

ANALIZA MOGUĆNOSTI POZICIONIRANJA HALL-ove SONDE POMOĆU PERMANENTNOG CILINDRIČNOG MAGNETA

P. Beličev, A. S. Vorozhtsov*, S. B. Vorozhtsov*

Laboratorija za fiziku (010), Institut za nuklearne nauke "Vinča", P.P. 522, 11000 Beograd, Srbija

*Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

Sadržaj – Za potrebe preciznog geometrijskog pozicioniranja Hall-ove sonde pri mapiranju polja magnetske indukcije u ciklotronu, predložen je i analiziran postupak korišćenja permanentnih cilindričnih magneta. Na osnovu proračuna raspodele magnetskog polja i rezolucije sistema za merenje odabrani su potrebni parametri premantnih magneta koji omogućavaju pozicioniranje sonde sa preciznošću do $\pm 20 \mu\text{m}$.

1. UVOD

Analiza je sprovedena u sklopu projektovanja sistema za mapiranje magnetskog polja Ciklotrona VINCY [1]. Sistem za mapiranje koristi Hall-ove sonde kao davače za merenje magnetske indukcije u određenom položaju u medijalnoj ravni ciklotrona. S obzirom da Hall-ova sonda nije tačkasta, već njena aktivna zapremina predstavlja pravougaoni paralelopiped zatopljen u epoksi smolu, precizno pozicioniranje njenog centra simetrije u zadatu tačku isključivo pomoću geometrijskih sredstava nije moguće.

Imajući u vidu pomenutu teškoću geometrijskog pozicioniranja sonde, predložen je postupak pozicioniranja pomoću magnetskog polja. Ideja se sastoji u tome da se pomoću cilindričnog permanentnog magneta generiše azimutalno simetrično polje sa maksimumom na osi cilindra (pik), a da se zatim finim pomeranjem sonde ona postavi u poziciju maksimalnog očitavanja na displeju teslametra, što bi značilo da je došlo do pozicioniranja centra sonde na osi cilindra permanentnog magneta. Pretpostavlja se da se pozicija permanentnog magneta može realizovati sa preciznošću za red veličine većom od one koja je zahtevana za pozicioniranje sonde.

Naravno da se ovo pozicioniranje može izvesti samo u okviru konačnog odstupanja. U slučaju mapiranja magnetskog polja, zahtevana preciznost pozicioniranja iznosi $\pm 20 \mu\text{m}$, što znači da se centar sonde mora pozicionirati ne dalje od $\pm 20 \mu\text{m}$ u odnosu na osu cilindra. Ovo s druge strane zahteva da je pik generisanog magnetskog polja dovoljno oštar, tako da promena magnetske indukcije između centra pika i tačke udaljene $20 \mu\text{m}$, t.j. $\Delta B = B(R=0) - B(R=20 \mu\text{m})$, bude veća od rezolucije mernog sistema. Problem se dodatno usložnjava i činjenicom da Hall-ova sonda, zbog svoje konačne dimenzije, u stvari ne meri vrednost magnetske indukcije u tački, već njenu srednju vrednost usrednjenu po zapremini sonde, tako da gornju relaciju za ΔB ustvari treba interpretirati u terminima srednjih vrednosti, t.j. $\Delta B = \langle B \rangle_{(R_c=0)} - \langle B \rangle_{(R_c=20 \mu\text{m})}$, gde je R_c udaljenost centra sonde od ose cilindra, a orijentacija sonde takva da su njene

