

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Mitja Alič

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

Magistrsko delo

Mentor: doc. dr. Mitja Nemec

Ljubljana, 2018

Zahvala

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

Vsebina

1	Uvod	5
2	Senzor RM44	7
3	Izpeljava gibanja sonde relativno na magnet ob nepravilni montaži	13
3.1	Definicija koordinatnega sistema	13
3.2	Izpeljava gibanja lokacije Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti	15
3.3	Izpeljava gibanja lokacije Hall-ove sonde na magnet pri statični ekscentričnosti	16
3.4	Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde	17
4	Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov	19
4.1	Različne amplitude	19
4.2	Različne enosmerne komponente	22
4.2.1	Enosmerna komponenta v signalu B_{sin}	22
4.2.2	Enosmerna komponenta signala B_{cos}	23
4.2.3	Enosmerna komponenta pri obeh signalih	25
4.3	Neorotogonalnost signalov	26

4.4	Napaka zaradi spremembe amplitude in faze zaradi enega parametra	29
-----	--	----

Seznam simbolov

V zaključnem delu so uporabljeni naslednje veličine in simboli:

Veličina / oznaka		Enota	
Ime	Simbol	Ime	Simbol
napajalna napetost	VDD	volt	V
ničelni potencial	GND	volt	V
referenčni kot	Θ	stopinja	°
pomerjeni kot	φ	stopinja	°
napaka	ε	stopinja	°
Z-komponenta gostote magnetnega polja	B_z	militesla	mT
statična ekscentričnost v x	Δx_s	milimetri	mm
statična ekscentričnost v y	Δy_s	milimetri	mm
dinamična ekscentričnost v x	Δx_d	milimetri	mm
dinamična ekscentričnost v y	Δy_d	milimetri	mm

Tabela 1: Veličine in simboli

Povzetek

Za regulacijo pogonov se v industriji uporablja dajalnike zasuka. Primer dajalnika zasuka je magnetni enkoder. Magnetni enkoder je zaradi svoje robustnosti primeren za delovanje v takem okolju.

S Hallovimi sonadmi enkoder meri Z-komponento magnetnega polja magneta, ki se nahaja na rotirajočem delu pogona. Iz signalov Hallovih sond se preko matematičnega algoritma izračuna kot zasuka. Algoritem predstavlja izračun matematične funkcije *atan2()*.

Ob nepravilni montaži enkoderja ali magneta, Hallove sonde zajamejo nepravilno polje. Posledično se v izračunanem kotu pojavi napaka. Napaka kota se izrazi glede na nepravilno zajeto magnetno polje. V magistrskem delu je predstavljeno spreminjanje zajemanja magnetnega polja posamezne Hallove sonde v odvisnosti od nepravilne montaže.

Napako zaradi nepravilne montaže se razbere iz signalov pomerjenih s Hallovimi sondami, izhod enkoderja je le podatek o zasuku. Izpeljan je potek napake *atan2()*; v odvisnosti od nepravilnih vhodnih signalov funkcije. Napaka funkcije *atan2()*; je izpeljana v neskončno vrsto v odvisnosti od nepravilnosti vhodnih signalov.

V programu MATLAB je bil sestavljen simulacijski model za merjenje napake enkoderja v odvisnosti od nepravilne montaže. Simulacije so bile opravljene na linearno aproksimirani Z-komponenti gostote magnetnega polja in na numerično izračunanem polju realnega magneta. Napaka ob napačni montaži je bila analizirana v frekvenčnem prostoru in je predstavljena kot potek posameznega har-

monika v odvisnosti od nepravilne montaže.

Opravljene so bile meritve na enkoderju RM44, ki so bile primerjane s simulacijami.

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

Abstract

Simulations have been compared to the encoder RM44 measurements. The basic principle of operation of encoder cannot be revealed due to secrecy.

This work presents the impact of incorrect measured Z-component of magnetic field with magnetic encoder, due to inappropriate installation of encoder or magnetic actuator. A relative change in position of Hall sensor relative to magnet is derived. The error of mathematical function $\text{atan2}()$; is described by infinity series depending on input signals distortion. Basic simulation model has been developed. Simulations have been made by linear approximation of Z-component of magnetic field and numerical calculations by magnet model. Simulations have been compared to measurements with encoder RM44. The basic principle of operation of encoder is business secret. Therefor was built own simulation model, by expectation that measurements will be different.

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

1 Uvod

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

Trenutni položaj merijo dajalniki pomika ali zasuka[1]. Dajalnike zasuka se loči na dajalnike, ki merijo zasuk na koncu osi (angl.: on axis) in dajalnike, ki merijo zasuk na osi (angl.: through hole). Možna delitev dajalnikov zasuka je tudi na eno-obratne (angl.: single-turn) in več-obratne (angl.: multi-turn). Eno-obratni dajalnikov zasuka podajo položaj znotraj enega obrata, medtem ko več-obratni štejejo tudi število polnih obratov. Dajalnike položaja se deli glede na uporabljeni princip zaznavanja fizikalne spremembe. Obstajajo magnetni, optični, induktivni in drugi [2].

