

Damian BERESKA, Witold ILEWICZ, Daria JANKOWIAK
Politechnika Śląska

URZĄDZENIE DO WZORCOWANIA CZUJNIKÓW POLA MAGNETYCZNEGO Z WYKORZYSTANIEM CEWEK HELMHOLTZA

Streszczenie. W pracy przedstawiono konstrukcję urządzenia do wzorcowania czujników pola magnetycznego opartego o 3 cewki Helmholtza (CH), których osie są zorientowane względem siebie ortogonalnie. Maksymalne wartości indukcji pola magnetycznego pojedynczej CH w urządzeniu to około 1 mT dla prądów w cewkach równych 2A. Zakres ten obejmuje wartości pola występujące na powierzchni Ziemi (25 – 65 μ T). Omówiono budowę stanowiska, wstępne wyniki pomiarów w postaci charakterystyk statycznych zależności indukcji pola magnetycznego od prądu cewek i ocenę jakości uzyskanego rozwiązania.

CALIBRATION STATION FOR MAGNETIC FIELD SENSORS USING HELMHOLTZ COILS

Summary. This paper presents the design of a magnetic field sensor calibration device based on 3 so-called Helmholtz coils (HC), whose axes are oriented orthogonally to each other. The maximum magnetic field induction values of a single HC in the device are about 1 mT for currents in the coils equal to 2A. This range includes the field values found at the Earth's surface (25 – 65 μ T). The construction of the stand, preliminary results of measurements in the form of static characteristics of the dependence of the magnetic field induction on the coil currents and an evaluation of the quality of the obtained solution are presented.

1. Wprowadzenie

Czujniki pola magnetycznego, zwane też magnetometrami, są powszechnie stosowane do uzyskiwania informacji o orientacji obiektów na podstawie lokalnych pomiarów wektora natężenia ziemskiego pola magnetycznego. Zastosowania dotyczą najczęściej takich dziedzin jak nawigacja, naprowadzanie i sterowanie systemami latającymi, pływającymi i kosmicznymi. Czujniki takie, wraz z czujnikami przyspieszenia i prędkości kątowej, stanowią element praktycznie każdego modułu IMU (*ang. Inertial Measurement Unit*). Wartość indukcji ziemskiego pola magnetycznego przy powierzchni Ziemi zawiera się w granicach od 25 μ T (małe i średnie szerokości geograficzne) do 65 μ T (w okolicach biegunów magnetycznych w północnej Kanadzie i południowej Australii). Obecnie wartość indukcji tego pola maleje z szybkością około 80 nanotesli na rok, generalnie zmniejszanie się tego pola w czasie ma charakter eksponencjalny.

Ważnym aspektem stosowania czujników pola magnetycznego jest ich kalibracja. W jej trakcie dokonuje się precyzyjnej kwantyfikacji parametrów czujnika pola magnetycznego i wyznacza jego błędy oraz ich poprawki. W najprostszych procedurach kalibracji 3-osiowych magnetometrów wykorzystuje się lokalne ziemskie pole magnetyczne, a charakterystyki kalibracyjne wyznacza się na podstawie surowych wskazań magnetometrów zarejestrowanych podczas wykonywania zestawu obrotów 3D kalibrowanego czujnika [6]. Kalibracja taka jest względnie mało dokładna, a prawdziwe wartości pola magnetycznego nieokreślone. Ten sposób kalibracji najczęściej stosuje w urządzeniach powszechnego użytku, takich jak smartfony, gdzie wymagana dokładność jest niewielka.

