

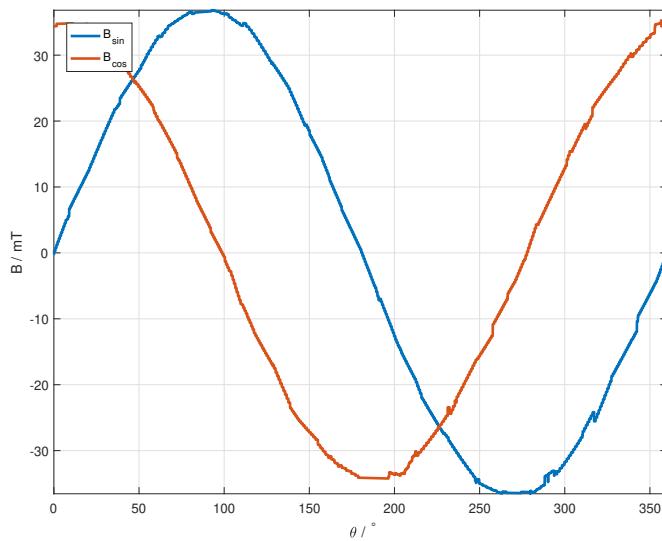
$$C_3(\Delta x_s) = 2,97\Delta x_s^3 - 1,58\Delta x_s^2 + 6,87 \cdot 10^{-2}\Delta x_s + 1,22 \cdot 10^{-1} \quad (6.10)$$

$$C_4(\Delta x_s) = 4,66\Delta x_s^3 + 1,12\Delta x_s^2 - 4,23 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 3,07 \cdot 10^{-1} \quad (6.11)$$

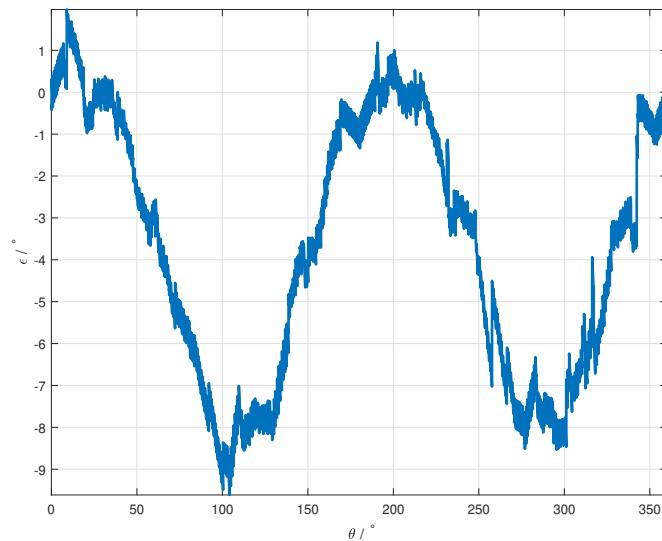
Enosmerna komponenta narašča enako kot pri simulacijah z linearnim modelom. Drugi harmonik narašča nekoliko počasneje.

6.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

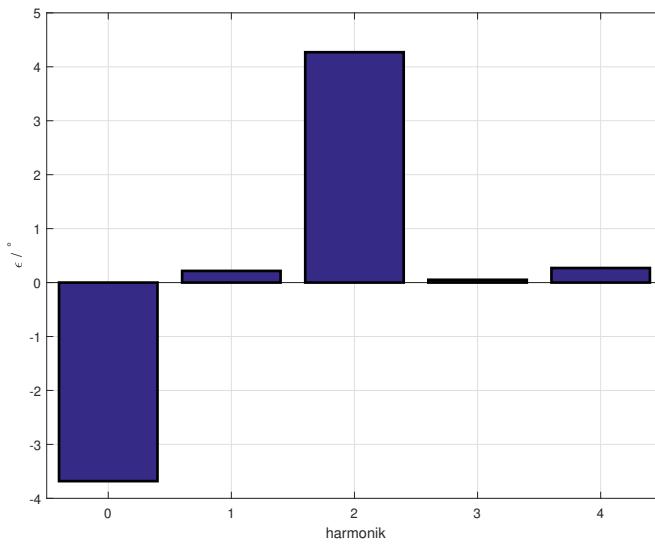
Tako kot pri statični ekscentričnosti v smeri x, se tudi na B_{sin} in B_{cos} signalih ob povzročeni ekscentričnosti opazi predvidene spremembe (slika 6.12). Amplituda B_{sin} se je povišala, spremenil se je tudi fazni zamik B_{cos} . Napaka ε (slika 6.13) je enake oblike kot je bila pri simulacijah statične ekscentričnosti v smeri x (slika 6.6). Napaka ima le negativno enosmerno komponento. Razvoj napake v Fourierovo vrsto (slika 6.7) potrdi pričakovanja.



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



Slika 6.13: Napaka 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. Sprememba B_{cos} od statične ekscentričnosti v smeri y je proti spremembi B_{sin} zanemarljiva. Enosmerena komponenta (slika 6.16) pri B_{sin} se spreminja enako, kot enosmerna komponenta B_{cos} pri statični ekscentričnosti v smeri x (slika 6.9). Fazni zamik signalov se spreminja po pričakovanjih (slika 6.17). Fazni zamik se manjša, pri čemer pada fazni zamik B_{cos} signala. Poteki

zapisani s kubičnimi polinomi.

$$A_{sin}(\Delta y_s) = 12,0\Delta y_s^3 - 19,4\Delta y_s^2 + 16,4\Delta y_s + 34,1 \quad (6.12)$$

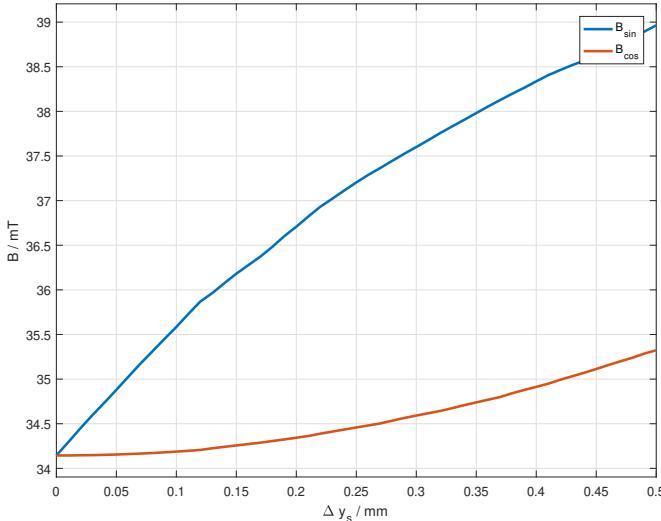
$$Off_{sin}(\Delta y_s) = 9,67\Delta y_s^3 - 7,21\Delta y_s^2 + 1,25\Delta y_s + 8,47 \cdot 10^{-2} \quad (6.13)$$

$$\delta_{sin}(\Delta y_s) = 12,9\Delta y_s^3 - 8,25\Delta y_s^2 + 9,90 \cdot 10^{-1}\Delta y_s - 4,74 \cdot 10^{-3} \quad (6.14)$$

$$A_{cos}(\Delta y_s) = -1,19\Delta y_s^3 + 5,39\Delta y_s^2 - 2,85 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 34,1 \quad (6.15)$$

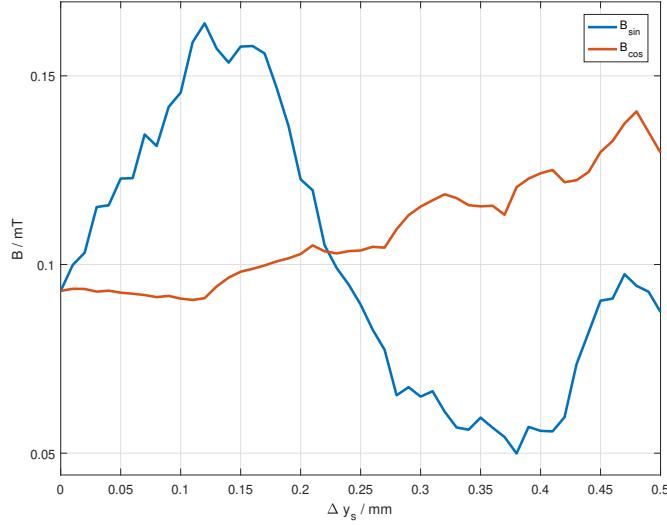
$$Off_{cos}(\Delta y_s) = -0,348\Delta y_s^3 + 0,389\Delta y_s^2 - 0,0223\Delta y_s + 9,25 \cdot 10^{-2} \quad (6.16)$$

$$\delta_{cos}(\Delta y_s) = 3,69\Delta y_s^3 + 1,22\Delta y_s^2 - 38,4\Delta y_s + 7,68 \cdot 10^{-3} \quad (6.17)$$

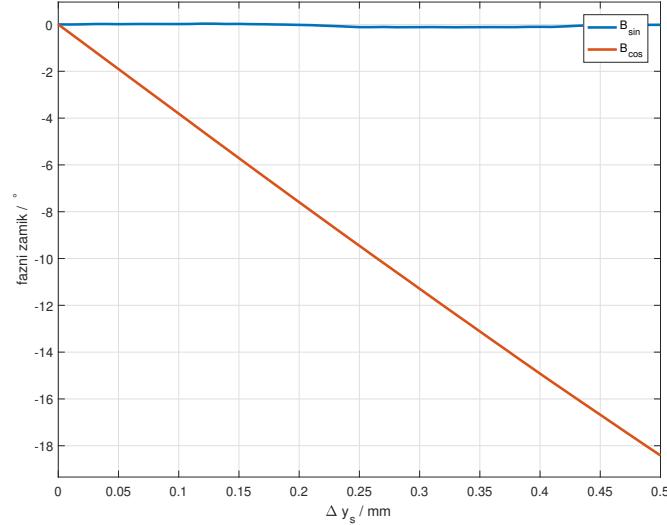


Slika 6.15: Amplituda osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} pri simulacijah z realnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

Enačbe prikazujejo podobne poteke kot poteki pri statični ekscentričnosti v smeri x. Poteki, ki so veljali za B_{sin} tu veljajo za B_{cos} in obratno. Razlikuje se le pri predzanku faznega zamika φ_{cos} . Posledično to vpliva na posamezne harmonike napake. Po pričakovanju je enosmerna komponenta negativana, drugi harmonik narašča počasneje kot je pri simulacijah z linearnim poljem, kar je pričakovano. Poteki aproksimirani s kubičnimi polinomi so podobni aprksimacijam amplitud posameznih harmonikov napake statične ekscentričnosti v smeri x.



