

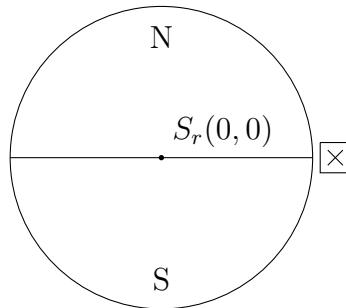
1 Analitična izpeljava vplivov dinamične in statične ekscentričnosti

V tem poglavju bom analitično prikazal vpliv napak omenjenih ekscentričnosti, ki se pojavita zaradi neprimerne vgradnje te vrste enkoderja. Napaki različno vplivati na izhode senzorja, zato ju lahko obravnamvam posamično. Preko analitične izpeljave bomo spoznali kako se spreminja lokacija Hall-ove sonde glede na magnet ob pravilni montaži. Z vpeljavo dodane ekscentričnosti v model bomo videli, kako se trajektorija gibanja Hall-ove sonde glede na magnet spremeni. S poznavanjem lokacije Hall-ove sonde nad magnetom bomo lahko odčitali vrednost B_z .

1.1 Definicija koordinatnih sistemov

Definirajmo kartezični koordinatni sistem, ki ima v izhodišcu postavljen radialno magnetiziran magnet. Na poljubno točko $S_{h0}(x_0, y_0)$, vendar ne v izhodišče postavimo Hall-ovo sondo. Na sliki 1.1 je prikazan tak sistem. Hall-ova sonda je postavljena na abcisno os za lažje razumevanje. Vrednost y_0 je lahko poljubna in končna rešitev izpeljave bo splošna za poljubno lokacijo Hall-ove sonde v začetni legi.

Z rotacijo magneta za kot θ , se lokacija Hall-ove sonde glede na magnet spremeni. Nova lokacija Hall-ove sonde glede na magnet je enaka, kot če namesto magnet, zaročiramo Hall-ovo sondo za kot $-\theta$. Novo lokacijo Hall-ove sonde



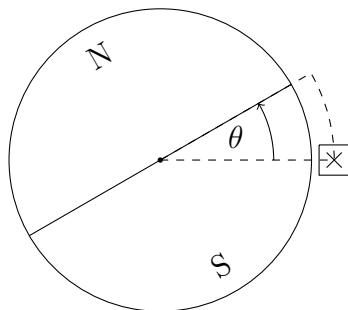
Slika 1.1: Definicija koordinatnega sistema z magnetom in Hall-ovo sondou

glede na magnet lahko zapišemo z rotacijsko matriko.

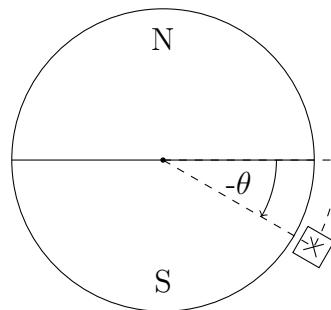
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Argument rotacijske matrike je $-\theta$, pri čemer vemo, da smo namesto magneta zaročirali Hall-ovo sondou v nasprotno smer. Z upoštevanjem lihosti funkcije sinus in sodosti funkcije kosinus, se enačba 1.1 poenostavi v:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$



(a) Zasukan magnet za kot θ

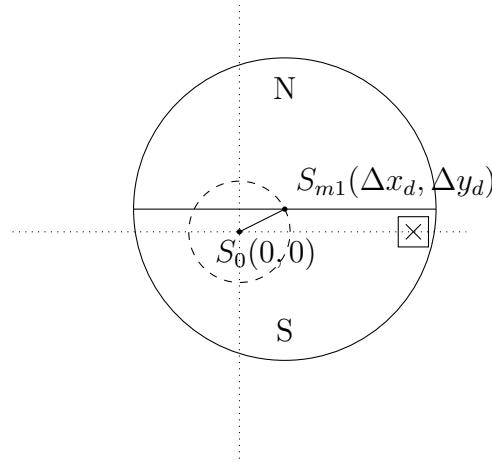


(b) Zasukan senzor za kot $-\theta$

Slika 1.2: Sprememba lokacije glede na magnet ob rotaciji

1.2 Izpeljava gibanja lokacije Hall-ove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti

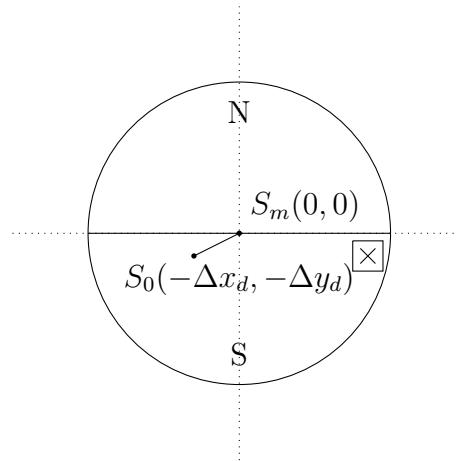
Opazujmo sedaj sistem gibanja Hall-ove sonde glede na magnet ter dinamično ekscentričnost. Magnet je postavljen v izhodišče koordinatnega sistema $S_m(0, 0)$. Sedaj magnet izmaknemo v novo lego $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$ (Slika 1.3). Os vrtenja je še vedno postavljena v izhodišče koordinatnega sistema. Središce magneta $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$ tako tekom vrtenja okoli koordinatnega izhodišča opiše krožnico z radijem $\sqrt{\Delta x_d^2 + \Delta y_d^2}$. V sistem sedaj dodajmo Hall-ovo sondo v njeno začetno lego glede na izhodišče $S_{h0}(x_0, y_0)$.



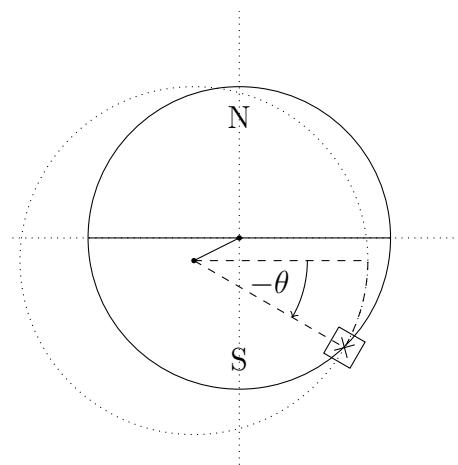
Slika 1.3: Shema definicije dinamične ekscentričnosti vpliva na magnet

Enako gibanje Hall-ove sonde na magnet lahko dosežemo tudi z obrnjenim sistemom. Vrnimo magnet v izhodiščno lego $S_m(0, 0)$. Sedaj postavimo os vrtenja magneta v točko $(-\Delta x_d, -\Delta y_d)$. Hall-ovo sondo postavimo v točko $S_{h1}(x_0 - \Delta x_d, y_0 - \Delta y_d)$.

Sistema prikazana na slikah 1.3 in 1.4, se v začetnih legah ne razlikujeta. Sedaj zarotirajmo Hall-ovo sondu okoli osi vrtenja $S_0(-\Delta x_d, -\Delta y_d)$. Hall-ova sonda se giblje glede na magnet enako, kot če bi magnet zavrteli z dinamično ekscentričnostjo (Slika 1.3). Gibanje Hall-ove sonde na magnet je izraženo kot gibanje po krožnici s središčem v točki $(-\Delta x_d, -\Delta y_d)$.



Slika 1.4: Shema definicije dinamične ekscentričnosti vpliva na Hall-ovo sondu



Slika 1.5: Potek Hall-ove sonde ob rotaciji glede na magnet ob dinamični ekscentričnosti

Potek Hall-ove sonde ob rotaciji z upoštevanjem dinamične ekscentričnosti lahko zapišemo kot (1.2) z dodatkom enosmerne komponente dinamične ekscentričnosti.

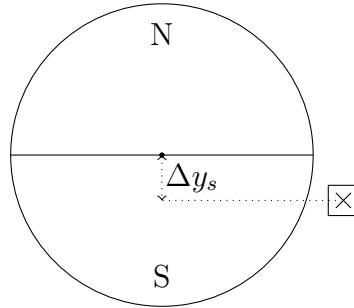
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Delta x_d \\ -\Delta y_d \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

V (1.3) lahko izrazimo - in izraz se poenostavi.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

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

Postavimo sistem nazaj v izhodišno lego, brez ekscentričnosti. Tako sred Ľ Ä ce magneta, kot os vrtenja postavimo v izhodišče. Hall-ova sonda je postavljena v točko $S_{h0}(x_0, y_0)$. Sedaj premaknimo Hall-ovo sondu za $(\Delta x_s, \Delta y_s)$, v novo točko $S_{h1}(x_0 + \Delta x_s, y_0 + \Delta y_s)$. Na sliki 1.6 je prikazana le statična ekscentričnost v y-osi, vendar celotni razmislek velja za obe statični ekscentričnosti enako.

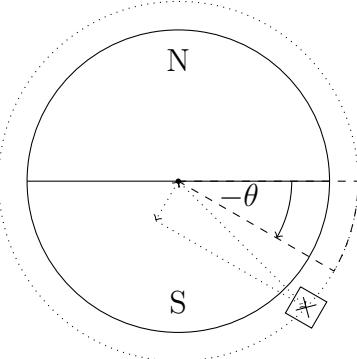


Slika 1.6: Shema definicije statične ekscentričnosti

Po enakem razmišljanju kot v zgornjih poglavjih, sedaj zarotirajmo Hall-ovo sondu za kot $-\theta$ okoli izhodišča. Hall-ova sonda se giblje po krožnici z radijem $\sqrt{(x_0 + \Delta x_s)^2 + (y_0 + \Delta y_s)^2}$.

To lahko zapišemo v izraz (1.2) kot:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x_s \\ y_0 + \Delta y_s \end{bmatrix} \quad (1.5)$$



Slika 1.7: Potek Hall-ove sonde ob rotaciji glede na magnet ob statični ekscentričnosti

1.4 Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde

Do sedaj smo postopoma izpeljali enačbe za:

- sistem magneta in Hall-ove sonde ob pravilni montaži
- sistem magneta in Hall-ove sonde z dinamično ekscentričnostjo magneta
- sistem magneta in Hall-ove sonde s statično ekscentričnostjo Hall-ove sonde

Enačbi sistema z ekscentričnostjo sti med seboj neodvisni zato lahko enačbe sistemov združimo. Uporabimo princip superpozicije in dobimo končno enačbo za lociranje Hall-ove sonde glede na magnet v odvisnosti od zasuka magneta, z upoštevanjem vpliva tako dinamične kot statične ekscentričnosti. Končna enačba se glasi:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x_s \\ y_0 + \Delta y_s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Ogledali smo si, kako je ob rotaciji locirana Hall-ova sonda glede na magnet. Ogledali smo si tudi, kako na lokacijo sonde vplivati dinamična in statična ekscentričnost. S poznavanjem magnetnega polja $B_z = B_z(x, y)$, lahko določimo kakšno vrednost polja B_z pomeri Hall-ova sonda ob rotaciji ($B_z = B_z(\theta)$). Ob

poznavanju polja B_z , lahko določimo zasuk magneta glede na postavitev Hallove sonde.

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

V tem poglavju si bomo ogledali kakšno magnetno polje pomeri Hall-ova sonda. Ogledali si bomo magnet, ter kako senzor RM44 meri magnetno polje. Preko pomirjenega polja, bomo izračunali kakšna je napake pomerjenega kota od referenčnega in kako se napaka spreminja z ekscentričnostjo.

