

Stanowisko do badania trójosiowych magnetometrów do pomiaru ziemskiego pola magnetycznego

Roman Szewczyk
Jacek Salach
Adam Bieńkowski
Marcin Safinowski
Rafał Kłoda

Pole magnetyczne występuje na całej powierzchni Ziemi, niezależnie od szerokości i długości geograficznej. Różni się jedynie co do wartości i kierunku. Różnice te wynikają zarówno z położenia geograficznego, jak również z uwarunkowań geologicznych. W celu określenia wartości pola ziemskiego w danym miejscu należy wykonać pomiary pola magnetycznego, np. za pomocą magnetometru magnetorezystancyjnego lub transduktorowego [1, 4]. Zwykle w danym punkcie

Ziemi wyznacza się składowe prostopadłą H_{\perp} i poziomą H_{\parallel} oraz kąt θ deklinacji magnetycznej i kąt φ inklinacji magnetycznej. Kąt θ jest kątem zawartym pomiędzy południkiem magnetycznym a południkiem geograficznym, przy czym odchylenie pola w kierunku wschodnim od południka geograficznego odpowiada deklinacji magnetycznej dodatniej, a w kierunku zachodnim – ujemnej. Inklinacja magnetyczna odpowiada kątowi φ , który tworzą z poziomem w danym punkcie Ziemi linie pola magnetycznego.

Pomiary pola magnetycznego realizowano także w pobliżu innych planet Układu Słonecznego i na Księżycu. Do tej pory w przestrzeń kosmiczną wystrzelono ponad 200 magnetometrów różnego typu. Na rys. 1 przedstawiono amerykańskiego kosmonautę Alana Beana rozstawiającego na Księżycu trójosiowy magnetometr transduktorowy w trakcie misji Apollo 12.

Aby zapewnić odpowiednią dokładność pomiarów, należy zbadać niepewność pomiarów wykonywanych danym przyrządem, jak również jego czu-

W artykule przedstawiono stanowisko do badania trójosiowych magnetometrów pracujących w zakresie pomiarowym zbliżonym do pola ziemskiego. W stanowisku zastosowano trójosiowe cewki Helmholtza oraz stabilny zasilacz prądowy. Niepewność wzorcowego pola wytwarzanego przez pojedynczą parę cewek Helmholtza oszacowano na 0,5%. Stanowisko będzie mogło być wykorzystane do badania właściwości funkcjonalnych oraz wzorcowania magnetometrów transduktorowych oraz czujników magnetorezystancyjnych.



Rys. 1. Alan Bean rozstawia na Księżycu trójosiowy magnetometr transduktorowy w trakcie misji Apollo 12 (fot. za zgodą NASA)

łość, liniowość oraz powtarzalność wskazań. Najdogodniejszym do tego celu wzorcem pola magnetycznego są cewki Helmholtza wytwarzające jednorodne pole magnetyczne o zdefiniowanej wartości, którego niepewność zależy jedynie od niepewności pomiaru geometrii cewek oraz od niepewności pomiaru prądu płynącego przez ich uzwojenia. Wariantem cewek Helmholtza są cewki trójosiowe umożliwiające całkowitą kompensację pola ziemskiego, uzyskanie zerowego pola wewnątrz

cewek, jak również wytworzenia dowolnego wektora pola magnetycznego.

W artykule opisano budowę stanowiska do badania magnetometrów mierzących pole magnetyczne w zakresie zbliżonym do pola ziemskiego. Kluczowym elementem stanowiska są trójosiowe cewki Helmholtza umożliwiające zarówno kompensację ziemskiego pola magnetycznego, jak i badanie użytkowych właściwości sensorów. Cewki te są sterowane za pomocą precyzyjnego źródła prądowego firmy KEPCO. W przyszłości zrealizowane stanowisko będzie także wykorzystywane w pracach badawczych związanych z opracowywaniem nowych typów sensorów transduktorowych.

Czujniki magnetorezystancyjne do pomiaru stałych pól magnetycznych

Sensory magnetorezystancyjne znajdują szerokie zastosowanie w systemach nawigacji, systemach bezpieczeństwa oraz w przemysłowej aparaturze kontrolno-pomiarowej. W szczególności są stosowane jako czujniki magnetyczne w badaniach nieniszczących elementów ferromagnetycznych.