Slika 6.16: 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}

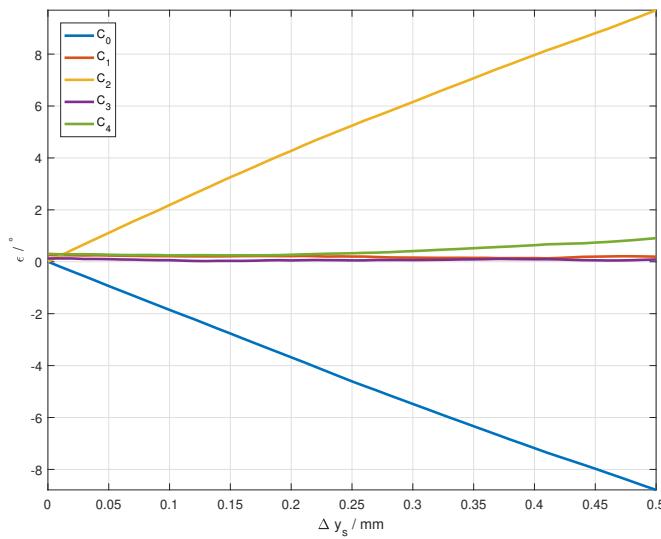
$$C_0(\Delta y_s) = 5,60\Delta y_s^3 - 9,39 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 18,5\Delta y_s - 2,28 \cdot 10^{-3} \quad (6.18)$$

$$C_1(\Delta y_s) = 5,15\Delta y_s^3 - 3,14\Delta y_s^2 + 2,37 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 2,37 \cdot 10^{-1} \quad (6.19)$$

$$C_2(\Delta y_s) = 4,47\Delta y_s^3 - 9,87\Delta y_s^2 + 23,2\Delta y_s - 1,57 \cdot 10^{-2} \quad (6.20)$$

$$C_3(\Delta y_s) = -7,42\Delta y_s^3 + 6,17\Delta y_s^2 - 1,41\Delta y_s + 1,44 \cdot 10^{-1} \quad (6.21)$$

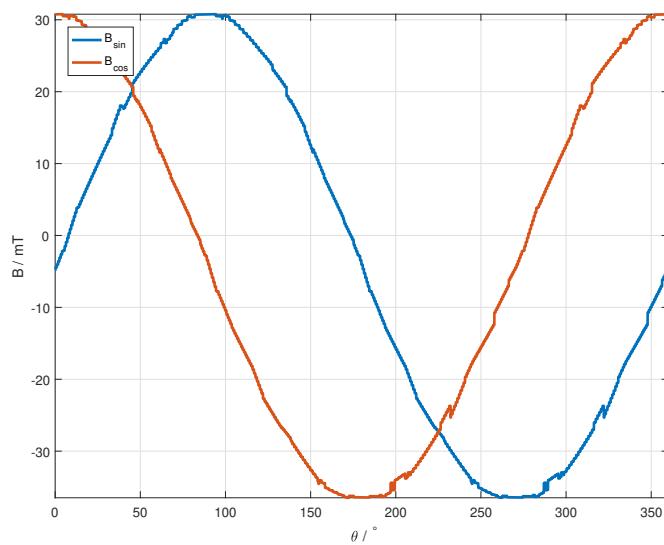
$$C_4(\Delta y_s) = -3,31\Delta y_s^3 + 6,83\Delta y_s^2 - 1,44\Delta y_s + 3,21 \cdot 10^{-1} \quad (6.22)$$



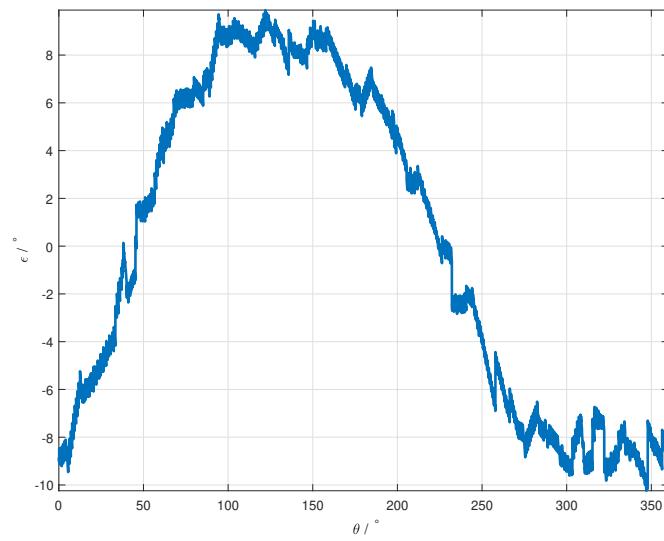
Slika 6.18: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri y pri simulacijah z realnim poljem

6.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x

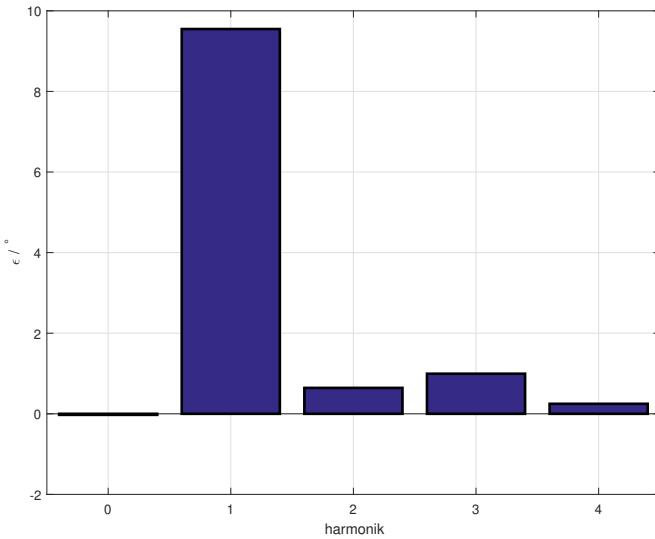
Vpliv dinamične ekscentričnosti v B_{sin} in B_{cos} bo viden v enosmerni komponenti. Na sliki 6.19 sta B_{sin} in B_{cos} , kjer je vidna enosmerna komponenta v obeh signalih. Posledično se v napaki (slika 6.20) izrazi najizraziteje prvi harmonik. Razvoj napake v Fourierovo vrsto potrdi pričakovanja (slika 6.21).



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



Slika 6.20: Napaka 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 to nebo vplivalo, saj se obe spremenjati enako. Enosmerni komponenti signalov (slika 6.23) se spremenjati po pričakovanjih linearno. 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 signala B_{sin} in B_{cos} .

$$A_{sin}(\Delta x_d) = 1,28 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^3 - 6,67 \Delta x_d^2 - 7,59 \cdot 10^{-1} \Delta x_d + 34,2 \quad (6.23)$$

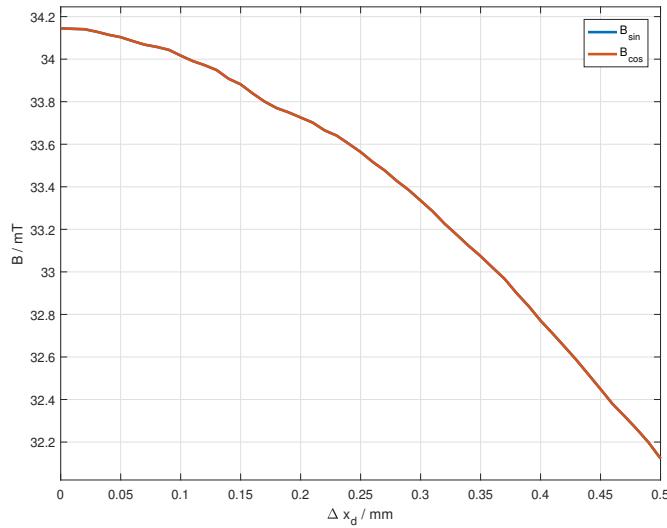
$$Off_{sin}(\Delta x_d) = 2,06 \Delta x_d^3 + 5,62 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 18,8 \Delta x_d + 9,92 \cdot 10^{-2} \quad (6.24)$$

$$\delta_{sin}(\Delta x_d) = 5,79 \Delta x_d^3 - 5,26 \Delta x_d^2 + 7,87 \cdot 10^{-1} \Delta x_d - 1,57 \cdot 10^{-2} \quad (6.25)$$

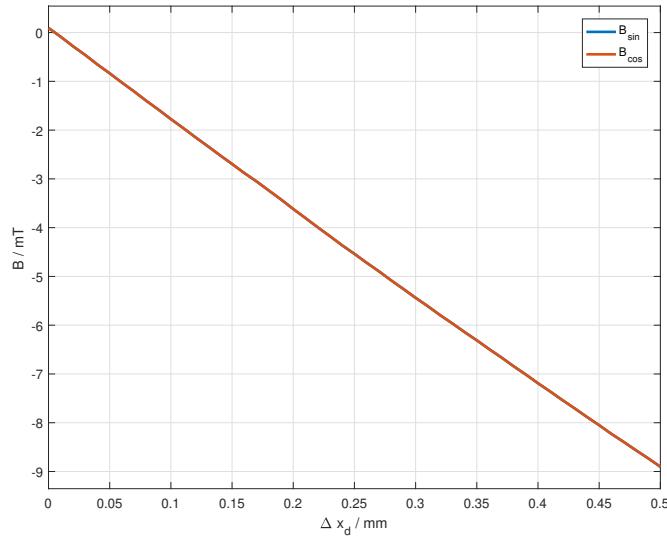
$$A_{cos}(\Delta x_d) = 1,28 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^3 - 6,67 \Delta x_d^2 - 7,59 \cdot 10^{-1} \Delta x_d + 34,2 \quad (6.26)$$

$$Off_{cos}(\Delta x_d) = 2,06 \Delta x_d^3 + 5,62 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 18,8 \Delta x_d + 9,92 \cdot 10^{-2} \quad (6.27)$$

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

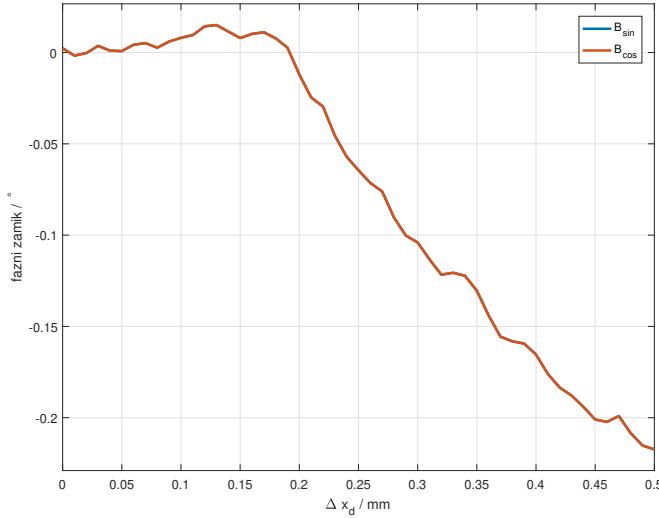


Slika 6.22: Amplituda osnovnega harmonika B_{\sin} in B_{\cos} pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

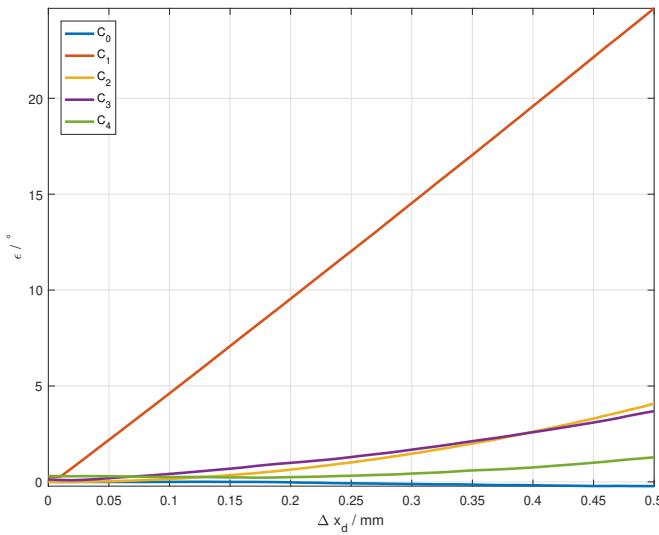


Slika 6.23: Enosmerna komponenta B_{\sin} in B_{\cos} pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

