

# 1 Uvod

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

Trenutni položaj merijo dajalniki pomika ali zasuka. 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, torej glede na uporabljeno tehnologijo. Poznamo magnetne, optične, induktivne in druge[1].

Pri magnetnem principu senzor dajalnika zaznava spremembo jakosti in smeri magnetnega polja. Magnetno polje se ustvari z aktuatorjem radialno polariziranega magneta. Meri se s Hallovimi sondami ali AMR senzorji. Iz zajetega polja sledi izračun dejanskega položaja. Dajalnik položaja, ki pretvarja merjeno magnetno polje v informacijo o položaju imenujemo enkoder.

Kot vsak merilni element, ima tudi magnetni enkoder napako. Napaka se lahko pojavi ob narobe merjenem magnetnem polju. Napako odpravimo s kalibracijo senzorjev zajema polja. 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 predvivi in odstrani. V tej magistrski nalogi je predstavljen vpliv napačno merenega magnetnega polja. Predstavljen je simulacijski model enkoderja, ter odvisnost napake na nepravilno montažo. Simulacije so primerjane z meritvami na enkoderju RM44.

## 2 Senzor RM44

Senzor RM44 je 13 bitni enkoder, primeren za merjenje zasuka in hitrosti elektromotorskega pogona. Enkoder se nahaja v robustem ohišju, zato je primeren za delovanje v težkem industrijskem okolju. Ključni element senzorja je čip AM8192B. V čipu so Hallove sonde za meritev z-komponente gostote magnetnega pretoka. Obliko izhodnega podatka o zasuku, je prilagodljiva na sistem aplikacije v kateri bo uporabljen. AM8192 lahko izhodni podatek posreduje na več načinov. Izhod je lahko analogni, v obliki sinusa in cosinusa, inkrementalni s signaloma A in B s katerih lahko izračunamo smer vrtenja ter signal Ri kateri določa referenčno točko. Izhod je lahko tudi digitalen preko komunikacijo SSI ali analogna napetost, ki se linearno spreminja med potencialom GND in Vdd v odvisnosti od kota zasuka. Senzor ima možnost nastavitve resolucije od 5 do 13 bitov [9][3]. Senzor na katerem so bile opravljene meritve je imel na voljo analogna signala sinus in kosinus.



Slika 2.1: Senzor RM44



### 3 Zastavljena naloga

Senzor RM44 mora biti za pravilno delovanje in točnost izhodnega podatka pravilno montiran.

Magistrsko delo predstavlja vpliv nepravilno montiranega senzorja ali nepravilno montiranega magneta na napako. Kako nepravilna montaža vpliva na izhodna signala sinus in kosinus ter neposredno iz tega tudi na napako. V delu je predstavljena tudi odvisnost napake pri spremembi idealnih signalov sinus in kosinus na izračunan kot.

V začetku je bila opravljena izpeljava kako se giblje magnet ali senzor v sistemu z nepravilno montažo. Opravi sem simulacije na linearno aproksimiranem magnetnem polju, ter na numerično izračunanem polju simuliranega realnega magneta. Tehnologija senzorja RM44 je poslovna skrivnost, zato je bil postavljen lasten simulacijski model senzorja, s pričakovanji, da bo rezultat slabši od končnih meritev.

Na tej točki bi bilo primerno definirati pojme, kateri se bodo uporabljali tekom izdelave dela. Izmik senzorja bo med spreminjanja kota zasuka postavljen fiksno in se njegova lokacija ne bo spreminjala na os vrtenja. Ta izmik je poimenovan statična ekscentričnost. V nalogi bo preverjeno kako vpliva izmik magneta na točnost izhodnega podatka. 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.



## 4 Analitična izpeljava vplivov dinamične in statične ekscentričnosti

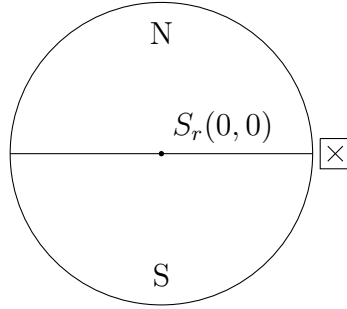
V tem poglavju je analitično izpeljan vpliv ekscentričnosti, ki se pojavita zaradi neprimerne vgradnje. Napaki različno vplivati na izhodni podatek, zato se ju lahko obravna posamično. Preko analitične izpeljave je prikazano, kako se spreminja lokacija Hall-ove sonde glede na magnet ob pravilni montaži. Z vpeljavo dodatne ekscentričnosti v model se potek gibanja sonde glede na magnet spremeni. S poznavanjem lokacije sonde nad magnetom se lahko odčita pomerjena vrednost  $B_z$ .

### 4.1 Definicija koordinatnih sistemov

Definiran kartezični koordinatni sistem, ima v izhodišču postavljen radialno magnetiziran magnet. Na poljubno točko  $S_{h0}(x_0, y_0)$ , vendar ne v izhodišče je postavljena Hall-ova sonda (slika 4.1). Za lažjo predstavo se Hall-ova sonda nahaja na abcisno osi.

Z rotacijo magneta za kot  $\theta$ , se položaja sonde glede na magnet spremeni. Nov položaj sonde glede na magnet je enaka, če namesto magnet, zavrtimo sondo za kot  $-\theta$ . Nov položaj sonde glede na magnet lahko zapišemo z (4.1).

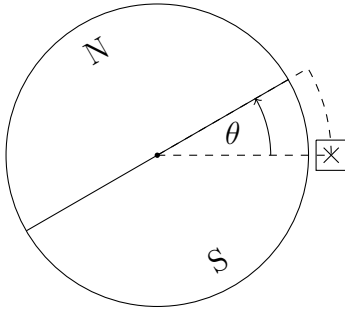
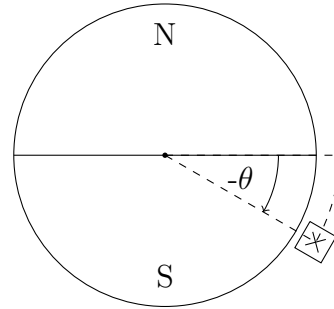
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$



Slika 4.1: Definicija koordinatnega sistema z magnetom in Hall-ovo sondo

Argument rotacijske matrike je  $-\theta$ . Z upoštevanjem lihosti funkcije sinus in sodosti funkcije kosinus[2], se (4.1) poenostavi v:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

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

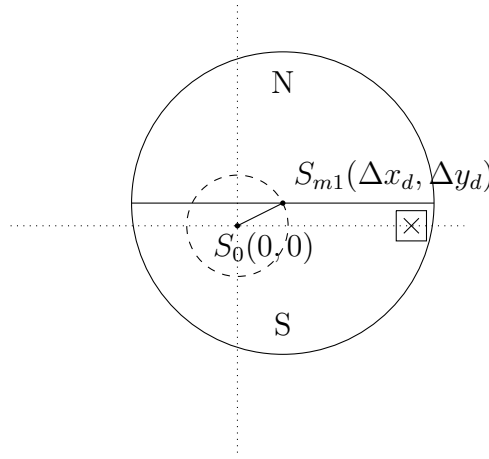
Slika 4.2: Sprememba položaja glede na magnet ob rotaciji

## 4.2 Izpeljava gibanja položaja Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti

Magnet je postavljen v izhodišče koordinatnega sistema  $S_m(0,0)$ , kjer je os vrtenja. Vpliv dinamične ekscentričnosti je sprememba središča magneta v točko  $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$  (Slika 4.3). Os vrtenja je ostaja v izhodišču koordinatnega sis-



tema. Središče magneta  $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$  ob rotaciji opiše okoli osi vrtenja krožnico z radijem  $\sqrt{\Delta x_d^2 + \Delta y_d^2}$ .



Slika 4.3: Definicije dinamične ekscentričnosti

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

S (4.3) je izraženo gibanje središče magneta na Hallovo sondo. Celoten sistem se vrti okoli osi vrtenja  $S_0(0,0)$ . Velja enak razmislek kot v prejšnjem poglavju z vrtenjem sonde za kot  $-\theta$ :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \left( \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} \right) \quad (4.4)$$

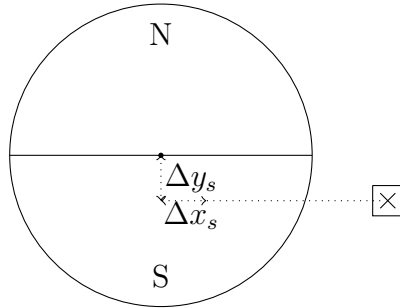
(4.4) se poenostavi:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

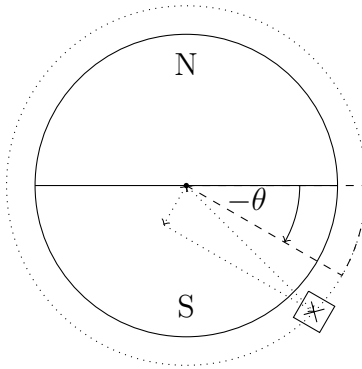
Dinamična ekscentričnost na gibanje sonde vpliva kot enosmerna komponenta  $(-\Delta x_d, -\Delta y_d)$ . Enak učinek se doseže, z izmikom Hallove sonde in osi vrtenja v novo točko  $S_{h1}(-\Delta x_d, -\Delta y_d)$ ,  $S_0(x_0 - \Delta x_d, y_0 - \Delta y_d)$  in zavrti sondo okoli osi vrtenja za  $-\theta$ .

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

Statična ekscentričnost se pojavi, ob izmiku Hallove sonde iz njene osnovne lege v  $S_{h1}(x_0 + \Delta x_s, y_0 + \Delta y_s)$ . Z vrtenjem magneta je sonda ves čas enako oddaljena od središča magneta. Z miselnim obratom vrtenja sonde v nasprotni smeri se gibanje sonde izrazi kot gibanje po krožnici z radijem  $\sqrt{(x_0 + \Delta x_s)^2 + (y_0 + \Delta y_s)^2}$  (4.2).



Slika 4.4: Shema definicije statične ekscentričnosti



Slika 4.5: Potek sonde ob vrtenju glede na magnet ob statični ekscentričnosti

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x_s \\ y_0 + \Delta y_s \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

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

(4.5) in (4.2) sta med seboj neodvisni zato se ju lahko združi.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x_s \\ y_0 + \Delta y_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (4.7)$$



## 5 Izpeljava poteka polja $B_z(\theta)$ in ocena napake zaradi ekscentričnosti

### 5.1 Definicija gostote magnetnega polja $B_z$

Predlagan magnet s strani proizvajalca senzorja je radialno magnetiziran s premerom 4 mm. a) alnik pozicije RM44 meri z-komponento gostote magnetnega

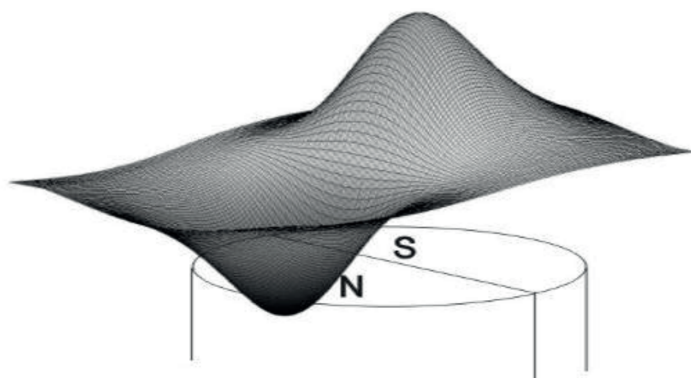
./Slike/magnet4mm ne obstaja

Slika 5.1: Primer magneta predlagan s strani proizvajalca

polja [3]. Potek komponente  $B_z$  nad cilindričnim magnetom je prikazan na sliki 5.2.

Potek z-komponente se lahko izračuna po Biot-Savartovim zakonom oz. z numerično seštevanjem prispevke posameznih delčkov magneta. Za oceno napake, se magnetno polje z komponente v okolici osi vrtenja magneta aproksimira z ravnino (5.1).

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



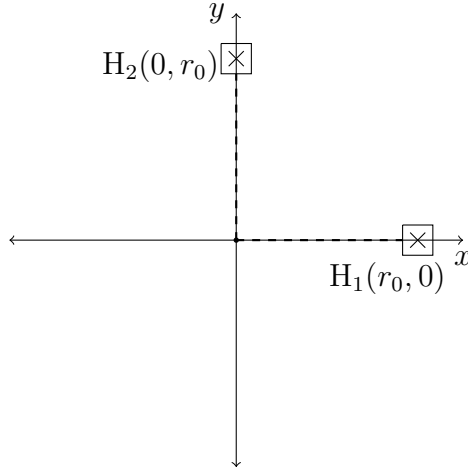
Slika 5.2: z-komponenta vektorja gostote magnetnega polja nad cilindričnim magnetom [3]

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 (5.1). Za lažje razumevanje naj bo  $k$  enak 1.

## 5.2 Postavitev Hallovih sond in pomerjeno polje v odvisnosti od ekscentričnosti

Za izračun kota je potrebno poznati polje v vsaj dveh točkah nad magnetom. Simulacijski model vsebuje 2 Hallovi sonde na koordinatnih oseh, oddaljeni od izhodišča za  $r_0$ .

S poznavanjem položaja sonde glede na magnet (4.7) in funkcije polja (5.1) se lahko določi potek polja sonde. Sonde ob obratu vsaka pomeri svoje polje. Potek polja pomejen s sondo v abscisni osi ( $H_1$ ), je v idealni montaži podoben signalu kosinus, zato je poimenovan *cos*. Potek polja pomejenega s sondo v ordinatni osi ( $H_2$ ) je za  $90^\circ$  zamaknjeno proti *cos*, zato je potek imenovan *sin*.



Slika 5.3: Začetna postavitev Hallovih sond

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

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

### 5.2.1 Sprememba magnetnega polja zaradi ekscentričnosti

Iz izrazov (5.2) in (5.3) brez upoštevanja ekscentričnosti sta  $\sin$  in  $\cos$  enake amplitude ter fazno zamaknjena za  $90^\circ$ . Z upoštevanjem statične ekscentričnosti se med  $\sin$  in  $\cos$  zmanjša fazni kot ter spremni amplituda (5.4) (5.5). Ob dinamični ekscentričnosti signala pridobita enosmerni komponenti (5.6) (5.7).

$$\cos(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s) = \sqrt{(r_0 + \Delta x_s)^2 + \Delta y_s^2} \cos(\theta - \arctan \frac{\Delta y_s}{r_0 + \Delta x_s}) \quad (5.4)$$

$$\sin(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s) = \sqrt{\Delta x_s^2 + (r_0 + \Delta y_s)^2} \sin(\theta + \arctan \frac{\Delta x_s}{r_0 + \Delta y_s}) \quad (5.5)$$

$$\cos(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = r_0 \cos \theta - \Delta x_d \quad (5.6)$$

$$\sin(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = r_0 \sin \theta - \Delta x_d \quad (5.7)$$

### 5.3 Premik senzorja v z smeri

Pri magnetnem polju aprokismiranem z ravnino (7.1), se gostota magnetnega polja pri obeh sondah spreminja enako. To se v enačbah odraža le kot dodaten faktor. Upoštevano spremembo polja zaradi premika senzorja po z osi se izrazi kot:

$$\cos = k_z(r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d) \quad (5.8)$$

$$\sin = k_z(r_0 \sin \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d) \quad (5.9)$$

Z vstavitvijo formul v arctan se faktor  $k_z$  nahaj tako v števcu kot imenovalcu ter se okrajša. Ti poteki polj veljajo le z upoštevanjem aprokismiranega polja (5.1).



## 6 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov

Izhod enkoderja je podatek o zasuku. Iz pomejenega polja, sledi izračun kota preko inverza funkcije tangens. V programu MATLAB se za izračun kota uporablja funkcijo `atan2()`; za izhodno vrednost kota v radianih oz. `atan2d()`; za vrednost v stopinjah [4][6]. Različne literature [?] opisujejo napake zaradi popačitve signalov *sin cos*. Napaka je izražena v obliki enosmerne komponente ter prvega oz drugega harmonika, kateri od primera do primera najbolj izstopa. V nadaljevanju je prikazano, kako popačen signal kot vhod v funkcijo `atan2d()`; vpliva na napako ter kako se odraža tudi na višjih harmonikih. Za majhne popačenja signalov, literatura nakazuje linearno naraščanje napake.

### 6.1 Različne amplitude

Vhodna signala v `atan2d()`, sta:

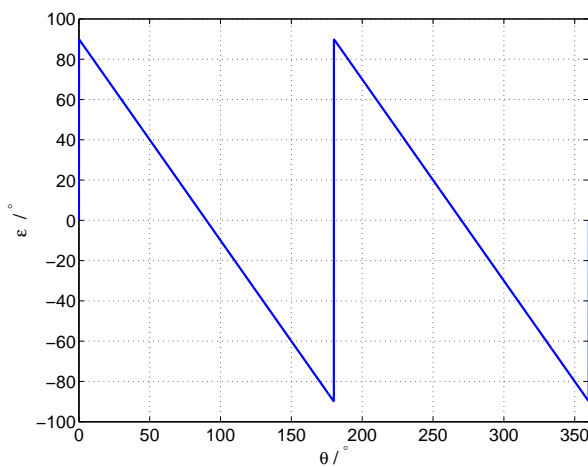
$$Sin = k \sin(\theta) \quad (6.1)$$

$$Cos = \cos(\theta) \quad (6.2)$$

limita ko gre  $k$  proti neskončnost:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \text{atan2}(k \sin \theta, \cos \theta) \quad (6.3)$$

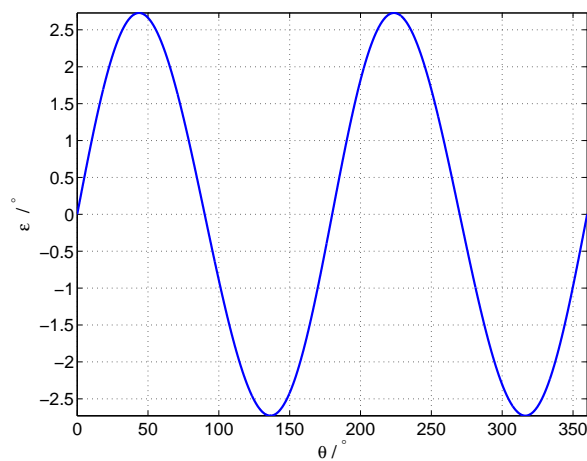
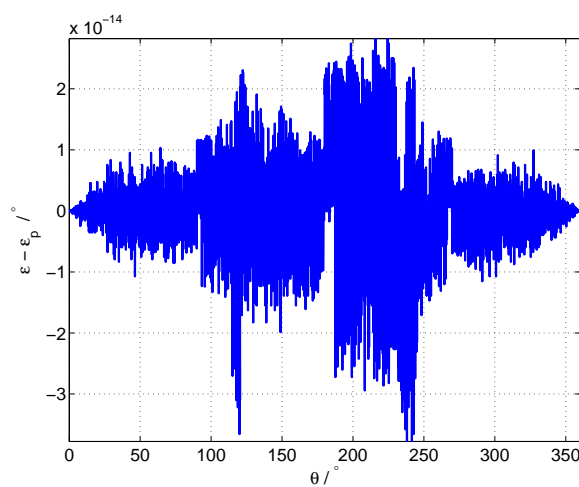
Kot  $\varepsilon$ , se bo ob limiti izrazila v obliki , ki jo lahko izrazimo z Fourierovo vrsto [7]:

Slika 6.1:  $\varepsilon$  ob limiti  $k$  v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin 2n\theta \quad (6.4)$$

V napaki nastopajo le sodi harmoniki. S opazovanjem sodih harmonikov napake pri različnih  $k$ -jih in uporabo funkcije Curve Fitting tool [5], sem določil funkcijo poteka napake v odvisnosti od  $k$ .

$$\varepsilon_p = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{k-1}{k+1} \right)^n \sin 2n\theta \quad (6.5)$$

Slika 6.2:  $\varepsilon$  pri  $k=1.1$ Slika 6.3: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2 in izračunano napako z vrsto (prvih 15 členov) po (6.5) pri  $k= 1.1$ 

## 6.2 Različne enosmerne komponente

Enosmerna komponenta se lahko pojavi tako v  $\sin$ ,  $\cos$  ali v obeh.

Vhodna signala v  $\text{atan2d}()$ , sta:

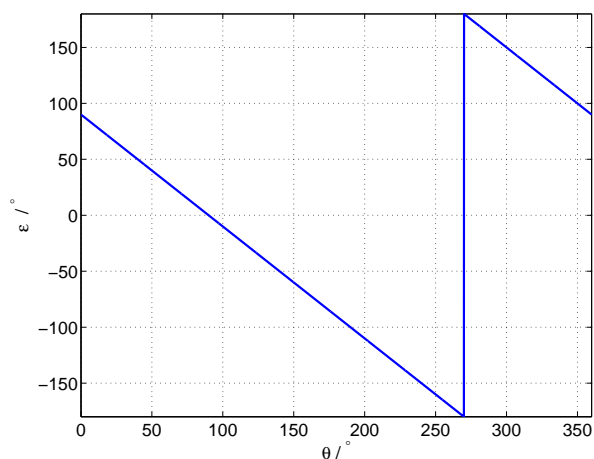
$$\text{Sin} = \sin(\theta) + B_0 \quad (6.6)$$

$$\text{Cos} = \cos(\theta) + A_0 \quad (6.7)$$

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

### 6.2.1 Enosmerna komponenta le v signalu $\text{sin}$

Z limito  $B_0$  v neskončnost, in izpeljavi napake v obliko Fourierove vrste, se napaka izrazi kot:

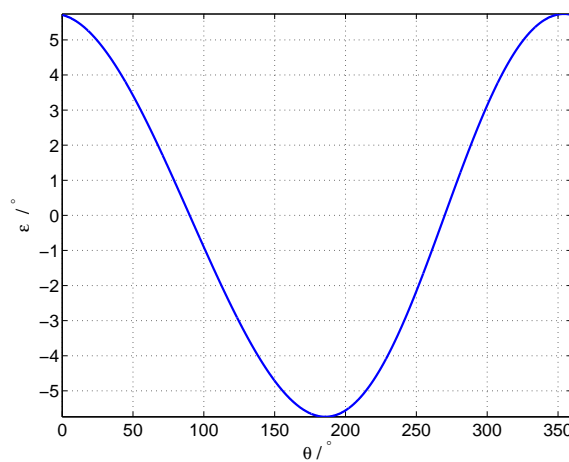
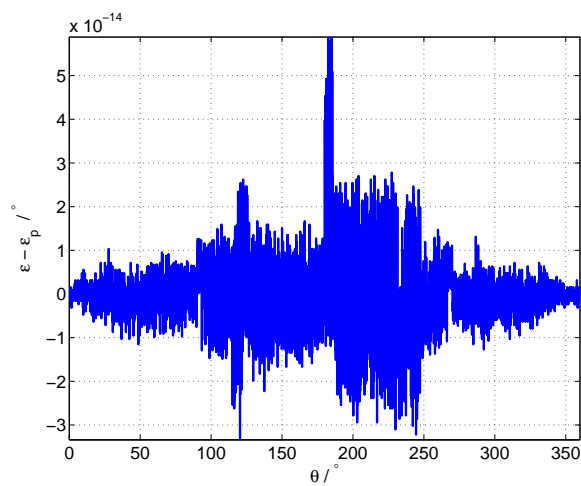


Slika 6.4:  $\varepsilon$  ob limiti  $B_0$  v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta + 90n) \quad (6.8)$$

Z analizo potekov posameznega harmonika napake in uporabe Curve Fitting tool je bila najdena funkcija, ki opiše odvisnost napake od enosmerne komponente v signalu  $\text{sin}$ .

