

## Merjenje homogenosti magnetnega polja v večplastni solenoidni tuljavi

Gregor Geršak<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: gregor.gersak@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** V prispevku so predstavljeni definicija homogenosti zračne tuljave in principi merjenja homogenosti magnetnih polj z visoko homogenostjo. Prikazan je postopek izbire primerne instrumenta za določanje profila polja v osi tuljave, narejena primerjava s simulacijskimi izračuni homogenosti in predstavljeni uporabljeni merilni principi. Določanje homogenosti polja je bilo izvedeno na primeru večplastne vodnohlajene tuljave, ki je bila sestavljena iz osnovnega navitja in več dodatnih kompenzacijskih paketov navitij, namenjenih izboljšanju homogenosti generiranega polja in odpravljanju gradientov polja. Merilni rezultati so podani v grafični obliki.

**Ključne besede:** homogenost, gostota magnetnega pretoka, profil polja, vodno hlajena tuljava, večplastni solenoid

## Measurements of the magnetic field uniformity in a solenoid multi-layer coil

**Extended abstract.** In calibration laboratories working in the field of magnetic measurements, field-coils are commonly used for generation of magnetic fields. One of their basic properties is the ability to generate fields of high homogeneity over the largest possible volume of the coil inner space. This means that when calibrating a magnetometer, a suitable medium for calibration by comparison is provided. In such calibration, indications of the probe of the device under calibration and of the reference magnetometer in the same magnetic field are compared. One of the most significant contributions to the combined measurement uncertainty of calibration is the error due to the field non-uniformity. The field uniformity cannot be computationally evaluated with high precision if only ideal or simplified field calculation equations are used. The field profile of a real field coil is subject to errors due to the winding geometry, direction of the helix-type windings, symmetry between winding packages, errors in wire cross-sections and insulation layer, filling factor, geometry of the coil former, temperature dependence, etc. The field uniformity is usually measured by using a magnetometer equipped with probe with the smallest possible high stability active sensing element.

In this paper we define the field uniformity, methods

for its measuring and for selecting a suitable magnetometer for uniformity measurements and result evaluation. All our measurements were conducted with a multi-layer water-cooled solenoid coil made of two main winding packages and additional compensating windings. Field profiles of different coil construction stages are shown.

**Keywords:** homogeneity, uniformity, magnetic flux density, field profile, multi-layer coil

---

### 1 Uvod

V kalibracijskih laboratorijih za magnetna merjenja je za izvajanje različnih kalibracijskih postopkov potrebno homogeno polje oz. konstantno magnetno polje na čim večjem volumnu. Poleg kalibracij v takih magnetnih poljih potekajo tudi številni fizikalni poskusi, ki zahtevajo homogenost na čim večjem volumnu (MRI slikanja v medicini, NMR analiza kemijskih vzorcev ipd).

Potrebna homogenost generiranih polj je odvisna od instrumentov, ki jih želimo kalibrirati. Za teslametre za merjenje magnetnih polj v zraku ponavadi zadostuje homogenost, ki jo zagotovi preprosta klasična Helmholtzova tuljava [3]. Teslametri, namenjeni uporabi v režah elektromagnetikov in permanentnih magnetov, se kalibrirajo v močnejših in manj homogenih poljih, ponavadi generiranih z elektromagneti. Za posebne

primere (instrumenti na principu jedrske magnetne resonance, kot so na primer protonski magnetometri) pa so potrebna generirana magnetna polja z visoko homogenostjo (homogenosti reda  $\mu\text{T}$  na volumnu  $30\text{ cm}^3$  pri poljih nekaj mT) [4].

Magnetno polje lahko določimo vsaki točki v prostoru. Ponavadi opazujemo vrednost gostote magnetnega pretoka ( $B$ ) ali pa jakosti magnetnega polja ( $H$ ). Za lažje primerjanje večje množice takih točk med njimi izberemo referenčno točko. Vsem drugim točkam normiramo vrednost glede na referenčno točko. Homogenost magnetnega polja je definirana z največjim odstopanjem polja od določene referenčne točke. Referenčno točko ponavadi izberemo v tipični točki prostora (v solenoidni tuljavi izberemo središčno točko v smeri osi, v Helmholtzovi tuljavi geometrično središče sistema, v reži permanentnega ali elektromagneta pa središčno točko reže itd). Z normiranjem lahko neposredno prikazemo relativno odstopanje magnetnega polja katerekoli točke prostora od referenčne točke.