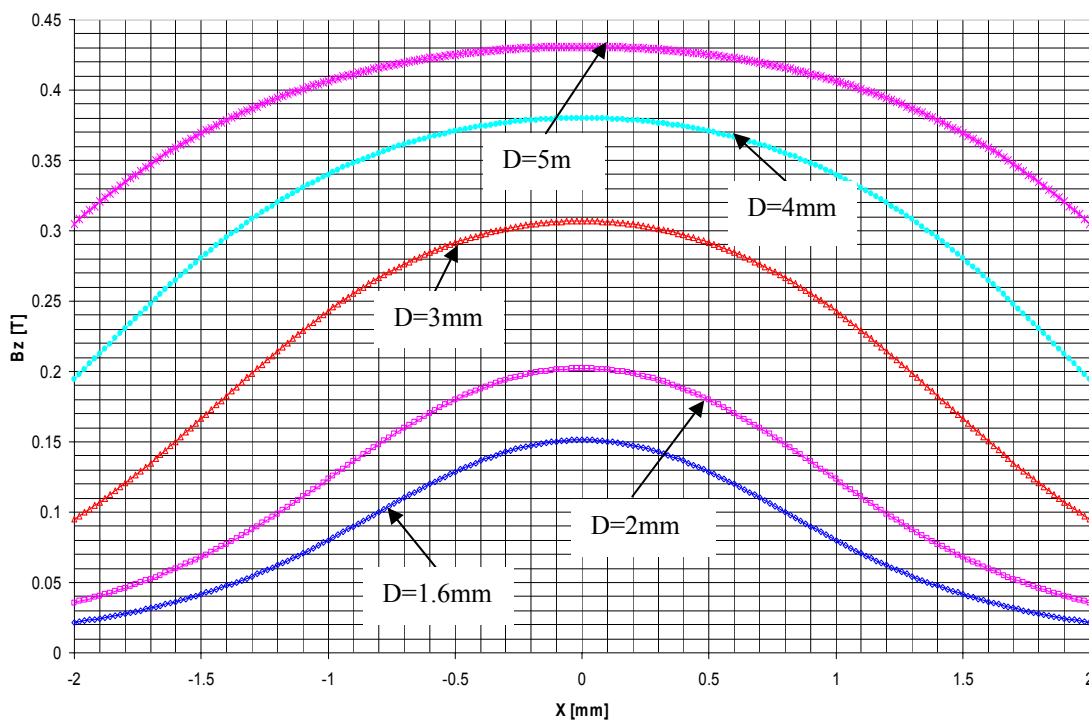
dve naspramne stranice paralelne sa radijusom cilindra koji prolazi kroz centar sonde, a druge dve normalne.

Treba napomenuti da rezolucija sistema za merenje magnetske indukcije iznosi 0.005 mT , u opsegu do 0.3 T , i 0.01 mT u opsegu od 0.3 do 0.6 T . Ovo su merni opsezi koji pokrivaju polje generisano permanentnim magnetima koji su bili razmatrani kao prihvatljiva opcija.

