

# Upravljanje elektromagnetom za kalibraciju magnetnih senzora pomoću softverskog paketa LabVIEW

## Control of Electromagnet for Magnetic Sensor Calibration by software package LabVIEW

Bojan Jovanović, Marjan Blagojević  
„SENTRONIS”A.D. Niš

**Sadržaj** – Upravljanje elektromagnetom izvršeno je u otvorenoj povratnoj petlji. Celim procesom upravlja se pomoću računara, korišćenjem grafički-orijentisanog softverskog paketa LabVIEW. To je ostvareno zahvaljujući tome što znamo prenosnu funkciju elektromagneta (izvršni organ). Prenosna funkcija dobijena je na osnovu krive magnećenja i zadatog zazora između magnetnih polova. Svrha sistema je da na osnovu zadatog magnetnog polja u mT i rastojanja između magnetnih polova (parametri koje zadaje korisnik) uspostavi zadato polje između polova. Polje je u prostoru između polova homogeno i služi za kalibraciju magnetnih senzora. U radu je najpre prikazan sistem na globalnom nivou kao i razlozi za njegovo uvođenje. Nakon toga je detaljnije opisan svaki deo sistema. Posebna pažnja je posvećena rutinama u LabVIEW programu koje upravljaju celokupnim sistemom.

**Abstract** – Control of magnet is realized in open loop. The whole process is controlled by PC, using LabVIEW which is software package for graphical programming. It is all done knowing the transfer function of electromagnet. Transfer function is obtained based on the magnetisation curve and the determined air gap between the electromagnet poles. The purpose of the system is to set up determined magnetic field in the gap. Desired magnetic field expressed in mT and the air gap expressed in mm are the input parameters. The magnetic field is homogenous in a region between the poles. Having that homogenous magnetic field we can calibrate magnetic sensors. At the beginning, the system on the global level as well as the reasons of its initiation are introduced. After that, each part of the system is described with more details. The LabVIEW program routines which control the whole process are particularly explained.

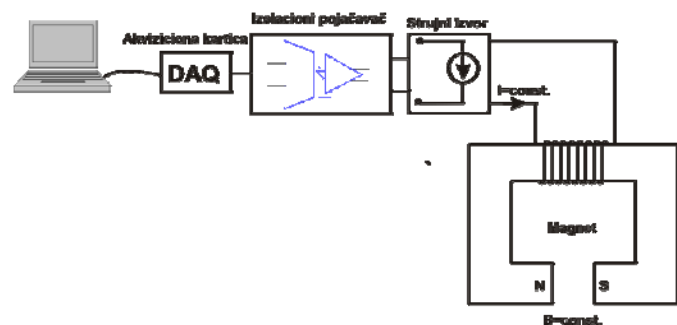
### 1. UVOD

Kalibracija magnetnih pretvarača zahteva da se u homogenom magnetnom polju nađu referentna sonda i sonda testiranog pretvarača. Kalibracija se vrši u više tačaka koje su približno ekvidistantne. Što se tiče magnetnog polja, nije potrebno da tačke budu strogo ekvidistantne već mogu da odstupaju  $\pm 10\%$  od željene vrednosti. Pre automatizacije, podešavanje magnetnog polja vršeno je ručnom regulacijom naponski

kontrolisanog strujnog izvora. Operater rukom okreće potenciometar i gleda vrednost magnetnog polja na teslametru. Ovakav način rada je dosta zamoran, monoton i zahteva dosta vremena. Da bi se ubrzao proces kalibracije magnetnih senzora u „SENTRONIS”A.D. pristupilo se automatizaciji ovog procesa. Automatizacija se sastoji u tome da operater na računaru, u LabVIEW programu kao ulazne parametre unese željenu vrednost magnetnog polja izraženu u mT i vazdušni procep između polova magneta izražen u mm. Nakon toga se posle izvršenja LabVIEW programskih rutina između polova magneta uspostavi željeno homogeno magnetno polje. Kao što je rečeno, magnetno polje može da odstupa  $\pm 10\%$  od željene vrednosti što nam daje slobodu da zanemarimo postojeći histerezis feromagnetnog jezgra. Krivu magnećenja takođe možemo zameniti segmentima pravih linija. Međutim, merenje polja za zadata tačku zahteva visoku tačnost i vrši se NMR teslametrom PT2025 čija je tačnost 5ppm.