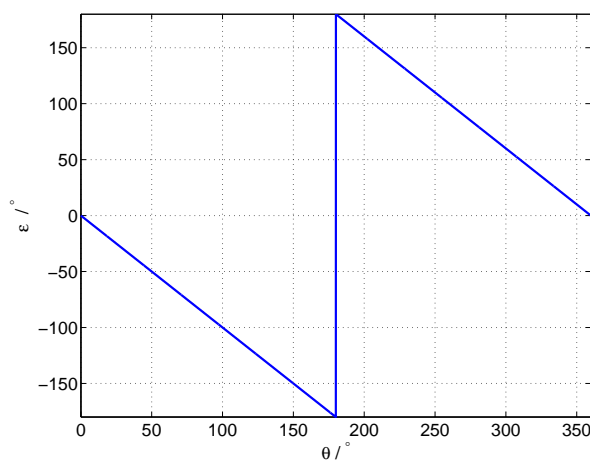
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-|B_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta - 90n), & B_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_0^n}{n} \sin(n\theta + 90n), & |B_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-B_0^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & B_0 \geq 1 \end{cases} \quad (6.9)$$

Slika 6.5:  $\varepsilon$  pri  $B_0 = 0,1$ Slika 6.6: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (6.9) pri  $B_0 = 0,1$  in  $n < 20$

### 6.2.2 Enosmerna komponenta signala $\cos$

Postopek je ponovljen tudi za enosmerno komponento v signalu  $\cos$

$$\lim_{a_0 \rightarrow \infty} \text{atan2}(\sin \theta, \cos \theta + A_0) \quad (6.10)$$



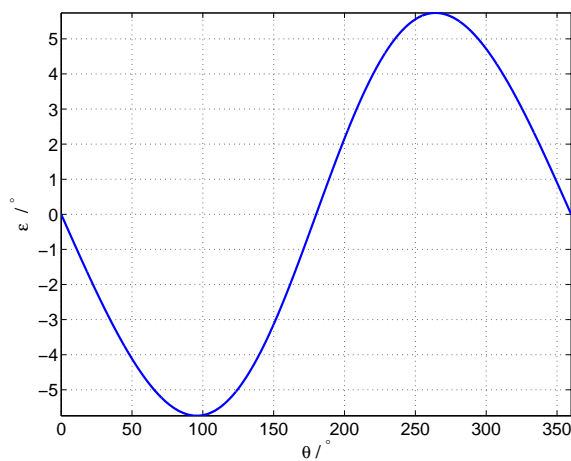
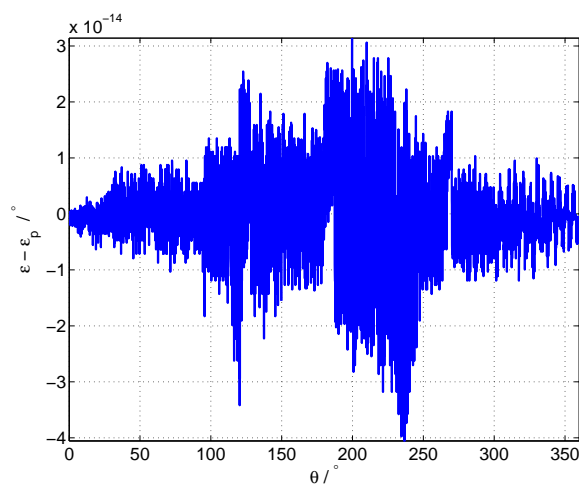
Slika 6.7:  $\varepsilon$  ob limiti  $A_0$  v neskončnost

Napaka (slika 6.7) je proti napaki na sliki 6.4 le fazno zamaknjena. To se izrazi tudi v Fourierovi vrsti.

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta + 90n) \quad (6.11)$$

Potek napake v odvisnosti od  $A_0$  je (6.12)

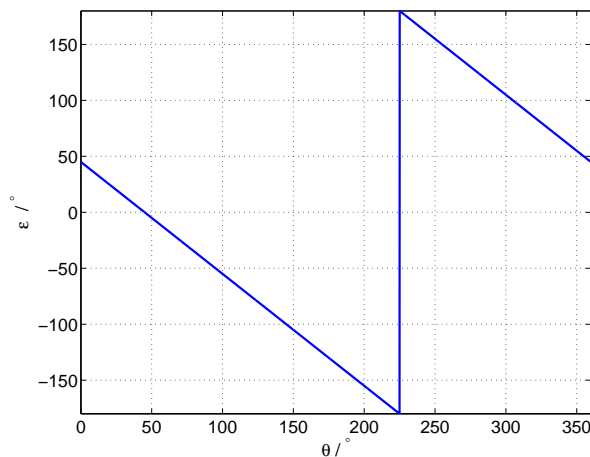
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-|A_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{A_0^n}{n} \sin(n\theta), & |A_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-A_0^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \geq 1 \end{cases} \quad (6.12)$$

Slika 6.8:  $\varepsilon$  pri  $A_0 = 0,1$ Slika 6.9: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (6.9) pri  $A_0 = 0,1$  in  $n < 20$ 

### 6.2.3 Enosmerna komponenta pri obeh signalih

Enosmerna komponenta pri obeh signalih je označena z  $C_0$ .

Limita napake ko gre  $C \rightarrow 0$  proti neskončnosti se v Fourierovi vrsti izrazi kot:

Slika 6.10:  $\varepsilon$  ob limiti  $c_0$  v neskončnost

$$\varepsilon = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n} \sin(n\theta - 90n) \quad (6.13)$$

Odvisnost napake ob spreminjanju enosmernih komponent pri obeh signalih se je izrazilo v (6.14).

$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-|\sqrt{2}c_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & c_0 \leq -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sqrt{2}c_0)^n}{n} \sin(n\theta - 90n), & |c_0| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-(\sqrt{2}c_0)^{-n}}{n} \sin(n\theta - 90n), & c_0 \geq \frac{\sqrt{2}}{2} \end{cases} \quad (6.14)$$

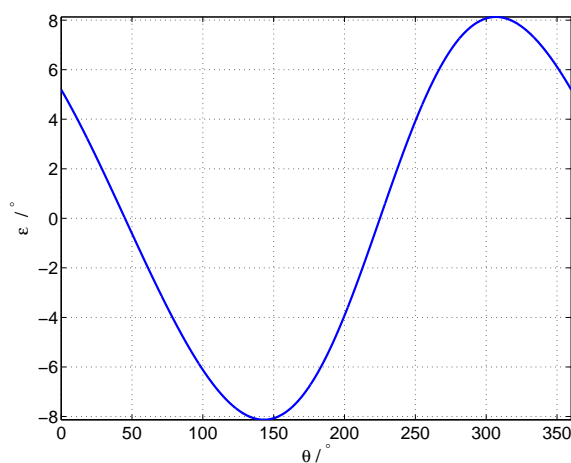
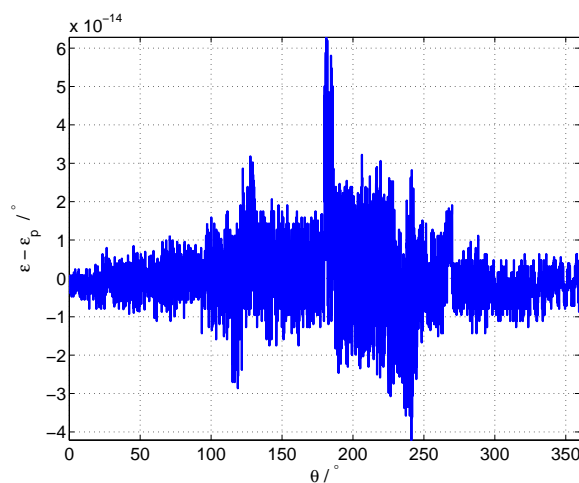
### 6.3 Neorotogonalnost signalov

Napaka se pojavi tudi, če signala  $\sin$  in  $\cos$  nista fazno zamaknjena za točno  $90^\circ$ . Vhodna signala imata obliko:

$$\text{Sin} = \sin(\theta + \varphi_s) \quad (6.15)$$

$$\text{Cos} = \cos(\theta + \varphi_c) \quad (6.16)$$

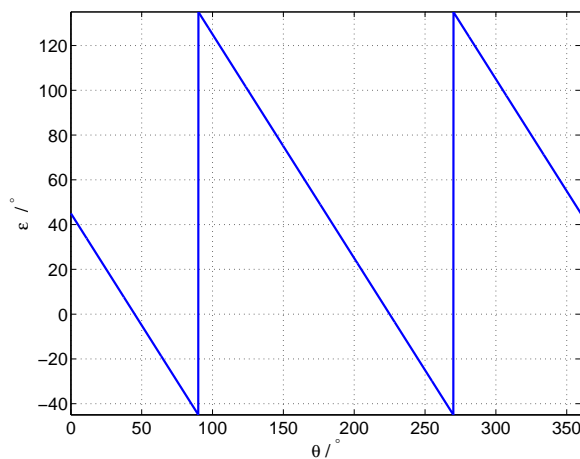


Slika 6.11:  $\varepsilon$  pri  $C_0 = 0,1$ Slika 6.12: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (6.14) pri  $C_0 = 0,1$  in  $n < 20$ 

Napako se določi posamično za vsakega od parametrov. Drugi je takrat enak 0. Na koncu se enačbi združi. Za določanje limite ni potrebno iti proti neskončnosti, ampak le do najslabše možnosti, ki je pri  $\pm 90^\circ$ :

$$\varepsilon = \lim_{\varphi_s \rightarrow 90^\circ} \text{atan2}(\text{Sin}, \text{Cos}) - \text{atan2d}(\sin(\theta), \cos(\theta)) \quad (6.17)$$

Potek napake  $\varepsilon$  s slike ?? predstavi vrsta (6.18).



Slika 6.13: Napaka  $\varepsilon$  ob limiti  $\varphi_s \rightarrow 90^\circ$

$$\varepsilon = 45^\circ - \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(2n\theta) \quad (6.18)$$

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 *sin* in *cos* na idealna signala.

$$\varepsilon(\varphi_s, \varphi_c) = \frac{\varphi_s + \varphi_c}{2} + \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \tan \frac{\varphi_s - \varphi_c}{2} \right)^n \sin(2n\theta + n(90^\circ + \varphi_s + \varphi_c)) \quad (6.19)$$

## 6.4 Potek napake pri statični ekscentričnosti v smeri x

Statična ekscentričnost povzroči v *sin* in *cos* razliko amplitud kot spremembo faz. Za vsako ekscentričnost posebj je bil izračunan potek napake aproksimirn z racionalno funkcijo.

Definirana vhodna signala:

$$\sin = r_0 \sin(\theta) + \Delta x_s \cos(\theta) \quad (6.20)$$

$$\cos = r_0 \cos(\theta) + \Delta x_s \sin(\theta) \quad (6.21)$$

Opravljen je bila limita  $\Delta x_s$  v neskončnost. V napaki nastopa enosmerna komponenta in sodi harmoniki. Funkcija ki predstavlja odvisnost napake od statične ekscentričnosti je (6.22).

$$\varepsilon_p = \text{atan} \frac{\Delta x_s}{\Delta x_s + 2r_0} + \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{\Delta x_s}{\sqrt{\Delta x_s^2 + 2r_0 \Delta x_s + 2r_0^2}} \right)^n \sin(2n\theta + n(90 + \text{atan}(\frac{\Delta x_s + r_0}{r_0}))) \quad (6.22)$$

Pri čemer:

$$\Delta x_s > -r_0$$

## 6.5 Potek napake pri statični ekscentričnosti v smeri y

Postopek ponovljen za ekscentričnost v y smeri. Pričakovano je podoben potek kot pri ekscentričnosti v x smeri.

Izračunana vrsta napake v odvisnosti od  $\Delta y_s$  je:

$$\varepsilon_p = \text{atan} \frac{-\Delta y_s}{\Delta y_s + 2r_0} + \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{\Delta y_s}{\sqrt{\Delta y_s^2 + 2r_0 \Delta y_s + 2r_0^2}} \right)^n \sin(2n\theta + n(90 + \text{atan}(\frac{\Delta y_s + r_0}{r_0}))) \quad (6.23)$$

Pri čemer:

$$\Delta y_s > -r_0$$

## 6.6 Potek napake pri dinamični ekscentričnosti v smeri x

$\sin$  in  $\cos$  se pri dinamični ekscentričnosti spreminjata, kot je bilo opisano pri napaki z enakima enosmernima komponentama. Rezultat napake v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti je:

$$\varepsilon_p = \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left( \frac{-\sqrt{2}}{r_0} \Delta x_d \right)^n \sin(n\theta - 90n) \quad (6.24)$$

Pri čemer velja

$$|\Delta x_d| \leq \frac{r_0}{\sqrt{2}}$$

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. Da bo primerjava možna bodo poteki izračunani v tem poglavju razviti v Taylorjevo vrsto do tretje stopnje.

## 7 Linearni model

V prejšnjem poglavju smo magnetno polje magneta aproksimirali z ravnino ter napako izračunali z neskončno vrsto. V tem poglavju bom predstavil simulacije opravljene na magnetnem polju aproksimiranega z ravnino, izračnan kot  $\varphi$  je rezultat numerične funkcije  $\text{atan2d}(y,x)$  citeatan2d. Predstavil bom napako, jo razstavil na posamezne harmonike, ter prikazal spreminjanje amplitud glede na spremembo ekscentričnosti. Ravnina aproksimiranega magnetnega polja je:

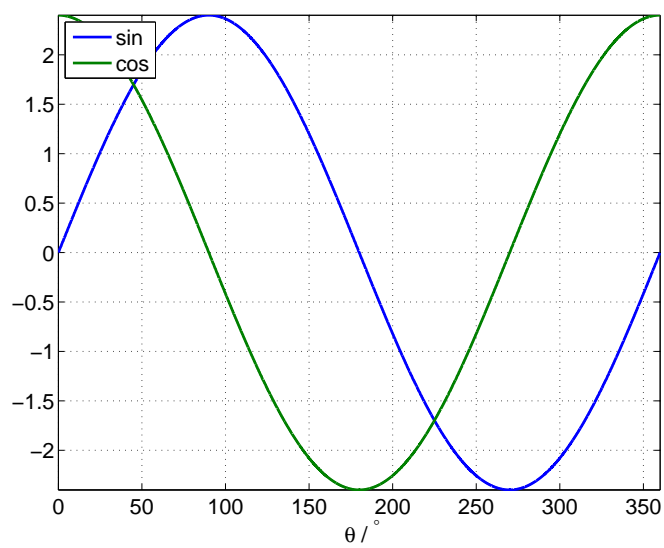
$$B(x, y) = x \tag{7.1}$$

Hall-ovi sondi sti postavljeni na krožnico z radijem 2,4 mm [3].

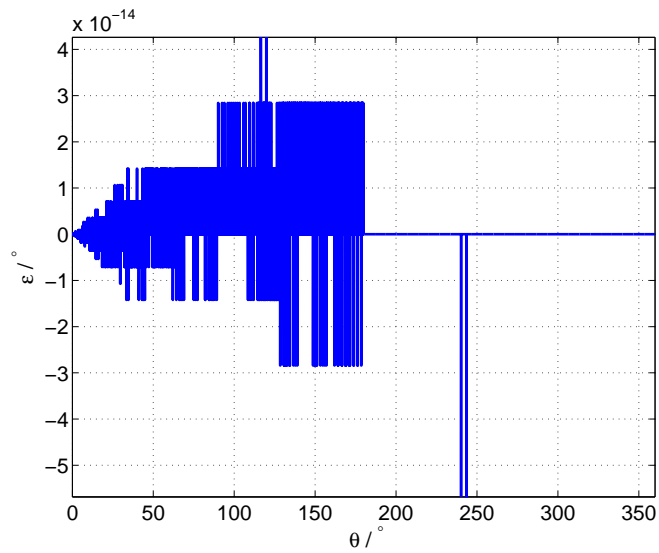
### 7.1 Brez napake

Za začetek si pogledajmo idealno montiran tako senzor kot magnet. Signala *sin* in *cos* imata enaki amplitudi in sta fazno zamaknjena za 90°. Napaka  $\varepsilon$ , ki se pojavi pri izračunu je tako le numerična napaka funkcije  $\text{atan2d}$  (Slika ??).

Numerično napako lahko na pričakovano napako zaradi ekscentričnosti zanemarim.



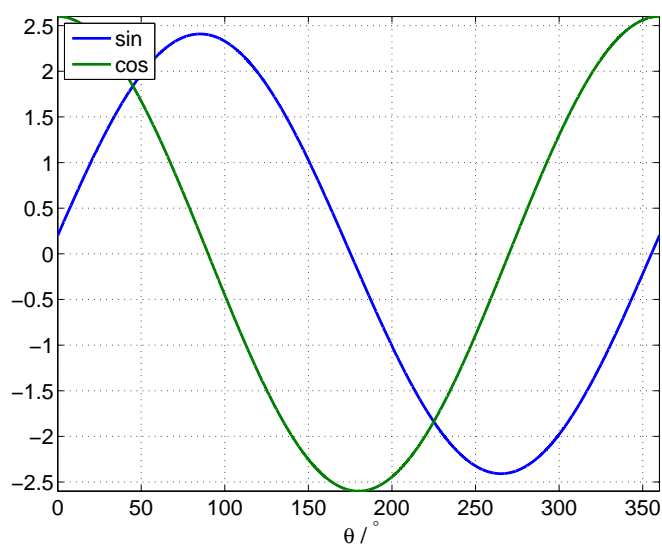
Slika 7.1: Potek signalov  $\sin$  in  $\cos$  brez ekscentričnosti



Slika 7.2: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti

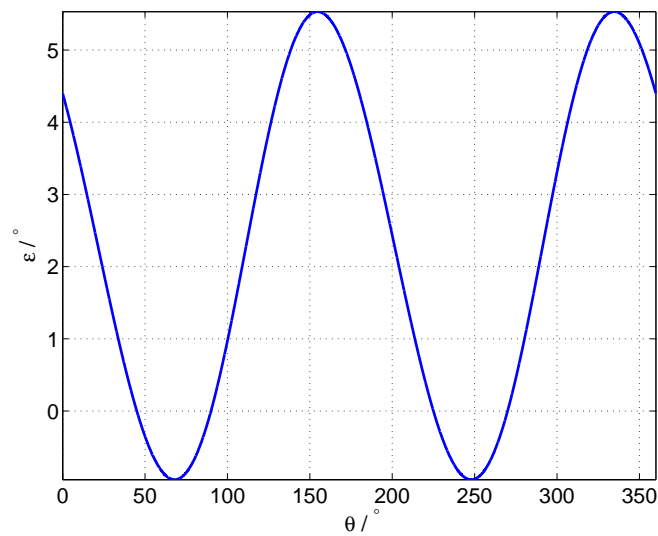
## 7.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

Oglejmo si rezultate simulacij statične ekscentričnosti v smeri x. Po pričakovanjih se bo povečala amplituda *sin* in *cos* signala ter zmanjšal njun fazni zamik (izraza (5.4) in 5.5).



Slika 7.3: Signala *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x

Napaka  $\varepsilon$  je prikazana na sliki 7.4.

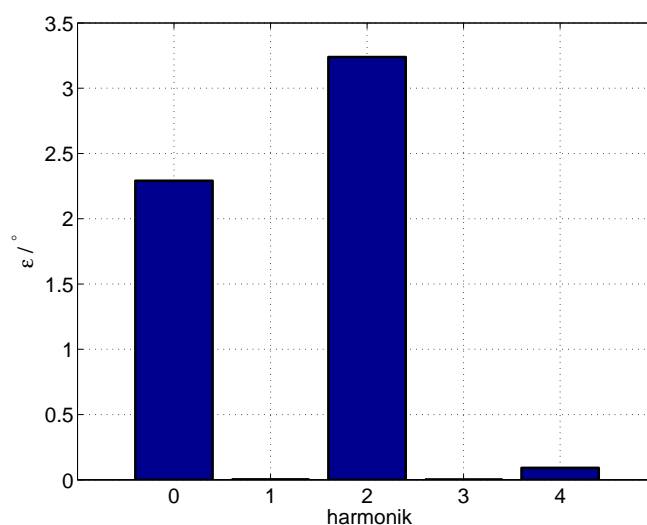


Slika 7.4: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x

Napako razvijmo v Fourierovo vrsto in pridobimo amplitude posameznih harmonikov napake (Slika 7.5).

Po pričakovanjih najbolj izstopata enosmerna komponenta (harmonik 0) in drugi harmonik.



