

ETALONIRANJE MERILA DC MAGNETSKOG POLJA

Dragana Naumović-Vuković, Slobodan Škundrić

Ključne reči: merila magnetskog polja, Hemholcov kalem, etaloniranje, merna nesigurnost

KRATAK SADRŽAJ

Merila jačine magnetskog polja i gustine magnetskog fliksa (magnetske indukcije) imaju vrlo široku oblast primene u industriji, rudarstvu, elektroenergtici, mašinstvu, medecini, ekologiji pa čak i u arheologiji. Kao i sva druga merila i ova merila podležu periodičnom etaloniranju radi potvrde njihovih metroloških karakteristika. U ovom radu prfikzan je deo problematike etaloniranja merila magnetskog polja, sa osvrtom na mernu metodu i korišćenu referentnu mernu opremu. Takođe, prikazan je postupak etaloniranja merila magnetskog polja za funkciju merenja DC magnetske indukcije u skladu sa standardom SRPS EN 61786-1. Razmatrane su takođe i uticajne veličine koje ulaze u proračun merne nesigurnosti etaloniranja za ovu vrstu merila.

CALIBRATION OF DC MAGNETIC FIELD METERS

Keywords: magnetic field meter, Helmholtz coil, calibration, uncertainty of measurement

ABSTRACT

Magnetic field meters are used for measurement of AC/DC magnetic flux density and magnetic field strength in industry, mining, residence, power utility objects, mechanical engineering, medicine, ecology even in archeology. In order to confirm their metrological properties, magnetic field meters are subject to periodic calibration, like all others measuring devices. The paper presents standard calibration methods for DC magnetic field meters in accordance with the requirements of the standard SRPS EN 61786-1 and measuring equipment that is used for that purpose. Also, the consideration of influencing quantities on the measurement uncertainty of the presented calibration methods is given.

UVOD

Merila AC/DC magnetskog polja imaju široku primenu u merenju jačine magnetskog polja i magnetske indukcije (gustine magnetskog fluksa) u industriji, saobraćaju, rudarstvu, elektroenergetici, mašinstvu, medicini, ekologiji pa čak i u arheologiji. Kao i sva druga merila i ova merila podležu periodičnom etaloniranju radi potvrde njihovih metroloških karakteristika. Preduslov za metrološki korektno etaloniranje ovih merila je realizacija homogenog magnetskog polja. Istorijski gledano, ovaj problem javio se pre više od sto godina kod etaloniranja magnetskih kompasu, a uspešno ga je rešio nemački fizičar Helmholtz (Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, 1821-1894) sa par identičnih kružnih kalemova paralelno postavljenih na rastojanju koje odgovara poluprečniku ovih kalemova. Postignuta homogenost (nepromenljivost) magnetskog polja tada je bila bolja od 1%. Kao što istorijski razvoj metrologije potvrđuje, sa napretkom tehnologije poboljšavani su i usavršavani kalemovi za generisanje homogenog magnetskog polja.

Elektrotehnički institut Nikola Tesla realizovao je jedan jednoosni Helmholtzov kalem HK 1, daleke 1964. godine za potrebe razvoja magnetskih merila u vojnoj industriji [1]. Za potrebe Geofizičkog zavoda bivše Jugoslavije, 1988. godine izrađen je jedan troosni Helmholtzov kalem [2]. Znanje i iskustvo iz ove oblasti, a i posedovanje potrebne merne opreme bile su osnova da se institut akredituje prema standard SRPS ISO/IEC 17025 za etaloniranje merila magnetskog polja [3].

U akreditovanoj laboratoriji Elektrotehničkog instituta Nikola Tesla a.d. iz Beograda (u daljem tekstu EINT) etaloniraju se merila AC/DC magnetske indukcije i jačine magnetskog polja. Metode etaloniranja su standardne u skladu sa SRPS EN 61786-1 [4]. U daljem tekstu, kao zajednički termin za merila AC/DC magnetske indukcije i jačine AC/DC magnetskog polja koristiće se termin - merila magnetskog polja.