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



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}



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

$$C_0(\Delta x_d) = 5,43\Delta x_d^3 - 4,87\Delta x_d^2 + 6,65 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,48 \cdot 10^{-2} \quad (6.29)$$

$$C_1(\Delta x_d) = -10,3\Delta x_d^3 + 12,0\Delta x_d^2 + 46,1\Delta x_d - 8,97 \cdot 10^{-2} \quad (6.30)$$

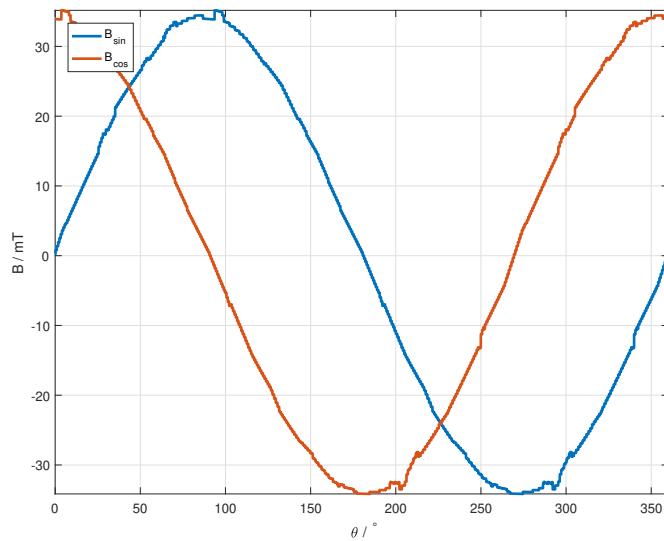
$$C_2(\Delta x_d) = -1,44\Delta x_d^3 + 17,5\Delta x_d^2 - 2,23 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 4,26 \cdot 10^{-4} \quad (6.31)$$

$$C_3(\Delta x_d) = 1,67\Delta x_d^3 + 7,64\Delta x_d^2 + 3,03\Delta x_d + 4,57 \cdot 10^{-2} \quad (6.32)$$

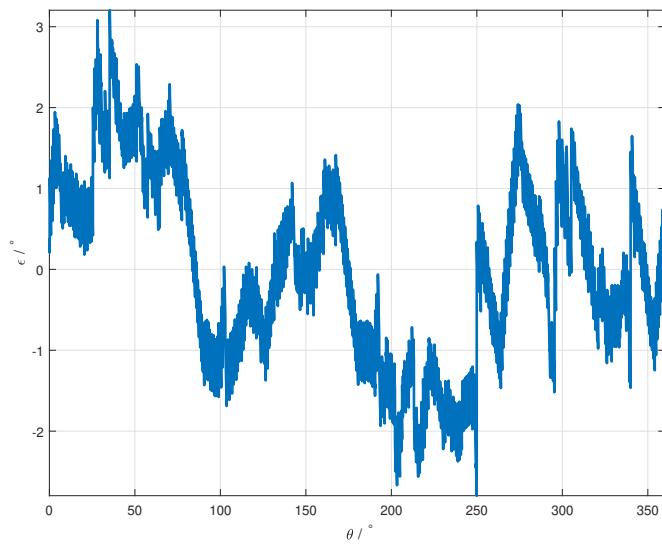
$$C_4(\Delta x_d) = 4,76\Delta x_d^3 + 4,22\Delta x_d^2 - 1,38\Delta x_d + 3,33 \cdot 10^{-1} \quad (6.33)$$

6.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y

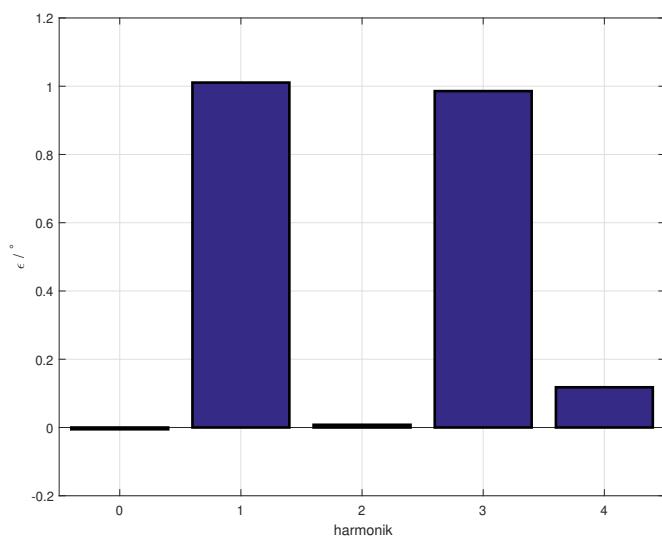
V simulacijah z linearno aproksimacijo polja signala B_{sin} in B_{cos} ter posledično tudi napaka, ni bila odvisna od dinamične ekscentričnosti v smeri y. Kljub temu je bila opravljena simulacija. Rezultati so razlikujejo od pričakovanj. Spremembe v B_{sin} in B_{cos} ni opaziti (slika 6.26), vendar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



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



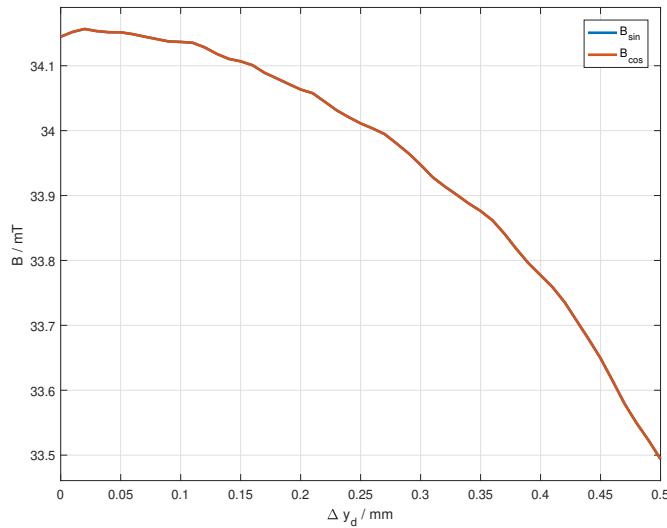
Slika 6.27: Napaka ε pri simulacijah z realnim poljem pri 0,20 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



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 amplituda osnovnega harmonika od naraščanja ekscentričnosti pada (slika 6.29). Razlika amplitud ostaja nespremenjena. V obeh signalih se enako spremenjati enosmerni komponenti, ki sta zanemarljivi (slika 6.30). Opaziti je tudi fazno lezenje obeh signalov, vendar je zanemarljivo (slika 6.31). Poteki so aproksimirani s kubičnimi polinomi.



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

$$A_{\sin}(\Delta y_d) = -3,15\Delta y_d^3 - 6,71 \cdot 10^{-1}\Delta y_d^2 - 2,02 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 34,2 \quad (6.34)$$

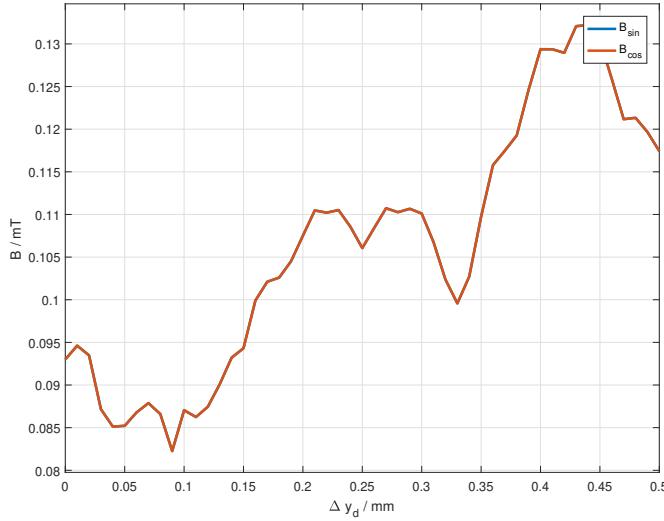
$$Off_{\sin}(\Delta y_d) = -0,895\Delta y_d^3 + 0,676\Delta y_d^2 - 0,0463\Delta y_d + 0,0895 \quad (6.35)$$

$$\delta_{\sin}(\Delta y_d) = 6,51\Delta y_d^3 - 5,38 \cdot 10^0\Delta y_d^2 + 8,76 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 2,65 \cdot 10^{-2} \quad (6.36)$$

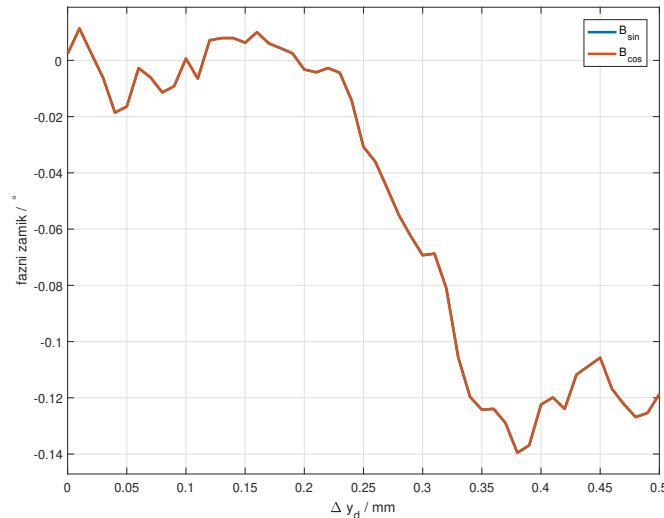
$$A_{\cos}(\Delta y_d) = -3,15\Delta y_d^3 - 6,71 \cdot 10^{-1}\Delta y_d^2 - 2,02 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 34,2 \quad (6.37)$$

$$Off_{\cos}(\Delta y_d) = -0,895\Delta y_d^3 + 0,676\Delta y_d^2 - 0,0463\Delta y_d + 0,0895 \quad (6.38)$$

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



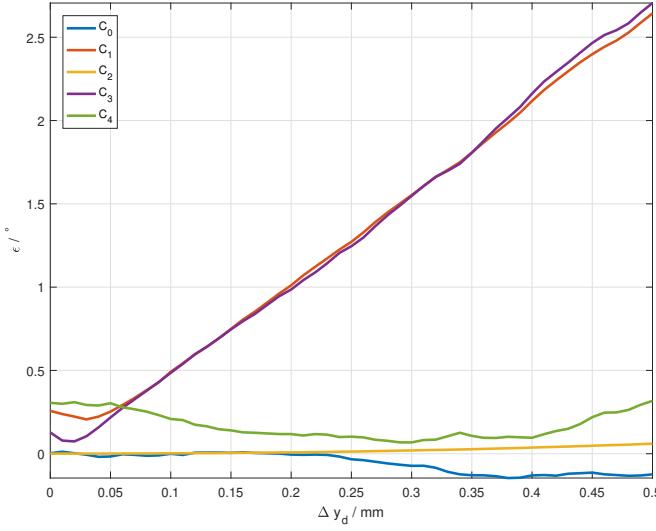
Slika 6.30: Enosmerna komponenta B_{sin} in B_{cos} pri simulacijah z realnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri y



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

Na sliki 6.32 je prikazana odvisnost amplitud napake ob spremjanju dinamične ekscentričnosti v smeri y. Napaka, se po pričakovanjih najbolj izrazi s prvim in tretjim harmonikom. Oblika napake ni posledica spremembe amplitude osnov-

nega harmonika, enosmerne komponente ali spremembe faznega zamika v B_{sin} in B_{cos} . Naraščanje prvega in tretjega harmonika je posledica vpliva drugega harmonika, ki se pojavi v B_{sin} in B_{cos} . Drugi harmonik v B_{sin} in B_{cos} se pojavi zaradi magnetnega polja, kar v tem delu ni raziskano.