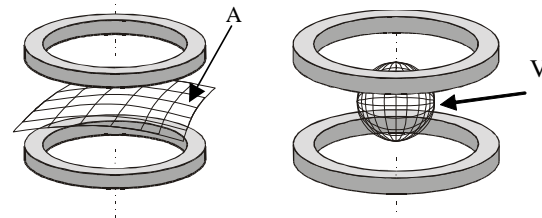
Homogenost je lastnost polja, ki pove, kolikšno je največje odstopanje vrednosti magnetnega polja  $B(x)$  od referenčne vrednosti  $B(0)$  v določenem prostoru. Enačba (1) prikazuje zapis vrednosti linearne homogenosti magnetnega polja.

$$HOM|_{d,B(0)} = \frac{\max[B(x) - B(0)]}{B(0)} \quad (1)$$

Pri podajanju homogenosti je pogosto pomembno, da ob vrednost homogenosti, zapisani v relativni obliki, podajamo tudi absolutno vrednost referenčne točke, saj je parameter homogenosti le tako enolično določen. Drugi pomembni parameter pri določanju homogenosti magnetnega polja je prostor, v katerem homogenost določamo. Prostor je lahko določen na različne načine [1].

V cilindričnih tuljavah je prostor ponavadi določen v eni dimenziji – pravimo, da je homogenost največje odstopanje vrednosti magnetnega polja od referenčne vrednosti v središču cilindrične tuljave, izračunano na določeni osni razdalji. V večjih tuljavah ali elektromagnetih z jarmi večjih dimenzij je zanimiva tudi homogenost polja v več dimenzijah. Tako sta definirani dvodimenzionalna in tridimenzionalna homogenost (slika 1). Glede na tip tuljave je definirana tudi oblika geometrijskega telesa, v kateri opisujemo polje. Ponavadi imamo opravka z osno simetričnimi tuljavami, kot je cilindrična ali Helmholtzova tuljava. V takih primerih lahko definiramo homogenost kot največje odstopanje vrednosti magnetnega polja od referenčne vrednosti v krogli, katere središče je referenčna točka. Parameter, ki to opisuje, je DSV (diameter

spherical volume) oziroma DCV (diameter cylindrical volume), če je telo valj z geometrijskim središčem kot referenčno točko.



Slika 1: Levo – homogenost definirana v dvodimenzionalnem prostoru A, v središču Helmholtzove tuljave. Desno – homogenost definirana v tridimenzionalnem prostoru V v obliki kroglice s središčem v središču Helmholtzove tuljave.

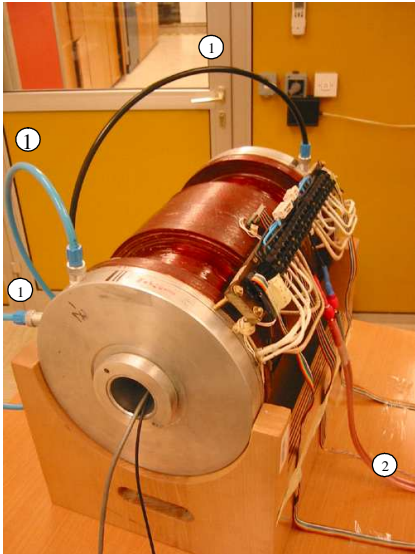
Figure 1. Left : homogeneity defined in the centre of the Helmholtz coil in a two-dimensional space A. Right: homogeneity defined in the centre of the Helmholtz coil in a spherical three-dimensional space V.

V tem prispevku bomo prikazali način določanja homogenosti generiranega polja solenoidne (cilindrične) tuljave, merjenje poteka polja v njej in ovrednotenje njene homogenosti. Vse meritve so bile izvedene na večplastni solenoidni vodnohlajeni tuljavi HomSol2, lasti Laboratorija za magnetna merjenja Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani (slika 2). HomSol2 je približno 70 kg težka solenoidna tuljava z deljenim glavnim bakrenim navitjem in tremi dodatnimi kompenzacijskimi navitji, ki zagotavljajo primerno homogenost. Med procesom izdelave tuljave smo dele tuljave s slike 3 v smislu postopnega priključevanja navitij poimenovali, kot prikazuje tabela 1.