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

Kot vsak merilni element, ima tudi magnetni enkoder napako. Napaka se lahko pojavi ob narobe merjenem magnetnem polju [4]. Napako lahko povzroči

tudi napačno pomerjeno polje. To se zgodi ob nepravilni montaži enkoderja ali magnetnega aktuatorja na os vrtenja. S poznavanjem vplivov nepravilne montaže na napako pomerjenega položaja, se napako lahko predvidi in odpravi.

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

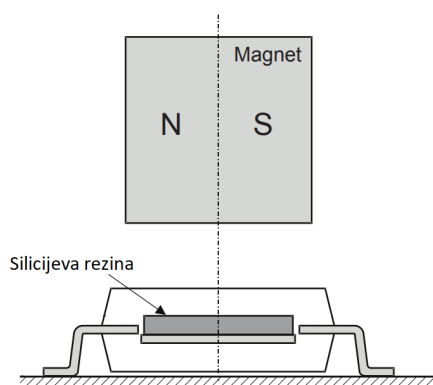
2 Senzor RM44

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

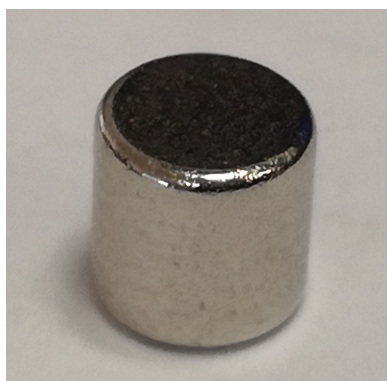


Slika 2.1: Senzor RM44

Ključni element senzorja je čip AM256. Za pravilno delovanje, se mora nahajati nad radialno polariziranim cilindričnim magnetom, ki je pritrjen na os vrtenja (slika 2.2). S strani proizvajalca senzorja je priporočen radialno polariziran magnet s premerom 4 mm, višino 4 mm in remanenco 1050 mT (slika 2.3).



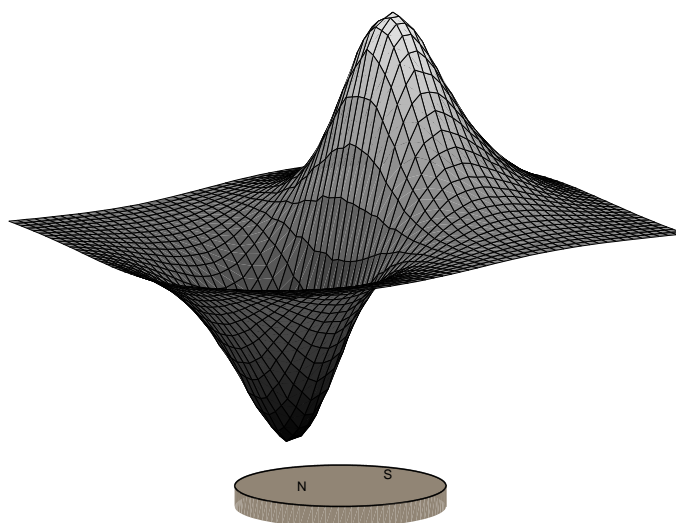
Slika 2.2: Nahajanje radialno polariziranega magneta nad čipom AM256 [7]



Slika 2.3: Primer magneta predlagan s strani proizvajalca RLS

Na siliciju čipa so razporejene Hallove sonde za meritev Z-komponento gostote magnetnega polja. Za merjenje Z-komponento gostote magnetnega polja je lahko čip obrnjen kot na sliki 2.2, ali obrnjen na glavo. Med silicijsvo rezino in magnetom se pri taki montaži nahaja še tiskanina. Tiskanina nima magnetnih lastnosti in ne vpliva na Z-komponento gostote magnetnega polja povzročene z magnetnim

aktuatorjem. Pri montiranju senzorja je potrebno ohraniti predpisano razdaljo med magnetom in silicijevo rezino (1,8mm).