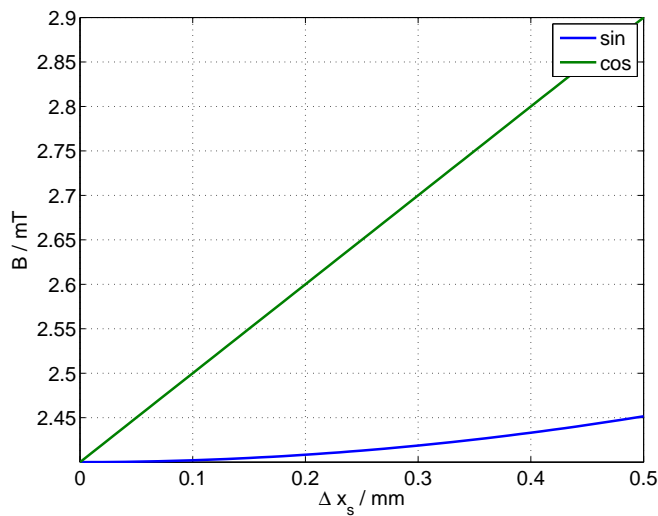


Slika 7.5: Amplitude harmonikov napake  $\epsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x

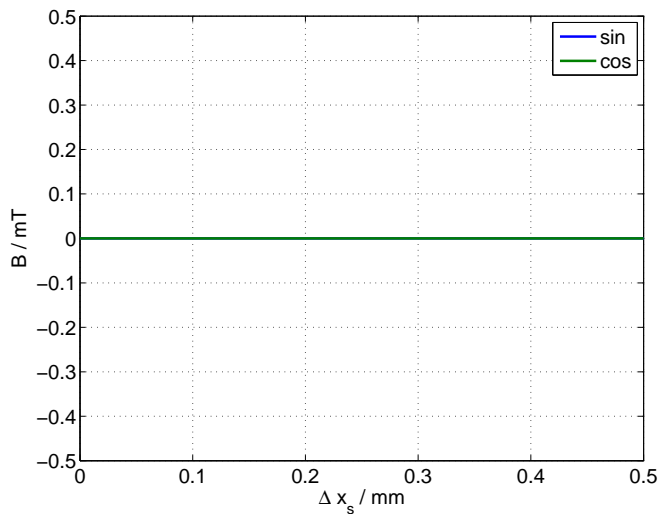
### 7.2.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_s$

Poglejmo tudi kako se spreminjata analogna signala  $\sin$  in  $\cos$  ob spreminjanju ekscentričnosti. Na sliki 7.6 je prikazana sprememba amplitude prvega harmonika, na sliki 7.7 enosmerni komponenti in na sliki 7.8 fazni zamik signalov glede na njuno idealno poravnavo. Iz slik vidimo kar nam opišeti enačbi (5.4)(5.5). Spremeniti se amplitudi, pri čemer se amplituda  $\cos$  signala spreminja hitreje, ter fazni zamik  $\sin$ .

Kako se spreminjajo amplituda prvega harmonika, enosmerna komponenta in fazni zamik  $\sin$  in  $\cos$  signalov lahko razberemo iz enačb (5.4) in (5.5). Tu poteke razvijem v Taylorjevo vrsto do tretje stopnje, kar bom lahko imel za primerjavo.



Slika 7.6: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.7: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

$$A_{\sin} = 2,08 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 2,4 \quad (7.2)$$

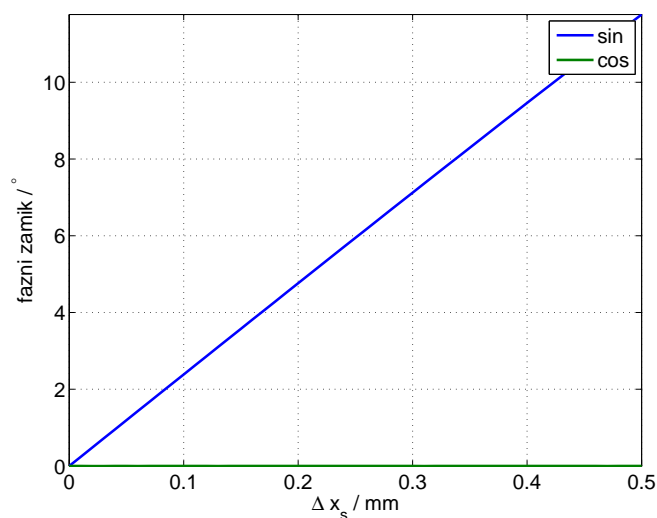
$$Off_{\sin} = 0 \quad (7.3)$$

$$\delta_{\sin} = -1,38 \Delta x_s^3 + 23,9 \Delta x_s \quad (7.4)$$

$$A_{\cos} = \Delta x_s + 2,4 \quad (7.5)$$

$$Off_{\cos} = 0 \quad (7.6)$$

$$\delta_{\cos} = 0 \quad (7.7)$$



Slika 7.8: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

Spremembi signalov *sin* in *cos* se odrazita tudi pri izračunu kota  $\varphi$  in napake  $\varepsilon$ . Na sliki 7.9 vidimo odvisnost amplitud posameznega harmonika od spreminjanja statične ekscentričnosti v smeri x.

Poteke s slike 7.9 aproksimiramo s kubičnimi polinomi in dobimo naslednje poteke:

$$C_0 = 3,35 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 2,48 \Delta x_s^2 + 1,19 \cdot 10 \Delta x_s + 1,23 \cdot 10^{-5} \quad (7.8)$$

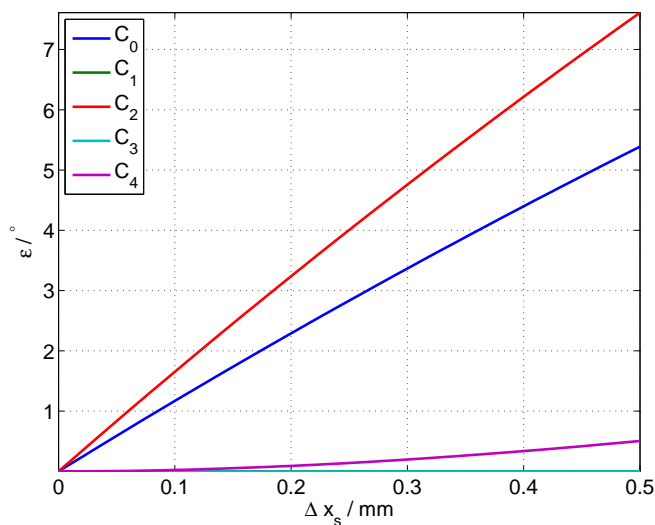
$$C_1 = 5,56 \cdot 10^{-4} \Delta x_s^3 - 2,00 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^2 + 4,34 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 7,67 \cdot 10^{-8} \quad (7.9)$$

$$C_2 = 4,13 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 3,53 \Delta x_s^2 + 1,69 \cdot 10 \Delta x_s - 2,31 \cdot 10^{-5} \quad (7.10)$$

$$C_3 = -2,17 \cdot 10^{-4} \Delta x_s^3 + 2,57 \cdot 10^{-4} \Delta x_s^2 + 4,20 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 4,51 \cdot 10^{-8} \quad (7.11)$$

$$C_4 = -8,27 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 + 2,42 \Delta x_s^2 + 8,08 \cdot 10^{-3} \Delta x_s - 1,60 \cdot 10^{-4} \quad (7.12)$$

Za primerjavo, dodam tudi enačbe potekov amplitude posameznega harmonika razvitega v Taylorjevo vrsto, katere sledijo iz ( 6.22):



Slika 7.9: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri x

$$C_0 = 3,45 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 2,49 \Delta x_s^2 + 1,19 \cdot 10 \Delta x_s \quad (7.13)$$

$$C_1 = 0 \quad (7.14)$$

$$C_2 = 3,66 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 3,51 \Delta x_s^2 + 1,69 \cdot 10 \Delta x_s \quad (7.15)$$

$$C_3 = 0 \quad (7.16)$$

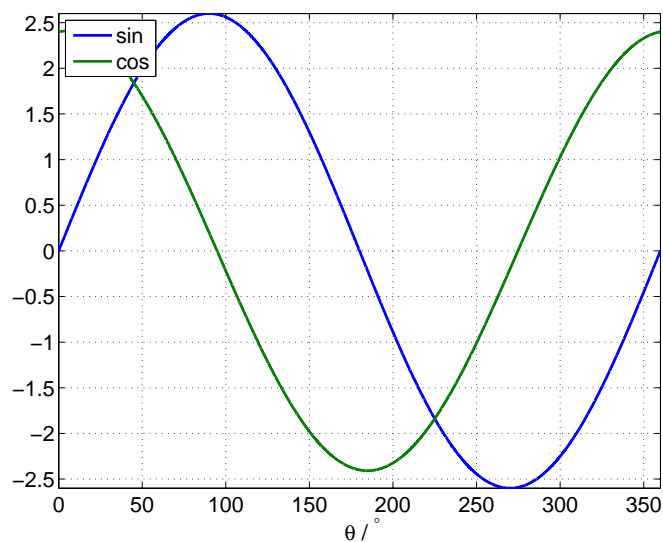
$$C_4 = -1,04 \Delta x_s^3 + 2,49 \Delta x_s^2 \quad (7.17)$$

Rezultati se ujemajo s pričakovanimi. Enosmerna komponenta in amplituda prvega harmonika naraščata linearno, četrti harmonik narašča s kvadratom ekscentričnosti, lihi harmoniki, so zanemarljivi.

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

Oglejmo si še rezultate simulacij statične ekscentričnosti v smeri y. Pričakujem podobne rezultate kot pri statični ekscentričnosti v smeri x, le da bo tu hitreje

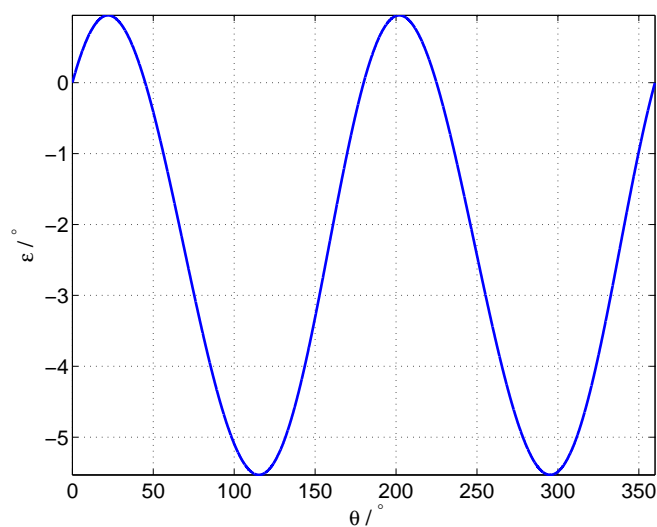
naraščala amplituda *sin* signala, spreminjal se bo fazni zamik *cos*.



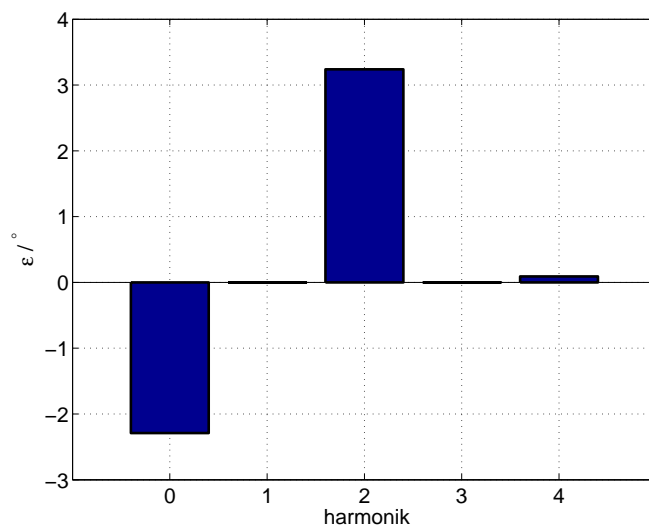
Slika 7.10: Signala *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

Napaka je prikazana na sliki 7.11. Sestavlja jo negativna enosmerna komponenta in izrazit drugi harmonik. Razvijmo jo v Fourierovo vrsto in pridobimo amplitude posameznih harmonikov napake (Slika 7.12).

Iz fft-ja napake je vidna enaka amplituda drugega harmonika kot pri enaki ekscentričnosti v smeri x. Enosmerna komponenta se razlikuje le v predznaku.



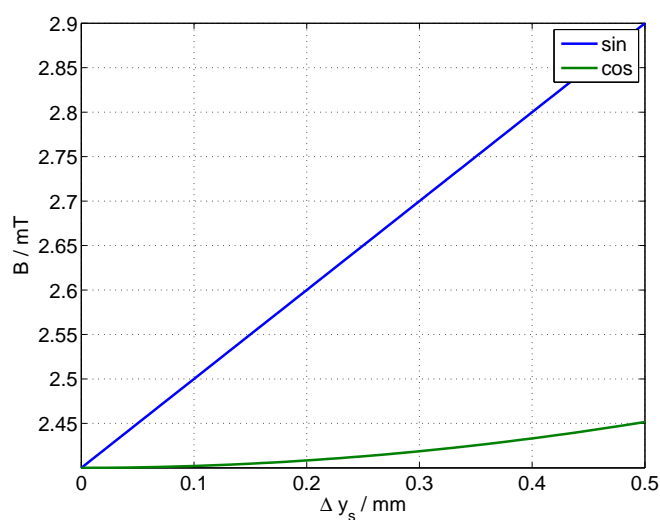
Slika 7.11: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.12: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

### 7.3.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_s$

Oglejmo si sedaj poteke amplitude, enosmerne komponente in faznega zamika pri statični ekscentričnosti v smeri y. Poteki so podobni kot pri ekscentričnosti v smeri x.



Slika 7.13: Amplituda osnovnega harmonika signalov  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

Poteke zapišimo še s kubičnimi polinomi.

$$A_{\sin} = \Delta x_s + 2,4 \quad (7.18)$$

$$Off_{\sin} = 0 \quad (7.19)$$

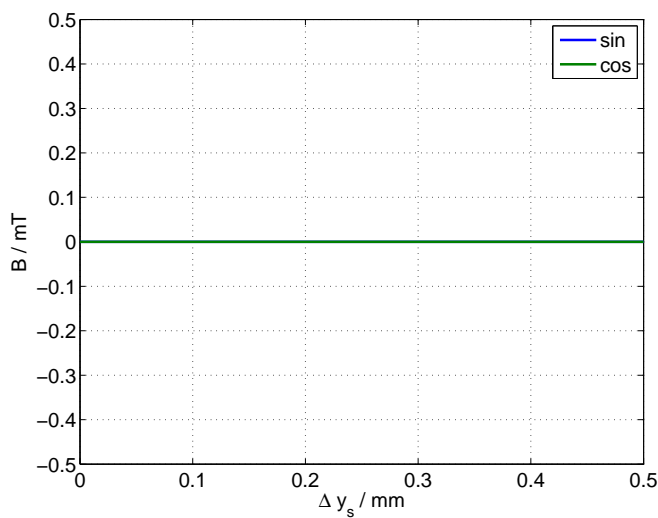
$$\delta_{\sin} = 0 \quad (7.20)$$

$$A_{\cos} = 2,08 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 2,4 \quad (7.21)$$

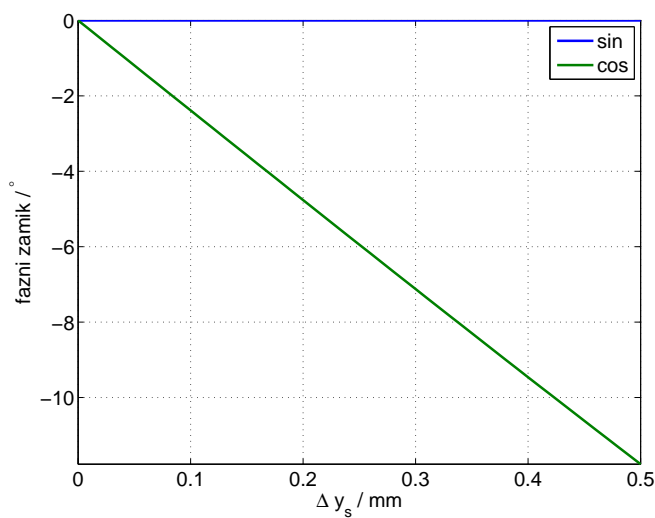
$$Off_{\cos} = 0 \quad (7.22)$$

$$\delta_{\cos} = 1,38 \Delta x_s^3 - 23,9 \Delta x_s \quad (7.23)$$

Iz potekov signalov  $\sin$  in  $\cos$  lahko predvidimo, da bo potek podoben le enosmerne komponenta bo negativna.



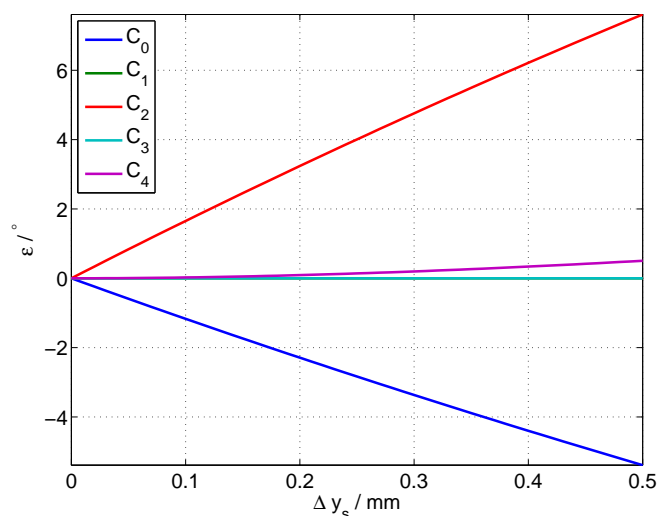
Slika 7.14: Amplituda osnovnega harmonika signalov  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.15: Amplituda osnovnega harmonika signalov  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

Poteke s slike 7.16, predstavimo s polinomom tretje stopnje. Aproksimacije pokažejo enake amplitude posameznih harmonikov, le enosmerna komponenta je dobila negativen predznak.





Slika 7.16: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri y

$$C_0 = -3,35 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 + 2,48 \Delta y_s^2 - 1,19 \cdot 10 \Delta y_s - 1,22 \cdot 10^{-5} \quad (7.24)$$

$$C_1 = 1,09 \cdot 10^{-4} \Delta y_s^3 - 8,69 \cdot 10^{-4} \Delta y_s^2 + 4,34 \cdot 10^{-3} \Delta y_s + 7,62 \cdot 10^{-10} \quad (7.25)$$

$$C_2 = 4,12 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 - 3,53 \Delta y_s^2 + 1,69 \cdot 10 \Delta y_s - 2,31 \cdot 10^{-5} \quad (7.26)$$

$$C_3 = 2,43 \cdot 10^{-4} \Delta y_s^3 - 1,30 \cdot 10^{-3} \Delta y_s^2 + 4,20 \cdot 10^{-3} \Delta y_s + 1,83 \cdot 10^{-8} \quad (7.27)$$

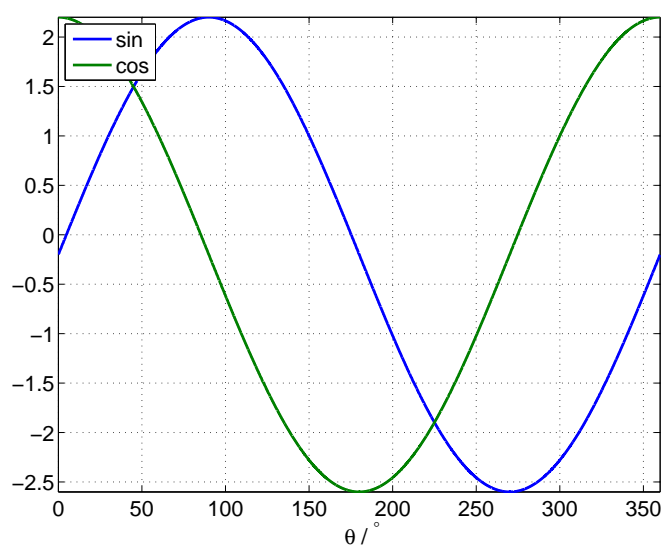
$$C_4 = -8,26 \cdot 10^{-1} \Delta y_s^3 + 2,42 \Delta y_s^2 + 6,13 \cdot 10^{-3} \Delta y_s - 1,60 \cdot 10^{-4} \quad (7.28)$$

## 7.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x osi

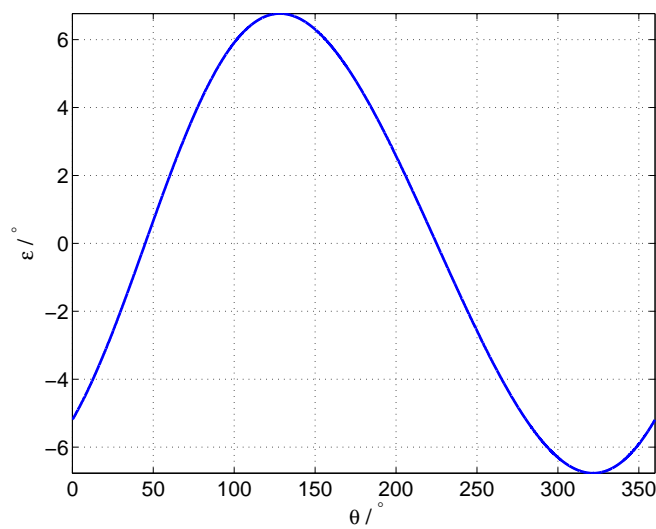
Oglejmo si sedaj rezultate simulacij dinamične ekscentričnosti. V signalih *sin* in *cos* se pojavi enosmerna komponenta (Slika 7.17).

Na sliki 7.18 je vidna napaka v obliki prvega harmonika, kar smo pričakovali.

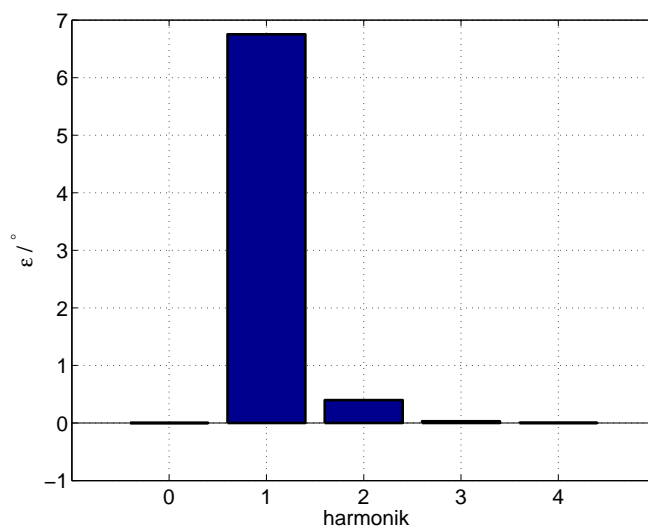
Po fft-ju napake se vidi izrazit prvi harmonik, enosmerne komponente je nič.