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

$$C_0(\Delta y_d) = 6,68\Delta y_d^3 - 5,51\Delta y_d^2 + 8,88 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 2,68 \cdot 10^{-2} \quad (6.40)$$

$$C_1(\Delta y_d) = -1,13 \cdot 10\Delta y_d^3 + 1,05 \cdot 10\Delta y_d^2 + 2,52\Delta y_d + 1,57 \cdot 10^{-1} \quad (6.41)$$

$$C_2(\Delta y_d) = 0,113\Delta y_d^3 + 0,191\Delta y_d^2 - 4,44 \cdot 10^{-3}\Delta y_d + 6,00 \cdot 10^{-4} \quad (6.42)$$

$$C_3(\Delta y_d) = -3,87\Delta y_d^3 + 4,82\Delta y_d^2 + 3,95\Delta y_d + 3,55 \cdot 10^{-2} \quad (6.43)$$

$$C_4(\Delta y_d) = 6,42\Delta y_d^3 - 1,09\Delta y_d^2 - 1,08\Delta y_d + 3,26 \cdot 10^{-1} \quad (6.44)$$

V tem poglavju so bile prikazane simulacije z uporabo realnega polja, ki ga merijo Hall-ove sonde. Rezultati imajo manjšo napako kot pri simulacijah z aproksimiranim linearnim magnetnim poljem. Opaziti je bilo manjši fazni zamik obeh signalov B_{sin} in B_{cos} pri dinamični ekscentričnosti, kar bi bilo smiselno pri meritvah podrobnejše opazovati. Na koncu, pri dinamični ekscentričnosti v smeri

y je prikazano tudi, da se v zajetem polju pojavijo tudi višji harmoniki, ki še dodatno ustvarijo napako.

7 Meritve

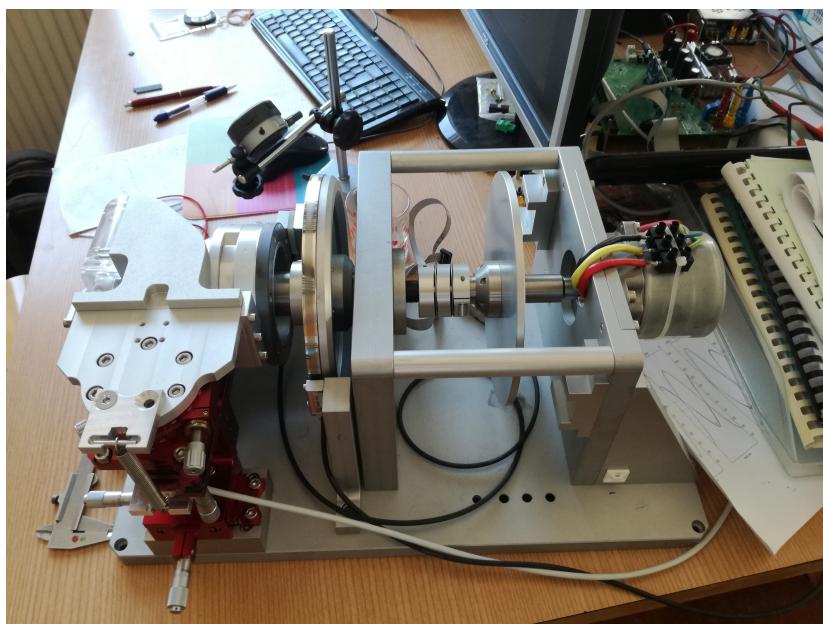
Simulacije so prikazale okvirne poteke B_{sin} in B_{cos} signalov ter napake ob posameznih ekscentričnostih. Na meritni napravi so bile opravljene meritve ekscentričnosti. V poglavju je opisana meritna naprava, zajem podatkov ter izvedba meritev.

7.1 Oprema in postavitev meritnega mesta

Meritno mesto sestavlja krmilna plošča za regulacijo motorskega pogona in obdelavo signalov sestavljena v LRTME. Vsebuje elektromotorski pogon z inkrementalnim, referenčnim dajalnikom zasuka TONiC podjetja Renishaw in magnetnim aktuatorjem za RM44 podjetja RLS d.o.o. Magnetni aktuator je možno premikati le v eni prostorski osi (slika 7.1). Senzor RM44 je pritrjen na konstrukcijo 6-osnega mikrometrskoga nastavljalnika pozicije HTIMS601. Celotno meritno mesto je prikazano na sliki 7.2. Za manevriranje s HTIMS601 je potrebno nastaviti 6 osi. S postavitvijo koordinatnega sistema (slika 7.3), je vsak od vijakov definiral premik senzorja. Vsako os se nastavlja z enim od vijakov (slika 7.4). Vijaki poimenovani x-os, y-os in z-os so za nastavljanje translacijskega merjenca, x-rot, y-rot in z-rot so za nastavljanje rotacije premikajoče plošče na vrhu HTIMS601. S spremembjo vrtenja vijakov translacijskih osi, se je lokacija senzorja pred magnetom spreminja za enako spremembo. S spremembjo vrtenja rotacijskih vijakov, se je zaradi ročice na katero je pritrjen senzor, senzor zarotira in hkrati tudi premakne iz dotedanje lege. S spremembjo rotacije je potrebno



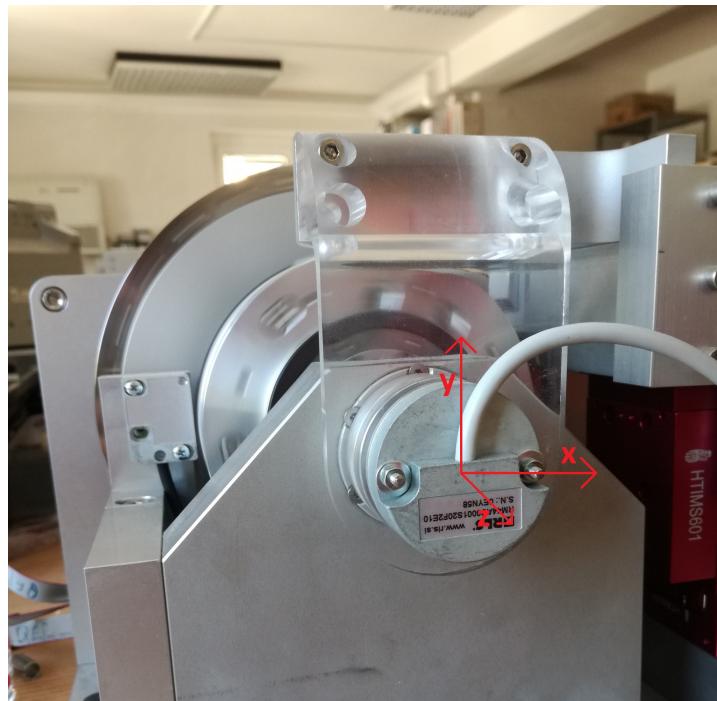
Slika 7.1: Dinamično ekscentričnost se lahko izmeri le v eni smeri



Slika 7.2: Postavitev testnega mesta

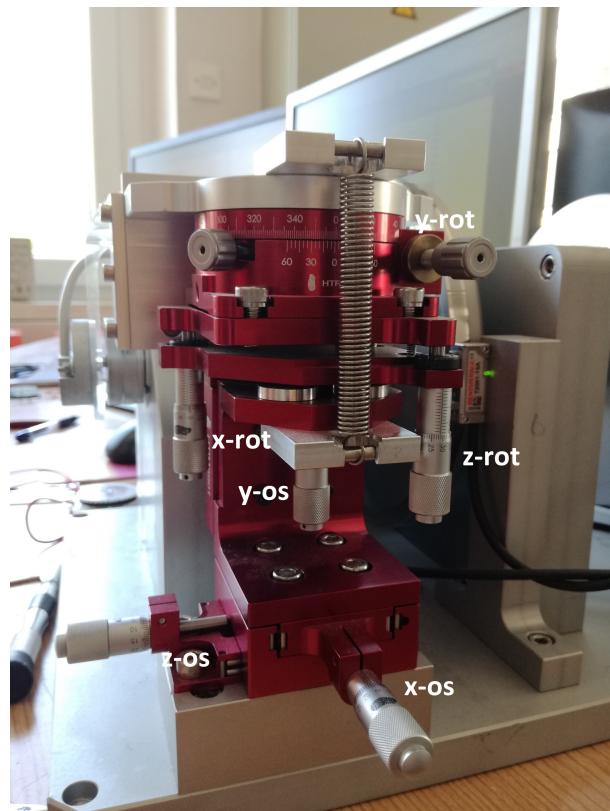
popraviti tudi nastavitev vijakov, ki senzor premikajo v translacijskih oseh.