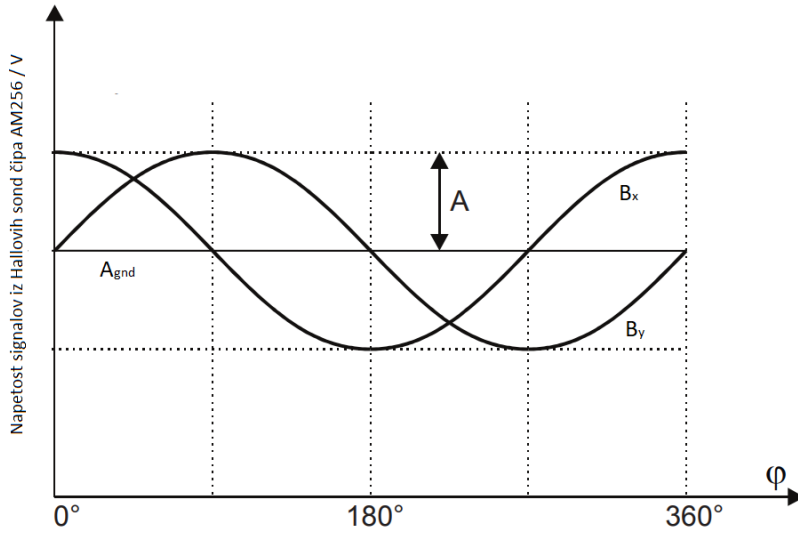


Slika 2.4: Oblika Z komponente gostote magnetnega pretoka nad magnetom

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

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

Iz signalov, zajetih s Hallovih sond, se izračuna kot. Metod, za numeričen izračun kota iz podatkov kot sta signala B_{cos} in B_{sin} je več (CORDIC, SAR,



Slika 2.5: Analogni signali zajeta s Hallovimi sondami [7]

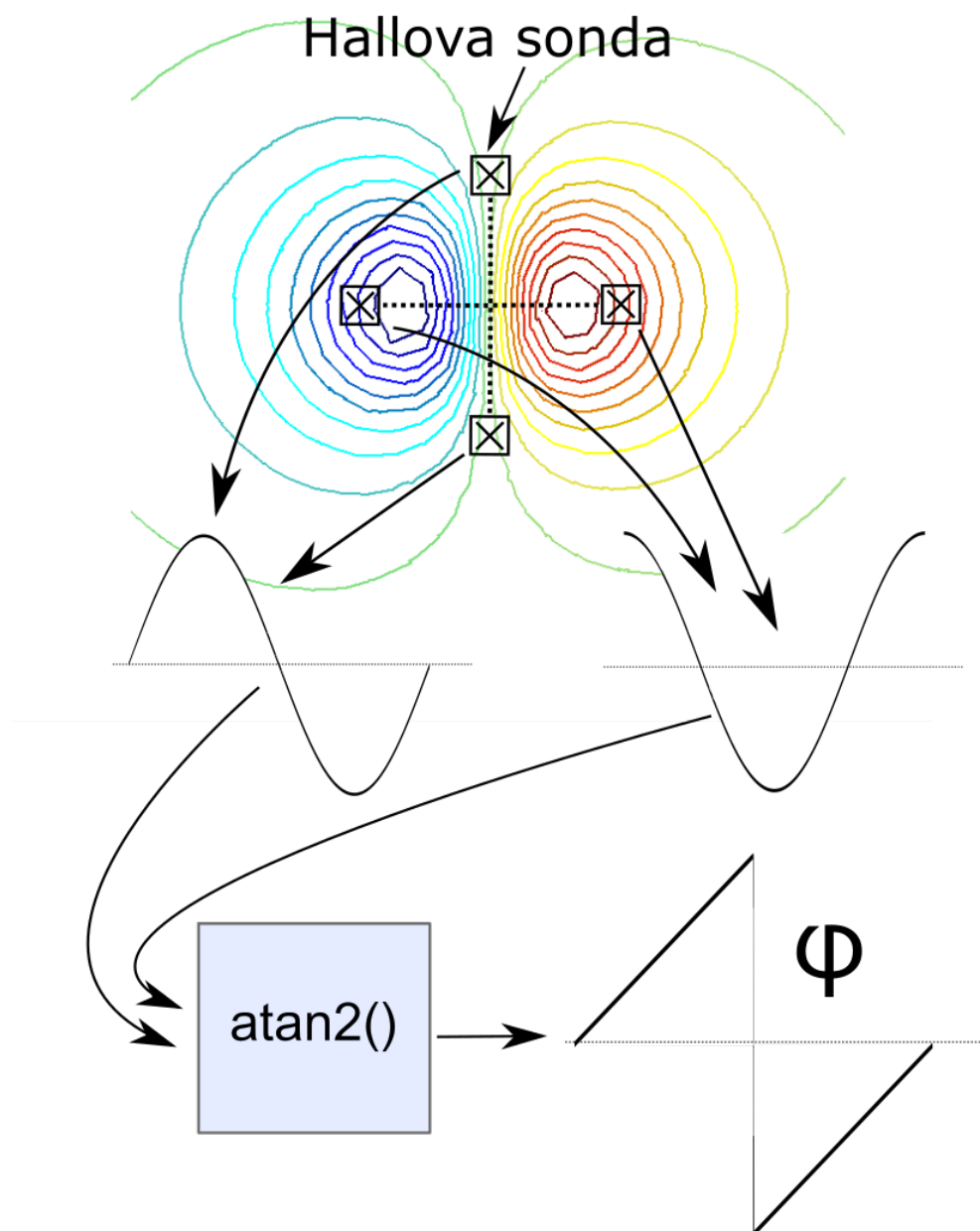
sledilna metoda, itd [8]). Osnovni princip metode je izračun funkcije $\text{atan2}(B_{\sin}, B_{\cos})$ [9].