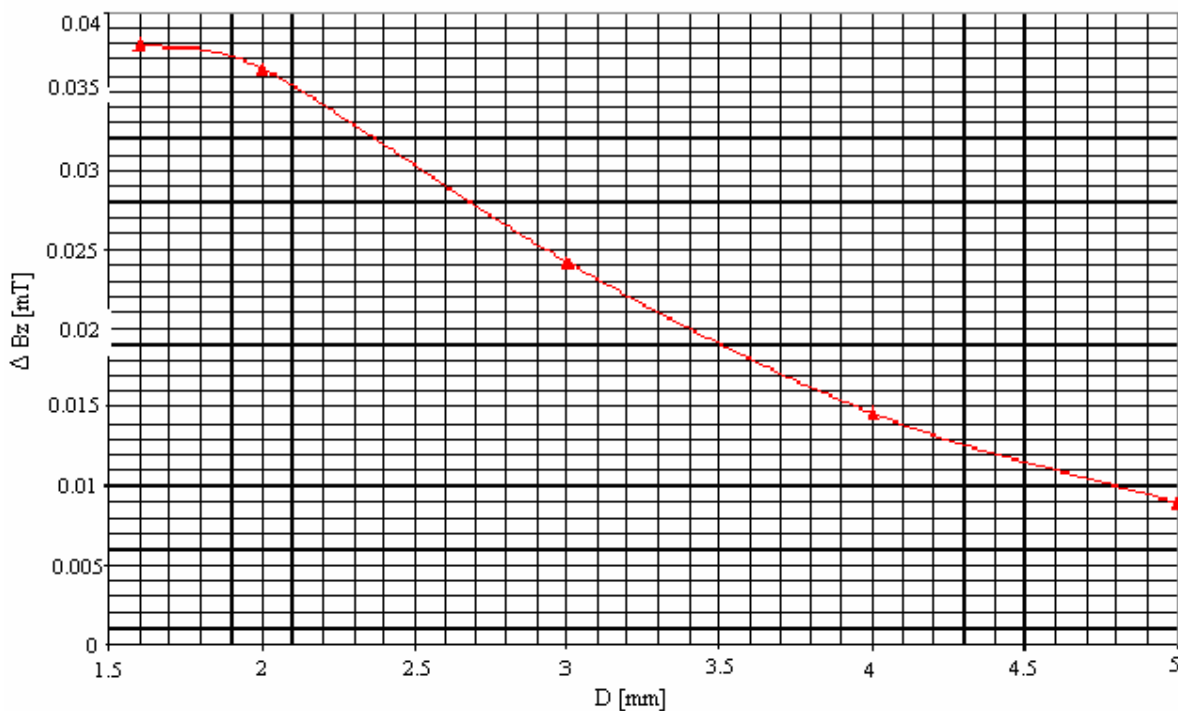
2. PRELIMINARNA ANALIZA

Prvi korak u analizi postavljenog probleme je definisanje oblika i materijala permanentnog magneta. Uzimajući u obzir mogućnosti montiranja magneta i potrebu za generisanjem magnetnog polja sa oštrim pikom, usvojen je oblik cilindričnog magneta visine 30 mm , izrađenog od Nd-Fe-B magnetnog materijala sa remanentnom indukcijom $B_r = 1.41 \text{ T}$, i dijametrom osnove do 5 mm . Proračun generisanog magnetskog polja u funkciji dijametra permanentnog magneta, u ravni paralelnoj sa osnovom cilindra na rastojanju 1 mm od njega, izvršena je pomoću koda TOSCA [2], kao i analitičkom aproksimacijom. Dobijeni rezultati prikazani su na sl.1.

Treba napomenuti da je analizirana samo aksijalna komponenta magnetske indukcije B_z (paralelna sa osom cilindra), s obzirom da je Hall-ova sonda postavljena tako da meri samo ovu komponentu. Analizom dijagrama na sl. 1. može se zaključiti da oština pika opada sa povećanjem dijametra cilindra, što je očekivani rezultat. S obzirom na pomenuti zahtev za preciznost pozicioniranja sonde od $\pm 20 \mu\text{m}$, veličina koja nas interesuje jeste promena indukcije ΔB_z u tačkama na krugu radijusa $20 \mu\text{m}$ oko centra cilindra, u odnosu na indukciju u centru kruga. Zavisnost ove veličine od dijametra cilindra prikazana je na sl.2. Analizom slika 1 i 2 može se zaključiti da je veličina ΔB_z zadovoljavajuća, t.j. unutar rezolucije mernog sistema, za sve razmatrane cilindre osim za onaj sa dijametrom od 5 mm . Naime, za ovaj cilindar je $\Delta B_z < 0.01 \text{ mT}$, što je ispod rezolucije mernog sistema u ovom opsegu ($B_{z \text{ max}} \approx 43 \text{ mT}$). Cilindri sa dijametrima do 3 mm najbolje zadovoljavaju uslov oštine pika, ali tehnologija izrade permanentnih magneta ne obezbeđuje kvalitetnu i preciznu proizvodnju u opsegu tako malih prečnika. Imajući ovo u vidu kandidati sa zadovoljavajućom oštrinom pika ostaju cilindri sa dijametrom u opsegu od 3 do 4.5 mm . Treba reći da je ova analiza preliminarna jer se zasniva na vrednostima magnetske indukcije u tački. Tačniji rezultati se dobijaju izračunavanjem ΔB_z na osnovu usrednjenih rezultata i njihovim upoređivanjem sa rezolucijom mernog sistema, što je u sledećem odeljku i učinjeno.