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

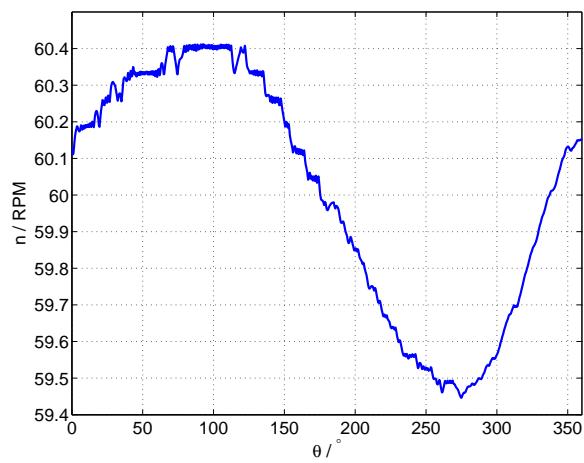


Slika 7.3: Postavitev testnega mesta

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



Slika 7.4: Naprava za nastavljanje statične ekscentričnosti



Slika 7.5: Potek hitrosti od zasuka

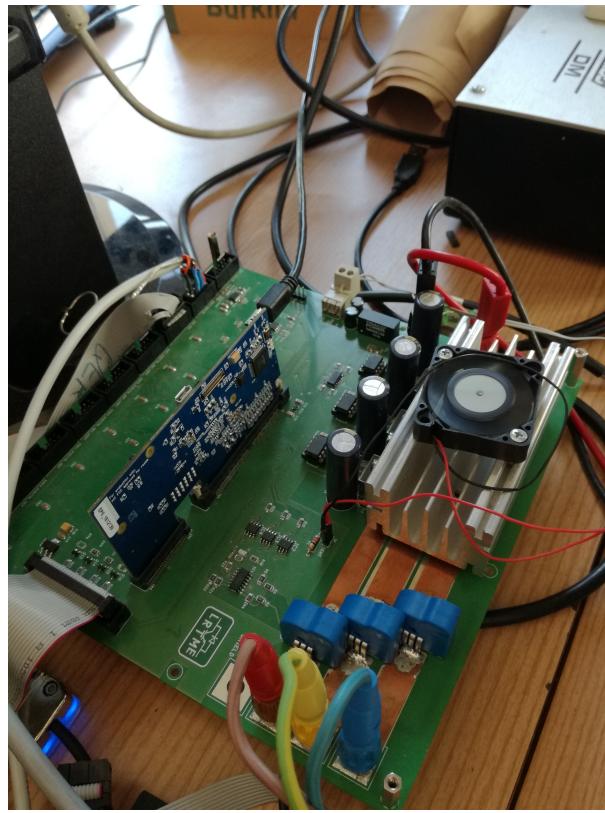
7.2 Zajem podatkov

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

Krmilna plošča (slika 7.7) zajema podatke s pogona s frekvenco 1kHz. Referenčni inkrementalni dajalnik, se ob zagonu inicializira. V programu se podatek o kotu deli z 12595200. Definicjsko območje referenčnega kota se giblje med 0 in 1. Signala sin in cos se na krmilni plošči ojačata in pretvorita z 12 bitnim AD pretvornikom. Izhodu AD pretvornika se odšteje 2048 in deli s 4096. Definicjsko območje sin in cos signala se gibljeta med $\pm 0,5$. Hitrost in napaka sta izračunana iz zajetih signalov. Podatki so v obliki enega paketa poslani s krmilne plošče na 1 sekundo. Pri frekvenci vrtenja 1 Hz, grafični vmesnik prikaže en obrat. Podatke se lahko izvozi v obliki .csv datoteke in nato poljubno obdela. Na sliki 7.6 je prikazan sinusni signal prikazan kot da je zamaknjen za 180° . To je posledica definicije pozitvne smeri vrtenja za senzor [5]. Senzor ima nasproto definirano pozitivno smer vrtenja. To sem rešil tako, da sem obrnil podatke. Popraviti je bilo potrebno tudi potek referenčnega dajalnika.



Slika 7.6: Grafični vmesnik s poteki signalov

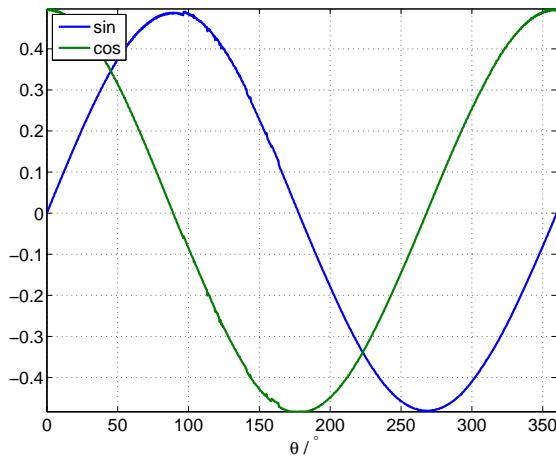


Slika 7.7: Krmilna plošča za krmiljenje pogona in obdelavo signalov s dajalnikov položaja

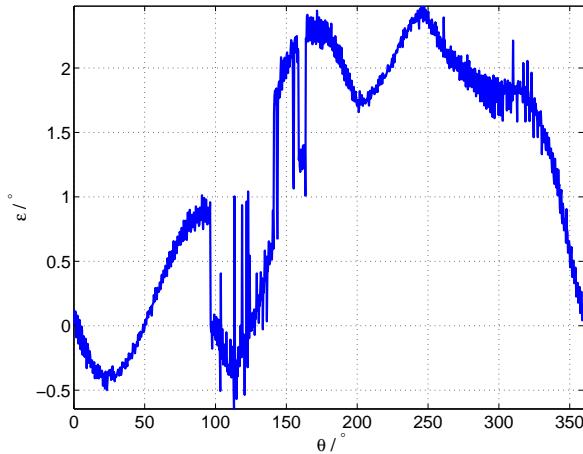
7.3 Senzor v izhodiščni legi

Senzor in magnet se lahko gibljeta, najprimernejša, izhodiščna lega, ni definirana. Z merilno urico Mitutoyo 543-391B se je dinamično ekscentričnost magneta nastavilo na najmanjšo. Oplet z merilno urico je bil pomerjen $\pm 3\mu\text{m}_{\text{pp}}$. S prilagajanjem vijakov HTIMS601, opazovanjem B_{\sin} in B_{\cos} ter napake je bil senzor nastavljen v lego, kjer je bila amplituda drugega harmonika napake najmanjša. Najprimernejšo lego sem iskal glede na vrednost amplitud in ortogonalnost B_{\sin} in B_{\cos} . Signala B_{\sin} in B_{\cos} morata ustrezati definicijskem območju zajema AD pretvornika.

Na sliki 7.8 sta prikazana B_{\sin} in B_{\cos} . Enosmerni komponenti sta prisotni v obeh signalih, posledično se izrazi v napaki prvi harmonik (slika 7.9). V napaki se pojavi med 95° in 140° preskok napake. V signalih B_{\sin} in B_{\cos} se v tem območju pojavi fazni zamik, B_{\sin} pri 95° in nato B_{\cos} pri 160° . Vzroka nisem raziskoval. Z razvojem napake v Fourierovo vrsto (slika 7.10) vidimo velikosti posameznih amplitud napake. Enosmererna komponenta je posledica sofaznih zamikov obeh signalov B_{\sin} in B_{\cos} . Prvi harmonik je posledica enosmernih komponent B_{\sin} in B_{\cos} . Z matematično obdelavo 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 spremenjena zaradi matematične obdelave. Spreminjanje signalov B_{\sin} in B_{\cos} in napake se bo opazovalo glede na potek, ki je bil pomerjen v izhodiščni legi.



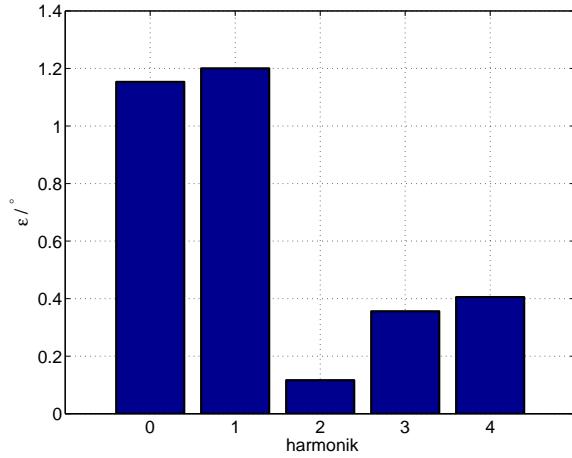
Slika 7.8: Signalna B_{sin} in B_{cos} pomerjena v izhodiščni legi



Slika 7.9: Napaka ε pomerjena v izhodiščni legi

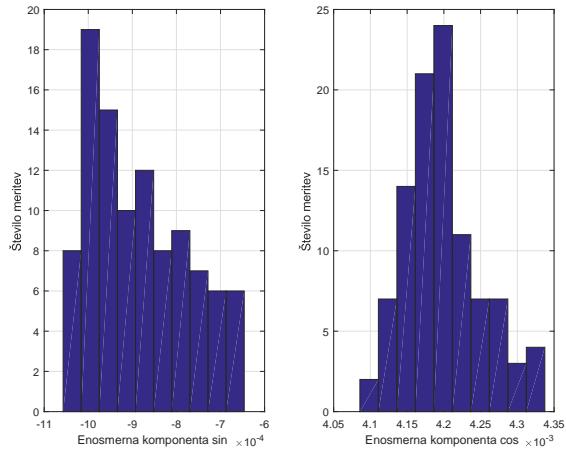
7.3.1 Meritve v izhodiščni legi

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



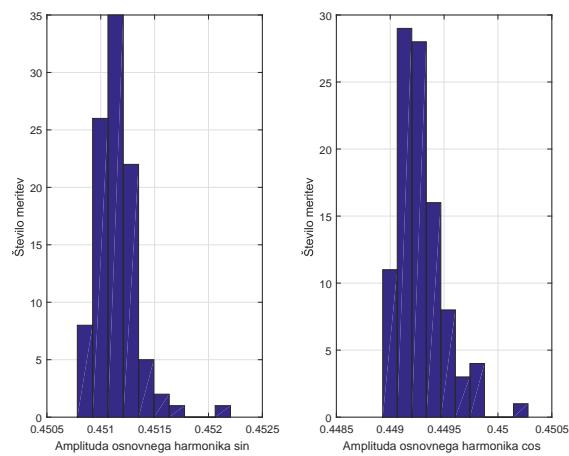
Slika 7.10: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri meritvah v izhodiščni legi

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



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

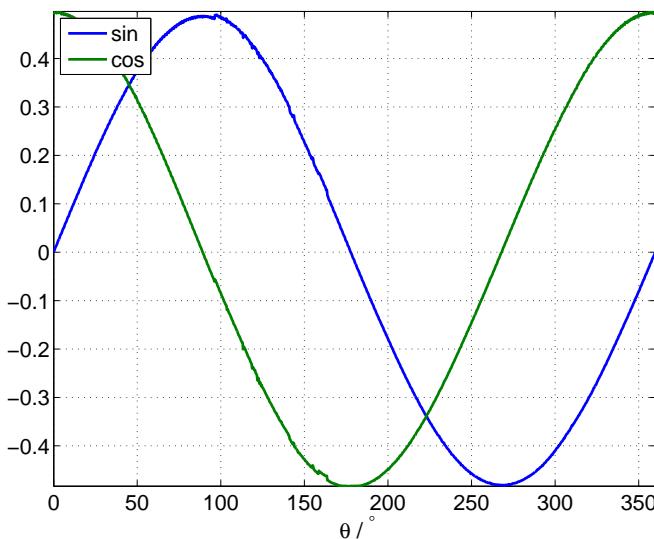
B_{sin} in B_{cos} je prikazana na sliki 7.11. Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika B_{sin} je $0,451$, standardna deviacija je $2,20 \cdot 10^{-4}$. Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika B_{cos} je $0,449$, standardna deviacija je $1,95 \cdot 10^{-4}$.



