

OPTIČKI SENZOR STRUJE SA FEROMAGNETSKIM PRSTENOM

Sanja Zlatanović, Peđa Mihailović, Goran Mašanović, Jovan Radunović
Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Sadržaj - U radu je opisan optički senzor intenziteta električne struje sa poboljšanom osetljivošću. Uvedeno poboljšanje postignuto je primenom feromagnetskog prstena. Dati su rezultati merenja i upoređeni proračuni za slučaj senzora sa feromagnetskim prstenom i za slučaj senzora bez feromagnetskog prstena.

1. UVOD

Optički, senzori se odlikuju nizom prednosti u odnosu na standardne senzore. Jedna od najznačajnijih je imunost na elektromagnetske smetnje.

Beskontaktni senzor intenziteta električne struje, prikazan u ovom radu, radi na principu Faradejevog efekta. Ovaj efekat je naročito izražen kod polumagnetskih poluprovodničkih kristala koji se nalaze u magnetskom polju. Kad se kroz ovakav kristal u pravcu magnetskog polja propusti linearno polarizovana svetlost, dolazi do rotiranja ravni polarizacije.

Princip merenja struje zasniva se na činjenici da svaki strujni provodnik u svojoj okolini stvara magnetsko polje čija je jačina direktno proporcionalna intenzitetu struje. Jedna realizacija senzora struje na ovom principu opisana je u [1].

Za razliku od fiberoptičkog unutrašnjeg senzora kod kojeg je potrebna velika dužina optičkog vlakna za postizanje značajne osetljivosti [2], ili senzora kod koga je korišćeno staklo kao osetljivi element [3], u ovom senzoru je korišćen CdMnTe koji pripada klasi polumagnetskih poluprovodnika.

U ovom radu dati su rezultati istraživanja koji se odnose na povećanje osetljivosti optičkog senzora struje na bazi Faradejevog efekta primenom feromagnetskog prstena. Prsten pojačava magnetsko polje strujnog provodnika. Rezultati proračuna feromagnetskog kola i optičkog sistema upoređeni su sa izmerenim vrednostima izlaznog signala senzora.

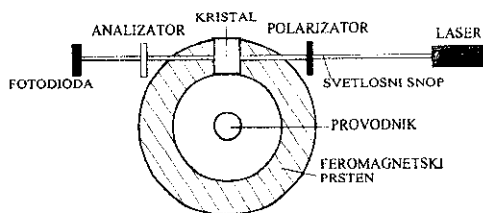
2. PRORAČUN FEROMAGNETSKOG KOLA

Svetlosni snop He-Ne lasera prolazi kroz polarizator i otvor u feromagnetiku i dolazi do kristala koji se nalazi u procepu feromagnetskog prstena. Pod uticajem magnetskog polja indukovanoj strujom u provodniku, u kristalu dolazi do Faradejeve rotacije ravni polarizacije svetlosti.

Ugao rotacije ravni polarizacije θ direktno zavisi od jačine primenjene magnetske indukcije B , od dužine kristala l i karakteristika kristala koje su opisane Verdeovom konstantom V [4]:

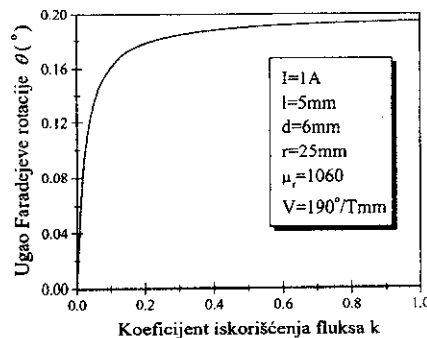
$$\theta = VBl \quad (1)$$

Posle prolaska kroz analizator snop dolazi do fotodiode. Usled modulacije polarizacije svetlosti, dolazi do modulacije njenog intenziteta.



Sl.1. Šema senzora intenziteta električne struje

Na Sl.1 data je šema realizovanog senzora kod koga se za povećanje osetljivosti koristi feromagnetski prsten. U centru feromagnetskog prstena nalazi se provodnik kroz koji teče struja. Ovaj provodnik stvara u okolini magnetsko polje. U procepu feromagnetskog prstena je smešten kristal CdMnTe. Magnetsko polje u procepu je jače od polja koje bi postojalo bez feromagnetskog prstena. Pojačanje polja zavisi od dimenzija procepa i magnetske permeabilnosti feromagnetskog materijala koji se koristi.