Sl. 1. Zavisnost B_z komponente magnetske indukcije od rastojanja od ose cilindra, u ravni udaljenoj 1 mm od osnove cilindra, za različite vrednosti dijametra D permanentnog magneta.



Sl. 2. Razlika magnetske indukcije (ΔB_z) na rastojanju $20 \mu\text{m}$ od centra i indukcije u centru cilindra, u ravni udaljenoj 1 mm od osnove cilindra, u funkciji dijametra D permanentnog magneta.

3. DETALJNA ANALIZA

U cilju usrednjavanja vrednosti magnetske indukcije po zapremini Hall-ove sonde, potrebno je imati dvodimenzionu (2D) mapu polja na mestu postavljanja sonde (s obzirom da je debljina sonde mala u odnosu na ostale dve njene dimenzija, usrednjavanje se aproksimativno može izvršiti po pravougaonoj površini sonde). Krive prikazane na sl. 1. su jednodimenzione (1D), ali s obzirom na azimutalnu simetriju polja, 2D mapa se lako može generisati rotacijom 1D krivih oko ose cilindra

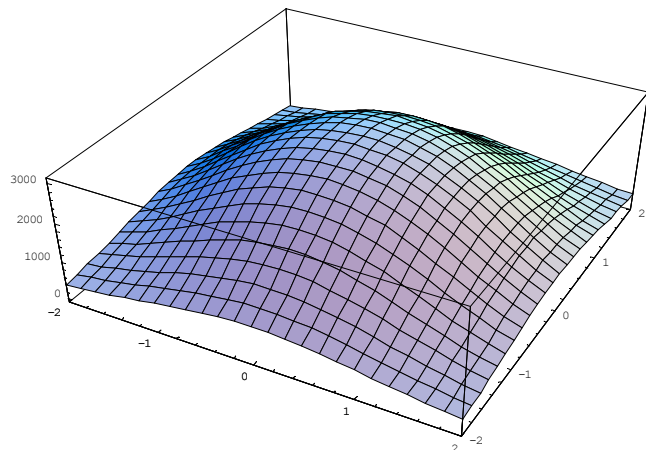
za 180° , kao što je ilustravano na sl. 3, za slučaj cilindra dijametra 3 mm. Iz ovako dobijenih mapa polja, mogu se izračunati odgovarajuće srednje vrednosti koje meri Hall-

ova sonda, kao: $\langle B_z \rangle = \frac{1}{S} \iint_S B_z(x, y) dx dy$, gde je $S =$

$1 \times 0.5 \text{ mm}^2$ površina pravougaone površi sonde koja je normalna na merenu B_z komponentu polja. Radi jednostavnijeg i tačnijeg rešavanja integrala, dobijene numeričke vrednosti za B_z sa sl.1 aproksimirane su analitičkom funkcijom, pa je nakon toga izvršena rotacija

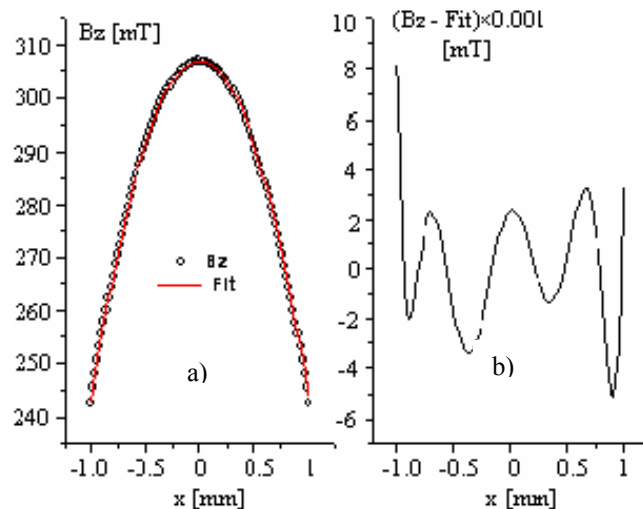
oko ose cilindra i dobijena mapa polja. Vodeći računa o zadovoljavajućoj tačnosti, izabrana je sledeća fitting funkcija sa 5 fitting parametara: $Y_0, X_c, A, W_1, W_2, W_3$:

$$B_z(x, y) \approx Y_0 + \frac{A}{1 + e^{-\frac{\sqrt{x^2+y^2} - X_c - W_1/2}{W_2}}} \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\frac{\sqrt{x^2+y^2} - X_c + W_1/2}{W_3}}} \right)$$



Sl. 3. Mapa magnetske indukcije dobijena iz 1D krive.