Potrzeba dokładniejszej kalibracji czujników pola magnetycznego wymusiła rozwój symulatorów (generatorów) pola magnetycznego. Najczęściej symulatory takie oparte są na 3-osiowych układach cewek elektrycznych, tzw. cewek Helmholtza (CH), w których generuje się pole magnetyczne poprzez wymuszanie odpowiednich wartości prądów. Pojedyncza cewka Helmholtza to zestaw 2 identycznych cewek, przez które płynie prąd o tej samej wartości i w tym samym kierunku. Cewki umieszczone są równolegle w tej samej osi, w odległości ich promienia od siebie. Układ taki nazywany jest często parą Helmholtza. Pozwala on osiągnąć pole magnetyczne o wysokiej jednorodności w przestrzeni pomiędzy cewkami. Różne rozwiązania tego typu opisano w publikacjach [1, 2, 3, 4, 7]. Osiągana jednorodność pola magnetycznego przy zastosowaniu odpowiednich algorytmów sterowania prądami cewek sięga 0.1% [5].

W artykule opisano budowę oraz zaprezentowano wstępne wyniki pomiarów generowanego pola magnetycznego dla urządzenia do kalibracji czujników pola magnetycznego, zbudowanego na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej, opartego o zestaw trzech prostopadle zorientowanych względem siebie cewek Helmholtza. Projekt urządzenia zakładał osiągnięcie maksymalnej wartości indukcji pola magnetycznego na poziomie zbliżonym do 1 mT dla każdej z cewek. Wygląd urządzenia pokazano na rysunku 1. W jego środku wyróżniono obszar o wysokiej jednorodności indukcji generowanego pola magnetycznego.

2. Budowa urządzenia do wzorcowania w oparciu o trójosiową cewkę Helmholtza

2.1. Trójosiowa cewka Helmholtza – projekt i wykonanie

Trójosiowa cewka Helmholtza bazuje na zestawie trzech par Helmholtza rozmieszczonych ortogonalnie względem siebie. Konstrukcja taka zapewnia w obszarze pomiędzy cewkami pary pole magnetyczne o wysoce jednorodnej charakterystyce. Brak wykorzystania materiałów ferromagnetycznych w konstrukcji zapewnia wysoką liniowość generowanego pola magnetycznego.

Indukcja magnetyczna w obszarze pary Helmholtza wyraża się przybliżonym wzorem:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 N I}{R}, \quad (1)$$

gdzie:

B – indukcja pola magnetycznego, T

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, H/m

N – liczba zwojów cewki

I – prąd płynący przez cewki, A

R – promień cewek w parze Helmholtza, m (wartość średnia)

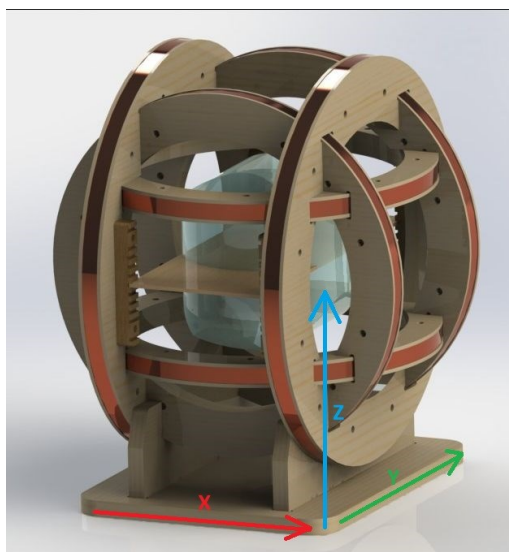
Wzór ten stanowi podstawę do wyznaczenia parametrów wymiarowych urządzenia oraz liczby zwojów poszczególnych par Helmholtza na podstawie przyjętych założeń konstrukcyjnych. Wstępnie założono wielkość obszaru jednorodnego pola magnetycznego na sześcian o boku 10 cm, co ogranicza od dołu wartość promienia najmniejszej pary Helmholtza. W obliczeniach cewek przyjęto wartości parametrów drutu miedzianego o średnicy 1,3 mm. W tabeli 1 podano parametry konstrukcyjne par Helmholtza obliczone na podstawie przyjętych założeń oraz zaprojektowanego modelu CAD 3D. Projektowe wartości indukcji generowanego pola magnetycznego podane w tabeli 1 obliczono dla prądów cewek równych 1000 mA.