Sensory magnetorezystancyjne, zwane także gaussotronami, wykorzystują zjawisko polegające na wzroście rezystancji właściwej cienkiej warstwy ferromagne-

dr inż. Roman Szewczyk^{1,2}, dr inż. Jacek Salach¹,
prof. nzw. dr hab. inż. Adam Bieńkowski¹,
mgr inż. Marcin Safinowski², mgr inż. Rafał Kłoda^{1,2}

¹ Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej
Politechniki Warszawskiej

² Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

tyka pod wpływem pola magnetycznego. Występuje ono na skutek zwiększonego rozpraszania i wydłużenia drogi nośników ładunku. Dla słabych pól magnetycznych zmianę tę można opisać zależnością liniową [1]:

$$\rho_B = \rho_0 \cdot (1 + a \cdot \mu_H^2 \cdot B) \quad (1)$$

gdzie: ρ_0 – rezystywność właściwa materiału niepoddanego działaniu pola magnetycznego, μ_H – ruchliwość Halla nośników ładunku, a – współczynnik opisujący mechanizm rozpraszania, B – indukcja mierzonego pola magnetycznego.

W praktyce magnetorezystor wykonywany jest w formie meandry metodą naparowywania próżniowego i fotolitografii. Dzięki temu mogą być uzyskiwane znaczne zmiany rezystancji, a w rezultacie wysoka czułość przetwornika. Proces projektowania cienkowarstwowych czujników magnetorezystancyjnych został szczegółowo opisany w [2]. Najczęściej stosowane przetworniki magnetorezystancyjne zawierają w swojej strukturze cztery magnetorezystory pracujące w układzie mostka Wheatstone'a. Dodatkowo mają one wbudowany układ stabilnego wzmacniacza różnicowego.

W celu zwiększenia dokładności przetwarzania czujnika magnetorezystancyjnego, a w szczególności korekcji temperaturowego pełzania zera, często stosuje się kluczujące pole stabilizujące [2] wytwarzane przez zewnętrzną cewkę. W nowoczesnych konstrukcjach cewka taka może być wbudowana w wewnętrzną strukturę przetwornika.

Do zalet czujników magnetorezystancyjnych należą: szeroki zakres pomiarowy (do 1 mT), szeroki zakres częstotliwości pracy (od pól stałych do 1 GHz), możliwość pracy w różnych temperaturach (od -70 °C do 200 °C) oraz małe wymiary [2]. Ponieważ przetworniki tego typu wykonywane są na podłożu krzemowym, można na jednej płytce wykonać czujnik i zoptymalizowany do pracy z nim wzmacniacz różnicowy.

Wadą tego typu czujników jest konieczność stosowania dość złożonych układów elektronicznych, zwłaszcza przy dokładnych pomiarach z zastosowaniem cewek kluczujących. Ponadto przetworniki magnetorezystancyjne dużej dokładności, zawierające w swojej strukturze wzmacniacze lub cewki kompensacyjne [4], są dość drogie.

Nowoczesnym magnetometrem magnetorezystancyjnym jest trójosiowy magnetometr HMR2300 firmy Honeywell. Magnetometr ten zawiera dwa czujniki magnetorezystancyjne: jednoosiowy HMC1001 i dwuosiowy

HMC1002. Poniżej przedstawiono podstawowe parametry użytkowe magnetometru HMR2300:

Napięcie zasilania:	od 6 V do 15 V
Temperatura pracy:	od -40 °C do +85 °C
Zakres pomiarowy:	±200 mT
Częstotliwość pracy:	od 0 Hz (DC) do 154 Hz
Dokładność pomiaru:	0,5 % zakresu
Sygnal wyjściowy:	cyfrowy, RS-232/RS-485.

Opracowane stanowisko badawcze

Na rys. 2 podano schemat blokowy opracowanego stanowiska do badania czujników magnetorezystancyjnych.

Stanowisko składa się z precyzyjnego źródła prądowego BOP-36A firmy KEPCO, amperomierza APPA 207, opracowanych trójosiowych cewek Helmholtza oraz magnetometru HMR2300 współpracującego z komputerem PC wyposażonym w oprogramowanie LABVIEW z pakietem VISA zapewniającym komunikację z magnetometrem poprzez port RS-232.