Slika 7.17: Signala  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.18: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 7.19: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

#### 7.4.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_d$

Oglejmo si, kako se spreminjata signala  $\sin$   $\cos$  po pričakovanjih se bo najbolj izrazito spreminjala enosmerna komponenta. Poteke zapišimo še s kubičnimi polinomi. Amplituda prvega harmonika in fazni zamik so nespremenjeni, spreminja se le enosmerna komponenta.

$$A_{\sin} = 2,4 \quad (7.29)$$

$$Off_{\sin} = -\Delta x_d \quad (7.30)$$

$$\delta_{\sin} = 0 \quad (7.31)$$

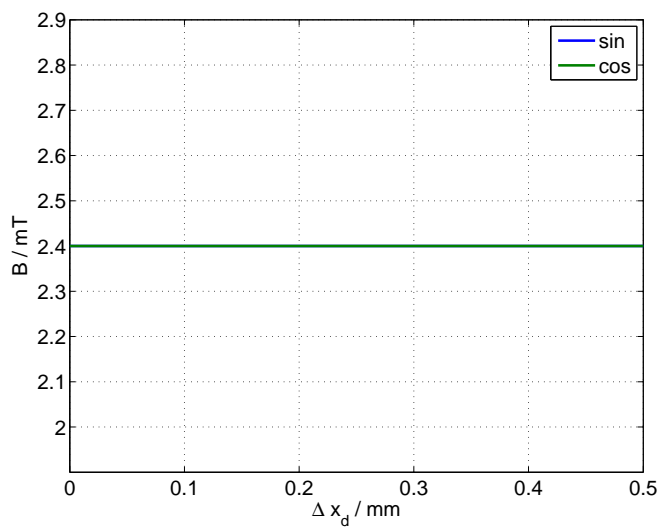
$$A_{\cos} = 2,4 \quad (7.32)$$

$$Off_{\cos} = -\Delta x_d \quad (7.33)$$

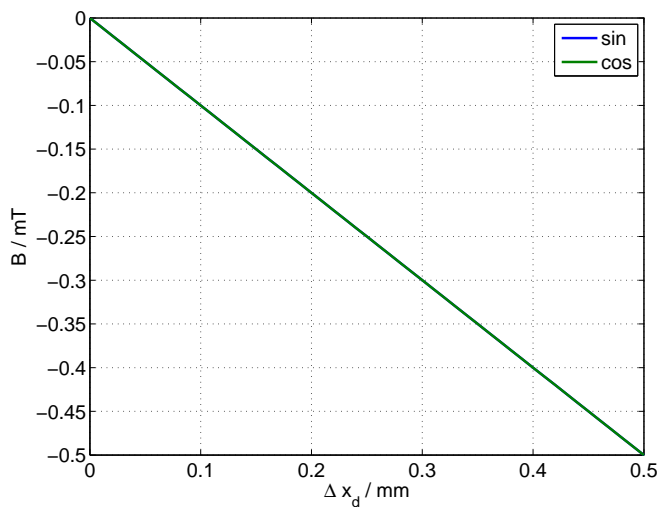
$$\delta_{\cos} = 0 \quad (7.34)$$

Na sliki 7.23 vidimo odvisnost amplitud napake od spreminjanja ekscentričnosti. Napaka, se po pričakovanjih najbolj izrazi s prvim harmonikom.

Poteke harmonikov s slike 7.23 aproksimiramo s polinomi.



Slika 7.20: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.21: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

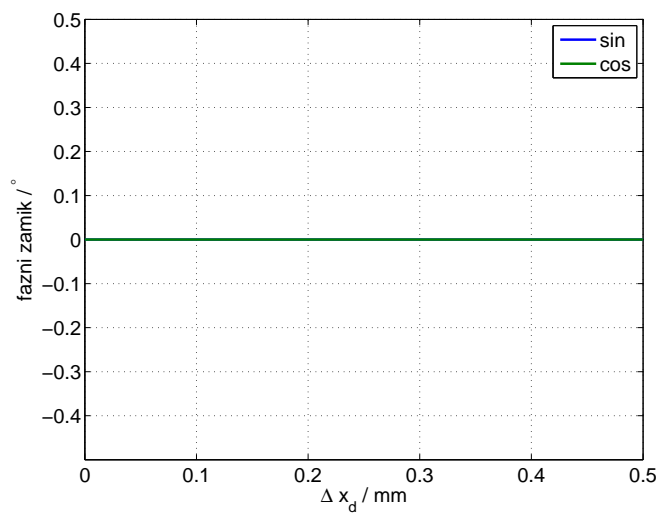
$$C_0 = 2,64 \cdot 10^{-4} \Delta x_d^3 + 1,25 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^2 + 2,91 \cdot 10^{-3} \Delta x_d + 1,02 \cdot 10^{-7} \quad (7.35)$$

$$C_1 = 1,58 \cdot 10^{-4} \Delta x_d^3 + 2,37 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^2 + 3,38 \cdot 10^{-3} \Delta x_d + 2,28 \cdot 10^{-7} \quad (7.36)$$

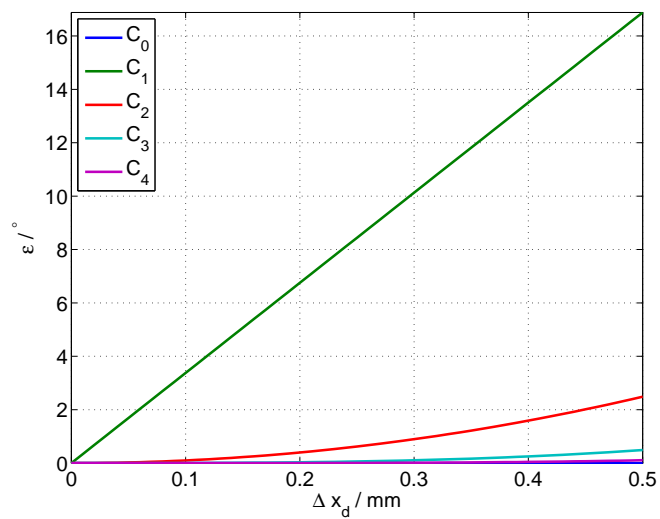
$$C_2 = 1,06 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^3 + 9,95 \Delta x_d^2 - 1,95 \cdot 10^{-3} \Delta x_d + 7,96 \cdot 10^{-7} \quad (7.37)$$

$$C_3 = 3,91 \Delta x_d^3 - 1,41 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^2 + 9,91 \cdot 10^{-4} \Delta x_d + 1,06 \cdot 10^{-5} \quad (7.38)$$

$$C_4 = 1,73 \Delta x_d^3 - 5,52 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 + 6,15 \cdot 10^{-2} \Delta x_d - 1,36 \cdot 10^{-3} \quad (7.39)$$



Slika 7.22: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z linearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 7.23: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od dinamične ekscentričnosti v smeri x

Tu lahko zapišem enačbe iz (6.24) razvite v Taylorjevo vrsto.

$$C_0 = 0 \quad (7.40)$$

$$C_1 = 3,38 \cdot 10 \Delta x_d \quad (7.41)$$

$$C_2 = 9,95 \Delta x_d^2 \quad (7.42)$$

$$C_3 = 3,91 \Delta x_d^3 \quad (7.43)$$

$$C_4 = 0 \quad (7.44)$$

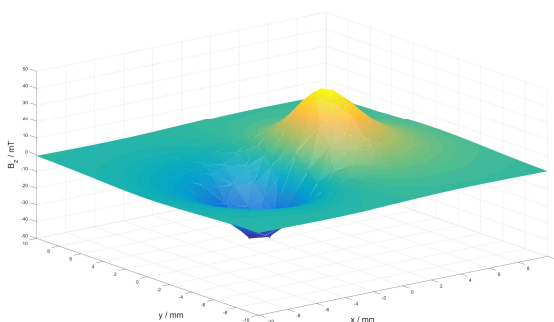
Rezultati se lepo prilegajo, četrti harmonik razvit s Taylorjevo vrsto je nič, saj je šele člen s potenco 4 neničelen. Polinom četrtega reda lahko kljub temu aprosimiramo s kubičnim polinomom po metodi najmanjših kvadratov.

Dinamična ekscentričnost v smeri  $y$  pri simulacijsah s linearnim poljem, ne povzroči napake, zato je ne morem opisati.

Pogledali smo si, kako se bodo obnašali signali  $\sin$ ,  $\cos$  in napaka glede na ekscentričnost senzorja ali magneta. Poteki so bili pričakovani, vendar semoramo zavedati, da je simulacijski model s linearizacijo polja zelo poenostavljen. V nadaljevanju pričakujem drugačno obnašanje potekov signalov  $\sin$  in  $\cos$ , napaka se bo izražala enako le harmoniki bodo imeli manjšo amplitudo ob večjih ekscentričnostih.

## 8 Realni model magnetnega polja

V tem poglavju bom predstavil rezultate simulacij, v katerih sem uporabil realen model magnetnega polja. Podjetje RLS merilna tehnika, mi je posredovalo rezultate simulacije z-komponente gostote magnetnega polja 2,55 mm nad magnetom. Simulirano polje pokriva območje 20x20 mm nad magnetom s korakom 0,02 mm (Slika 8.1).



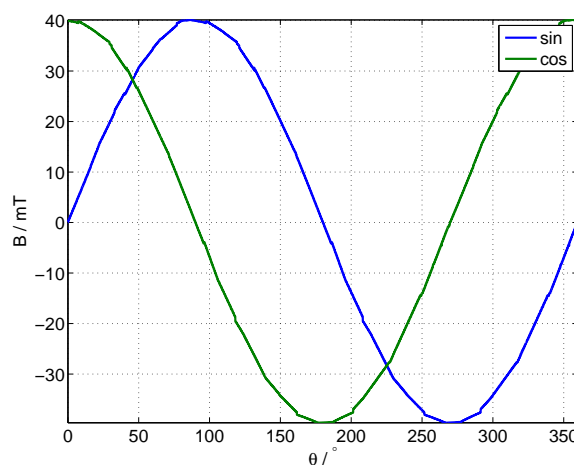
Slika 8.1: Model z- komponente gostote magnetnega polja uporabljen v simulacijah

Polje hall.ove sonde sem določil na naslednji način. Znana mi je lokacija sonde nad magnetom oz magnetnim poljem. Geometrijsko sem poiskal najbližjo poznano točko v kateri imam simulirano magnetno polje in vzel vrednost polja v najbližnji točki za polje v moji točki. S tem sem se izognil linearni interpolaciji polja (funkciji `interp2`) in s tem skrajšal simulacijski čas za 93% (iz 11min na 43.37s).

V tem poglavju bom na enak način kot v prejšnjem, predstavil rezultate in jih primerjal.

## 8.1 Brez napake

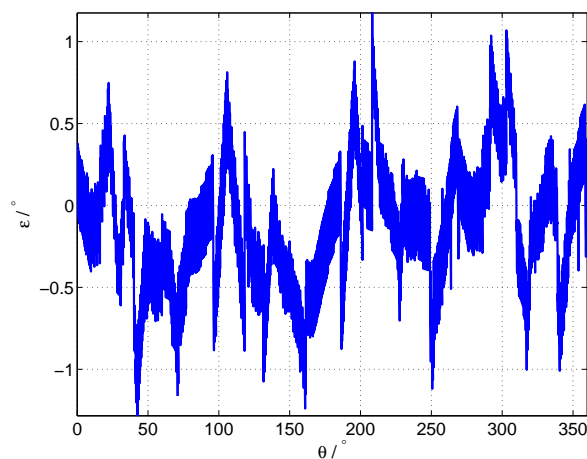
Kljub idealni montaži, se zaradi nepopolnega magneta, pojavi napaka. Magnet je lahko neenakomerno magnetiziran, kar nam že v začetku ustvari neko napako. Poglejmo si zato najprej zajeta signala *sin* in *cos* (Slika 8.2).



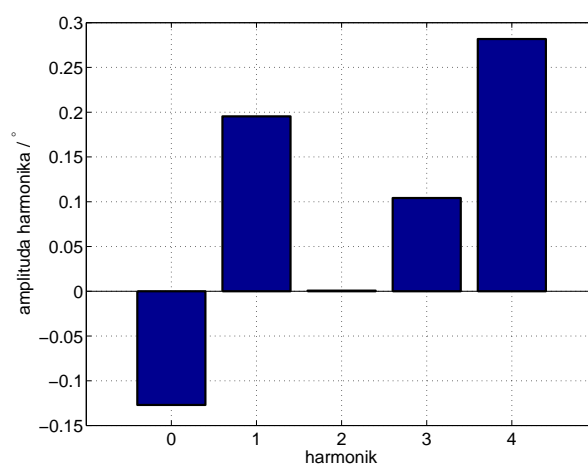
Slika 8.2: Poteka signala *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez vplivov ekscentričnosti

Signala *sin* in *cos* nimata popolne oblike kot pri simulacijah z linearnim poljem. Vsebujeta tudi višje harmonike. Ta nepopolnost analognih signalov se izrazi tudi v napaki (Slika 8.3). Napaka je bolj izrazita kot pri linearnem modelu polja. V napaki se pojavljajo tudi skoki (npr. pri  $105^\circ$ ), ki so posledica nepopolnega numerično izračunanega modela magnetnega polja. Opravimo FFT napake (Slika 8.4). Izrazit je četrti harmonik, kar je pričakovano po podatkovnih listih [3].





Slika 8.3: Napaka pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez vplivov ekscentričnosti

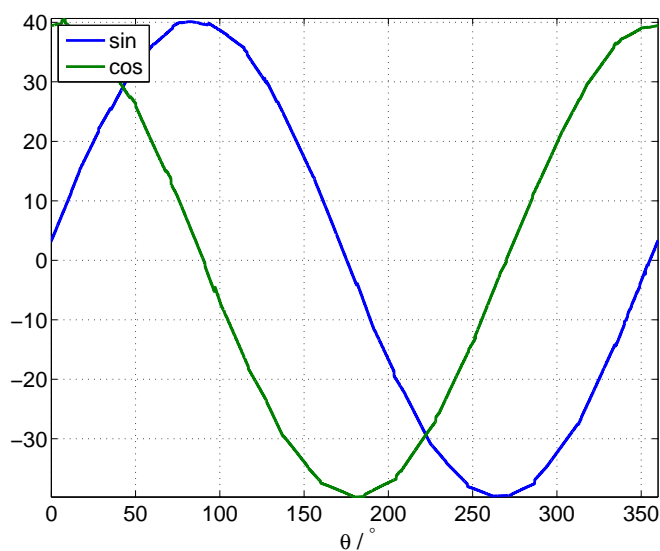


Slika 8.4: Amplitude harmonikov napake simulacij z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti

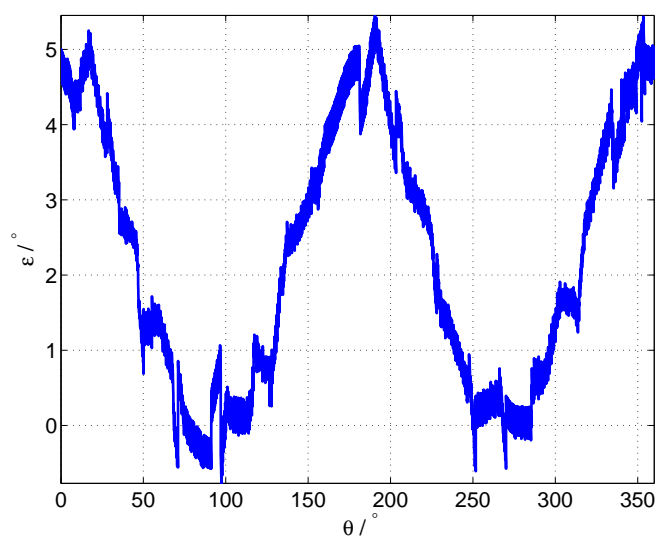
## 8.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

Oglejmo si rezultate simulacij statične ekscentričnosti v smeri x z realnim poljem. Po pričakovanjih se bo spremenila amplituda *sin* in *cos* signala ter zmanjšal njun

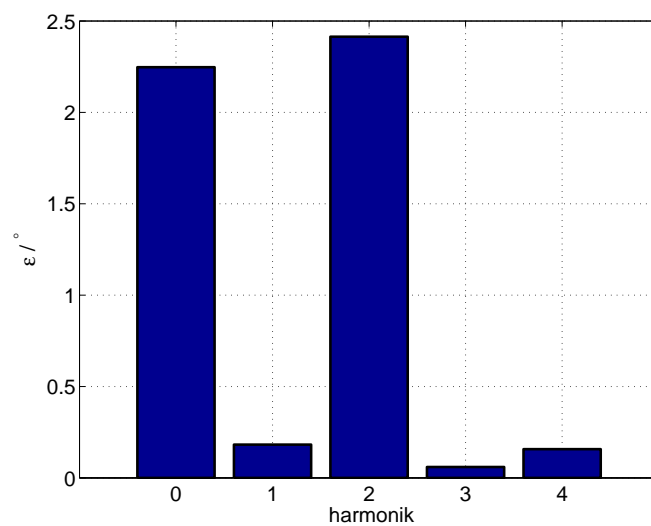
fazni zamik (izraza (5.4) in 5.5). Na sliki 8.5 na opazimo velike razlike. Na sliki 8.6 vidimo napako kakršno obliko smo pričakovali. Napaka je za cca  $30^\circ$  zamaknjena proti napaki s slike 7.4. Amplituda drugega harmonika izgleda nekoliko nižja, kar bo bolje pokazal fft napake, ki je prikazan na sliki 8.7. Enosmerna komponenta je po velikosti enaka, amplituda drugega harmonika je nekoliko manjša, kot pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem.



Slika 8.5: Signala *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x



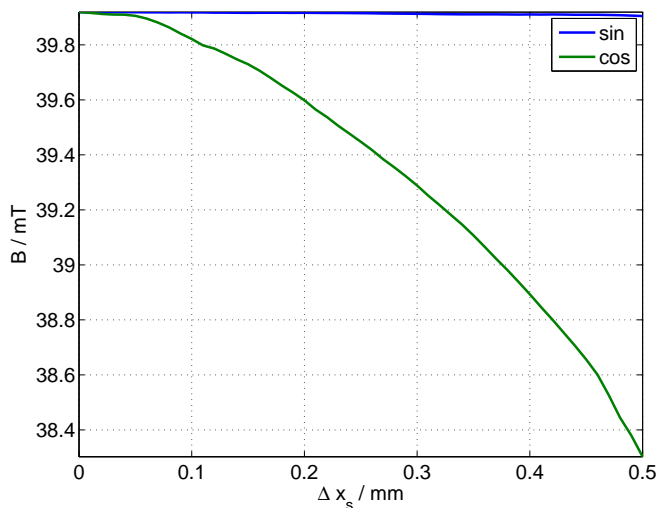
Slika 8.6: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z reaearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.7: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite s fft pri simulacijah z reaearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri x

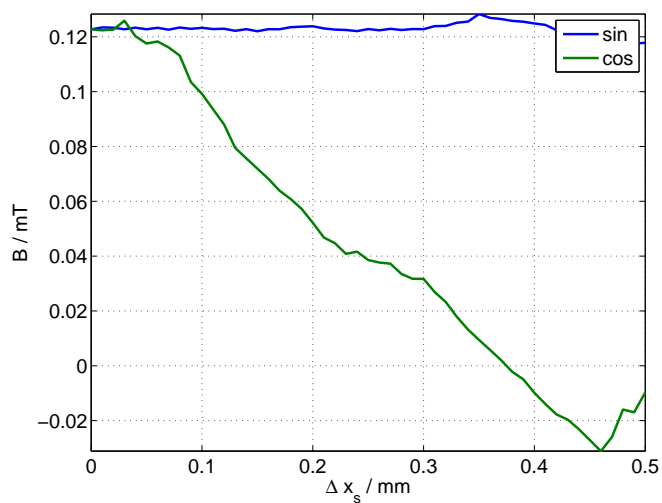
### 8.2.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_s$

Sedaj pogledjmo kako se spreminjata analogna signala  $\sin$  in  $\cos$  ob spreminjanju ekscentričnosti. Na sliki 8.8 je prikazana sprememba amplitude prvega harmonika, na sliki 8.9 enosmerni komponenti in na sliki 8.10 fazni zamik signalov glede na njuno idealno poravnavo. Pri simulacijah z linearnim poljem sta amplitudi prvega harmonika naraščali. Hallovi sondi sta na radij 2,4 mm postavljeni z razlogom, imeti maksimalno amplitudo signala. Z vsakim premikom se amplituda lahko le zmanjša, pri čemer se amplituda  $\cos$  manjša hitreje. To lahko razumemo, saj Hallova sonda za zajem  $\cos$  signala zajame večji radij kot sonda za signal  $\sin$ . Sonda ne zajame več najvišje vrednosti magnetnega polja zato se mu amplituda tudi zmanjša. Zanimivo je tudi, da imati v idealni legi ob signala  $\sin$  in  $\cos$  enako enosmerno komponento. Z višanjem ekscentričnosti se enosmerna komponenta  $\cos$  manjša, enosmerna komponenta  $\sin$  ostaja enaka. Fazni zamik signala  $\cos$  je dokaj konstanten, medtem ko fazni zamik  $\sin$  linearno narašča kot je bilo simulirano pri linearnem polju.