Tabela 1

Parametry techniczne cewek (par) Helmholtza. N – liczba zwojów, R – średnica cewek w parach (wartość średnia), B - projektowa wartość indukcji magnetycznej dla $I=1000$ mA

Nr cewki	N	R [m]	B [μ T]
1 (X)	114	0,214	479
2 (Y)	104	0,195	480
3 (Z)	96	0,180	480

Wygląd urządzenia pokazano na rysunku 1, gdzie zaznaczono kierunki pól magnetycznych generowanych przez poszczególne pary Helmholtza. Jako oś X przyjęto kierunek pola magnetycznego generowanego przez cewkę o największej średnicy (tab.1, CEWKA_1), oś Z wskazuje kierunek pola generowanego przez cewkę o najmniejszej średnicy (tab.1, CEWKA_3).



Rys.1. Model 3D urządzenia do wzorcowania czujników pola magnetycznego - widok stelaża z układem cewek 3 cewek Helmholtza.

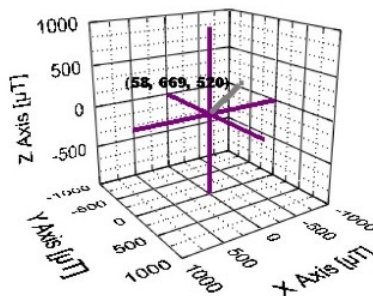
Zgodnie z projektem przedstawionym na rysunku 1 i parametrami z tabeli 1 wykonano rzeczywiste urządzenie. Jego wygląd jest praktycznie identyczny z wyglądem modelu na rysunku 1. Stelaże do nawinięcia cewek w kształcie pierścieni wykonano ze sklejki drewnianej. Połączenia elementów sklejki dokonano z użyciem kleju za pomocą kołków drewnianych. Cewki nawinięto z drutu miedzianego o średnicy 1,3 mm.

2.2. Sterowanie prądami cewek w układzie otwartym

W celu sterowania wartościami prądów cewek Helmholtza skonstruowano elektroniczny zadajnik prądów w oparciu o sterownik mikroprocesorowy oraz sterowane źródła prądowe. Zadajnik posiada trzy identyczne kanały, w których można zadawać prądy o wartościach w zakresie od $0 \div 2000$ mA (z rozdzielczością 1 mA) z jednoczesnym określeniem kierunku przepływu prądu. Każdy kanał składa się ze sterowanego źródła prądowego, przełącznika kierunku prądu, przetwornika C/A i układu zasilania. Wartość i kierunek prądu zadawane są ze sterownika mikroprocesorowego. Kanały posiadają wyjścia napięciowe do monitorowania wartości prądu w cewkach, z nominalnym współczynnikiem skali 1mA/mV. Parametry czasowe i wartości prądu w poszczególnych cewkach określone są przez użytkownika w aplikacji na komputerze PC. Przekazywanie danych z komputera PC do sterownika zadajnika realizuje interfejs szeregowy USB-RS. Zadajnik dodatkowo wyposażono w funkcje testowe do sprawdzania poprawności pracy układu.

2.3. Aplikacja z interfejsem użytkownika

Aplikacja na komputer PC z interfejsem użytkownika do ręcznego sterowania pracą urządzenia została stworzona w graficznym języku programowania LabView. Aplikacja pozwala użytkownikowi na ręczne/programowe zadawanie wartości prądu w cewkach w zakresie od -2000 mA do 2000 mA oraz prezentuje orientacyjny wektor zadanego pola magnetycznego na wykresie 3D w układzie X-Y-Z. Współrzędne wektora obliczane są na podstawie modelu (1). W trybie programowym można zadawać sekwencję wartości prądów w poszczególnych parach Helmholtza oraz czas ich trwania. Przykładowa wizualizacja generowanego wektora indukcji pola magnetycznego jest pokazana na rysunku 2.



