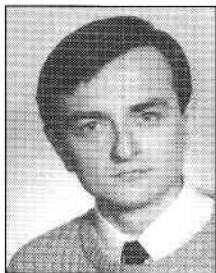


Mirosław WOŁOSZYN

POLITECHNIKA GDAŃSKA

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI

Pomiary pól magnetycznych obiektów ferromagnetycznych



Dr inż. Mirosław WOŁOSZYN

– absolwent Politechniki Gdańskiej. Pracuje w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki PG na stanowisku adiunkta. Pracę doktorską obronił na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki PG w 1997 r. Współpracuje z Ośrodkiem Doświadczalnym Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG.

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań pól magnetycznych wywołanych przez obiekty ferromagnetyczne o kształcie zbliżonym do trójosiowej wydłużonej elipsoidy. Obiekt o właściwościach ferromagnetycznych zaburza w swojej okolicy równomierność ziemskiego pola magnetycznego, wywołując anomalię magnetyczną. Zaburzenie to zależy od wielu czynników, takich jak kształt, rozmiary obiektu, jego orientacja względem wektora ziemskiego pola magnetycznego, właściwości magnetyczne obiektu. Ważnym czynnikiem jest też rozkład ferromagnetyka wewnątrz obiektu. W niniejszej pracy w sposób analityczny i eksperymentalny zbadano wpływ stopnia wypełnienia obiektu ferromagnetykiem na wielkość i rozkład przestrzenny pola magnetycznego. Przedstawiono również metodę i wyniki pomiaru indukcji magnetycznej obiektu ferromagnetycznego na podstawie których można przeprowadzić jego lokalizację i identyfikację.

Abstract

This paper outlines the results of research into the magnetic fields produced by ferromagnetic objects whose shape resembles a stretched, three-axial ellipsoid. Ferromagnetic objects affect, in their proximity, the uniformity of the magnetic field of the earth, leading to magnetic anomalies. The constitution of the effect depends on a variety of factors, including the shape and size of the object, its magnetic orientation relative to the magnetic field of the earth, and the inherent magnetic properties of the object. An important circumstance is also the internal distribution of ferromagnetic material within the object. For example, in the case of such objects as ships and warships, the ferromagnetic material does not fill all the space thereof. To acquire a sense of how of the magnetic field around an object depends on the fill coefficient, an analytical study has been carried out for a spherical shape of the object. Moreover, experimental studies of the same aspect have been performed for the case of cylindrical objects. The length-to-diameter ratio of the cylinders was chosen so as to mimic the geometry of a ship. Concerning the distribution of magnetic field, it has been found to bear only minor dependence on the fill coefficient. As for the intensity of the magnetic anomaly, its dependence on the fill coefficient is much more pronounced, but tends to be insignificant for large permeability of the ferromagnetic material. Presented in this paper is also a method for measuring magnetic induction of ferromagnetic objects. The method is well suited to locating and identifying such objects.

Wprowadzenie

W publikacjach dotyczących lokalizacji i identyfikacji obiektów ferromagnetycznych [1-3] nie analizuje się stopnia wypełnienia obiektów ferromagnetykiem, przyjmując ich całkowite wypełnienie. Przestrzenne wypełnienie ferromagnetykiem w przypadku obiektów pływających (statki handlowe i okręty wojenne) czy latających (samoloty i śmigłowce) jest różne i na tyle złożone, że przeprowadzenie analizy pola magnetycznego tak skomplikowanych obiektów byłoby bardzo pracochłonne. Przyjęcie w modelu matematycznym pola magnetycznego obiektu założenia, że jest on całkowicie wypełniony ferromagnetykiem, wymaga wyjaśnienia. Przeprowadzenie analizy wpły-

wu stopnia wypełnienia obiektu ferromagnetykiem stanowi problem sam w sobie. Analizę tego problemu przeprowadzono w sposób uproszczony. Analitycznie zbadano wpływ stopnia wypełnienia ferromagnetykiem kuli oraz eksperymentalnie wpływ wypełnienia obiektu w kształcie wydrążonego walca o wymiarach proporcjonalnych do występujących w typowych statkach czy okrętach wojennych.