Opracowane trójosiowe cewki Helmholtza zostały wykonane we współpracy z Przemysłowym Instytutem Automatyki i Pomiarów. Wykonano je z tworzywa sztucznego (tarnamit) za pomocą obróbki skrawaniem i cięcia strumieniem wody pod wysokim ciśnieniem. Wizualizację projektu cewek Helmholtza przedstawiono na rys. 3.

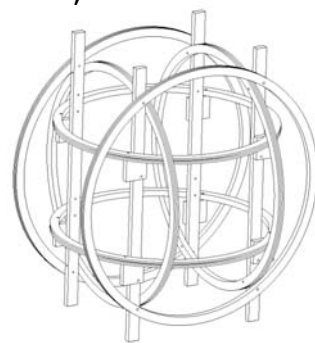
Wartość pola magnetycznego H w odległości x od środka układu cewek Helmholtza o promieniu r , odległych od siebie o a może być wyznaczona z zależności [3]:

$$H = \frac{nIr^2}{2} \left\{ \left[r^2 + \left(\frac{a}{2} + x \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} + \left[r^2 + \left(\frac{a}{2} - x \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} \right\} \quad (2)$$

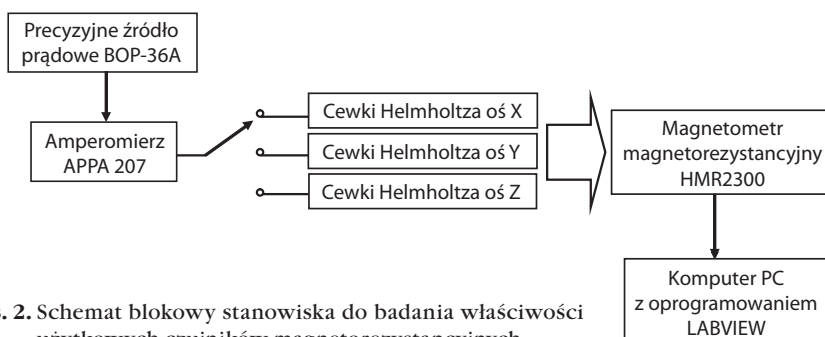
w której n jest liczbą zwojów każdej z cewek, zaś I jest przepływającym przez nie prądem. Aby wytworzyć jednorodne pola magnetyczne, odległość a między cewkami Helmholtza powinna być równa ich promieniowi r , zaś wartość stosunku wymiarów b i c przekrojów po-

przechnych uzwojenia cewek powinna wynosić $\sqrt{\frac{31}{36}}$ [3]. Przy spełnieniu tych warunków zależność (2) można sprowadzić do postaci:

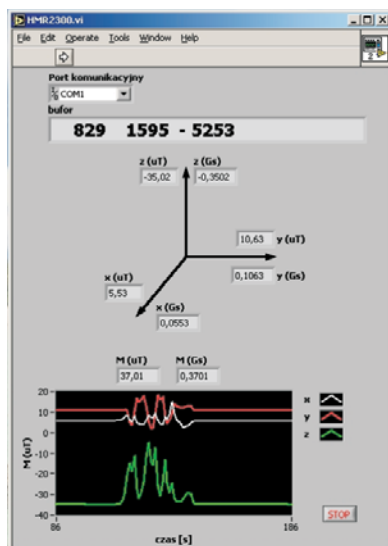
$$H = 0,7155 \frac{n}{r} I \quad (3)$$



Rys. 3. Wizualizacja projektu opracowanych, trójosiowych cewek Helmholtza

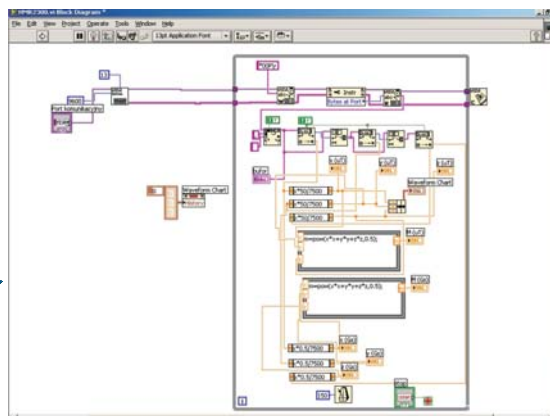


Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska do badania właściwości użytkowych czujników magnetorezystancyjnych



Rys. 4. Widok okna programu służącego do wizualizacji wyników pomiarów magnetometrem HMR2300. Widoczne w oknie oscylacje są wynikiem zakłócenia mierzonego magnetycznego pola ziemskiego przez wprowadzenie do cewek Helmholtza rdzenia ferromagnetycznego