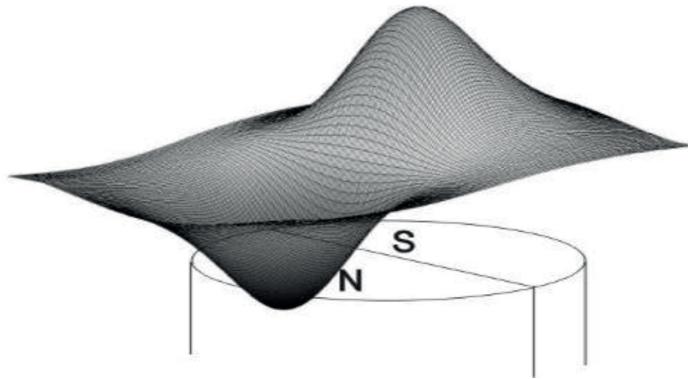
2.1 Definicija gostote magnetnega polja B_z

Predlagan magnet s strani proizvajalca senzorja je radialno magnetiziran s premerom 4 mm. Dajalnik pozicije RM44 meri Z-komponento gostote magnetnega polja, zato se lahko osredotočimo le nanjo citeAM8192. Potek komponente B_z nad cilindričnim magnetom je prikazan na sliki 2.1.

Potek z-komponente lahko izračunamo po Biot-Savartovim zakonom oz. numerično seštejemo prispevke posameznih delčkov magneta. Tako dobimo vrednost celotnega vektorja gostote magnetnega polja v posamezni točki. Magnetno polje z komponente v okolini osi vrtenja magneta lahko aproksimiramo z ravnino

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

Takšna aproksimacija zadostuje za ocenitev poteka napake. S poznavanjem lokacije Hall-ove sonde, kar smo si ogledali v prejšnjem poglavju, sedaj dobimo potek pomerjene komponente gostote magnetnega polja. Aproksimirano polje je



Slika 2.1: z-komponenta vektorja gostote magnetnega polja nad cilindričnim magnetom citeAM8192

linearno odvisno od x komponente. Za lažje razumevanje definirajmo konstanto k enako 1.

2.2 Postavitev Hall-ovih sond za zajem polja in pomerenje polje v odvisnosti od ekscentričnosti

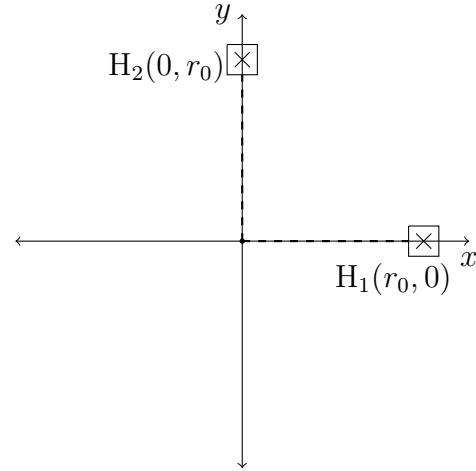
Za izračun kota potrebujem poznati polje v vsaj dveh točkah nad magnetom. Da si enačbe olajšamo postavimo 2 Hall-ovi sondi na koordinatni osi, oddaljeni od izhodišča za r_0 .

S poznavanjem lociranja sonde glede na magnet (1.6), funkcije polja (2.1) ter začetne pozicije Hall-ovih sond lahko določimo potek polja sonde.

$$\cos = B_{H_1}(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d \quad (2.2)$$

$$\sin = B_{H_2}(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = r_0 \sin \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d \quad (2.3)$$

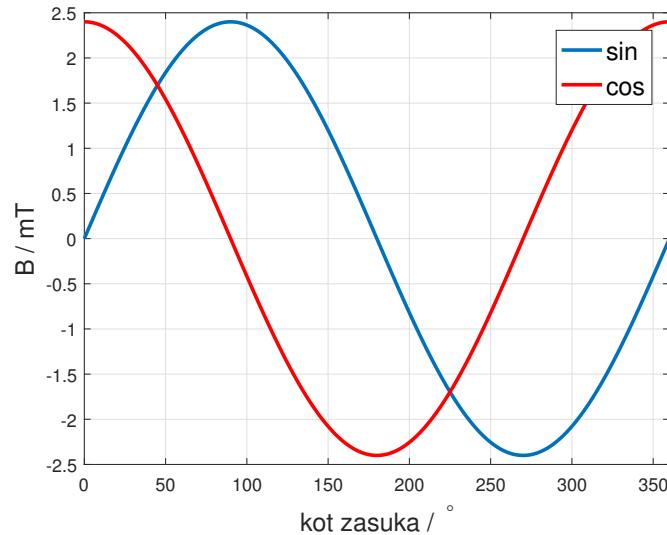
Zajeta signala bom od tu naprej imenoval sinus (\sin) in cosinu (\cos), ker to je njuna osnovna oblika.



Slika 2.2: Začetna postavitev Hallovih sond

2.2.1 Sprememba magnetnega polja zaradi ekscentričnosti

Oglejmo si primer kakšno polje zajameti Hall-ovi sondi, ko ekscentričnosti ni. \sin in \cos izraza se poenostavita in dobimo poteka v obliki sinusa ter kosinusa z enako amplitudo r_0 (Slika 2.3).



Slika 2.3: Poteka \sin in \cos brez ekscentričnosti

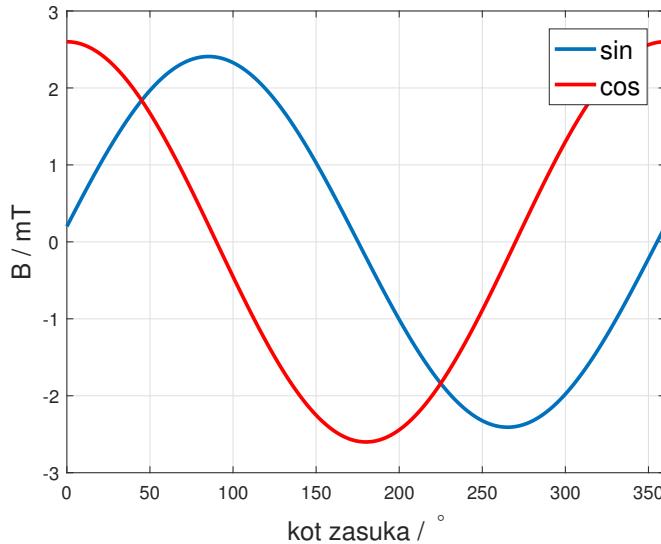
Upoštevajmo sedaj le statični ekscentričnosti Δx_s in Δy_s . Δx_d postavimo na

0. Enačbi (2.2) in (2.3) lahko preuredimo v izraza:

$$\cos(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s) = \sqrt{(r_0 + \Delta x_s)^2 + \Delta y_s^2} \cos(\theta - \arctan \frac{\Delta y_s}{r_0 + \Delta x_s}) \quad (2.4)$$

$$\sin(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s) = \sqrt{\Delta x_s^2 + (r_0 + \Delta y_s)^2} \cos(\theta - 90 + \arctan \frac{\Delta x_s}{r_0 + \Delta y_s}) \quad (2.5)$$

Iz njiju vidimo spremenjena poteka. Signaloma se je spremenila amplituda in fazni zamik (Slika 3.2).



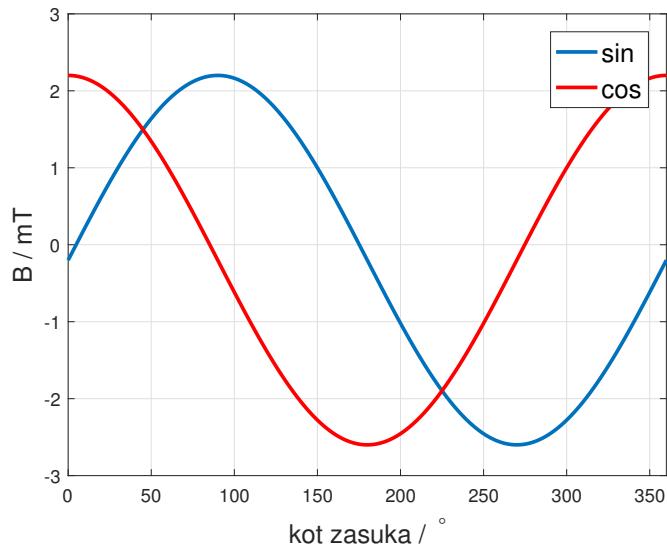
Slika 2.4: Poteka \sin in \cos z upoštevanjem 0,2 mm statični ekscentričnosti v x-osi

Postavimo sedaj vrednosti Δx_s in Δy_s na 0, Δx_d predpostavimo da ni 0.

$$\cos(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = r_0 \cos \theta - \Delta x_d \quad (2.6)$$

$$\sin(\theta, r_0, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = r_0 \sin \theta - \Delta x_d \quad (2.7)$$

Polji obdržita enako amplitudo ter fazo, vendar dobita enosmerno komponento (Slika 3.10).



Slika 2.5: Poteka \sin in \cos z upoštevanjem 0,2 mm dinamične ekscentričnosti v x-osi

2.3 Premik senzorja po v z smeri

Oglejmo si še kako vpliva sprememba premikanja senzorja v z smeri. Pri magnetnem polju aproksimiranem z ravnino (3.1), se gostota magnetnega polja pri obeh sondah spreminja enako. To se v enačbah odraža le kot dodaten faktor. Upoštevajmo spremembo polja zaradi premika senzorja po z osi. Zajeti polji imata naslednji potek:

$$\cos = k_z(r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d) \quad (2.8)$$

$$\sin = k_z(r_0 \sin \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d) \quad (2.9)$$

Z vstavitvijo formul v arctan se faktor k_z nahaj tako v števcu kot imenovalcu ter se lahko okrajša. Naj še enkrat poudarim, da to velja le za polje aproksimirano z ravnino.

2.4 Analitičen potek napake posamezne ekscentričnosti

S poznanjem potekov polja posamezne sonde sedaj s funkcijo arctan izračunamo kot.

$$\varphi(\theta, \Delta x_s, \Delta y_s, \Delta x_d) = \arctan \frac{B_y}{B_x} = \arctan \frac{r_0 \sin \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d}{r_0 \cos \theta + \Delta x_s \cos \theta + \Delta y_s \sin \theta - \Delta x_d} \quad (2.10)$$

Iz podanega izraza (2.10) je težko sklepati, kakšen bo potek pomerjenega kota. Na tem mestu definirajmo napako merjenega kota:

$$\varepsilon = \varphi - \theta \quad (2.11)$$

Poglejmo si analitičen potek napake. S spodaj opisanim postopkom se bomo izognili numeričnemu računanju funkcije arctan.

Signalna \sin in \cos imata periodo 360° . Iz tega sledi, da bo tudi ε imel periodo 360° . Pričakujem, da bo potek napake ε v obliki :

$$\varepsilon = A_0 + A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta + A_2 \cos 2\theta + B_2 \sin 2\theta \quad (2.12)$$

Tak nastavek sem vzel zaradi predvidene napake v podatkovnih listih citeAM8192. Za približek napake izraz (2.10) razvijmo v Taylorjevo vrsto po kotu θ . V Taylorjevo vrsto razvijemo tudi nastavek pričakovanega poteka. Zaradi aproksimacije poteka merjenega kota se zadovoljimo z razvojem do petega reda. Za poenostavitev se bom ekscentričnosti lotil posamezno. V naslednjih podoglavljih bom prikazal analitične rezultate posameznega harmonika. Izpeljavo bom le teoretično opisal.

Oba izraza (2.10 in 2.12) razvijem do petega reda Taylorjeve vrste po kotu θ . Z združitvijo posameznih potenc θ , pridobimo sistem petih enčb s petimi neznankami. S tem pridobim neznane faktorje A_0, A_1, A_2, B_1 in B_2 . S poznanjem teh faktorjev lahko ocenimo kaškni bodo poteki posameznih harmonikov, ob posameznih ekscentričnostih. Te rezultate Taylorjeve vrste lahko upoštevam le v okolici

ničle. Izrazi so izpeljani za statični ekscentričnosti ter dinamično ekscentričnost v smeri x. Potekov dinamične ekscentričnosti v smeri y ni, saj ta ne nastopa v izrazu (2.10).