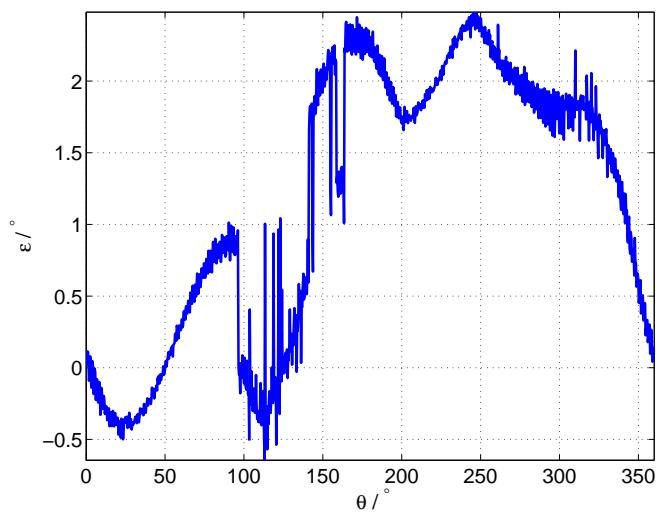
Slika 7.12: Porazdelitev meritev amplitude osnovnega harmonika signalov B_{sin} in B_{cos}

7.4 Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi

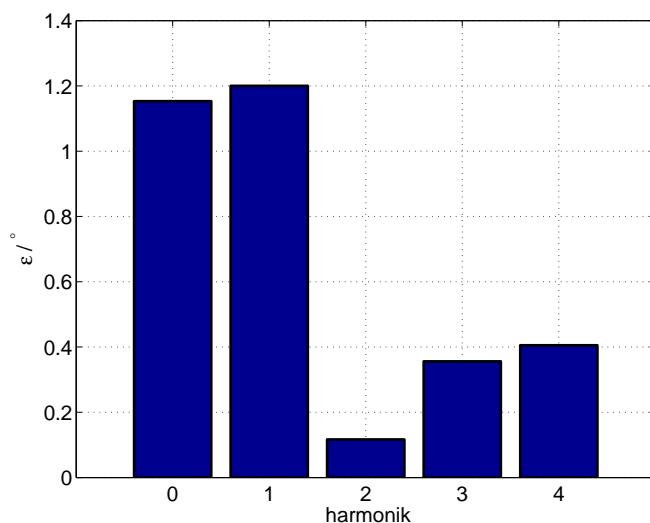
Pri meritvi je pričakovati spremembo amplitud in faznih zamikov signalov B_{sin} in B_{cos} . Na sliki 7.13 sta prikazana B_{sin} in B_{cos} pomerjena pri 0,20 mm statične ekscentričnosti v smeri x. Na signalih, med 95 in 175° se pojavijo nenavadni skoki. Izrazijo se tudi na napaki, ki je prikazana na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



Slika 7.13: Signala B_{sin} in B_{cos} merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



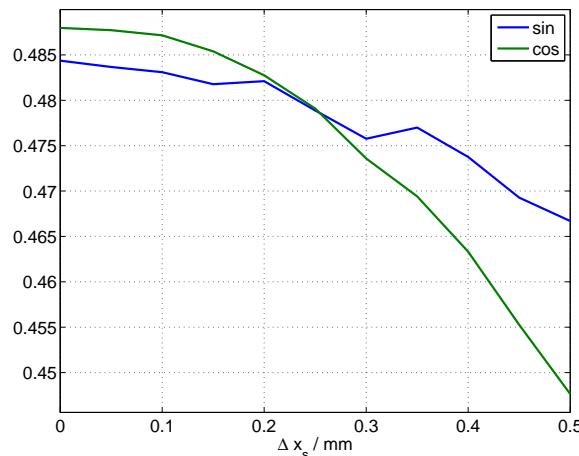
Slika 7.14: Napaka ε merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



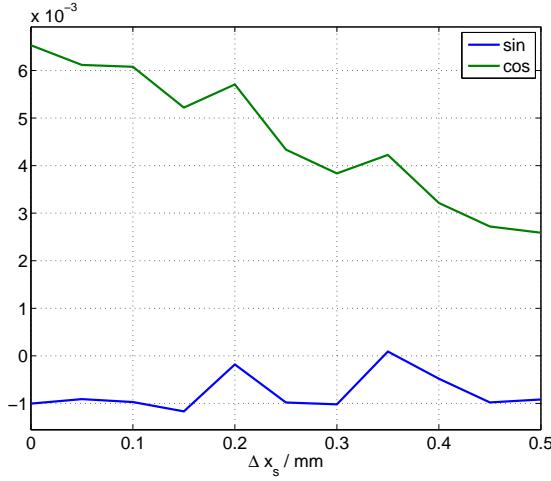
Slika 7.15: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

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

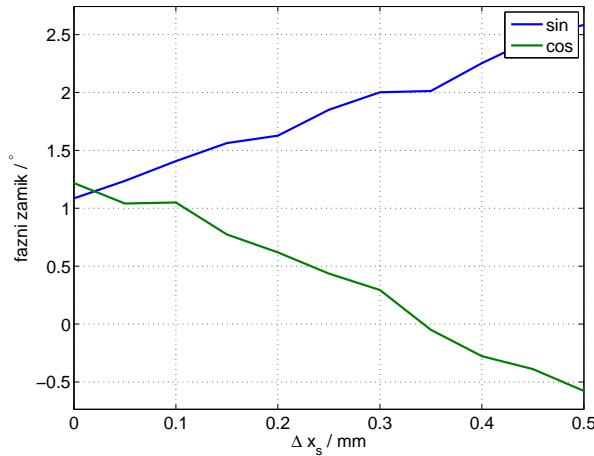
Iz simulacij se pričakuje hitrejše sprememjanje amplitudo osnovnega harmonika B_{cos} signala. Sprememba amplitud osnovnih harmonikov je prikazana na sliki 7.16. Amplituda signala B_{cos} pada pričakovano, pada tudi amplituda signala B_{sin} . Signala nimata enake amplitude v izhodišču, kar je posledica neidealne izhodiščne lege. Potek enosmerne komponente je prikazan na sliki 7.17. Komponenta B_{cos} signala pada kot je bilo predvideno v simulacijah. Fazni zamik signalov je prikazan na sliki 7.18. Pričakovano po simulacijah se fazna razlika med signaloma zmanjšuje. Rezultati simulacij so prikazovali konstanten fazni kot signala B_{cos} in sprememjanje le faznega kota B_{sin} . 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.



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



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



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}

$$A_{sin} = -6,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 1,71 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 1,17 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 0,484 \quad (7.1)$$

$$Off_{sin} = -0,0388 \Delta x_s^3 + 0,0237 \Delta x_s^2 - 2,25 \cdot 10^{-3} \Delta x_s - 9,53 \cdot 10^{-4} \quad (7.2)$$

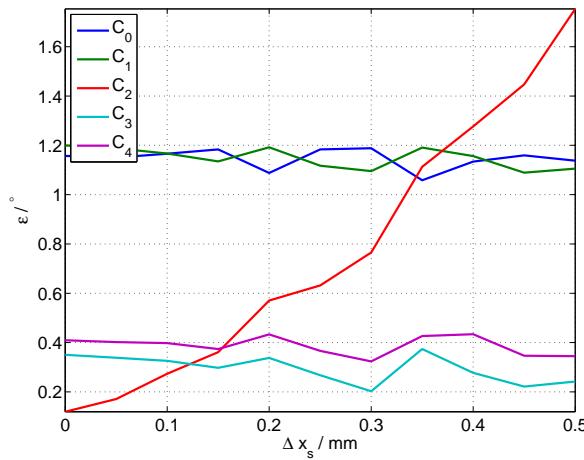
$$\delta_{sin} = 5,32 \Delta x_s^3 - 3,55 \Delta x_s^2 + 3,49 \Delta x_s + 1,08 \quad (7.3)$$

$$A_{cos} = 7,46 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^3 - 0,185 \Delta x_s^2 + 1,01 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 0,488 \quad (7.4)$$

$$Off_{cos} = 0,0221 \Delta x_s^3 - 0,191 \Delta x_s^2 - 3,91 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 6,48 \cdot 10^{-3} \quad (7.5)$$

$$\delta_{cos} = 11,5 \Delta x_s^3 - 10,6 \Delta x_s^2 - 1,14 \Delta x_s + 1,19 \quad (7.6)$$

Slika 7.19 prikazuje poteke amplitud posameznih harmonik napake v odvisnosti od statične ekscentričnosti v smeri x. Kvadratično narašča amplituda drugega harmonika, medtem ko so enosmerna komponenta in ostali harmoniki konstantni. Poteke se aproksimira s kubičnimi polinomi.



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

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

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

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

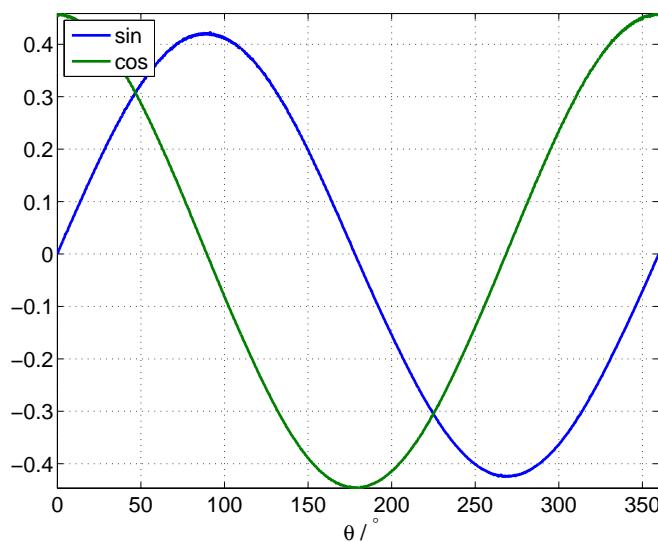
$$C_3 = -2,10\Delta x_s^3 + 1,61\Delta x_s^2 - 5,25 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 3,57 \cdot 10^{-1} \quad (7.10)$$

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

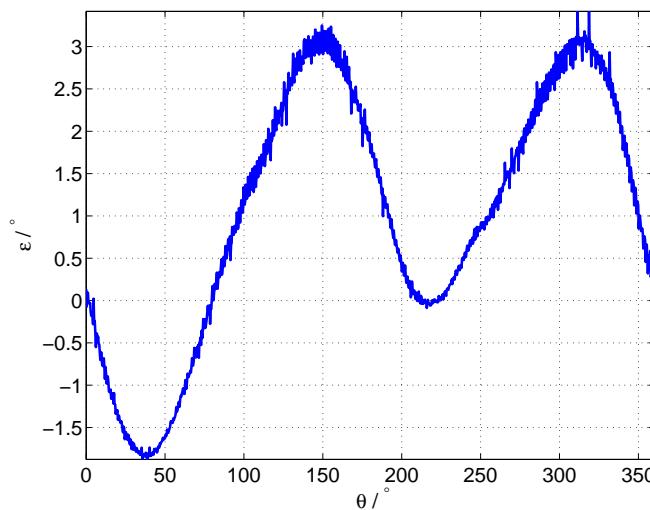
7.5 Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi

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 višji drugi harmonik (slika 7.21). Z razvojem

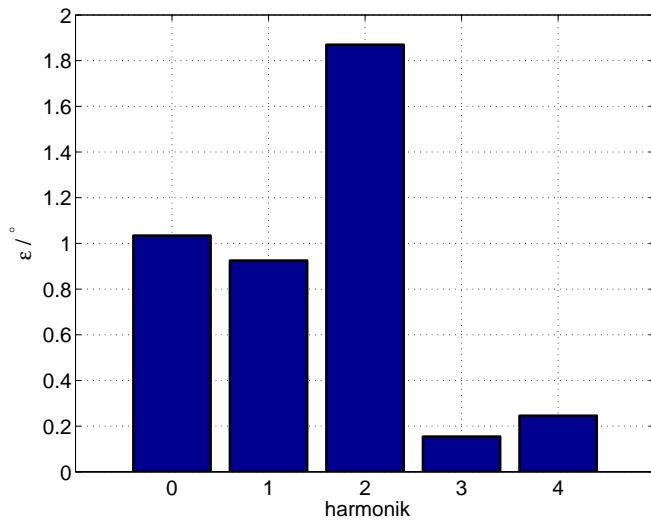
napake v Fourierovo vrsto se potrdi povišanje drugega harmonika. Enosmerna komponenta in prvi harmonik sta nekoliko nižja.