Sl.2. Zavisnost ugla rotacije od koeficijenta iskorišćenja

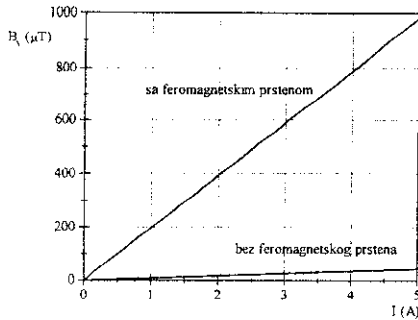
Kod ovog senzora korišćeno je meko gvožđe, čija je relativna magnetska permeabilnost $\mu_r=1060$. Ovaj materijal je meki feromagnetik, što znači da ima jako uzan histerezis. U opsegu u kome vršimo merenja njegova histerezisna karakteristika je praktično linearna. Poluprečnik feromagnetskog prstena je $r=25\text{mm}$. Veličina procepa je $d=6\text{mm}$. Poprečni presek prstena je oblika kvadrata stranice 10mm . Vazdušni procep je velikih dimenzija u odnosu na dimenzije feromagnetskog prstena, te je zato i rasipanje fluksa veliko i iznosi 60% za ovaj slučaj. Koeficijent iskorišćenja fluksa, koji se odnosi na deo ukupnog fluksa koji ostaje u procepu, u ovom slučaju je $k=0.4$.

Magnetska indukcija u vazдушnom procepu određena je izrazom [3]:

$$B_v = \frac{\mu_0 I}{\frac{2\pi r}{k\mu_r} + d \left(1 - \frac{1}{k\mu_r}\right)} \quad (2)$$

Koeficijent iskorišćenja fluksa zavisi od oblika feromagnetskog prstena, i oblika i veličine njegovog poprečnog preseka na procepu. Na Sl.2 prikazana je zavisnost ugla rotacije θ od koeficijenta iskorišćenja fluksa, za struju od 1A, koja je dobijena na osnovu (2).

Sa Sl.2 se može videti da se ugao rotacije malo menja sa povećanjem koeficijenta iskorišćenja fluksa iznad vrednosti 0.2. Dakle, za osetljivost merenja važno je da koeficijent iskorišćenja fluksa bude malo veći od 0.2.



Sl.3. Zavisnost magnetske indukcije od intenziteta struje za senzor sa feromagnetskim prstenom i senzor bez feromagnetskog prstena

Na Sl.3 su prikazane teorijski dobijene zavisnosti magnetske indukcije od intenziteta struje za slučaj senzora sa feromagnetskim prstenom i bez njega. Vidi se da feromagnetski prsten povećava magnetsku indukciju za jedan red veličine.

3. PRORAČUN OPTIČKOG SISTEMA

Po izlasku iz kristala svetlost prolazi kroz analizator, a zatim pada na fotodiodu koja meri intenzitet svetlosti. Intenzitet svetlosti zavisi od položaja ravni polarizacije u odnosu na osu analizatora, odnosno zavisi od ugla rotacije.

Snaga laserskog snopa P_0 za He-Ne laser je 1mW. Pri prolasku kroz elemente sistema, polarizator, kristal, analizator i sočivo, apsorbiruje se 96% upadne snage zračenja, odnosno koeficijent transmisije sistema je $\tau=0.04$.

Snaga koju će detektovati fotodioda kad nema magnetskog polja je

$$P' = \tau P_0 \cos^2 \varphi, \quad (3)$$

gde je φ ugao pod kojim su međusobno postavljene ose polarizatora i analizatora. Snaga koju detektuje fotodioda kad je uključeno magnetsko polje je

$$P'' = \tau P_0 \cos^2(\varphi - \theta), \quad (4)$$

gde je θ ugao Faradejeve rotacije.

Da bismo povećali osetljivost merenja merimo samo onaj deo signala koji nastaje usled modulacije magnetskim poljem. Vrednost signala se dobija kao razlika snaga zračenja datih jednačinama (4) i (3).

