

Współczesne systemy magnetometryczne

Streszczenie. Systemy magnetometryczne znajdują zastosowanie szczególnie w geologii, w archeologii oraz w urządzeniach militarnych. Do pomiaru indukcji magnetycznej stosowane są precyzyjne magnetometry SQUID, pompowane optycznie, Overhauser'a, protonowe i transduktorowe. W pracy przedstawiono metodę magnetometryczną oraz opisano współczesne systemy magnetometryczne.

Abstract. Magnetometric systems are used especially in geology, archeology and military devices. The very sensitive magnetometers as SQUID, optically pumped, Overhauser's, proton and fluxgate are used in measuring the Earth magnetic field. The magnetometric method and modern magnetometric systems are presented in this paper. (Modern magnetometric systems).

Słowa kluczowe: magnetometria, magnetometr, pole magnetyczne, obiekt ferromagnetyczny.

Keywords: magnetometer, magnetic field, ferromagnetic object.

Wstęp

Każdy obiekt o właściwościach ferromagnetycznych zaburza w swoim otoczeniu równomierność pola magnetycznego Ziemi. Zaburzenie to wynika z namagnesowania stałego i indukowanego obiektu. Namagnesowanie stałe związane jest z tzw. historią magnetyczną obiektu. Obiekt o namagnesowaniu stałym wytwarza pole magnetyczne niezależnie od obecności pola ziemskiego. Namagnesowanie indukowane zależy jest natomiast od kształtu obiektu, od jego właściwości ferromagnetycznych oraz położenia względem ziemskiego pola magnetycznego. Mierząc ziemskie pole magnetyczne można obiekt o właściwościach ferromagnetycznych wykryć i zlokalizować. Jest to tzw. metoda magnetometryczna znana od początków XX wieku. Metoda ta ma zastosowanie głównie w geologii, w archeologii i w systemach militarnych. Wyróżnia się systemy magnetometryczne lotnicze, naziemne i podwodne. W pracy przedstawiono problematykę wykrywania obiektów ferromagnetycznych metodą magnetometryczną oraz przedstawiono systemy magnetometryczne lotnicze, naziemne i podwodne.

Pole magnetyczne obiektu ferromagnetycznego

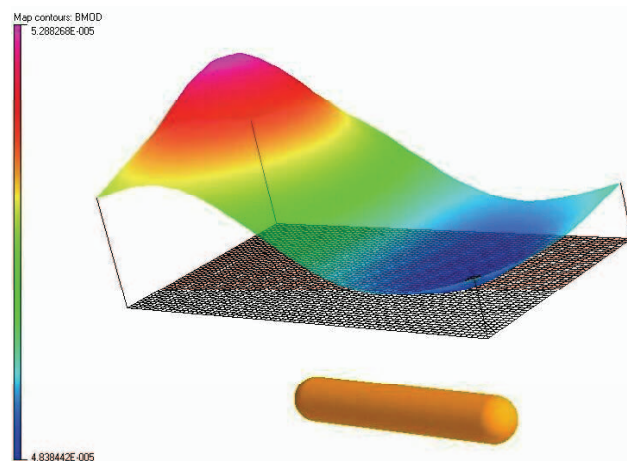
Przy magnesowaniu materiału ferromagnetycznego w zamkniętym obwodzie magnetycznym indukcja magnetyczna w ferromagnetyku jest zgodna z charakterystyką magnesowania. W przypadku magnesowania obiektu o skończonych wymiarach geometrycznych w obwodzie otwartym, końce obiektu wytwarzają dodatkowe pole magnetyczne, które powoduje osłabienie pola wewnątrz obiektu. Jest to zjawisko od magnesowującego oddziaływania kształtu [1]. Mimo magnesowania jednorodnym polem obiekt ulega niejednorodnej magnetyzacji, za wyjątkiem kuli i symetrycznej elipsoidy. Obiekt taki ulega tzw. namagnesowaniu indukowanemu. Oba rodzaje namagnesowania powodują powstanie wypadkowego pola własnego obiektu, które w pewnym obszarze osłabia, a w innym wzmacnia ziemskie pole magnetyczne. Pole własne obiektu zwane również anomalią magnetyczną jest złożoną funkcją wielu parametrów takich jak: kształt obiektu, właściwości magnetyczne, „historia” magnetyczna obiektu (ma wpływ na wartość namagnesowania stałego) i położenia względem wektora ziemskiego pola magnetycznego. Przykład anomalii magnetycznej obiektu ferromagnetycznego przedstawiono na rys.1. Obliczenia symulacyjne pola magnetycznego obiektu przeprowadzono w pakiecie Opera 3D [2].