Rys. 5. Graficzna prezentacja kodu źródłowego opracowanego programu z wykorzystaniem pakietu LABVIEW z modulem VISA



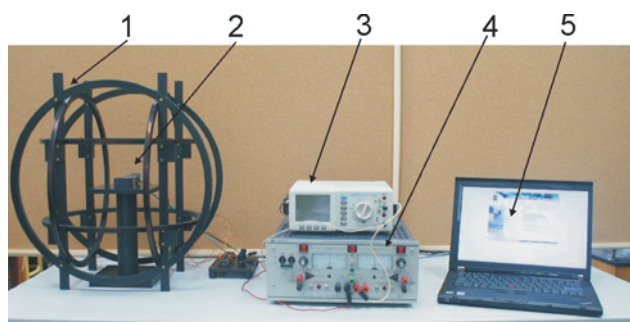
Tab. 1. Parametry użytkowe opracowanych cewek Helmholtza

Oś	Promień r (m)	Liczba zwojów n	Stała przetworzenia k_1 (A/m/A)	Stała przetworzenia k_2 ($\mu\text{T/A}$)
X	0,2230	25	80,213	100,799
Y	0,2045	25	87,469	109,917
Z	0,1860	25	96,169	120,850

W tab. 1 zebrano parametry opracowanych cewek Helmholtza w odniesieniu do poszczególnych osi, przy czym k_1 i k_2 są stałymi przetworzenia; $k_1 = H/I$, $k_2 = B/I$, (B – indukcja magnetyczna w wolnej przestrzeni, $B = \mu_0 H$).

Na rys. 4 przedstawiono widok okna programu służącego do wizualizacji wyników pomiarów magnetometrem HMR2300, przy czym środek układu współrzędnych znajduje się w środku geometrycznym cewek Helmholtza, a osie wykresu pokrywają się z osiami cewek. Na rys. 5 w sposób graficzny przytoczono kod źródłowy opracowanego programu z wykorzystaniem pakietu LABVIEW z modulem VISA.

Na rys. 6 przedstawiono widok opracowanego stanowiska wraz z badanym magnetometrem magnetorezystancyjnym, źródłem prądowym oraz współpracującym komputerem PC.



Rys. 6. Widok opracowanego stanowiska pomiarowego: 1 – trójwymiarowe cewki Helmholtza, 2 – czujnik magneto-rezystancyjny HMR2300, 3 – amperomierz APPA 207, 4 – zasilacz prądowy KEPCO36A, 5 – komputer PC

Oszacowanie błędów wartości wzorcowego pola magnetycznego wytwarzanego na stanowisku

Do oszacowania dokładności wzorcowego pola magnetycznego wytwarzanego przez opracowane trójosiowe cewki Helmholtza przyjęto następujące założenia:

- niepewność wykonania średnicy cewki Helmholtza: 0,5 %
- niepewność pomiaru prądu płynącego przez cewki: 0,2 %.

Przy powyższych założeniach niepewność wzorcowego pola wytwarzanego przez pojedynczą parę cewek Helmholtza oszacowano na 0,6 %. Niepewność pola wzorcowego jest zbliżona do niepewności pomiaru realizowanego za pomocą magnetometru HMR2300.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Opracowane stanowisko umożliwia badanie właściwości użytkowych magnetometrów do pomiaru pola magnetycznego w zakresie do około 100 mT, czyli magnetometrów wykrywających anomalie ziemskiego pola magnetycznego. Opracowane stanowisko umożliwia generowanie pola magnetycznego w trzech prostopadłych osiach, co stwarza możliwość wytworzenia pola magnetycznego o dowolnym kierunku wektora wypadkowego. Opracowane stanowisko umożliwia generowanie wzorcowego pola magnetycznego z niepewnością nieprzekraczającą 0,6 %.

Bibliografia

1. Rusek M., Ćwirko R., Marciniak W.: *Przewodnik po elektronice*. WNT 1986.
2. Tumański S.: *Cienkowarstwowe czujniki magneto-rezystancyjne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
3. Nałęcz M., Jaworski J.: *Miernictwo magnetyczne*. WNT 1968.
4. Ripka P.: *Magnetic sensors and magnetometers*. Artech House 2001. ■