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



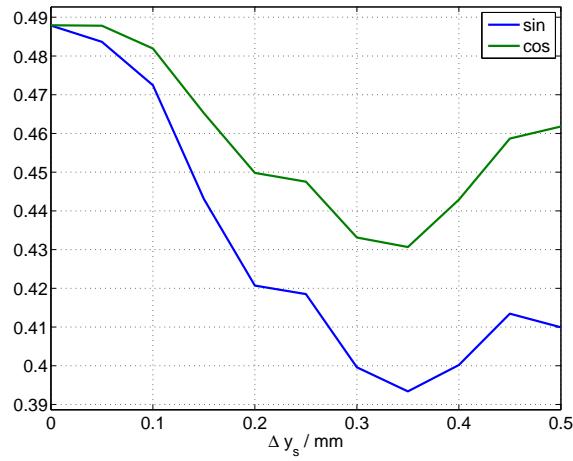
Slika 7.21: Napaka ε merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



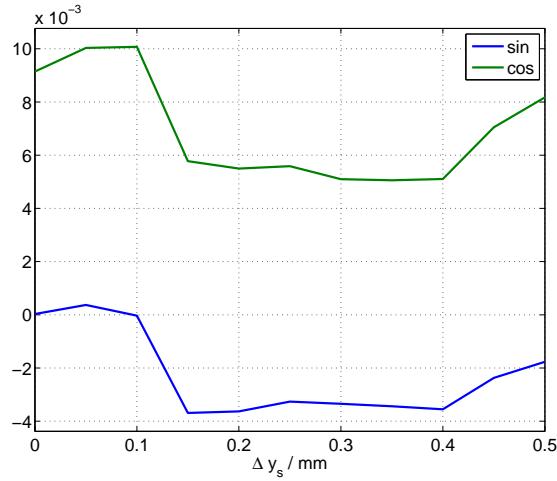
Slika 7.22: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

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

Slika 7.23 prikazuje potek amplitud osnovnega hamonika napake v odvisnosti statične ekscentričnosti v smeri y. S potekom se opazi padanje amplitud. Razlika med signaloma linearno narašča. Slika 7.24 prikazuje potek enosmernih komponent. Pri meritvi 0,15 mm se pojavi skok enosmernih komponent, vendar razlika ostaja enaka. Fazni kot se v pri manjših odmikih ne spreminja kot je bilo pričakovati po rezultatih simulacij. Pri večjih odmikih se sprememba faznih kotov izrazi kot se je pričakovalo. Fazna razlika se začne ob večjih izmikih manjšati.



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



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

$$A_{\sin} = 1,73\Delta y_s^3 - 6,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 2,60 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 4,94 \cdot 10^{-1} \quad (7.12)$$

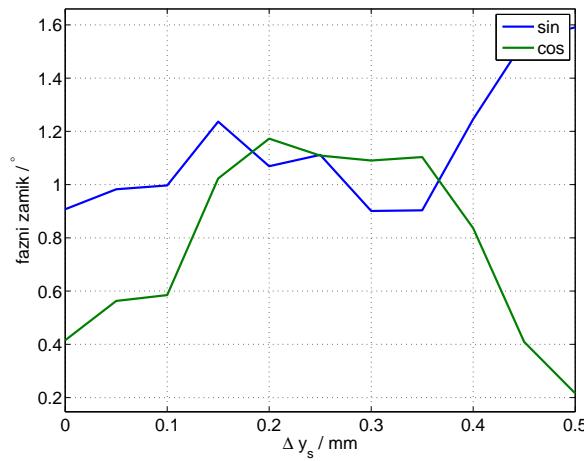
$$Off_{\sin} = 0,0469\Delta y_s^3 + 0,0132\Delta y_s^2 - 0,0229\Delta y_s + 7,08 \cdot 10^{-4} \quad (7.13)$$

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

$$A_{\cos} = +1,99\Delta y_s^3 - 9,29 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 7,82 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 4,91 \cdot 10^{-1} \quad (7.15)$$

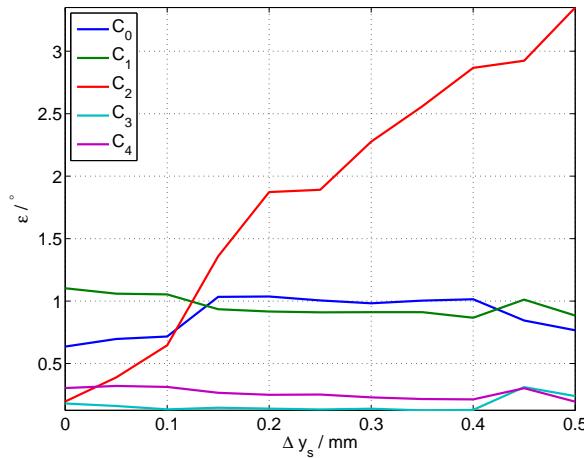
$$Off_{\cos} = 0,187\Delta y_s^3 - 0,0792\Delta y_s^2 - 9,87 \cdot 10^{-3}\Delta y_s + 9,94 \cdot 10^{-3} \quad (7.16)$$

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



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

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



Slika 7.26: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y

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

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

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

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

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

7.6 Meritve dinamične ekscentričnosti v smeri x-osi

Meritve dinamične ekscentričnosti so bile lahko pomerjene le v eni koordinatni osi. Os po kateri se na napravi spreminja ekscentričnost magneta je zasukana za $32,4^\circ$ na abciso. Meritev zato ni bilo možno opraviti neposredno v eni koordinatni osi. Enačbe spodaj aproksimirajo poteke amplitude osnovnega harmonika, faze osnovnega harmonika in enosmerne komponente B_{sin} in B_{cos} , ter poteke amplitud posameznega harmonika napake pri dinamični ekscentričnosti v smeri x in zarotiranem magnetu za $32,4^\circ$ pri simulacijah z realnim magnetnim poljem. V enačbah je ekscentričnost označena z Δx_d , z zavedanjem, da je mišljen potek z zasukanim magnetom.

$$A_{sin}(\Delta x_d) = -6,93\Delta x_d^3 - 1,23\Delta x_d^2 - 1,12\Delta x_d + 34,2 \quad (7.23)$$

$$Off_{sin}(\Delta x_d) = 5,02\Delta x_d^3 - 1,75\Delta x_d^2 - 15,7\Delta x_d + 9,49 \cdot 10^{-2} \quad (7.24)$$

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

$$A_{cos}(\Delta x_d) = -6,93\Delta x_d^3 - 1,23\Delta x_d^2 - 1,12\Delta x_d + 34,2 \quad (7.26)$$

$$Off_{cos}(\Delta x_d) = 5,02\Delta x_d^3 - 1,75\Delta x_d^2 - 15,7\Delta x_d + 9,49 \cdot 10^{-2} \quad (7.27)$$

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

$$C_0(\Delta x_d) = 7,20\Delta x_d^3 - 1,74\Delta x_d^2 + 4,85 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,29 \cdot 10^{-2} \quad (7.29)$$

$$C_1(\Delta x_d) = -1,69 \cdot 10\Delta x_d^3 + 16,1\Delta x_d^2 + 38,1\Delta x_d - 6,75 \cdot 10^{-2} \quad (7.30)$$

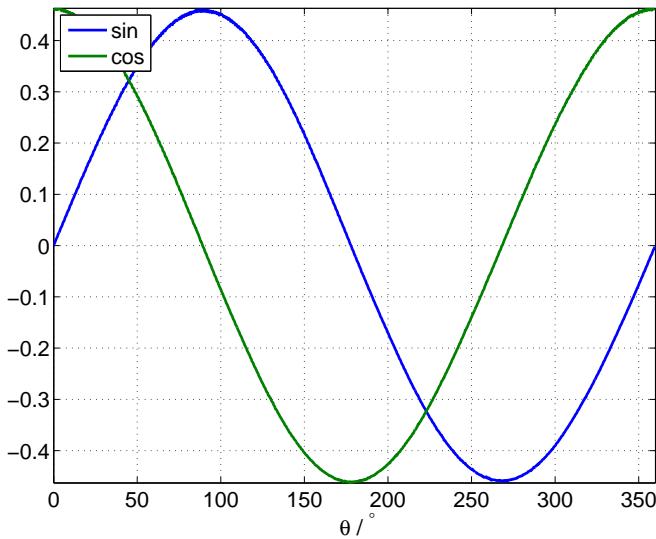
$$C_2(\Delta x_d) = -5,14 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^3 + 12,6\Delta x_d^2 - 0,230\Delta x_d + 2,97 \cdot 10^{-4} \quad (7.31)$$

$$C_3(\Delta x_d) = 1,50\Delta x_d^3 + 6,27\Delta x_d^2 + 3,15\Delta x_d + 1,10 \cdot 10^{-1} \quad (7.32)$$

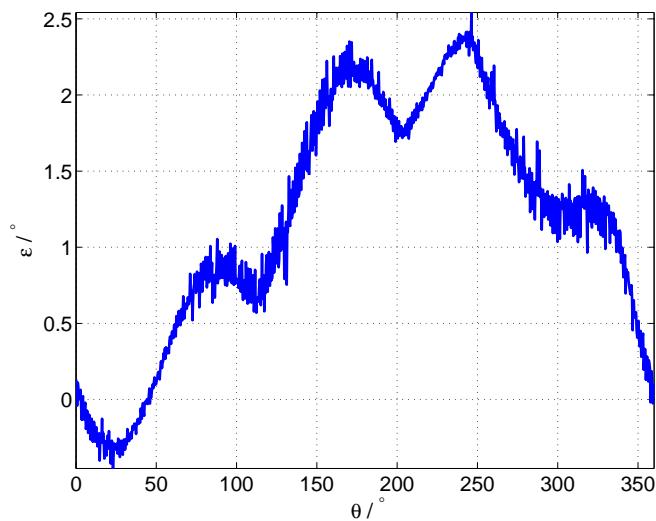
$$C_4(\Delta x_d) = -7,12\Delta x_d^3 + 14,4\Delta x_d^2 - 3,73\Delta x_d + 4,02 \cdot 10^{-1} \quad (7.33)$$

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

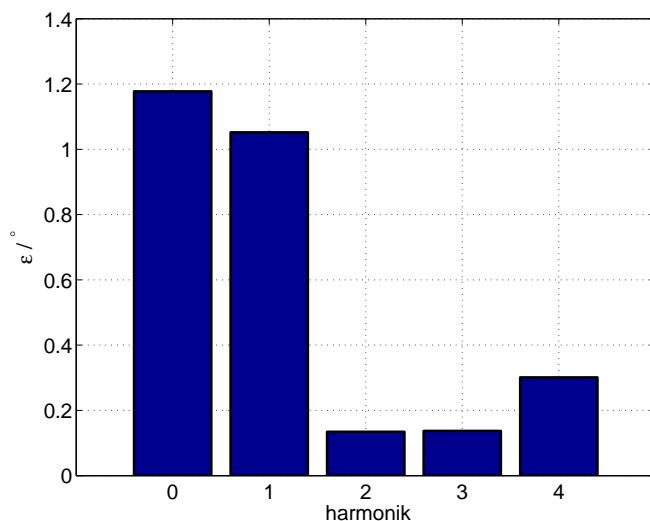
Pri dinamični ekscentričnosti v povzročeni smeri se signala B_{sin} in B_{cos} nista opazno spremenila (slika 7.27). Sprememb ni niti na napaki (slika 7.28). Spremembe niso opazne niti na napaki razviti v Fourierovo vrsto (slika 7.29).



