

## Mirosław WOŁOSZYN

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

# Nowoczesne systemy magnetometryczne

Dr inż. Mirosław WOŁOSZYN

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki. Od 1987 r. pracownik Politechniki Gdańskiej w Katedrze Elektrotechniki i Informatyki. Po uzyskaniu stopnia doktora w 1997 r. pracuje na stanowisku adiunkta. Zajmuje się wykrywaniem, lokalizacją i identyfikacją obiektów ferromagnetycznych metodą magnetometryczną.



e-mail: m.woloszyn@ely.pg.gda.pl

### Streszczenie

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

**Słowa kluczowe:** magnetometr, pole magnetyczne, obiekt ferromagnetyczny, detekcja, lokalizacja.

## Modern magnetometric systems

### Abstract

The magnetometric method and modern magnetometric systems are presented in this paper. Magnetometric systems are used especially in the 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.

**Keywords:** magnetometer, magnetic field, ferromagnetic object, detection, localization.

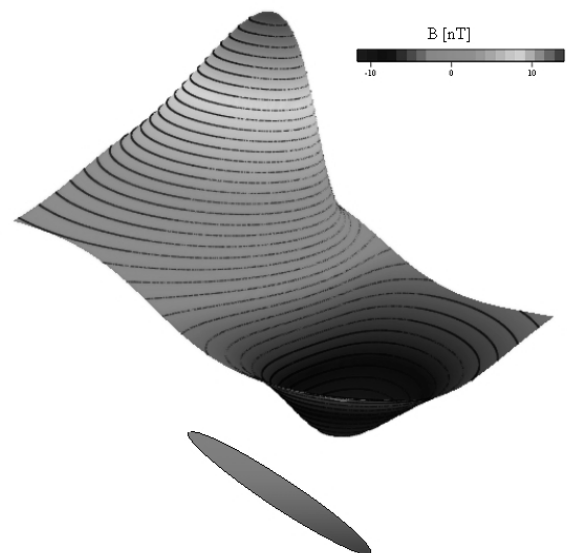
## 1. Wstęp

Obiekt o właściwościach ferromagnetycznych powoduje zaburzenie równomierności rozkładu pola magnetycznego Ziemi. Zaburzenie to wynika z namagnesowania stałego i indukowanego obiektu. Namagnesowanie indukowane zależy od kształtu obiektu, od jego właściwości ferromagnetycznych oraz położenia względem ziemskiego pola magnetycznego. Namagnesowanie stałe związane jest natomiast z tzw. historią magnetyczną obiektu. Obiekt o namagnesowaniu stałym wytwarza pole magnetyczne niezależnie od obecności pola ziemskiego. Mierząc ziemskie pole magnetyczne można obiekt o właściwościach ferromagnetycznych wykryć i zlokalizować. Jest to znana od początków XX wieku metoda magnetometryczna. Metodę tę stosuje się głównie w geologii, w archeologii oraz w systemach militarnych. Systemy magnetometryczne instalowane są na pojazdach lotniczych, naziemnych oraz podwodnych. W pracy przedstawiono problematykę wykrywania obiektów ferromagnetycznych metodą magnetometryczną oraz przedstawiono nowoczesne systemy magnetometryczne.

## 2. Pole magnetyczne obiektu ferromagnetycznego

Przy namagnesowaniu materiału ferromagnetycznego w zamkniętym obwodzie magnetycznym indukcja magnetyczna w ferromagnetyku jest zgodna z charakterystyką namagnesowania. W przypadku namagnesowania obiektu o skończonych wymiarach geometrycznych w obwodzie otwartym, końce obiektu wytwarzają dodatkowe pole magnetyczne, które powoduje osłabienie pola

wewnątrz obiektu. Jest to tzw. zjawisko odnamagnesującego oddziaływania kształtu [1]. Mimo namagnesowania jednorodnym polem obiekt ulega niejednorodnej magnetyzacji, za wyjątkiem kuli i symetrycznej elipsoidy. Obiekt taki ulega tzw. namagnesowaniu indukowanemu. Obiekt posiada również namagnesowanie stałe. 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. Na rys. 1 przedstawiono przykład anomalii magnetycznej nad obiektem ferromagnetycznym w kształcie symetrycznej elipsoidy (średnica =  $a$ , długość =  $5a$ , wysokość =  $20a$ ) skierowanej w kierunku N-S. Obliczenia symulacyjne pola magnetycznego obiektu przeprowadzono w pakiecie MathCad [2].