2.4.1 Aproksimacija pomerjenega kota ob statični ekscentričnosti x

V izrazu (2.10) upoštevamo le statično ekscentričnost Δx_s .

$$\varphi = \arctan \frac{r_0 \sin \theta + \Delta x_s \cos \theta}{r_0 \cos \theta + \Delta x_s \sin \theta} \quad (2.13)$$

Z aproksimacijo po izrazu (2.12) pridobimo koeficiente posameznega harmonika

$$A_0 = \frac{-90r_0^2 \Delta y_s (r_0^5 + 29r_0^4 \Delta y_s + 132r_0^3 \Delta y_s^2 + 208r_0^2 \Delta y_s^3 + 156r_0 \Delta y_s^4 + 52\Delta y_s^5)}{\pi(r_0^2 + 2r_0 \Delta y_s + 2\Delta y_s^2)^4} + \arctan \frac{\Delta y_s}{r_0 + \Delta y_s} \quad (2.14)$$

$$A_1 = \frac{2280r_0^2 \Delta y_s^2 (r_0^4 + 5r_0^3 \Delta y_s + 8r_0^2 \Delta y_s^2 + 6r_0 \Delta y_s^3 + 2\Delta y_s^4)}{\pi(r_0^2 + 2r_0 \Delta y_s + 2\Delta y_s^2)^4} \quad (2.15)$$

$$B_1 = -\frac{240\Delta y_s^3 (7r_0^3 + 18r_0^2 \Delta y_s + 18r_0 \Delta y_s^2 + 18r_0 \Delta y_s^3 + 8\Delta y_s^4)}{\pi(r_0^2 + 2r_0 \Delta y_s + 2\Delta y_s^2)^3} \quad (2.16)$$

$$A_2 = \frac{90r_0^2 \Delta y_s (r_0^5 - 3r_0^4 \Delta y_s - 28r_0^3 \Delta y_s^2 - 48r_0^2 \Delta y_s^3 - 36r_0 \Delta y_s^4 - 12\Delta y_s^5)}{\pi(r_0^2 + 2r_0 \Delta y_s + 2\Delta y_s^2)^4} \quad (2.17)$$

$$B_2 = \frac{30\Delta y_s (-3r_0^5 - 18r_0^4 \Delta y_s - 20r_0^3 \Delta y_s^2 + 12r_0 \Delta y_s^4 + 8\Delta y_s^5)}{\pi(r_0^2 + 2r_0 \Delta y_s + 2\Delta y_s^2)^3} \quad (2.18)$$

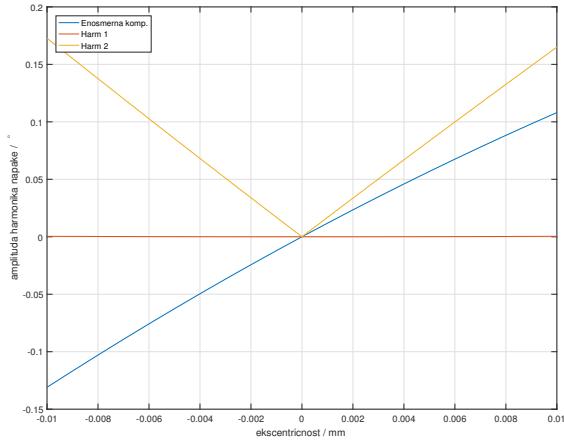
$$(2.19)$$

Oglejmo si sliko potekov posameznih harmonikov. Iz rezultatov lahko pričakujemo naraščanje drugega harmonika ter naraščanje enosmerne komponente.

2.4.2 Aproksimacija pomerjenega kota ob statični ekscentričnosti y

V izrazu (2.10) upoštevamo le statično ekscentričnost Δy_s .

$$\varphi = \arctan \frac{r_0 \sin \theta + \Delta y_s \sin \theta}{r_0 \cos \theta + \Delta y_s \cos \theta} \quad (2.20)$$



Slika 2.6: Potek amplitud prvega in drugega harmonika ter enosmerne komponente ob sprememjanju statične ekscentričnosti v x-osi

Z aproksimacijo po izrazu (2.12) pridobimo koeficiente posameznega harmonika

$$A_0 = \frac{-90y_s(r_0^2 - 23r_0y_s - 24y_s^2)}{\pi r_0^3} \quad (2.21)$$

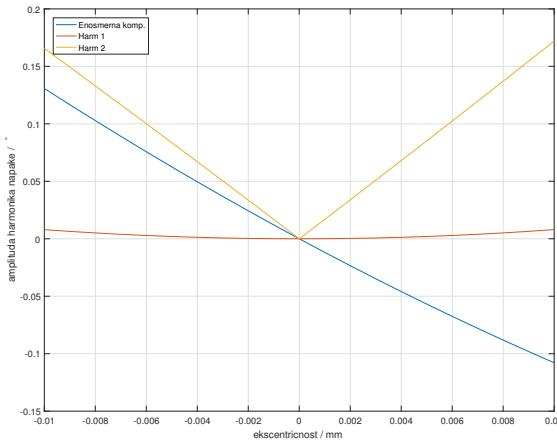
$$A_1 = \frac{-1690y_s^2(r_0 + y_s)}{\pi r_0^3} \quad (2.22)$$

$$A_2 = \frac{90y_s(r_0^2 + 9r_0y_s + 8y_s^2)}{\pi r_0^3} \quad (2.23)$$

$$B_1 = \frac{240y_s^3}{\pi r_0^3} \quad (2.24)$$

$$B_2 = \frac{30(3r_0^2y_s - 4y_s^3)}{\pi r_0^3} \quad (2.25)$$

Oglejmo si sliko potekov posameznih harmonikov. Iz grafa je razvidno, da doenosmerna komponenta upadala, drugi harmonik bo najbolj izrazit.



Slika 2.7: Potek amplitud prvega in drugega harmonika ter enosmerne komponente ob spremjanju statične ekscentričnosti v y-osi

2.4.3 Aproksimacija pomerjenega kota ob dinamični ekscentričnosti \mathbf{x}

Izraz (2.10) kjer upoštevamo le dinamično ekscentričnost se poenostavi v:

$$A_0 = \frac{180(r_0 \Delta x_d(r_0^6 - 7r_0^5 \Delta x_d + 18r_0^4 \Delta x_d^2 - 36r_0^2 \Delta x_d^4 + 28r_0 \Delta x_d^5 - 8\Delta x_d^6))}{\pi(r_0^2 - 2r_0 \Delta x_d + 2\Delta x_d^2)^4} - \arctan \frac{\Delta x_d}{r_0 - \Delta x_d} \quad (2.26)$$

$$A_1 = \frac{-180(r_0 \Delta x_d(r_0^6 - 8r_0^5 \Delta x_d + 22r_0^4 \Delta x_d^2 - 44r_0^2 \Delta x_d^4 + 32r_0 \Delta x_d^5 - 8\Delta x_d^6))}{\pi(r_0^2 - 2r_0 \Delta x_d + 2\Delta x_d^2)^4} \quad (2.27)$$

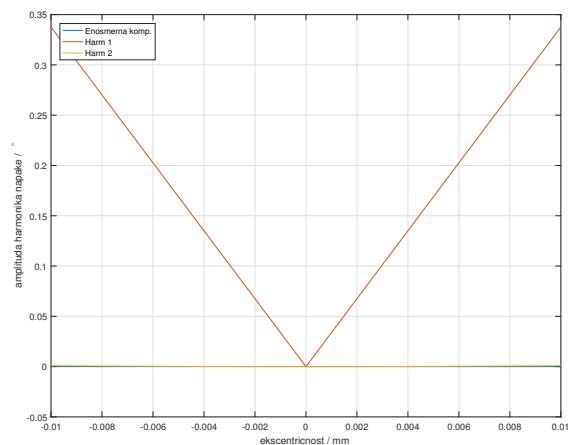
$$A_2 = \frac{-180(r_0^2 \Delta x_d^2(r_0^4 - 4r_0^3 \Delta x_d + 8r_0 \Delta x_d^3 - 4\Delta x_d^4))}{\pi(r_0^2 - 2r_0 \Delta x_d + 2\Delta x_d^2)^4} \quad (2.28)$$

$$B_1 = \frac{60(\Delta x_d(3r_0^5 - 18r_0^4 \Delta x_d + 64r_0^3 \Delta x_d^2 - 108r_0^2 \Delta x_d^3 + 84r_0 \Delta x_d^4 - 32\Delta x_d^5))}{\pi(r_0^2 - 2r_0 \Delta x_d + 2\Delta x_d^2)^3} \quad (2.29)$$

$$B_2 = \frac{60(2\Delta x_d^3(-4r_0^3 + 9r_0^2 \Delta x_d - 6r_0 \Delta x_d^2 + 2\Delta x_d^3))}{\pi(r_0^2 - 2r_0 \Delta x_d + 2\Delta x_d^2)^3} \quad (2.30)$$

Slike 2.8 vidimo da bo izrazit le prvi harmonik, ki pri majhnih odmikih narašča linearno, kar je pričakovano po citeAM8192.

V tem poglavju smo si ogledali kakšno magnetno polje ustvari magnet in kako ga Hall-ove sonde zaznavajo. Magnetno polje smo aproksimirali z ravnino in si ogledali poteke napake. Spoznali smo tudi kako se bo izražala napaka pri posamezni ekscentričnosti.



Slika 2.8: Poteki amplitud prvega in drugega harmonika ter enosmerne komponente ob spremjanju dinamične ekscentričnosti v x-osi

3 Linearni model

V prejšnjem poglavju smo magnetno polje magneta aproksimirali z ravnino ter napako izračunali analitično. V tem poglavju bom predstavil simulacije opravljene na magnetnem polju aproksimiranega z ravnino, izračunan kot φ je rezultat numerične funkcije atan2d(y,x) citeatan2d. Predstavil bom napako, jo razstavil na posamezne harmonike, ter prikazal spremenjanje amplitud glede na spremembo ekscentričnosti. Ravnina aproksimiranega magnetnega polja je:

$$B(x, y) = y \quad (3.1)$$

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

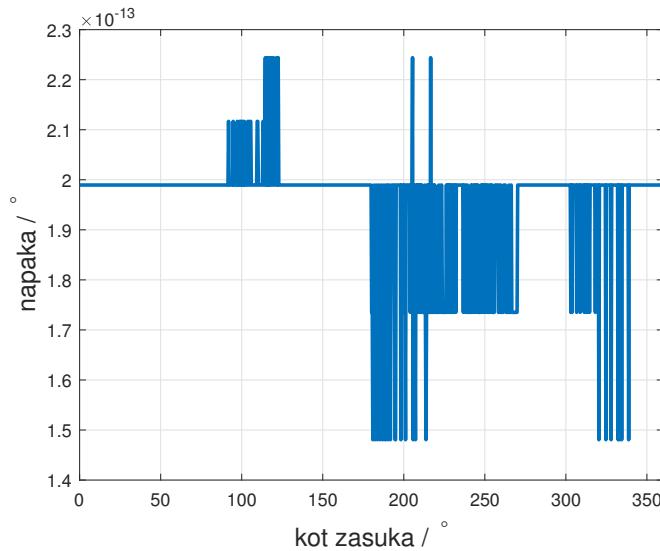
3.1 Brez napake

Za začetek si poglejmo idealno montriran tako senzor kot magnet. Signala \sin in \cos imata enaki amplitudi in sta fazno zamaknjena za 90° . Napaka ε , ki se pojavi pri izračunu je tako le numerična napaka funkcije atan2d (Slika 3.1).

Numerično napako lahko na pričakovano napako zaradi ekscentričnosti zanemarim.