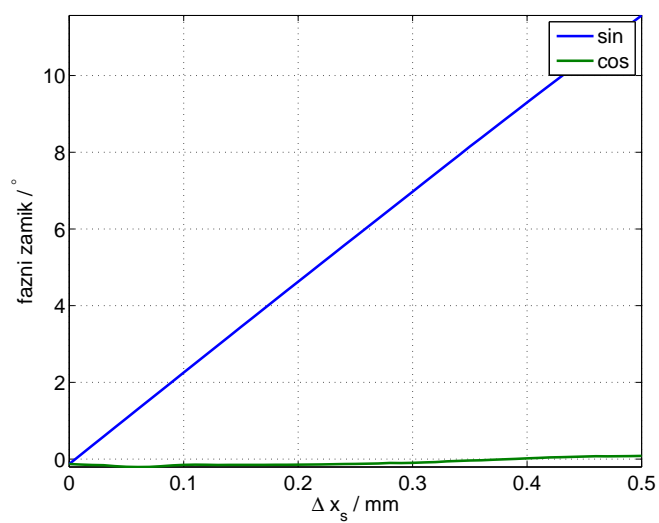


Slika 8.8: Amplituda osnovnega harmonika signalov  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z linearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

Poteke sedaj aproksimirajmo s kubičnimi polinomi. Enačbe potrdijo kon-



Slika 8.9: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.10: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri x

stantnost amplitude prvega harmonika in enosmerne komponente signala *sin*, ter linearno naraščanje faznega zamika kot pri enačbah (7.2).

$$A_{sin} = +4,18 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 6,17 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 3,60 \cdot 10^{-3} \Delta x_s + 3,99 \cdot 10 \quad (8.1)$$

$$Of f_{sin} = -5,45 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 + 3,43 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 - 5,33 \cdot 10^{-2} \Delta x_s + 1,25 \cdot 10 \quad (8.2)$$

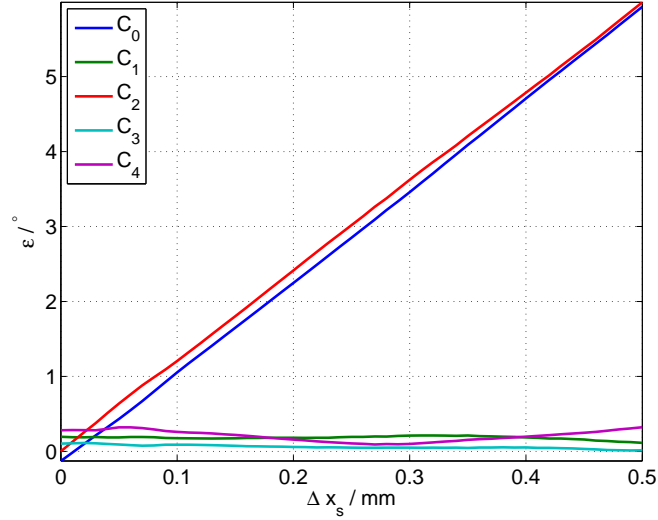
$$\delta_{sin} = -2,29 \Delta x_s^3 + 3,65 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 2,38 \cdot 10 \Delta x_s - 1,25 \cdot 10^{-1} \quad (8.3)$$

$$A_{cos} = -2,39 \Delta x_s^3 - 3,28 \Delta x_s^2 - 9,66 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 3,99 \cdot 10 \quad (8.4)$$

$$Of f_{cos} = +8,68 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^3 - 4,23 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 - 3,16 \cdot 10^{-1} \Delta x_s + 1,31 \cdot 10 \quad (8.5)$$

$$\delta_{cos} = -2,71 \Delta x_s^3 + 3,54 \Delta x_s^2 - 5,97 \cdot 10^{-1} \Delta x_s - 1,46 \cdot 10^{-1} \quad (8.6)$$

Na sliki 8.11 vidimo odvisnost amplitud posameznega harmonika od spreminjanja statične ekscentričnosti v smeri x.



Slika 8.11: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri x

Poteke s slike 8.11 aproksimiramo s kubičnimi porealami in dobimo naslednje poteke:

$$C_0 = -1,30\Delta x_s^3 + 1,66\Delta x_s^2 + 1,16 \cdot 10\Delta x_s - 1,37 \cdot 10^{-1} \quad (8.7)$$

$$C_1 = -5,99\Delta x_s^3 + 3,85\Delta x_s^2 - 6,20 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 2,05 \cdot 10^{-1} \quad (8.8)$$

$$C_2 = -3,28 \cdot 10^{-1}\Delta x_s^3 - 5,20 \cdot 10^{-2}\Delta x_s^2 + 1,20 \cdot 10\Delta x_s + 1,66 \cdot 10^{-2} \quad (8.9)$$

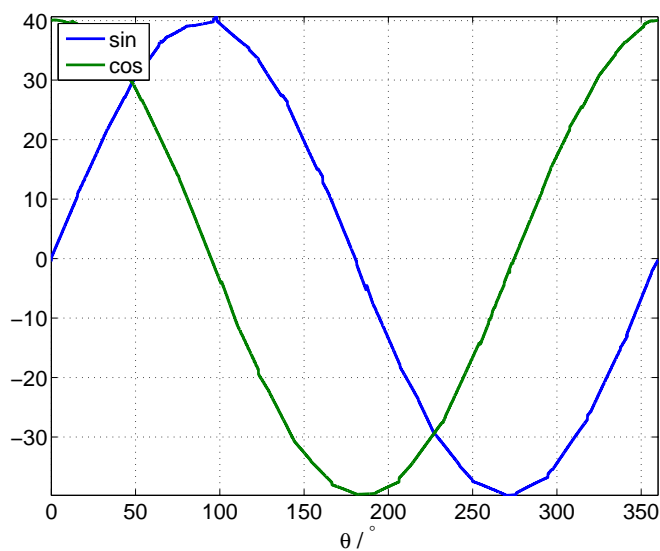
$$C_3 = -1,84\Delta x_s^3 + 1,50\Delta x_s^2 - 4,91 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,16 \cdot 10^{-1} \quad (8.10)$$

$$C_4 = 8,53\Delta x_s^3 - 3,17\Delta x_s^2 - 4,72 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 3,20 \cdot 10^{-1} \quad (8.11)$$

Enosmerna komponenta narašča enako kot pri simulacijah z linearnim poljem, kar je posledica faznega zamika  $\sin$ . Prvi tretji in četrti harmonik so konstantni, drugi harmonik narašča nekoliko počasneje, kot je naraščal pri simulacijah z linearnim poljem.

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

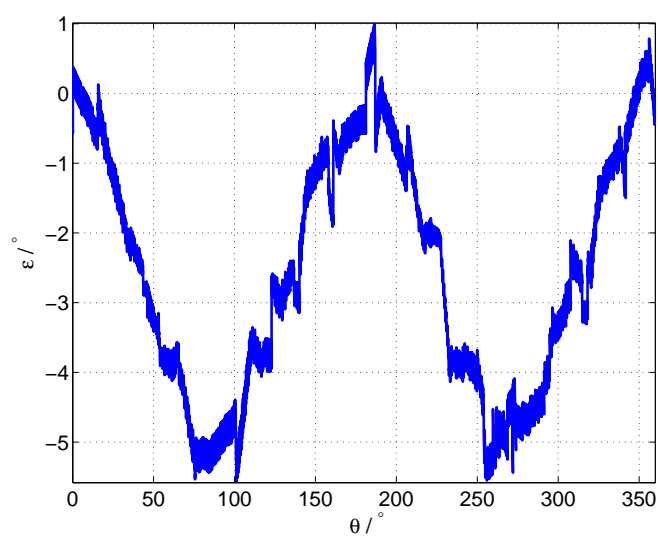
Oglejmo si rezultate simulacij statične ekscentričnosti v smeri y. Pričakujem podobne rezultate kot pri statični ekscentričnosti v smeri x, le da bo tu hitreje padala amplituda *sin* signala in spreminjal se bo fazni zamik *cos*. Pri izmiku za 10% neizgleda, da bi se signal kaj spremenila vendar predvidevam, da bo fft signalov nakazal na padanje. Na sliki 8.13 vidimo obliko napake, kot smo jo pričakovali.



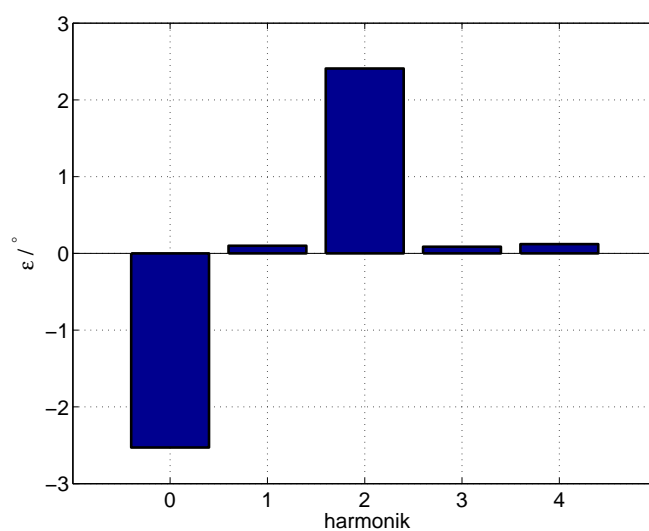
Slika 8.12: Signala *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

fft pokaže pričakovane poteke, amplitude so le nekoliko manjše.





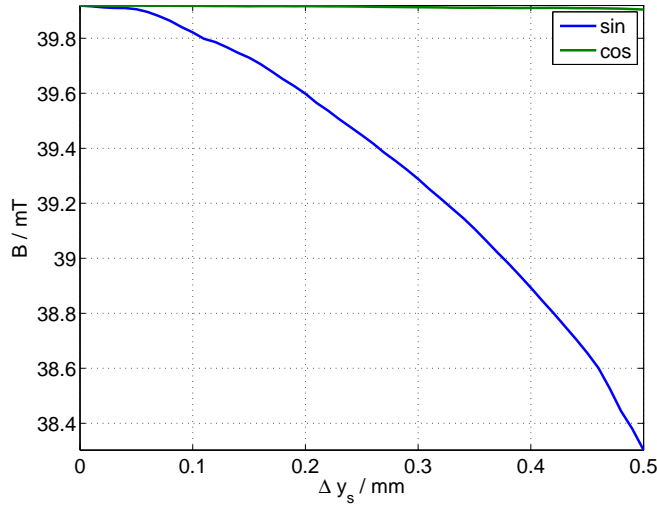
Slika 8.13: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z reaearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 8.14: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z reaearnim poljem pri 0,24 mm statične ekscentričnosti v smeri y

### 8.3.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_s$

Oglejmo si sedaj poteke amplitude, enosmerne komponente in faznega zamika pri statični ekscentričnosti v smeri  $y$ . Poteki so podobni kot pri ekscentričnosti v smeri  $x$  le kar je veljalo prej za  $\sin$  bo sedaj za  $\cos$  in obratno. Na sliki 8.15 vidimo sedaj pričakovano padanje amplitude prvega harmonika  $\sin$ . Kot je pri ekscentričnosti v smeri  $x$  padala enosmerna komponenta  $\cos$ , sedaj pada enosmerna komponenta  $\sin$ . Fazni zamik  $\cos$  je enak kot je bil pri simulacijah z linearnim poljem. Poteke sedaj opišimo še s kubičnimi polinomi.



Slika 8.15: Amplituda osnovnega harmonika signalov  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z reaeanim poljem statične ekscentričnosti v smeri  $y$

Poteke zapišimo še s kubičnimi polinomi.

$$A_{\sin} = -2,39\Delta y_s^3 - 3,28\Delta y_s^2 - 9,66 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 3,99 \cdot 10 \quad (8.12)$$

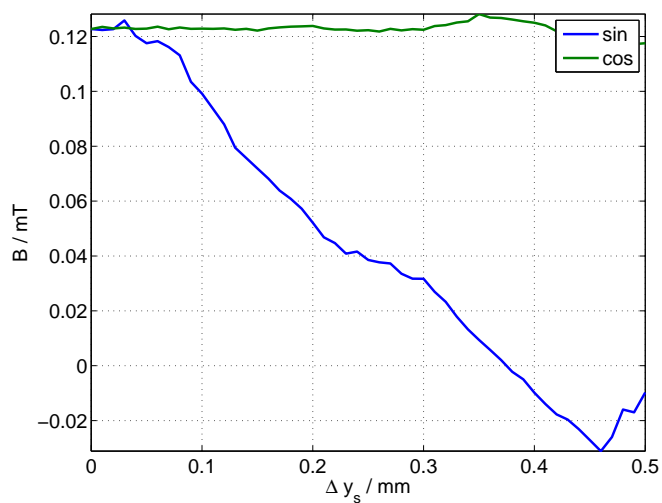
$$Off_{\sin} = +8,68 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 - 4,23 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 3,16 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 1,31 \cdot 10 \quad (8.13)$$

$$\delta_{\sin} = -2,71\Delta y_s^3 + 3,54\Delta y_s^2 - 5,97 \cdot 10^{-1}\Delta y_s - 1,46 \cdot 10^{-1} \quad (8.14)$$

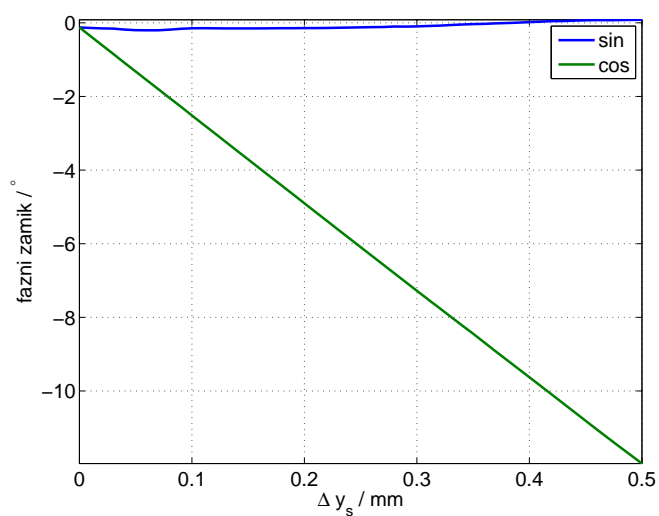
$$A_{\cos} = +3,76 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^3 - 5,99 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 - 3,87 \cdot 10^{-3}\Delta y_s + 3,99 \cdot 10 \quad (8.15)$$

$$Off_{\cos} = -5,45 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 + 3,42 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 5,30 \cdot 10^{-2}\Delta y_s + 1,24 \cdot 10 \quad (8.16)$$

$$\delta_{\cos} = +2,29 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 + 4,73 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 2,40 \cdot 10\Delta y_s - 1,24 \cdot 10^{-1} \quad (8.17)$$



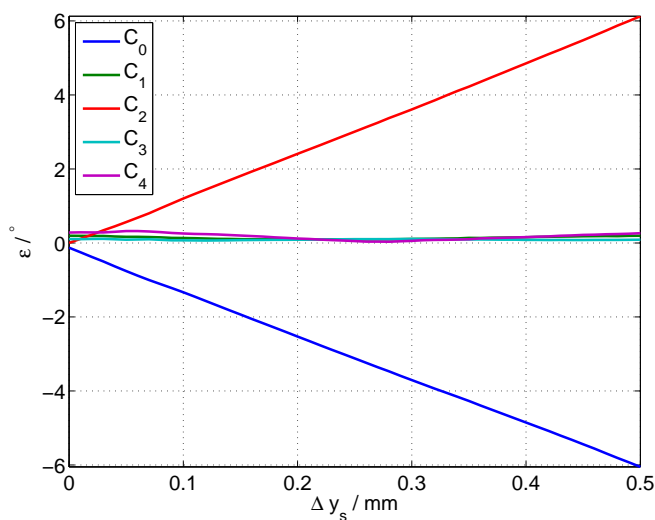
Slika 8.16: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 8.17: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem statične ekscentričnosti v smeri y

Enačbe prikazujejo podobne poteke kot sem jih pridobil pri simulacijah z realnim poljem, pri statični ekscentričnosti v smeri x. Poteke, ki so veljali za *sin* tu veljajo za *cos* in obratno. Razlikuje se le pri predzanku faznega zamika

$\varphi_{cos}$ . Poglejmo si tudi poteke posameznega harmonika napake. Po pričakovanju je enosmerna komponenta negativana, drugi harmonik narašča počasneje kot je pri simulacijah z linearnim poljem kar smo pričakovali. Poteke aproksimiramo s kubičnimi polinomi.



Slika 8.18: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od statične ekscentričnosti v smeri y

Potek enosmerne komponente ob majhnih odmikih linearno narašča, enako kot pri pri ekscentričnosti v smeri x, le z negativnim predznakom. Drugi harmonik narašča z večanjem ekscentričnosti prav tako, kot narašča amplituda drugega harmonika ob večanju ekscentričnosti v smeri x.

$$C_0 = -2,56\Delta y_s^3 + 2,36\Delta y_s^2 - 1,24 \cdot 10\Delta y_s - 1,33 \cdot 10^{-1} \quad (8.18)$$

$$C_1 = -2,46\Delta y_s^3 + 3,57\Delta y_s^2 - 1,19\Delta y_s + 2,14 \cdot 10^{-1} \quad (8.19)$$

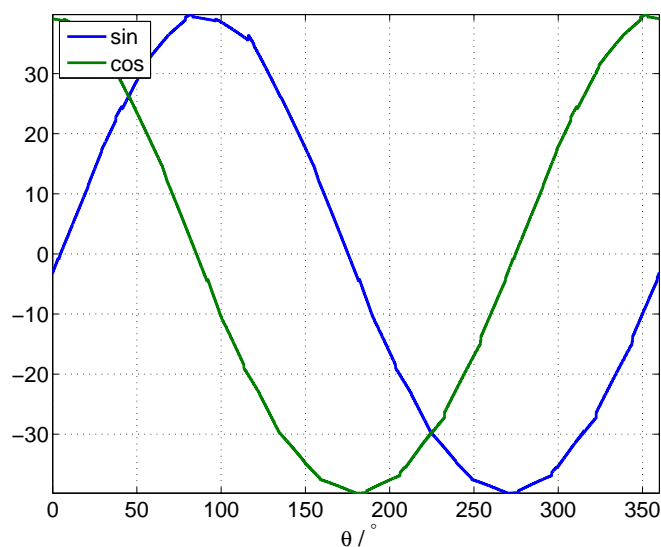
$$C_2 = 2,92\Delta y_s^3 - 1,53\Delta y_s^2 + 1,23 \cdot 10\Delta y_s - 2,78 \cdot 10^{-2} \quad (8.20)$$

$$C_3 = -2,93\Delta y_s^3 + 2,15\Delta y_s^2 - 4,19 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 1,07 \cdot 10^{-1} \quad (8.21)$$

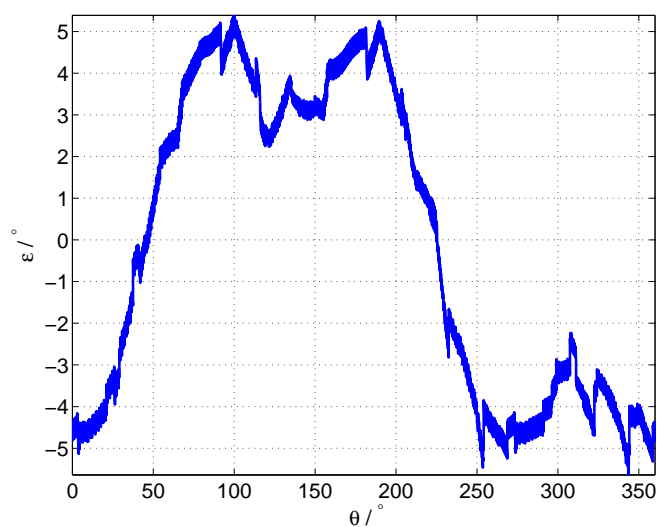
$$C_4 = 8,63\Delta y_s^3 - 2,82\Delta y_s^2 - 7,73 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 3,33 \cdot 10^{-1} \quad (8.22)$$

## 8.4 Dinamična ekscentričnost v smeri x

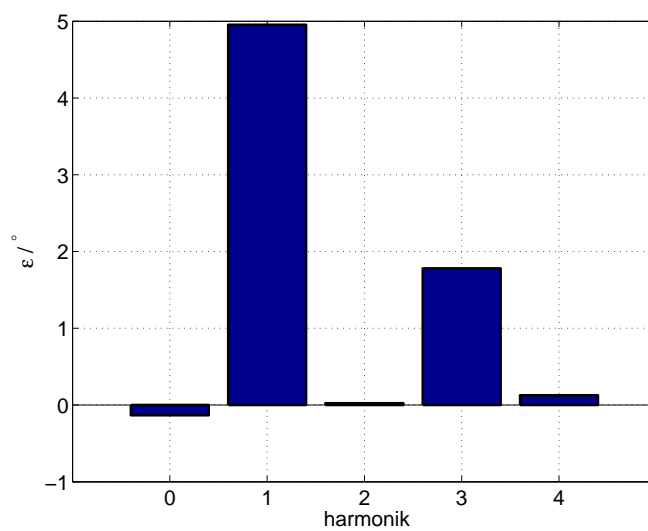
Oglejmo si sedaj rezultate simulacij dinamične ekscentričnosti. V signalih *sin* in *cos* pričakujemo enosmerno komponento (Slika 8.19). Na sliki ni opazna, a je zato posledica enosmerne komponente v *sin* in *cos* vidna v napaki (Slika 8.20). Napaka se izrazi v obliki prvega harmonika, ki je posledica enosmerne komponente v *sin* oz. *cos*. V napaki je viden tudi tretji harmonik. Poglejmo si še fft napake s slike 8.20, prikazanega na sliki 8.28. Po pričakovanju izstopa prvi harmonik, ki je nekoliko manjši kot je bil pri enaki ekscentričnosti pri linearnem polju. Presenetljivo izstopa tudi tretji harmonik. Pokaže se tudi majhna enosmerna komponenta.



Slika 8.19: Signala *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



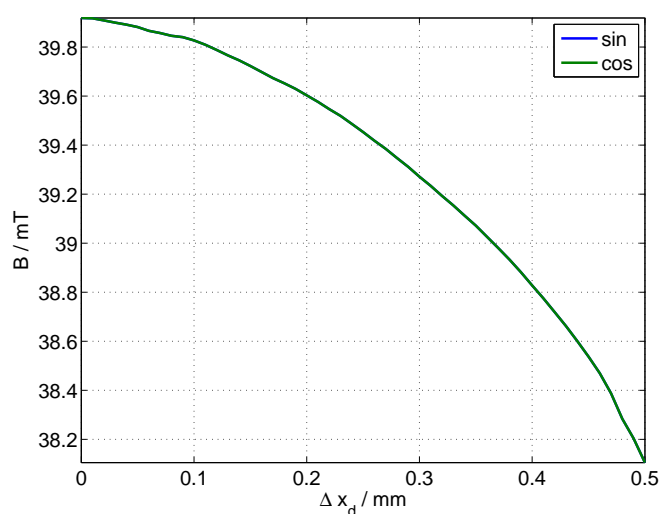
Slika 8.20: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z reaearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 8.21: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  pri simulacijah z reaearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

### 8.4.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta x_d$

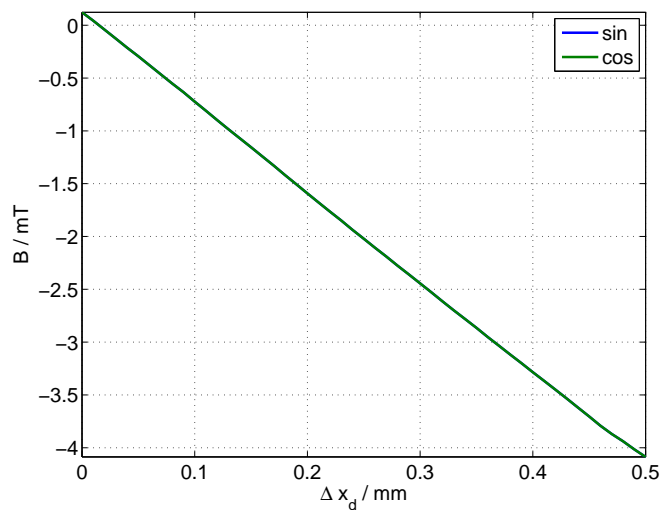
Oglejmo si, kako se spreminjata signala  $\sin$   $\cos$ . Po pričakovanjih se bo najbolj izrazito spreminjala enosmerna komponenta. Sklepamo lahko tudi, da se bo zmanjšala amplituda prvega harmonika.