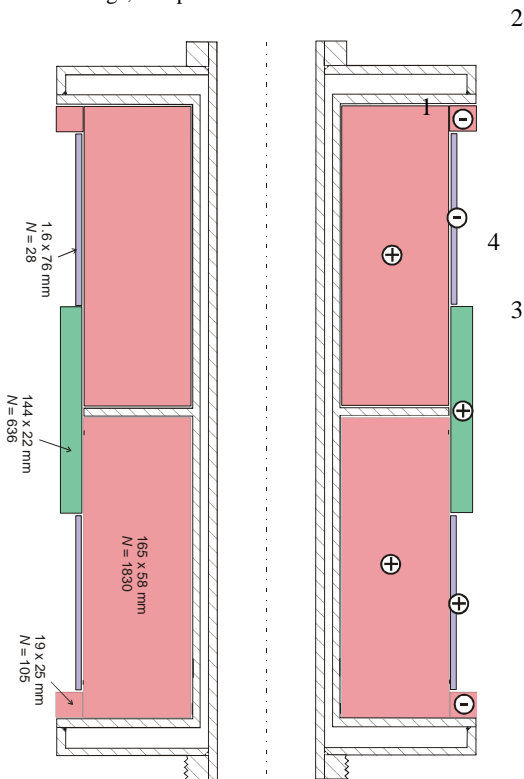
Tabela 1. Prikaz vmesnih stopenj izdelave solenoidne tuljave HomSol2 v odvisnosti od priključitve navitij slike 3.

Table 1. Intermediate stages in the process of building the multilayer solenoid coil HomSol2 as a function of the number of energized winding packages from Figure 3.

Ime izdelave tuljave	stopnje priključena navitja
HomSol2_1	1
HomSol2_2	1, 2, 3
HomSol2_3	1, 2, 3, 4
HomSol2_3R	1, 2, 3, 4 + R



Slika 2: Merjenje homogenosti večplastne vodnohlajene tuljave HomSol2. Vidne so dovodna in odvodni cevi za hladilno tekočino ① in napajalni žici ②.  
Figure 2: Magnetic field uniformity measurement of a multi-layer water-cooled solenoid coil HomSol2. ① - liquid coolant tubings, ② - power line.

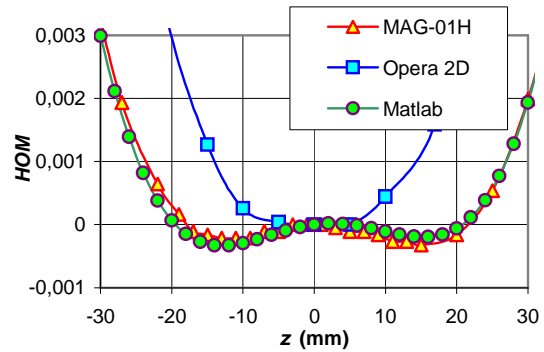


Slika 3: Shematični prerez večplastne tuljave. Označena je smer toka skozi glavno in kompenzacijska navitija, ki so namenjena izboljšanju homogenosti polja v tuljavi, ter dimenzije in število ovojev pravokotne bakrene žice.

Figure 3: Cross-section of the multilayer coil with directions of the energizing current, dimensions and number of windings packages shown.

## 2 Merjenje profila magnetnega polja

Homogenost polja merimo, saj izračunani profil generiranega polja ponavadi ne ustreza dejanskim razmeram (slika 4). Razlike so lahko velike predvsem zaradi nepravilnosti v izdelavi realne tuljave, zaradi geometrije vodnikov, nepravilnosti v preseku lakirane bakrene žice, zaradi načina navijanja v obliki vijahnice, razlik med geometrijo ovojev v posameznih plasteh navitja, pravilnosti oblike tuljavnika, razlik med simetrično postavljenimi paketi navitja, polnilnega faktorja navitja, nesimetričnosti navijanja, temperaturnih učinkov na navitje in drugih prispevkov zaradi neidealnih razmer [1, 7].



Slika 4: Primerjava profila polja, izračunanega s simulacijskimi paketi Opera2D (metoda končnih elementov) in Matlab in izmerjenega profila središču realne tuljave (izmerjeno s teslametrom MAG-01H).

Figure 4: Comparison of the measured field profile and computed field profiles (Opera 2D by VectorFields and Matlab by Mathworks).