Osnovno delovanje senzorja se lahko ponazori, s 4 Hallovimi. Sonde so enakomerno razporejene po krožnici s središčem v osi vrtenja in radijem r_0 . Z diferencialnim odčitavanjem pomerjenih signalov nasproti ležečih Hallovih sond, se signaloma B_{\sin} in B_{\cos} odstrani enosmerno komponento in poviša amplitudo.

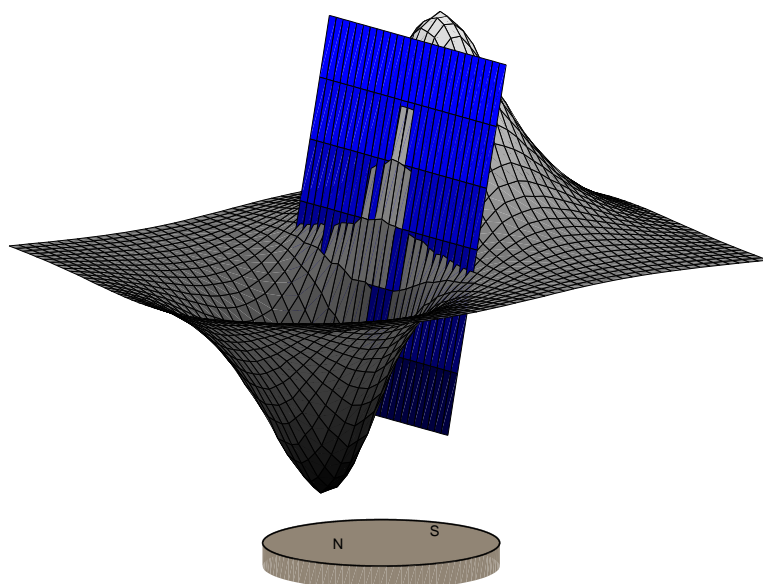
Signala B_{\cos} in B_{\sin} sta vhodna parametra v funkcijo $\text{atan2}()$, ki izračuna kot zasuka (slika 2.6). Za oceno napake, se lahko Z komponento gostote magnetnega pretoka v okolici središča magneta, aproksimira z ravnino (slika 2.7).

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

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



Slika 2.6: Osnovni model, za izračun kot zasuka



Slika 2.7: Oblika Z komponente gostote magnetnega polja nad magnetom in aproksimirano ravnino v središču magneta

3 Izpeljava gibanja sonde relativno na magnet ob nepravilni montaži

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

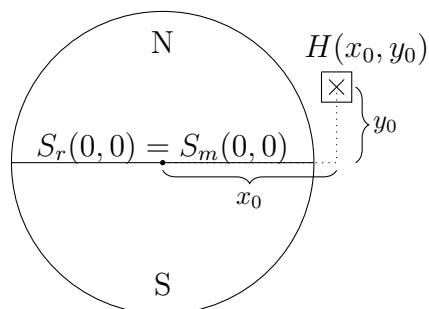
Izmik sredine senzorja iz osi vrtenja bo med spreminjanjem dejanskega kota zasuka statičen, njegova lokacija se ne bo spreminjala na os vrtenja. Ta izmik je poimenovan statična ekscentričnost.

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

3.1 Definicija koordinatnega sistema

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

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



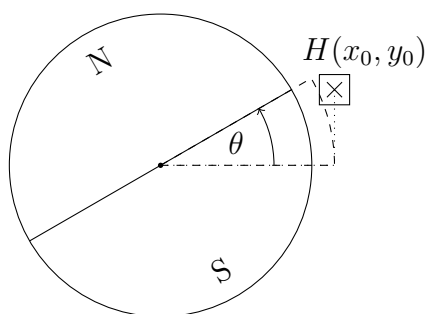
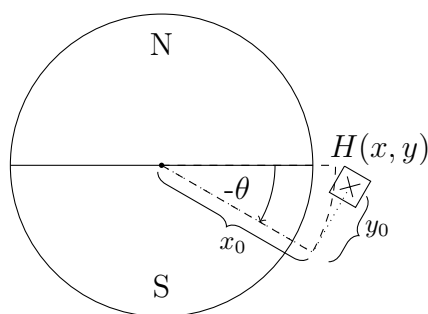
Slika 3.1: Definicija koordinatnega sistema z magnetom in Hall-ovo sondo

zasuka magneta za kot θ , opiše enačba (3.1).