### 2. ELEMENTI SISTEMA

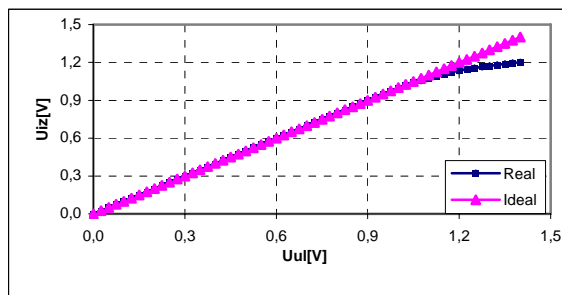
Elementi sistema prikazani su na slici 1.



Slika 1. Elementi sistema

- Na početku lanca je računar na kome se nalazi kreiran LabVIEW programom.
- DAQ je 16-to bitna akviziciona kartica NI PCI-6036E. Ima 16 analognih ulaza (16 single ended/8 differential), PCI bus, 200KS/s, ulazi  $\pm 10V$  do  $\pm 0.05 V$ , 4 ulazna opsega, 2 analogna izlaza 10KS/s, 8 digitalnih ulaza/izlaza, dva 24-voro bitna brojača/tajmera, digitalno trigerovanje
- U lancu se nalazi i izolacioni pojačavač. Osnovni razlog za njegovo uvođenje je bezbednost akvizicione kartice. U slučaju kvara na energetskejoj elektronici i slučajnih

fluktuacija napona sa mreže može se javiti prenapon na kartici i uzrokovati njen kvar. Izolacioni pojačavač baziran je na optokaplreskoj komponenti HCPL7800. Idealno, on bi trebalo da ima prenosni odnos 1:1, tj. da se napon na njegovom ulazu propusti na izlaz bez promene. Izmerena prenosna karakteristika izolacionog pojačavača zajedno sa idealnom prenosnom karakteristikom prikazane su na slici 2.

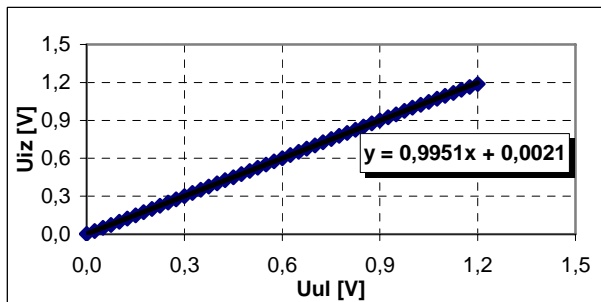


Slika 2. Prenosna funkcija realnog i idealnog izolacionog pojačavača

Prenosna funkcija snimljena je u opsegu 0 – 1.4V. Sa grafika prenosne karakteristike vidi se da za ulazne napone do oko 1V izolacioni pojačavač ima prenosni odnos 1:1 i da počinje da ulazi u zasićenje za ulazne napone veće od 1V. Takođe se vidi i da je maksimalna vrednost na izlazu izolacionog pojačavača oko 1.2V. Za linearizaciju prenosne karakteristike korišćen je podprogram *Linearizacija prenosne karakteristike izolacionog pojačavača.vi*. Linearizacija je izvršena za opseg ulaznih napona 0.95 – 1.2V i to na sledeći način. Opseg nelinearnosti izolacionog pojačavača podeljen je na 5 podopsega: (0.95-1), (1-1.05), (1.05-1.1), [1.1-1.15), [1.15-1.2V]. Za svaki podopseg prenosna karakteristika je aproksimirana polinomom drugog reda i proračunato je odstupanje od idealne prenosne karakteristike. Ono je takođe predstavljeno polinomom drugog stepena:

LabVIEW program za linearizaciju posmatra vrednost napona koji se dovodi na ulaz izolacionog pojačavača. Svaki put kad je ulazni napon u nelinearnom delu karakteristike određuje se u kom je podopsegu od pomenutih pet i proračuna se odstupanje. Ulaznom naponu dodaje se vrednost odstupanja u voltima kako bi se i na izlazu uspostavio naponski nivo jednak ulaznom. Pomenuta metoda linearizacije je poprilično gruba ali daje zadovoljavajuće rezultate imajući u vidu zahtevanu tačnost celokupnog sistema.