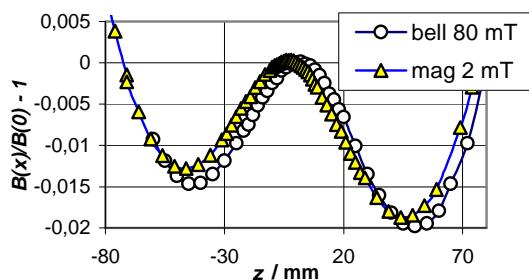
### 2.1 Izbira merilnega instrumenta za merjenje homogenosti magnetnega polja

Ponavadi se v praksi za merjenje profila polja uporabljajo teslametri s Hallovimi sondami, ki merijo vrednosti magnetnega polja v eni osi kartezičnega koordinatnega sistema prostora. Njihova značilnost je tudi aktivni element minimalnih dimenzij (nekaj mm<sup>3</sup>). Aktivni elementi so veliki tipično reda desetine notranjega radija solenoida oz. notranjega radija Helmholtzeve tuljave. Podobno uporabni so Foersterjevi teslametri, ki jih odlikuje velika ločljivost [1].

Slabost Hallovih teslametrov je poleg temperaturne občutljivosti tudi merilno območje z visoko spodnjo mejo (zanesljivi so tipično od nekaj mT navzgor). Po drugi strani imajo Foersterjevi teslametri (pre)nizko merilno območje (do 10 mT

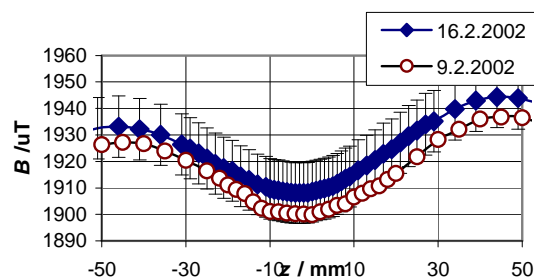
[5]) in aktivni element reda velikosti nekaj centimetrov. Za merjenje profila polja uporabljamo tudi teslametre, ki merijo skupno magnetno polje, to je celotno dolžino vektorja gostote magnetnega pretoka. Tipični predstavnik takih teslametrov je protonski magnetometer. Ti delujejo na principu jedrske magnetne resonance, zato je treba posebno pozornost nameniti tudi notranji zgradbi sonde teslametra, ker (feromagnetni) materiali v njej lahko vplivajo na profil merjenega polja. Prostornine sond protonskega magnetometra so tipično  $500 \text{ mm}^3$  [4], pa tudi precej večje, odvisno od paramagnetnosti vzorca in gostote merjenega pretoka. Ker merijo magnetno polje v vseh treh kartezičnih koordinatah, gostoto magnetnega pretoka preko celotne prostornine sonde integrirajo [3]. V navadnih zračnih tuljavah v osi tuljave ne pride do hitrih skokov v profilu polja, ki bi jih taka integracija lahko zbrisala. Visoka ločljivost in velika točnost sta vzroka, da protonski magnetometer pogosto uporabljamo za merjenje poteka polja v tuljavi.

S primerjalnimi meritvami smo poskušali ugotoviti razlike, prednosti in slabosti določanja profila polja s pomočjo Hallovega teslametra (Bell 9953 podjetja F.W. Bell, Bell Technologies [6]) in Foersterjevega teslametra (Bartington MAG-01H, izdelan v Bartington Instruments). Na sliki 5 je prikazana primerjava profila polja tuljave HomSol2\_1 pri merjenju z obema teslametroma pri različnih maksimalnih amplitudah merjenega polja (MAG01H pri 2 mT in Bell 9953 pri 80 mT). Razlika med profiloma polja je manjša od merilne negotovosti, zato sklepamo, da sta oba enako primerna za merjenje homogenosti. Odločili smo se za Foersterjev teslameter, ker je bolj časovno stabilen in temperaturno veliko manj občutljiv (slika 7). Ker nas je zanimalo magnetno polje v smeri osi tuljave, smo s Foersterjevim teslametrom zajeli množico točk v osi tuljave. Za merjenje smo uporabili teslameter s sondo aksialnega tipa, kjer je aktivni element v sondi nameščen tako, da instrument meri vzdolžno polje glede na ohišje sonde [1].



Slika 5: Primerjava profila polja tuljave, izmerjenega s Hallovim in Foersterjevim teslametrom  
Figure 5: Comparison of field profiles measured by the Hall and Foerster magnetometer.