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

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

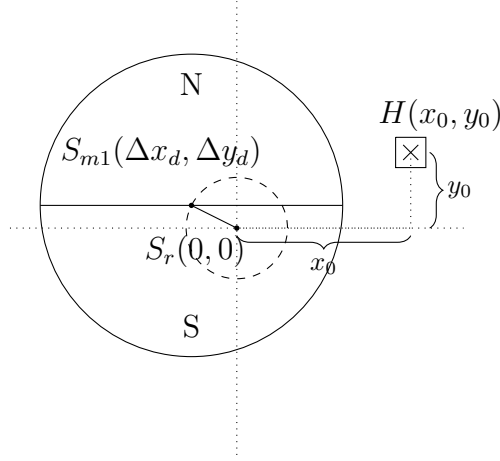
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

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

Slika 3.2: Sprememba položaja glede na magnet ob rotaciji

3.2 Izpeljava gibanja lokacije Hallove sonde na magnet pri dinamični ekscentričnosti

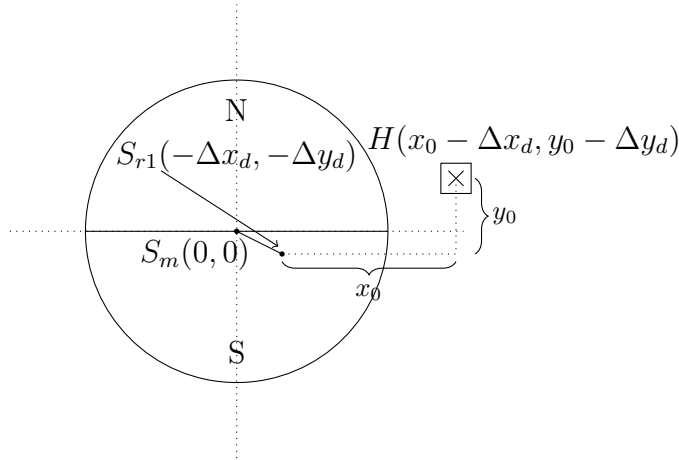
Magnet je postavljen v izhodišče koordinatnega sistema $S_m(0,0)$, kjer je tudi os vrtenja $S_r(0,0)$. Dinamična ekscentričnost povzroči premik središča magneta v točko $S_{m1}(\Delta x_d, \Delta y_d)$ (Slika 3.3). Os vrtenja je ostaja v izhodišču koordinatnega sistema. Središče magneta $S_{m1}(\Delta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



Slika 3.3: Definicije dinamične ekscentričnosti

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

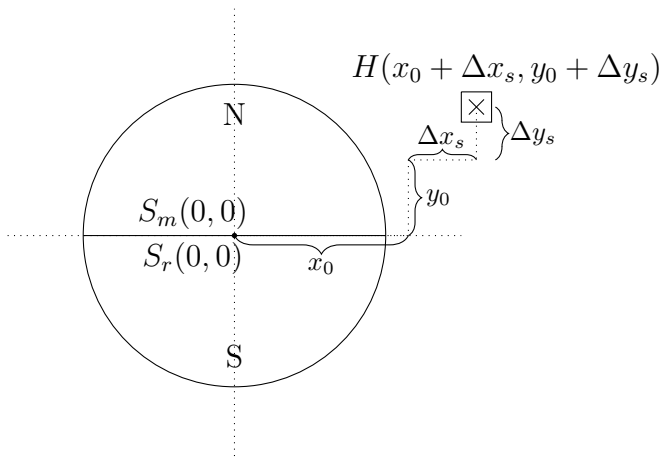
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta x_d \\ \Delta y_d \end{bmatrix} \quad (3.3)$$



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

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

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



Slika 3.5: Definicije statične ekscentričnosti

ekscentričnosti se sonda giblje po drugem radiju.

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

3.4 Končna enačba za določanje lokacije Hall-ove sonde

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

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

4 Potek napake funkcije atan2 ob popačenju vhodnih signalov

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

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

4.1 Različne amplitude

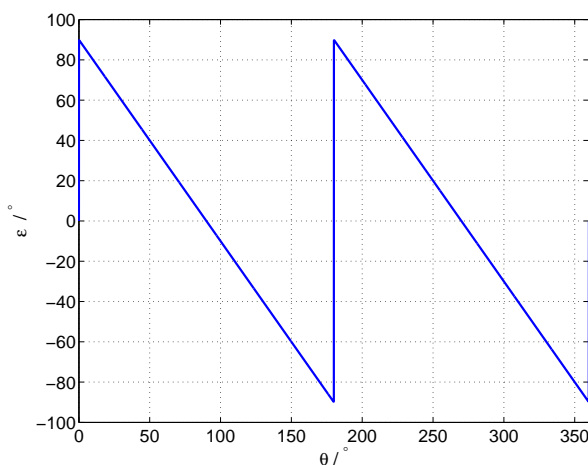
Prvi primer popačenih vhodov v funkcijo atan2d(); je neenakost amplitud vhodnih signalov. Signala imata poljubne amplitude, vendar se izhod funkcije atan2d(); nebo spremenil, če se obe amplitudi deli s poljubnim številom. Če se za poljubno število vzame amplitudo signala B_{cos} , imata signala novo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

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

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

Funkciji sta vstavljeni v `atan2d()`; in parameter k je limitiran v neskončnost. Izhod `atan2d()`; je konstanta, napaka ε je prikazana na sliki 4.1.