Pole magnetyczne jest polem potencjalnym i może być przedstawione jako gradient potencjału [3]:

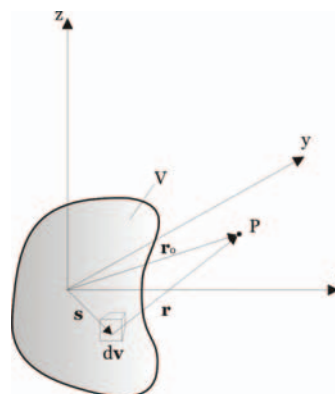
$$(1) \quad H = -\nabla \phi$$

Potencjał pola magnetycznego wynosi (rys.2):

$$(2) \quad \phi(r_o) = \int_V M(s) \cdot \nabla\left(\frac{1}{r}\right) dv$$



Rys.1 Pole magnetyczne obiektu ferromagnetycznego



Rys.2 Przyjęta geometria układu do obliczenia pola magnetycznego obiektu, gdzie: V – obszar ferromagnetyka, M – wektor momentu magnetycznego, P – punkt o potencjale ϕ .

Równanie (2) może zostać rozwiązane i przedstawione jako suma momentów magnetycznych [4]. Pierwszy składnik wyrażenia to dipol magnetyczny. W poszu-

kiwaniach obiektów magnetycznych przyjmuje się uproszczony model matematyczny obiektu w postaci dipola magnetycznego. Istnieje szereg metod lokalizacji i identyfikacji obiektu ferromagnetycznego z zastosowaniem metody magnetometrycznej [5-7].

Magnetometriy

W pomiarach ziemskiego pola magnetycznego (średnia wartość indukcji magnetycznej Ziemi wynosi $50 \mu\text{T}$) stosowane są przyrządy pomiarowe zwane magnetometrami. W magnetometrii używa się magnetometry wektorowe i skalarnie. Magnetometry wektorowe pozwalają na pomiar trzech składowych wektora ziemskiego pola magnetycznego. Stosowane są magnetometry transduktorowe i SQUID. W przypadku magnetometru SQUID możliwy jest również pomiar pochodnych cząstkowych wektora pola magnetycznego [7]. Do magnetometrów skalarnych, które mierzą moduł wektora indukcji magnetycznej należą magnetometry protonowe, magnetometry Overhauser'a i pompowane optycznie [8]. Do najczulszych magnetometrów należą SQUID o czułości rzędu dziesiątek fT i pompowane optycznie o czułości 1 pT. Stosowanie pojedynczego magnetometru o tak dużej czułości w praktyce nie ma sensu ze względu na występowanie wariacji ziemskiego pola magnetycznego. Szybkie wariacje pola magnetycznego wynoszą od kilkudziesięciu do kilkuset pT. Poważną trudnością w wykrywaniu obiektów ferromagnetycznych mogą okazać się naturalne anomalie magnetyczne. Wysoką czułość magnetometrów można uzyskać stosując różnicowy pomiar indukcji magnetycznej. Wpływ wariacji i naturalnych anomalii magnetycznych w takich układach jest znikomy. Magnetometry stosowane są w systemach magnetometrycznych lotniczych, naziemnych i podwodnych. Zasięg wykrywania obiektów ferromagnetycznych metodą magnetometryczną zależy od właściwości ferromagnetycznych obiektu, rodzaju zastosowanego magnetometru lub magnetometrów oraz środowiska, w którym wykonuje się poszukiwania. W obszarze dużych zakłóceń magnetycznych (np. otoczenie trakcji elektrycznej, dużych zakładów przemysłowych) wykrywanie obiektów jest utrudnione.

Lotnicze systemy magnetometryczne

Lotnicze systemy magnetometryczne instalowane są na samolotach, śmigłowcach i pojazdach bezzałogowych UAV. Stosowane są systemy pomiaru indukcji magnetycznej oraz gradientu indukcji magnetycznej. Głównie stosowane są magnetometry pompowane optycznie oraz SQUID. Systemy te znajdują zastosowanie w pracach geologicznych (w wykrywaniu złóż ropy naftowej, gazu czy diamentów) oraz w celach militarnych.