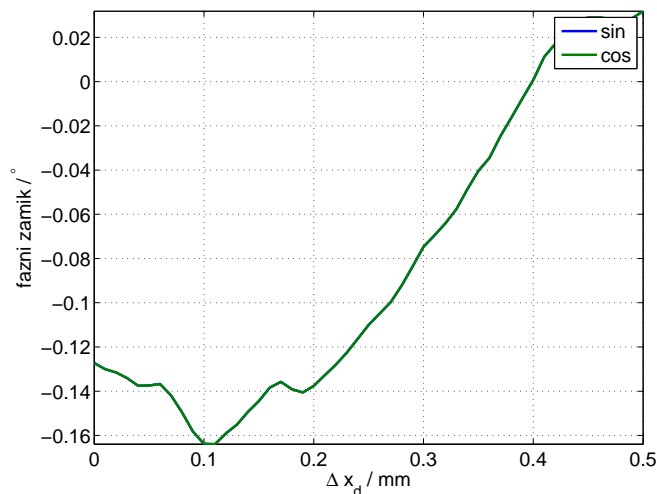
Slika 8.22: Amplituda osnovnega harmonika signalov  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z reaearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

Pri potekih vidimo, da se amplituda prvega harmonika pri obeh signalih enako zmanjša. Zmanjšuje se nekoliko hitreje kot se je amplituda nižala pri statični ekscentričnosti. Enosmerna komponenta linearno po pričakovanju. Zanimivo je tudi to da se spreminja fazni zamik obeh signalov enako, kar nam povzroči enosmerno komponento v napaki. Majhno, ampak je prav da to omenim, saj ni bila pričakovana. To je posledica zaradi nepopolnega magnetnega polja magneta.

Poteke zapišimo še s kubičnimi polinomi. Zanimivo je predvsem to, da se oba signala tekom večanja ekscentričnost obnašata enako kar pokažejo tudi aproksi-



Slika 8.23: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.24: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

mirane enačbe.

$$A_{sin} = -6,54\Delta x_d^3 - 1,78\Delta x_d^2 - 1,04\Delta x_d + 3,99 \cdot 10 \quad (8.23)$$

$$Off_{sin} = 2,20\Delta x_d^3 - 1,11\Delta x_d^2 - 8,45\Delta x_d + 1,28 \cdot 10^{-1} \quad (8.24)$$

$$\delta_{sin} = -4,82\Delta x_d^3 + 4,73\Delta x_d^2 - 8,49 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (8.25)$$

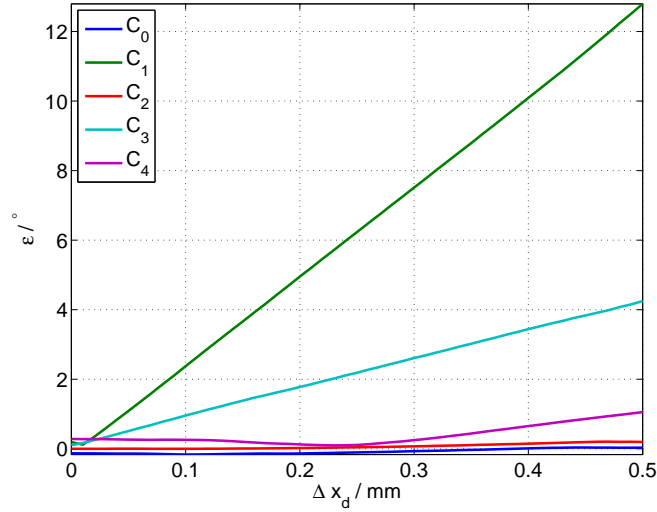
$$A_{cos} = -6,54\Delta x_d^3 - 1,78\Delta x_d^2 - 1,04\Delta x_d + 3,99 \cdot 10 \quad (8.26)$$

$$Off_{cos} = 2,20\Delta x_d^3 - 1,11\Delta x_d^2 - 8,45\Delta x_d + 1,28 \cdot 10^{-1} \quad (8.27)$$

$$\delta_{cos} = -4,82\Delta x_d^3 + 4,73\Delta x_d^2 - 8,49 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (8.28)$$



Na sliki 8.25 vidimo odvisnost amplitud napake od spreminjanja ekscentričnosti. Napaka, se po pričakovanjih najbolj izrazi s prvim harmonikom. Vidimo tudi linearno naraščanje tretjega harmonika.



Slika 8.25: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od dinamične ekscentričnosti v smeri x

Poteke harmonikov s slike 8.25 aproksimiramo s polinomi. V enačbah se vidi spreminjanje enosmerne komponente, ki je posledica faznega zamikanja *sin* in *cos*. Prvi harmonik narašča nekoliko počasneje, za izpostaviti je še tretji harmonik, ki narašča linearno.

$$C_0 = -5,61\Delta x_d^3 + 5,24\Delta x_d^2 - 9,00 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,14 \cdot 10^{-1} \quad (8.29)$$

$$C_1 = -2,27\Delta x_d^3 + 3,60\Delta x_d^2 + 2,44 \cdot 10\Delta x_d - 8,53 \cdot 10^{-2} \quad (8.30)$$

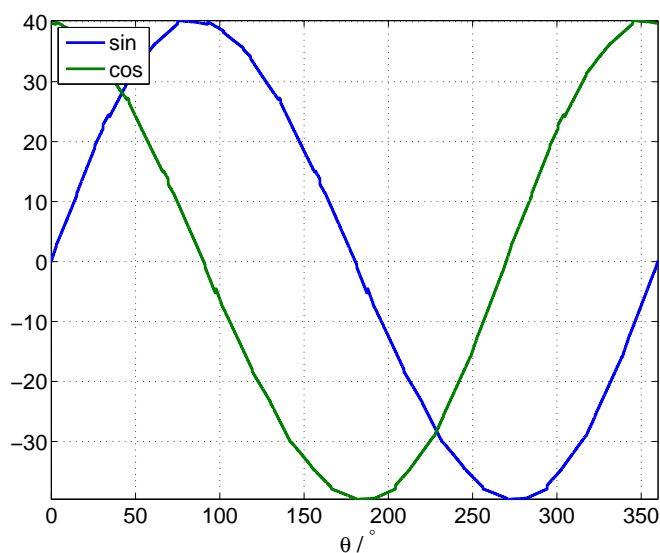
$$C_2 = -1,71\Delta x_d^3 + 2,37\Delta x_d^2 - 3,36 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 9,84 \cdot 10^{-3} \quad (8.31)$$

$$C_3 = 1,07\Delta x_d^3 - 1,37\Delta x_d^2 + 8,73\Delta x_d + 8,63 \cdot 10^{-2} \quad (8.32)$$

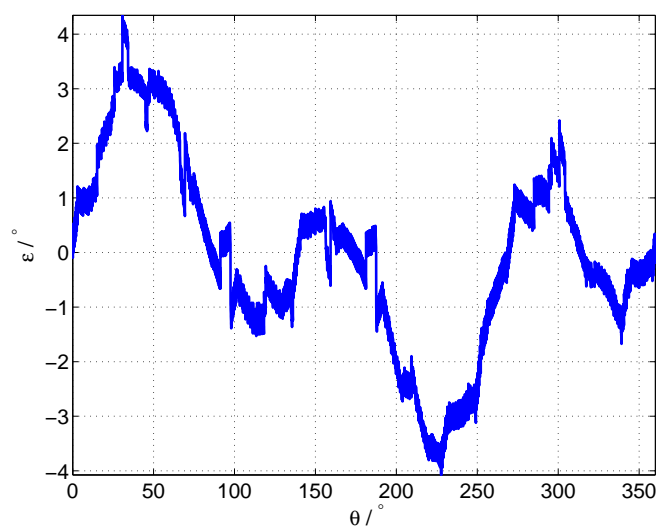
$$C_4 = 6,38\Delta x_d^3 + 4,03\Delta x_d^2 - 2,02\Delta x_d + 3,51 \cdot 10^{-1} \quad (8.33)$$

## 8.5 Dinamična ekscentričnost v smeri y

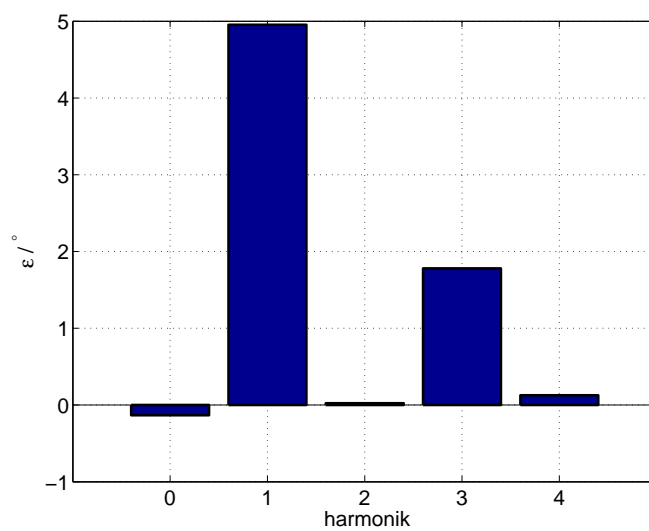
V simulacijah z linearnim poljem napaka ni bila odvisna od dinamične ekscentričnosti v smeri y. Tu sem jo kljub temu pomeril in opazil da obstaja. Pričakoval bi, da se bo napaka na izrazala podobno kot se izraža napaka pri dinamični ekscentričnosti. Na sliki 8.26 vidimo *sin* in *cos*, iz katerih se na prvi pogled neda veliko razbrati. Ko pogledamo napako na sliki 8.27. Opazimo izražena prvi in tretji harmonik, kar potrди tezo, o podobnosti napake z drugo ekscentričnostjo. Ko napravimo fft napake, opazimo tudi majhno enosmerno komponento, a prevladujeta prvi in tretji harmonik.



Slika 8.26: Signala *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



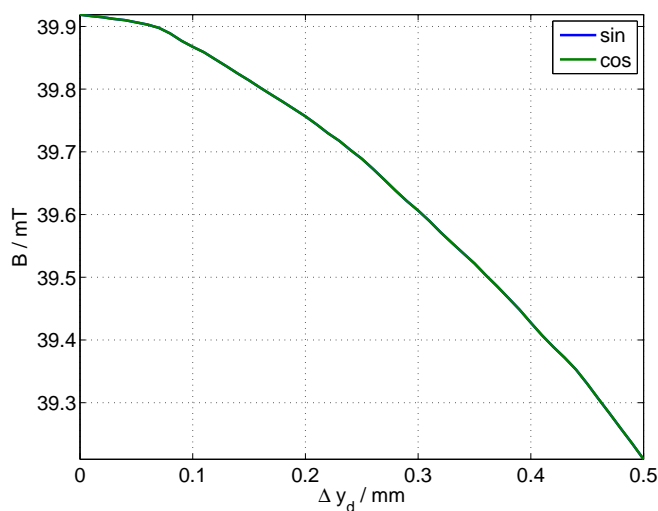
Slika 8.27: Napaka  $\varepsilon$  pri simulacijah z reeearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y



Slika 8.28: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  pri simulacijah z reeearnim poljem pri 0,24 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

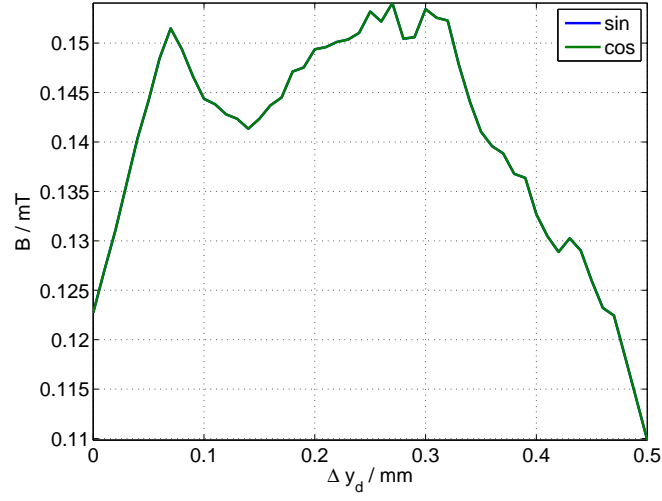
### 8.5.1 Sprememba $\sin$ , $\cos$ ter napake od $\Delta y_d$

Oglejmo si še poteke  $\sin$  in  $\cos$  v odvisnosti od dinamične ekscentričnosti v smeri  $y$ . Na sliki 8.29 vidimo enako zmanjševanje obeh amplitud prvih harmonikov. Zmanjševanje amplitude je počasnejše kot, pri dinamične ekscentričnosti v smeri  $x$ . Enosmerna komponenta se spreminja pri obeh signalih vendar zanemarljivo glede na amplitudo osnovnega harmonika. Ponovno je opazen fazni zamik obeh signalov za enak kot, kar povzroči enosmerno komponento v napaki.

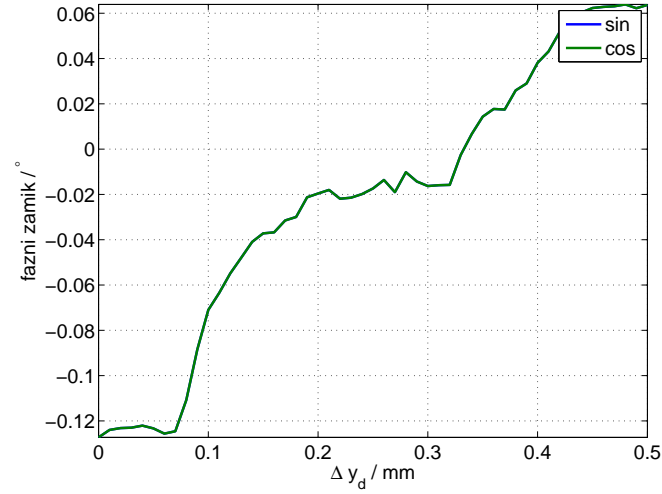


Slika 8.29: Amplituda osnovnega harmonika signalov  $\sin$  in  $\cos$  pri simulacijah z reaeanim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri  $x$

Poteke zapišimo še s kubičnimi polinomi. Po enačbah vidimo enako obnašanje  $\sin$  kot  $\cos$ . Izpostavim lahko le linearno naraščanje faznega zamika obeh signalov



Slika 8.30: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 8.31: Amplituda osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z reaearnim poljem dinamične ekscentričnosti v smeri x

kar povzroči naraščanje enosmerne komponente napake.

$$A_{sin} = +1,15\Delta y_d^3 - 2,72\Delta y_d^2 - 3,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,99 \cdot 10 \quad (8.34)$$

$$Off_{sin} = -2,44 \cdot 10^{-1}\Delta y_d^3 - 2,92 \cdot 10^{-1}\Delta y_d^2 + 1,69 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 1,31 \cdot 10^{-1} \quad (8.35)$$

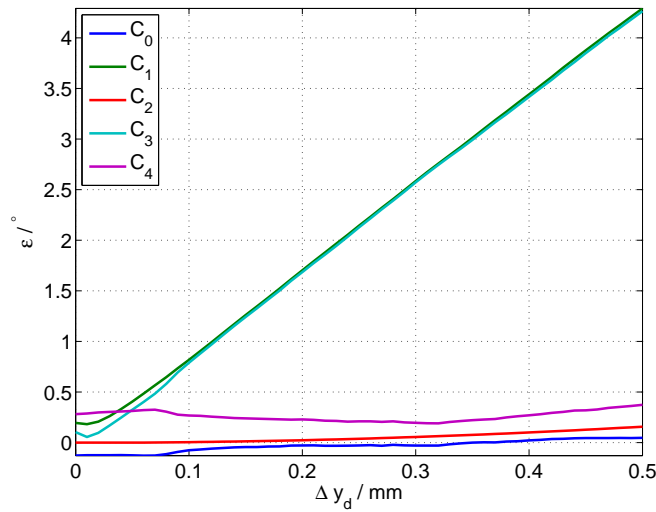
$$\delta_{sin} = +2,39\Delta y_d^3 - 2,10\Delta y_d^2 + 9,01 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (8.36)$$

$$A_{cos} = +1,15\Delta y_d^3 - 2,72\Delta y_d^2 - 3,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,99 \cdot 10 \quad (8.37)$$

$$Off_{cos} = -2,44 \cdot 10^{-1}\Delta y_d^3 - 2,92 \cdot 10^{-1}\Delta y_d^2 + 1,69 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 1,31 \cdot 10^{-1} \quad (8.38)$$

$$\delta_{cos} = +2,39\Delta y_d^3 - 2,10\Delta y_d^2 + 9,01 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (8.39)$$

Na sliki 8.32 vidimo odvisnost amplitud napake od spreminjanja ekscentričnosti. Napaka, se po pričakovanjih najbolj izrazi s prvim in tretjim harmonikom. Oblika napake ni posledica spremembe amplitude osnovnega harmonika, enosmerne komponente ali spremembe faznega zamika, ampak vsebnost drugega harmonika v *sin* in *cos*.



Slika 8.32: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  od dinamične ekscentričnosti v smeri x

$$C_0 = 2,50\Delta y_d^3 - 2,14\Delta y_d^2 + 8,63 \cdot 10^{-1}\Delta y_d - 1,47 \cdot 10^{-1} \quad (8.40)$$

$$C_1 = -9,46\Delta y_d^3 + 7,85\Delta y_d^2 + 6,81\Delta y_d + 8,35 \cdot 10^{-2} \quad (8.41)$$

$$C_2 = -1,48 \cdot 10^{-1}\Delta y_d^3 + 7,62 \cdot 10^{-1}\Delta y_d^2 - 3,01 \cdot 10^{-2}\Delta y_d + 4,54 \cdot 10^{-4} \quad (8.42)$$

$$C_3 = -6,17\Delta y_d^3 + 4,40\Delta y_d^2 + 7,91\Delta y_d - 3,84 \cdot 10^{-2} \quad (8.43)$$

$$C_4 = 5,60\Delta y_d^3 - 1,89\Delta y_d^2 - 2,84 \cdot 10^{-1}\Delta y_d + 3,13 \cdot 10^{-1} \quad (8.44)$$

V tem poglavju smo spoznali realno polje, ki ga merijo Hall-ove sonde. Rezultati imajo manjšo napako kot pri simulacijah z aproksimiranim linearnim magnetnim poljem. Opazili smo manjše fazni zamik obeh signalov *sin* in *cos* pri

dinamični ekscentričnosti, kar bi bilo smiselno pri meritvah podrobno opazovati. Na koncu, pri dinamični ekscentričnosti v smeri  $y$  smo spoznali, da se v zajetem polju pojavijo tudi višji harmoniki, ki nam še dodatno ustvarijo napako.





## 9 Meritve

Simulacije so prikazale okvirne poteke analognih signalov ter napake ob posamezni ekscentričnosti. Na merilni napravi so bile opravljene meritve ekscentričnosti. V tem poglavju je opisana sama merilna naprava, zajem podatkov ter izvedba meritev.

### 9.1 Oprema in postavitve merilnega mesta

Merilno mesto sestavljala 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 ??). Senzor RM44 je pritrjen na konstrukcijo 6 osnega mikrometrskega nastavljalnika pozicije HTIMS601. Celotno merilno mesto je prikazano na sliki ??.

Za manevriranje s HTIMS601 je potrebno nastaviti 6 osi. Vsako os se nastavlja s enim od vijakov (??). S postavitvijo koordinatnega sistema, je vsak od vijakov definiral premik senzorja. S spremembo vrtenja vijakov translacijskih osi, se je lokacija senzorja pred magnetom spreminjala z enako spremembo. S spremembo vrtenja rotacijskih vijakov, se je zaradi ročice na katero je pritrjen senzor, senzor zarotiral in hkrati tudi premaknil iz dotedanje lege. S spremembo rotacije je potrebno popraviti tudi nastavitve vijakovm, ki senzor premikajo v translacijskih oseh. Na sliki ?? je prikazano kateri vijak je za nastavljanje posamezne prostorske

osi. Vijaki poimenovani x-os, y-os in z-os so za nastavljanje translacijo merjenja, rot x-osi, rot y-osi in rot z-osi so za nastavljanje rotacije premikajoče plošče na vrhu HTIMS601. Senzor se je posledično ob premiku vijakov rot x-osi, rot y-osi in rot z-osi, glede na magnet vrtel in premikal. S potenciometrom se nastavlja hitrost vrtenja motorja. Hitrost vrtenja je nastavljena na 60 RPM (slika ??). Hitrost ni popolnoma konstantna. Vzrok je v vztrajnosti pogona. Mitja Nemec je problem skušal čimbolje odpraviti, z dodajanjem primernih uteži na primerna mesta na vztrajniku.

Za senzor RM4 sem postavil koordinati sistem prikazan na sliki ??

## 9.2 Zajem podatkov

Mitja Nemec je pripravil tudi grafični uporabniški vmesnik za prikazovanje meritev (slika ??). Vmesnik lahko prikazuje potek referenčnega kota, analognih signalov sinus in kosinus senzorja RM44, izračunanega kota iz sin in cos signala, napako med izračunanim kotom senzorja in referenčnim dajalnikom, hitrost vrtenja ter tok prve faze motorskega pogona. Signaloma sin in cos se v programu prištejete enosmerni komponenti, ki bi popravili izhodna signala. Krmilna plošča zajema podatke s pogona s frekvenco 1kHz. Referenčni inkrementalni dajalnik, se ob zagonu inicializira. V programu se podatek o kotu deli s 12595200. Definijsko 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. Izvodu AD pretvornika se odšteje 2048 in deli s 4096. Definijsko 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.

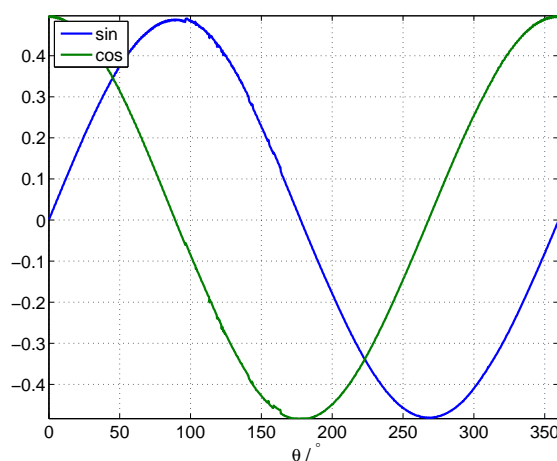
Na sliki ?? je prikazan sinusni signal prikazan kot da je zamaknjen za  $180^\circ$ . To je posledica pozitivne smeri vrtenja senzorja [9]. Senzorju se lahko nastavi v katero smer narašča izhod. To sem rešil tako, da sem obrnil podatke. Popraviti je bilo potrebno tudi potek referenčnega dajalnika.