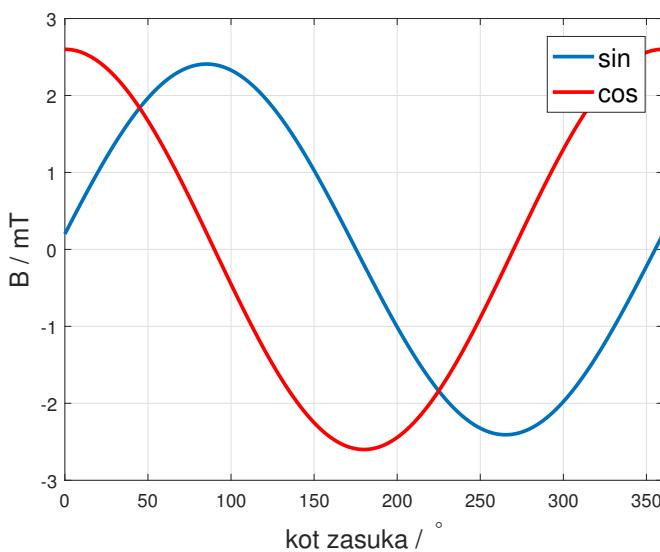
3.2 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri x-osi

Oglejmo si rezultate simulacij statične ekscentričnosti v smeri x. Po pričakovanih se bo povišala amplituda \sin in \cos signala ter zmanjšal njun fazni zamik (izraza



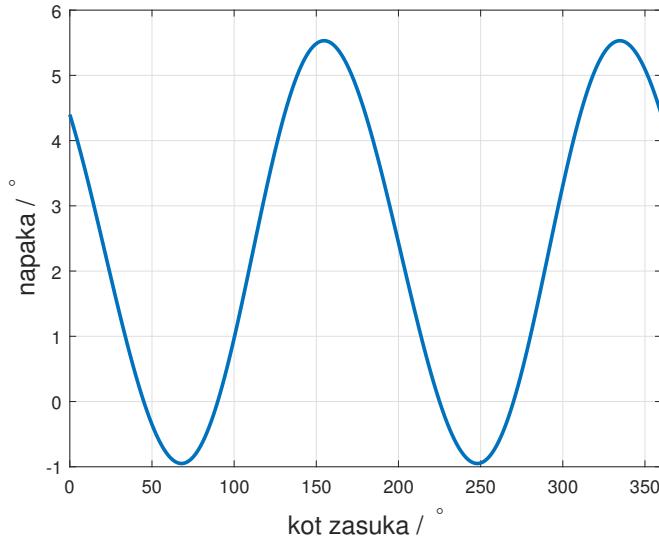
Slika 3.1: Napaka ε pri simulacijah z linearnim magnetnim poljem pri idealni montaži

(2.4) in 2.5).



Slika 3.2: Signala \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

Napaka ε je prikazana na sliki 3.3.



Slika 3.3: Napaka ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

Napako razvijmo v Fourierovo vrsto in pridobimo amplitude posameznih harmonikov napake (Slika 3.4).

Po pričakovanjih najbolj izstopata enosmerna komponenta (harmonik 0) in drugi harmonik. Na sliki 3.5 vidimo odvisnost amplitud od spremnjanja ekscentričnosti.

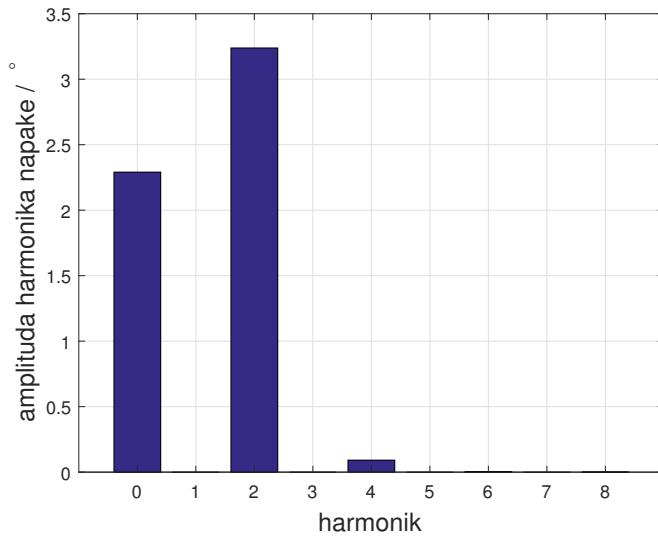
Poteke s slike 3.5 predstavimo s polinomom druge stopnje.

$$A_0 = 11,94\Delta x_s^2 - 2,48\Delta x_s + 0,34 \quad (3.2)$$

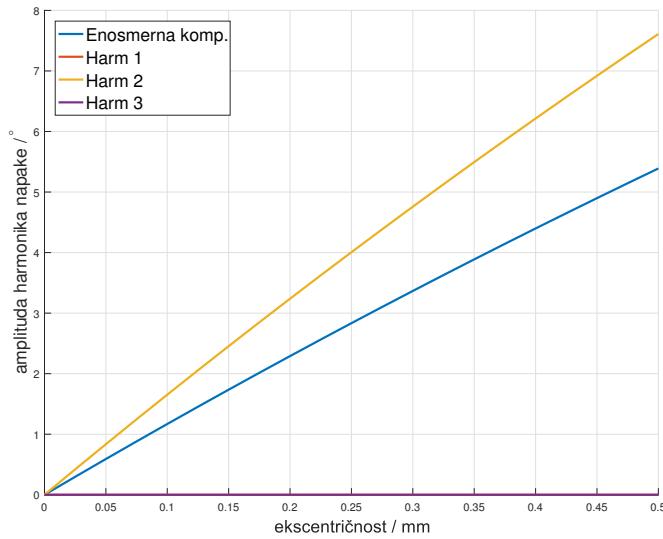
$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} = 1,5810^{-13}\Delta x_s^2 - 6,5210^{-13}\Delta x_s + 9,4710^{-13} \quad (3.3)$$

$$C_2 = 16,88\Delta x_s^2 - 3,53\Delta x_s + 0,41 \quad (3.4)$$

$$C_3 = -2,4310^{-14}\Delta x_s^2 + 3,5210^{-13}\Delta x_s - 6,2910^{-13} \quad (3.5)$$



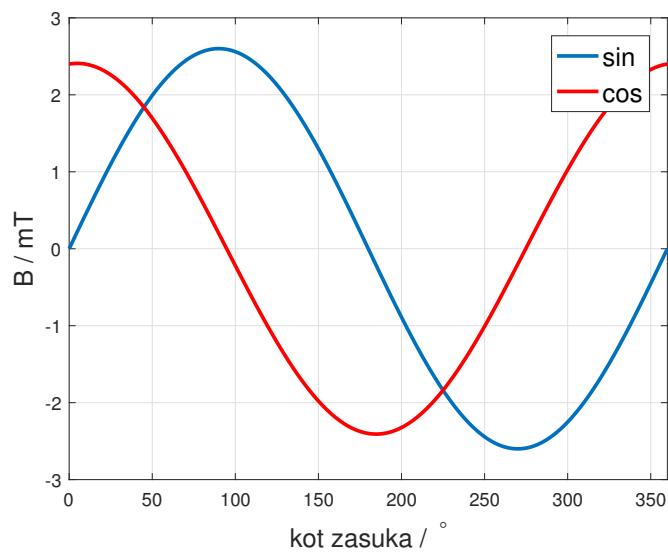
Slika 3.4: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 3.5: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri x

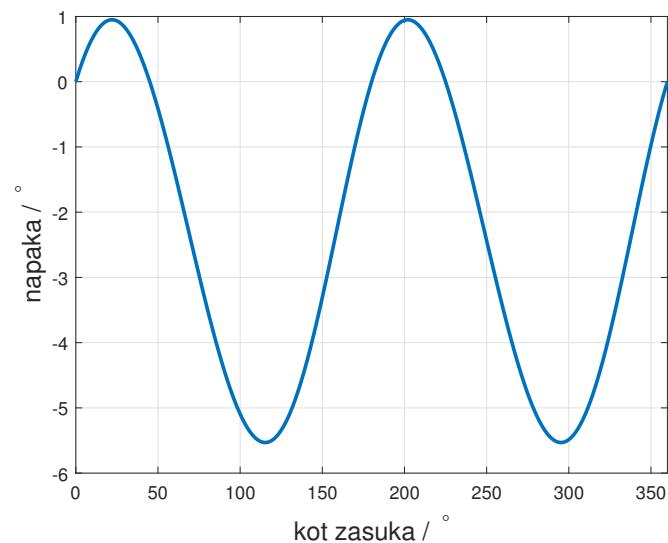
3.3 Simulacija statične ekscentričnosti v smeri y-osi

Oglejmo si še rezultate simulacij statične ekscentričnosti vsmeri y.



Slika 3.6: Signala \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem pri 0.2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

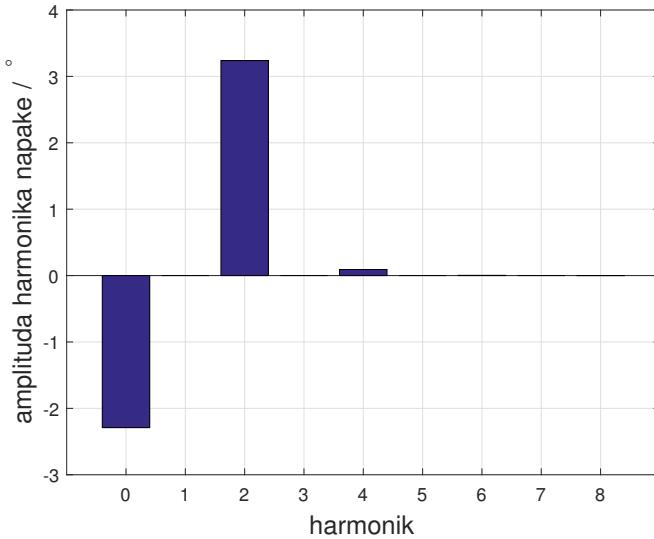
Napaka je prikazana na sliki 3.7.



Slika 3.7: Napaka ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0.2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

Napako razvijmo v Fourierovo vrsto in pridobimo amplitude posameznih har-

monikov napake (Slika 3.8).



Slika 3.8: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

Tudi tu najbolj izstopata enosmerna komponenta in drugi harmonik. Za razliko od statične ekscentričnosti v smeri x je tu enosmerna komponenta negativna.

Na sliki 3.9 vidimo odvisnost amplitud od spremenjanja statične ekscentričnosti v smeri y.

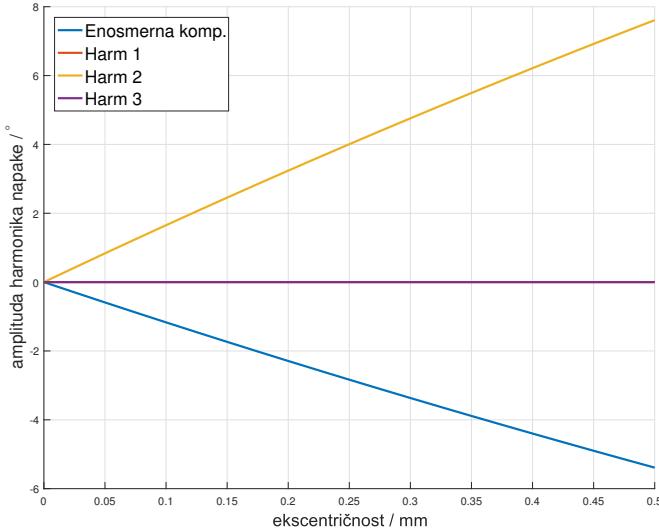
Poteke s slike 3.9 predstavimo s polinomom druge stopnje.

$$A_0 = -11,94\Delta y_s^2 + 2,48\Delta y_s - 0,34 \quad (3.6)$$

$$C_1 = 3,7910^{-13}\Delta y_s^2 - 2,1010^{-12}\Delta y_s + 2,9610^{-12} \quad (3.7)$$

$$C_2 = 16,88\Delta y_s^2 - 3,53\Delta y_s + 0,41 \quad (3.8)$$

$$C_3 = 1,5610^{-14}\Delta y_s^2 - 1,6510^{-14}\Delta y_s + 1,9010^{-14} \quad (3.9)$$



Slika 3.9: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri y

3.4 Dinamična ekscentričnost

Oglejmo si sedaj rezultate simulacij dinamične ekscentričnosti. V signalih \sin in \cos se pojavi enosmerna komponenta (Slika 3.10).

V napaki prevladuje prvi harmonik kar je vidno tudi iz razvoja v Fourierovo vrsto (Slika 3.12)

Na sliki 3.9 vidimo odvisnost amplitud od spremenjanja ekscentričnosti.