Ako posmatramo male magnetske indukcije B , onda su i Faradejevi uglovi mali, pa se maksimalana osetljivost merenje postiže kad je ugao između polarizatora i analizatora $\varphi=45^\circ$. Tada je snaga koja nastaje usled modulacije magnetskim poljem [1]

$$\Delta P = \frac{1}{2} \tau P_0 \sin 2\theta. \quad (5)$$

Osetljivost fotodiode na talasnoj dužini He-Ne lasera ($\lambda=638.2\text{nm}$) je $R_F=0.43\text{A/W}$. Struja fotodiode je

$$I_F = R_F P, \quad (6)$$

gde je P snaga zračenja koje dospeva na fotodiodu.

Fotodioda se nalazi u kolu transimpedans pojačavača čiji je izlazni napon

$$V = I_F R = R_F R P, \quad (7)$$

gde je R otpornik u kolu transimpedans pojačavača.

Osnovnom kolu transimpedans pojačavača pridodato je prati-parnti kolo, čiji je cilj da izdvoji onu komponentu signala koja nastaje usled prisustva magnetskog polja. Napon na izlazu ovog kola je

$$\Delta V = V_0 \sin \beta I, \quad (8)$$

gde je amplituda $V_0 = \frac{1}{2} \tau P_0 R_F R$, a $\beta = \frac{2\mu_0 V I}{\frac{2\pi r - d}{k\mu_r} + d}$.

Vrednost otpornika je $R=860\text{k}\Omega$, pa se korišćenjem ostalih već datih vrednosti dobija $V_0=7.39\text{V}$ i $\beta=0.376^\circ/\text{A}$.

Najmanja vrednost struje koja se može meriti ovim senzorom je 30mA. Teorijski maksimalna struja koju senzor može meriti je 240A. Za tu struju ugao Faradejeve rotacije je 45° . Za uglove veće od 45° izlazni signal počinje da opada zbog sinusne zavisnosti, pa merenje prestaje da bude jednoznačno. Što se tiče histerezisne karakteristike feromagnetskog prstena, ona ne predstavlja ograničavajući faktor za maksimalnu struju, jer se zasićenje na krivoj magnetoćenja dobija za vrednosti struje mnogo veće od 240A. U ovom mernom opsegu moguće je krivu magnetoćenja aproksimirati linearnom karakteristikom.

4. REZULTATI MERENJA

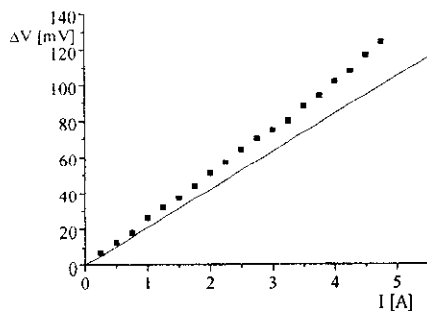
Kroz provodnik je propuštana jednosmerna struja iz strujnog izvora sa korakom promene od 250mA.

U senzoru je korišćen kristal $\text{Cd}_{0.57}\text{Mn}_{0.43}\text{Te}$. Ovaj kristal pripada klasi polumagnetskih poluprovodnika i odlikuje se velikom vrednošću Faradejeve rotacije, koja potiče od izmenske interakcije Mn jona sa zonskim nosiocima koji ulaze u sastav eksitona. Dobijen je modifikovanim Bridžmanovim postupkom. Osim velike vrednosti Verdeove konstante CdMnTe ima odlične frekvencijske i temperaturne osobine. Kao svetlosni izvor korišćen je He-Ne laser. Talasna dužina svetlosti He-Ne lasera je 682.8nm. Na toj talasnoj dužini kristal $\text{Cd}_{0.57}\text{Mn}_{0.43}\text{Te}$ ima najveću osetljivost i najveću vrednost za Verdeovu konstantu, koja iznosi $190^\circ/\text{Tmm}$ [5].

Kristal $Cd_{0.43}Mn_{0.57}Te$ je dužine $l=5\text{mm}$. Za relativnu magnetsku permeabilnost kristala smatramo da je bliska jedinici, jer je reč o paramagnetiku.