Na sliki 7 je prikazana meritev za ocenjevanje obnovljivosti merjenja profila polja. Polje tuljave HomSol2 je bilo izmerjeno v istih pogojih okolice (temperatura, vlaga) v dveh različnih dnevih. Merilna negotovost teslametra, ki smo ga uporabili, je znašala 0.6 % ( $k = 2$ ). Ugotovimo, da so odstopanja rezultatov obeh meritev v okviru merilne negotovosti teslametra. Negotovost je prikazana na grafu za vsako izmerjeno točko.

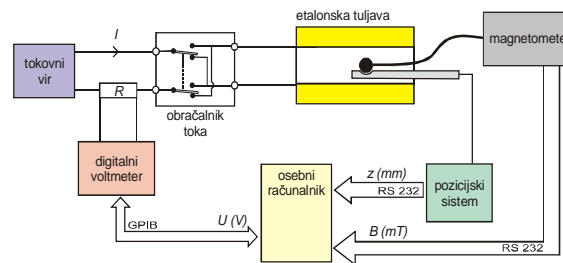


Slika 6: Obnovljivost merjenja profila magnetnega pretoka v tuljavi HomSol2\_1 (prikazan je tudi interval merilne negotovosti)

Figure 6: Reproducibility of the field profile measurement time-wise (error-bars represent measuring uncertainty)

## 2.2 Merjenje profila polja

Postopek merjenja posameznih točk v osi, s katerim lahko določimo potek in homogenost polja tuljave, je časovno zamuden. Za natančno merjenje je treba izdelati posebne sisteme za premikanje merilne sonde v osi in v smeri osi tuljave z veliko točnostjo (slika 7). Izvedbe teh sistemov so še bolj zapletene, če hočemo meriti homogenost polja v točkah zunaj osi tuljave.



Slika 7: Merilna instrumentacija za določanje profila generiranega polja v osi tuljave. Z obračalnikom toka lahko obračamo smer napajalnega toka [7]. Pozicijski sistem omogoča premikanje sonde teslametra v osi tuljave v korakih, manjših od 1 mm.

Figure 7: Measuring set-up for an axial uniformity measurement in increments of less than 1 mm.

Meritve profila polja tuljave HomSol2 smo opravili s teslametrom Bartington MAG01H. Sonda teslametra je bila pritrjena v posebej za ta namen

izdelan nosilec iz pleksi stekla, ki je zagotavljal, da je merjena smer v razredu točnosti stružnic (največ  $\pm 0.05$  mm) v geometrijski osi tuljave.

Stabilnost napajalnega toka je bila določena s posrednim merjenjem toka prek etalonskega upora. Tipično je raztros amplitude toka znašal manj kot 30 ppm v relativni obliki [1]. Stabilnost toka je bila tako v vseh fazah meritev zadostna. Le v končni obliki tuljave (vezava HomSol2\_3R) je nestabilnost toka povzročala tudi opazne spremembe homogenosti polja v velikostnem razredu ločljivosti teslametra.

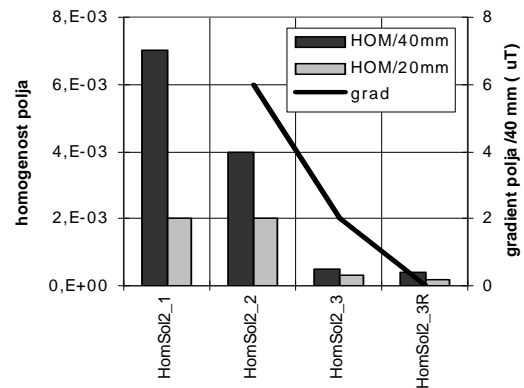
### 3 Rezultati

Ugotovili smo, da je potek profila polja v izdelani tuljavi precej drugačen od simuliranih vrednosti in da je določanje homogenosti še vedno temelji predvsem na neposrednem merjenju polja v osi tuljave (slika 4).