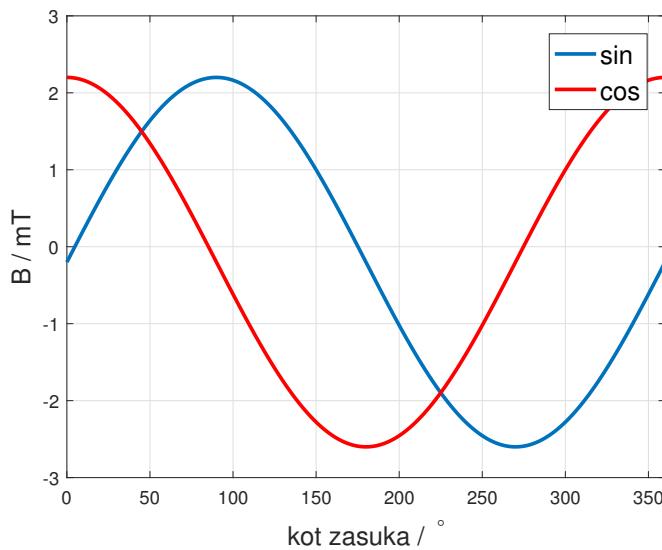
Poteke s slike 3.13 aproksimiramo s polinomi. Rezultati so bili pridobljeni po metodi najmanjših kvadratov. Koeficienti ostalih potenc pri aproksimaciji C_1 , C_2 in C_3 so bili zanemarljivi.

$$A_0 = 1,0110^{-11} \Delta x_d^3 - 6,8910^{-12} \Delta x_d^2 + 1,2510^{-12} \Delta x_d + 1,1110^{-13} \quad (3.10)$$

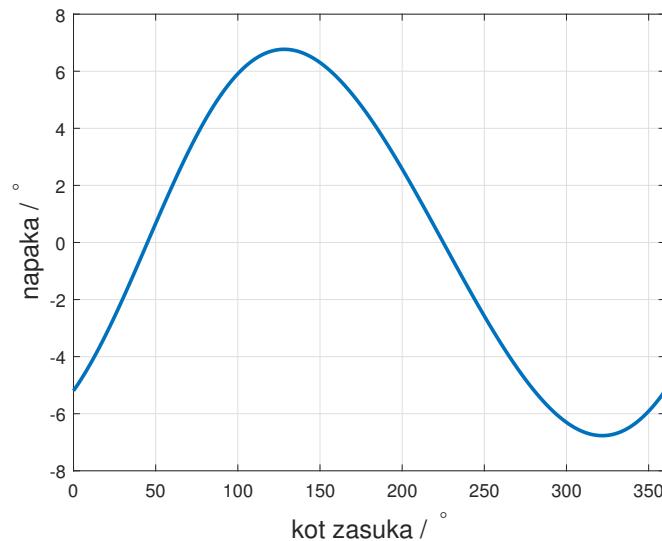
$$C_1 = 33,76 \Delta x_d \quad (3.11)$$

$$C_2 = 9,95 \Delta x_d^2 \quad (3.12)$$

$$C_3 = 3,91 \Delta x_d^3 \quad (3.13)$$

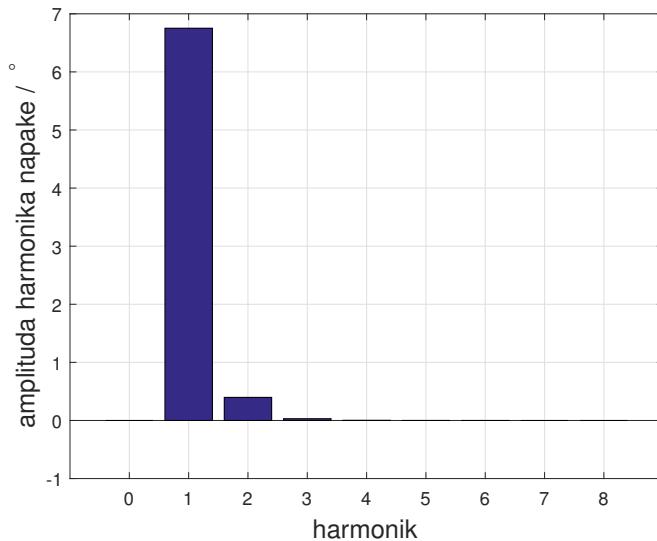


Slika 3.10: Signala \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem pri 0.2 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

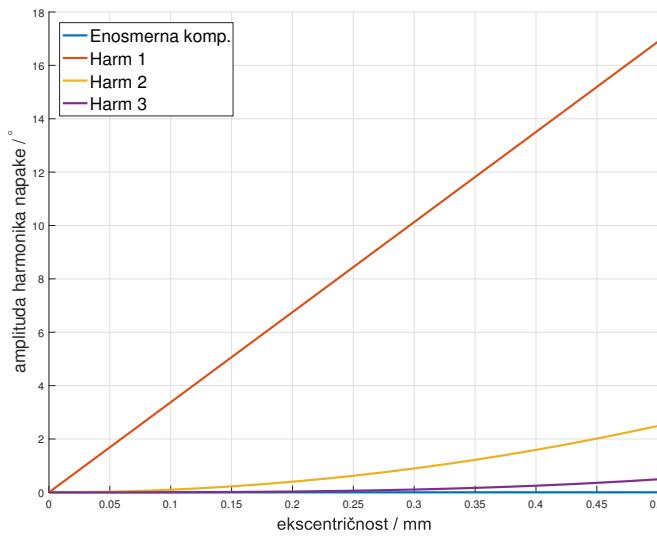


Slika 3.11: Napaka ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0.2 mm dinamične ekscentričnosti v smeri y

Dinamična ekscentričnost v smeri y, pri simulacijah z linearnim poljem ni izražala napake, saj se polje ob tej ekscentričnosti zaradi aproksimacije z ravnino,



Slika 3.12: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x



Slika 3.13: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od dinamične ekscentričnosti v smeri x

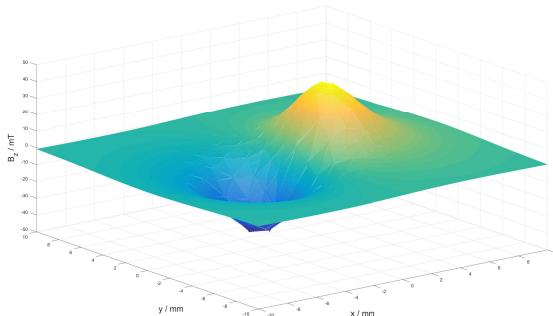
za Hall-ove sonde ni spremenilo.

V tem poglavju sem predstavil numerične rezultate simulacij z magnetnim

poljem aproksimiranega z ravnino. Rezultati so potrdili prevladujoče harmonike, pojavljajo se tudi višji. V nadaljevanju pričakujem, z boljšim modelom magnetnega polja manjše napake.

4 Realni model magnetnega polja

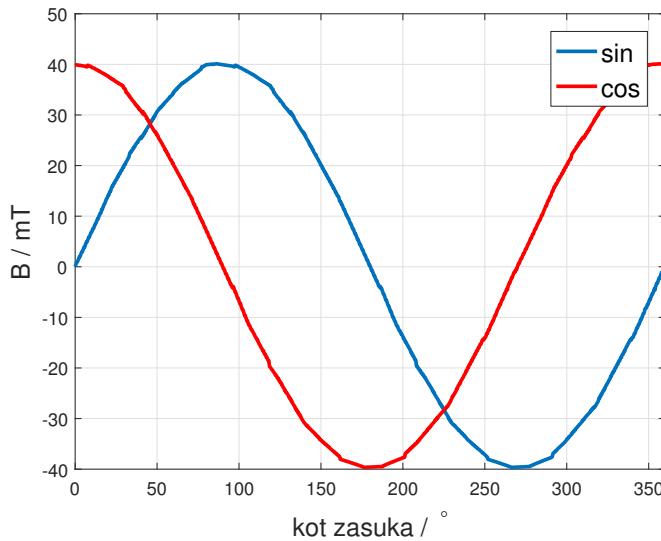
V tem poglavju bom predstavil rezultate simulacij, v katerih sem uporabil realen model magnetnega polja. Podjetje RLS merilna tehnika, mi je posredovalo rezultate simulacije z komponente gostote magnetnega polja 2,55 mm nad magnetom. Simulirano polje pokriva območje 20x20 mm nad magnetom s korakom 0,02 mm (Slika 4.1).



Slika 4.1: Model z- komponente gostote magnetnega polja uporabljen v simulacijah

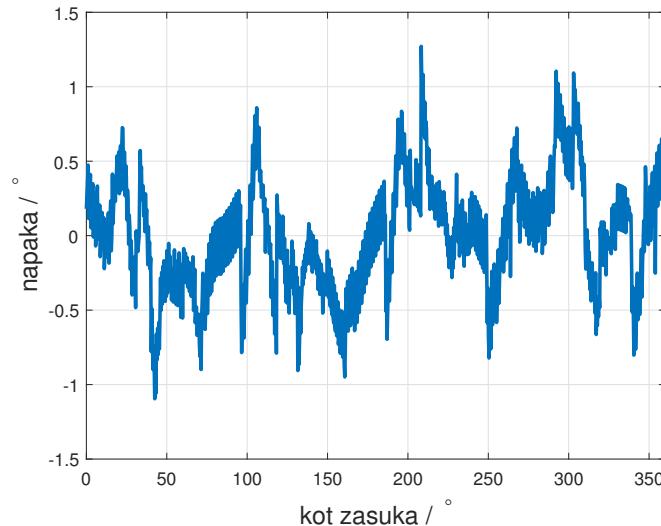
4.1 Brez napake

Kljub idealni montaži, se bo v realnosti pojavila napaka. Magnet je lahko neenakomerno magnatiziran, kar nam že v začetku ustvari neko napako. Poglejmo si zato najprej zajeta signala \sin in \cos (Slika 4.2).



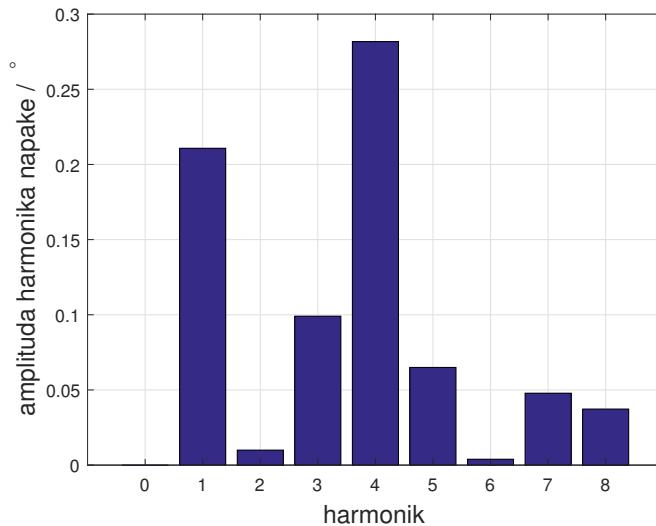
Slika 4.2: Poteka signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez vplivov ekscentričnosti

Signalov *sin* in *cos* nimata popolne oblike kot bi ju pričakovali. Napaka je tudi posledica numeričnega izračuna magnetnega polja. Ta nepopolnost analognih signalov se izraža tudi v napaki (Slika 4.3). Napaka je bolj izrazita kot pri



Slika 4.3: Napaka pri simulacijah z realnim magnetnim poljem brez vplivov ekscentričnosti

linearnem modelu polja. V napaki se pojavljajo tudi skoki (npr pri 105°), ki so posledica nepopolnega numerično izračunanega modela magnetnega polja. Razvijmo napako v Fourierovo vrsto (Slika 4.4). Prevladujeta prvi in četrti harmonik



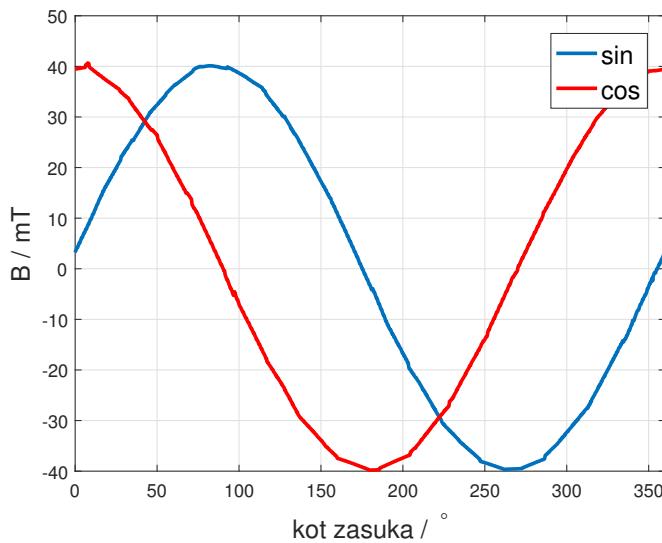
Slika 4.4: Amplitude harmonikov napake simulacijah z realnim magnetnim poljem brez ekscentričnosti

kar je pričakovano po podatkovnih listih citeAM8192.