Rys. 1. Pole magnetyczne ferromagnetycznej elipsoidy  
Fig. 1. Magnetic field of the ferromagnetic elliptic

Pole magnetyczne może być opisane za pomocą potencjału skalarnego i przedstawione jako gradient potencjału [3]:

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

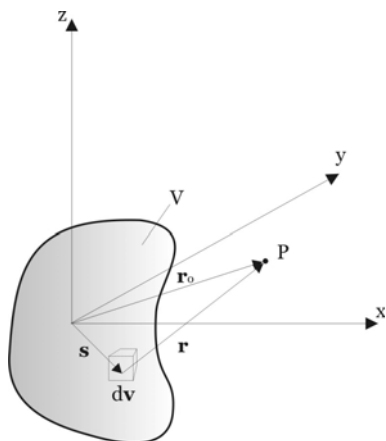
gdzie:  $\phi$  – potencjał skalarny,  $H$  – natężenie pola magnetycznego.

Potencjał pola magnetycznego wynosi:

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

gdzie:  $V$  – obszar ferromagnetyka,  $M$  – wektor momentu magnetycznego,  $r$  – odległość elementarnej objętości ferromagnetyka od punktu  $P$  (rys. 2).

W multipolowym rozwinięciu potencjału skalarnego (2) drugim wyrazem jest dipol magnetyczny [4], który przyjmuje się w metodach lokalizacji obiektu, jako model matematyczny pola magnetycznego. Istnieje szereg metod lokalizacji i identyfikacji obiektu ferromagnetycznego z zastosowaniem metody magnetometrycznej [5, 6, 7].



Rys. 2. Przyjęta geometria układu w celu obliczenia pola magnetycznego obiektu

Fig. 2. Geometry used to calculate of the magnetic field of an object

### 3. Magnetometry

W pomiarach ziemskiego pola magnetycznego stosowane są przyrządy pomiarowe zwane magnetometrami. W magnetometrii używa się magnetometry skalarne i wektorowe. Do magnetometrów skalarnych, które mierzą moduł wektora indukcji magnetycznej należą magnetometry protonowe, magnetometry Overhauser'a i pompowane optycznie [8]. Magnetometry wektorowe pozwalają na pomiar trzech składowych wektora ziemskiego pola magnetycznego. Stosowane są magnetometry transduktorowe i SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). W przypadku magnetometru SQUID możliwy jest również pomiar pochodnych cząstkowych wektora pola magnetycznego [8]. Do najczulszych magnetometrów należą SQUID o czułości rzędu dziesiątek fT i pompowane optycznie o czułości 1 pT (średnia wartość indukcji magnetycznej Ziemi wynosi 50  $\mu$ T). Ze względu na występowanie wariacji ziemskiego pola magnetycznego, stosowanie pojedynczego magnetometru o tak dużej czułości w praktyce nie ma sensu (szybkie wariacje pola magnetycznego wynoszą od kilkudziesięciu do kilkuset pT). Dużą czułość magnetometrów można wykorzystać 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.

### 4. Systemy magnetometryczne na pojazdach lotniczych

W systemach magnetometrycznych instalowanych na pojazdach lotniczych stosowane są magnetometry pompowane optycznie oraz magnetometry typu SQUID. Budowane są systemy z pojedynczym magnetometrem oraz z kilkoma w układzie różnicowym. Systemy te znajdują zastosowanie w pracach geologicznych (w wykrywaniu złóż ropy naftowej, gazu czy diamentów) oraz w celach militarnych.

W systemach magnetometrycznych na samolotach czujniki magnetometrów montowane są bezpośrednio do konstrukcji samolotu. Na rys. 3 przedstawiono samolot typu Caravan z różnicowym systemem magnetometrycznym na skrzydłach i w tylnej części samolotu. Na rys. 4 pokazano 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

wymi indukowanymi podczas przechyłów samolotu. System magnetometryczny na samolocie musi być wyposażony w kompensator zakłóceń magnetycznych [9, 10].



Rys. 3. System magnetometryczny TRIAX na samolocie typu Caravan ([www.fugroairborne.com](http://www.fugroairborne.com))

Fig. 3. Magnetic platform TRIAX ([www.fugroairborne.com](http://www.fugroairborne.com))



Rys. 4. Samolot Bryza Bis z systemem magnetometrycznym (foto: Mariusz Adamski)

Fig. 4. Bryza Bis airplane with magnetic system (photo: Mariusz Adamski)

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.

W systemach magnetometrycznych na śmigłowcach stosowane są pojedyncze magnetometry lub zestaw kilku magnetometrów do pomiaru indukcji magnetycznej w układzie różnicowym (rys. 5). W przypadku instalacji magnetometru lub magnetometrów w bliskiej odległości od śmigłowca podobnie jak na samolotach stosowany jest kompensator zakłóceń magnetycznych.