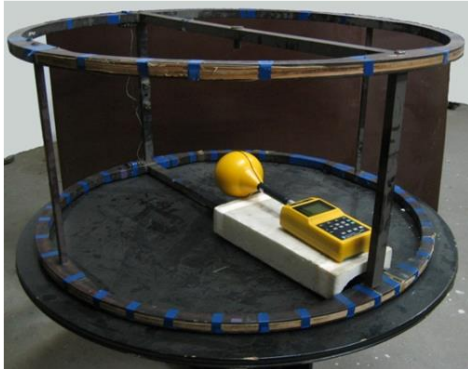
MERNA METODA

Metoda etaloniranja merila AC/DC magnetskog polja koja se koristi u Laboratoriji za ispitivanje i etaloniranje EINT svodi se na generisanje homogenog, stabilnog magnetskog polja, poznate vrednosti sa odgovarajućom mernom nesigurnošću. Magnetsko polje u osi Helmholtzovog kalema određeno je proizvodom konstante kalema i merene struje kroz navojke kalema.

Metoda etaloniranja merila magnetskog polja opisana je u standardu SRPSEN 61786-1 [4]. Etaloniranje ove vrste merila predstavlja poređenje poznate vrednosti magnetske indukcije i/ili jačine magnetskog polja sa izmerenim vrednostima istih na merilu koje se etalonira.

Za sprovođenje etaloniranja merila magnetskog polja koriste se dva Helmholtzova kalema, već navedeni tip HK-1 i novo razvijeni Helmholtzov kalem tip HK-3. Helmholtzovi kalemovi tip HK-1 prikazani su na slici 1. Na slici 1 je prikazan primer etaloniranja merila magnetnog polja koji imaju sondu sa kalemovima, koja može da meri jačinu polja i magnetsku indukciju u jednoj ili sve tri ose. Helmholtzovi kalemovi tip HK-3 prikazani su na slici 2 i projektovani su i realizovani 2020. godine za potrebe proširenja akreditacije Laboratorije za ispitivanje i etaloniranje [5]. Na slici 2 je prikazan primer etaloniranja merila magnetnog polja koji imaju sondu na bazi Holovog efekta.

Referentno magnetsko polje, u oba slučaja, generiše se propuštanjem AC/DC električne struje iz izvora napajanja kroz namotaje Helmholtzovih kalemova. Merenje struje se vrši referentnim ampermetrom koji je redno povezan u kolo sa izvorom napajanja i Helmholtzovim kalemovima. Ispitivano merilo magnetskog polja, odnosno mernu sondu, potrebno je uneti u polje i pozicionirati u sredini sistema Helmholtzovih kalemova, slika 1 i 2.



Slika 1. Helmholcovi kalemovi tip HK-1 [6]



Slika 2. Helmholcovi kalemovi tip HK-3

ODREĐIVANJE KONSTANTE HELMHOLCOVIH KALEMOVA

Šematski prikaz Helmholcovih kalemova prikazan je na slici 3. Konstruktivne karakteristike kalema navedene na slici 3. su: D_1 – spoljašnji prečnik, D_2 – unutrašnji prečnik, N – broj navojaka, D – srednji prečnik, $d=r=D/2$ rastojanje između kalemova. Intenzitet vektora magnetske indukcije i jačine polja u osi Helmholcovog kalema, izračunava se složenim matematičkim proračunom. Međutim nizom uprošćavanja matematičkog modela, moguće je doći do pojednostavljenog izraza za magnetsku indukciju B .

Intenzitet vektora magnetske indukcije u osi Helmholcovih kalemova se izračunava iz pojednostavljene formule, koja važi isključivo ako su kalemovi postavljeni na međusobnom rastojanju d koje je jednako poluprečniku kalemova r [1]:

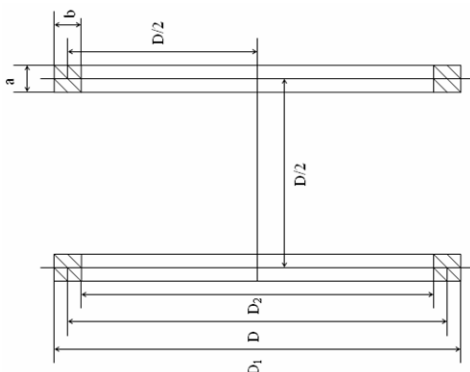
$$B = k \cdot I = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot r} \cdot \left\{ \left[1 + \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{r} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} + \left[1 + \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{r} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \right\} \quad (3)$$

gde je I vrednost struje propuštene kroz kalemove a $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T·m/A permeabilnost vakuuma. U centru ose simetrije kalemova, kada je $x = 0$, vrednost magnetske indukcije iznosi:

$$B = 0,7155 \cdot \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{r} \quad (4)$$

Konstanta kalema je tada jednaka:

$$k = 0,7155 \cdot \frac{\mu_0}{r} \cdot N \quad (5)$$



Slika 3. Šematski prikaz Helmholcovih kalemova

Tako se na osnovu tačno određenih dimenzija kalema i odgovarajućeg broja navojaka, može izračunati konstanta za konkretnu izvedbu Helmholcovih kalemova. Na osnovu gornjih jednačina za Helmholcov kalem tip HK1 vrednost konstante iznosi $k_1 = 2,321 \cdot 10^{-4}$ T/A [6], a za tip HK3, konstanta iznosi $k_3 = 10,02$ mT/A [5].

U zavisnosti od geometrije merila magnetskog polja odnosno njemu pripadajuće sonde, kao i njegovog deklarisanog mernog opsega, za etaloniranje u

Laboratoriji EINT se bira jedan od dva gore navedena Helmholtcova kalema.

ANALIZA MERNE NESIGURNOSTI

U ovom poglavlju data je analiza merne nesigurnosti za etaloniranje merila DC magnetskog polja sa Holovom sondom koja meri ukupnu magnetsku indukciju referentnog magnetskog polja unutar Helmholtcovih kalemova tip HK3. Matematički model greške meranja magnetske indukcije dat je jednačinom:

$$B_m - B_{RE} = \Delta g_m + \delta g_{m-rez} + \delta g_{RE} + \delta g_{RE-rez} + \delta g_{const-kal} + \delta g_{poz} + \delta g_{ems} + \delta g_{t-kal} \quad (6)$$

Matematičkim modelom greške merenja, jednačina (6) obuhvaćeni su sledeći izvori merne nesigurnosti: ponovljivost merenja, greška i rezolucija primenjenog etalon ampermetra (δg_{RE} i δg_{RE-rez} respektivno), rezolucija ispitivanog merila (δg_{m-rez}), greška u određivanju konstante kalema ($\delta g_{const-kal}$), greška usled pozicioniranja merne sonde (δg_{poz}), uticaj stranog elektromagnetnog polja (δg_{ems}), greška usled uticaja temperature na merni sistem (δg_{t-kal}). Na osnovu toga u proračunu kombinovane merne nesigurnosti obuhvaćeni su sledeće komponente:

- merna nesigurnost u određivanju konstante kalema,
- merna nesigurnost usled ponovljivosti merenja (standardna devijacija),
- merna nesigurnost usled greške primenjenog referentnog ampermetra,
- merna nesigurnost usled rezolucije primenjenog referentnog ampermetra,
- merna nesigurnost usled rezolucije etaloniranog merila,
- merna nesigurnost usled pozicioniranja i orjentisanja merne sonde,
- merna nesigurnost usled uticaja stranog elektromagnetnog polja,
- merna nesigurnost usled uticaja temperature na merni sistem.

Na određivanje greške konstante kalema najviše utiče tačnost merenja njegovih dimenzija i greška zaokruživanja vrednosti izračunate konstante. Navedene dimenzije kalema izmerene su sa pomičnim merilom, rezolucije 0,1mm i deklarirane greške $\pm 0,3\% \pm 0,1\text{mm}$. Dimenzije kalema su određene sa greškom koja ne prelazi 0,5%.

Izračunata vrednost konstante Helmholtcovih kalemova tip HK3 iznosu 10,02 mT/A. Ako se za konstantu kalema usvoji vrednost 10 mT/A tada se usled zaokruživanja vrednosti čini greška od 0,2%.