## 9.3 Senzor v izhodiščni legi

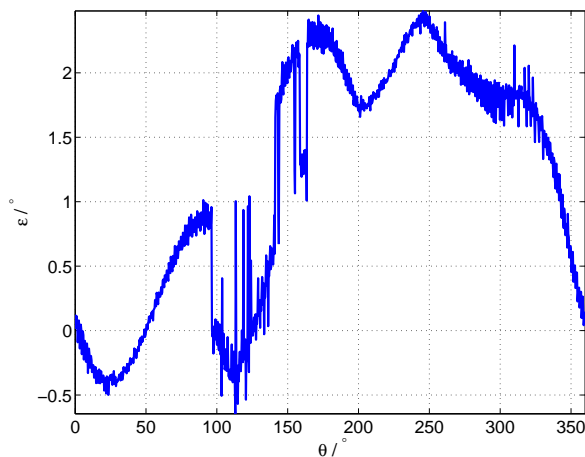
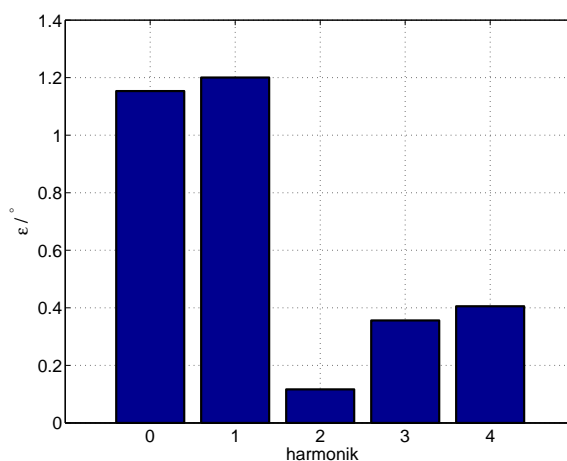
Senzor in magnet se lahko gibljeta, najprimernejša, izhodiščna lega, ni definirana. Z merilno urico Mitutoyo 543-391B se je dinamično ekscentričnost magneta nastavilo na najmanjšo. Oplet z merilno urico je bil pomejen  $\pm 3 \mu\text{m}_{pp}$ . S prilagajanjem vijakov HTIMS601, opazovanjem signalov *sin* in *cos* ter napake sem nastavil senzor v lego kjer je bila statična ekscentričnost najmanjša. Najprimernejšo lego sem iskal glede na največjo vrednost amplitud in ortogonalnost

$\sin$  in  $\cos$  signalov. Signala  $\sin$  in  $\cos$  sta morala ustrezati definicijskem območju zajema AD pretvornika.

NA sliki 9.1 sta predstavljena signala  $\sin$  in  $\cos$ . Enosmerni komponenti sta prisotni v obeh signalih, posledično se izrazi v napaki prvi harmonik (slika 9.2). V napaki se pojavi med  $95^\circ$  in  $140^\circ$  preskok napake. V signalih  $\sin$  in  $\cos$  se v tem območju pojavi fazni zamik,  $\sin$  pri  $95^\circ$  in nato  $\cos$  pri  $160^\circ$ . Z razvojem napake v Fourierovo vrsto (slika 9.3) vidimo velikosti posameznih amplitud napake. Enosmerna komponenta je posledica sofaznih zamikov obeh signalov  $\sin$  in  $\cos$ . Prvi harmonik je posledica enosmerne komponente  $\sin$  in  $\cos$ . Z matematično obdelavo signalov  $\sin$  in  $\cos$  sem enosmerni komponenti odstranil, vendar se prvi harmonik napake še vedno izrazi. Prvi harmonik napake je odvisen tudi od drugega harmonika v signalih  $\sin$  in  $\cos$ . Z odstranitvijo tudi drugega harmonika iz signalov  $\sin$  in  $\cos$  je bil prvi harmonik v napaki odstranjen. Signala  $\sin$  in  $\cos$  med obdelavo ne bosta popravljena. Spreminjanje signalov  $\sin$  in  $\cos$  in napake se bo opazovalo glede na potek, ki je bil pomejen v izhodiščni legi.



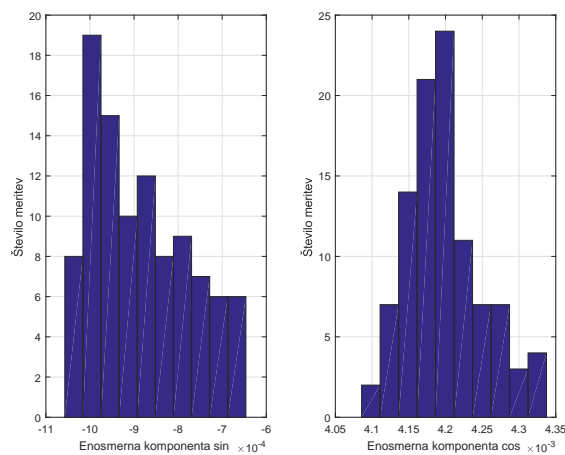
Slika 9.1: Signala  $\sin$  in  $\cos$  pomejena v izhodiščni legi

Slika 9.2: Napaka  $\varepsilon$  pomejena v izhodiščni legiSlika 9.3: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto pri meritvah v izhodiščni legi

### 9.3.1 Meritve v izhodiščni legi

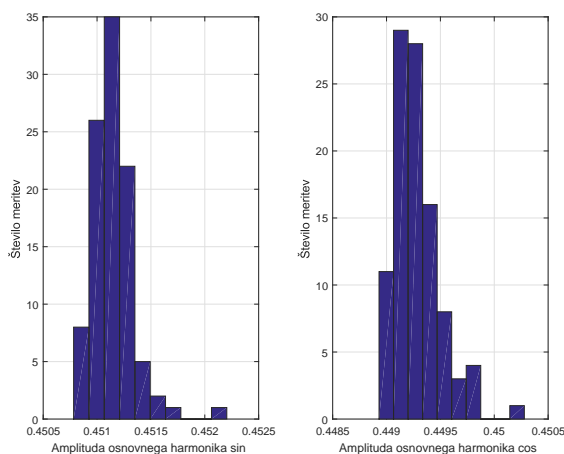
V izhodiščni legi sem opravil več meritev. Osredotočil sem se na enosmerni komponenti in amplitudi osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos*. Porazdelitev enosmerne komponente signala *sin* in *cos* je prikazana na sliki 9.4. Srednja vrednost

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



Slika 9.4: Porazdelitev meritev enosmerne komponente signalov  $\sin$  in  $\cos$

prikazana na sliki 9.4. Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika  $\sin$  je 0,451, standardna deviacija je  $2,20 \cdot 10^{-4}$ . Srednja vrednost amplitude osnovnega harmonika  $\cos$  je 0,449, standardna deviacija je  $1,95 \cdot 10^{-4}$ .



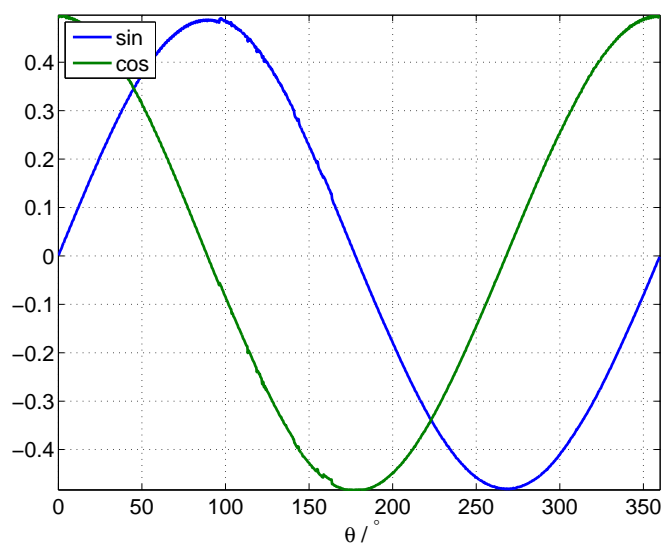
Slika 9.5: Porazdelitev meritev amplitude osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos*

## 9.4 Meritve statične ekscentričnosti v smeri x-osi

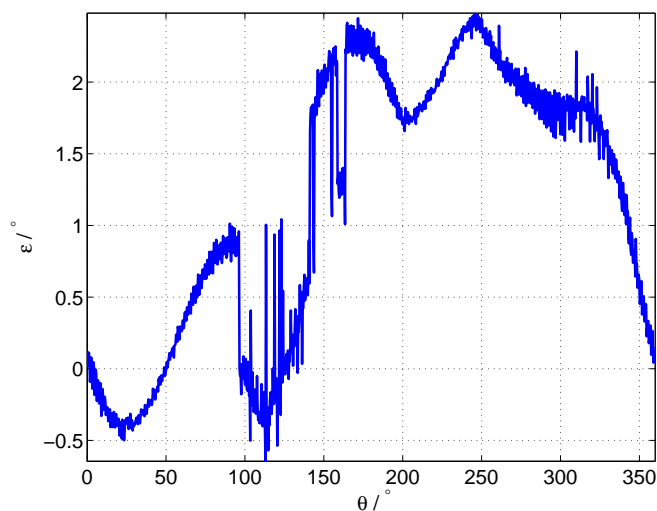
Pri meritvi je pričakovati spremembo amplitud in faznih zamikov signalov *sin* in *cos*. Na sliki 9.6 sta prikazana *sin* in *cos* signala. Na signalih, med 95 in 175° se pojavijo visoko harmonske motnje. Napaka je prikazana na sliki 9.7. Med 95 in 175° se signala *sin* in *cos* hkrati fazno zamakneta. Vzrok tega pojava nisem raziskoval. Napaka razvita v Fourierovo vrsto prikaže pričakovano povišanje drugega harmonika. Povišala sta se tudi amplitudi tretjega in četrtega harmonika.

### 9.4.1 Sprememba *sin*, *cos* ter napake od $\Delta x_s$

Iz simulacij se pričakuje nižanje amplitude osnovnega harmonika *cos* signala. Sprememba amplitud osnovnih harmonikov je prikazana na sliki 9.9. Amplituda signala *cos* pada pričakovano, pada tudi amplituda signala *sin*. Signala nimata enake amplitude v izhodišču, kar je posledica nepopolne izhodiščne lege. Potek enosmerne komponente je prikazan na sliki 9.10. Komponenta *cos* signala pada po kot je bilo predvideno v simulacijah. Fazni zamik signalov je prikazan na



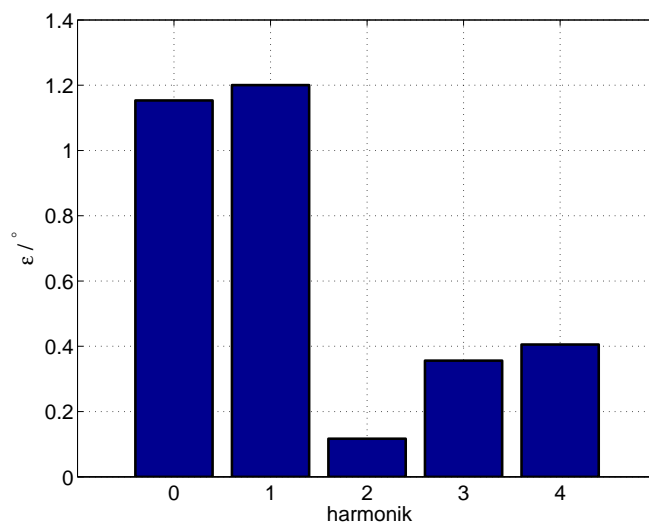
Slika 9.6: Signala  $\sin$  in  $\cos$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 9.7: Napaka  $\varepsilon$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

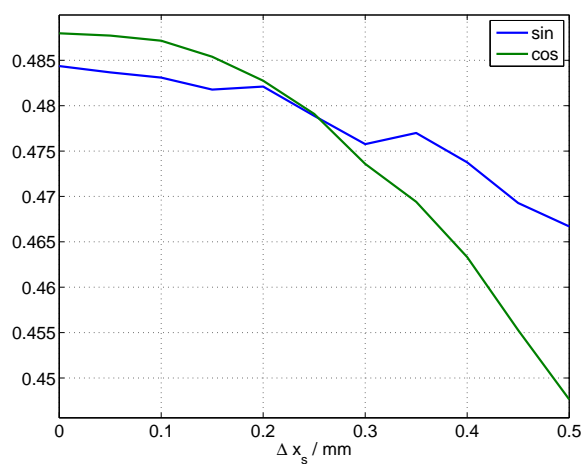
sliki 9.11. Pričakovano po simulacijah se fazni zamik med signaloma povečuje. Rezultati simulacij so prikazovali konstanten fazni kot signala  $\cos$  in spreminjanje le faznega kota  $\sin$ . Pri meritvah se je fazni kot  $\cos$  zmanjševal, fazni kot  $\sin$  naraščal. Razlika med njima je majša, kot je bila posimulirana. Vsota faznih zamikov je konstantna, zato se enosmerna komponenta v napaki ne spreminja.



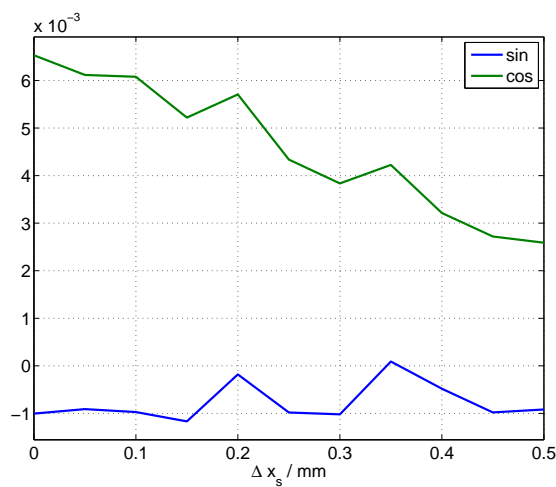


Slika 9.8: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

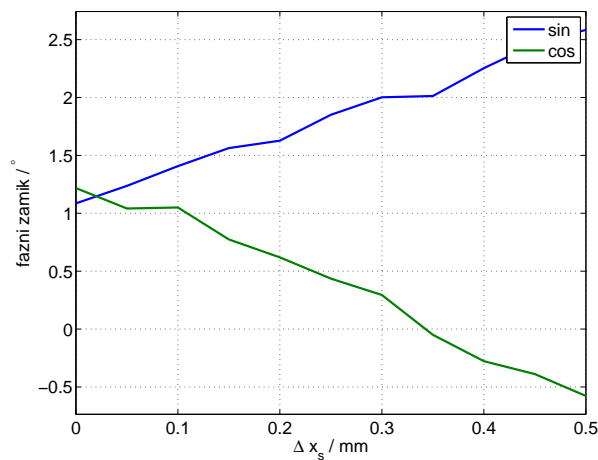
Poteke signalov  $\sin$  in  $\cos$ , ter poteke amplitud posameznih harmonikov napake, se aproksimira s kubičnimi polinomi.



Slika 9.9: Potek amplitude osnovnega harmonika  $\sin$  in  $\cos$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 9.10: Potek enosmerne komponente *sin* in *cos* pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 9.11: Fazni zamik osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x glede na izhodiščno lego

$$A_{sin} = -6,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 1,71 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 1,17 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^1 + 4,84 \cdot 10^{-4} \quad (9.1)$$

$$Off_{sin} = -3,88 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 + 2,37 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 2,25 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^1 - 9,53 \cdot 10^{-5} \quad (9.2)$$

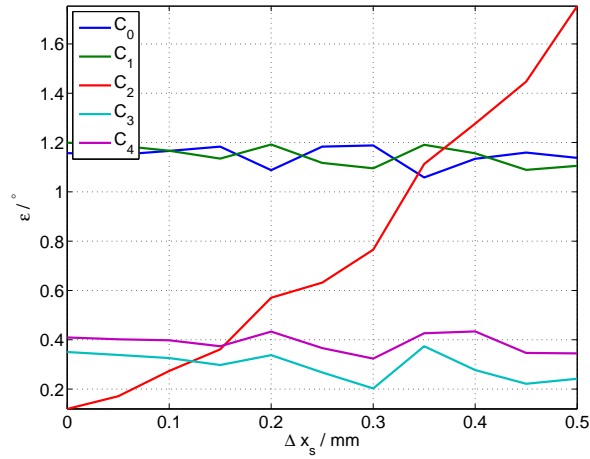
$$\delta_{sin} = +5,32 \Delta x_s^3 - 3,55 \cdot 10^0 \Delta x_s^2 + 3,49 \cdot 10^0 \Delta x_s^1 + 1,08 \cdot 10^0 \quad (9.3)$$

$$A_{cos} = +7,46 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^3 - 1,85 \cdot 10^{-1} \Delta x_s^2 + 1,01 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^1 + 4,88 \cdot 10^{-4} \quad (9.4)$$

$$Off_{cos} = +2,21 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^3 - 1,91 \cdot 10^{-2} \Delta x_s^2 - 3,91 \cdot 10^{-3} \Delta x_s^1 + 6,48 \cdot 10^{-5} \quad (9.5)$$

$$\delta_{cos} = +1,15 \cdot 10 \Delta x_s^3 - 1,06 \cdot 10^1 \Delta x_s^2 - 1,14 \Delta x_s^1 + 1,19 \quad (9.6)$$

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



Slika 9.12: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri x

$$C_0 = 2,42\Delta x_s^3 - 1,71\Delta x_s^2 + 2,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,15 \quad (9.7)$$

$$C_1 = -3,01\Delta x_s^3 + 2,35\Delta x_s^2 - 6,35 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,21 \quad (9.8)$$

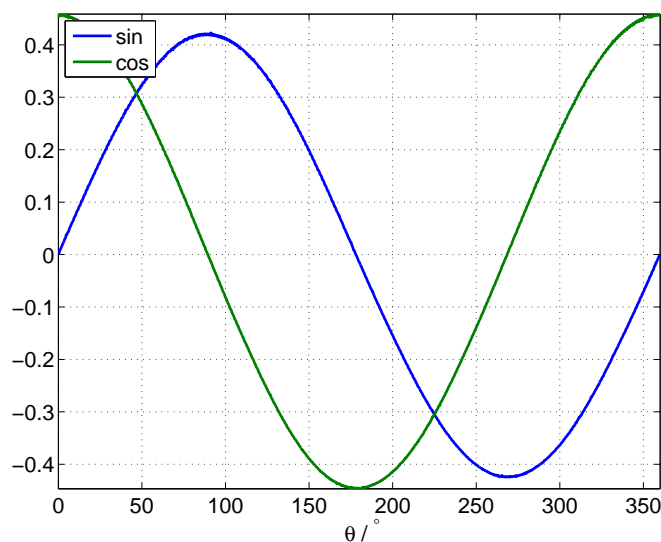
$$C_2 = -1,11\Delta x_s^3 + 5,06\Delta x_s^2 + 9,95 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 1,18 \cdot 10^{-1} \quad (9.9)$$

$$C_3 = -2,10\Delta x_s^3 + 1,61\Delta x_s^2 - 5,25 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 3,57 \cdot 10^{-1} \quad (9.10)$$

$$C_4 = -3,24\Delta x_s^3 + 2,29\Delta x_s^2 - 4,73 \cdot 10^{-1}\Delta x_s + 4,17 \cdot 10^{-1} \quad (9.11)$$

## 9.5 Meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi

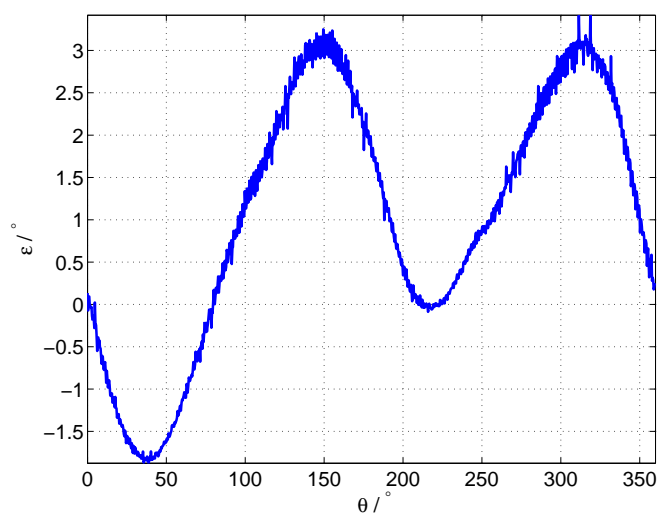
Senzor sem vrnil v izhodiščno lego in opravil meritve statične ekscentričnosti v smeri y-osi. Slika 9.13 prikazuje zajeta signala *sin* in *cos*. Amplituda *sin* se je zmanjšala, kot je bilo pričakovati po rezultatih simulacij. POsledično se izraazi v napaki višji drugi harmonik (slika 9.14). Z razvojem napake v Fourierovo vrsto se amplitude posameznih harmonikov lažje razberejo. Očitno je narasla amplituda drugega harmonika, enosmerna komponenta in ostali harmoniki so ohranili enake amplitude.