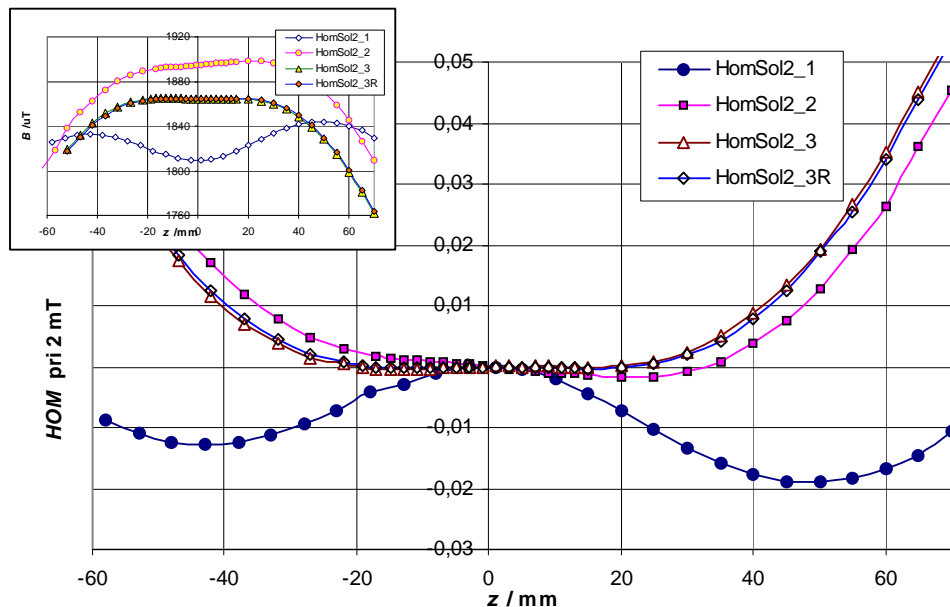
Med izdelavo tuljave je postajal profil polja čedalje bolj homogen. Izboljševanje homogenosti polja po zaporednih fazah izdelave iz tabele 1 je prikazano na slikah 8 in 9. Na slikah vidimo postopno izboljšanje homogenosti polja okoli geometrijskega središča in povečevanje amplitude generiranega polja zaradi dodanih kompenzacijskih ovojev (manjši graf na sliki 9).

Slika 8 prikazuje izboljšanje homogenosti tuljave v vseh stopnjah izdelave. Dodan je tudi ustrezen prikaz manjšanja gradienta polja (v primeru

HomSol2\_1 je gradient nad 40 mm večji od 1%). S postopnim dodajanjem kompenzacijskih navitij smo homogenost polja pri 2 mT izboljšali s  $7 \times 10^{-3}$  na  $4 \times 10^{-4}$  na razdalji 40 mm, gradient polja v središčnih 40 mm pa je padel s 6  $\mu$ T na 0,3  $\mu$ T (slika 8).



Slika 8: Prikaz izboljšanja homogenosti polja gostote 2 mT v osi tuljave HomSol2 preko vseh stopenj izdelave  
Figure 8: Improvement of the field uniformity of 2 mT magnetic field when connecting additional compensating windings in all stages of building of the coil.



Slika 9: Profil generiranega polja v osi tuljave. Krivulje prikazujejo profil polja po posameznih stopnjah gradnje HomSol2 v absolutni in relativni obliki.

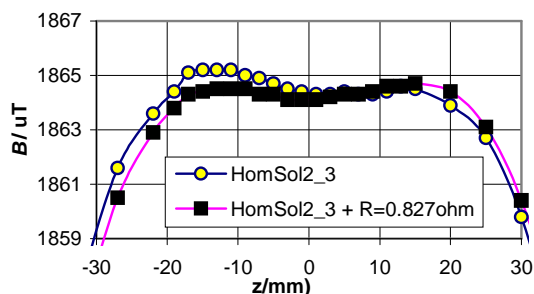
Figure 9: Field profile in the coil axis. Four curves represent the absolute and relative form of the field uniformity in the four stages of the HomSol2 coil construction.

## 4 Sklep

Za navadne primerjalne kalibracije merilnikov gostote magnetnega pretoka potrebujemo referenčni instrument in medij. To je magnetno polje, v katerem lahko obe izmerjeni vrednosti primerjamo. Za kalibracije z nizkimi merilnimi negotovostmi mora biti generirano magnetno polje zadosti homogeno, da lahko trdimo, da sta sondi umerjanega in referenčnega instrumenta res izpostavljeni približno istemu magnetnemu polju.

Ponavadi je profil v tipičnem generatorju magnetnega polja (zračni tuljavi) parabolične oblike, v katere teme sočasno postavimo obe sondi. Tak sočasni princip je v praksi pogosto problematičen zaradi medsebojnega vpliva aktivnih elementov v obeh sondah. V skrajnih primerih sočasna, primerjalna kalibracija ni mogoča, je pa mogoča sekvenčna oblika kalibracije. Praktična rešitev je v izdelavi tuljave, v kateri je profil polja sedlaste oblike, pri čemer sta obe temeni nekaj centimetrov narazen. Če postavimo sondi referenčnega in umerjanega instrumenta vsako v svoje teme generiranega polja, se medsebojno ne motita in lahko sočasno izvedemo tudi neposredno primerjalno kalibracijo.