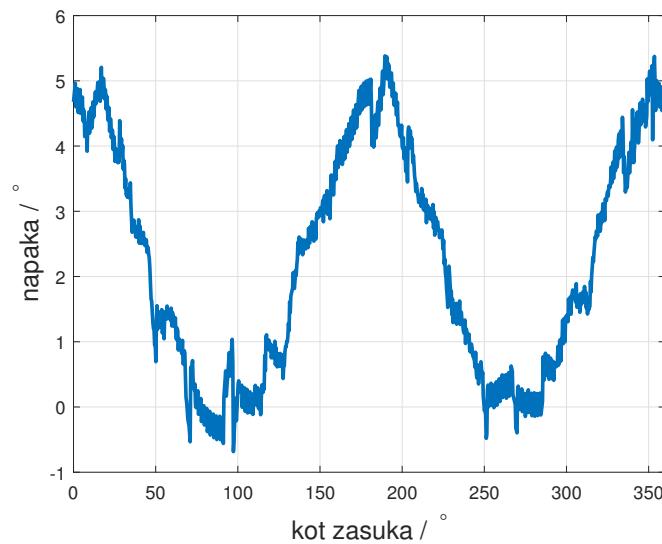
4.2 Simulacija statične eksentričnosti

Oglejmo si sedaj rezultate ob upoštevanju statične eksentričnosti. Po prčakovanjih se bo razlika pokazala v amplitudah in faznem zamiku analognih signalov. Slika 4.5 prikazuje poteka simuliranih signalov \sin in \cos . Amlituda se ni opazno spremenila, spremenil pa se je fazni zamik. S prikazom napake (Slika 4.6) opazimo povišanje drugega harmonika. Z razvojem v Fourierovo vrsto lahko to tudi potrdimo (Slika 4.7).

Po pričakovanjih iz simulacij z linearnim modela magnetnim poljem se napaka izraža enako. Enosmerna komponenta in drugi harmonik imata manjšo amplitudo, kot simulacije z uporabo magnetnega polja aproksimiranega z ravnino, je



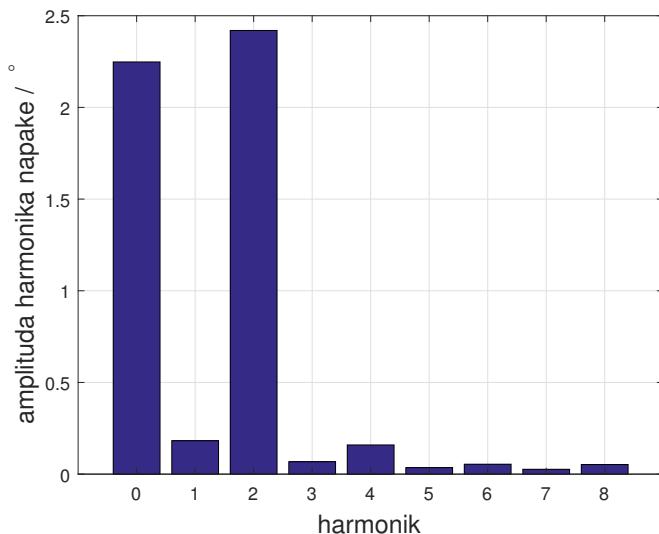
Slika 4.5: Poteka signalov \sin in \cos pri simulacijah z realnim magnetnim poljem s 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri xi



Slika 4.6: Poteka napake pri simulacijah z realnim magnetnim poljem s 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri xi

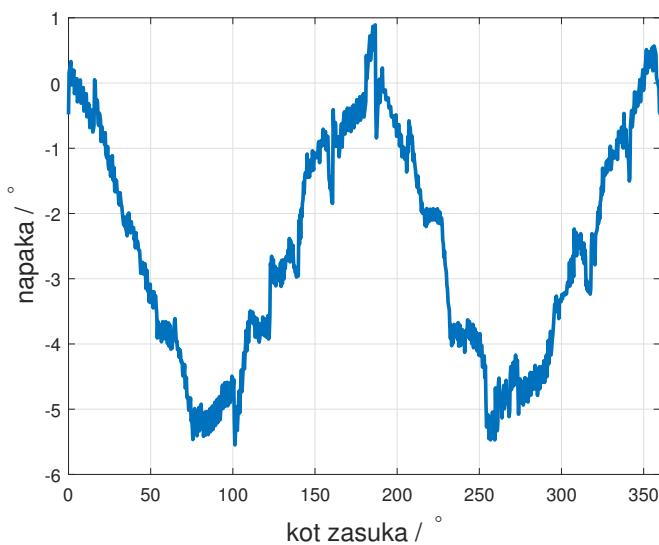
pa vešji delež drugih harmonikov.

Oglejmo si še napako simulacije pri statični ekscentričnosti v smeri y (Slika

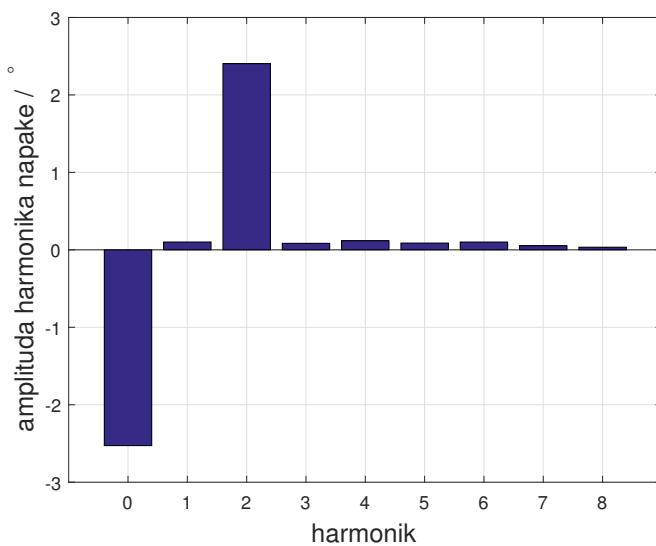


Slika 4.7: Amplitude harmonikov napake simulacijah z realnim magnetnim poljem s 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x

4.8). Opazimo negativno enosmerno komponento ter izrazit drugi harmonik, kar je pričakovano. Na sliki 4.9 vidimo napako razvito v Fourierovo vrsto, ki nam pokaže pričakovane velikosti amplitud.

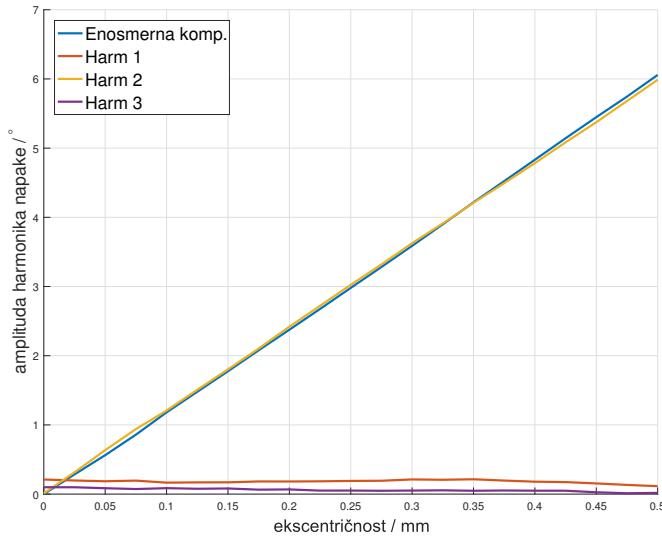


Slika 4.8: Napaka ε pri simulacijah z realnim magnetnim poljem s 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y



Slika 4.9: Amplitude harmonikov napake simulacijah z realnim magnetnim poljem s 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri y

Oglejmo si sedaj še poteka spremenjanja velikosti amplitud od višanja ekscentričnosti.



Slika 4.10: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri x

$$A_0 = -1, 55\Delta x_s^3 + 1, 83\Delta x_s^2 + 11, 60\Delta x_s \quad (4.1)$$

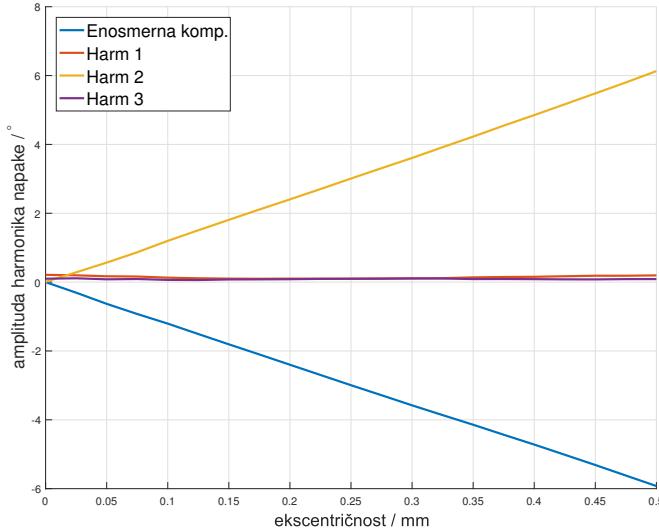
$$C_1 = -6, 55\Delta x_s^3 + 4, 37\Delta x_s^2 - 0, 76\Delta x_s + 0, 2 \quad (4.2)$$

$$C_2 = -0, 15\Delta x_s^3 + 0, 20\Delta x_s^2 + 12, 14\Delta x_s - 0, 01 \quad (4.3)$$

$$C_3 = -1, 43\Delta x_s^3 + 1, 07\Delta x_s^2 - 0, 36\Delta x_s + 0, 10 \quad (4.4)$$

Aproksimacije potekov s polinomom nam opišejo linearno naraščanje enesmerne komponente ter amplitude drugega harmonika, pri manjših odmikih. Opazimo da je amplituda prvega in tretjega harmonika dokaj konstantna.

Oglejmo si še poteke spremenjanja velikosti amplitud pri ekscentričnosti v smeri y.