Feromagnetski prsten izrađen je od mekog gvožđa, čija je relativna magnetska permeabilnost 1060. Meko gvožđe ima jako uzanu histerezisnu karakteristiku, i za male vrednosti polja može se smatrati da je linearan i homogen materijal.

Dobijeni rezultati grafički su predstavljeni na Sl.4. Vidi da je zavisnost približno linearna, što je očekivan rezultat, dobijen i teorijskim razmatranjem. Izmerena osetljivost senzorskog sistema iznosi 24mV/A . Na Sl.4 upoređeni su rezultati merenja sa teorijskim proračunom (puna linija na grafiku). Vrednost koeficijenta iskorišćenja k izmerena je pomoću Holovog senzora. Korišćenjem ove vrednosti dobija se da je teorijska osetljivost merenja 21mV/A .



Sl.4. Poređenje teorijske i eksperimentalne krive (■ - eksperimentalni rezultati, — teorijski proračun)

5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazano jedno rešenje za realizaciju beskontaktnog senzora intenziteta struje na principu Faradejevog efekta, kod koga se za povećanje osetljivosti merenja koristi feromagnetski prsten.

Izmerena zavisnost izlaznog signala od struje kroz provodnik u opsegu promena struje od 0 do 5A (kada su uglovi Faradejeve rotacije manji od 2°) je linearna, što je u saglasnosti sa prikazanim proračunom.

Vršena su merenja intenziteta jednosmerne struje. Rezultati merenja su reproduktivni nezavisno od smera promene struje, odnosno senzor se može koristiti i za merenje trenutne vrednosti naizmenične struje. Uz korišćenje odgovarajućih feromagnetika i daljim razvojem elektronskih kola za merenje signala fotodiode može se koristiti i za merenje struje visokih frekvencija.

Umesto $CdMnTe$ u senzoru bi se mogli koristiti garneti, ali samo za merenje malih struja, zato što imaju izražen histerezis. Za proučavanje je vrlo interesantan $GaGd$ -garnet zbog prilično velike vrednosti Verdeove konstante, kao i zbog velike transparentnosti u vidljivom i IC području.

Primenjeni princip povećava osetljivost merenja. Sa realizovanim elektronskim mernim kolima ostvarena je osetljivost merenja od 24mV/A .

Realizovani optički senzor struje zadržava sve prednosti koje optički senzori struje imaju u odnosu na klasične strujne merne transformatore koji se koriste za merenja u elektroenergetskim sistemima. Te prednosti su:

- eliminisanje elektromagnetskih uticaja elektroenergetskih kola na kola za merenje i zaštitu
- mogućnost merenja viših harmonika struja kod pojedinih tipova industrijskih potrošača
- merenje prelaznih struja koje nastaju kod sklopnih operacija i kvarova.

REFERENCE

- [1] G. Mašanović, J. Radunović, "Magnetic field sensor based on Faraday effect", *J. Electrotech. Math.*, No 1, 1997, pp. 21-30.
- [2] T. F. Morse, "Overview of fibre optic research at Brown University", SPIE, 1169, *Fibre Optic and Laser Sensors VII*, 1989, pp. 30-41.
- [3] G. Li, M.G. Kong, G.R. Jones, J.W. Spencer, "Sensitivity Improvement of an Optical Current Sensor with Enhanced Faraday Rotation", *J. of Lightwave Tech.*, vol.15, 1997, pp. 2246-2252.
- [4] A. Yariv, *Optical Electronics in Modern Communications*, Oxford University Press, 1997.
- [5] S.N. Barybin, A.N. Grigorenko, V.I. Konov, P.I. Nikitin, "Magnetic field fibre-optical sensors based on Faraday effect", *Sensors and actuators*, vol. A25-A27, 1991, pp. 767-774

Abstract - This paper presents an optical current sensor with improved sensitivity. The application of a ferromagnetic concentrator has resulted in an improvement of sensor's sensitivity. The measurement results are given and compared to the calculation results for sensor with and without ferromagnetic ring.

OPTICAL CURRENT SENSOR WITH FEROMAGNETIC RING

Sanja Zlatanović, Peđa Mihailović, Goran Mašanović, Jovan Radunović