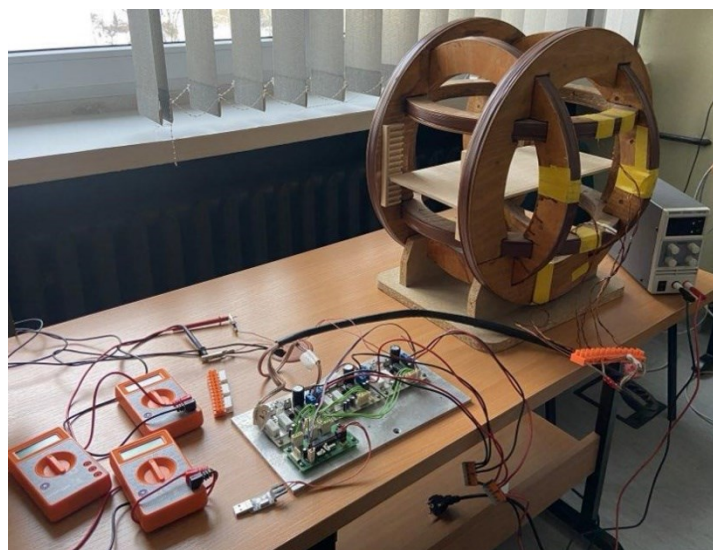
Rys.2. Przykładowa wizualizacja generowanego wektora indukcji pola magnetycznego w aplikacji środowiska LabView w układzie współrzędnych X-Y-Z wg rysunku 1.

3. Pomiary testowe i dyskusja wyników

Widok urządzenia podczas pomiarów testowych pokazano na rysunku 3. Po lewej stronie stołu widoczne są woltomierze do bieżącej kontroli prądów w cewkach. W środku widoczny jest zadajnik prądów cewek, z interfejsem USB-RS do komputera PC. Po prawej widoczny jest zestaw cewek Helmholtza wraz z tacką pomiarową do umieszczania kalibrowanych czujników oraz zasilacz urządzenia.

Podczas pomiarów testowych pomiary przeprowadzono niezależnie dla każdej cewki. Na drewnianej tacy zorientowanej równolegle do płaszczyzny X-Y urządzenia umieszczono cyfrowy czujnik pola magnetycznego 1D, o rozdzielczości $1\mu\text{T}$, precyzyjnie zamocowany w sześcienniej ramce, co umożliwiło dokładne orientowanie osi czujnika z osiami cewek X, Y, Z urządzenia. Na każdej z cewek Helmholtza zadawano prądy stałe z zakresu $\langle -1500\text{ mA}, 1500\text{ mA} \rangle$ z krokiem 100 mA , przy zerowych wartościach prądu w pozostałych cewkach. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 2.

Wyniki pomiarów przedstawione w tabeli 2 podsumowano w tabeli 3 oraz na rysunku 4. Na rysunku 4, w górnej części, pokazano dane pomiarowe w postaci zmierzonej charakterystyki statycznej zależności $B(I)$ oraz proste regresji $B=a \cdot I+b$ dopasowane do danych metodą najmniejszych kwadratów. Wartości współczynników regresji pokazano w drugiej i trzeciej kolumnie tabeli 3. W kolumnie 4 tabeli 3 zaprezentowano maksymalne wartości błędów nieliniowości charakterystyk w zastosowanym zakresie prądów.



Rys. 3. Urządzenie do kalibracji czujników pola magnetycznego – widok rzeczywisty.