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



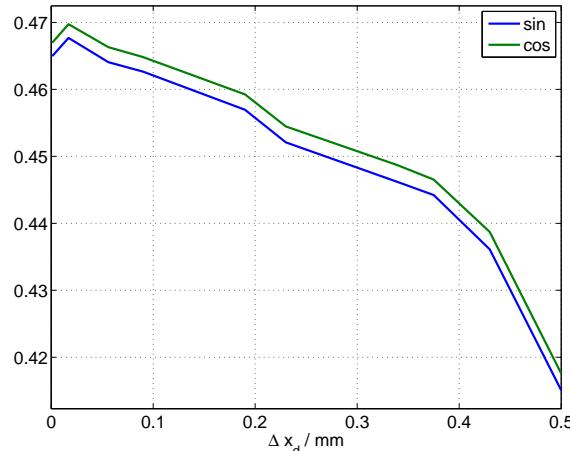
Slika 7.28: Napaka ε merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



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

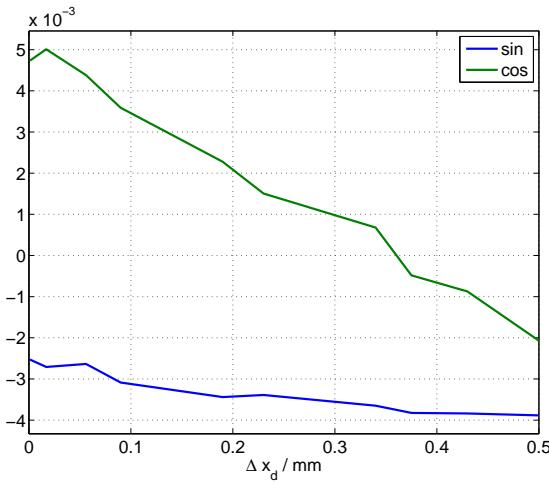
7.6.1 Sprememba signalov Hallovih sond ter napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri x

Potek spremenjanja amplitudne osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} glede na dinamično ekscentričnost pričakovano pada (Slika 7.30). Razlika med amplitudama ostaja tekom spremenjanja dinamične ekscentričnosti enaka. Enosmerni komponenti B_{sin} in B_{cos} padati, vendar vsaka s svojim gradientom. Sprememba enosmerne komponente je manjša, kot je bila predvidena v simulacijah. Sprememba faznega zamika osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} je prikazana na sliki 7.32. Fazna zamika s spremembo dinamične ekscentričnosti naraščata. V simulacijah tako velika spremembra enosmerne komponente ni bila pričakovana.

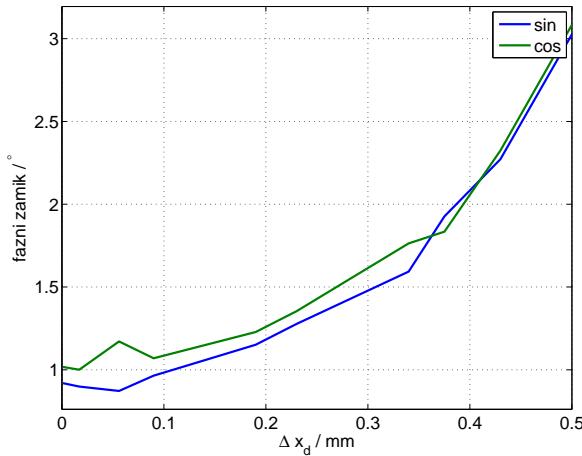


Slika 7.30: Potek amplitude osnovnega harmonika B_{sin} in B_{cos} pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x

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



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



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

polinomi.

$$A_{sin} = -0,795\Delta x_d^3 + 0,405\Delta x_d^2 - 0,106\Delta x_d + 0,468 \quad (7.34)$$

$$Off_{sin} = (-3,42\Delta x_d^3 + 7,48\Delta x_d^2 - 5,61\Delta x_d - 2,53) \cdot 10^{-3} \quad (7.35)$$

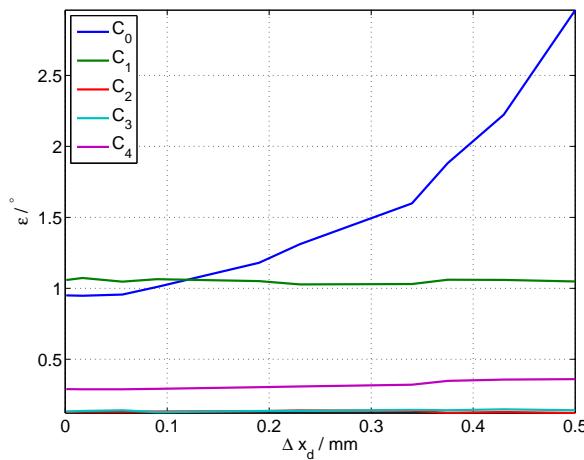
$$\delta_{sin} = 17,6\Delta x_d^3 - 2,62\Delta x_d^2 + 1,18\Delta x_d + 8,78 \cdot 10^{-1} \quad (7.36)$$

$$A_{cos} = -0,790\Delta x_d^3 + 0,400\Delta x_d^2 - 0,104\Delta x_d + 0,470 \quad (7.37)$$

$$Off_{cos} = (-1,5,8\Delta x_d^3 + 1,22\Delta x_d^2 - 1,63\Delta x_d + 0,505) \cdot 10^{-3} \quad (7.38)$$

$$\delta_{cos} = 25,8\Delta x_d^3 - 8,64\Delta x_d^2 + 2,01\Delta x_d + 1,00 \quad (7.39)$$

Iz potekov B_{sin} in B_{cos} signalov 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

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

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

$$C_2 = 3,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^3 - 0,188 \Delta x_d^2 + 7,10 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 0,129 \quad (7.42)$$

$$C_3 = -0,591 \Delta x_d^3 + 0,451 \Delta x_d^2 - 6,48 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 0,135 \quad (7.43)$$

$$C_4 = -0,991 \Delta x_d^3 + 0,961 \Delta x_d^2 - 8,81 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 0,291 \quad (7.44)$$

8 Primerjava simulacij in meritev

9 Sklep

9.1 Merjenje kota in vpliv na napako

Aplikacije, ki za delovanje potrebujejo informacijo o zasuku, kot lahko merijo na različne načine. Senzor RM44 za merjenje kota uporablja Hallove sonde. Senzor je robuste in zato primeren tudi za aplikacije v bolj obremenjenih okoljih. Izhod senzorja kljub robustnosti lahko vsebuje napako. Napaka je lahko posledica nepravilne montaže. S poznavanjem vplivov na napako senzorja zaradi nepravilne montaže, se napako lahko predvidi in odstrani.

9.2 Nepravilna montaža

Merilni sistem za merjenje kota je sestavljen iz dveh delov, magnetnega aktuatorja in senzorja za merjenje magnetnega polja. Nepravilno je lahko montiran aktuator ali senzor. Nepravilno montiran aktuator se izrazi kot dinamična ekscentričnost. Hallova sonda v senzorju pomeri dodatno enosmerno komponento magnetnega polja. Nepravilno montriran senzor, se izrazi kot statična ekscentričnost. Hallova sonda v senzorju zajame magnetno polje s spremenjeno amplitudo in s spremenjenim faznim zamikom.

9.3 Oblika napake

Zaradi nepravilnega zajema magnetnega polja, podatek o kotu vsebuje napako. Napaka zaradi dinamične ekscentričnosti se izrazi kot sinusni signal. Napaka zaradi statične ekscentričnosti se izrazi z sinusnim signalom dvojne frekvence in dodano enosmerno komponento.

9.4 Izvedba meritov

Delovnje senzorja nam je nepoznano (black-box). Senzor vrne izmerjena signala \sin in \cos iz katerih se s funkcijo $\text{atan}2$ izračuna kot. Na napravi izdelani v LRTME na fakulteti, so bile opravljene meritve. Meritve statične ekscentričnosti so simulacije potrdile. Pri meritvah dinamične ekscentričnosti je v napaki naraščala le enosmerna komponenta. Senzor bi se dalo postaviti tudi v boljšo lego. To bi bilo mogoče z uporabo Evaluation boarda RMK2. RMK2 vsebuje enka čip AM256, uporabniku so navoljo vsi pini čipa. Čip ima analogni signal Error, s katerim se lahko preveri poravnava med magnetom in čipom.

9.5 Komentar rezultatov

Zgradba in podrobnejše delovanje senzorja je poslovna skrinost, zato sem predvideval, da bo napaka pri meritvah manjša kot so pokazali rezultati simulacij. Simulacijski model je bil sestavljen iz dveh Hallovih sond, neposredno iz zajetega polja je bil izračunan kot. Podobni senzorji [?], omogočajo popravljanje enosmernih komponent in razmerija amplitud osnovega harmonika signalov \sin in \cos . S kalibracijo senzorja bi bila napaka manjša.

Pri projektu sem se osredotočil le na parametre enosmerne komponente, amplitudo in fazo osnovnega harmonika \sin in \cos . Signala v realnosti vsebujeta tudi višje harmonike, kateri tu niso bili obravnavani.

Literatura

- [1] J. Gachter, M. Hirz in R. Seebacher, “Impact of rotor position sensor errors on speed controlled permanent magnetized synchronous machines,” v *IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, str. pp.822–830, Dec. 2017.
- [2] B. Killer, “Diplomsko delo absolutni magnetni dajalnik z uporabo principa nonij,” Master’s thesis, Univerza v Ljubljani.
- [3] Z. Zhang, F. Ni, H. Liu in M. Jin, “Theory analysis of a new absolute position sensor based on electromagnetism,” v *International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence*.
- [4] M. Demierre, *Improvements of CMOS Hall Microsystems and Application for Absolute Angular Position Measurements*. PhD thesis, Federal Polytechnic School of Lausanne, Switzerland.
- [5] RLS Merilna tehnika d.o.o., “Rm44 magnetic encoder base unit.” Dosegljivo: https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FRM44D01_10.pdf.
- [6] V. Ambrožič in P. Zajec, *Električni servo pogoni*. Slovensko Združenje elektroenergetikov CIGRÉ-CIRED.
- [7] RLS Merilna tehnika d.o.o., “Am256 – angular magnetic encoder ic.” Dosegljivo: https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FAM256D01_13_bookmark.pdf.

- [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>.