V postopku izdelave tuljave HomSol2 smo z razvojem pozicijskega sistema za merjenje profila polja in računalniške simulacije dodatnih kompenzacijskih navitij izdelali večplastno tuljavo na vodno-hlajenem aluminijastem tuljavniku. Tuljava generira magnetno polje visoke homogenosti do polje gostot 150 mT. Med določanjem homogenosti vmesnih faz tuljave smo zaznali tudi rahli gradient v profilu polja ( $+2 \mu\text{T}/40 \text{ mm}$ ) blizu središča tuljave (slika 10). Odpravili smo ga z zmanjšanjem toka skozi kompenzacijsko navitje 4 tako, da smo temu vzporedno vezali upor  $0,827 \Omega$ . Upor je bil izbran tako, da je zmanjšan tok povzročil zmanjšanje gradienta na manj kot  $+0.3 \mu\text{T}/40 \text{ mm}$ . Končni profil tuljave prikazuje slika 10).



Slika 10: Zmanjšanje gradienta polja. Prikazana je primerjava med potekoma polja tuljav HomSol2\_3 in HomSol2\_3 z dodatnim uporom  $R$ .

Figure 10. Reducing the field-uniformity gradient to the final  $+0.3 \mu\text{T}$  over 40 mm. The figure shows field profiles of the coil in the phase HomSol2\_3 and in the phase HomSol2\_3+R

(with resistor  $R$  in parallel with one of the compensating windings).

Nehomogenost generiranega polja je vzrok enega največjih prispevkov merilni negotovosti kalibracije magnetmetrov. V tem prispevku smo prikazali postopke merjenja homogenosti homogeniziranega solenoida in ovrednotenje izdelane večplastne vodnohlajene tuljave HomSol2. Dokončana tuljava se je izkazala kot primerno kalibracijsko okolje z uporabnim območjem do 150 mT. Primerna je tudi za merjenje z instrumenti, ki delujejo po načelu jedrske magnetne resonance, ki so daleč najzahtevnejši glede potrebne homogenosti merjenega polja.

## Zahvala

Avtor se zahvaljuje prof. dr. Antonu Jegliču in prof. dr. Dušanu Feferju iz Laboratorija za magnetna merjenja Fakultete za elektrotehniko Univerze v Ljubljani za instrumentacijo, ki je bila uporabljena v okviru izdelave doktorske disertacije.

## Literatura

- [1] G. Geršak, *Etalonski sistem za gostoto enosmernega magnetnega pretoka*, doktorska disertacija, Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, 2003.
- [2] G. Geršak, J. Humar, D. Fefer, Uporaba računalniškega modeliranja za določevanje konstante in homogenosti magnetnega polja zračne tuljave, *Elektroteh. vestn.*, letn. 69, št. 1, str. 27-33, 2002.
- [3] A. Loesche, *Kerninduktion*, Berlin, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1957.
- [4] K. Weyand, "Magnetometer Calibration Setup Controlled by Nuclear Magnetic Resonance," *IEEE Trans. Instrum. Measur.*, vol. 48, p. 668-671, 1998.
- [5] G. Bartington, *Sensors for Low Level, Low Frequency Magnetic Fields*, Barington Instruments Ltd., Oxford, 1995.
- [6] Bell, *Model 9950 Gauss/Teslameter, Instruction Manual*, Bell Technologies, julij 1996.
- [7] G. Geršak, J. Drnovšek, Correction of temperature dependency of a standard; case study - magnetic flux density standard, *Measurement*, vol. 40, no. 9/10, str. 913-918, 2007.

**Gregor Geršak** je doktoriral leta 2003 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegovo raziskovalno področje obsega precizijsko merjenje magnetnih polj zračnih tuljav, predvsem merjenje gostote magnetnega pretoka z uporabo jedrske magnetne resonance. V zadnjih letih se ukvarja s teorijo merjenja, termometrijo, merjenjem tlaka in metrologijo medicinske instrumentacije, s poudarkom na napravah za neinvazivno merjenje krvnega tlaka.