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



Slika 4.1: ε ob limiti k v neskončnost

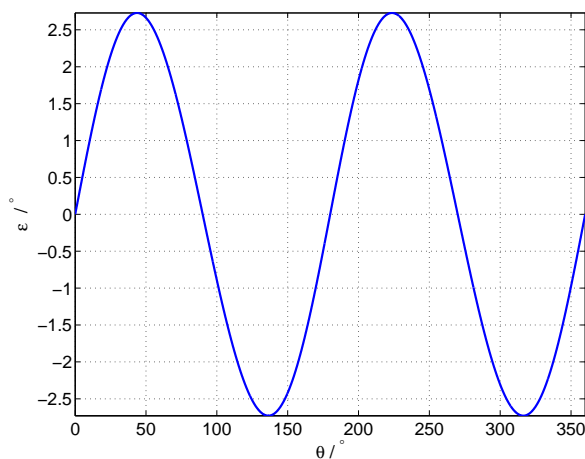
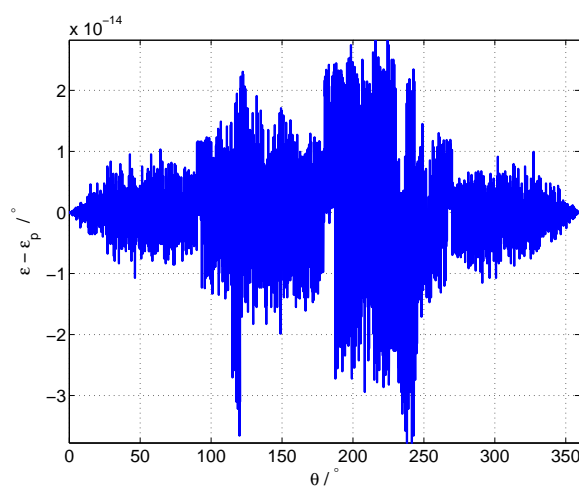
Potek ε se lahko zapiše s Fourierovo vrsto [10]:

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

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

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

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

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

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

4.2 Različne enosmerne komponente

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

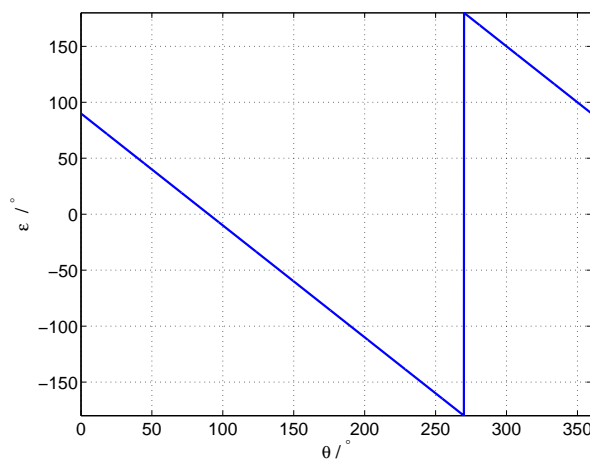
$$B_{sin} = \sin(\theta) + B_0 \quad (4.6)$$

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

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

4.2.1 Enosmerna komponenta v signalu B_{sin}

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



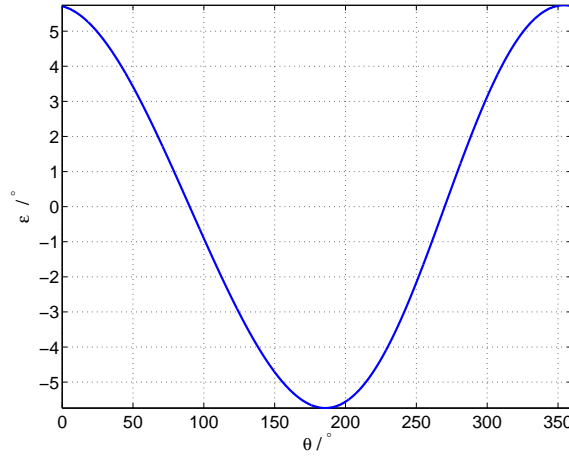
Slika 4.4: ε ob limiti B_0 v neskončnost

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

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

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

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



Slika 4.5: ε pri $B_0 = 0,1$

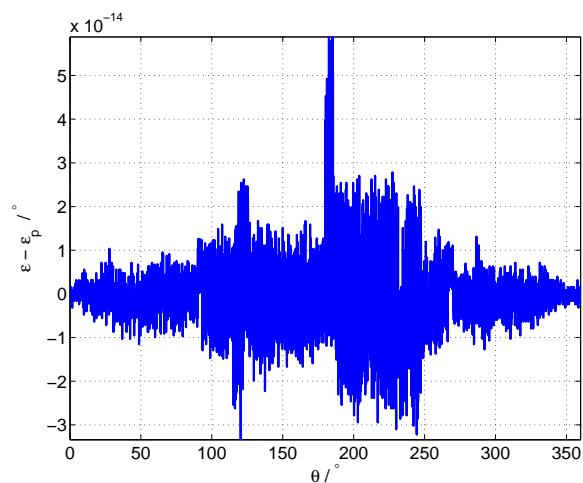
4.2.2 Enosmerna komponenta signala B_{cos}