Wpływ wypełnienia obiektu ferromagnetykiem

Na podstawie zależności opisanych w [4] przeprowadzono analizę pola magnetycznego, biorąc pod uwagę jego wielkość i rozkład przestrzenny na zewnątrz kuli o różnym stopniu wypełnienia (rys. 1). W analizie tej założono, że obiekt nie posiada magnetyzmu stałego. Wyznaczono względną różnicę wartości ekstremalnych δB_{ek} miary wektora indukcji magnetycznej na zewnątrz kuli ze wzoru

$$\delta B_{ek} = \frac{\Delta B_{kp} - \Delta B_{k\eta}}{\Delta B_{kp}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: ΔB_{kp} – różnica wartości ekstremalnych indukcji magnetycznej dla pełnej kuli,
 $\Delta B_{k\eta}$ – różnica wartości ekstremalnych indukcji magnetycznej dla kuli o wypełnieniu względnym η .

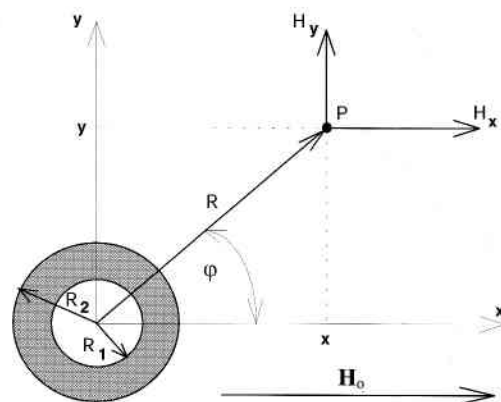
Stopień wypełnienia η kuli ferromagnetykiem określono wzorem

$$\eta = \frac{R_2 - R_1}{R_2} \cdot 100\% \quad (2)$$

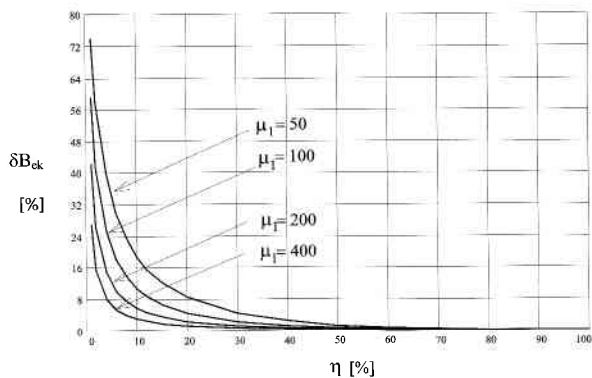
Różnice wartości ekstremalnych indukcji magnetycznej obliczono ze wzoru

$$\Delta B_j = B_{\max j} - B_{\min j} \quad (3)$$

gdzie: $j \in (kp, k\eta)$, kp – kula pełna, $k\eta$ – kula wydrążona.



Rys. 1. Kula ferromagnetyczna o różnym stopniu wypełnienia umieszczona w równomiernym polu magnetycznym o natężeniu H_0

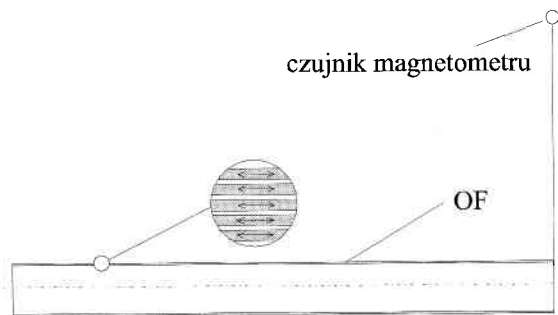


Rys. 2. Zależność względnej różnicy wartości ekstremalnych $\Delta B_{ek}(1)$ w funkcji względnej wartości wypełnienia η (2)