Tabela 2

Wyniki pomiarów indukcji pola magnetycznego cewek 1(X), 2(Y), 3(Z)

LP	I mA	BX μT	BY μT	BZ μT	LP	I mA	BX μT	BY μT	BZ μT
1	-1500	-768	-720	-717	16	0	-36	6	-7
2	-1400	-720	-672	-669	17	100	11	55	43
3	-1300	-670	-624	-621	18	200	60	105	89

4	-1200	-621	-576	-574	19	300	108	152	137
5	-1100	-573	-528	-526	20	400	158	201	184
6	-1000	-524	-479	-478	21	500	207	250	231
7	-900	-476	-431	-430	22	600	256	298	279
8	-800	-426	-382	-383	23	700	305	346	325
9	-700	-378	-334	-335	24	800	354	394	374
10	-600	-329	-285	-288	25	900	404	442	421
11	-500	-280	-237	-240	26	1000	452	490	470
12	-400	-232	-188	-193	27	1100	502	538	517
13	-300	-182	-139	-146	28	1200	550	585	565
14	-200	-135	-90	-98	29	1300	599	632	613
15	-100	-85	-40	-52	30	1400	648	679	660
16	0	-36	6	-7	31	1500	697	725	709

W dolnej części rysunku 4 pokazano wykresy błęd nieliniowości dla poszczególnych cewek. Błędy te zostały policzone jako różnica pomiędzy wartościami zmierzonej indukcji magnetycznej pokazanej w tabeli 2, a wartościami prostej łączącej dwa skrajne punkty charakterystyk statycznych B(I) cewek.

Współczynniki nachylenia charakterystyk statycznych cewek mają zbliżone wartości i wynoszą około $0,48 \mu\text{T}/\text{mA}$. Odchyłki ich wartości od średniej są poniżej 1,6%, co świadczy o wysokiej dokładności wykonania urządzenia. Ponieważ rozdzielczość zadawania prądu w cewkach zadajnikiem elektronicznym wynosi 1mA, rozdzielczość wartości indukcji możliwa do uzyskania w urządzeniu wynosi poniżej $0,5 \mu\text{T}$ i jest na poziomie 1% średniej wartości indukcji ziemskiego pola magnetycznego na powierzchni Ziemi. Rozdzielczość taka pozwoli na bardzo dokładną kalibrację czujników orientacji wykorzystujących magnetometrię.