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

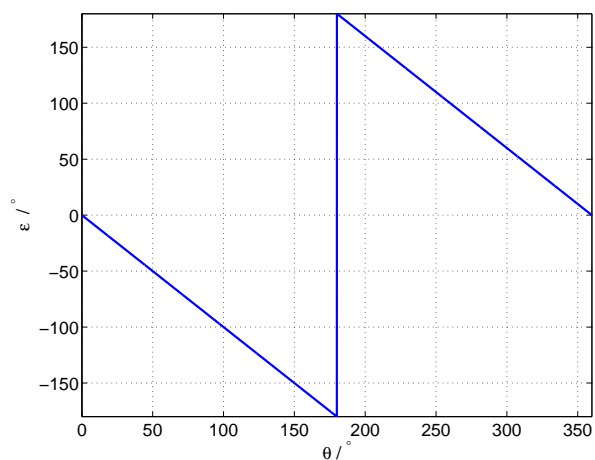
$$\lim_{a_0 \rightarrow \infty} \text{atan2}(\sin \theta, \cos \theta + A_0) \quad (4.10)$$

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

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



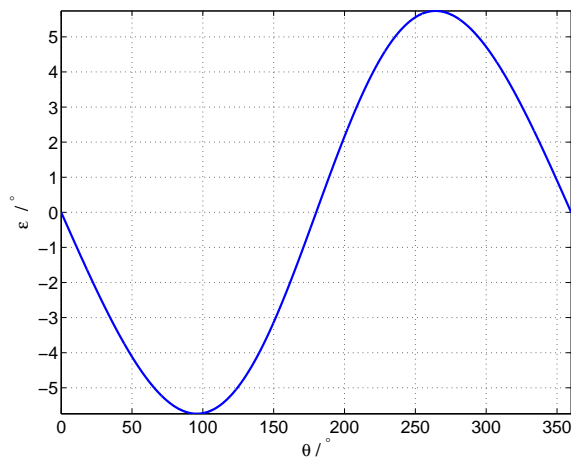
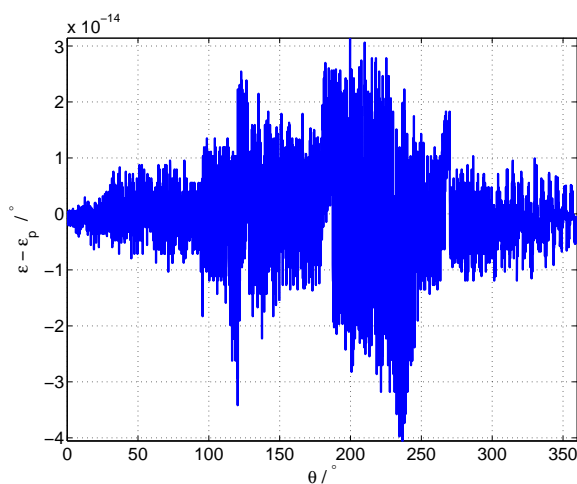
Slika 4.6: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d in napako izračunano z (4.9) pri $B_0 = 0,1$ in uporabi prvih 20 členov vrste (4.9)



Slika 4.7: ε ob limiti A_0 v neskončnost

Potek napake v odvisnosti od A_0 je (4.12)

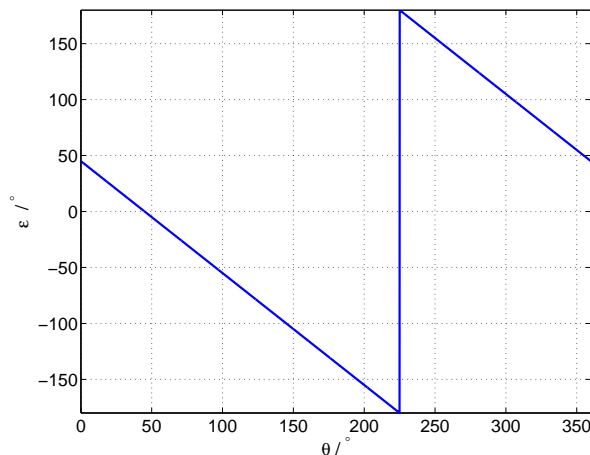
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-|A_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta), & A_0 \leq -1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{A_0^n}{n} \sin(n\theta), & |A_0| \leq 1 \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2-A_0^{-n}}{n} \sin(n\theta),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