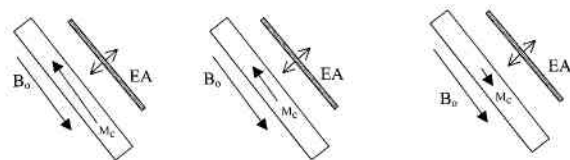
Jako odniesienie przyjęto pole magnetyczne wokół kuli pełnej. Obliczenia przeprowadzono dla różnych wartości względnej przenikalności magnetycznej μ_1 materiału kuli. W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano wykres (rys. 2) zależności ΔB_{ek} (1) od stopnia wypełnienia η (2) kuli materiałem ferromagnetycznym. Obliczenia wykazały, że im większa jest wartość przenikalności magnetycznej μ_1 materiału kuli, tym miara wektora indukcji magnetycznej jest w mniejszym stopniu zależna od względnego wypełnienia η . Dla $\mu_1 = 400$ względna różnica wartości ekstremalnych indukcji magnetycznej (1) dla kuli o wypełnieniu $\eta > 10\%$, jest w porównaniu z kulą pełną mniejsza od 5%. Położenie miejsc, w których występują wartości ekstremalne w małym stopniu zależą od wypełnienia η . Z przeprowadzonej analizy anomalii pola magnetycznego wywołanej przez obiekt w kształcie kuli wynika, że dla dużych wartości względnej przenikalności magnetycznej ferromagnetyka ($\mu_1 > 200$), można pominąć wydrążenie kuli, jeżeli spełniony jest warunek $\eta > 10\%$. Zależność ta może być większa w sytuacji, gdy obiektem wywołującym anomalie magnetyczną będzie obiekt pływający, który zbudowany jest ze stali o względnej przenikalności magnetycznej $\mu_1 > 100$ [6].

Badania pola magnetycznego modelu fizycznego obiektu ferromagnetycznego

W celu sprawdzenia wpływu wypełnienia obiektu ferromagnetykiem na wielkość pola magnetycznego związanego z namagnesowaniem indukowanym tego obiektu, przeprowadzono badania eksperymentalne na modelu fizycznym. Model składał się z szeregu rur o stosunku długości do średnicy równy 10, co odpowiada proporcjonalnym rozmiarom okrętów. Zastosowanie różnych średnic rur pozwoliło na zmianę wypełnienia obiektu ferromagnetykiem. Pomiary przeprowadzono przy pomocy trójosiowego magnetometru transduktorowego, który został zbudowany przez Ośrodek Doświadczalny Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej [7]. Czujnik magnetometru umieszczony został nad obiektem na wysokości bliskiej jego długości i w odległości od środka geometrycznego równej połowie tej długości (rys. 3). Obiekt położono w płaszczyźnie poziomej w kierunku magnetycznym N-S. W pomiarach indukcji magnetycznej wywołanej przez obiekt związanej z namagnesowaniem indukowanym, należało wziąć pod uwagę fakt jego namagnesowania stałego [6]. W tym celu wykonano szereg pomiarów, aby wyeliminować wpływ stałego namagnesowania po-



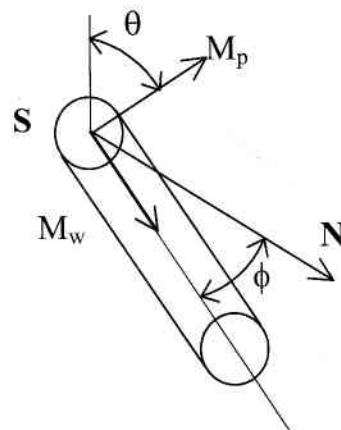
Rys. 3. Przekrój poprzeczny modelu obiektu



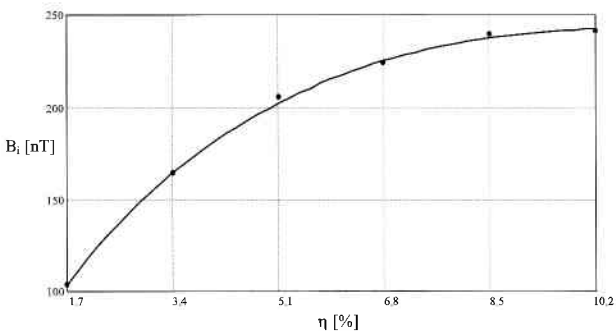
Rys. 4. Redukcja wzdłużnego namagnesowania stałego obiektu ferromagnetycznego gdzie:

B_0 - indukcja magnetyczna Ziemi,
 M_c - stały moment magnetyczny,
 EA - element amagnetyczny

przecznego i wzdłużnego obiektu. Przed wykonaniem pomiarów przeprowadzono częściową demagnetyzację obiektu wykorzystując metodę uderową [6]. Po odpowiednim ustawieniu obiektu względem wektora indukcji ziemskiego pola magnetycznego i wykonaniu kilku uderzeń w obiekt elementem amagnetycznym, zmniejszono jego wzdłużne namagnesowanie stałe (rys. 4). Zakładając, że obiekt namagnesowany jest w kierunku wzdłużnym i poprzecznym, wykonano pomiary indukcji magnetycznej obiektu, dla różnych jego położenia względem wektora B_0 (rys. 5). Mierząc indukcję magnetyczną dla $\phi = 0^\circ$ i $\phi = 180^\circ$ można określić wpływ wzdłużnego namagnesowania stałego obiektu na wielkość pola magnetycznego. W celu wyeliminowania wpływu poprzecznego namagne-



Rys. 5. Położenie wzdłużnego M_w i poprzecznego M_p momentu magnetycznego stałego względem kierunku N-S i płaszczyzny poziomej



Rys. 6. Zależność indukcji magnetycznej związanej z namagnesowaniem indukowanym na zewnątrz obiektu w zależności od stopnia wypełnienia obiektu ferromagnetykiem

sowania stałego należy dodatkowo wykonać pomiary dla różnych położeń obiektu względem osi poprzecznej. Dla każdego wypełnienia obiektu ferromagnetykiem wykonano 8 pomiarów indukcji magnetycznej dla:

- kąta $\phi = 0^\circ$ i kąta $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ i 270° ,
- kąta $\phi = 180^\circ$ i kąta $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ i 270°

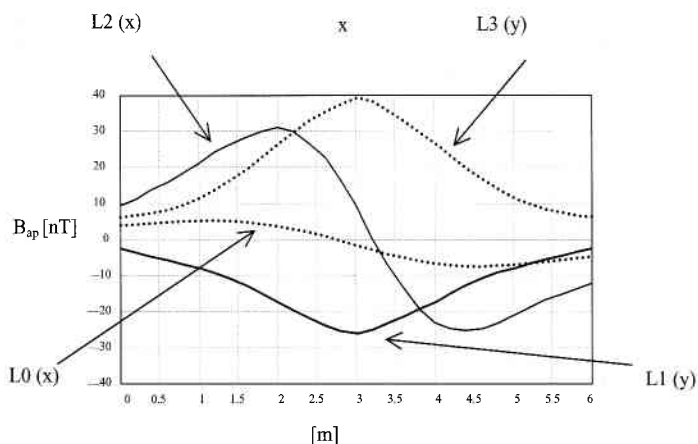
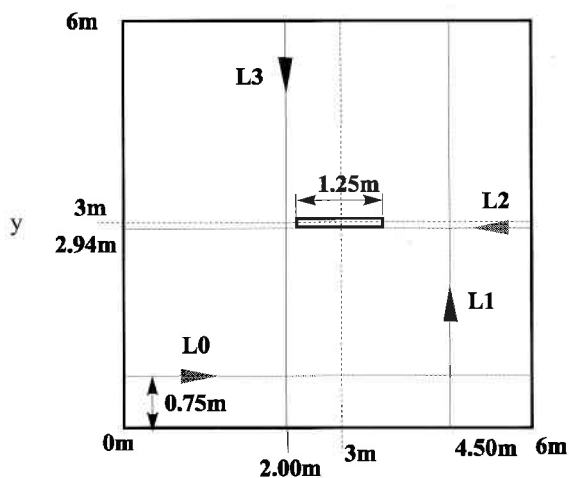
Obliczając średnią z 8 pomiarów otrzymano wartość pola magnetycznego związanego z namagnesowaniem indukowanym obiektu. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano następującą zależność indukcji magnetycznej B_i związanej z namagnesowaniem indukowanym obiektu w zależności od jego wypełnienia η (rys. 6). Badania na modelu fizycznym wykazały, że dla wypełnienia większego od 10% jego wpływ na wartość indukcji magnetycznej na zewnątrz obiektu można pominąć. Również można pominąć wpływ wypełnienia obiektu na rozkład przestrzenny pola magnetycznego. Ze względu na złożoność konstrukcji rzeczywistego obiektu pływającego, zbadanie wpływu jego stopnia wypełnienia ferromagnetykiem na wartość i rozkład indukcji magnetycznej wymaga przeprowadzenia stosownych badań na obiekcie rzeczywistym.