Slika 4.11: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri y

$$A_0 = -3,06\Delta x_s^3 + 2,74\Delta x_s^2 - 12,43\Delta x_s \quad (4.5)$$

$$C_1 = 3,26\Delta x_s^3 + 4,21\Delta x_s^2 - 1,33\Delta x_s + 0,22 \quad (4.6)$$

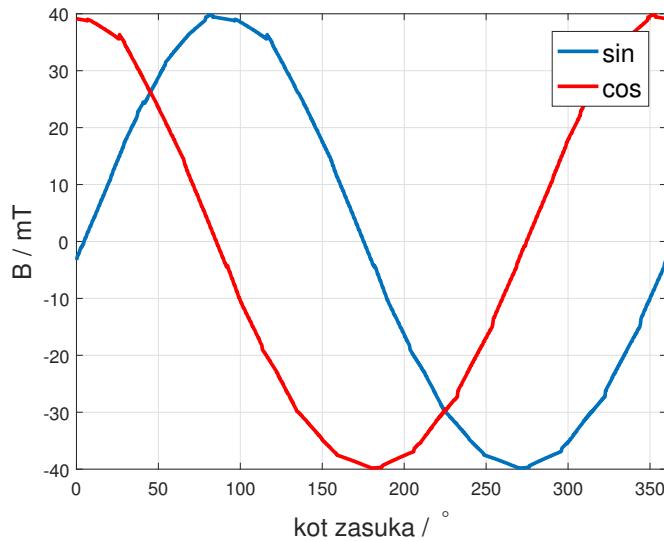
$$C_2 = 2,05\Delta x_s^3 - 0,74\Delta x_s^2 + 12,14\Delta x_s - 0,01 \quad (4.7)$$

$$C_3 = -2,61\Delta x_s^3 + 1,96\Delta x_s^2 - 0,38\Delta x_s + 0,10 \quad (4.8)$$

Pri manjših odmikih statične ekscentričnosti v smeri y, pridobiva negativno vrednost enosmerne komponente in viša se amplituda drugega harmonika. Poteki so pričakovani. Podrobnejšo primerjavo potekov obeh simulacij bom opravil na koncu poglavja.

4.3 Simulacije dinamčne ekscentričnosti

Poglejmo si sedaj še dinamično ekscentrirčnost. Po simulacijah dinamične ekscentričnosti v smeri x pri linearinem polju, pričakujemo ob enosmerno komponento. Primer dinamične ekscentričnosti je na sliki 4.12. Velikost enosmerne kompo-



Slika 4.12: Poteka signalov *sin* in *cos* pri simulacijah z realnim magnetnim poljem s 0,2 mm dinamične ekscentričnosti v smeri xi

nente *sin* je $-1,60\text{mT}$ in *cos* $-1,59\text{mT}$. Enosmerna komponenta ni tako izrazita, kot pri simulacijah z linearnim poljem, vendar kljub temu povzroči napako (Slika 4.13).

V napaki se izrazite pokaže prvi harmonik kar je bilo pričakovati. Razvijmo napako še v Fourierovo vrsto. po pričakovanjih je najvišja amplituda prvega harmonika, narasel je tudi tretji harmonik.

Poglejmo si sedaj še spremenjanje velikosti amplitud s spremenjanjem velikosti dinamične ekscentričnosti v smeri x.

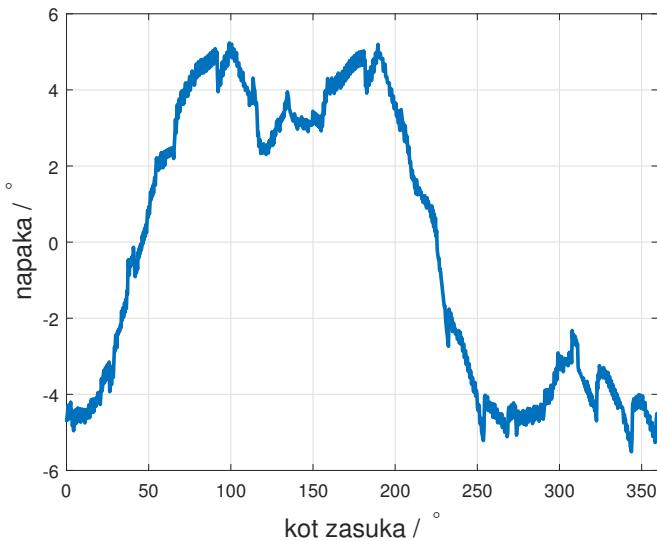
Aproksimirajmo poteke s polinomo tretje stopnje. po pričakovanjih je izrazito naraščanje prvega harmonika.

$$A_0 = -5,70\Delta x_d^3 + 5,27\Delta x_d^2 - 0,89\Delta x_d + 0,01 \quad (4.9)$$

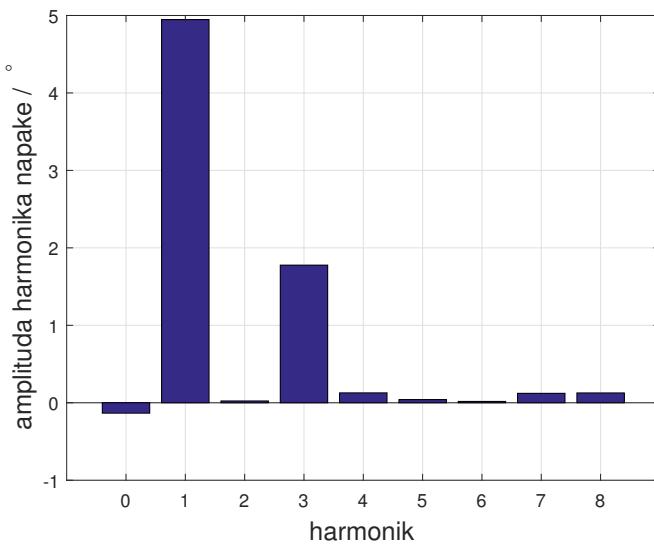
$$C_1 = -8,36\Delta x_d^3 + 9,16\Delta x_d^2 - 22,94\Delta x_d + 0,01 \quad (4.10)$$

$$C_2 = -1,75\Delta x_d^3 + 2,46\Delta x_d^2 - 0,40\Delta x_d + 0,02 \quad (4.11)$$

$$C_3 = 1,04\Delta x_d^3 - 1,31\Delta x_d^2 + 8,71\Delta x_d + 0,09 \quad (4.12)$$

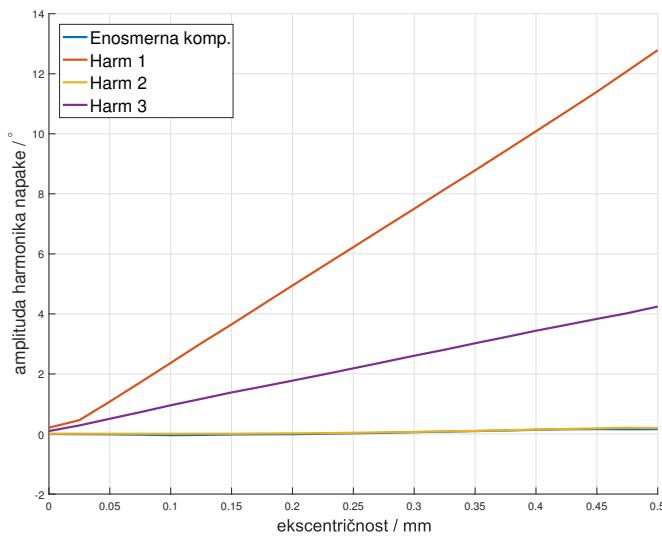


Slika 4.13: Poteka napake pri simulacijah z realnim magnetnim poljem s 0,2 mm dinamične ekscentričnost v smeri x



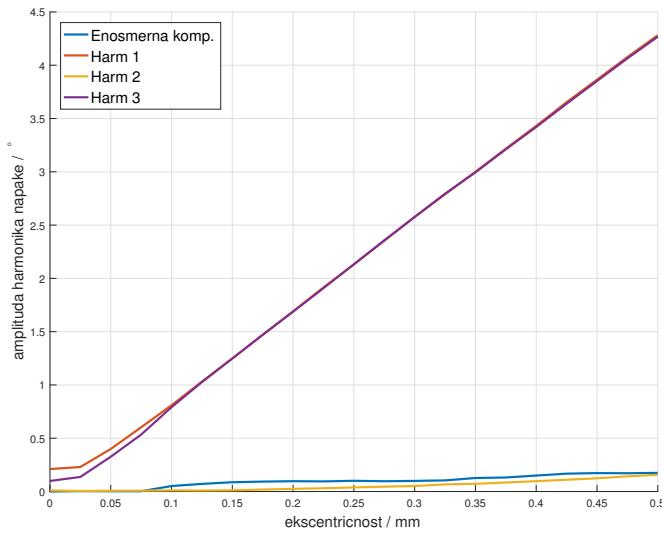
Slika 4.14: Amplitude harmonikov napake simulacijah z realnim magnetnim poljem s 0,2 mm dinamične ekscentričnosti v smeri x

Simulacije dinamične ekscentričnosti v y smeri z aproksimacijo magnetnega polja z ravnilo ni bilo mogoče. Z realnim modelom sem lahko opravil simulacije. Pričakovanja so, da se bo tudi tu izrazil prvi harmonik. Kot rezultat prilagam le



Slika 4.15: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od dinamiične ekscentričnosti v smeri x

poteke amplitud posameznega harmonika napake glede na ekscentričnost v smeri y.



Slika 4.16: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od dinamiične ekscentričnosti v smeri y

Aproksimirajmo poteke s polinomom tretje stopnje. Po pričakovanjih je izrazito naraščanje prvega harmonika. Amplituda prvega harmonika je pri dinamični ekscentričnosti v smeri y za faktor 3 nižja kot pri ekscentričnosti v x smeri.

$$A_0 = 2,14\Delta x_d^3 - 1,86\Delta x_d^2 + 0,80\Delta x_d + 0,02 \quad (4.13)$$

$$C_1 = -11,96\Delta x_d^3 + 10,16\Delta x_d^2 + 6,19\Delta x_d + 0,12 \quad (4.14)$$

$$C_2 = -0,02\Delta x_d^3 + 0,75\Delta x_d^2 - 0,07\Delta x_d + 0,01 \quad (4.15)$$

$$C_3 = -8,33\Delta x_d^3 + 6,32\Delta x_d^2 + 7,41\Delta x_d \quad (4.16)$$

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. Simulacijski model senzorja je bil zelo poenostavljen. Senzor RM44 vsebuje tudi interpolator ki z numeričnim postopki izboljša ločljivost, ter zmanjša napako. Iz tega lahko predvidimo, da bo napaka senzorja manjša, kot so bili rezultati simulacij.

5 Meritve

Spoznali smo simulacijske rezultate in pridobili predstavo potekov napake ob posamezni ekscentričnosti. S simulacijskim modelom smo pridobili občutek kaj naj pričakujemo pri meritvah. V tem poglavju bom opisal opravljene meritve. Spoznali se bomo s merilnim mestom in postopkom nastavljanja ekscentričnosti na merilni napravi.

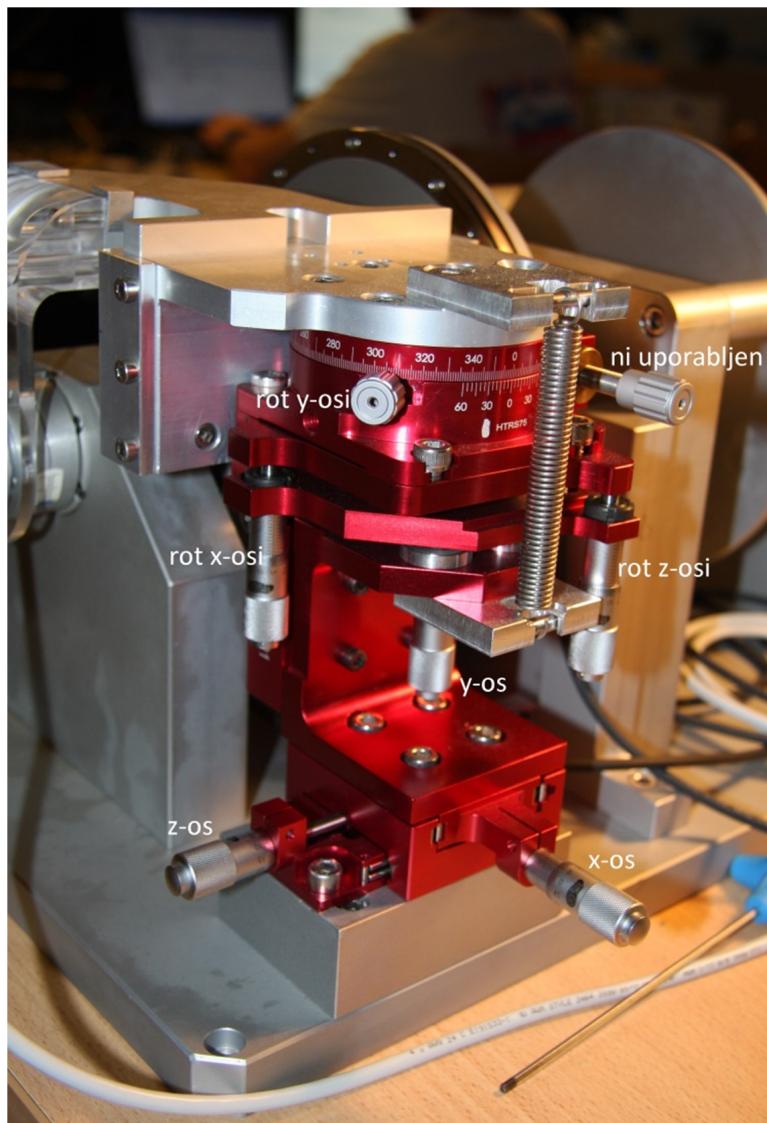
5.1 Oprema in postavitev merilnega mesta

Merilno mesto je bilo sestavljalna krmilna plosča za regulacijo motorskega pogona in obdelavo signalov enkoderjev ter konstrukcija z motorjem referenčnim dajalniko TONiC podjetja Renishaw, magnetnim aktuatorjem za RM44 podjetja RLS d.o.o., 6 osnim mikrometerskim nastavljalnikom pozicije HTIMS601 za premikanje senorja RM44 ter senzor RM44AC. Merilno mesto je prikazano na sliki ??.