Prenosna karakteristika izolacionog pojačavača nakon linearizacije prikazana je na slici 3.



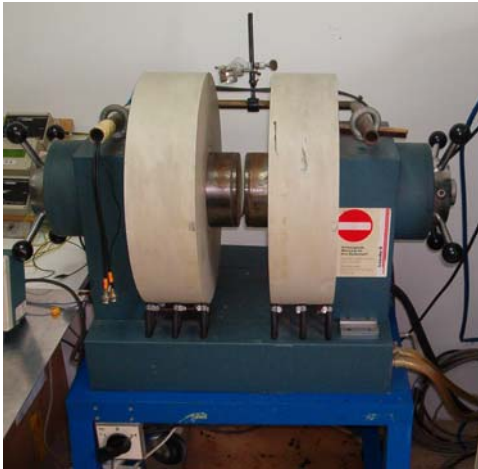
Slika 3. Prenosna funkcija izolacionog pojačavača nakon linearizacije

- Strujni izvor, drajver elektromagneta je BRUKER B-MN C5, prikazan na slici 4.



Slika 4. Drajver elektromagneta B-MN C5

- Na kraju lance je elektromagnet BRUKER B-E 15. Ima mogućnost ručne regulacije vazdušnog procepa u opsegu od 0 do 100mm, prečnik pola od 150mm, vodeno hlađenje i 30A maksimalne struje po namotaju. Prikazan je na slici 5.



Slika5. Elektromagnet BRUKER B-E 15

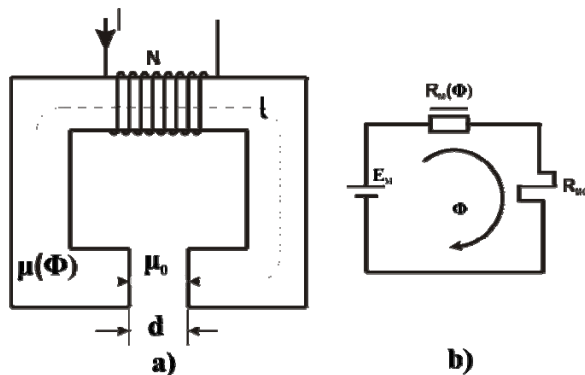
### 3. ODREĐIVANJE KRIVE MAGNEĆENJA

Magnetsko kolo je skup sredina koje obrazuju put po kome se zatvara magnetski fluks [4]. Magnetsko kolo našeg sistema kao i njegova ekvivalentna šema prikazani su na slici 6. Parametri kola sa slike 6 b) su sledeći:

$E_M = N \cdot I$  je magnetopobudna sila, a  $R_{M0} = \frac{d}{\mu_0 \cdot S}$  i

$R_M(\phi) = \frac{l}{\mu(\phi) \cdot S}$  predstavljaju magnetske otpornosti

vazdušnog procepa i gvođenog jezgra.  $R_M$  zavisi od magnetskog fluksa odnosno od magnetizacionog polja  $H$  pa se ponaša kao nelinearan otpornik, dok se vazdušni procep ponaša se kao linearan otpornik