Iako na uspešno pozicioniranje sonde utiče samo promena polja između centra cilindra i tačke koja je na rasotojanju 20 μm od centra, radi boljeg razumevanja procesa centriranja kada je početni položaj sonde proizvoljan, analiza je izvršena u više tačaka koje su unutar kruga radijusa 100 μm oko centra cilindra. Pretpostavlja se da je moguće, pomoću mehaničkog podešavanja, centar sonde dovesti na početnom rastojanju manjem od 100 μm od ose cilindra. Imajući ovo u vidu, numerički dobijeni podaci za magnetsku indukciju su fitovani na redukovanom opsegu radijusa od -1 do +1 mm, što omogućava veću tačnost aproksimacije oko pika polja. Na sl. 4 a) i b) prikazani su dijagrami fit funkcije i odstupanja aproksimativnih vrednosti od numeričkih, respektivno.

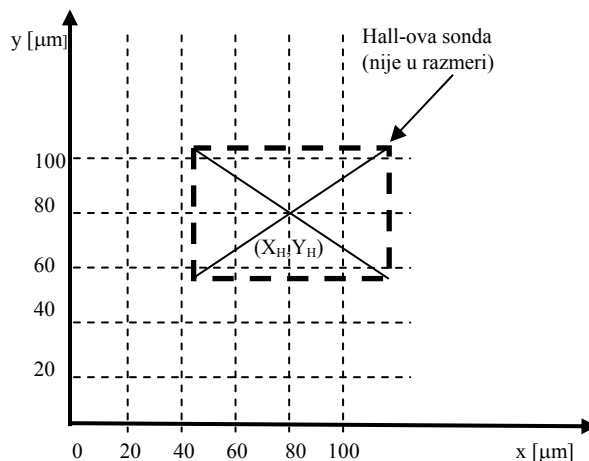


Sl. 4. a) Aproksimacija polja fit funkcijom, i b) odgovarajuće odstupanje.

Iz dijagrama odstupanja polja može se videti da je aproksimacija unutar 0.002 mT u oblasti koja je od

interesa. Štaviše, odstupanje je oscilatornog karaktera, pa treba očekivati njegovo dodatno smanjenje nakon usrednjavanja po površini Hall-ove sonde.

Merni položaji centra Hall-ove sonde (tačka na preseku dijagonale pravougaonika čije su koordinate (X_H, Y_H)) izabrani su u čvorovima mreže sa korakom od po 20 μm u pravcu obe koordinatne ose, u opsegu $0 < X_H < 0.1 \text{ mm}$ i $0 < Y_H < 0.1 \text{ mm}$. Zbog simetrije polja, proračuni su izvršeni samo u prvom kvadrantu, kao što je ilustrovano na sl. 5. Koordinatni početak je na osi cilindra



Sl. 5. Prikaz položaja Hall-ove sonde u kojima je izračunato srednje polje.