Lokalizacja i identyfikacja obiektów ferromagnetycznych

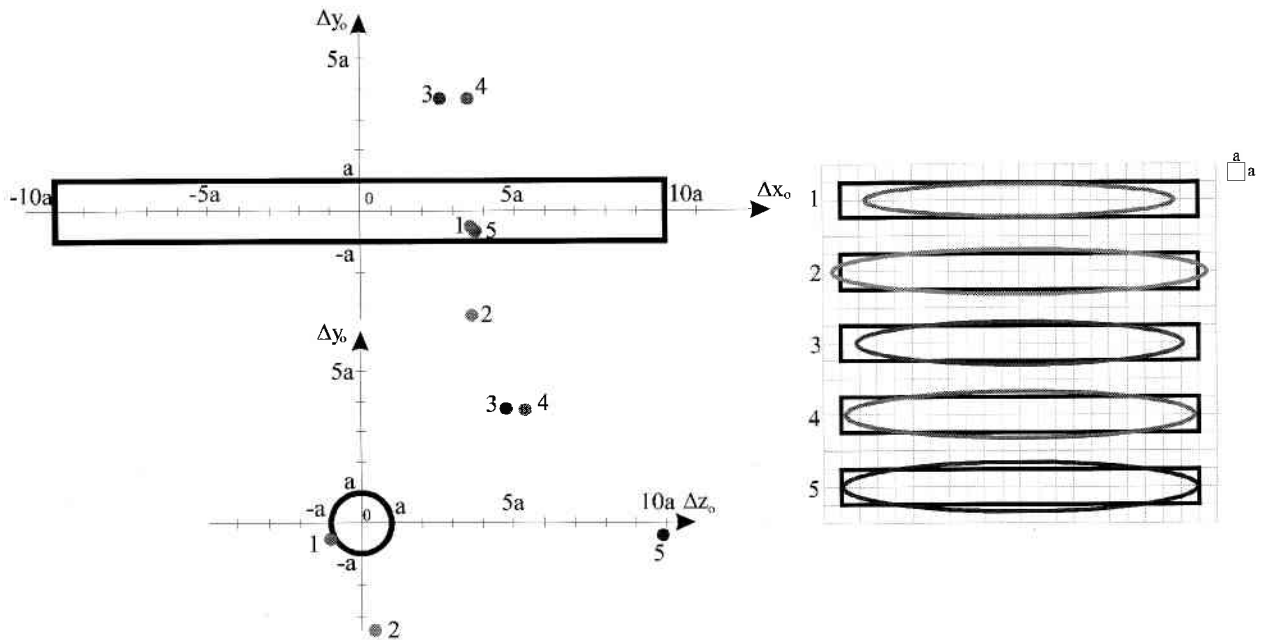
Mierząc indukcję magnetyczną w pobliżu obiektu o właściwościach ferromagnetycznych i wydzielając pole anomalne z pola mierzonego, można na podstawie rozkładu pola anomального rozwiązać zagadnienie odwrotne, tj. określić położenie i rozmiary obiektu. W przypadku, gdy liczba pomiarów wykonanych nad obiektem musi być z wielu względów jak najmniejsza, należy zastosować odpowiednią metodę pomiaru. W opracowanej przez autora metodzie lokalizacji i identyfikacji obiektów ferromagnetycznych [5], wykazano, że pomiary indukcji magnetycznej należy przeprowadzić wzdłuż trajektorii przechodzących w pobliżu miejsc występowania wartości ekstremalnych pola. Kierunek danej trajektorii wyznaczony zostaje na podstawie przeprowadzonych wcześniej pomiarów. Pomiary indukcji magnetycznej wykonywane są maksymalnie wzdłuż czterech linii nad obiektem. Lokalizację i identyfikację obiektu przeprowadza się przez

dopasowanie zmierzonej indukcji magnetycznej wzdłuż tych linii, do indukcji otrzymanej z modelu matematycznego pola magnetycznego obiektu. W rozważanym przypadku syntezy pola magnetycznego zastosowano algorytmy genetyczne [8]. W zaproponowanej metodzie założono, że poszukiwany obiekt ma kształt zbliżony do symetrycznej, wydłużonej elipsoidy trójosiowej i wypełniony jest ferromagnetykiem powyżej 10%. Wyniki badań symulacyjnych lokalizacji i identyfikacji obiektów ferromagnetycznych wg opracowanej metody, przedstawiono obszernie w pracy [5].