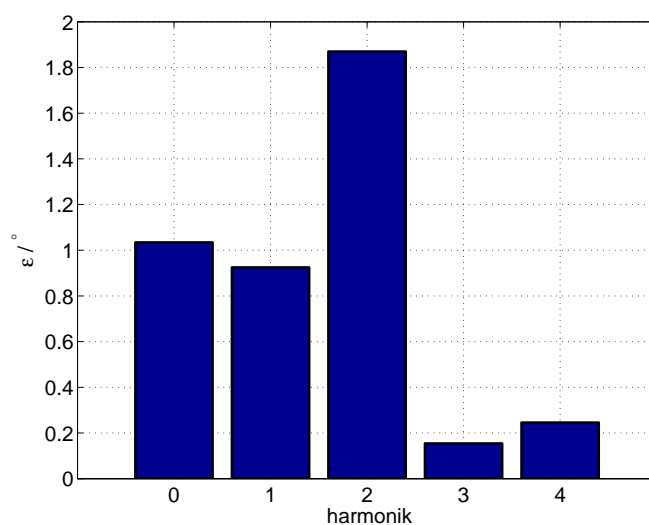
Slika 9.13: Signala *sin* in *cos* merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

### 9.5.1 Sprememba *sin*, *cos* ter napake od $\Delta y_s$

Slika 9.16 prikazuje potek amplitud osnovnega hamonika napake v odvisnosti statične ekscentričnosti v smeri y. S potekov se opazi padanje amplitud. Razlika med signaloma linearno narašča. Slika 9.17 prikazuje potek enosmernih komponent. Pri meritvi 0,15 mm se pojavi skok enosmernih komponent, vendar

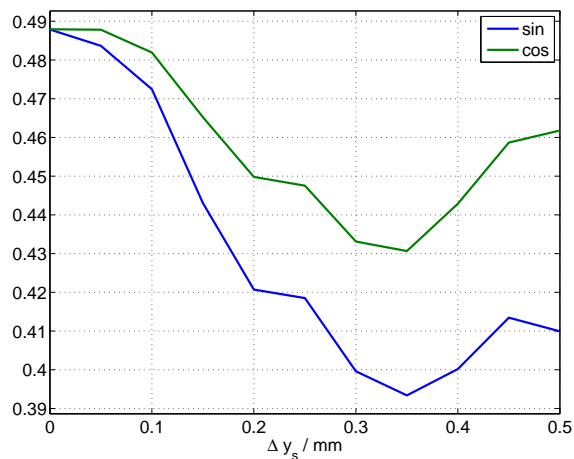


Slika 9.14: Napaka  $\varepsilon$  merjena pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

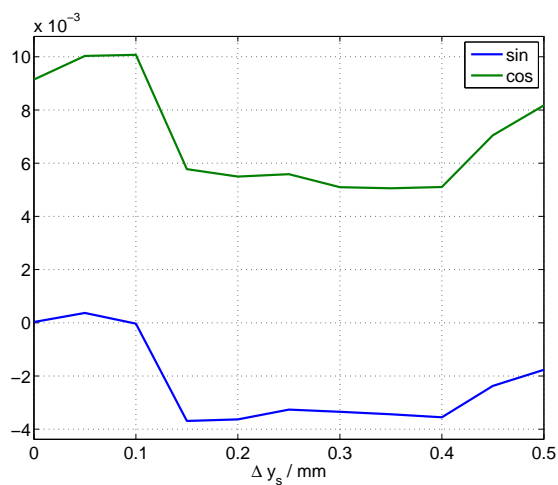


Slika 9.15: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

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. Vsota faznih zamikov *sin* in *cos* je kolikortoliko konstantna, zato ni sprememb v enosmerni komponenti.



Slika 9.16: Potek amplitude osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 9.17: Potek enosmerne komponente *sin* in *cos* pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y

$$A_{sin} = +1,73\Delta y_s^3 - 6,47 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 2,60 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^1 + 4,94 \cdot 10^{-1} \quad (9.12)$$

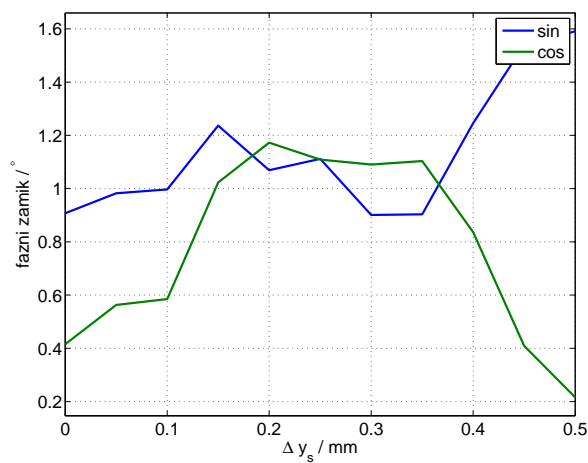
$$Off_{sin} = +4,69 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^3 + 1,32 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 - 2,29 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^1 + 7,08 \cdot 10^{-3} \quad (9.13)$$

$$\delta_{sin} = +3,37 \cdot 10\Delta y_s^3 - 2,12 \cdot 10^1\Delta y_s^2 + 3,81\Delta y_s^1 + 8,82 \cdot 10^{-1} \quad (9.14)$$

$$A_{cos} = +1,99\Delta y_s^3 - 9,29 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 7,82 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^1 + 4,91 \cdot 10^{-1} \quad (9.15)$$

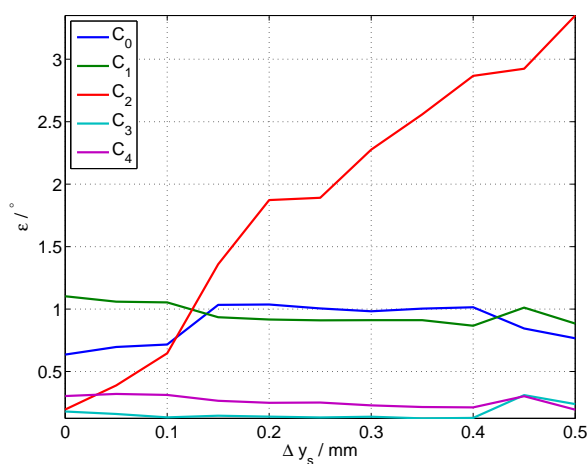
$$Off_{cos} = +1,87 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 - 7,92 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 - 9,87 \cdot 10^{-3}\Delta y_s^1 + 9,94 \cdot 10^{-3} \quad (9.16)$$

$$\delta_{cos} = -1,76 \cdot 10\Delta y_s^3 - 9,77 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 + 4,42\Delta y_s^1 + 3,59 \cdot 10^{-1} \quad (9.17)$$



Slika 9.18: Fazni zamik osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y glede na izhodiščno lego

Slika 9.19 prikazuje poteke amplitude posameznih harmonikov napake. Kot je bilo pričakovano se spreminja le amplituda drugega harmonika.



Slika 9.19: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  pri meritvah statične ekscentričnosti v smeri y

$$C_0 = -3,26\Delta y_s^3 - 3,10\Delta y_s^2 + 2,68\Delta y_s + 6,00 \cdot 10^{-1} \quad (9.18)$$

$$C_1 = -2,38\Delta y_s^3 + 3,50\Delta y_s^2 - 1,54\Delta y_s + 1,12 \quad (9.19)$$

$$C_2 = -4,15\Delta y_s^3 - 1,64\Delta y_s^2 + 8,22\Delta y_s + 8,04 \cdot 10^{-2} \quad (9.20)$$

$$C_3 = 2,30\Delta y_s^3 - 1,37 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^2 - 3,13 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 1,78 \cdot 10^{-1} \quad (9.21)$$

$$C_4 = 7,11 \cdot 10^{-1}\Delta y_s^3 - 7,96 \cdot 10^{-2}\Delta y_s^2 - 3,14 \cdot 10^{-1}\Delta y_s + 3,21 \cdot 10^{-1} \quad (9.22)$$

## 9.6 Meritve dinamične ekscentričnosti v smeri x-osi

Meritve dinamične ekscentričnosti sem lahko delal 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 *sin* in *cos*, ter poteke amplitud posameznega harmonika napke pri dinamični ekscentričnosti v smeri x in zarotiranem magnetu za  $32,4^\circ$  pri simulacijah z realnim magnetnim poljem. V enačbah je ekscentričnost označena z  $\Delta x_d$ , z zavedanjem, da je mišljen potek z zasukanim magnetom.

$$A_{sin} = +1,03\Delta x_d^3 - 5,83 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 3,77 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^1 + 3,99 \cdot 10 \quad (9.23)$$

$$Off_{sin} = +4,24 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^3 + 6,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 - 7,57\Delta x_d^1 + 1,29 \cdot 10^{-1} \quad (9.24)$$

$$\delta_{sin} = -4,59\Delta x_d^3 + 7,50 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 4,12 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^1 - 1,38 \cdot 10^{-1} \quad (9.25)$$

$$A_{cos} = +1,03\Delta x_d^3 - 5,83 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 3,77 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^1 + 3,99 \cdot 10 \quad (9.26)$$

$$Off_{cos} = +4,24 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^3 + 6,40 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 - 7,57\Delta x_d^1 + 1,29 \cdot 10^{-1} \quad (9.27)$$

$$\delta_{cos} = -4,59\Delta x_d^3 + 7,50 \cdot 10^0\Delta x_d^2 - 4,12 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^1 - 1,38 \cdot 10^{-1} \quad (9.28)$$



$$C_0 = -4,95\Delta x_d^3 + 6,52\Delta x_d^2 - 4,16 \cdot 10^{-1}\Delta x_d - 1,37 \cdot 10^{-1} \quad (9.29)$$

$$C_1 = -2,62\Delta x_d^3 + 2,78\Delta x_d^2 + 2,11 \cdot 10\Delta x_d - 2,89 \cdot 10^{-2} \quad (9.30)$$

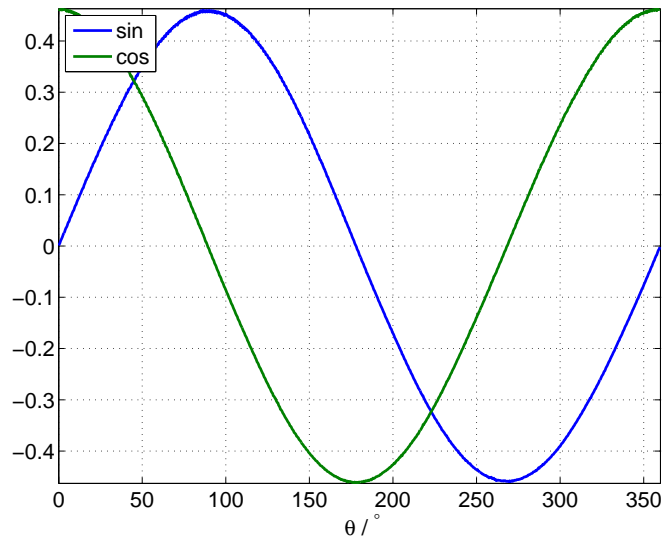
$$C_2 = 4,68 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^3 + 5,21 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 - 2,03 \cdot 10^{-2}\Delta x_d + 2,54 \cdot 10^{-3} \quad (9.31)$$

$$C_3 = -4,90 \cdot 10^{-2}\Delta x_d^3 + 8,11 \cdot 10^{-1}\Delta x_d^2 + 7,89\Delta x_d + 1,25 \cdot 10^{-1} \quad (9.32)$$

$$C_4 = 1,04 \cdot 10\Delta x_d^3 - 2,55\Delta x_d^2 - 2,82 \cdot 10^{-1}\Delta x_d + 2,96 \cdot 10^{-1} \quad (9.33)$$

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

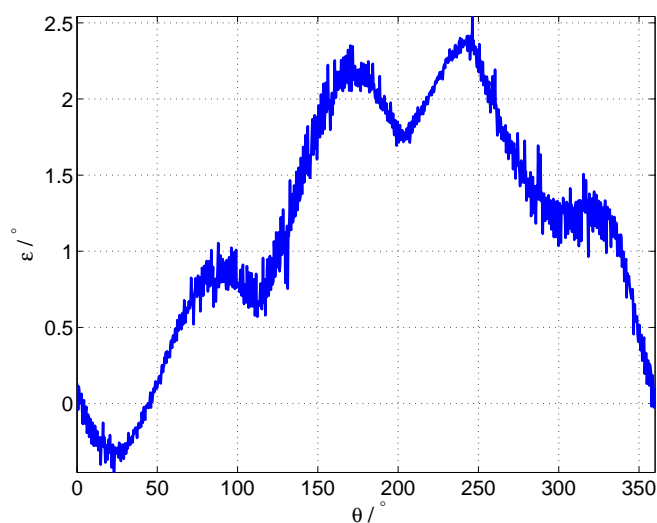
Pri dinamični ekscentričnosti v povzročeni smeri se signala *sin* in *cos* nista opazno spremenila (9.20). Sprememb ni niti na napaki (9.21). Spremembe niso opazne niti na napaki razviti v Fourierovo vrsto (??).



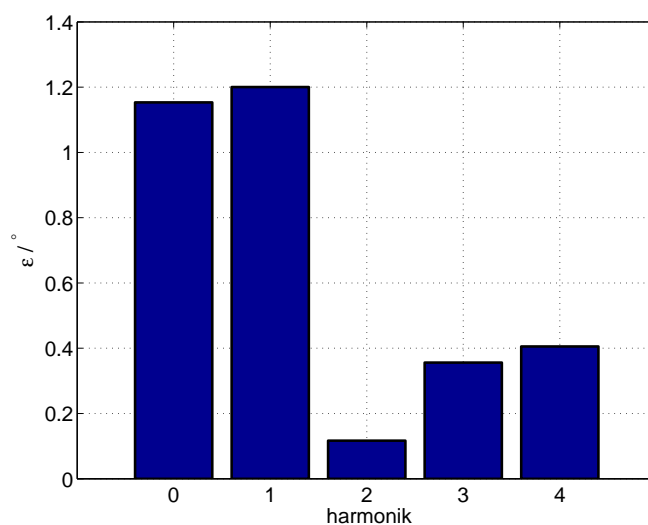
Slika 9.20: Signala *sin* in *cos* merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

### 9.6.1 Sprememba *sin*, *cos* ter napake od $\Delta x_d$

Potek spreminjanja amplitude osnovnega harmonika *sin* in *cos* glede na dinamično ekscentričnost pričakovano pada (Slika 9.23). Razlika med amplitudama



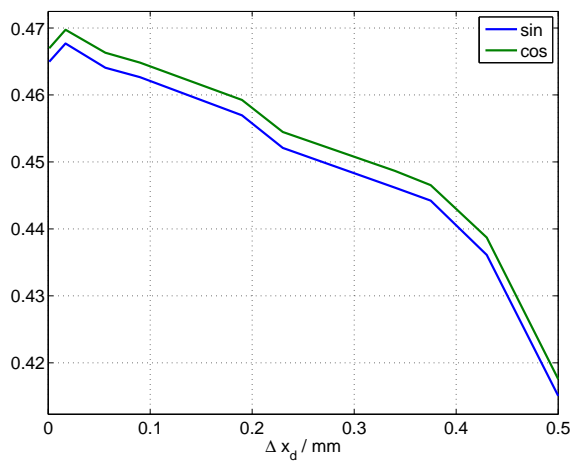
Slika 9.21: Napaka  $\varepsilon$  merjena pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



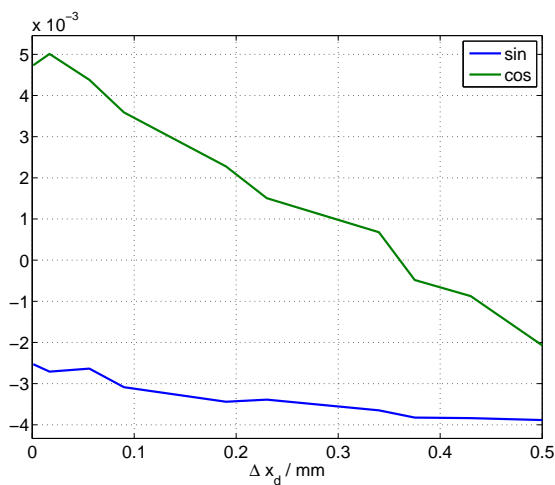
Slika 9.22: Amplitude harmonikov napake  $\varepsilon$  razvite v Fourierovo vrsto merjeno pri 0,19 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

ostaja tekom spreminjanja ekscentričnosti enaka. Enosmerni komponenti *sin* in *cos* padati, vendar vsaka s svojim gradientom. Sprememba enosmerne komponente je manjša, kot je bila predvidena v simulacijah. sprememba faznega zamika osnovnega harmonika *sin* in *cos* je prikazana na sliki 9.25. Fazna zamika s spre-

mebo dinamične ekscentričnosti naraščata. V simulacijah tako velika sprememba ni bila pričakovana.

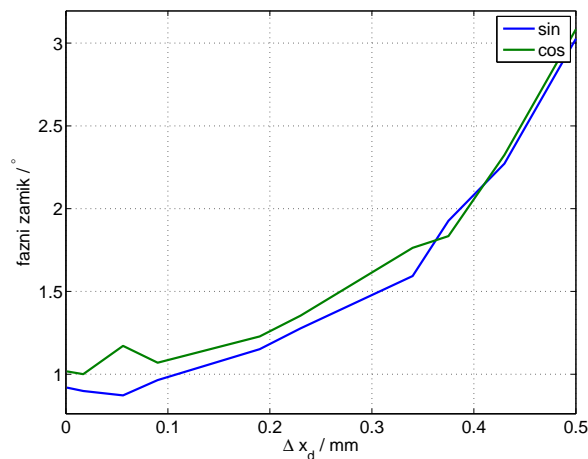


Slika 9.23: Potek amplitude osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 9.24: Potek enosmerne komponente *sin* in *cos* pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x

Poteke prikazane na slikah 9.23 9.24 in 9.25, se lahko aproksimira s kubičnimi



Slika 9.25: Fazni zamik osnovnega harmonika *sin* in *cos* pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x glede na izhodiščno lego

polinomi.

$$A_{sin} = -7,95 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 4,05 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 1,06 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^1 + 4,68 \cdot 10^{-1} \quad (9.34)$$

$$Off_{sin} = -3,42 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^3 + 7,48 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^2 - 5,61 \cdot 10^{-3} \Delta x_d^1 - 2,53 \cdot 10^{-3} \quad (9.35)$$

$$\delta_{sin} = +1,76 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 2,62 \Delta x_d^2 + 1,18 \cdot 10^0 \Delta x_d^1 + 8,78 \cdot 10^{-1} \quad (9.36)$$

$$A_{cos} = -7,90 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 4,00 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 1,04 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^1 + 4,70 \cdot 10^{-1} \quad (9.37)$$

$$Off_{cos} = -1,58 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^3 + 1,22 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^2 - 1,63 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^1 + 5,05 \cdot 10^{-3} \quad (9.38)$$

$$\delta_{cos} = +2,58 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 8,64 \Delta x_d^2 + 2,01 \cdot 10^0 \Delta x_d^1 + 1,00 \cdot 10^0 \quad (9.39)$$

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

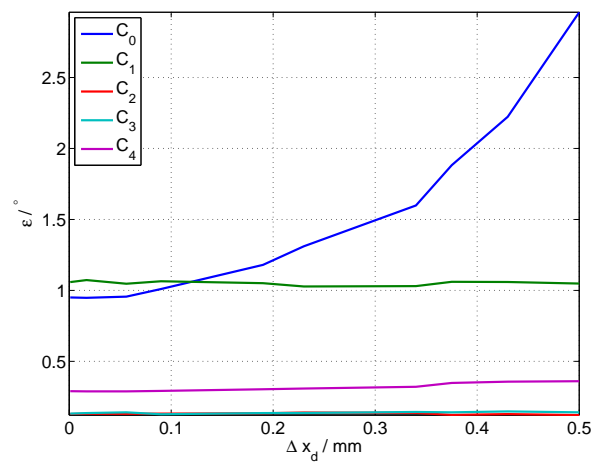
$$C_0 = 2,03 \cdot 10 \Delta x_d^3 - 5,17 \Delta x_d^2 + 1,57 \Delta x_d + 9,20 \cdot 10^{-1} \quad (9.40)$$

$$C_1 = -4,97 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 6,69 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 2,36 \cdot 10^{-1} \Delta x_d + 1,07 \quad (9.41)$$

$$C_2 = 3,14 \cdot 10^{-2} \Delta x_d^3 - 1,88 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 + 7,10 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 1,29 \cdot 10^{-1} \quad (9.42)$$

$$C_3 = -5,91 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 4,51 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 6,48 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 1,35 \cdot 10^{-1} \quad (9.43)$$

$$C_4 = -9,91 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^3 + 9,61 \cdot 10^{-1} \Delta x_d^2 - 8,81 \cdot 10^{-2} \Delta x_d + 2,91 \cdot 10^{-1} \quad (9.44)$$



Slika 9.26: Potek amplitud posameznega harmonika napake  $\varepsilon$  pri meritvah dinamične ekscentričnosti v smeri x



## 10 Sklep

### 10.1 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.

### 10.2 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 montiran senzor, se izrazi kot statična ekscetričnost. Hallova sonda v senzorju zajame magnetno polje s spremenjeno amplitudo in s spremenjenim faznim zamikom.

### 10.3 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.

### 10.4 Izvedba meritv

Delovnje senzorja nam je nepoznano (black-box). Senzor vrne izmerjena signala *sin* in *cos* iz katerih se s funkcijo *atan2* 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.

### 10.5 Komentar rezultatov

Zgradba in podrobnejše delovanje senzorja je poslovna skrivnost, 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 [10], omogočajo popravljanje enosmernih komponent in razmerij amplitud osnovnega harmonika signalov *sin* in *cos*. S kalibracijo senzorja bi bila napaka manjša.

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



## Literatura

- [1] S. Južnič, B. Markič in P. Južnič, *Diplomska naloga: napotki za izdelavo*. Ljubljana: Založba Amalietti & Amalietti, 1992.
- [2] T. Oetiker, H. Partl, I. Hyna in E. Schlegl, *Ne najkrajši uvod v LaTeX 2 $\epsilon$ , The not so short introduction to LaTeX 2 $\epsilon$* . Elektronska verzija dostopna na <http://www-lp.fmf.uni-lj.si/plestenjak/vaje/latex/lshort.pdf>, 2006. Bor Plestenjak, Slovenski prevod in priredba.
- [3] R. merilna tehnika d.o.o., “Am8192b – angular magnetic sensor chip.” Dosegljivo: <https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FData-sheet-AM8192B-chip.pdf>. [Dostopano: 28. 4. 2017].
- [4] MathWorks, “MathWorks Documentation matlab functions atan2d [Online].” Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2d.html>. [Dostopano: 27. 2. 2018].
- [5]
- [6] MathWorks, “MathWorks Documentation matlab functions atan2d [Online].” Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2d.html>. [Dostopano: 27. 2. 2018].
- [7] T. Oetiker, H. Partl, I. Hyna in E. Schlegl, *Ne najkraj uvod v LaTeX 2 $\epsilon$ , The not so short introduction to LaTeX 2 $\epsilon$* . Elektronska verzija dostopna na

- 
- <http://www-lp.fmf.uni-lj.si/plestenjak/vaje/latex/lshort.pdf>, 2006. Bor Plestenjak, Slovenski prevod in priredba.
- [8] MathWorks, “MathWorks Documentation matlab functions atan2d [Online].” Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2d.html>. [Dostopano: 27. 2. 2018].
- [9] R. merilna tehnika d.o.o., “Am8192b – angular magnetic sensor chip.” Dosegljivo: <https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FData-sheet-AM8192B-chip.pdf>. [Dostopano: 28. 4. 2017].
- [10] R. merilna tehnika d.o.o., “Am8192b – angular magnetic sensor chip.” Dosegljivo: <https://www.rls.si/en/fileuploader/download/download/?d=0&file=custom%2Fupload%2FData-sheet-AM8192B-chip.pdf>. [Dostopano: 28. 4. 2017].