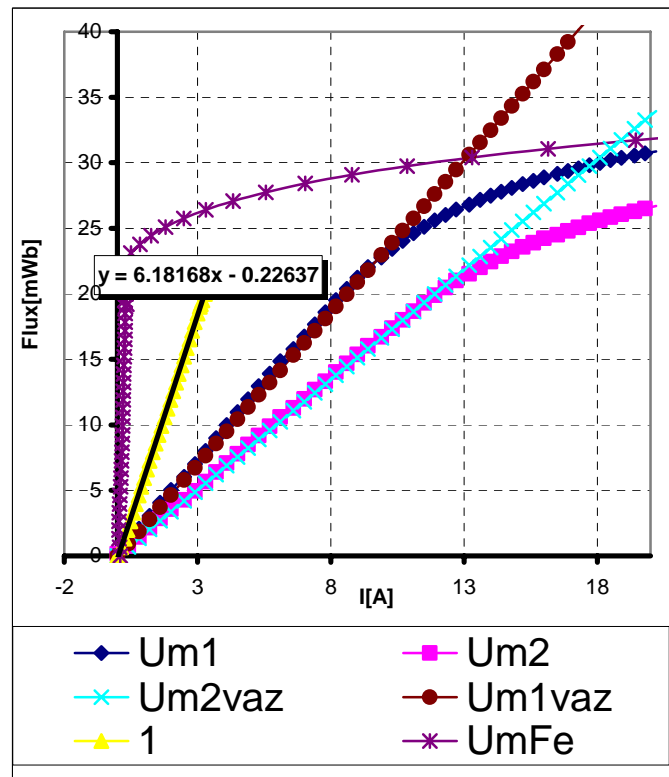


Slika 6. Magnetsko kolo sistema a) i njegova ekvivalentna šema b)

Magnetski fluks prožima dve sredine: feromagnetik magnetne propustljivosti  $\mu$  i vazdušni procep magnetne propustljivosti  $\mu_0$ . Kriva magnetizacije  $B=f(H)$ , predstavlja zavisnost magnetske indukcije  $B$  od jačine magnetizacionog polja  $H$ . S obzirom na to da je jačina magnetizacionog polja proporcionalna struji koja teče

kroz navojke ( $H = N \cdot I$ ), a magnetski fluks proporcionalan magnetskoj indukciji ( $\phi = BS$ ), zavisnost magnetskog fluksa od struje ima oblik krive magnećenja. Rezultujuća kriva magnećenja zbir je krive magnećenja feromagnetnog materijala i prave  $\phi = \mu_0 \frac{S}{d} NI$  koja predstavlja magnetnu karakteristiku

vazdušnog procepa. Analogni izrazi i zakoni magnetskih i električnih kola daju mogućnost da se svako magnetsko kolo predstavi ekvivalentnim električnim kolom i rešava kao električno. Kako magnetsko kolo sadrži feromagnetik to će ekvivalentno kolo biti nelinearno i rešavaće se metodom za nelinearna električna kola [1]. Prvi cilj nam je bio da nađemo krivu magnećenja jezgra, i to smo uradili na sledeći način. Snimamo krivu magnećenja za dva različita vazdušna procepa  $d_1$  i  $d_2$ .



Slika 7. Krive magnećenja

Na apscisi je magnetski napon (odgovara električnom naponu), a na ordinati magnetski fluks (odgovara struji). Kriva  $U_{M1}$  sa slike 7. predstavlja zbir magnetskih napona na feromagnetiku i vazdušnom procepu  $d_1$ . Kriva  $U_{M2}$  predstavlja zbir magnetskih napona na feromagnetiku i vazdušnom procepu  $d_2$ . To je dato sledećim jednačinama:

$$U_{M1} = U_{M1vaz} + U_{M1Fe} \quad (1)$$

$$U_{M2} = U_{M2vaz} + U_{M2Fe} \quad (2)$$

Magnetski napon na feromagnetiku je znatno manji od magnetskog napona na vazdušnom procepu. Za mala polja je praktično nula i raste kako feromagnetik ulazi u zasićenje. Kada se menja vazdušni procep menja se i dužina srednje linije kroz feromagnetik ( $l$  na slici 6 a). Dužina srednje linije

kroz jezgro za vazdušni procep od 14.5mm je oko 1530mm. Kada se vazdušni procep poveća na 20mm dužina srednje linije kroz feromagnetik se smanji za oko 0,3%. Kako je ovo veoma mala promena možemo smatrati da je magnetski napon na feromagnetiku konstantan bez obzira na promenu vazdušnog procepa tj.  $U_{M1Fe} = U_{M2Fe}$ . Sada je razlika jednačina (1) i (2):

$$U_{M1} - U_{M2} = U_{M1vaz} - U_{M2vaz} = \frac{NI}{R_{M1vaz}} - \frac{NI}{R_{M2vaz}} \quad (3)$$