W celu zweryfikowania metody lokalizacji i identyfikacji obiektów przeprowadzono pomiary indukcji magnetycznej dla modelu fizycznego obiektu. Do pomiarów indukcji magnetycznej zastosowano precyzyjny magnetometr pompowany optycznie typu SM4 firmy Scintrex. Jest to magnetometr, który umożliwia pomiar miary wektora indukcji magnetycznej z dokładnością do 0,01 nT (indukcja magnetyczna Ziemi wynosi około 50000 nT). W pomiarach uwzględniono dobowe wariacje pola magnetycznego. Chcąc w pełni wykorzystać wysoką precyzję tego magnetometru i wyeliminować z pomiarów szybkie wariacje pola magnetycznego, należało-



Rys. 7. Wyniki pomiarów indukcji magnetycznej wykonanych nad obiektem



Rys. 8. Wyniki lokalizacji i identyfikacji obiektu ferromagnetycznego

by zastosować metodę różnicową korzystając z dodatkowego magnetometru lub gradiometru. Na rys. 7 przedstawiono wyniki pomiarów indukcji magnetycznej wykonanych wzdłuż 3 linii nad modelem obiektu. Na podstawie wykonanych pomiarów indukcji magnetycznej przeprowadzono lokalizację i identyfikację obiektu. Na rys. 8 kolejnymi numerami przedstawiono najlepsze rozwiązania lokalizacji i identyfikacji, otrzymane w wyniku obliczeń, w których zastosowano algorytmy genetyczne. Najmniejszy błąd wyznaczenia położenia obiektu nie przekroczył w tym przypadku 2 średnic obiektu. Obiekt został zidentyfikowany, jako elipsoida o długości mniejszej o około 10% od rzeczywistej długości modelu obiektu.

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych na modelu fizycznym obiektu ferromagnetycznego, stwierdzono, że wpływ na wielkość anomalnego pola magnetycznego ma obiekt o wypełnieniu mniejszym od 10% przy względnej przenikalności magnetycznej równej 200. Im większa jest względna przenikalność magnetyczna materiału z którego zbudowany jest obiekt, tym wpływ zawartości ferromagnetyka w obiekcie na wielkość pola jest mniejszy. Przeprowadzone badania na modelu fizycznym obiektu zgodnie z opracowaną przez autora metodą lokalizacji i identyfikacji obiektów ferromagnetycznych, potwierdziły możliwość określenia położenia i rozmiarów obiektu na podstawie stosunkowo niewielkiej informacji o rozkładzie anomalnego pola magnetycznego.

Podziękowanie

Autor pracy pragnie podziękować Panu Stanisławowi Starczykowi z firmy REF TEK CANADA za wypożyczenie magnetometru pompowanego optycznie typu SM4 kanadyjskiej firmy SCINTREX oraz Panu mgr inż. Andrzejowi Wierzchowskiemu dyrektorowi Ośrodka Doświadczalnego Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej za wypożyczenie trójosiowego magnetometru transduktorowego.

Literatura

- [1] A. D. MCAULAY: Computerized Model Demonstrating Magnetic Submarine Localization. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. Vol. AES-13, no 3, p. 246-254, 1977
- [2] J. E. MCFEE, Y. DAS: Fast nonrecursive method for estimating the location and dipole moment components of a static magnetic dipole. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. GE-24, p. 663-673, 1986
- [3] J. E. MCFEE, Y. DAS: Locating and Identifying Compact Ferrous Objects. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 28, no 2, p. 182-193, 1990
- [4] J. TUROWSKI: Elektrodynamika techniczna. WNT, Warszawa 1968
- [5] M. WOŁOSZYN: Lokalizacja i identyfikacja obiektów o właściwościach ferromagnetycznych metodą magnetometryczną. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1997
- [6] L. GAWĘCKI: Statyczne i dynamiczne właściwości układów ferromagnetycznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej. Elektryka Nr 31, Gdańsk 1973
- [7] M. WOŁOSZYN: „Kalibracja trójosiowego magnetometru transduktorowego”. III Konferencja „Metrologia wspomaganą komputerowo”, t.2, s. 89-94, Zegrze 1997.
- [8] D. E. GOLBERG: Algorytmy genetyczne i ich zastosowania. WNT, Warszawa 1995