4. ANALIZA REZULTATA

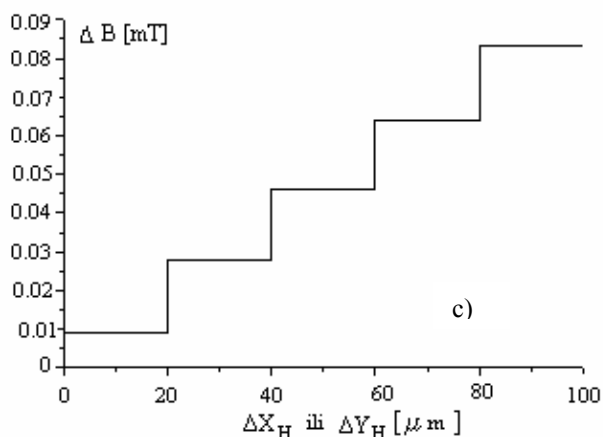
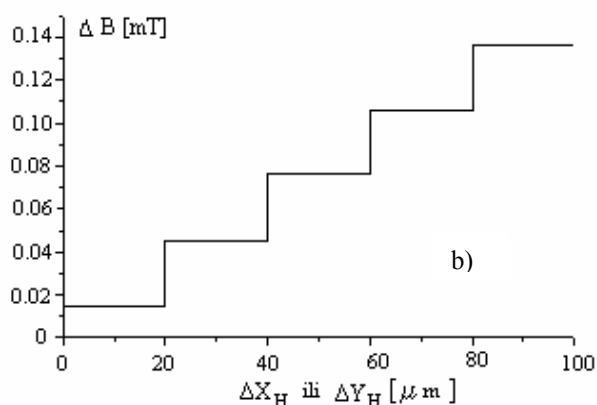
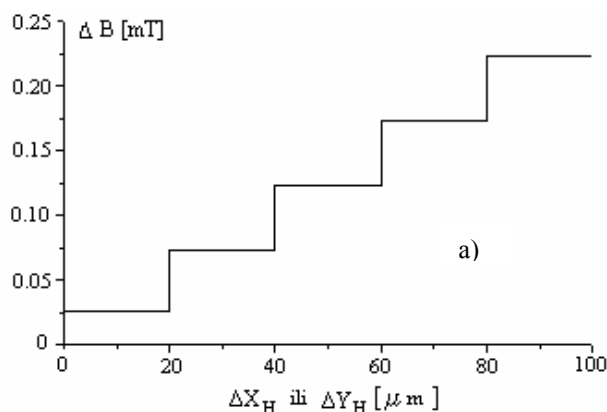
Proračuni razlike vrednosti magnetske indukcije (usrednjene po površini Hall-ove sonde) između dva susedna čvora mreže prikazane na sl. 5, izvršeni su za sve prečnike magneta prikazanih na sl. 1. Zbog ograničenog prostora u Tabeli 1 a) i b) prikazani su samo rezultati za cilindrični permanentni magnet prečnika 3 mm, a na sl. 6 a), b) i c), za prečnike 3, 4 i 5 mm, respektivno. Prikazana usrednjena vrednost $DB_z(\Delta X_H, Y_H)$ jednaka je razlici usrednjenih vrednosti $B_z(X_{H1}, Y_H) - B_z(X_{H2}, Y_H)$. Analogno važi i za $DB_z(X_H, \Delta Y_H)$. Analiza pokazuje da vrednost DB_z , za zadati prečnik cilindra, ima praktično istu vrednost za oba pravca kretanja sonde paralelno koordinatnim osama, i skoro je nezavisna od udaljenosti od odgovarajuće koordinatne ose (naravno, za razmatrani opseg do 100 μm).

Tabela 1 a). Promena srednje magnetske indukcije između susednih čvorova sa sl. 5, za pomeranje sonde u X pravcu.

$\Delta B_z(\Delta X_H, Y_H)$ [mT] (D = 30 mm)		$\Delta X_H = X_{H1} - X_{H2}$ [μm]				
		0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Y_H [μm]	0	0.026	0.075	0.126	0.177	0.227
	20	0.025	0.076	0.126	0.177	0.227
	40	0.026	0.075	0.126	0.177	0.227
	60	0.026	0.075	0.126	0.177	0.227
	80	0.025	0.076	0.126	0.177	0.227
	100	0.025	0.076	0.126	0.177	0.228

Tabela 1 b). Promena srednje magnetske indukcije između dva susedna čvora sa sl. 5, za pomeranje sonde u Y pravcu.