Tabela 3

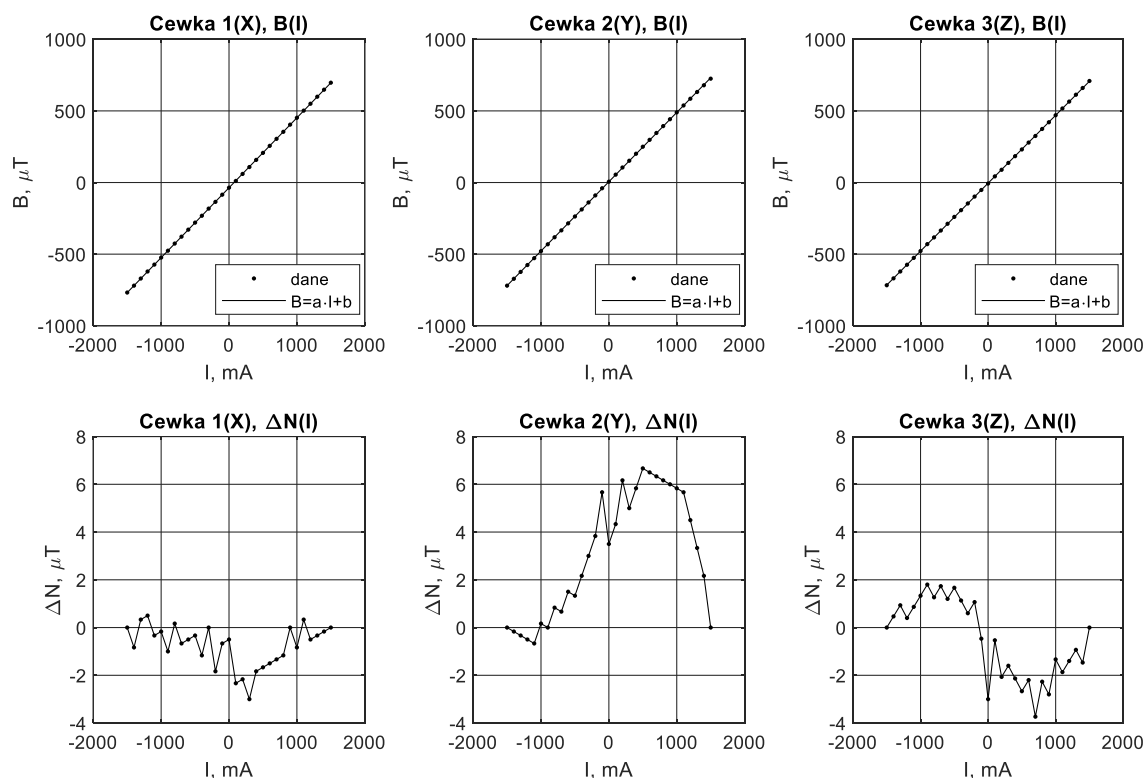
Podsumowanie analizy danych z tabeli 1

Nr cewki	a $\mu\text{T}/\text{mA}$	b μT	$\max(\Delta N)$ μT	$a \times 1000 \text{ mA}$ μT	B(1000 mA) proj., μT
1 (X)	0,488	-36,3	3	488	479
2 (Y)	0,483	5,58	6,7	483	480
3 (Z)	0,474	-4,52	3,7	474	480

Maksymalne wartości indukcji magnetycznej możliwe do uzyskania dla pojedynczej cewki w urządzeniu wynoszą nieco poniżej 1 mT, co stanowi dwudziestokrotność średniej wartości indukcji ziemskiego pola magnetycznego. Maksymalny stały wektor indukcji magnetycznej możliwy do wygenerowania na stanowisku ma wartość około 1,7 mT (dla prądów we wszystkich cewkach ustalonych na poziomie 2000 mA).

Zależności B(I) pokazane na rysunku 4, w górnej jego części, charakteryzują się bardzo wysoką liniowością. Świadczą o tym przebiegi błęd nieliniowości, pokazane na dolnej części rysunku 4. Maksymalne wartości modułu tych błędów wynoszą dla cewek 1(X), 2(Y) i 3(Z) odpowiednio dla $3,0 \mu\text{T}$, $6,7 \mu\text{T}$ i $3,7 \mu\text{T}$ co stanowi około 0,20%, 0,46% i 0,26% zakresu wartości indukcji magnetycznej podczas pomiarów.

Oznacza to możliwość osiągnięcia wysokiej dokładności zadawania indukcji magnetycznej w urządzeniu przy odpowiedniej procedurze jego kalibracji.



Rys. 4. Charakterystyki statyczne cewek Helmholtza (wykresy górne) oraz ich błędy nieliniowości (wykresy dolne)

Wartości współczynników b równania regresji liniowej opisujących zależność $B(I)$ wyznaczone na podstawie pomiarów, pokazane w trzeciej kolumnie tabeli 3 są niezerowe. Są one w przybliżeniu równe zmierzonej wartości indukcji magnetycznej dla zerowego prądu w cewkach (tabela 2). Ponieważ podczas pomiarów nie zmieniano orientacji stanowiska, wartości te są zbliżone do rzutów indukcji lokalnego ziemskiego pola magnetycznego na kierunki osi cewek w urządzeniu, a pierwiastek z sumy ich kwadratów równy około $37 \mu\text{T}$. Przy wykorzystaniu urządzenia do precyzyjnej kalibracji czujników wielkość tą należy kompensować. Na ogół czyni się to poprzez umieszczenie na tacy urządzenia wzorcowego czujnika pola magnetycznego, którego wskazania wykorzystuje się do kompensacji w czasie rzeczywistym zewnętrznych pól magnetycznych w obszarze urządzenia.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono projekt i rezultaty wstępnych badań urządzenia przeznaczonego do generacji jednorodnego, stałego pola magnetycznego w oparciu o 3-osiową cewkę Helmholtza. Opisane rozwiązanie obejmuje stelaż z nawiniętymi, zgodnie z projektem, cewkami Helmholtza, sterownik elektroniczny do precyzyjnego zadawania prądów w cewkach wyposażony w interfejs USB-RS do połączenia z komputerem PC oraz do ręcznego i programowego zadawania prądów w cewkach.