W systemach magnetometrycznych podwieszanych na śmigłowcach nie ma potrzeby stosowania kompensatorów zakłóceń magnetycznych (rys. 6, 7). Magnetometry znajdują się w specjalnych gondolach, w wystarczającej odległości od ferromagnetycznych elementów śmigłowca. Z uwagi na stabilny lot gondoli w systemach tych stosuje się również magnetometry SQUID [11].



Rys. 5. System magnetometryczny na śmigłowcu z trzema magnetometrami (www.fugroairborne.com)

Fig. 5. Magnetic system on the helicopter with three magnetometers (www.fugroairborne.com)



Rys. 6. System magnetometryczny podwieszony na śmigłowcu (www.fugroairborne.com)

Fig. 6. Towed bird magnetic system (www.fugroairborne.com)



Rys. 7. Śmigłowiec Mi-14Pl z systemem magnetometrycznym (www.mw.mil.pl)

Fig. 7. Mi-14Pl helicopter with magnetic system (www.mw.mil.pl)

## 5. 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. Przykład systemu zamontowanego na pojeździe z kilkoma magnetometrami pompowanymi optycznie pokazano na rys. 8.



Rys. 8. System magnetometryczny na pojeździe [12]

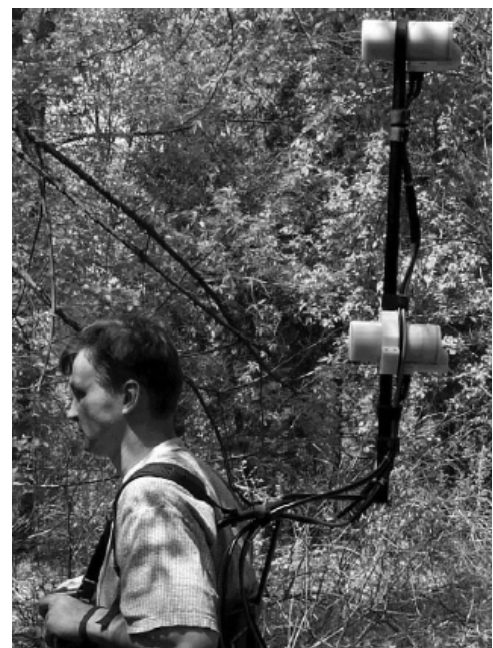
Fig. 8. Magnetic system MTADS [12]

Na kolejnych rysunkach przedstawiono systemy z magnetometrem pompowanym optycznie (rys. 9), protonowym (rys. 10) oraz magnetometrem transduktorowym (rys. 11).



Rys. 9. System magnetometryczny z magnetometrem pompowanym optycznie (www.geometrics.com)

Fig. 9. Optically pumped magnetometer system (www.geometrics.com)



Rys. 10. System magnetometryczny z magnetometrami protonowymi (www.gemsys.ca)

Fig. 10. Magnetic system with proton magnetometers (www.gemsys.ca)



Rys. 11. Transduktorowy system magnetometryczny (www.foerstergroup.de)  
Fig. 11. Fluxgate magnetometer system (www.foerstergroup.de)

## 6. Podwodne systemy magnetometryczne

W podwodnych systemach magnetometrycznych czujniki instalowane są w wodoszczelnych obudowach, które przemieszczane mogą być na pojeździe nawodnym (rys.12), ciągnięte są na kablo-linie (rys.13) lub w podwodnym bezzałogowym pojeździe (rys.14). 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. 12. System magnetometryczny: Geonix 852 [12]  
Fig. 12. Geonix 852 magnetic system [12]



Rys. 13. System magnetometryczny Seaspy (www.marinemagnetics.com)  
Fig. 13. Seaspy magnetic system (www.marinemagnetics.com)



Rys. 14. System MUDSS z gradiometrem SQUID  
Fig. 14. MUDSS system with SQUID gradiometer

## 7. Wnioski

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, szczególnie w przypadku min morskich. W systemach magnetometrycznych stosowane są bardzo czułe magnetometry skalarne (pompowane optycznie i protonowe) oraz wektorowe typu SQUID. Dużą czułość magnetometrów wykorzystuje się w układzie różnicowym. W przypadku zamontowania magnetometrów na platformie zawierającej elementy ferromagnetyczne, niezbędne jest zastosowanie kompensatora zakłóceń magnetycznych, generowanych przez platformę. Koszt systemów magnetometrycznych jest stosunkowo wysoki, szczególnie lotniczych. W Polsce od wielu lat producentem systemów magnetometrycznych jest Centrum Morskich Technologii Militarnych Politechniki Gdańskiej.

## 8. Literatura

- [1] O'handley R.: Modern Magnetic Materials. Principles and Applications. John Wiley & Sons, Inc. New York, 2000
- [2] MathCad User Guide, 2004
- [3] Griffiths D.J.: Podstawy elektrotechniki. PWN. Warszawa, 2001
- [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 Yogadhis, 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