$\Delta B_z(X_H, \Delta Y_H)$ [mT] (D = 30 mm)	$\Delta Y_H = Y_{H1} - Y_{H2}$ [μm]					
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	
X_H [μm]	0	0.025	0.074	0.124	0.174	0.223
20	0.024	0.075	0.124	0.173	0.223	
40	0.025	0.074	0.124	0.174	0.223	
60	0.025	0.074	0.124	0.174	0.223	
80	0.025	0.074	0.124	0.174	0.223	
100	0.025	0.074	0.124	0.174	0.224	



Sl. 6 . Zavisnosti promene ΔB_z od radijalnog kretanja sonde iz centra pika duž koordinatnih osa (korak $20 \mu\text{m}$), za prečnike magneta od a) 30 mm, b) 40 mm i c) 50 mm.

4. ZAKLJUČAK

Na osnovu analize dobijenih rezultata može se zaključiti sledeće:

1) Permanentni magnet sa dijametrom od 3 mm je najpovoljniji za postupak centriranja Hall-ove sonde. Naime, iz Tabela 1 a) i b) vidi se da promena srednje magnetske indukcije prilikom pomeranja sonde iz centra pika u pravcu koordinatnih osa za $20 \mu\text{m}$, iznosi oko 0.026 mT. S duge strane, nivo srednje indukcije u piku za ovaj magnet iznosi 300.586 mT, što spada u merni opseg sistema za merenje od 0 do 0.3 T u kome rezolucija merenja iznosi 0.005 mT što je manje od izračunate promene od 0.026 mT. Drugim rečima, sistem za merenje bi trebalo da bude u mogućnosti da pozicionira pik polja sa preciznošću ne lošijom od $20 \mu\text{m}$. Da bi se ispitale mogućnosti povećanja preciznosti, sličan proračun je izveden i za pomeraj od $10 \mu\text{m}$, samo za tačke na koordinatnim osama, ali je u ovom slučaju ΔB_z iznosio samo 0.007 mT, što je ispod rezolucije sistema (pozicioniranje od $10 \mu\text{m}$ ne može se postići).

S obzirom da je nivo polja u piku od 300.586 mT na granici opsega mernog sistema u kome važi pomenuta rezolucija od 0.005 mT, u cilju povećanja pouzdanosti merenja, trebalo bi koristiti magnetni materijal sa manjom remanentnom indukcijom koji bi maksimalnu indukciju smanjio za oko 10 do 15 mT ($B_r \approx 1.39 \text{ T}$).

2) Permanentni magnet sa dijametrom od 4 mm je na granici prihvatljivosti za postupak centriranja Hall-ove sonde. Naime, iako je odgovarajuća promena indukcije relativno velika i iznosi 0.015 mT (sl. 6 b)), maksimalna srednja indukcija u centru pika za ovaj magnet iznosi 376.132 mT što izlazi iz opsega maksimalne rezolucije mernog sistema, i prebacuje ga u opseg sa rezolucijom od 0.01 mT, što je istog reda veličine kao i merena promena indukcije.

3) Kao što je već i preliminarana analiza pokazala, permanentni magnet sa dijametrom od 5 mm nije prihvatljiv za postupak centriranja Hall-ove sonde (sl. 6 c)).

LITERATURA

[1] N. Nešković, A. Dobrosavljević and J. J. Čomor, «Status report on the TESLA Project». XXXIV European Cyclotron Progress Meeting (ECPM 2005), Belgrade, October 6-8, 2005.

[2] *The TOSCA Reference Manual*, Vector Fields Limited, 24 Bankside, Kidlington, Oxford, OX5 1JE, England.

Abstract – Precise positioning of a Hall probe for cyclotron magnetic field mapping, using cylindrical permanent magnets, was analyzed. The necessary permanent magnet parameters in order to achieve $\pm 20 \mu\text{m}$ position precision, were determined.

ANALYSIS OF HALL PROBE PRECISE POSITIONING WITH CYLINDRICAL PERMANENT MAGNET

P. Beličev, A. S. Vorozhtsov, S. B. Vorozhtsov