./Slike/ ne obstaja

Slika 5.1: Postavitev testnega mesta

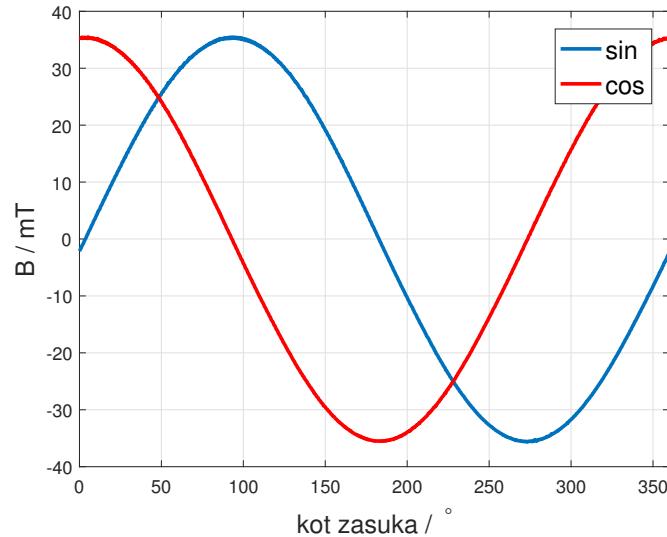
Statično ekscentričnost sem lahko nastavljal v šestih prostorskih stopnjah. Na sliki 5.2 je prikazano kateri vijak je za nastavljanje posamezne prostorske osi. Vijaki poimenovani x-os, y-os in z-os so za nastavljanje translaciijo merjenca, rot x-osi, rot y-osi, rot z-osi so za nastavljanje rotacije merjenca. Motor se je pri vseh meritvah vrtel s hitrostjo 60 RPM.



Slika 5.2: Naprava za nastavljanje statične ekscentričnosti

5.2 Senzor v izhodiščni poziciji

Za meritve ekscentričnosti je bilo potrebno senzor, kot magnetni aktuator nastaviti v čim bolj idealno pozicijo. Ničelna lega je prikazana na sliki 5.3



Slika 5.3: Signala \sin in \cos pomerjena v izhodiščni legi

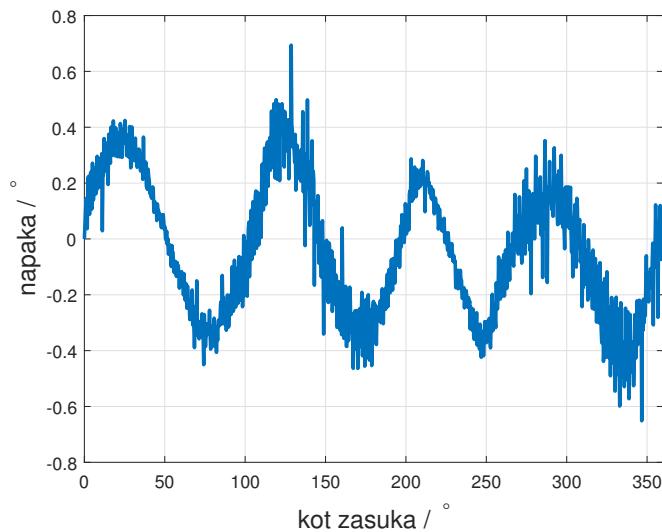
Napaka ε , ki je bila pomerjena je prikazana na sliki 5.4. Napaka je po pričakovanjih manjša kot je bila pomerjena pri simulacijah. Z razvojem v Fourierovo vrsto (Slika 5.5) se potrdi izstopanje četrtega harmonika, ki je bil izrazit tudi v simulacijah z realnim modelom polja. Napako razvijimo v Fourierovo vrsto in pridobimo amplitude posameznih harmonikov napake(Slika 5.5).

$$A_0 = 11,94\Delta x_s^2 - 2,48\Delta x_s + 0,34 \quad (5.1)$$

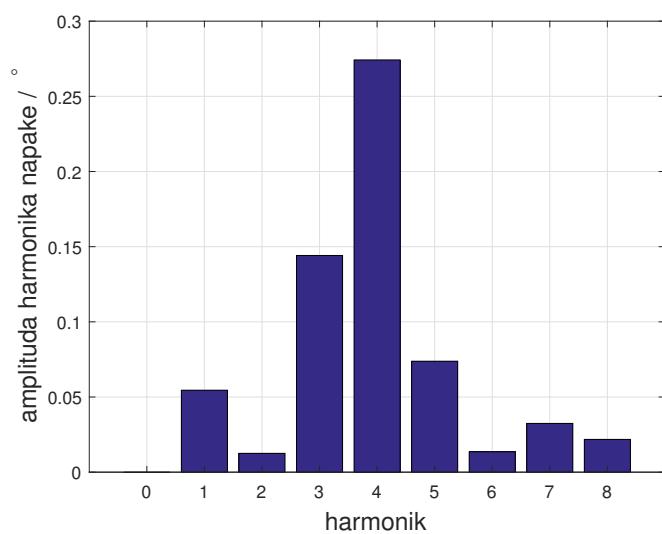
$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} = 1,5810^{-13}\Delta x_s^2 - 6,5210^{-13}\Delta x_s + 9,4710^{-13} \quad (5.2)$$

$$C_2 = 16,88\Delta x_s^2 - 3,53\Delta x_s + 0,41 \quad (5.3)$$

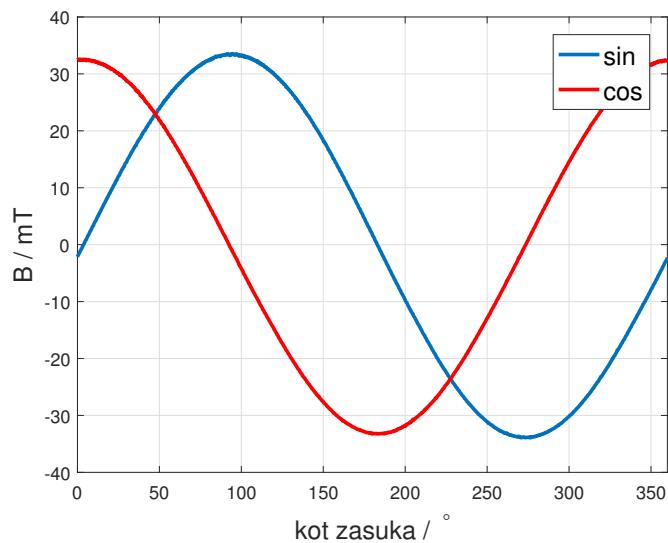
$$C_3 = -2,4310^{-14}\Delta x_s^2 + 3,5210^{-13}\Delta x_s - 6,2910^{-13} \quad (5.4)$$



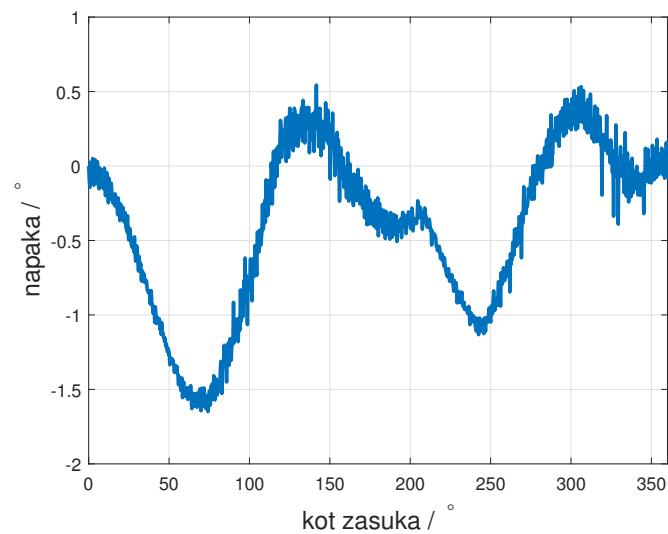
Slika 5.4: Napaka ε pomerjena v izhodisčni legi



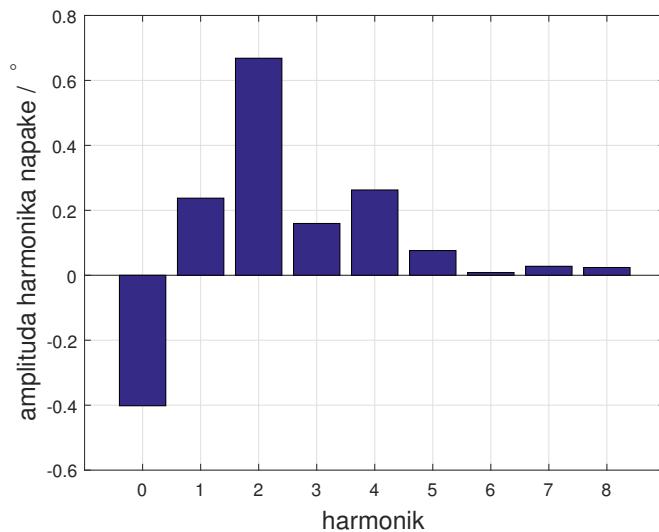
Slika 5.5: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



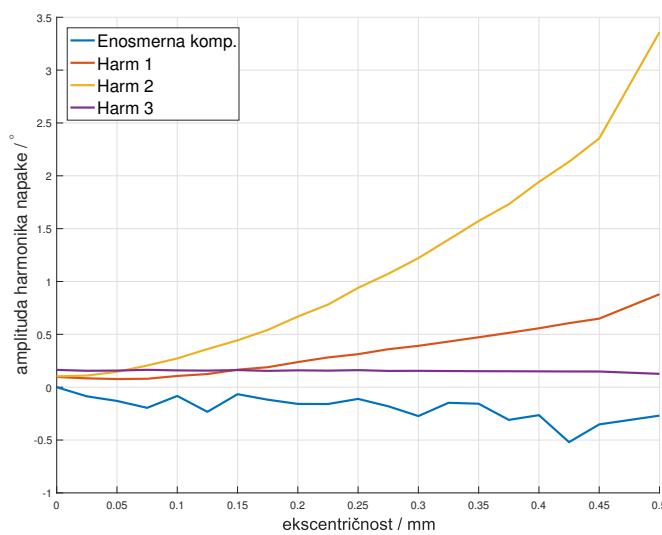
Slika 5.6: Signala \sin in \cos pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.7: Napaka ε pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.8: Amplitude harmonikov napake ε razvite v Fourierovo vrsto pri simulacijah z linearnim poljem pri 0,2 mm statične ekscentričnosti v smeri x



Slika 5.9: Potek amplitud posameznega harmonika napake ε od statične ekscentričnosti v smeri x