Wyniki pomiarów wskazują na wysoką jakość wykonania urządzenia. W założeniach projektowych dla prądów w cewkach 1(X), 2(Y), 3(Z) równych 1000 mA, wyznaczone z modelu matematycznego dla przyjętych parametrów technicznych wartości indukcji pokazano w ostatniej kolumnie tabeli 3. Dla porównania w przedostatniej kolumnie umieszczono wartości uzyskane podczas pomiarów testowych na gotowym urządzeniu. Wartości te są niemal identyczne, co oznacza spełnienie założeń projektowych z wysoką dokładnością.

Kolejne prace, przy zbudowanym urządzeniu, obejmować będą badania mające na celu wyznaczenie współczynników sprzężeń skrośnych pól generowanych przez cewki Helmholtza. Sprzężenia te występują głównie na skutek błędów ortogonalności ustawienia osi cewek, a w mniejszym stopniu z powodu innych czynników. W obecnym stanie urządzenie pracuje w układzie otwartym, bez sprzężenia zwrotnego z informacją o rzeczywistej wartości indukcji pola magnetycznego w strefie jednorodności wewnątrz cewek. W dalszych pracach urządzenie zostanie wyposażone we wzorcowy czujnik zapewniający takie sprzężenie. Umożliwi to kompensację zewnętrznych zmiennych pól magnetycznych oddziałujących na urządzenie i występujących podczas kalibracji. Odpowiednio rozbudowana zostanie aplikacja PC do sterowania stanowiskiem. Autorzy szacują możliwą do osiągnięcia, docelową dokładność generacji jednorodnego pola magnetycznego na stanowisku na nie gorszą niż 0.25%.

Praca została zrealizowana przy wsparciu finansowym Politechniki Śląskiej w ramach dotacji na utrzymanie i rozwój potencjału badawczego w roku 2024: 02/050/BK_24/0038.

LITERATURA

1. Abbott J. J.: Parametric design of tri-axial nested Helmholtz coils. Rev. Sci. Instrum., vol. 86, no. 5, May 2015, Art. no. 054701.
2. Batista F., Granziera M., Tosin C., de Melo L. F.: Three-axial Helmholtz coil design and validation for aerospace applications. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 54, no. 1, Feb. 2018, p. 392–403.
3. Mohamadabadi K., Hillion M.: An automated indoor scalar calibration method for three-axis vector magnetometers. IEEE Sensors J., vol. 14, no. 9, Sep. 2014, p. 3076–3083.
4. Piergentili F., Candini G. P., Zannoni M.: Design, manufacturing, and test of a real-time, three-axis magnetic field simulator. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 47, no. 2, Apr. 2011, p. 1369–1379.
5. Ramdas V., Sethunadh R.: A magnetic sensor calibration system based on a closed-loop tri-axial field simulator. IEEE Access, vol. 10, 2022, p.81846–81855.
6. Renaudin V., Afzal M. H., Lachapelle G.: Complete triaxis magnetometer calibration in the magnetic domain. J. Sensors, vol. 2010, Dec. 2010, p. 1–10.
7. Wyszynski G.: Development of magnetic field control systems in the nEDM experiment. Ph.D. thesis, Fac. Phys., Astron. Appl. Comput. Sci., Jagiellonian Univ., Kraków, Poland, 2016.