Razlika  $U_{M1} - U_{M2}$  je prava 1 na slici 7, čiji koeficijent (k) nagiba određujemo iz excela pomoću trendline-a. Sada jednačina (3) postaje:

$$kI = \frac{NI}{d_1} - \frac{NI}{d_2} \quad (4)$$

$$\frac{NI}{\mu_0 S} \quad \frac{NI}{\mu_0 S}$$

N je broj amper-navoja. Da bismo rešili ovo nelinearno kolo treba da odredimo broj amper navoja N, sve ostalo su poznate veličine.

$$N = \frac{kd_1 d_2}{\mu_0 S (d_2 - d_1)} \quad (5)$$

Znajući promenu magnetskog napona feromagnetika u zavisnosti od struje lako određujemo krivu magnećenja feromagnetika  $B=f(H)$ , što je i bio cilj. Rezultujući željeni magnetski napon (koji odgovara željenom magnetskom polju) dobijamo kada saberemo magnetski napon na jezgru i magnetski napon na vazdušnom procepu. Pri tom je kriva magnećenja aproksimirana nizom pravih. Iz novodobijene rezultujuće krive magnetskog napona lako određujemo potrebnu struju I za željeno polje.

Prilikom proračuna treba uzeti u obzir i zavisnost struje strujnog izvora od izlaznog napona izolacionog pojačavača (slika 1). Ova zavisnost je oblika

$$I[A] = 16.489604 \cdot U[V] - 0.029882$$

#### 4. LabVIEW PROGRAM (REALIZACIJA I REZULTAT)

Kao što je na početku spomenuto, LabVIEW je grafičko-orientisani programski jezik. Za razliku od uobičajenih tekstualno-orientisanih programskih jezika gde se programski kod ispisuje tekstualno, kod u LabVIEW jeziku predstavljen je blok dijagramom. Linije teksta zamenjene su grafičkim



Kada znamo N možemo da odredimo magnetski napon na vazdušnom procepu  $d_1$  (ili  $d_2$ ), i to je kriva  $U_{M1vaz}$  (odnosno  $U_{M2vaz}$ ) na slici 7. Magnetski napon na feromagnetiku  $U_{MFe}$  dobijamo kada od rezultujuće  $U_{M1}$  oduzmemo  $U_{M1vaz}$ .

ikonama u blok dijagramu. Izuzetnu primenu ovaj program nalazi u kontroli i upravljanju merenih uređaja i procesa [3]. Front panel našeg LabVIEW programa *Kalibracija magnetnih transducera.vi* prikazan je na slici 8. U toku svog rada ovaj program komunicira sa referentnim NMR teslometrom PT2025 čija je merna sonda postavljena u vazdušnom procepu magneta



i visokopreciznim stonim multimetrom AGILENT 34401A koji čita naponski signal sa magnetnog pretvarača koji se kalibriše. Komunikacija je ostvarena putem serijskih RS232 portova. Zato se na samom početku rada programa konfiguriraju serijski portovi (baud rate, bitovi podataka, parnost-neparnost, stop bitovi, flow control).

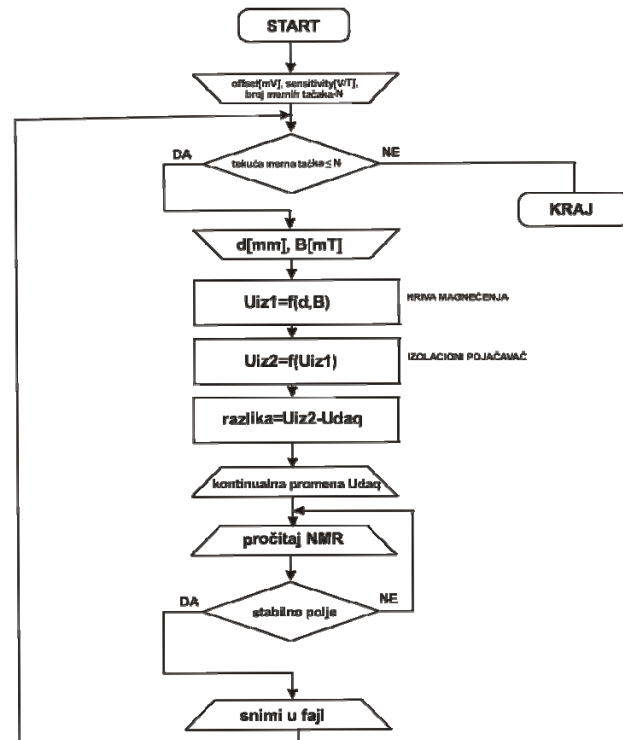
Na samom početku korisnik najpre unosi podatke o magnetnom transdjuseru, njegov offset[mV] i osetljivost[V/T] kao i broj mernih tačaka. Zatim unosi vrednost vazdušnog procepa d[mm]. Nakon toga unosi željenu vrednost magnetnog polja B[mT]. Klikom na dugme **Postavi magnetno polje** proračunava se vrednost napona koju treba postaviti na analognom izlazu 0 akvizicione kartice (DAQ). Naponski izlaz iz DAQ ograničen je na 1.5V zbog toga što je maksimalni ulazni napon izolacionog pojačavača 1.5V. U isto vreme se i očitava predhodno postavljeni napon na izlazu DAQ (za predhodnu mernu tačku) i proračunava se razlika između željenog i trenutnog napona na izlazu DAQ. U slučaju da je razlika pozitivna ona se dodaje trenutnoj vrednosti napona na izlazu akvizicione kartice, u suprotnom se oduzima. U oba slučaja, to se radi kontinualno. Naime, zbog velike induktivnosti elektromagneta ne smemo trenutno da menjamo struju kroz njegov kalem jer se mogu javiti prenaponi. Budući da izlaz iz DAQ ide u izolacioni pojačavač koristi se podprogram za linearizaciju njegove prenosne karakteristike. Pritiskom na dugme **Pročitaj NMR** zahteva se od NMR-a da LabVIEW programu pošalje vrednost magnetnog polja koju meri kao i informaciju o tome da li je polje stabilno. Ako je prvi karakter u stringu koji šalje NMR slovo L (od Locked), polje je vremenski i prostorno stabilno. To nam vizuelno indikuje polje **NMR Lock** na front panelu.

Na indikatoru **Ref.magn.polje[T]** prikazuje se referentno polje izraženo u Teslama. Kad polje postane stabilno pritiskom na dugme **Snimi tačku** u fajl *D:\Kalibracija senzora.txt* upisuje se vrednost magnetnog polja i naponski izlaz sa magnetnog transdjusera. U isto vreme se proračunava i relativna greška[%] i prikazuje na grafiku. Algoritam programa prikazan je na slici 9.

## 5. ZAKLJUČAK

Predhodno opisani sistem funkcioniše besprekorno već godinu dana. Umnogome je olakšao posao operatera koji radi na poslovima kalibracije magnetnih senzora.

Treba imati u vidu da se softverski paket LabVIEW koristi i za kontrolu drugih uređaja u „SENTRONIS”A.D., tako da su inženjeri unutar firme familijarni sa ovim programom. Kao moguće usavršavanje ovog opisanog procesa vidimo mogućnost da program sam na osnovu merenog polja i zadate struje odredi veličinu vazdušnog procepa.



Slika 9. Algoritam programa

## LITERATURA

- [1] Vorgančić A. "Osnovi elektrotehnike – Nelinearna kola jednosmerne struje", Univerzitet u Nišu, str. 52-63, Niš, 1986.
- [2] Shepherd B. "The Hall Probe Calibration System", ASTeC, Daresbury, 2005.
- [3] Nesimi E. "Electrical Circuits and Machines Laboratory with LabVIEW", University of Adelaide, pp 1-1 – 1-7, 2000
- [4] Surutka J. "Elektromagnetika", Građevinska knjiga, Beograd, 1965.