Systemy magnetometryczne na samolotach

W systemach magnetometrycznych na samolotach stosowane są głównie magnetometry pompowane optycznie. Sondy magnetometrów montowane są do konstrukcji samolotu. Na rysunku 3 przedstawiono samolot typu Cessna z gradientowym systemem magnetometrycznym na skrzydłach i w tylnej części samolotu oraz natomiast na rysunku 4 polski samolot Bryza Bis produkcji PZL Mielec. Samolot podczas lotu generuje w swoim otoczeniu zakłócające pole magnetyczne. Zakłócenia te związane są z namagnesowaniem stałym i indukowanym samolotu oraz z prądami wirowymi indukowanymi podczas przechyłów samolotu. Z tego względu system magnetometryczny na samolocie musi być wyposażony w kompensator zakłóceń magnetycznych [9, 10]. Na rysunku 5 przedstawiono zmiany bezwymiarowych wartości indukcji

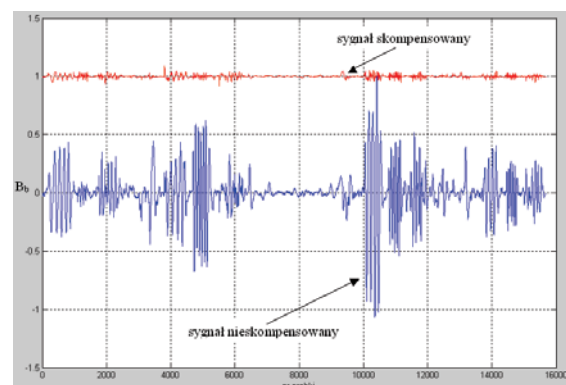
magnetycznej bez i z kompensacją zakłóceń magnetycznych generowanych przez samolot typu skytruck.



Rys.3 System gradientowy na samolocie typu Cessna (www.fugroairborne.com)



Rys.4 System magnetometryczny na polskim samolocie Bryza Bis (foto: Mariusz Adamski)



Rys.5 Zmiany bezwymiarowych wartości indukcji magnetycznej bez i z kompensacją zakłóceń magnetycznych

Poziom zakłóceń magnetycznych zależy od tzw. wyczyszczenia magnetycznego samolotu. W samolocie przeznaczonym do pracy z systemem magnetometrycznym minimalizuje się liczbę elementów ferromagnetycznych, odpowiednio projektuje instalację elektryczną oraz stosuje się, jeżeli jest taka możliwość, poszycie samolotu z tworzywa sztucznego.

Systemy magnetometryczne na śmigłowcach

W systemach magnetometrycznych na śmigłowcach stosowane są pojedyncze magnetometry (rys.6) oraz układ kilku magnetometrów do pomiaru gradientu skalarnego indukcji magnetycznej (rys.7). W przypadku instalacji magnetometru lub magnetometrów w bliskiej odległości od śmigłowca podobnie jak na samolotach stosowany jest kompensator zakłóceń magnetycznych.



Rys.6. System magnetometryczny na śmigłowcu z pojedynczym magnetometrem (www.fugroairborne.com)



Rys.7. System gradiometryczny na śmigłowcu z trzema magnetometrami (www.fugroairborne.com)

W systemach magnetometrycznych podwieszanych na śmigłowcach nie ma potrzeby stosowania kompensatorów zakłóceń magnetycznych (rys.8,9). Magnetometry znajdują się w specjalnych gondolach, wystarczającej odległości od ferromagnetycznych elementów śmigłowca. Z uwagi na stabilny lot gondoli w systemach tych stosuje się również magnetometry SQUID [11].



Rys.8. System gradiometryczny podwieszony na śmigłowcu (www.fugroairborne.com)



Rys.9 Polski śmigłowiec Mi-14P z systemem magnetometrycznym (www.mw.mil.pl)

Naziemne systemy magnetometryczne

Naziemne systemy magnetometryczne przeznaczone są głównie do wykrywania min, niewybuchów oraz militariów. Wyróżnia się systemy przenoszone na

pojazdach mechanicznych oraz systemy ręczne. W systemach tych stosowane są magnetometry transduktorowe (rys.10), pompowane optycznie (rys.11) oraz protonowe (rys.12). Przykład systemu zamontowanego na pojeździe pokazano na rys.13.



Rys.10. Transduktorowy system magnetometryczny (www.foerstergroup.de)



Rys.11 System magnetometryczny z magnetometrem pompowanym optycznie (www.geometrics.com)



Rys.12 System magnetometryczny z magnetometrem protonowym (www.gemsys.ca)



Rys.13 System gradiometryczny na pojeździe [12]

Na pojeździe stosuje się głównie magnetometry pompowane optycznie pracujące w układzie różnicowym (gradiometr skalarny). System taki służy do wykrywania min i pocisków.