Slika 4.8: ε pri $A_0 = 0,1$ Slika 4.9: Razlika med napako izračunano s funkcijo atan2d(); in napako izračunano z (4.12) pri $A_0 = 0,1$ in uporabi prvih 20 členov vrste (4.12)

4.2.3 Enosmerna komponenta pri obeh signalih

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

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



Slika 4.10: ε ob limiti C_0 v neskončnost

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

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

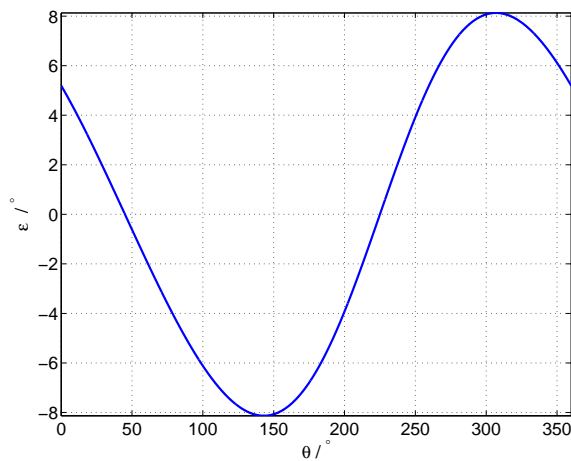
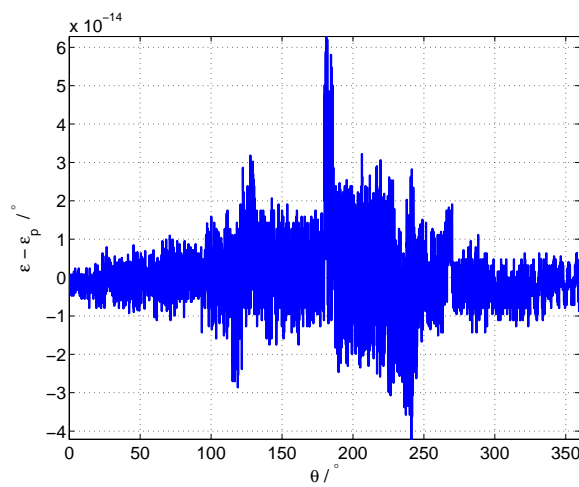
$$\varepsilon_p = \begin{cases} \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2-|\sqrt{2}C_0|^{-n}}{n} \sin(n\theta + 90n), & C_0 \leq -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sqrt{2}C_0)^n}{n} \sin(n\theta - 90n), & |C_0| \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{180}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty}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

4.3 Neorotogonalnost signalov

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

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

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

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

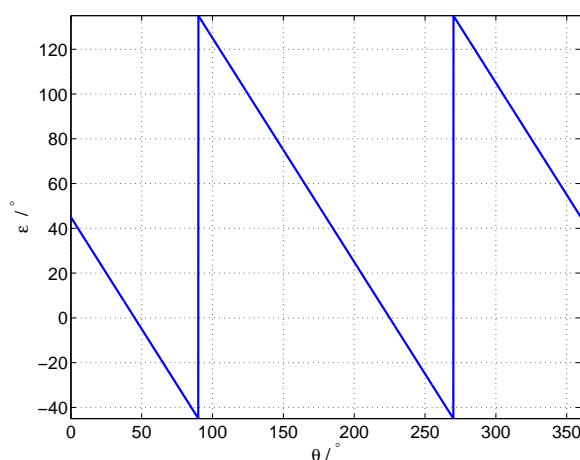
Napako se določi za vsakega od parametrov posamično. Drugi je takrat enak 0. Na koncu se enačbi združi.

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

možnosti, ki je pri $\pm 90^\circ$:

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

Potek napake ε s slike 4.13 predstavi vrsta (4.18).



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

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

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

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

4.4 Napaka zaradi spremembe amplitude in faze zaradi enega parametra

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

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

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

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

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

Pri čemer velja:

$$\Delta_c > -C_1$$

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

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

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

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

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

Pri čemer velja:

$$\Delta_s > -C_1$$

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

Literatura

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

- [8] iC Haus, “High-precision sine/cosine interpolation / white paper.” Dosegljivo: http://www.ichaus.de/upload/pdf/WP7en_High-Precision_Interpolation_140124.pdf.
- [9] MathWorks. Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2d.html>.
- [10] G. Dolinar, *Matematika 1*. Založba FE in FRI.
- [11] MathWorks. Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/atan2d.html>.
- [12] J. Lara, “Position error compensation in quadrature analog magnetic encoders through an iterative optimization algorithm,” v *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*.
- [13] Q. Lin, T. Li in Z. Zhou, “Error analysis and compensation of the orthogonal magnetic encoder,” v *IEEE ICMCC Conference*.
- [14] D. Hanselman, “Resolver signal requirements for high accuracy resolver-to-digital conversion,” 37.
- [15] MathWorks. Dosegljivo: <https://www.mathworks.com/products/curvefitting.html>.