Na osnovu napred navedenih vrednosti greška određivanja konstante kalema se može odrediti prema sledećem izrazu:

$$g_{const-kal} = 2\sqrt{(0,5\%)^2 + (0,2\%)^2} = 0,6\% \quad (7)$$

Uticaj pozicioniranja Holove sonde u prostoru između kalemova, po y osi eksperimentalno je određena na sledeći način. Maksimalna razlika vrednosti polja na udaljenosti ± 10 mm od centra prostora između kalemova 0,96%. Ova vrednost je usvojena kao vrednost maksimalnog odstupanja vrednosti izmerenog polja kada se sonda postavi u krajnje položaje u prostoru između kalemova u odnosu na vrednost magnetskog polja kada je sonda pozicionirana u vođici, žljebu, na x osi. Greška pozicioniranja može biti maksimalno $\pm 1\text{mm}$, pa se ovaj uticaj na tačnost generisanog polja redukuje na približno 0,1%.

Na ovaj način je obezbeđen i uslov standarda da homogenost polja mora biti takva da obezbeđuje da najveće odstupanje intenziteta vektora magnetske indukcije od vrednosti intenziteta u osi kalemova bude manja od 1% na čitavoj površini poprečnog preseka sonde koja se etalonira.

Navedena procedura etaloniranja takođe obezbeđuje da je zadovoljen zahtev standarda da je vrednost intenziteta vektora magnetske indukcije u osi Helmholtcovih kalemova poznata sa nesigurnošću koja je

manja od $\pm 3\%$ pod uslovom da se obezbedi merenje struje sa potrebnom tačnošću, što je moguće lako ostvariti.

Analiziran je takođe i uticaj deklarisanе greške referentnog ampermetra i njegove rezolucije. Razmatrani su digitalni multimetri proizvođača FLUKE, tip 289 i proizvođača Agilent, tip 34401A za funkciju merenja struje, za merni opseg DC struje od 10 mA do 5 A. Ovaj opseg je izabran, jer su karakteristike Helmholtzovog kalema tip HK-3, utvrđene na osnovu njegove konstrukcije i sprovedenih ispitivanja, deklarisanе za generisanje homogenog magnetskog polja do 50 mT i za maksimalnu vrednost struje od 5 A u trajanju od 1 min. Utvrđeno je da rezolucija i deklarisanа greška referentnog navedenog ampermetra, bez obzira na proizvođača i tip utiče najviše 0,8 % od merene vrednosti u opsegu merenja magnetske indukcije od 0,001 mT do 50 mT.

Od stranih polja prilikom etaloniranja DC merila magnetskog polja prisutno je magnetsko polje Zemlje, tzv. geomagnetsko polje. Njegova vrednost izmerena u prostorijama Laboratorije EINT iznosi približno 40 μ T. Uticaj ovog polja je moguće kod velike većine savremenih merila polja poništiti nulovanjem. U suprotnom ova vrednost se po potrebi sabira sa, ili oduzima od izmerene vrednosti na merilu koje se etalonira, u zavisnosti od smera generisanog polja.

Uticaj temperature se može razmatrati i sa stanovišta mernog sistema i sa stanovišta samog merila koje se etalonira. Etaloniranje se u Laboratoriji za ispitivanje i etaloniranje obavlja u kontrolisanom opsegu temperature od 23 °C \pm 5 °C. Uticaj temperature na tačnost etaloniranog merila ima smisla uključiti kroz korekciju same greške, ili kroz mernu nesigurnost, u slučajevima kada se uslovi koje propisuje proizvođač razlikuju od laboratorijskih, u pogledu opsega temperature za koji je greška merila deklarisanа. Slično važi i za primenjeni referentni ampermetar. Prema specifikaciji proizvođača napred pomenutih referentnih multimetara koji se u mernom sistemu koriste za merenje struje, temperaturni koeficijent se kreće u granicama od 0,002%/°C do 0,007%/°C za merni opseg struje od 10mA do 5A i za temperaturu okoline izvan navedenih granica temperature u Laboratoriji. Geometrija Helmholtzovog kalema u nekim slučajevima može biti zavisna od temperature, u zavisnosti od materijala od koga je napravljen nosač namotaja kalema. Nosači Helmholtzovog kalema tip HK3 su izrađeni od teflona. Koeficijent linearnog termičkog širenja teflona je reda veličine 0,02%/°C. Iz svega navedenog, u kontrolisanim uslovima temperature ambijenta u laboratoriji, za definisane granice od 23 °C \pm 5 °C uticaj temperature na merni sistem (Helmholtzov kalem i ampermetar) koji se koristi pri etaloniranju, u odnosu na ostale navedene uticaje, se može zanemariti.