Podwodne systemy magnetometryczne

W podwodnych systemach magnetometrycznych czujniki instalowane są w wodoszczelnych obudowach, które przemieszczane mogą być na pojeździe nawodnym (rys.14), ciągnięte są na kablolinie (rys.15) lub w podwodnym bezzałogowym pojeździe (rys.16). W pierwszym przypadku wymagana jest kompensacja zakłóceń magnetycznych pojazdu, chyba, że pojazd nie zawiera elementów ferromagnetycznych. Drugie rozwiązanie mniej skomplikowane i tańsze, pozwala na przemieszczanie magnetometrów na wybranej głębokości, co istotnie zwiększa prawdopodobieństwo wykrycia obiektu. Systemy te stosuje się w wykrywaniu zatopionych statków, militariów oraz min morskich.



Rys.14 System magnetometryczny: Geonix 852 [12]



Rys.15 System magnetometryczny: Seaspy
(www.marinemagnetics.com)



Rys.16 System MUDSS z gradiometrem SQUID

Podwodne systemy magnetometryczne stosowane są również do pomiaru pola magnetycznego okrętów. Rozróżnia się stacjonarne systemy magnetometryczne (zamontowane na stałe do konstrukcji pod wodą) oraz przenośne. W Polsce producentem takich systemów jest Centrum Morskich Technologii Militarnych Politechniki Gdańskiej (CMTM PG). Na rys.17 przedstawiono przenośny magnetometr transduktorowy produkcji CMTM PG.



Rys.17 Przenośny magnetometr transduktorowy produkcji CMTM PG

Podsumowanie

Metoda magnetometryczna stosowana jest głównie w badaniach geologicznych, w badaniach archeologicznych oraz w celach militarnych. Metoda magnetometryczna, jako metoda pasywna znajduje również ważne zastosowanie w wykrywaniu min. W systemach magnetometrycznych stosowane są bardzo czułe magnetometry wektorowe SQUID i skalarnie (pompowane optycznie i protonowe). W praktyce dużą ilość magnetometrów można wykorzystać w układzie różnicowym. Systemy magnetometryczne stosowane są na pojazdach lotniczych, lądowych, nawodnych i podwodnych. W przypadku zamontowania magnetometrów na pojazdach zawierających elementy ferromagnetyczne, niezbędne jest zastosowanie kompensatora zakłóceń magnetycznych. Koszt systemów magnetometrycznych jest stosunkowo drogi, szczególnie lotniczych. W Polsce od wielu lat producentem systemów magnetometrycznych jest Centrum Morskich Technologii Militarnych Politechniki Gdańskiej.

LITERATURA

- [1] O'Handley R.: *Modern Magnetic Materials*. Principles and Applications. John Wiley & Sons, Inc. New York, 2000
- [2] OPERA 3D User Guide. Vector Fields Limited. July 2002
- [3] Stratton J.: *Electromagnetic Theory*. New York. McGraw-Hill, 1941
- [4] Telford W.M., Geldart L.P., Sheriff R.E.: *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, New York 1990
- [5] Groom R.W, Jia R., Alvarez C.: *Investigations into inversion of magnetic and gradient magnetic data for detection and discrimination of metallic objects*. SAGEEP Meeting 2003
- [6] McFee J.E., Das Yogadish, Ellingson R.O.: *Locating and Identifying Compact Ferrous Objects*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.28., no.2, pp.182-193, march 1990
- [7] Bilings S.D., Pasion L.P., Oldenburg D.W.: *Inversion of magnetics for UXO discrimination and identification*. Proc. 2002 UXO Forum, Orlando, September, 2002
- [8] Ripka P.: *Magnetic sensors and magnetometers*. Artech House, Norwood 2001
- [9] Wołoszyn M.: *Simulation of compensator of magnetic interference caused by an aircraft*. XXVI IC SPETO 26th International Conference on Fundamentals and Circuit Theory. Gliwice- Niedzica, pp.99-102,2003.
- [10] Leach B.W.: *Automatic Aeromagnetic Compensation*. NAE Report LTR-FR-69, March 1979
- [11] Clem T.: *Superconducting magnetic sensors operating from a moving platform*. IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 5(2), pp.2124-2148, 1995
- [12] *Report of the Defense Science Board Task Force on Unexploded Ordnance*. Washington, December 2003

Autor: dr inż. Mirosław Wołoszyn, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, E-mail: mwołosz@ely.pg.gda.pl;