Kombinovana merna nesigurnost za etaloniranje DC merila magnetskog polja sa Holovom sondom za funkciju merenja magnetske indukcije računa se po formuli:

$$u_c^2(B_m) = c_1^2 \cdot u^2(\Delta g_m) + c_2^2 \cdot u^2(\delta g_{m-rez}) + c_3^2 \cdot u^2(\delta g_{RE-rez}) + c_4^2 \cdot u^2(\delta g_{RE})c_3^2 + c_5^2 \cdot u^2(\delta g_{const-kal}) + c_6^2 \cdot u^2(\delta g_{poz}) + c_7^2 \cdot u^2(\delta g_{ems}) + c_8^2 \cdot u^2(\delta g_{t-kal}) \quad (8)$$

Pošto merene veličine nisu međusobno korelisane faktori osetljivosti c_i ($i=1,2,3,4,5,6,7,8$) u jednačini (8), su svi jednaki jedinici.

Proširena merana nesigurnost za normalnu raspodelu se dobija kada se kombinovana merna nesigurnost pomnoži koeficijentom proširenja $k=2$ za nivo poverenja koji iznosi približno 95% [7].

Uzimajući u obzir napred navedene komponente merne nesigurnosti, Laboratorija EINT je izračunala i vrednost najbolje mogućnosti merenja (CMC) koja za merenje DC magnetske indukcije iznosi 1% od mernog opsega ne uzimajući u obzir komponente merne nesigurnosti koje potiču od merila koje se etalonira.

ZAKLJUČAK

U oblasti merenja jačine magnetnog polja i magnetske indukcije, Elektrotehnički institut Nikola Tesla ima višedecenijsku tradiciju. Dugogodišnje iskustvo primenjuje se i danas kroz akreditovane metode etaloniranja merila magnetskog polja i ispitivanja nivoa izlaganja ljudi jednosmernim i naizmeničnim

poljima, niskih i visokih učestanosti, na otvorenom i u zatvorenom prostoru. Mogućnosti merenja (CMC) date u obimima akreditacije za oblasti ispitivanja i etaloniranja akreditovane Laboratorije instituta Nikola Tesla u potpunosti pokrivaju potrebe u Republici Srbiji u ovoj oblasti metrologije.

LITERATURA

- [1] Dragomir D. Jelovac, *Dobijanje i kompenzacija homogenog jednosmernog magnetnog polja*, Zbornik radova V JUKEM, Zagreb, str. 246-253, 1971.
- [2] Srđan Spiridonović, *Realizacija etalona magnetskog polja*, Zbornik radova XIII JUKEM, Split, 1988.
- [3] SRPS ISO/IEC 17025:2017 *Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje*
- [4] SRPS EN 61786-1:2014 *Merenje jednosmernih magnetskih, naizmeničnih magnetskih i naizmeničnih električnih polja u opsegu od 1Hz do 100kHz u pogledu izloženosti ljudi – Deo 1: Zahtevi za merne instrumente*
- [5] *Uputstvo za etaloniranje merila magnetskog polja*, interni dokument IMS Laboratorije za ispitivanje i etaloniranje Elektrotehničkog instituta Nikola Tesla a.d. Beograd
- [6] D. Naumović-Vuković, A. Pavlović, S. Škundrić, V. Kostić, *Etaloniranje merila za merenje gustine fluksa naizmeničnog magnetskog polja*, Elektroprivreda, br. 2. str. 162-167, Beograd, 2010., UDK 621.314.224, ISSN 0013-5755
- [7] EA-4/02 M:2022 *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration*