

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

WYDZIAŁ MECHATRONIKI

Rozprawa doktorska

mgr inż. Michał Nowicki

Lokalizacja obiektów ferromagnetycznych
na podstawie analizy
trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych

Promotor

dr hab. inż. Roman Szewczyk, prof. PW

Promotor pomocniczy

dr hab. inż. Jacek Salach

WARSZAWA 2017

Podziękowania

Dziękuję moim Rodzicom, którzy przygotowali mnie do podjęcia pracy na Uczelni, mojemu Promotorowi który mi to umożliwił, oraz Koleżankom i Kolegom z zespołu, bez których praca na Uczelni nie byłaby taka sama.

Chciałbym również podziękować wszystkim, którzy pomogli mi podczas badań, dzięki czemu rozprawa ta stała się rzeczywistością.

W szczególności dziękuję Pani Alicji Praczkowskiej, za pomoc w walidacji modułu magnetostaticznego oprogramowania Elmer FEM.

Składam podziękowania Narodowemu Centrum Badań i Rozwoju. Część badań przedstawionych w pracy przeprowadzono w ramach grantu NCBiR0015/R/ID 1/2011/01 „Zaprojektowanie mobilnej platformy do wsparcia badań kryminalistycznych miejsc zdarzeń, w których może występować zagrożenie CBRN”.

Dziękuję Przemysłowemu Instytutowi Automatyki i Pomiarów PIAP za współpracę w zaimplementowaniu trójosiowego magnetometru do pomiarów magnetowizyjnych na policyjnym robocie mobilnym.

Spis treści

Streszczenie	7
Abstract	7
Podziękowania	3
1. Wstęp	9
2. Cel i zakres pracy	14
3. Stan wiedzy	15
3.1 Równania Maxwella w odniesieniu do układów magnetostatycznych	15
3.1.1 Równania Maxwella	15
3.1.2 Przybliżenie magnetostatyczne	17
3.1.3 Moment magnetyczny oraz dipolowy moment magnetyczny	19
3.1.4 Magnetyzacja w układach magnetostatycznych	22
3.1.5 Natężenie pola magnetycznego	23
3.1.6 Potencjał magnetyczny w układach magnetostatycznych	25
3.1.7 Materiały magnetyczne	27
3.2 Metody lokalizacji obiektów ferromagnetycznych	29
3.2.1 Rozwiązania stosowane w praktyce	29
3.2.2 Rozwiązania w fazie eksperymentalnej	33
4. Przedmiot badań	35
5. Metodyka badań	37
5.1. Stanowisko pomiarowe	37
5.2. Metoda kompensacji wpływu ziemskiego pola magnetycznego	40
5.3. Stanowisko do pomiaru momentu magnetycznego	42
6. Wyniki własnych badań eksperymentalnych	47
6.1. Rozkłady indukcji pola magnetycznego	47
6.2 Wpływ ziemskiego pola magnetycznego na wynik pomiaru rozkładu indukcji pola magnetycznego	60
6.3 Trójwymiarowe rozkłady indukcji pola magnetycznego	63
6.4 Wyniki pomiarów momentu magnetycznego wybranych obiektów	65
7. Modelowanie rozkładu indukcji pola magnetycznego wokół obiektów magnetycznych	67
7.1. Metodyka modelowania	68

7.2. Eksperymentalna walidacja obliczeń z wykorzystaniem programu Elmer FEM	71
7.4 Oszacowanie niepewności pomiarów	75
7.5 Podsumowanie.....	76
8. Nowa metoda lokalizacji obiektów z wykorzystaniem pomiarów magnetowizyjnych	77
8.1. Metoda określania położenia obiektu ferromagnetycznego	77
8.2. Opracowana metoda pomiaru odległości od nieznanego obiektu.....	83
8.3. Opracowana metoda wyznaczania momentu magnetycznego nieznanego obiektu	89
8.4. Nowatorska metoda lokalizacji i wyznaczania momentu magnetycznego z wykorzystaniem trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych	93
9. Wytyczne do wykrywania i lokalizacji obiektów ferromagnetycznych.....	111
10. Podsumowanie i wnioski końcowe.....	114
11. Kierunki dalszych prac	116
Bibliografia	117

Streszczenie

Tematem niniejszej rozprawy jest zagadnienie lokalizacji obiektów ferromagnetycznych na podstawie analizy trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych. W przedstawionej rozprawie pojęcie lokalizacji jest rozumiane jako wskazanie koordynat x,y,z środka momentu magnetycznego szukanego obiektu. Moment magnetyczny natomiast jest wielkością przypisaną do danego obiektu, zależną od jego rozmiarów, kształtu i magnetyzacji. Większość materiałów charakteryzuje się zbyt słabymi właściwościami magnetycznymi, nieodpowiednimi dla wykrywania ich opisanymi w pracy metodami. Natomiast materiały ferromagnetyczne, takie jak żelazo, nikiel, kobalt i ich niektóre stopy, wyróżniają się posiadaniem znacznego, wypadkowego momentu magnetycznego. Pomiar magnetowizyjny zapewnia bardziej precyzyjną, dwuwymiarową lokalizację anomalii magnetycznych, w porównaniu do istniejących aktywnych i pasywnych urządzeń przenośnych, bazujących w dużym stopniu na wiedzy i doświadczeniu operatora. Ponadto, analiza wyników pomiaru magnetowizyjnego, poprzez fuzję danych pomiarowych z modelem matematycznym, umożliwia ilościową ocenę położenia obiektu w przestrzeni oraz wyznaczenie wartości i orientacji przestrzennej jego wypadkowego momentu magnetycznego. W rozprawie przedstawiono wyniki symulacji magnetostatycznych metodą elementów skończonych, które wskazują na możliwość wykorzystania pomiarów magnetowizyjnych do detekcji obiektów ferromagnetycznych w polu ziemskim. Zaprezentowane wyniki eksperymentalne potwierdziły taką możliwość. Metoda detekcji i lokalizacji została zweryfikowana, przy wykorzystaniu certyfikowanych wzorców momentu magnetycznego, co umożliwiło ilościową ocenę skuteczności metody, zakresu jej stosowalności oraz niepewności wyznaczenia parametrów modelu.

W pracy przedstawiono trójwymiarowy model zaburzeń pola ziemskiego generowanych przez dipolowy moment magnetyczny. Dodatkową nowość stanowi uwzględnienie w modelu wpływu stałego gradientu pola zewnętrznego, co odpowiada zaburzającemu pomiarowi wpływu dużych, lecz odległych obiektów. Zaproponowany, nowy sposób trójwymiarowego pomiaru magnetowizyjnego i jego analizy umożliwia wyznaczenie wartości koordynat XYZ, położenia kąтового i wartości momentu magnetycznego nieznanego dipola magnetycznego w warunkach rzeczywistych (wpływ zaburzeń generowanych przez inne, odległe obiekty, szum tła), a więc detekcję i lokalizację obiektu ferromagnetycznego. Zaprezentowano wytyczne do wykorzystania nowej metody lokalizacji obiektów ferromagnetycznych, a w tym przedstawiono zależność zasięgu lokalizowania obiektów od wartości ich momentu magnetycznego.

Słowa kluczowe: magnetowizja, wykrywanie obiektów, anomalie magnetyczne

Abstract

This thesis is concerned with localization of ferromagnetic objects on the basis of three-dimensional magnetovision measurement analysis. In the presented case, the concept of localization is understood as the indication of the x , y , z coordinates of magnetic moment of the sought object. Whereas the magnetic moment is the value assigned to the object, depending on its size, shape, and magnetization. Most of the materials are characterized by very weak magnetic properties, which are inadequate for the methods described in the work. Ferromagnetic materials, such as iron, nickel, cobalt, and some alloys, are known for having a distinct resultant magnetic moment.

Magnetovision measurement provides a much simpler, two-dimensional localization of magnetic anomalies compared to existing active and passive mobile devices, based largely on operator knowledge and experience. In addition, the analysis of the obtained magnetovision measurement, by fusing data with a mathematical model, enables a quantitative assessment of the position of an object in space and the determination of the value and spatial orientation of its magnetic moment vector.

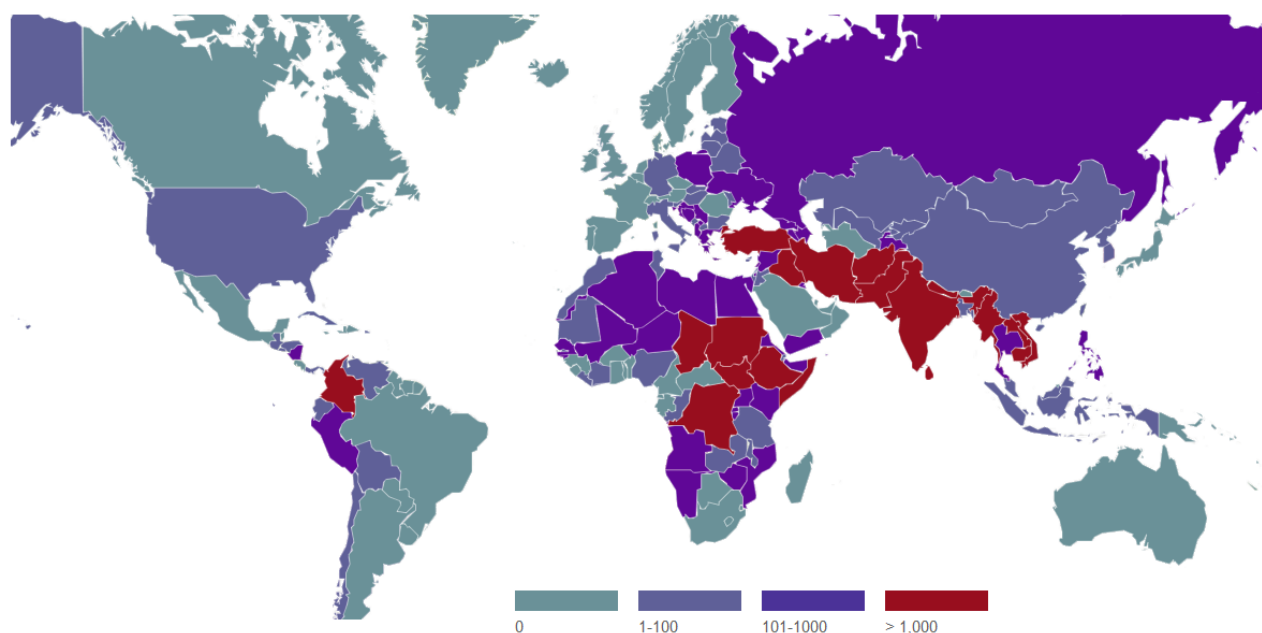
The results of the FEM magnetostatic simulations show the possibility of using magnetovision measurements for the detection of ferromagnetic objects in the earth field. Experimental results have also been demonstrated that have confirmed this possibility. The detection and localization method was verified using certified magnetic moment standards, which enabled a quantitative assessment of the effectiveness, applicability and uncertainty of model parameters.

A three dimensional model of Earth field disturbance generated by dipole magnetic moment is presented. Additional novelty is to include in the model the influence of the constant gradient of the external field, which corresponds to disturbing the measurement by the influence of large but distant objects. The proposed new three-dimensional magnetovision measurement method and its analysis enable the determination of the XYZ coordinates, the angular position and the magnetic moment values of unknown magnetic dipoles in real conditions (effects of disturbances generated by other distant objects, background noise), thus precisely detecting and locating the ferromagnetic object. Guidelines for using a new method of detecting and locating ferromagnetic objects, including the dependence of the range of effective localization of objects on the value of their magnetic moment are also presented.

Keywords: magnetovision, objects detection, magnetic anomalies

1. Wstęp

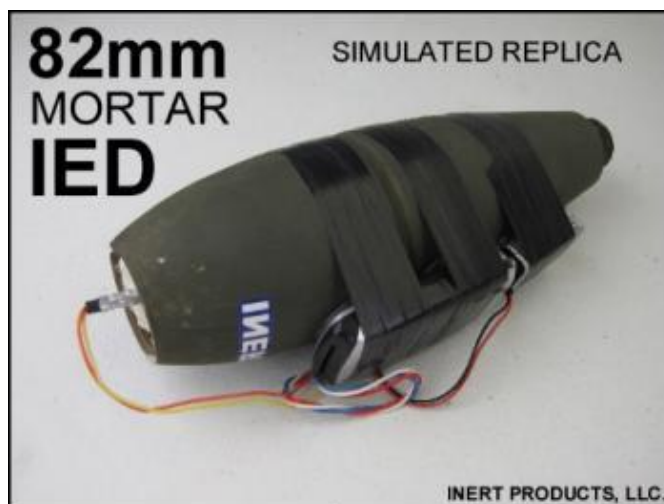
Miny lądowe i wybuchowe pozostałości wojenne (ang. ERW – Explosive Remnants of War) wciąż stanowią aktualne zagrożenie dla ludności cywilnej w ujęciu globalnym. Średnia roczna liczba ofiar cywilnych na świecie wynosi około 5000 osób [1]. Kraje w których odnotowano takie przypadki w 2010 roku przedstawiono na rysunku 1.1. Problem ten dotyczy również państw Unii Europejskiej, zarówno ze względu na niewybuchy pozostałe po II Wojnie Światowej, jak również na stosunkowo aktualny konflikt na Bałkanach [2]. Przykładowo, w nowoprzyjętej do UE Chorwacji obowiązuje zakaz wstępu na rozległe obszary górskie, wciąż stanowiące teren zaminowany [3].



Rys. 1.1. Ofiary śmiertelne min, wybuchowych pozostałości wojennych (ang. ERW – Explosive Remnants of War [4]) oraz amunicji kasetowej (stan w latach 1999-2015) [5]

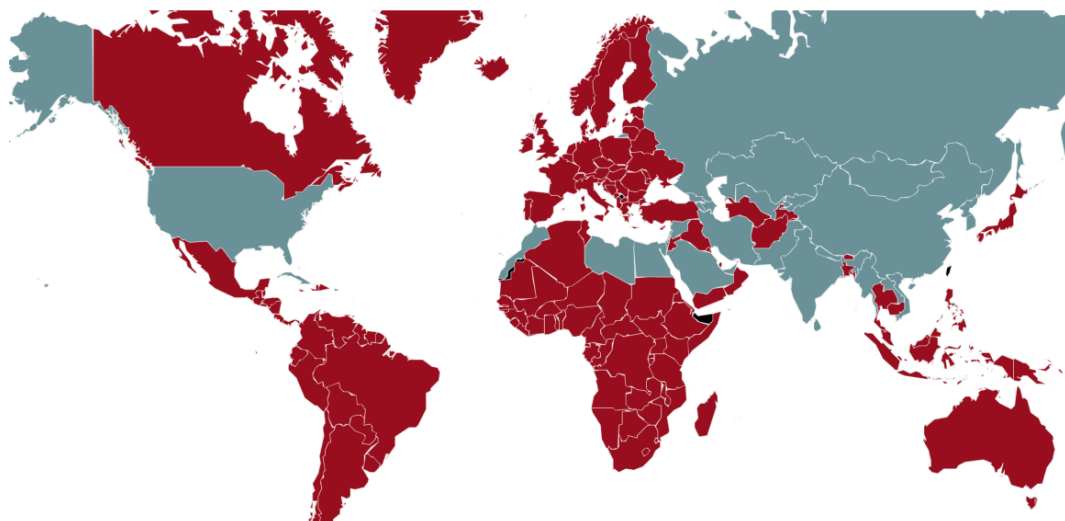
Szacuje się, że w skali światowej na unieszkodliwienie oczekuje około 100 mln min lądowych [6, 7]. Nawet przy założeniu znacznego przeszacowania tej wartości [8] uwidacznia się skala problemu, jakim jest oczyszczenie zaminowanych terenów i zapewnienie bezpieczeństwa ludności cywilnej. Proces takiego oczyszczania jest bardzo kosztowny i niebezpieczny. Najskuteczniejsze i najbezpieczniejsze rozwiązanie tego problemu to zerwanie i przemiał górnej warstwy gleby [9]. Jest to jednak rozwiązanie najdroższe. Ze względu na koszty i czasochłonność, zagrożenia znajdujące się na większych głębokościach lokalizowane są i usuwane przez specjalistycznie przeszkolony personel [10].

Drugi, narastający problem w tym zakresie stanowią improwizowane ładunki wybuchowe (ang. IED – Improvised Explosive Device [11], przykład na rysunku 1.2) oraz amunicja kasetowa [12]. Są to zagrożenia typowe na obszarach współczesnych konfliktów zbrojnych. Ładunki typu IED są także przyczyną znaczącej części strat ludzkich w wojskach NATO [13].



Rys. 1.2. Replika szkoleniowa ładunku typu IED [14]

Saperzy przy usuwaniu obiektów niebezpiecznych, korzystają głównie z ręcznych, aktywnych wykrywaczy metalu. Wykrywacze tego typu mogą jednak uaktywnić czuły zapalnik magnetyczny współczesnych min przeciwczołgowych [15]. W niektórych konfliktach stosowane są również zapalniki antysaperskie do specjalistycznych ładunków-pułapek oraz ładunków typu IED [1, 16].

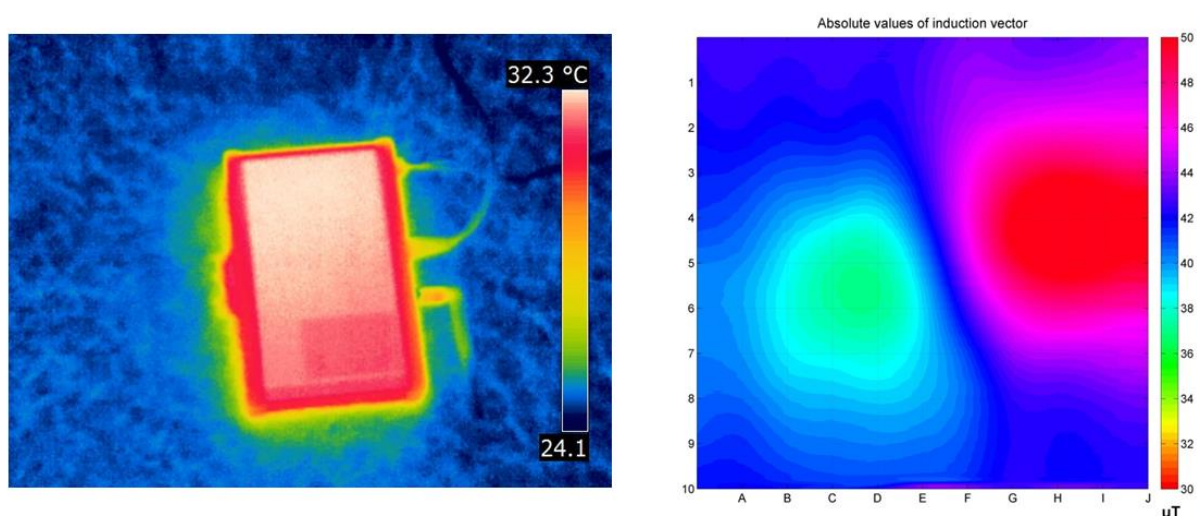


Rys. 1.3. Sygnatariusze Traktatu z Ottawy, kolor czerwony – państwa które ratyfikowały traktat [5]

Miny i zapalniki, czułe na pole magnetyczne generowane przez wykrywacze metalu, są zabronione przez Traktat z Ottawy (1997 rok) [17], który dotyczy również zakazu produkcji i rozprzestrzeniania m.in. niemetalicznych min przeciwpiechotnych. Na rysunku 1.3 przedstawiono sygnatariuszy Traktatu z Ottawy. Największe kraje będące producentami broni nie podpisały jednak tego traktatu. Traktat ten nie ma też wpływu na działalność organizacji przestępczych i paramilitarnych. Powoduje to dodatkowe zagrożenie dla procesu *humanitarnego rozminowywania* [1] oraz dla działań misji pokojowych wojsk ONZ i NATO [18].

Jednym z rozwiązań umożliwiających bezpieczną detekcję min z zapalnikiem czułym na pola magnetyczne jest system *pasyny*. Przedstawiona w niniejszej pracy pasywna metoda lokalizacji obiektów ferromagnetycznych na podstawie analizy trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych jest rozwinięciem istniejących i stosowanych w praktyce metod detekcji. Metody te bazują na pomiarach zaburzeń ziemskiego pola magnetycznego. Istniejące, a przedstawione w przeglądzie stanu wiedzy, metody wykrywania obiektów ferromagnetycznych umożliwiają ocenę jakościową wystąpienia anomalii, i zgrubną, dwuwymiarową detekcję położenia poszukiwanego obiektu [19]. Bardziej udoskonalone metody umożliwiają również wyznaczenie głębokości na jakiej znajduje się obiekt [20] oraz wartości jego momentu magnetycznego [21]. Są to w większości metody nowe, będące jednak wciąż w fazie badań, koniecznych przed ewentualnym wprowadzeniem ich do praktycznych zastosowań [22].

Jedną z potencjalnych pasywnych metod wykrywania obiektów ferromagnetycznych jest magnetowizja. Magnetowizja polega na pomiarze rozkładu pola indukcji magnetycznej w określonej płaszczyźnie lub przestrzeni, i przedstawieniu go w postaci obrazu. Sam termin „magnetowizja” pochodzi od analogii z termowizją, co przedstawiono poglądowo na rysunku 1.4 [23].



Rys. 1.4. Porównanie obrazu termowizyjnego i magnetowizyjnego

Tematem niniejszej rozprawy jest zagadnienie lokalizacji obiektów ferromagnetycznych na podstawie analizy trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych. Pojęcie lokalizacji nie jest rozumiane jednak tylko jako detekcja istnienia ukrytego obiektu, co jest typowe dla obecnie stosowanych metod [24]. W przedstawionej rozprawie pojęcie lokalizacji jest rozumiane jako wskazanie koordynat x,y,z położenia szukanego obiektu. W przyjętych w dalszej części pracy modelach są to koordynaty środka wypadkowego momentu magnetycznego obiektu. Moment magnetyczny natomiast jest wielkością przypisaną do danego obiektu, zależną od jego rozmiarów, kształtu i magnetyzacji. Większość spotykanych materiałów charakteryzuje się bardzo słabymi właściwościami magnetycznymi, nieodpowiednimi dla opisanych w pracy metod. Natomiast materiały ferromagnetyczne, takie jak żelazo, nikiel, kobalt i ich niektóre stopy [25] wyróżniają się posiadaniem wyraźnego, wypadkowego momentu magnetycznego, którego wartość można wyznaczyć na podstawie specjalistycznych pomiarów [26].

W pracy przedstawiono przykłady wykorzystania zasady pomiaru magnetowizyjnego do wykrywania oraz trójwymiarowej lokalizacji obiektów ferromagnetycznych. Pomiar magnetowizyjny zapewnia bardziej precyzyjną, dwuwymiarową lokalizację anomalii magnetycznych, w porównaniu do istniejących aktywnych i pasywnych urządzeń przenośnych, bazujących w dużym stopniu na wiedzy i doświadczeniu operatora. Ponadto, analiza wyników pomiaru magnetowizyjnego, poprzez fuzję danych pomiarowych z modelem matematycznym, umożliwia ilościową ocenę położenia obiektu w przestrzeni oraz wyznaczenie wartości i orientacji przestrzennej jego wypadkowego momentu magnetycznego. W rozprawie przedstawiono wyniki symulacji magnetostatycznych metodą elementów skończonych wskazujące na możliwość wykorzystania pomiarów magnetowizyjnych do detekcji obiektów ferromagnetycznych w polu ziemskim. Zaprezentowane również eksperymentalne potwierdziły taką możliwość.

W odróżnieniu od istniejącej literatury [27, 28], badania wykonano z wykorzystaniem wzorców momentu magnetycznego. Zapewniło to możliwość ilościowego porównania uzyskanych wyników z wartościami wzorcowymi.

Przedstawiono trójwymiarowy model zaburzeń pola ziemskiego generowanych przez dipolowy moment magnetyczny. Dodatkową nowość stanowi uwzględnienie w modelu wpływu stałego gradientu pola zewnętrznego, co odpowiada zaburzającemu pomiar wpływowi dużych, lecz odległych obiektów.

Zaproponowany, nowy sposób pomiaru magnetowizyjnego i jego analizy umożliwia wyznaczenie wartości koordynat XYZ, położenia kąтового i wartości momentu magnetycznego

nieznanego dipola magnetycznego w warunkach rzeczywistych (wpływ zaburzeń generowanych przez inne, odległe obiekty, szum tła), a więc precyzyjną detekcję i lokalizację obiektu ferromagnetycznego. Zaprezentowano również wytyczne do wykorzystania nowej metody detekcji i lokalizacji obiektów ferromagnetycznych, a w tym przedstawiono zależność zasięgu skutecznego lokalizowania obiektów od wartości ich momentu magnetycznego.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest zbadanie możliwości wykorzystania pomiarów magnetowizyjnych do lokalizacji ukrytych obiektów ferromagnetycznych. Istniejące systemy umożliwiają detekcję obiektów ferromagnetycznych, a w niewielkim stopniu ich trójwymiarową lokalizację [29]. Kolejny problem stanowi ocena wartości i kierunku wektora momentu magnetycznego, który jest zależny od rozmiarów i magnetyzacji obiektu.

Przedstawiona w pracy metodyka zapewnia automatyczne dopasowanie parametrów modelu matematycznego do wyników pomiaru magnetowizyjnego. Umożliwi to dokładniejszą niż dotychczas lokalizację i ocenę parametrów momentu magnetycznego, charakteryzującego poszukiwany obiekt ferromagnetyczny.

Celem pracy jest :

- Opracowanie trójwymiarowego modelu wpływu obiektów ferromagnetycznych na jednorodne pole magnetyczne, w którym się one znajdują,
- weryfikacja modelu na podstawie wyników badań otrzymanych na stanowisku do pomiarów magnetowizyjnych,
- opracowanie metody pozwalającej na określenie trójwymiarowego położenia (w tym głębokości), oraz wartości i kierunku momentu magnetycznego, ukrytego, nieznanego obiektu ferromagnetycznego, na podstawie dopasowania danych uzyskanych z pomiaru i modelu matematycznego,
- przebadanie wybranych obiektów ferromagnetycznych, a w tym certyfikowanych wzorców momentu magnetycznego.

Opracowana przez autora metoda umożliwi lokalizację obiektów ferromagnetycznych na podstawie analizy pomiarów magnetowizyjnych. Metoda ta znajdzie zastosowanie w odniesieniu zarówno do trójwymiarowej lokalizacji obiektów ferromagnetycznych, jak i do przemysłowych badań parametrów elementów wykonanych z magnetyków twardych. W szczególności może znaleźć zastosowanie w obszarze bezpieczeństwa publicznego, do wykrywania ukrytych obiektów ferromagnetycznych takich jak np. stalowe elementy min lądowych i pocisków.

3. Stan wiedzy

3.1 Równania Maxwella w odniesieniu do układów magnetostatycznych

Niniejsza praca dotyczy w całości badań zjawisk magnetostatycznych, stanowiących część zjawisk elektromagnetycznych. Podstawy ilościowego opisu tych zagadnień powstały pod koniec XVIII wieku [30]. Jednym z badaczy, który jako pierwszy studiował procesy zależne od czasu, był Faraday [31, 32]. Natomiast w 1865 roku James Clerk Maxwell opublikował swoją słynną pracę na temat dynamicznej teorii zjawisk elektromagnetycznych [33]. W tej pracy po raz pierwszy podano zestaw czterech oryginalnych równań, które stanowią bazę dla dalszych rozważań teoretycznych [34].

3.1.1 Równania Maxwella

Wszystkie zjawiska elektromagnetyczne można opisać zestawem równań zwanych równaniami Maxwell'a [35] :

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{x}, t) = \rho(\mathbf{x}, t) \quad (3.1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \quad (3.1b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (3.1c)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{j}(\mathbf{x}, t) + \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(\mathbf{x}, t) \quad (3.1d)$$

przy czym: \mathbf{x} – wektor poprowadzony z początku układu współrzędnych do dowolnego punktu x w przestrzeni, \mathbf{D} – wektor indukcji elektrycznej, \mathbf{E} - wektor natężenia pola elektrycznego, ρ – objętościowa gęstość ładunków elektrycznych, \mathbf{B} – wektor indukcji pola magnetycznego, \mathbf{H} – wektor natężenia pola magnetycznego, \mathbf{j} – objętościowa gęstość prądu elektrycznego. Poza polami \mathbf{B} i \mathbf{E} oraz ich źródłami \mathbf{j} i ρ w równaniach zawarte są również stałe μ_0 i ϵ_0 , czyli przenikalność magnetyczna próżni oraz przenikalność elektryczna próżni. Przenikalność magnetyczna próżni μ_0 (stała magnetyczna) ma określoną wartość:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}^{-1} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{Hm}^{-1} \quad (3.2)$$

Przenikalność elektryczna próżni ϵ_0 jest natomiast określona jako:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c_0^2} 8,854 \cdot 10^{-12} \text{Fm}^{-1} \quad (3.3)$$

Przy czym c_0 jest prędkością światła w próżni. Zestawienie znaczenia użytych symboli i ich jednostek w układzie SI podano w tabeli 3.1. Zestawienie to jest istotne ze względu na różnorodność tradycyjnych jednostek, używanych we współczesnych publikacjach naukowych, jak np. układ CGS, w trzech odmianach.

Tabela 3.1. Definicje i jednostki w równaniach Maxwella [35]

Symbol	Wielkość	Jednostka SI
E	Wektor natężenia pola elektrycznego	Vm^{-1}
D	Wektor indukcji pola elektrycznego	Cm^{-2}
H	Wektor natężenia pola magnetycznego	Hm^{-1}
B	Wektor indukcji pola magnetycznego	T
ρ	Objętościowa gęstość ładunku elektrycznego	Cm^{-3}
j	Objętościowa gęstość prądu elektrycznego	Am^{-2}
ε_0	Przenikalność elektryczna próżni	Fm^{-1}
μ_0	Przenikalność magnetyczna próżni	Hm^{-1}
c_0	Prędkość światła w próżni	m s^{-1}

W celu zachowania spójności z literaturą międzynarodową, wielkości wektorowe odróżnione są pogrubieniem od skalarnych.

3.1.2 Przybliżenie magnetostaticzne

Najważniejszą wartością mierzoną bezpośrednio w niniejszej pracy jest indukcja pola magnetycznego \mathbf{B} , ponieważ opisuje wartość anomalii magnetycznych, których modelowanie i pomiar opisane są w następnych rozdziałach. Generalnie, jest ona powiązana z polem elektrycznym \mathbf{D} poprzez wyrażenia $\partial\mathbf{D}/\partial t$ i $\partial\mathbf{B}/\partial t$ zawarte w podstawowych równaniach Maxwella, (3.1b) oraz (3.1c). Tym niemniej, w przypadku statycznym czynniki $\partial\mathbf{D}/\partial t$ i $\partial\mathbf{B}/\partial t$ mogą zostać pominięte, co powoduje uniezależnienie wartości pola magnetycznego \mathbf{B} od elektrycznego \mathbf{D} . Dla statycznego rozkładu ładunków i prądów w próżni równania Maxwella przyjmują postać [35]:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.4a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (3.4b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.4c)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (3.4d)$$

Wynika z nich wprost, że gęstość prądu \mathbf{j} można traktować jako źródło wywołujące indukcję pola magnetycznego \mathbf{B} . Jeżeli gęstość prądu zależy od czasu, założenie statyczności jest błędne i należy rozpatrzyć pełne równania Maxwella. Jednakże, jeśli zmiany te są wystarczająco małe, możliwe jest uproszczenie w którym równania magnetostaticzne (3.4) są nadal traktowane jako prawidłowe. W tym przybliżeniu równanie (3.4a) oznacza, że zmiany gęstości prądu \mathbf{j} natychmiast przekładają się na zmiany indukcji pola magnetycznego \mathbf{B} , przy założeniu nieskończonej prędkości propagacji zmian. Takie przybliżenie jest więc słuszne tylko w układach w których opóźnienie wywołane przez skończony czas propagacji jest bardzo małe w porównaniu do czasu, jaki zajmują zmiany gęstości prądu. Przyjmując, że zmiany gęstości prądu zachodzą z określoną częstotliwością, warunek uproszczenia magnetostaticznego jest następujący [36]: $L \cdot f_z \ll c_0$, gdzie: L (m) – rozmiar rozpatrywanego układu fizycznego, f_z (Hz) – częstotliwość zmian gęstości prądu w układzie, c_0 – prędkość światła w próżni. Przykładowo, rozważając układ fizyczny o największym wymiarze 3 m i częstotliwości zmian równej 50 Hz, otrzymujemy warunek w postaci:

$$1\text{m} \cdot 50\text{Hz} = 50\text{ms}^{-1} \ll 3 \cdot 10^8\text{ms}^{-1}$$

W opisywanych w pracy przypadkach rozmiary układu fizycznego są podobnego rzędu wielkości, częstotliwości zmian natomiast wyraźnie mniejsze, zbliżone do statycznych, przybliżenie magnetostaticzne jest więc uzasadnione.

3.1.3 Moment magnetyczny oraz dipolowy moment magnetyczny

Moment magnetyczny jest najważniejszą wielkością fizyczną rozważaną w niniejszej pracy. W dostępnej literaturze naukowej, szczególnie anglojęzycznej [37], spotyka się liczne definicje i jednostki „momentu magnetycznego” i „dipolowego momentu magnetycznego”, przy czym często te dwa pojęcia używane są zamiennie. Wśród najczęściej spotykanych jednostek występują: $\text{erg}\cdot\text{G}^{-1}$, $\text{G}\cdot\text{cm}^3$, $\text{Oe}\cdot\text{cm}^3$, $\text{T}\cdot\text{m}^3$, $\text{A}\cdot\text{m}^2$, $\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$. Zamiana jednostek i sens fizyczny nie zawsze są oczywiste. Często wręcz uniemożliwia to proste porównanie wyników między poszczególnymi publikacjami [38].

W pracy przyjęto aktualnie obowiązujący system SI, dlatego też w tym systemie należy podać definicję momentu magnetycznego. Na magnes umieszczony w zewnętrznym polu magnetycznym o indukcji \mathbf{B} oddziałuje moment skręcający τ . Wartość momentu skręcającego \mathbf{m} zależy od wzajemnej orientacji geometrycznej osi magnesu i wektora pola magnetycznego. Istnieje jeden kierunek i dwa zwroty położenia magnesu względem pola, gdy zostanie on poddany działaniu maksymalnej wartości momentu skręcającego, moment magnetyczny jest więc zdefiniowany jako maksymalny moment skręcający oddziałujący na magnes, gdy jest on umieszczony w jednostkowym zewnętrznym polu magnetycznym o indukcji \mathbf{B} . Wartość i zwrot momentu skręcającego dane są równaniem:

$$\tau = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \quad (3.5)$$

Tak więc jednostką SI momentu magnetycznego jest $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{T}^{-1}$.

Alternatywnie, jeżeli prąd elektryczny I płynie w kołowej pętli o powierzchni \mathbf{A} , moment skręcający oddziałujący na pętlę umieszczoną w zewnętrznym polu magnetycznym dany jest równaniem:

$$\tau = I\mathbf{A} \times \mathbf{B} \quad (3.6)$$

Z równań (3.5) i (3.6) wynika z kolei, że moment magnetyczny cewki wynosi:

$$\mathbf{m} = I\mathbf{A} \quad (3.7)$$

Wynika stąd, że jednostka $A \cdot m^2$ jest również jednostką SI, i ze względu na powszechne użycie w dziedzinie, której dotyczy niniejsza praca, zmierzone i obliczone momenty magnetyczne będą w niej wyrażane.

Bardziej złożona sytuacja powstaje przy próbie przeliczenia wartości momentu magnetycznego podanego w układzie jednostek miar CGS [35]. Z powodu istnienia we współczesnej literaturze co najmniej trzech odmian tego układu (ESU, Gaussian, EMU) powszechnie występuje sześć, różnie zdefiniowanych, jednostek momentu magnetycznego.

Wśród producentów sprzętu do pomiarów magnetycznych istnieje rozróżnienie pomiędzy momentem magnetycznym, oznaczanym dalej jako \mathbf{m} i dipolowym momentem magnetycznym, oznaczonym jako \mathbf{j} (w celu uniknięcia dwuznaczności oznaczeń, w pracy moment dipolowy oznaczono jako \mathbf{d}). Powiązane są one zależnością:

$$\mathbf{d} = \mu_0 \mathbf{m} \quad (3.8)$$

W niektórych przypadkach producent nie definiuje wyraźnie, który moment magnetyczny podaje. Opisane w dalszych rozdziałach stanowisko do pomiaru momentu magnetycznego zawiera strumieniomierz firmy Lakeshore, produkcji amerykańskiej, całe stanowisko natomiast wzorcowane było wzorcami momentu magnetycznego produkcji MagnetPhysik GmbH z Niemiec, z odpowiednimi certyfikatami. Wzorce mają podaną wartość „dipolowego momentu magnetycznego” \mathbf{d} , wyrażonego w jednostkach $V \cdot s \cdot cm$. Strumieniomierz natomiast podaje wynik pomiaru momentu magnetycznego w $mWb \cdot cm$, czyli również dipolowy moment magnetyczny.

Moment magnetyczny jest wielkością determinującą kształt i wielkość anomalii magnetycznej, tj. rozkład indukcji pola magnetycznego w przestrzeni wokół danego obiektu. Wartość indukcji pola magnetycznego \mathbf{B} w płaszczyźnie prostopadłej do danego wektora momentu magnetycznego, przy założeniu odpowiednio dużej odległości, może być przybliżona następującym równaniem [39]:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\mathbf{m}}{r^3} \quad (3.9)$$

W bardziej uogólnionym przypadku, ale nadal przy założeniu odległości od obiektu wyraźniej większej od jego rozmiarów, potencjał magnetyczny \mathbf{A} w odległości $\mathbf{r}(x,y,z)$ od dipola wyrażony jest zależnością:

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad (3.10)$$

Przy czym \mathbf{r} jest wektorem wskazującym punkt względem dipola, w którym obliczany jest potencjał magnetyczny. Indukcja pola magnetycznego \mathbf{B} generowana przez taki moment magnetyczny powiązana jest bezpośrednio z potencjałem \mathbf{A} zależnością:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.11)$$

3.1.4 Magnetyzacja w układach magnetostatycznych

Związek między wypadkową indukcją \mathbf{B} pola magnetycznego, natężeniem \mathbf{H} zewnętrznego pola magnetycznego i magnetyzacją \mathbf{M} w najprostszym, jednorodnym przypadku dany jest zależnością:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.12)$$

Wszystkie materiały składają się z atomów z orbitującymi elektronami. Elektrony te generują prądy kołowe, które można przedstawić jako momenty magnetyczne m_i . Zbiór wszystkich tych momentów dipolowych składa się na wypadkową magnetyzację materiału. Przyjmuje się uśrednioną wartość momentów w większej objętości, i opisuje magnetyzację jako wartość wypadkowego momentu magnetycznego na jednostkę objętości. Jeśli w jednostkowej objętości jest n atomów, magnetyzację \mathbf{M} definiujemy jako:

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{n\Delta V} \mathbf{m}_i}{\Delta V} \quad [\text{Am}^{-1}] \quad (3.13)$$

Przy czym $\sum_{i=1}^{n\Delta V} m_i$ jest sumą wszystkich dipolowych momentów magnetycznych wewnątrz objętości elementu ΔV . Według tej definicji, magnetyzacja może być opisana jako gęstość dipolowych momentów magnetycznych. Wielkość ta upraszcza zarówno obliczenia analityczne, jak i modelowanie metodą elementów skończonych – ponieważ należy podać wypadkową magnetyzację obiektu, nie jest natomiast wymagana informacja o wszystkich składających się na nią dipolach magnetycznych.

3.1.5 Natężenie pola magnetycznego

Gęstość prądu \mathbf{j} może być rozdzielona na dwie składowe – gęstość prądu związanego \mathbf{j}_m i gęstość prądu ładunków swobodnych \mathbf{j}_f :

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_m + \mathbf{j}_f \quad (3.15)$$

Prąd związany jest powiązany z materiałem i może być w uproszczeniu rozumiany jako gęstość prądu wynikająca z ruchu elektronów wokół jąder atomowych. Gęstość prądu związanego definiowana jest jako rotacja magnetyzacji \mathbf{M} .

$$\mathbf{j}_m = \nabla \times \mathbf{M} \quad (3.16)$$

Gęstość prądu ładunków swobodnych \mathbf{j}_f nie jest trwale powiązana z obiektem, ładunki mogą przemieszczać się swobodnie. Podstawiając (3.15) do (3.4d) otrzymujemy:

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{j}_m + \mathbf{j}_f = \mathbf{j}_f + \nabla \times \mathbf{M} \quad (3.17)$$

Lub:

$$\nabla \times \left(\frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \right) = \mathbf{j}_f \quad (3.18)$$

Można zatem zdefiniować pole \mathbf{H} [Am^{-1}], zwane natężeniem pola magnetycznego:

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \quad (3.18)$$

W ten sposób, można wprowadzić drugą formę równań magnetostatycznych:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_f \quad (3.19a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.19b)$$

Przekształcenie równań magnetostatycznych z zależności (3.4) w zależność (3.19) umożliwia opis zależny tylko od gęstości prądu ładunków swobodnych \mathbf{j}_f i magnetyzacji \mathbf{M} , wiążącej pola \mathbf{B} i \mathbf{H} poprzez zależność (3.18). Założenie $\mathbf{j}_f = 0$ sprawia, że pola te stają się wolne od rotacji i dywergencji, co dodatkowo ułatwia obliczenia magnetostatyczne.

3.1.6 Potencjał magnetyczny w układach magnetostatycznych

W elektrodynamice klasycznej pojęciem ułatwiającym obliczenia magnetostatyczne jest potencjał magnetyczny. W miejsce bezpośrednich obliczeń pól \mathbf{B} i \mathbf{H} , można zastosować ich potencjały. Głównym powodem takiego podejścia jest możliwość przekształcenia równań magnetostatycznych (3.19) w prostszy do rozwiązania układ równań różniczkowych. Rozróżnia się dwa rodzaje potencjałów magnetycznych – skalarny i wektorowy. Ich istnienie wynika z dwóch ważnych tożsamości:

$$\nabla \times (\nabla\varphi) \equiv 0 \quad (3.20a)$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) \equiv 0 \quad (3.20b)$$

Dowód tych tożsamości znajduje się między innymi w pracy [39].

W układzie pozbawionym gęstości prądu ładunków swobodnych ($\mathbf{j}_f = 0$) natężenie pola magnetycznego \mathbf{H} jest bezrotacyjne:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{0} \quad (3.21)$$

Porównując zależność (3.21) z tożsamością (3.20a) otrzymuje się opis pola \mathbf{H} jako gradientu skalarnego pola:

$$\mathbf{H} = -\nabla\varphi \quad (3.22)$$

Skalarne pole φ nazywane jest skalarnym potencjałem magnetycznym. Wykorzystując tę wielkość, możemy wyznaczyć zależność między potencjałem skalarnym a magnetyzacją, która go wywołuje. Stosując operację dywergencji na wektorze natężenia pola magnetycznego otrzymuje się:

$$\operatorname{div}\mathbf{H} = \nabla \cdot \mathbf{H} = \nabla \cdot (-\nabla\varphi) = \frac{1}{\mu_0} \nabla \cdot \mathbf{B} - \nabla \cdot \mathbf{M} \quad (3.23)$$

Umożliwia to wyznaczenie efektywnej gęstości ładunków magnetycznych:

$$\rho_M = -\nabla \cdot \mathbf{M} \quad (3.24)$$

oraz wyznaczenie równania Poisson'a dla pola skalarnego φ

$$\nabla^2 \varphi = -\rho_M \quad (3.25)$$

Mając dany rozkład ρ_M , można wyznaczyć skalarny potencjał magnetyczny φ . Przykłady zastosowania metody potencjałów skalarnych do rozwiązywania problemów magnetostacyjnych zawarte są w pracy [37], natomiast przykład modelowania trójwymiarowych pól magnetycznych w pracy [40].

Ponieważ pole indukcji magnetycznej \mathbf{B} jest polem bezźródłowym (3.19b), tożsamość (3.20b) wskazuje na możliwość opisu pola \mathbf{B} jako rotacji innego pola wektorowego:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.26)$$

Pole wektorowe \mathbf{A} nazywane jest magnetycznym potencjałem wektorowym.

Przy takiej definicji pole \mathbf{A} jest niejednoznaczne, a więc dodanie dowolnego bezrotacyjnego pola do \mathbf{A} nie wpłynie na \mathbf{B} . Ażeby uniknąć niejednoznaczności, wprowadza się warunek Lorenz'a $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$. Przy takim założeniu, otrzymuje się:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} = -\nabla^2 \mathbf{A} \quad (3.27)$$

Biorąc pod uwagę prawo Ampere'a (3.4a), otrzymuje się równanie Poisson'a dla poszczególnych składowych \mathbf{A} .

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J} \quad (3.28)$$

Podobnie jak w przypadku skalarnego potencjału magnetycznego, zależność ta pozwala na modelowanie problemów magnetostacyjnych. Pojęcie wektorowego potencjału magnetycznego umożliwia również opis dipola magnetycznego, w podrozdziale 3.1.3. Pojęcie to umożliwia też wyprowadzenie analitycznego modelu matematycznego opisującego rozkład pola indukcji magnetycznej \mathbf{B} w danej płaszczyźnie względem dipola magnetycznego, który jest podstawą lokalizacji obiektów ferromagnetycznych na podstawie pomiarów magnetowizyjnych. Model ten opisano w rozdziale 8.5.

3.1.7 Materiały magnetyczne

W odróżnieniu od indukcji pola magnetycznego w próżni, w materiałach wprowadza się pojęcie przenikalności względnej μ_r , i modyfikuje się równanie wiążące wartość indukcji pola magnetycznego B w materiale z wartością natężenia pola magnetycznego H do następującej zależności:

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu H \quad (3.29)$$

Na podstawie zróżnicowania wartości przenikalności względnej μ_r , wszystkie materiały można podzielić na trzy główne grupy: materiały diamagnetyczne ($\mu_r < 1$), paramagnetyczne ($\mu_r > 1$) i ferromagnetyczne ($\mu_r \gg 1$).

Praca obejmuje wykrywanie i lokalizację obiektów ferromagnetycznych. Są to materiały, w których występuje spontaniczna magnetyzacja, również przy nieobecności zewnętrznego pola magnesującego. Atomowe momenty magnetyczne w materiale zorientowane są wzdłuż poszczególnych osi krystalograficznych, co z kolei jest przyczyną powstania wypadkowego momentu magnetycznego w materiale [41]. Jednakże tendencja do minimalizacji energii swobodnej w danej próbce materiału, prowadzi do powstania wzajemnie się znoszących regionów o jednorodnej magnetyzacji, tzw. domen magnetycznych. W rezultacie, przy nieobecności pola zewnętrznego, materiał taki (w stanie rozmagnesowanym) nie wykazuje wypadkowego momentu magnetycznego [42].

Materiał ferromagnetyczny charakteryzowany jest poprzez krzywe $B(H)$. Może to być krzywa magnesowania lub pętla histerezy magnetycznej. Początkowo w procesie magnesowania materiału od stanu rozmagnesowanego do nasycenia obserwuje się pierwotną krzywą magnesowania. Następnie, pod wpływem zmiennego pola magnesującego, materiał przechodzi między stanami nasycenia, wykazując przy tym tzw. histerezę magnetyczną. Jednym z najistotniejszych zjawisk powodujących tę histerezę jest oddziaływanie między strukturą domen magnetycznych a strukturą krystaliczną materiału [43].

Pętla histerezy magnetycznej opisywana jest przez następujące parametry:

- natężenie pola koercji H_c , które określa wartość pola magnesującego potrzebnego do zredukowania do zera indukcji magnetycznej w materiale,
- indukcję remanencji B_r , która określa wartość indukcji magnetycznej w materiale wstępnie namagnesowanym dla pola magnesującego $H = 0$,
- indukcję nasycenia B_s , która określa wartość indukcji magnetycznej w materiale dla pola magnesującego nasycenia H_s , tj. $H_s \gg H_c$.

Z technicznego punktu widzenia materiały ferromagnetyczne można podzielić na dwa główne rodzaje:

- materiały magnetyczne miękkie, o niskiej wartości pola koercji H_c ,
- materiały magnetyczne twarde, o wysokiej wartości pola koercji H_c .

Zasadniczym kryterium różnicującym te dwie grupy materiałów jest ich zachowanie w zewnętrznym polu magnesującym. Materiały magnetyczne miękkie mają wysoką przenikalność i niską koercję, co sprawia że łatwo się magnesują pod wpływem pól zewnętrznych. Dlatego też np. elementy stalowe (jako magnetyki miękkie) mogą uzyskać wypadkowy moment magnetyczny pod wpływem pola ziemskiego, procesów produkcyjnych, itp.

Materiały magnetyczne twarde natomiast są w dużym stopniu niewrażliwe na wpływ pola zewnętrznego i są w stanie wykazywać znaczny oraz stabilny wypadkowy moment magnetyczny.

W pracy posłużono się obiektami testowymi z obu tych grup materiałów, w szczególności wzorcami momentu magnetycznego wykonanymi z materiału magnetycznie twardego, o dużej stabilności temperaturowej wartości indukcji remanencji B_r .

3.2 Metody lokalizacji obiektów ferromagnetycznych

3.2.1 Rozwiązania stosowane w praktyce

Wybuchowe pozostałości wojenne często znajdują się na głębokościach poza zasięgiem konwencjonalnych, aktywnych wykrywaczy metalu [1]. Może to być spowodowane naturalnymi zjawiskami glebotwórczymi, częściej wynika ze sposobu w jaki mina lub niewybuch znalazł się w danym miejscu. Dla obiektów silnie uderzających w ziemię mogą to być znaczne głębokości, nawet 3 metrów. Przykłady to pociski moździerzowe, artyleryjskie czy bomby lotnicze. Procent niewybuchów szacuje się na 15% [44].

Czułość aktywnego wykrywacza metalu spada wykładniczo z odległością obiektu od cewek wykrywacza. Zasięg roboczy wykrywacza to zazwyczaj 2 do 3 średnic cewek. Większość konwencjonalnych aktywnych wykrywaczy metalu używanych podczas rozminowywania posiada zasięg roboczy poniżej 20 cm [45]. Ponieważ zostały one zoptymalizowane do poszukiwań małych obiektów metalowych w pobliżu powierzchni gruntu, wykrycie większych obiektów na większych głębokościach jest utrudnione, i tylko nieliczne są w stanie wykryć np. dużą minę przeciwczołgową w stalowej, blaszanej obudowie na głębokości ponad 40 cm. Jeżeli obszar zostaje przeszukany przy wykorzystaniu takiego sprzętu, głęboko położone niewybuchy pozostają niewykryte. Instytucje zajmujące się rozminowywaniem, takie jak Międzynarodowe Centrum Humanitarnego Rozminowywania w Genewie (GICHD), określają zatem głębokość rozminowania terenu. W gruntach o właściwościach magnetycznych i przewodzących może to być zaledwie 10 cm [46].

Głęboko położone niewybuchy nie stanowią bezpośredniego zagrożenia dla pieszych, lecz zagrażają ciężkim maszynom, działalności budowlanej i rolniczej na danym terenie. Dlatego po standardowym rozminowaniu, stosuje się obecnie drugie badanie dalekiego zasięgu (ang. Deep Search). Do takich badań stosuje się dwie główne metody – aktywne i pasywne [47].

Przyrządy aktywne mają taką samą zasadę działania jak wykrywacze metalu stosowane w konwencjonalnym rozminowywaniu, lecz mają znacznie większe cewki nadawcze i odbiorcze, o średnicy około 1 m. Zwiększenie średnicy zwiększa proporcjonalnie zasięg wykrywacza, dla średnicy 1m będzie to ok. 3 m, lecz jednocześnie zmniejsza rozdzielczość XY wykrywacza oraz czułość na małe obiekty, które mogą zostać niewykryte. Największą zaletą technologii aktywnych jest możliwość wykrywania wszystkich metali i innych obiektów przewodzących. Niestety, jak w przypadku wszystkich technik aktywnych, istnieje możliwość zastosowania pułapek antysaperskich [48].

Instrumenty pasywne to czułe magnetometry, mierzące wartość skalarną lub wektorową naturalnego ziemskiego pola magnetycznego [49]. Obecność obiektu ferromagnetycznego, takiego jak np. bomba lotnicza ze stalowym korpusem, powoduje zaburzenie stałego pola magnetycznego [26]. Ponieważ przyrządy te polegają na pomiarze wartości, rozkładu lub gradientu stałego pola magnetycznego, mogą wykrywać wyłącznie obiekty ferromagnetyczne. Obecnie obsługa urządzeń przenośnych polega na wykonaniu szczegółowych pomiarów ręcznym magnetometrem w danym terenie, i wnioskowaniu o położeniu i głębokości na jakiej znajduje się obiekt na podstawie kształtu lokalnego zaburzenia pola magnetycznego, czyli tzw. anomalii. Istniejące magnetometry nie są w stanie wykryć obecności np. min z tworzyw sztucznych z minimalną zawartością części metalowych, lecz wykrywają miny w obudowach stalowych lub zawierające stalowe odłamki. Urządzenia tego typu wykrywają duże obiekty na głębokościach do 5m [50]. Najczęściej wykorzystuje się czujniki transduktorowe, ze względu na dużą rozdzielczość, na poziomie 100 pT [51]. Ze względu na znaczną wartość stałego pola ziemskiego przy czułościach tego rzędu, konstruuje się je zazwyczaj jako gradiometry. Dwa jednakowe czujniki umieszczone są na końcach sztywnego ramienia, a sygnały z nich są odejmowane. W ten sposób pole stałe jest pomijane, co ułatwia obserwację lokalnych anomalii [52].

Spotykane są również konstrukcje komercyjne oparte na magnetometrach potasowych i cezowych, oraz czujniki NMR [53] – są to tak zwane magnetometry skalarne, tj. mierzące wartość indukcji pola magnetycznego niezależnie od kierunku jego wektora.

Kiedy lokalne warunki pozwalają na swobodny wybór technologii, systemy aktywne są preferowane podczas poszukiwań niewybuchów na średnich głębokościach: pocisków moździerzowych, bomb kasetowych, pocisków średniej artylerii. Przyrządy pasywne są wybierane na obszarach po bombardowaniu lotniczym lub ciężkim ostrzale artyleryjskim, ze względu na większą głębokość wykrywania niewybuchów.

Najefektywniejszym sposobem wykrywania głęboko położonych obiektów jest zastosowanie technologii geo-mapowania, które pozwala na archiwizację i analizę danych pomiarowych oraz zminimalizowanie błędu ludzkiego [54]. Obecnie stosowane systemy polegają na skanowaniu terenu poprzez 'ręczny' transport magnetometru sprzężonego z odbiornikiem GPS. Stosuje się również odpowiednie wózki lub pojazdy, wtedy należy wziąć pod uwagę zaburzenie generowane przez pojazd [55].

Na rysunku 3.1 przedstawiono nowoczesny, eksperymentalny układ pomiarowy tego typu, składający się z magnetometrów nadprzewodzących SQUID (ang. superconducting quantum

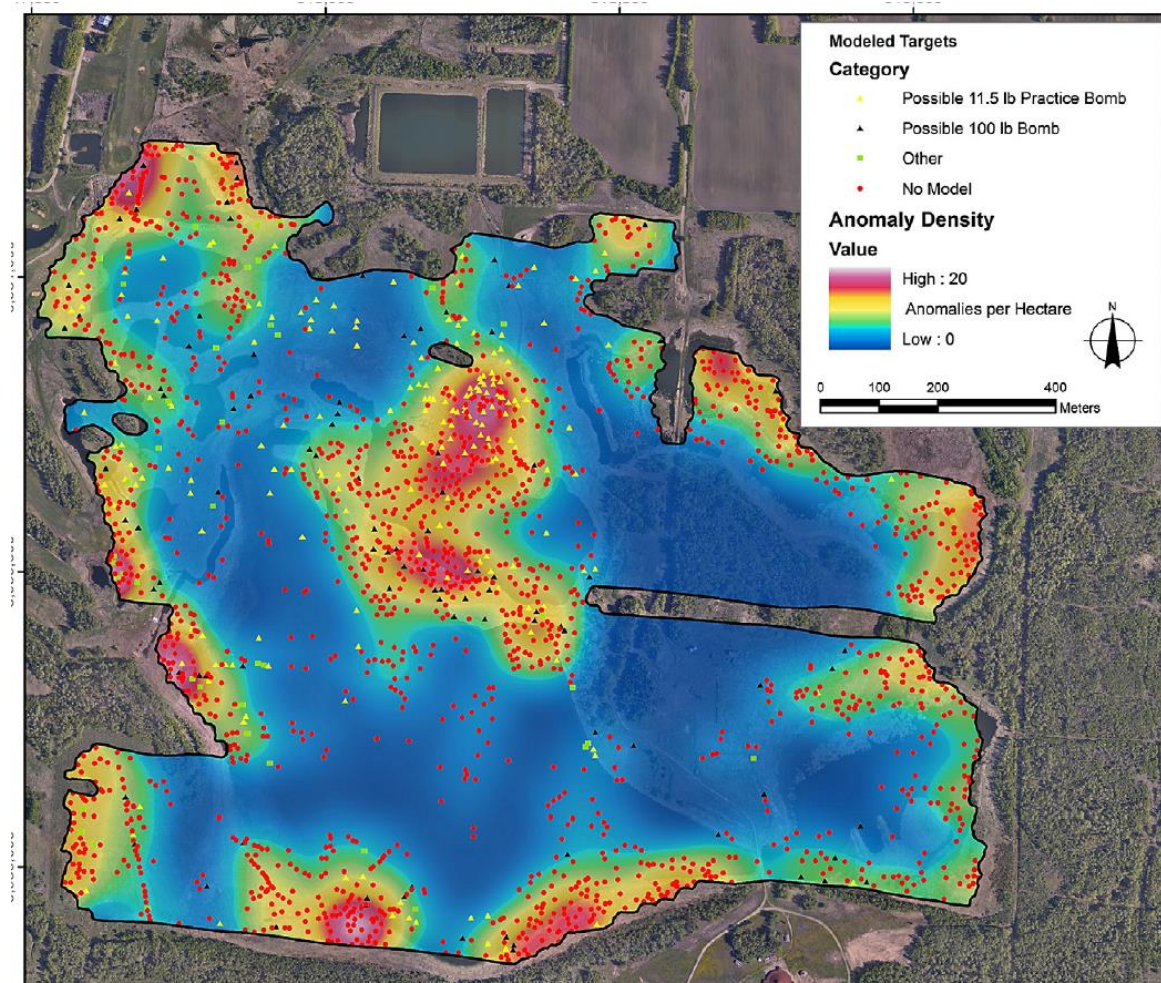
interference device [56]) umieszczonych na wysięgniku przymocowanym do helikoptera. Posłużył on do mapowania obszaru poligonu wojskowego, na którym poszukiwano bomb lotniczych przedstawionych na rysunku 3.2. Na rysunku 3.3 natomiast przedstawiono wyniki takich pomiarów. Rozdzielczość XY przedstawionej metody wyniosła 0,5m. W publikacji nie określano jednak głębokości. Rodzaj obiektu dopasowywano na podstawie wygenerowanej wcześniej biblioteki sygnatur magnetycznych [57].



Rys. 3.1. Helikopter z zamocowanym wysięgnikiem, na którego końcach umieszczono magnetometry typu SQUID [57]



Rys. 3.2. Stalowa ćwiczebna bomba lotnicza [57]



Rys. 3.3. Przykładowe wyniki geo-mapowania anomalii magnetycznych [57]

Dane zebrane w ten sposób umożliwiają uproszczoną detekcję położenia anomalii pola magnetycznego, a więc ukrytych obiektów. Jest to jednak ocena jakościowa, nie ilościowa, i nie pozwala na precyzyjne wyznaczenie parametrów opisujących wypadkowy moment magnetyczny danego obiektu, oraz wszystkich jego współrzędnych przestrzennych.

Zwiększenie liczby punktów pomiarowych poprzez pomiar magnetowizyjny pozwoli na zwiększenie rozdzielczości wyznaczenia położenia zaburzenia magnetycznego na płaszczyźnie pomiarowej. Dodatkowa komputerowa analiza danych umożliwi uzyskanie dodatkowych informacji na temat źródeł anomalii, takich jak głębokość i wartość powiązanej z obiektem momentu magnetycznego.

3.2.2 Rozwiązania w fazie eksperymentalnej

Możliwości techniczne związane z metodami pomiaru anomalii magnetycznych oraz gromadzeniem i analizą danych są stale rozwijane, przede wszystkim przez ośrodki naukowe w USA i ChRL. Ma to miejsce zarówno poprzez opracowywanie nowych, czulszych magnetometrów, w tym miniaturowych magnetometrów transduktorowych [58], jak i poprzez konstrukcje hybrydowe. W pracy [59] opisano np. wykrywacz indukcyjno-gradiometryczny, w którym cewki wykrywacza aktywnego służą do wykrywania obiektów przewodzących, a macierz magnetometrów magnetorezystancyjnych ma wykrywać obiekty ferromagnetyczne i umożliwiać ich identyfikację. Zasięg przedstawionego wykrywacza to 20 cm. W pracy [27] z kolei przedstawiono układ czterech trójosiowych magnetometrów transduktorowych, umożliwiający po odpowiedniej analizie danych lokalizację obiektów ferromagnetycznych w 3D. Zapropozowany układ ma ok 10% niepewność wyznaczenia położenia obiektu. Niepewność ta jest dalej zmniejszona w pracy [60] do deklarowanych 5%. Brakuje w niej jednak rzetelnej oceny możliwości wyznaczenia pozostałych parametrów obiektu, tj. składowych wektora momentu magnetycznego. Prowadzone są również prace nad optymalizacją konfiguracji przestrzennej układów magnetometrów [29, 61].

Dużo wysiłku włożono w opracowanie metod pozwalających na detekcję i identyfikację obiektów na podstawie bibliotek oczekiwanych sygnatur magnetycznych [20]. Biblioteki i modele te powstają najczęściej w oparciu o dipolowe modele analityczne [62]. Próby rozróżnienia obiektów często polegają na pomiarze wzajemnej skali efektu remanencji i momentu zaindukowanego polem ziemskim [21]. Zbadano również wpływ uderzeń o ziemię, w stałym polu ziemskim, na magnetyzację niewybuchów, co może wywołać wyróżnienie pewnych kierunków magnetyzacji. Wstępne wyniki wskazują na możliwość odróżnienia takich niewybuchów od innych, przypadkowych obiektów ferromagnetycznych [63].

Próbie wprowadzenia podejścia metrologicznego, tj. wyznaczenia niepewności przy detekcji i lokalizacji niewybuchów przedstawiono w pracy [28].

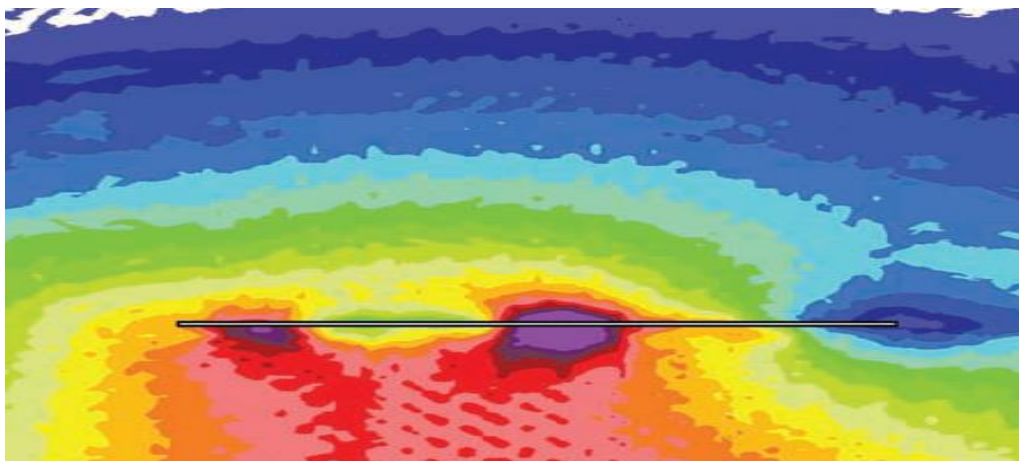
W większej skali metody pasywne stosuje się w wykrywaniu wraków [64] i okrętów podwodnych [65], oraz poszukiwania złóż mineralnych [66, 67].

Stosunkowo nową metodą pasywną jest magnetowizja. Początkowo systemy magnetowizyjne składały się z układu skanującego i sensora magnetorezystancyjnego, umożliwiającego pomiar rozkładu pola magnetycznego z dużą rozdzielczością [68].

Magnetowizja kojarzona była w literaturze z pomiarami właściwości magnetycznych stali elektrotechnicznej, z próbą powiązania pomiaru magnetowizyjnego z układem ziaren w prób-

kach [69, 70]. Późniejsze wersje systemu posłużyły do pomiarów rozkładu pola w otwartych magnetowodach, i weryfikacji obliczeń numerycznych [71].

Kolejne badania koncentrowały się wokół możliwości wykorzystania dokładnych pomiarów rozkładu pola magnetycznego w innych zastosowaniach badań nieniszczących, takich jak badanie zawartości fazy martenzytycznej w stali, rozkładu pola magnetycznego w urządzeniach magnetokalorycznych, itp. [72, 73, 74, 75, 76, 77, 78].



Rys. 3.4. Pomiar magnetowizyjny rozkładu pola wokół próbki ze stali krzemowej [71]

W pracach [79], [80] zaproponowano z kolei zastosowanie układu skanera magnetowizyjnego do detekcji i lokalizacji ukrytych obiektów ferromagnetycznych. Pomiar anomalii i wnioskowanie o położeniu obiektu są analogiczne jak w metodach geo-mapowania, różnią się większą rozdzielczością przestrzenną, wynikającą z gromadzenia znacznie większej liczby punktów pomiarowych i dokładnego określenia ich współrzędnych. Analiza uzyskanych danych pozwoliła z kolei na wyznaczenie dodatkowych parametrów obiektów ferromagnetycznych, takich jak współrzędne przestrzenne, wartość i kierunek wypadkowego momentu magnetycznego. Metoda przedstawiona w niniejszej pracy umożliwia uzyskanie mniejszych niepewności niż uzyskane w dotychczasowych badaniach.

4. Przedmiot badań

Ponieważ liczne obiekty niebezpieczne, takie jak niewybuchy, ładunki IED, czy miny zbudowane są ze stali, posiadają one wyraźne właściwości ferromagnetyczne. Wysoka przenikalność magnetyczna sprawia, że ulegają namagnesowaniu w polu ziemskim, oraz mają własną remanencję magnetyczną, będącą pozostałością procesu produkcyjnego i ewentualnych wstrząsów.

Do badań wybrano obiekty ferromagnetyczne, zróżnicowane na dwie podstawowe grupy: wzorce oraz obiekty zbliżone do rzeczywistych. Obiekty zbliżone do rzeczywistych z kolei dobrano ze względu na zróżnicowanie wartości ich remanencji oraz przenikalności magnetycznej. Dodatkowym kryterium było posiadanie prostej lub skomplikowanej geometrii.

Najważniejszymi spośród użytych próbek są wzorce momentu magnetycznego ME 8 oraz ME 7 [81], będące wysokostabilnymi magnesami trwałymi produkcji Magnet-Physik Dr Steingroever GmbH, wyposażonymi w odpowiednie certyfikaty kalibracji. Są to materiały magnetycznie twarde, ich sygnatury magnetyczne nie zależą więc od zewnętrznych, słabych pól magnetycznych, takich jak ziemskie pole magnetyczne. Posłużyły one zarówno do kalibracji stanowiska do pomiaru momentu magnetycznego opisanego w rozdziale 5.3 [82], jak i do rozwinięcia i weryfikacji algorytmów lokalizacji opisanych w rozdziale 8. Zastosowanie wzorców i ich precyzyjne pozycjonowanie pozwala na odniesienie wyników analizy pomiarów magnetowizyjnych do warunków rzeczywistych, a więc analizę ilościową, a nie jakościową, co stanowi nowość tej pracy w odniesieniu do dotychczasowych badań nad wykrywaniem obiektów ferromagnetycznych.

Dodatkowo w trakcie badań magnetowizyjnych, w celu sprawdzenia metody wyznaczania wartości momentu magnetycznego w szerszym zakresie wartości momentów, wykorzystano następujące magnesy trwałe: walec $\varnothing 8 \times 10$ mm wykonany z ferrytu F30, walec $\varnothing 10 \times 10$ mm wykonany ze stopu Alnico oraz kulka $\varnothing 15$ wykonana z $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ [83].

Z pośród materiałów magnetycznie miękkich wykorzystano walce stalowe z materiału ST3, $\varnothing 70$ mm x 10 mm oraz $\varnothing 40$ mm x 20 mm. Posłużyły one do sprawdzenia wpływu zewnętrznego, słabego pola magnetycznego na pomiar magnetowizyjny. Wyniki badań opisano w rozdziale 7.2.

W celu sprawdzenia poprawności działania modelu matematycznego służącego lokalizacji obiektów, przeprowadzono również pomiary magnetowizyjne następujących, skomplikowanych obiektów ferromagnetycznych, tj. obiektów zbliżonych do rzeczywistych obiektów niebezpiecznych:

-nóż składany, długość $l = 150$ mm. Ostrze wykonane ze stali nierdzewnej, rękojeść drewniana ze sprężyną stalową.

- korpus granatu ręcznego typu F1, oraz korpus z zapalnikiem/łyżką . Korpus wykonany jest z odlewu stalowego, zapalnik wykonano ze stali ocynkowanej.

W tabeli 4.1 przedstawiono poglądowe zestawienie parametrów obiektów testowych.

Tabela 4.1 Obiekty testowe

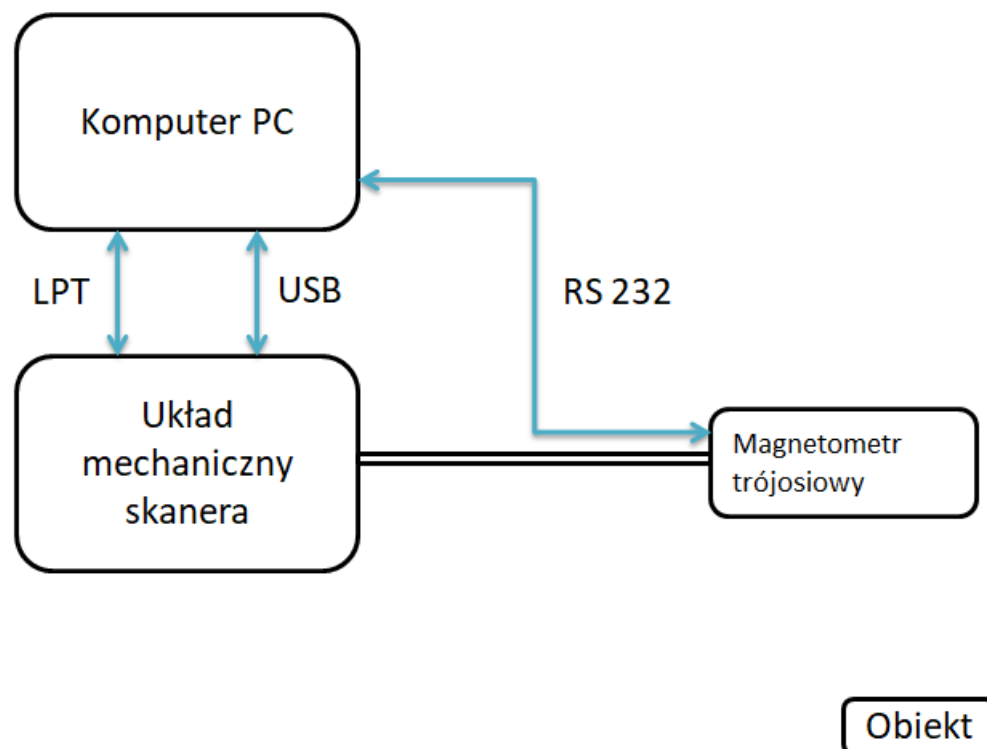
Lp.	Nazwa	Przenikalność	Remanencja	Geometria
1.	Worzec ME8	Niska	Bardzo wysoka	Prosta
2.	Worzec ME7	Niska	Wysoka	Prosta
3.	Walec $\varnothing 8 \times 10$ F30	Niska	Wysoka	Prosta
4.	Walec $\varnothing 10 \times 10$ Alnico	Niska	Wysoka	Prosta
5.	Kulka $\varnothing 15$ Nd ₂ Fe ₁₄ B	Niska	Bardzo wysoka	Prosta
6.	Walec $\varnothing 70 \times 10$ St3	Wysoka	Niska	Prosta
7.	Walec $\varnothing 40 \times 20$ St3	Wysoka	Niska	Prosta
8.	Nóż składany	Wysoka	Niska	Złożona
9.	Korpus granatu F1	Niska	Niska	Złożona
10.	Korpus granatu F1 z zapalnikiem i łyżką	Niska	Niska	Złożona

Udana detekcja, lokalizacja i wyznaczenie parametrów dipola magnetycznego dla obiektu 10, zaprezentowana w rozdziale 8, potwierdza skuteczność opracowanej metody. Obiekt ten posiadał jednocześnie niską przenikalność, niską remanencję i skomplikowaną geometrię, był więc najtrudniejszy do wykrycia metodą pasywną. Był on jednak także najbardziej zbliżony do obiektów rzeczywistych.

5. Metodyka badań

5.1. Stanowisko pomiarowe

Badania rozkładu pola magnetycznego, w celu otrzymania obrazów magnetowizyjnych, przeprowadzono z wykorzystaniem opracowanego stanowiska, którego schemat przedstawiono na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Schemat blokowy układu skanera magnetowizyjnego

Komputer klasy PC ze specjalnie przygotowaną aplikacją w środowisku LabView odpowiada za sterowanie całym układem pomiarowym i akwizycję danych z czujnika. System współpracuje z układem skanera odpowiednio za pomocą interfejsu LPT, natomiast z czujnikiem magnetorezystancyjnym za pomocą interfejsu szeregowego RS232 [84].

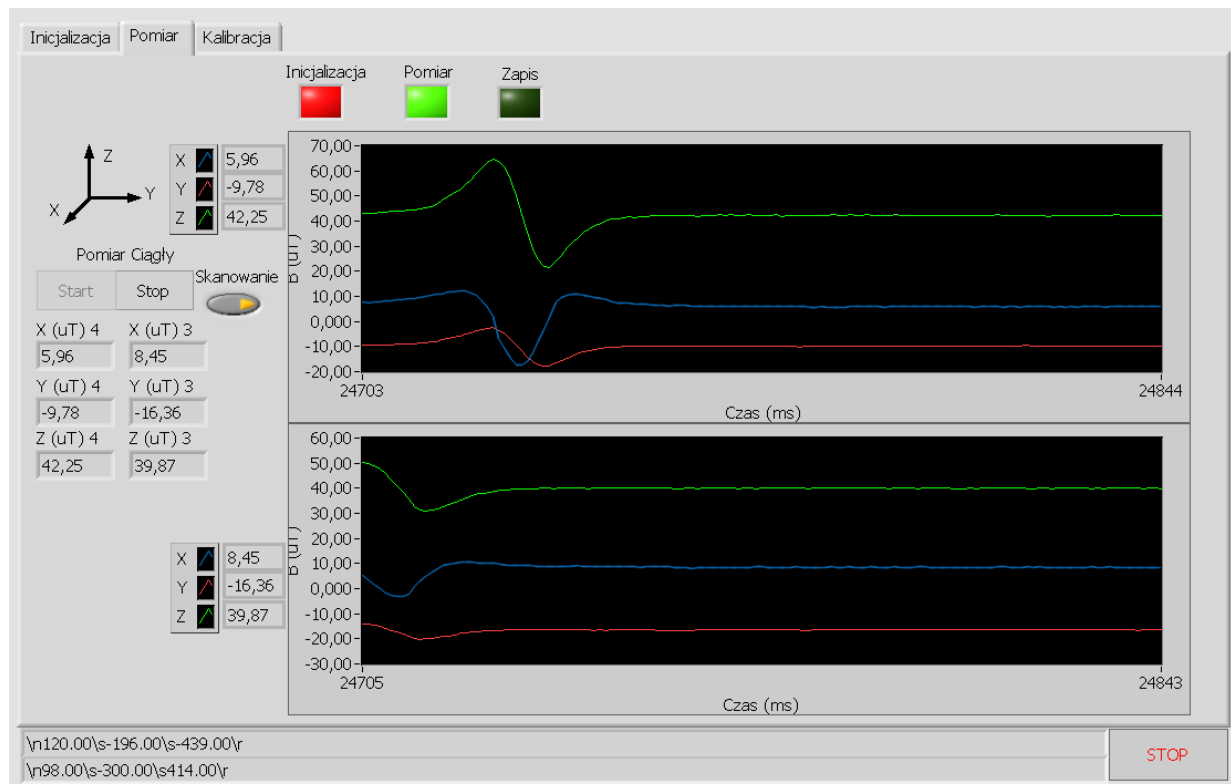
W opracowanym stanowisku wykorzystano precyzyjny czujnik magnetorezystancyjny HMR 2300 firmy Honeywell. Czujnik ten umożliwia pomiar indukcji magnetycznej w trzech osiach z rozdzielczością 7 nT. Stanowi to znaczącą przewagę nad pomiarami dokonywanymi czujnikami jednoosiowymi, ponieważ pozwala na ustalenie wartości i kierunku wektora indukcji magnetycznej w danym punkcie pomiarowym. Błąd pomiaru wartości indukcji magne-

tycznej w stosowanym zakresie pomiarowym ($100 \mu\text{T}$) wynosi $1 \mu\text{T}$, co dla typowych pomiarów przekłada się na niepewność względną poniżej 5%. Wektorowy charakter indukcji pola magnetycznego był najczęściej pomijany w dotychczasowych systemach magnetowizyjnych ze względu na korzystanie z czujników jednoosiowych.

Czujnik magnetorezystancyjny umieszczono na krańcu ramienia układu mechanicznego pozwalającego na przemieszczanie czujnika wzdłuż równoległych linii (o zadanym skoku), wyznaczających płaszczyznę pomiarową. Układ mechaniczny został zaprojektowany i wykonany na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. Ruch czujnika w płaszczyźnie realizują precyzyjne silniki krokowe, sterowane generatorem trajektorii M.I. 389. Niepewność położenia punktów pomiarowych w przestrzeni oszacowano na 1mm.

W czasie pomiarów nie stosowano dodatkowych pól magnesujących, a mierzono jedynie zaburzenia tła, które stanowi głównie naturalne ziemskie pole magnetyczne. Do badań przyjęto obszar $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, na którym wyznaczono 11 równoległych linii pomiarowych. Na każdej linii znajduje się od 100 do 300 punktów pomiarowych. Wspomniane parametry dobrano w zależności od pożądanej rozdzielczości i czasu pomiaru.

Uzyskane wyniki przetworzono w programie Matlab, przyporządkowując je do poszczególnych linii pomiarowych. Następnie interpolowano wyniki uzyskanej macierzy do wymaganej liczby punktów, co pozwalało na uzyskanie wyraźnego obrazu magnetowizyjnego. W trakcie pomiaru zbierano dane z płaszczyzny XY przy ustalonej wysokości Z. Stanowisko umożliwia przesunięcie płaszczyzny pomiarowej w osi Z o zadaną wartość. Umożliwia to uzyskanie obrazów magnetowizyjnych na różnych wysokościach nad próbką. Zastosowanie w układzie skanera drugiego magnetometru, przesuniętego w osi Z o zadaną wartość, umożliwia jednoczesny pomiar na dwóch wysokościach lub pomiar gradientu pola.



Rys. 5.2. Interfejs użytkownika programu odpowiadającego za sterowanie i akwizycję danych z magnetometru skanera magnetowizyjnego

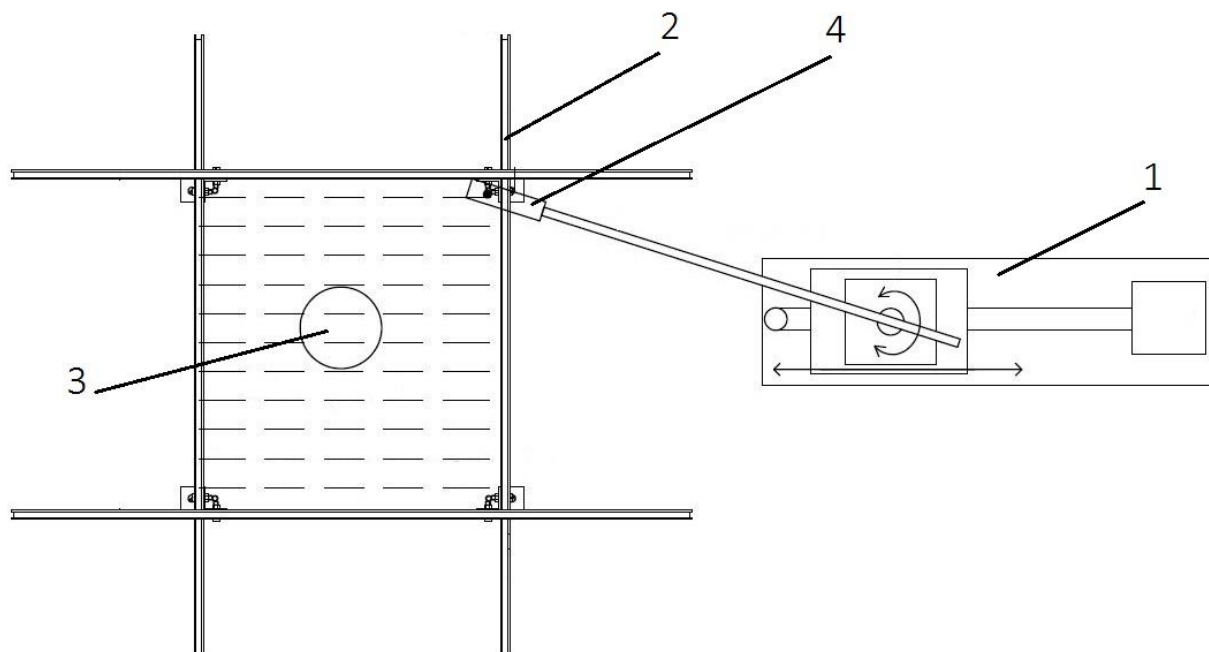
Na rysunku 5.2 przedstawiono interfejs graficzny programu odpowiadającego za sterowanie skanerem magnetowizyjnym i akwizycję danych z magnetometru. Wykresy przedstawiają wyniki pomiarów w trakcie przesuwu układu skanera, wyposażonego w dwa magnetometry nad próbką ferromagnetyczną (wzorec momentu magnetycznego ME8). Poza wizualizacją wyniku trójosiowego pomiaru z jednego lub dwóch magnetometrów i zapisem danych do pliku, program umożliwia również kalibrację poszczególnych kanałów pomiarowych na bazie wyników, uzyskanych podczas badania danego magnetometru na stanowisku wzorcowym z cewkami Helmholtza. Sprawdzenie czułości i offsetu magnetometrów jest możliwe również bez demontażu czujników z ramienia skanera.

Na górnym wykresie programu przedstawiono typowy kształt anomalii generowany przez dipol magnetyczny w trakcie przemieszczania się nad nim magnetometru.

5.2. Metoda kompensacji wpływu ziemskiego pola magnetycznego

W celu dokonania pomiaru rozkładu indukcji pola magnetycznego od magnetyzacji własnej (remanencji) obiektu, oraz zbadania wpływu pola ziemskiego na sygnatury magnetyczne obiektów o wysokiej przenikalności magnetycznej, zestawiono stanowisko pomiarowe składające się ze skanera magnetowizyjnego (pkt. 5.1) i precyzyjnych, trójosiowych cewek Helmholtza [85, 86].

Schemat tak rozbudowanego układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 5.3. Cewki Helmholtza generują jednorodne pole magnetyczne o ustalonej wartości i kierunku, w celu kompensacji wpływu zewnętrznego pola ziemskiego podczas pomiarów magnetowizyjnych [87]. Uniezależniło to wynik pomiaru od warunków zewnętrznych, i umożliwiło badanie rozkładu pola nad rozmagnesowanymi próbkami o wysokiej przenikalności magnetycznej w polu magnetycznym o zadanej wartości i kierunku.



Rys. 5.3 Schemat układu skanera magnetowizyjnego wyposażonego w cewki kompensujące pole ziemskie (widok z góry). 1- układ mechaniczny skanera, 2 - cewki Helmholtza, 3- obiekt badany, 4 – magnetometr

Obiekty badane umieszczano w jednorodnym polu generowanym przez układ cewek Helmholtza, które kompensują wpływ pola ziemskiego do wartości poniżej $0,5 \mu\text{T}$. W tych warunkach pomiar magnetowizyjny umożliwiał pomiar rozkładu pola magnetycznego nad obiektem (linie przerywane oznaczają linie pomiarowe) zależnego wyłącznie od remanencji

obiektu, a więc od jego momentu magnetycznego. Następnie przy pomocy cewek zadawano pole magnetyczne w osiach X, Y i Z układu, co umożliwiło pomiar zaburzeń tego pola magnetycznego wywołany wysoką przenikalnością próbek [88]. Ponadto, tak rozbudowany układ pomiarowy umożliwił proste odtworzenie warunków zadawanych w symulacjach wykonanych metodą elementów skończonych, przez co można było porównać wyniki symulacji z rzeczywistymi rozkładami pola [89].

5.3. Stanowisko do pomiaru momentu magnetycznego

Pomiary referencyjne momentu magnetycznego obiektów badanych wykonano przy zastosowaniu cewek Helmholtza, początkowo zaprojektowanych jako wzorzec pola ziemskiego (pkt 5.2.). Cewki Helmholtza stanowią parę płaskich, równoległych cewek o jednakowej geometrii połączonych szeregowo, a oddalonych od siebie (w ich płaszczyznach) o odległość równą ich promieniowi [90]. Cewki takie używane są do generowania jednorodnego pola magnetycznego w obszarze wewnątrz cewek. Cewki takie przy zastosowaniu całkującego strumieniomierza [91] mogą też być wykorzystywane jako cewki pomiarowe, do pomiaru magnetyzacji otwartego obwodu magnetycznego. Ze względu na równomierny rozkład pola wewnątrz cewek, namagnesowana próbka umieszczona w ich środku może być traktowana jako magnetyczny dipol. Po podłączeniu strumieniomierza do cewek Helmholtza, obiekt umieszcza się wewnątrz cewek, osią momentu magnetycznego zgodnie z osią geometryczną cewek, oraz zeruje się wskazania strumieniomierza. Kiedy następnie obiekt zostanie zabrany na znaczną odległość od cewek, lub obrócony o 180° względem osi prostopadłej do osi cewek, strumieniomierz wskazuje wartość wprost proporcjonalną do momentu magnetycznego obiektu badanego. Należy podkreślić, że w przypadku obrotu obiektu czułość metody pomiarowej i wskazania strumieniomierza są dwa razy większe niż w przypadku wysunięcia obiektu na znaczną odległość. Fakt ten jest często pomijany w literaturze, co może prowadzić do błędnej interpretacji wyników pomiaru.

Napięcie zaindukowane w cewkach jest całkowane w funkcji czasu przez strumieniomierz, a moment magnetyczny jest obliczany z uwzględnieniem stałej C cewek. Stała C cewek może zostać obliczona przy zastosowaniu uproszczonych wzorów opisujących cewkę Helmholtza (zależność 5.1), lub może być zmierzona przy użyciu magnetometru na podstawie generowanego pola magnetycznego przy danym prądzie zasilającym cewki [92].

$$C = \frac{I\mu_0}{B} = \frac{R}{\left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}}n} \quad (5.1)$$

przy czym:

C – stała cewek Helmholtza, wynikająca z ich geometrii (m),

I – prąd zasilający cewki (A),

B – indukcja pola magnetycznego w (T), generowanego przez cewki zasilane prądem I,

R – promień cewek Helmholtza (m),

n – liczba zwojów pojedynczej cewki.

Moment magnetyczny obiektu badanego powiazany jest z scałkowanym napięciem zaindukowanym w cewkach zależnością:

$$4\pi m = C \int U dt \quad (5.2)$$

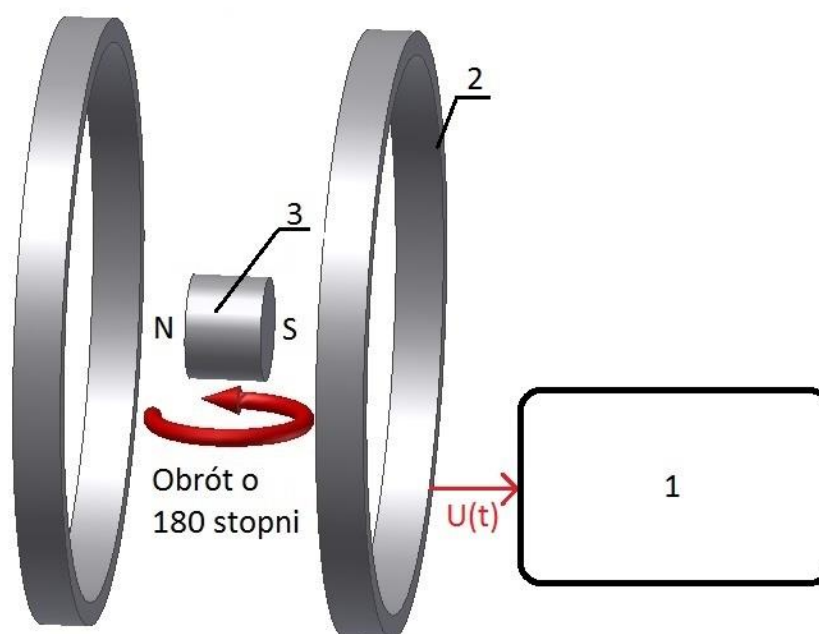
przy czym:

m – moment magnetyczny próbki (Am^2),

C – stała cewek Helmholtza (m),

U – napięcie zaindukowane na cewkach podczas ruchu próbki (V).

Do pomiarów wykorzystano cewki Helmholtza własnej konstrukcji, których stała $C = 0,01 \pm 0,00001$ m została zaprojektowana, obliczona i zmierzona. Schemat zaprojektowanego układu do pomiaru momentu magnetycznego przedstawiono na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Schemat stanowiska do pomiaru momentu magnetycznego przy zastosowaniu strumieniomierza (1) podłączonego do cewek Helmholtza (2). Widoczna w środku próbka/obiekt badany (3) umieszczona jest zgodnie z osią geometryczną cewek i podczas pomiaru obracana o 180° względem osi prostopadłej do osi cewek

W stanowisku wykorzystano strumieniomierz LakeShore 480 Fluxmeter posiadający wbudowane oprogramowanie do pomiaru momentu magnetycznego. Kalibracji układu dokonano zgodnie z instrukcją producenta, co zapewnia niepewność pomiaru poniżej 1%. W najnowocześniejszych, zautomatyzowanych układach tego typu dokładność pomiaru osiąga 0,2% [93].

Strumieniometer podaje wartość momentu magnetycznego w mWbcm, a nie w przyjętych w układzie SI jednostkach (Am^2). Próba konwersji jednostek wprost jest utrudniona, ponieważ sam sens fizyczny momentu magnetycznego jest inny – w tym wypadku jest to tzw. moment dipolowy. Należy wziąć pod uwagę zróżnicowanie definicji momentu magnetycznego spotykaną w literaturze (rozdział 3.1). W celu konwersji wskazań z momentu dipolowego d na moment magnetyczny m należy podzielić wynik przez wartość przenikalności magnetycznej próżni μ_0 . Najważniejszym ograniczeniem tej metody pomiarowej są wymiary geometryczne obiektu badanego. Maksymalny wymiar obiektu musi być mniejszy od wartości odpowiadającej $1/3$ promienia cewek Helmholtza.

W celu walidacji wyników, zastosowano niezależnie drugą metodę pomiaru momentu magnetycznego. Jest to najprostsza i najczęściej spotykana metoda pomiarowa, polegająca na pomiarach indukcji magnetycznej w znanej odległości od obiektu pojedynczym magnetometrem. Wartość absolutna indukcji magnetycznej B w odległości r od obiektu o magnetyzacji M , pod kątem φ do osi magnetycznej obiektu podana jest zależnością :

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} (1 + 3\cos^2\varphi)^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

Sonda pomiarowa magnetometru, np. magnetorezystancyjna lub transduktorowa, umieszczona jest w osi obiektu badanego, w znanej odległości. Moment magnetyczny można obliczyć z uproszczonego równania (5.4) lub (5.5) [94], w zależności od wybranego układu magnetometr-próbka. Odległość r podaje się w metrach, wartość indukcji B w μT , a wynikowy moment magnetyczny m otrzymujemy w standardowym dla układu SI Am^2 .

Przypadek 1 – sonda pomiarowa magnetometru umieszczona jest wzdłuż osi magnetycznej próbki (Rys. 5.5).

$$m = 5 B r^3 \quad (5.4)$$

przy czym:

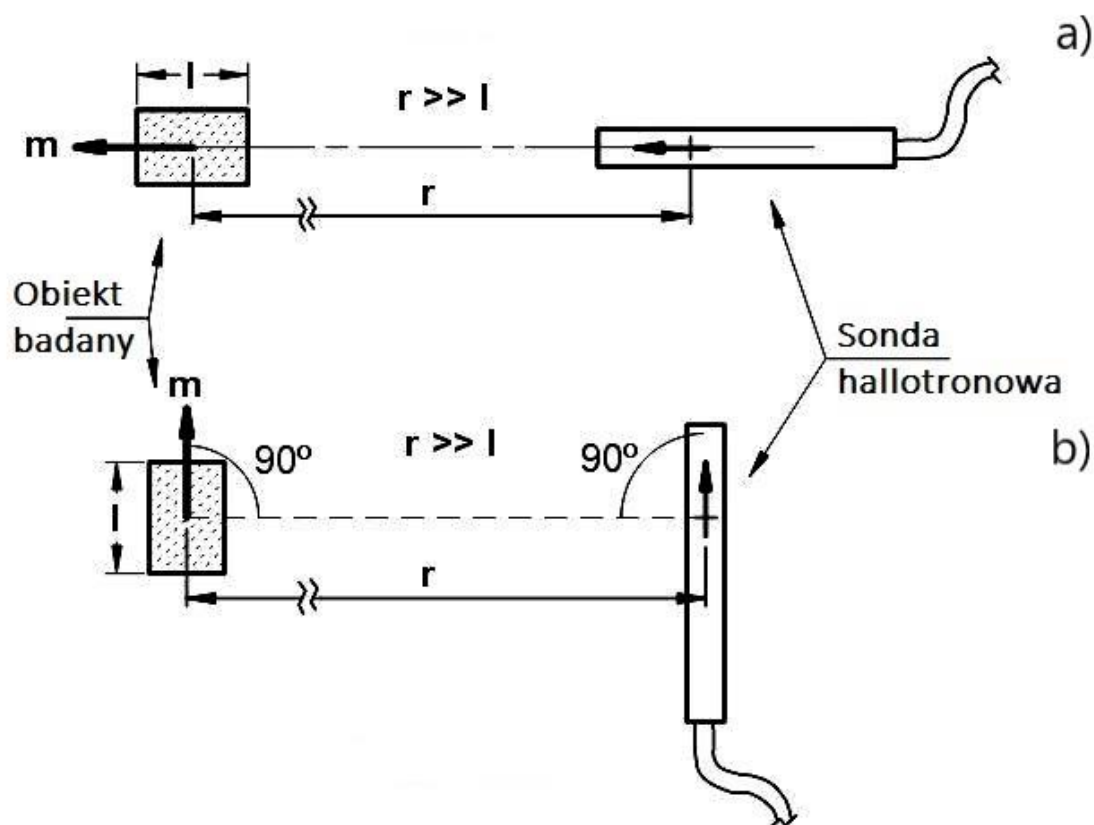
m – zmierzony moment magnetyczny, Am^2

B – zmierzona wartość indukcji magnetycznej, μT

r – odległość między środkiem próbki a elementem pomiarowym magnetometru, m

Przypadek 2 - układ równoległy sondy pomiarowej i próbki.

$$m = 10 B r^3 \quad (5.5)$$



Rys. 5.5. Schemat stanowiska do pomiaru momentu magnetycznego z pojedynczym magnetometrem. Układ magnetometr-próbka: a) sonda magnetometru umieszczona jest wzdłuż osi magnetycznej próbki, b) układ równoległy.

Wynik pomiaru zależy przede wszystkim od właściwego ustawienia sondy pomiarowej względem obiektu, natomiast w mniejszym stopniu od jego kształtu i jednorodności. Obiektem badanym w tej metodzie może być każdy obiekt posiadający moment magnetyczny, niezależnie od rozmiarów, np. satelita telekomunikacyjny, co stanowi najważniejszą przewagę nad doskonalszą, ale droższą metodą z cewkami Helmholtza.

W przypadku a), tj. współosiowym układzie magnetometr-próbka, czułość i uzyskany wynik pomiaru pola B jest dwukrotnie większa niż w przypadku b) [94]. Tym samym, taki układ magnetometr-próbka jest preferowany ze względu na większą dokładność pomiaru. Odległość r powinna być co najmniej 10 razy większa od największego wymiaru geometrycznego obiektu. Aby poprawić dokładność pomiaru i usunąć wpływ pola ziemskiego na wynik pomiaru, należy wykonać dwa pomiary w dwóch położeniach obiektu badanego, obróconego o kąt 180° . Po odjęciu wyników i podzieleniu przez 2 uzyskuje się szukaną wartość momentu ma-

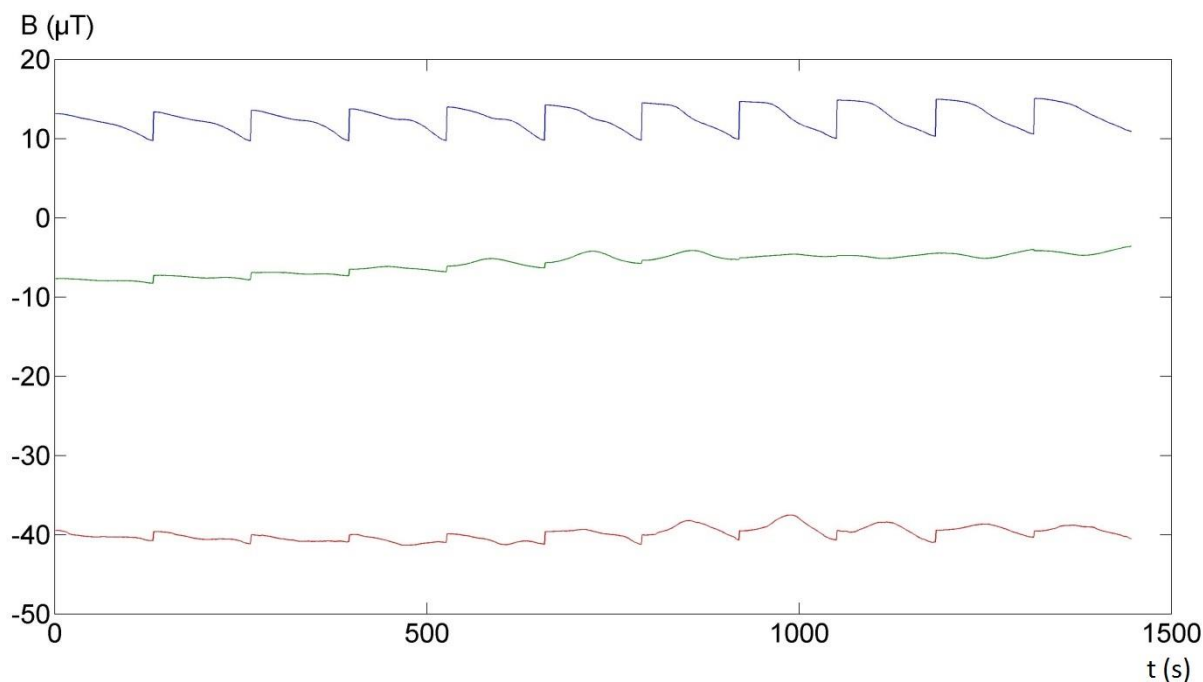
gnetycznego. Można również wyzerować wskazania nieruchomego magnetometru (bez próbki) i przeprowadzić pomiary indukcji po umieszczeniu próbki w różnych zadanych odległościach r .

W pracy zastosowano magnetometr Honeywell HMR 2300 o rozdzielczości 7 nT i zakresie pomiarowym 200 μ T [95]. Ze względu na orientacyjny charakter pomiarów i sposób pozycjonowania układu magnetometr-próbka, oraz niedoskonałość metody, dokładność pomiaru momentu magnetycznego oszacowano na 10%.

6. Wyniki własnych badań eksperymentalnych

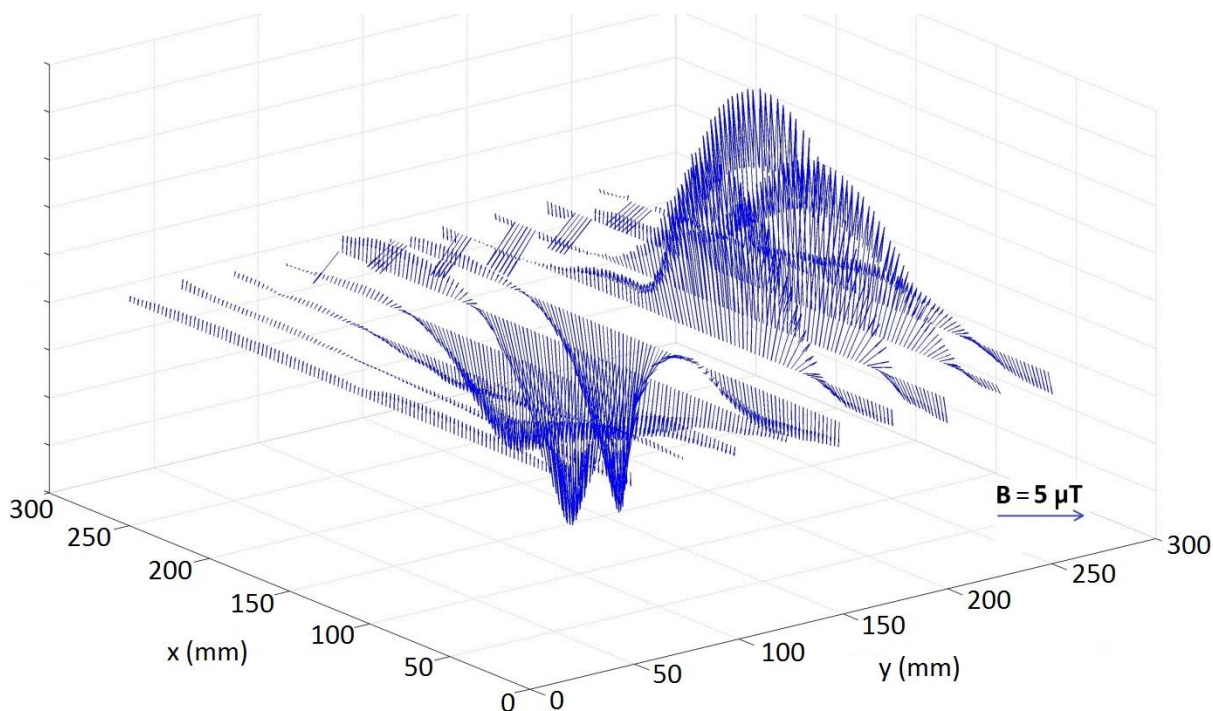
6.1. Rozkłady indukcji pola magnetycznego

Opisane w punkcie 5.2 stanowisko wykorzystano do uzyskania eksperymentalnych obrazów magnetowizyjnych dla obiektów testowych, opisanych w rozdziale 4.2. Przykładowy wykres sygnału pomiarowego przedstawiono na rysunku 6.1. Na wykresie rejestrowana jest wartość 3 składowych wektora indukcji \mathbf{B} pola magnetycznego.



Rys. 6.1. Składowe wektora indukcji \mathbf{B} pola magnetycznego zarejestrowane przez skaner magnetowizyjny. Składowa X (linia niebieska), Y (linia czerwona) i Z (linia zielona) wektora \mathbf{B} . Przykładowy pomiar indukcji \mathbf{B} dla próbki nr 6 (walec stalowy o średnicy 70 mm i wysokości 10 mm). Odległość obiektu od płaszczyzny pomiarowej $z = 50$ mm [96]

Analiza sygnału w oprogramowaniu Matlab umożliwia odtworzenie rozkładu wektorów pola magnetycznego w płaszczyźnie pomiarowej. Na rysunku 6.2 przedstawiono przykładowy wynik pomiaru dla próbki nr 6. W celu lepszego zwizualizowania wektorów pola pochodzących od próbki, z wyników pomiaru usunięto składową stałą (tj. pole ziemskie). Następnie interpolowano wyniki uzyskanej macierzy 100×10 do 100×100 punktów, co pozwalało na uzyskanie wyraźnego obrazu magnetowizyjnego.



Rys. 6.2. Rozkład wektorów indukcji \mathbf{B} pola magnetycznego w płaszczyźnie pomiarowej. Przykładowy pomiar dla próbki nr 6. Odległość obiektu od płaszczyzny pomiarowej $z = 50$ mm [97]

Ponieważ czujnik magnetorezystancyjny mierzy jedynie wartość trzech składowych wektora indukcji magnetycznej w punkcie w którym się fizycznie znajduje, pojawia się problem oddzielenia od tła zakłócenia generowanego przez interesujący nas obiekt. Najprostszym rozwiązaniem w warunkach laboratoryjnych jest pomiar różnicowy polegający na wykonaniu pomiaru bez badanego obiektu i następnie kompensacji wyniku pomiaru z obiektem. Metoda ta daje najlepsze wyniki, umożliwiając precyzyjne rozdzielanie rozkładu indukcji magnetycznej tła i obiektu, co pozwala na uzyskanie niskiego poziomu zakłóceń w obrazie magnetowizyjnym.

Wykorzystanie tej metody jest możliwe tylko w warunkach możliwości wykonania pomiarów z obiektem i bez w tej samej płaszczyźnie. Z tego względu opracowano metodę pomiaru różnicowego minimalizującą wpływ tła na wynik pomiaru, a w tym zarówno ziemskiego pola magnetycznego oraz innych, znacząco oddalonych źródeł pola.

W najprostszej formie pomiar różnicowy polega na wykonaniu pomiaru w dwóch płaszczyznach: w płaszczyźnie P_1 – na wysokości z nad badanym obiektem, oraz w płaszczyźnie P_2 – na wysokości $z + h$, przy czym z jest w przybliżeniu odległością między obiektem a płasz-

czyzną pomiarową 1, a h jest znaną odległością między płaszczyzną pomiarową P_1 a płaszczyzną pomiarową P_2 .

Rozkład linii indukcji pola magnetycznego w pobliżu obiektu ferromagnetycznego umieszczonego w ziemskim polu magnetycznym jest zbliżony do rozkładu pola magnesu sztabkowego. W szczególności indukcja pola magnetycznego magnesu może być opisywana jako pole dipola magnetycznego scharakteryzowanego przez magnetyczny moment dipolowy \mathbf{m} . Indukcja pola magnetycznego na osi magnesu, w próżni, w odległości x od jego środka jest wyrażona zależnością:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{2\pi z^3} \mathbf{m} = \mathbf{C} \frac{1}{z^3} \quad (6.1)$$

Przy czym:

\mathbf{m} – moment magnetyczny,

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{A}\cdot\text{m}}$ – przenikalność magnetyczna próżni (stała magnetyczna),

$\mathbf{C} = \frac{\mu_0}{2\pi} \mathbf{m}$ – stała zastępcza indukcji \mathbf{B} pola magnetycznego.

Ponieważ wartość indukcji magnetycznej zmniejsza się proporcjonalnie do sześcianu odległości od źródła, to jeśli $h \approx z$, zakłócenie \mathbf{B}_1 wywołane przez obiekt w pierwszej płaszczyźnie pomiarowej będzie do 8 razy większe niż \mathbf{B}_2 w drugiej płaszczyźnie.

Jeśli natomiast inne źródła pola magnetycznego znajdują się w odległości $z_F \gg z$ od pierwszej płaszczyzny pomiarowej, to ich wpływ \mathbf{B}_T na wartość indukcji magnetycznej w płaszczyznach P_1 i P_2 będzie zbliżony. A więc:

$$\mathbf{B}_{P1} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_{T1} \quad (6.2)$$

$$\mathbf{B}_{P2} = \mathbf{B}_2 + \mathbf{B}_{T2} \quad (6.3)$$

Przy założeniu:

$$\mathbf{B}_{T1} \cong \mathbf{B}_{T2}$$

$$\mathbf{B}_1 > \mathbf{B}_2$$

Otrzymuje się:

$$\mathbf{B}_{P1} - \mathbf{B}_{P2} \approx \mathbf{B}_1 \quad (6.4)$$

Przy czym:

\mathbf{B}_{P1} - indukcja zmierzona w płaszczyźnie P_1 ,

B_{P_2} - indukcja zmierzona w płaszczyźnie P_2 .

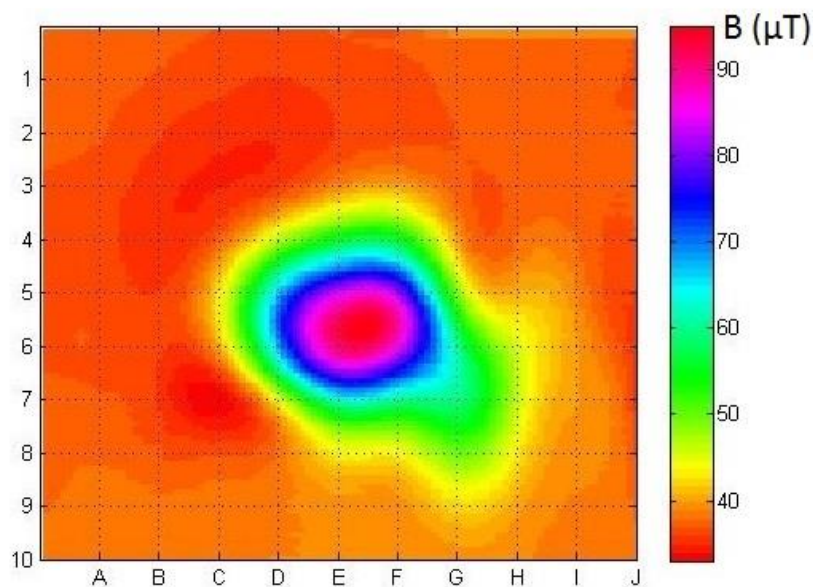
B_{T_1}, B_{T_2} - wartości indukcji pola magnetycznego tła odpowiednio w płaszczyźnie P_1 i P_2 .

Można więc uzyskać zgrubny obraz magnetowizyjny próbki znajdującej się w niewielkiej odległości poprzez odjęcie wyniku pomiaru w płaszczyźnie 2 od wyniku w płaszczyźnie 1. Wynik pomiaru różnicowego dwu-płaszczyznowego stanowi wartość bezwzględną różnicy wartości indukcji pola magnetycznego między płaszczyznami pomiarowymi.

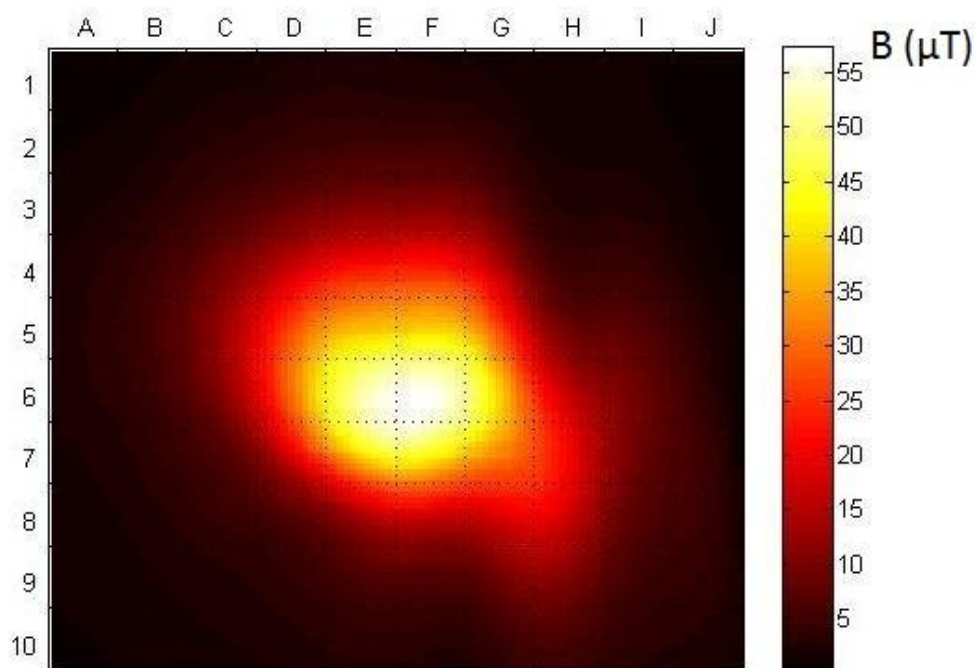
Podobną metodą skompensowania wpływu tła na wynik pomiaru, jest pomiar gradientowy, stosowany w astrofizyce i geologii (np. w gradiometrach grawitacyjnych). Polega on na pomiarze wartości natężenia pola magnetycznego w różnych płaszczyznach i na tej podstawie wyznaczeniu gradientu pola. Zastosowanie tej metody daje również dobre wyniki, pozwalające na odróżnienie obszarów dodatniego i ujemnego zaburzenia magnetycznego względem pola ziemskiego.

Pomiary zrealizowano na stanowisku opisanym w punkcie 5.1. Do badań wykorzystano obiekty ferromagnetyczne opisane w tabeli 4.1. Przyjęto odległość między płaszczyznami pomiarowymi $h = 50$ mm.

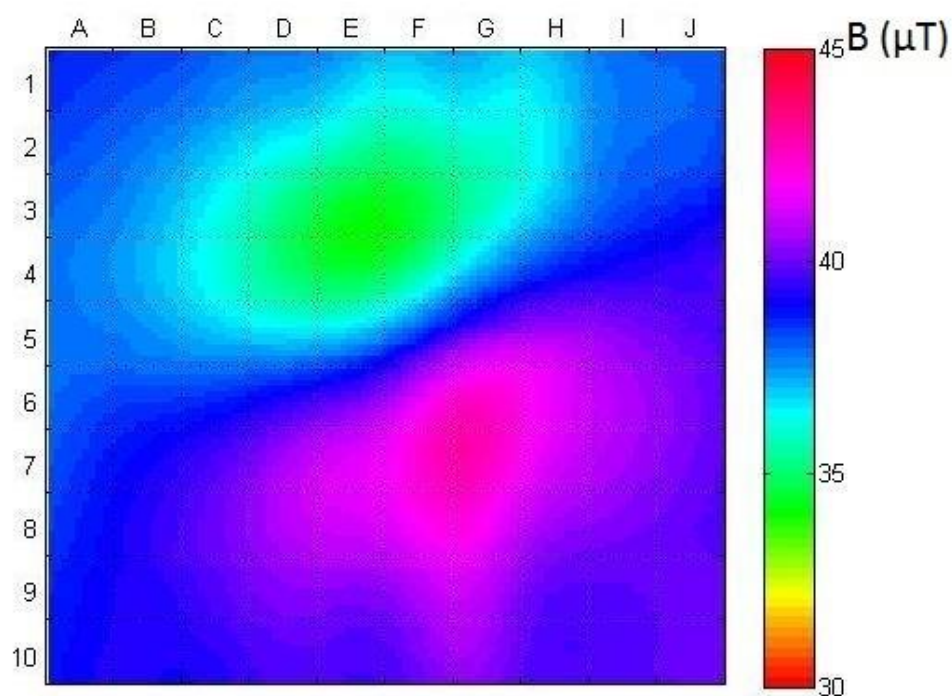
Na rysunku 6.3 pokazano obraz magnetowizyjny uzyskany poprzez jednorazowy pomiar w odległości 20 mm od obiektu nr 7. Dla tak małych odległości wpływ tła staje się pomijalny. Należy podkreślić, że położenie próbki jest wyraźnie widoczne, co może być wykorzystane w systemach bezpieczeństwa.



Rys. 6.3. Obraz magnetowizyjny rozkładu indukcji magnetycznej obiektu nr 7 - walca stalowego, pomiar pojedynczy, bez kompensacji wpływu pola tła



Rys. 6.4. Obraz magnetowizyjny rozkładu indukcji magnetycznej obiektu nr 7 - walca stalowego, pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy. Wpływ tła wyraźnie zminimalizowany

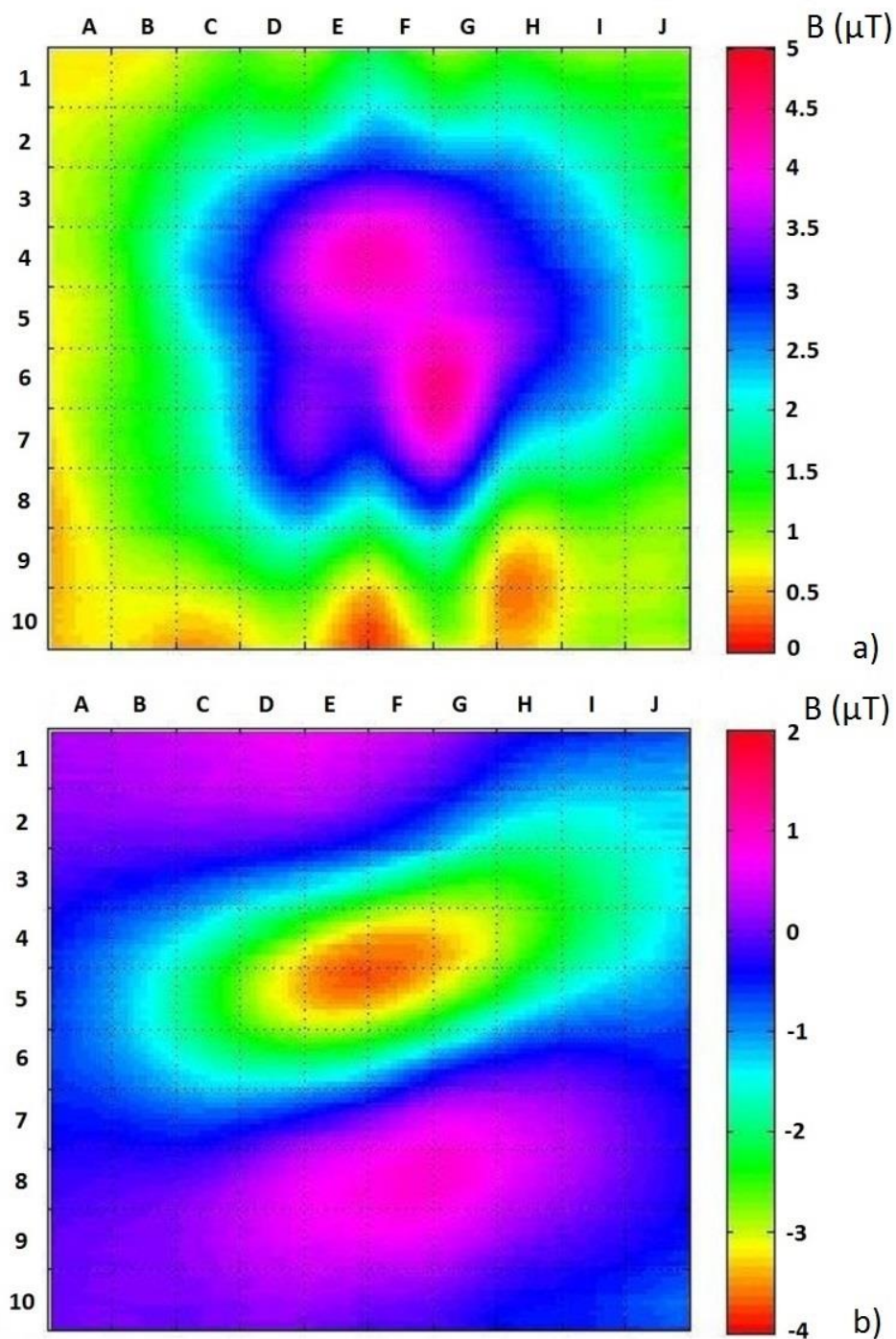


Rys. 6.5. Pomiar gradientowy rozkładu indukcji magnetycznej obiektu nr 6, bez usuwania wpływu tła

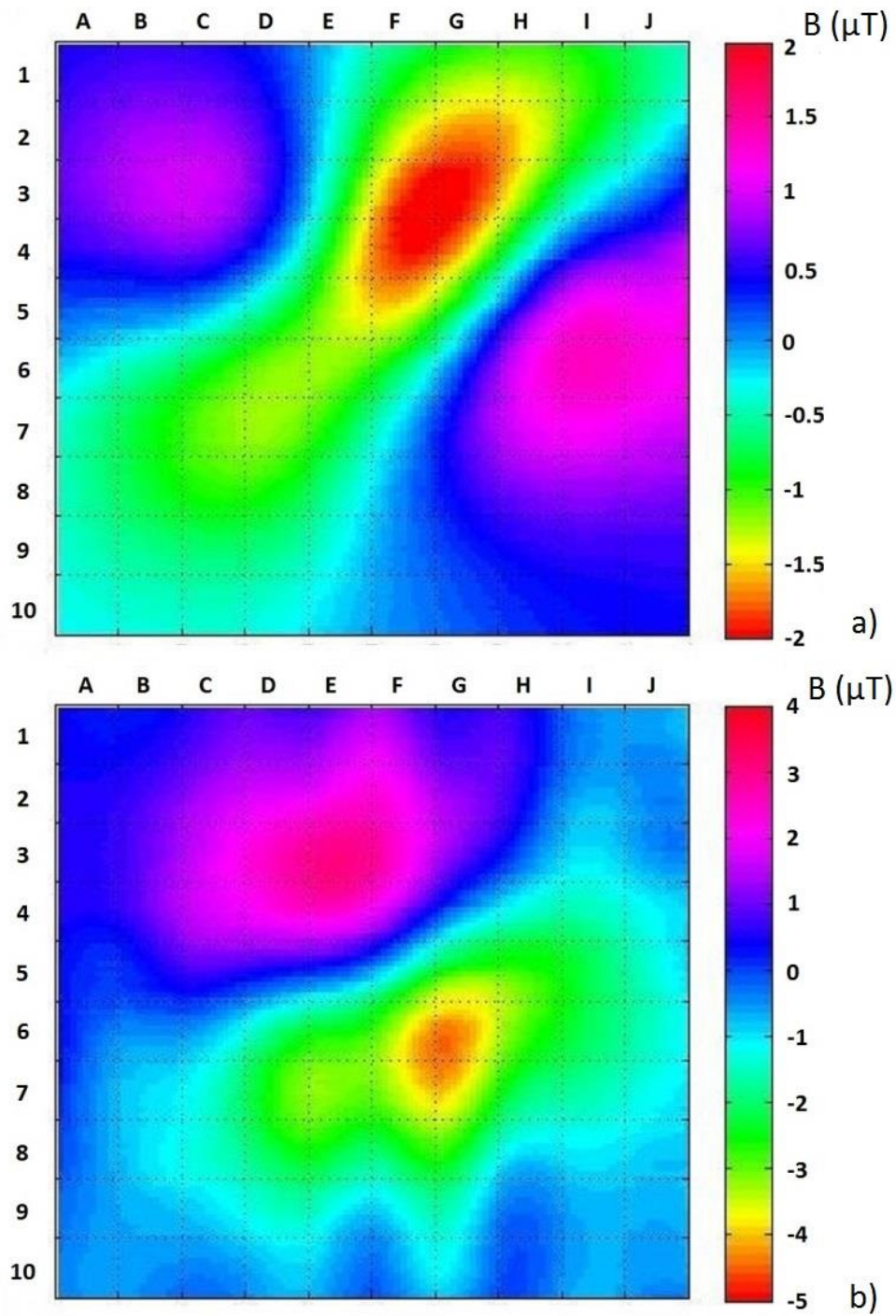
Na rysunku 6.4 przedstawiono obraz magnetowizyjny uzyskany poprzez pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy w odległości 20 mm od obiektu 2. Wyraźnie widoczny jest zminimalizowany wpływ tła na wynik pomiaru.

Na rysunku 6.5 przedstawiono wynik pomiaru gradientowego z pominięciem wpływu tła. Należy podkreślić, że jest widoczna wyraźna różnica między obszarami dodatniego i ujemnego zaburzenia magnetycznego.

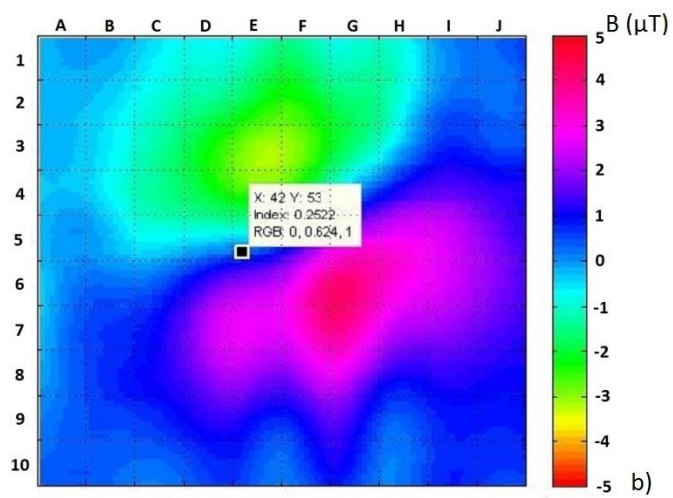
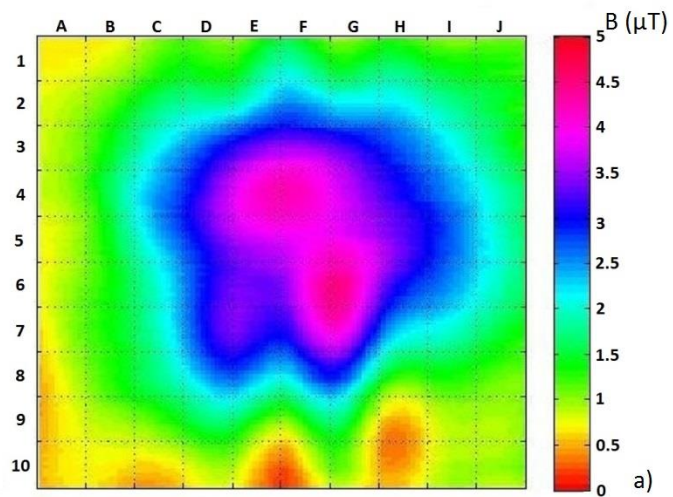
Na rysunku 6.6 przedstawiono obraz pomiaru różnicowego dwu-płaszczyznowego obiektu nr 6 (rys. 6.6.1 a) oraz obrazy poszczególnych składowych wektora indukcji magnetycznej: składowa B_x - rys. 6.6.1 b, składowa B_y - 6.6.2 a, składowa B_z – 6.6.2 b. Wyniki wskazują jednoznacznie, że na obrazie magnetowizyjnym najłatwiej rozpoznać położenie próbki na płaszczyźnie XY dla obrazu wartości wypadkowej indukcji pola magnetycznego \mathbf{B} (rys. 6.6.1 a) oraz składowej \mathbf{B}_z (rys.6.6.2 b), prostopadłej do płaszczyzny pomiarowej.



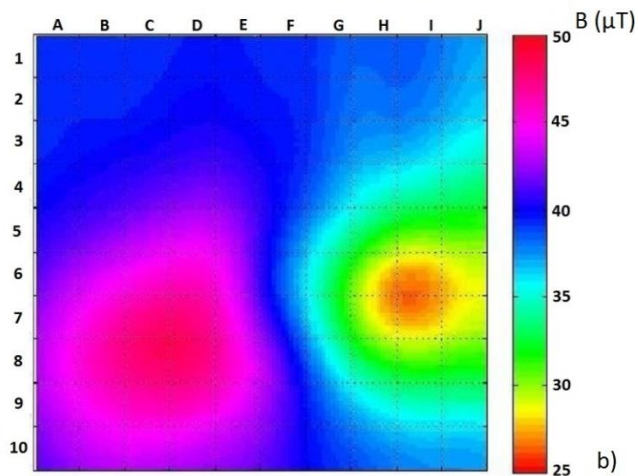
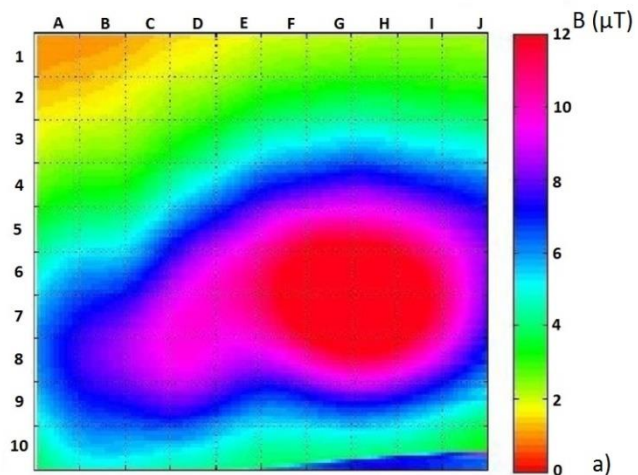
Rys. 6.6.1. Obraz magnetowizyjny rozkładu indukcji magnetycznej, pomiar różnicowy dwu-płaszczyznowy, obiekt nr 6. a) wartość wypadkowa wektora indukcji magnetycznej B , b) składowa B_x



Rys. 6.6.2. Obraz magnetowizyjny rozkładu indukcji magnetycznej, pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy wartości wektora indukcji magnetycznej, obiekt nr 6. a) składowa B_y b) składowa B_z



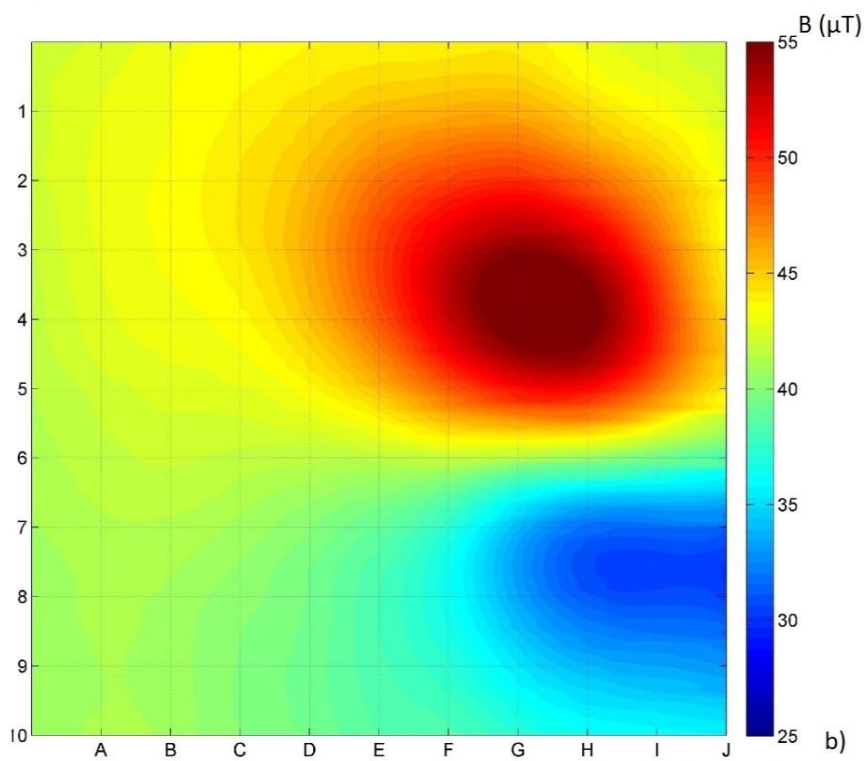
Rys. 6.7. Pomiar położenia obiektu nr 6: a) pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy rozkładu indukcji pola magnetycznego, b) pomiar gradientowy rozkładu indukcji pola magnetycznego, c) zdjęcie rzeczywistego położenia obiektu



Rys. 6.8. Pomiar położenia przedmiotu niebezpiecznego (obiekt nr 8): a) pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy rozkładu indukcji pola magnetycznego, b) pomiar gradientowy rozkładu indukcji pola magnetycznego bez oddzielenia wpływu tła, c) zdjęcie rzeczywistego położenia przedmiotu



a)



b)

Rys. 6.9. Pomiar położenia ukrytego obiektu nr 1. a) zdjęcie rzeczywistego położenia obiektu (czerwony okrąg), b) jednopłaszczyznowy pomiar magnetowizyjny rozkładu indukcji pola magnetycznego bez usuwania wpływu tła

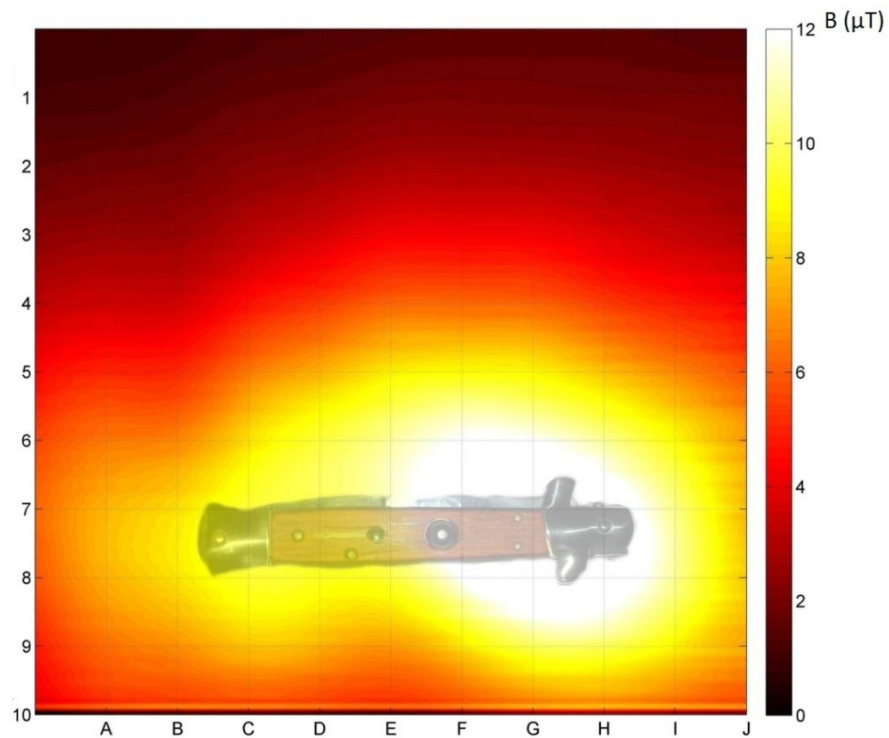
Na rysunku 6.7 przedstawiono porównanie wyników pomiaru przy zastosowaniu metody różnicowej dwu-płaszczyznowej (rys. 6.7 a) i gradientowej (rys. 6.7 b) do ustalenia położenia obiektu nr 6 względem płaszczyzny pomiarowej (odległość pomiaru 50 mm). Położenie rzeczywiste próbki przedstawiono na rysunku 6.7 c. Obie metody pozwalają na znaczne zmniejszenie wpływu tła na wynik pomiaru oraz ustalenie położenia próbki.

Na rysunku 6.8 przedstawiono wyniki zastosowania opracowanej metody pomiarowej. Badaną próbką był obiekt nr 8 – stalowy nóż składany. Odległość pierwszej płaszczyzny pomiarowej od obiektu wynosiła 50 mm. Zastosowano pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy – rys. 6.8 a, oraz pomiar gradientowy bez usuwania wpływu tła – rys. 6.8 b. Zdjęcie rzeczywistego położenia próbki na siatce referencyjnej natomiast przedstawiono na rysunku 6.8 c. Uzyskano odczyty zaburzeń rzędu 12 μT wartości bezwzględnej (rys. 6.8a) oraz $\pm 12 \mu\text{T}$ względem tła dla pomiaru gradientu (rys. 6.8b).

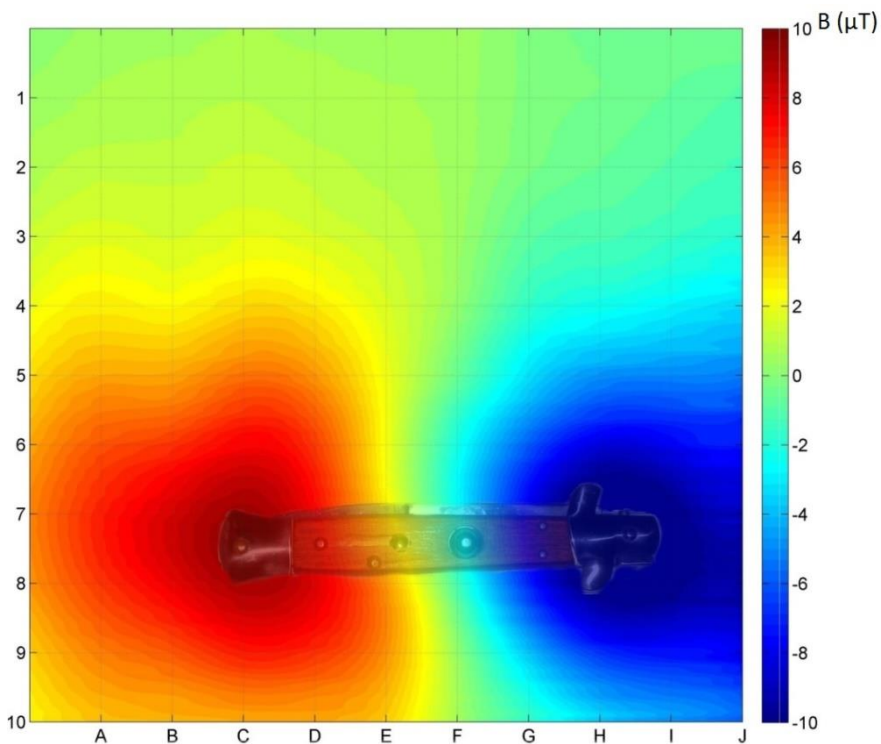
Rysunek 6.9 przedstawia obraz magnetowizyjny obiektu nr 6, umieszczonego w skrzyni wypełnionej ziemią, na głębokości 50 mm. Pomiar został wykonany w płaszczyźnie oddalonej o 50 mm od powierzchni ziemi, co daje łączną odległość od obiektu 100 mm. Zdjęcie rzeczywistego położenia obiektu (czerwony okrąg) przedstawiono na rys. 6.9 a, natomiast uzyskany obraz magnetowizyjny na rys. 6.9 b. Na podstawie otrzymanych wyników można określić położenie i oszacować rozmiar obiektu.

Udoskonalenie stanowiska opisanego w punkcie 5.1 umożliwiło uzyskanie fuzji obrazu magnetowizyjnego z optycznym, tj. zdjęciem płaszczyzny pomiarowej. Zwiększenie stopnia interpolacji dało w efekcie obraz magnetowizyjny w rozdzielczości 1000 x 1000 punktów. Nałożenie obrazu magnetowizyjnego na rzeczywisty wizualizuje powiązanie między obiektem mierzonym i wynikiem pomiaru oraz wskazuje metodę lokalizacji obiektu w zależności od typu pomiaru magnetowizyjnego. W metodzie dwupłaszczyznowej obiekt znajduje się w osi ekstremum zmierzonej indukcji magnetycznej, podczas gdy w metodzie bezpośredniej i gradientowej znajduje się on pomiędzy lokalnym minimum i maksimum wskazań.

Rysunek 6.10 przedstawia fuzję danych – nałożenie obrazu magnetowizyjnego uzyskanego metodą dwupłaszczyznową i zdjęcia położenia obiektu nr 8. Na rysunku 6.11 przedstawiono analogiczny obraz dla metody gradientowej.



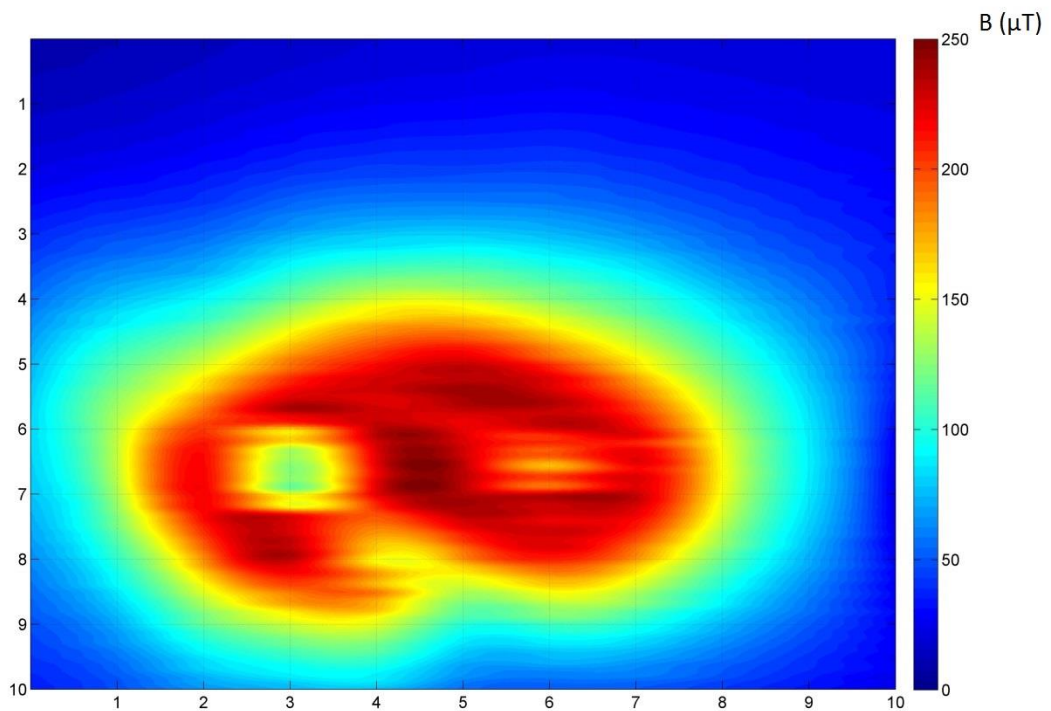
Rys. 6.10. Fuzja obrazu magnetowizyjnego rozkładu indukcji pola magnetycznego obiektu nr 8 i zdjęcia jego rzeczywistego położenia, metoda dwupłaszczyznowa



Rys. 6.11. Fuzja obrazu magnetowizyjnego rozkładu indukcji pola magnetycznego obiektu nr 8 i zdjęcia jego rzeczywistego położenia, metoda gradientowa

6.2 Wpływ ziemskiego pola magnetycznego na wynik pomiaru rozkładu indukcji pola magnetycznego

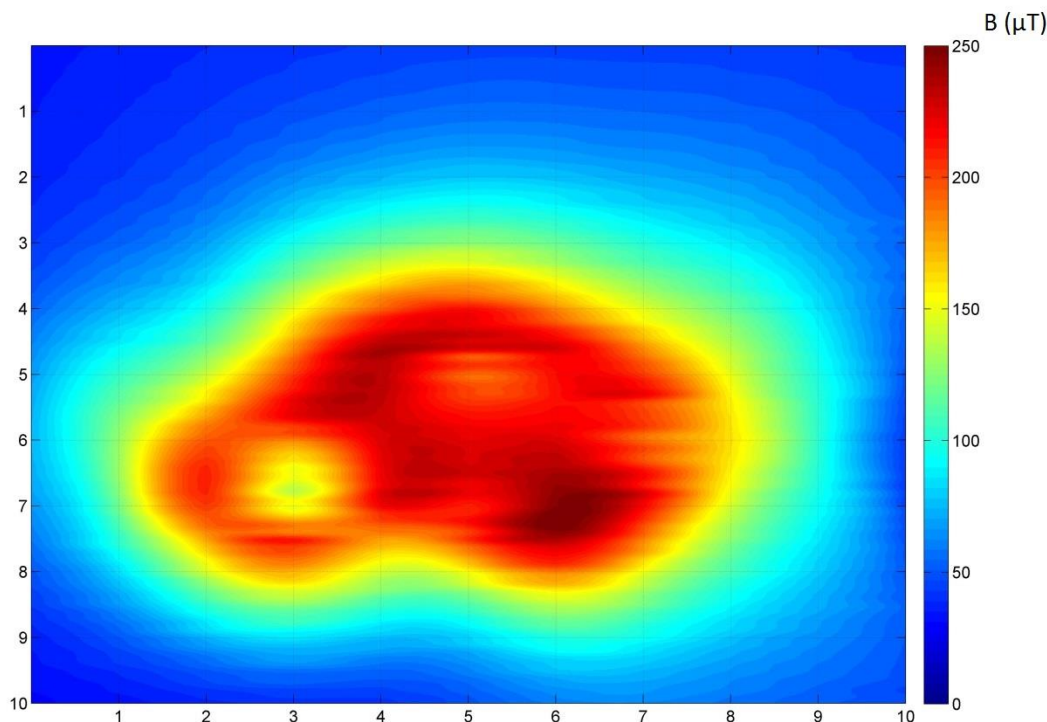
Rozbudowanie stanowiska pomiarowego o trójosiowe cewki Helmholtza, opisane w punkcie 5.2, pozwoliło na kompensację pola ziemskiego podczas pomiarów magnetowizyjnych, oraz zbadanie wpływu słabego pola magnetycznego (o zadanej wartości i kierunku) na uzyskiwane obrazy magnetowizyjne. Obiekt badany (nr 6)– stalowy cylinder o średnicy 70 mm i wysokości 10 mm, został umieszczony w trójosiowych cewkach Helmholtza, w warunkach zewnętrznego pola ziemskiego skompensowanego do poziomu poniżej $0,1 \mu\text{T}$. Pomiar magnetowizyjny został wykonany w płaszczyźnie pomiarowej odległej o 20 mm od próbki. Wyniki pomiaru indukcji magnetycznej, pochodzącej w zdecydowanej części od resztkowej magnetyzacji próbki, zostały przedstawione rysunku 6.12



Rys. 6.12. Pomiar magnetowizyjny rozkładu indukcji pola magnetycznego obiektu nr 6. Odległość 20 mm, wpływ zewnętrznego pola magnetycznego skompensowano do poziomu poniżej $0,1 \mu\text{T}$

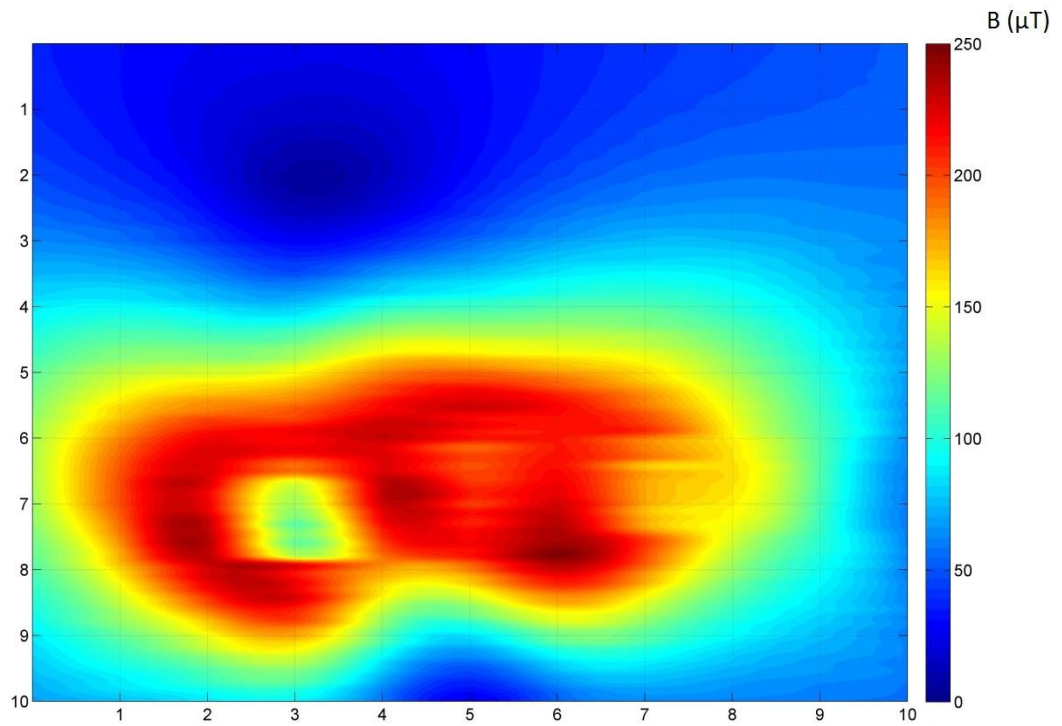
Następnie, z zastosowaniem cewek Helmholtza, zadawano stałe zewnętrzne pole magnetyczne oddziałujące na próbkę, o wartości zbliżonej do pola ziemskiego $B = 40 \mu\text{T}$, w kierunku pionowym Z (rysunek 6.13) i w kierunku poziomym Y (wzdłuż osi ramienia czujnika-

rys. 6.14) układu odniesienia skanera magnetowizyjnego. W celu porównania z wynikami pomiarów z rys. 6.12, stała wartość zadanego zewnętrznego pola została odjęta od wyników pomiaru. W przypadku pola zadanego w osi Z można zaobserwować deformację uzyskanego obrazu, natomiast w przypadku pola w osi Y deformacja jest bardzo wyraźna. Wyniki pomiarów dowodzą znaczącego wpływu zewnętrznego słabego pola magnetycznego i jego kierunku na magnetyzację obiektów ferromagnetycznych, a w tym obiektów o stosunkowo niskiej przenikalności magnetycznej.



Rys. 6.13. Pomiar magnetowizyjny rozkładu indukcji pola magnetycznego obiektu nr 6. Odległość 20 mm, zadane stałe pole magnetyczne $B = 40 \mu\text{T}$ w osi Z (prostopadle do płaszczyzny pomiarowej)

Uzyskane wyniki potwierdzają słuszność przewidywań teoretycznych, a mianowicie obiekty wykonane z materiałów ferromagnetycznych miękkich ulegają namagnesowaniu w polu magnetycznym o wartości zbliżonej do pola magnetycznego Ziemi. Generują przez to lokalną anomalię magnetyczną na mierzalnym poziomie indukcji.



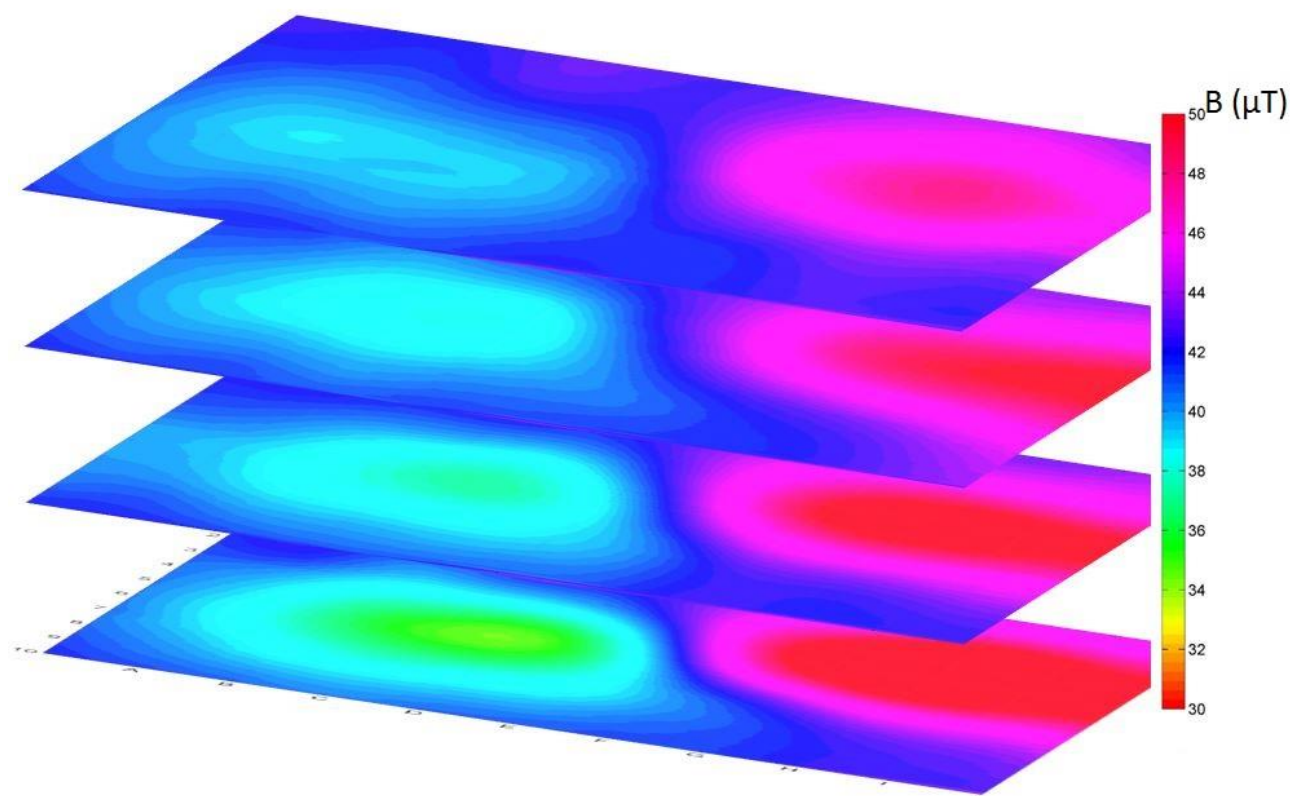
Rys. 6.14. Pomiar magnetowizyjny rozkładu indukcji pola magnetycznego obiektu nr 6. Odległość 20 mm, zadane stałe pole magnetyczne $B = 40 \mu\text{T}$ w osi Y (na rysunku – oś pionowa)

6.3 Trójwymiarowe rozkłady indukcji pola magnetycznego

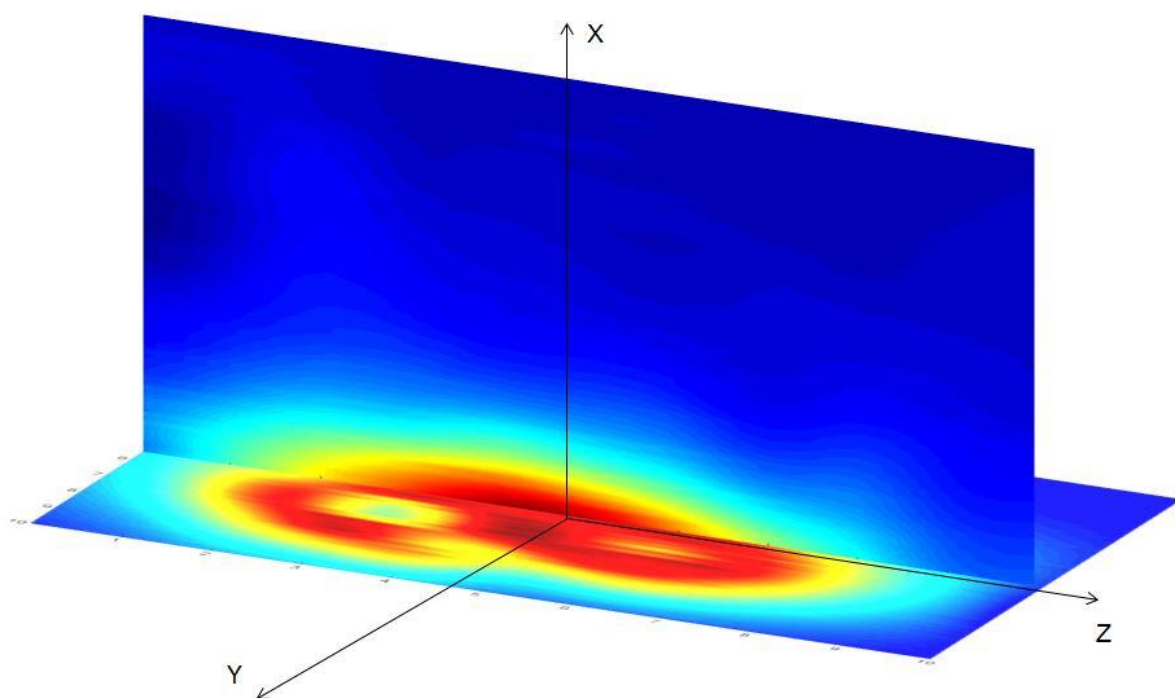
Badanie trójwymiarowego rozkładu indukcji pola magnetycznego w przestrzeni nad obiektem badanym, przy użyciu skanera magnetowizyjnego opisanego w punkcie 5.1, jest możliwe:

- Poprzez inkrementalne zwiększenie odległości płaszczyzny pomiarowej od obiektu mierzonego. Przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 6.15. Obiekt nr 6, odległości zwiększane co 10 mm.

- Poprzez wykonanie pomiaru magnetowizyjnego w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych. Na rysunku 6.16 przedstawiono przykładowe wyniki pomiaru nad obiektem nr 6. Po wykonaniu skanu w płaszczyźnie poziomej, przeprowadzono skanowanie rozkładu pola magnetycznego w płaszczyźnie pionowej, w osi obiektu badanego.



Rys. 6.15. Trójwymiarowy pomiar magnetowizyjny rozkładu indukcji pola magnetycznego obiektu nr 6. Odległość 20 mm, zwiększana o 10 mm w kolejnych płaszczyznach pomiarowych



Rys. 6.16. Trójwymiarowy pomiar magnetowizyjny rozkładu indukcji pola magnetycznego obiektu nr 6. Odległość płaszczyzny poziomej - 20 mm, pomiar w płaszczyźnie pionowej wykonany w osi obiektu badanego

W ogólnym przypadku najbardziej dogodny do przeprowadzenia jest pomiar wielopłaszczyznowy. Natomiast pomiar prostopadły, wykonany w osi obiektu, zawiera dodatkowe informacje pozwalające wnioskować o momencie magnetycznym i odległości od badanego obiektu.

6.4 Wyniki pomiarów momentu magnetycznego wybranych obiektów

W celu precyzyjnego wyznaczenia wartości momentu magnetycznego obiektów badanych w pracy, zastosowano metodę i stanowisko opisane w punkcie 5.3. Obiekty badane umieszczano na stoliku obrotowym wewnątrz cewek Helmholtza, a następnie obracano o 180°. W ten sposób uzyskiwano odczyt na strumieniomierzu odpowiadający podwójnej wartości dipolowego momentu magnetycznego d , który następnie przeliczono na wartość momentu magnetycznego m . Dzięki precyzyjnemu projektowi i wykonaniu cewek, kalibracja przy użyciu wzorców momentu magnetycznego wykazała, że wskazania zawierają się w teoretycznych granicach niepewności pomiaru stanowiska.

Tabela 6.1. – Wyniki pomiarów laboratoryjnych momentu magnetycznego próbek

Obiekt badany		Podwojona wartość dipolowego momentu magnetycznego $2 \cdot d$ (mWbcm)	Wartość dipolowego momentu magne- tycznego d (mWbcm)	Wartość momentu magnetycznego m (Am ²)
Nr	Nazwa			
1	Wzorzec ME8	0,152	0,076	0,605
2	Wzorzec ME7	0,017	0,009	0,068
3	Magnes ferrytowy walec Ø8x10mm	0,038	0,019	0,151
4	Magnes alnico walec Ø10x10mm	0,034	0,017	0,135
5	Magnes neodymowy kulka Ø15mm	0,428	0,214	1,704
9	Granat F1 - korpus	0,056	0,028	0,223
10	Granat F1 – korpus, zapalnik, łyżka	0,080	0,040	0,318

Niepewność pomiaru, przy odpowiedniej liczbie powtórzeń, wynikała wyłącznie z rozdzielczości strumieniomierza i wynosiła odpowiednio 0,001 mWbcm dla pomiaru momentu d oraz 0,008 Am² dla pomiaru momentu m .

Ze względu na zastosowaną metodę pomiaru zbadano w ten sposób wyłącznie obiekty o stałym momencie magnetycznym, tj. niezależnym od kierunku pola ziemskiego.

Na podstawie wyników badań stwierdzono wyraźnie wyższe wartości momentu dla obiektu nr 10 (korpusu granatu F1 z założonym zapalnikiem i łyżką), w porównaniu z samym korpusem (obiektem nr 9), pomimo że momenty magnetyczne zapalnika i łyżki zmierzone niezależnie były mniejsze od rozdzielczości wskazań stanowiska ($< 0,001$ mWbcm). Spowodowane jest to, prawdopodobnie, namagnesowaniem miękkiej stali zapalnika przez szczątkową magnetyzację korpusu.

7. Modelowanie rozkładu indukcji pola magnetycznego wokół obiektów magnetycznych

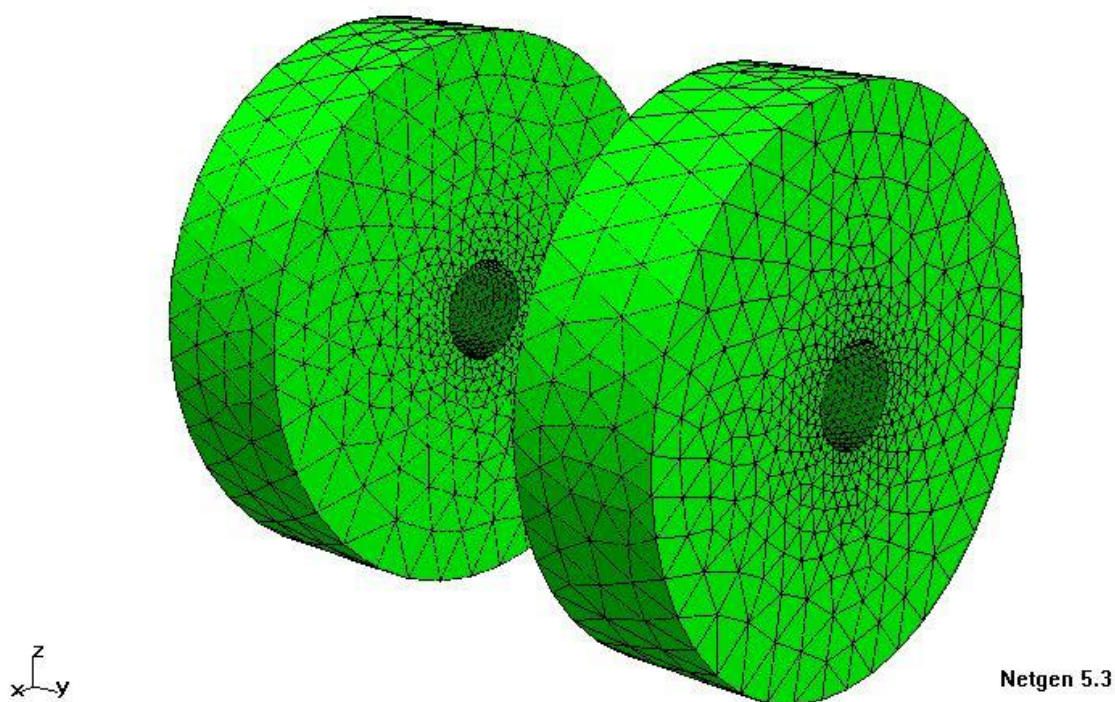
Równania opisujące rozkład pola magnetycznego nie zawsze umożliwiają jego prostą analizę. W bardziej skomplikowanych przypadkach, obliczenia należy przeprowadzać wykorzystując Metodę Elementów Skończonych (MES lub ang. FEM). Dyskretyzacja równań różniczkowych, opisujących ciągłe zjawiska fizyczne, umożliwia wyznaczenie skończonej liczby punktów, wykorzystywanych w symulacji komputerowej. Analizowany obszar dzielony jest na mniejsze fragmenty zawierające informacje o sąsiednich fragmentach i wspólnych węzłach tzw. siatki. Wewnątrz danych obszarów poszukiwane rozwiązanie równań różniczkowych przybliżane jest przy użyciu pewnych funkcji, które można określić na podstawie wartości węzłów ograniczających obszar. Niniejszy rozdział opisuje rezultaty walidacji metody magnetostaticznego modelowania MES na przykładzie rozkładu indukcji pola magnetycznego generowanego przez ferrytowe magnesy trwałe. Wyniki modelowania porównane są z wynikami pomiarów w celu sprawdzenia poprawności modelowania. Zgodność wyników uzyskanych z modelowania i pomiarów wskazuje na zasadność korzystania z przedstawionej metody modelowania MES przy modelowaniu magnetostaticznym pod kątem opracowania metody analizy pomiarów magnetowizyjnych.

7.1. Metodyka modelowania

Podstawą omawianej metody modelowania rozkładu pola magnetycznego [98] jest Metoda Elementów Skończonych (MES), a w szczególności dwa programy, dostępne na licencji open-source. Pierwszy program - Netgen 5.3 służy do dyskretyzacji ciągłej geometrii na małe subdomeny (tzw. siatkę). Siatka ta jest wczytywana do programu Elmer FEM, który rozwiązuje dany problem z wykorzystaniem MES.

Proces modelowania rozpoczyna się od stworzenia pliku tekstowego z rozszerzeniem .geo, w którym znajduje się opis ciągłej geometrii analizowanego systemu. Plik ten określa dane wejściowe dla programu Netgen, który na jego podstawie generuje odpowiednią siatkę.

Po wczytaniu do programu pliku z opisem geometrii układu następuje dyskretyzacja obiektu. Program Netgen wykorzystuje w tym celu algorytm Delaunay'a [99].



Rys. 7.1. Model układu dwóch magnesów z zaznaczoną siatką, widoczny w oknie aplikacji Netgen 5.3 [100]

Algorytm bazuje na podziale geometrii bryły na czworościany, które muszą spełniać określone warunki, a mianowicie okrąg opisany na każdym z trójkątów tworzonych przez węzły nie może zawierać innych węzłów. Na tę operację składają się dwa działania: triangulacja elementów na powierzchni każdego z modelowanych obiektów i generacja wewnętrznych węzłów siatki. Początkowo generowana jest prosta siatka. Następnie jest ona zagęszczana

przez program poprzez dodawanie kolejnych węzłów powierzchniowych. Po dodaniu każdego z węzłów następuje lokalna rekonstrukcja siatki, w celu spełnienia warunków algorytmu.

Generacja wewnętrznych węzłów poprawia jakość siatki. Program odnajduje trójkąty, które nie spełniają warunków masy, równobocznosci lub rozmiaru i umieszcza dodatkowe węzły wewnątrz trójkąta lub w jego bliskim sąsiedztwie. Następnie przeprowadza rekonstrukcję siatki w sposób analogiczny jak dla węzłów powierzchniowych. Zauważalna zmiana rozmiaru elementów pokazuje, że gęstość siatki rośnie odwrotnie proporcjonalnie do promienia krzywizny obiektu, co można zaobserwować na przykładowym rysunku 7.1.

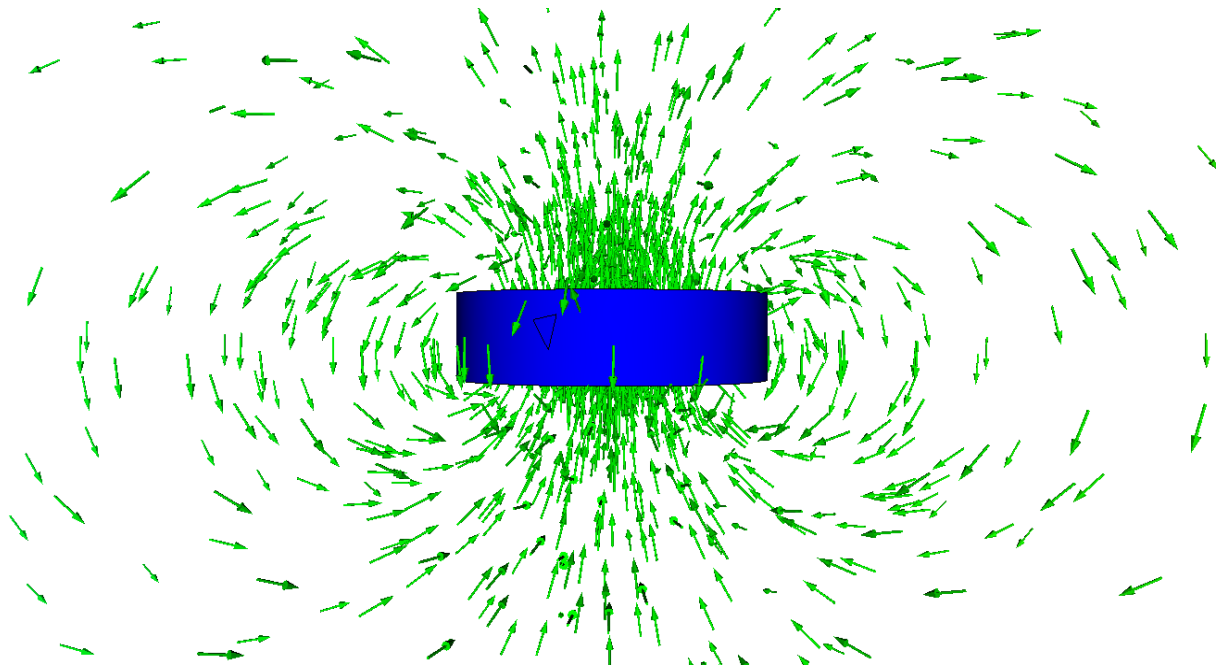
Zauważana nieciągłość rozkładu pola magnetycznego wynika ze skończonych wymiarów pojedynczego elementu w siatce. Należy podkreślić, że symulacje prowadzono dla największej domyślnej precyzji, co wydaje się być wystarczająco dokładnym odtworzeniem geometrii. Dalsze zwiększanie precyzji nie poprawiało jakości uzyskanych obrazów rozkładu pola magnetycznego, a jedynie zwiększało czas niezbędny na przeprowadzenie obliczeń, lub uniemożliwiało obliczenia ze względu na zbyt duże obciążenie pamięci RAM komputera. Uzyskaną siatkę elementów skończonych eksportowano następnie do pliku w formacie .gms, standardowym dla programu Netgen.

Otrzymany plik należy przekonwertować do formatu akceptowanego przez program ElmerFEM. Konwersję przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania ElmerGrid. W wyniku konwersji pliku uzyskuje się cztery pliki mesh.header (nagłówek), mesh.elements (elementy), mesh.nodes (węzły) i mesh.boundary (powierzchnie). Do obliczenia rozkładu pola magnetycznego program Elmer FEM wymaga dwóch dodatkowych plików, w których określa się parametry symulacji, takie jak parametry fizyczne modelowanych obiektów, np. magnetyzacja, przenikalność magnetyczna, przewodność cieplna i elektryczna itp.

Modelowanie opiera się na analizie trójwymiarowej geometrii z wykorzystaniem elementów skończonych. W celu obliczenia rozkładu pola magnetycznego, Elmer FEM wykorzystuje magnetostatyczne równania Maxwella, opisane w rozdziale 3. Są to najbardziej podstawowe równania opisujące zależności pomiędzy polem elektrycznym i magnetycznym, a także właściwości samego pola magnetycznego.

Po zadaniu odpowiednich warunków brzegowych i przeprowadzeniu transformacji numerycznych oprogramowanie wykorzystuje elementy krawędziowe Whitneya [101]. Umożliwiają one obliczenie składowych skalarnych i wektorowych potencjału magnetycznego, które jednoznacznie opisują pole magnetyczne [102].

Modelowanie rozkładu pola magnetycznego przeprowadzono w przestrzeni trójwymiarowej, co przedstawiono na rysunku 7.2. W dalszej części przedstawiono jedynie analizę składowej pola zgodnej z osią modelowanego magnesu. W przypadku pojedynczego magnesu jest to oś Z, natomiast dla układu dwóch magnesów przedstawiono analizę rozkładu pola wzdłuż osi Y. Przyjęcie takiego uproszczenia wynika z ograniczonych możliwości sond pomiarowych wykorzystywanych do walidacji obliczeń.

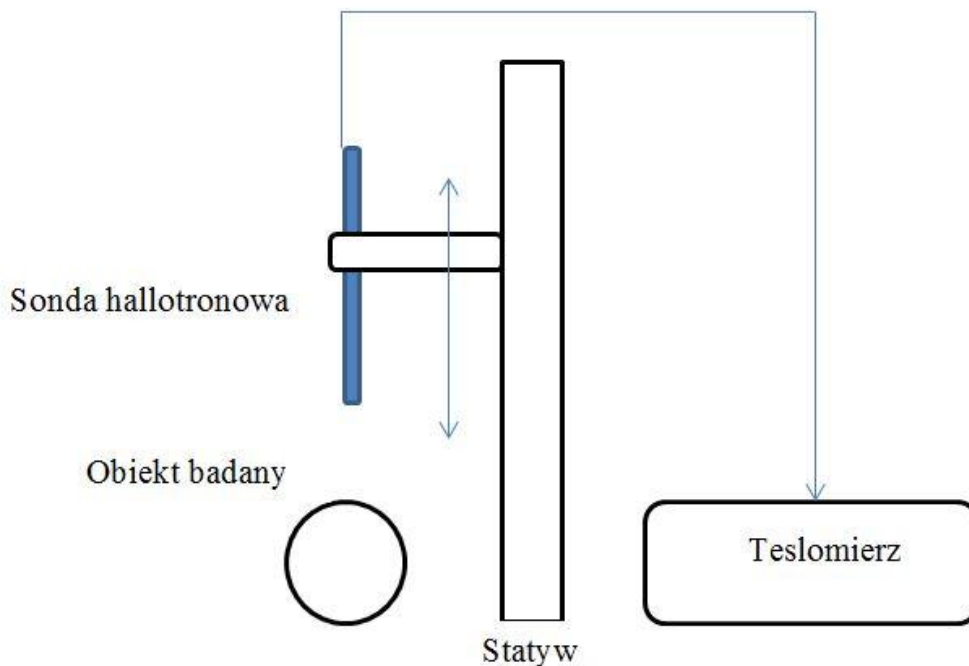


Rys.7.2. Wizualizacja kierunków wektorów indukcji magnetycznej dla zamodelowanego magnesu pierścieniowego. W celu lepszego zobrazowania kierunków wektorów ich długość nie jest proporcjonalna do ich wartości

7.2. Eksperymentalna walidacja obliczeń z wykorzystaniem programu Elmer FEM

Walidację poprawności teoretycznego modelowania pola za pomocą oprogramowania Elmer FEM, przeprowadzono na stanowisku pomiarowym składającym się z Gaussometru 455 DSP firmy LakeShore i statywu z podziałką milimetrową (rysunek 7.3). Zastosowano dwa rodzaje sond hallotronowych:

- sonda mierząca pole wzdłuż kierunku przesunięcia,
- sonda mierząca pole w osi prostopadłej do kierunku przesunięcia.



Rys. 7.3. Schemat stanowiska do precyzyjnego pomiaru rozkładu indukcji magnetycznej w osi pionowej Z

Zbadano magnesy trwałe, przy polach magnetycznych w zakresie 10^3 razy większych od pola ziemskiego i 10^5 razy większych od zaburzeń pola ziemskiego w obszarze pomiarowym. Pozwoliło to na zasymulowanie uproszczonego układu przyjętego w symulacjach FEM, tj. jednorodnego obiektu magnetycznego umieszczonego w jednorodnym zewnętrznym polu magnetycznym. Umożliwiło to również bezpośrednie ilościowe porównanie wyników pomiarów w odniesieniu do obiektu rzeczywistego z analogicznym układem symulowanym. Na podstawie porównania wprowadzono odpowiednie poprawki w symulacjach.

Do testów walidacyjnych użyto dwóch ferrytowych magnesów pierścieniowych z materiału magnetycznie twardego oznaczonego F30. Wymiary magnesów: średnica wewnętrzna 10 mm, zewnętrzna 55 mm, grubość 15 mm. Właściwości magnetyczne materiału F30:

- indukcja remanencji $B_r = \text{min } 0,37 \text{ T}$
- pole koercji $H_{cB} = \text{min. } 175 \text{ kA/m}$
- pole koercji $H_{cJ} = \text{min. } 180 \text{ kA/m}$
- gęstość energii magnetycznej $(BH)_{\text{max}} = 26 \text{ kJ/m}^3$

Fizyczne właściwości materiału F30:

- gęstość $\rho = 4,5 \text{ g/cm}^3$
- rezystywność $\delta = 104 - 108 \text{ } \Omega\text{cm}$

Względna przenikalność magnetyczna materiałów magnetycznie twardych zawiera się pomiędzy 1,1 a 1,3. Dla materiału F30 wynosi ona $\mu_r \approx 1,2$ i ma znikomy wpływ na wynik obliczeń.

Dla wstępnego oszacowania magnetyzacji materiału (jest to wartość niezbędna do obliczeń) wykorzystano następującą zależność:

$$B = \mu_0(M + H) \quad (7.1)$$

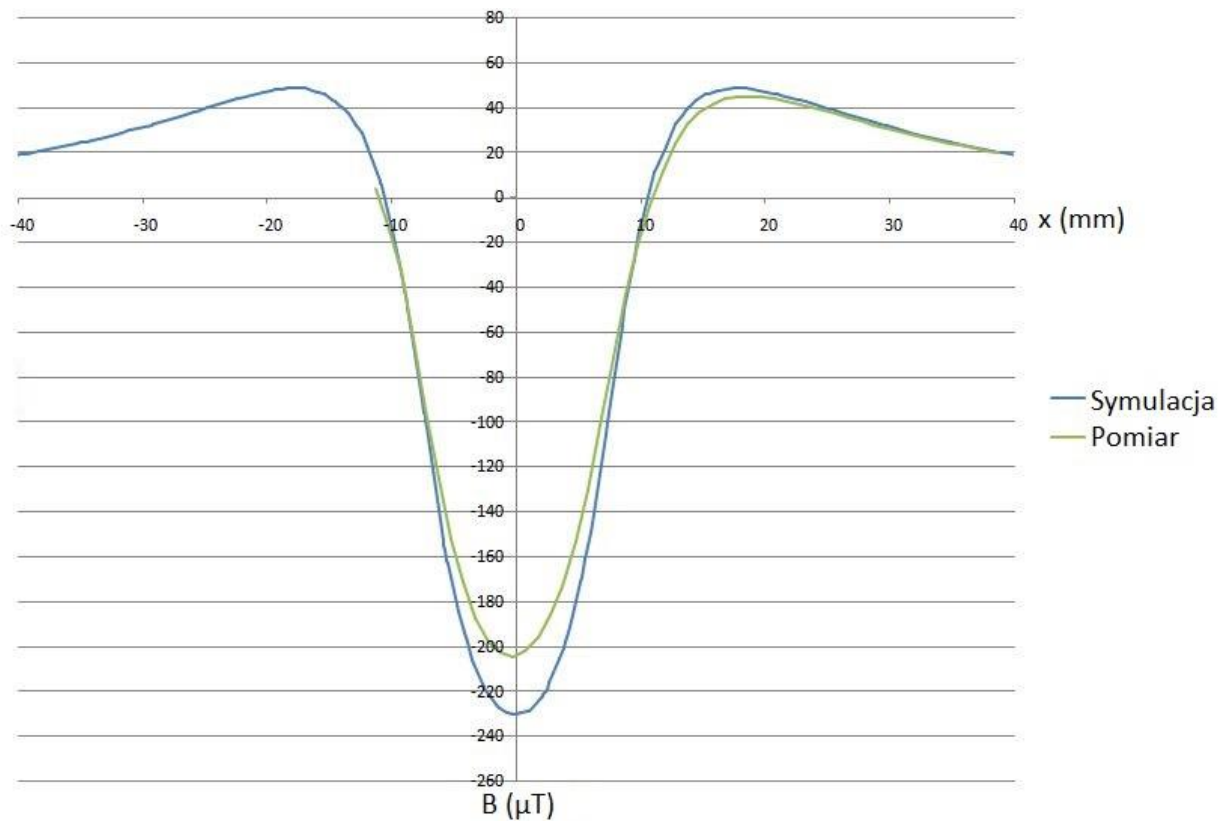
Przy natężeniu pola zewnętrznego $H = 0$

$$B \approx B_r = \mu_0 M \quad (7.2)$$

$$M = \frac{B_r}{\mu_0} = \frac{0,37 \text{ T}}{4 * \pi * 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}} = 294437 \frac{\text{A}}{\text{m}} \approx 300000 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (7.3)$$

Jest to wartość teoretyczna, którą należało sprawdzić eksperymentalnie. Eksperyment zrealizowano na stanowisku opisanym w rozdziale 6.4.

Na rysunku 7.4 przedstawiono zależność wartości indukcji B pola magnetycznego wzdłuż osi Z magnesu, jako wynik modelowania w programie Elmer FEM, przy magnetyzacji o wartości 300 000 A/m, oraz odpowiadające im wyniki pomiarów obiektu rzeczywistego.



Rys.7.4. Zależność indukcji B pola magnetycznego wzdłuż osi Z magnesu, według modelowania w programie Elmer FEM oraz odpowiadające im wyniki pomiarów indukcji B w odniesieniu do obiektu rzeczywistego [101]

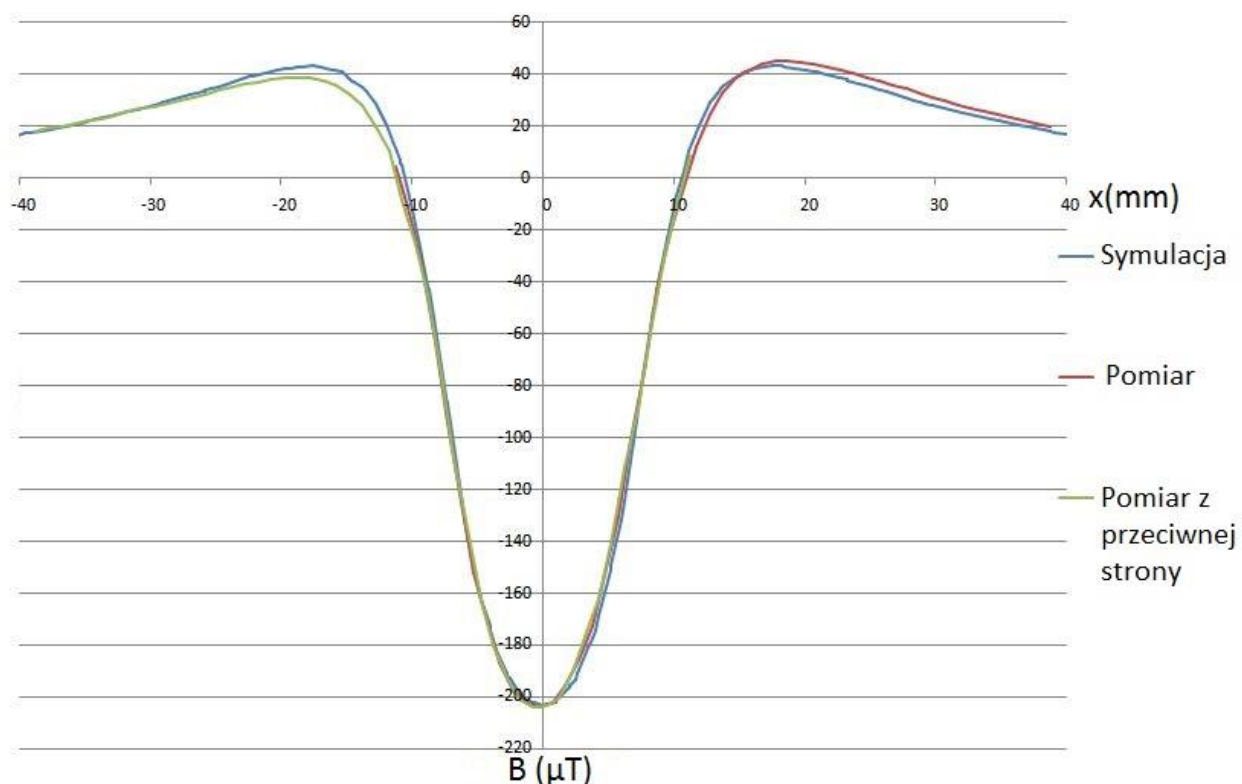
Okazało się, że założona wartość magnetyzacji była zbyt wysoka. Dla określenia prawidłowej wartości wykorzystano proporcjonalną zależność między wynikami modelowania a eksperymentem. I tak, dla punktu zerowego osi magnesu:

$$\frac{230 \text{ mT}}{300000 \frac{\text{A}}{\text{m}}} = \frac{203 \text{ mT}}{M} \quad (5.9)$$

$$M \approx 265000 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (5.10)$$

Należy podkreślić, że różnica ta wynika głównie z wpływu pola odmagnesowania, a więc wpływu kształtu magnesu.

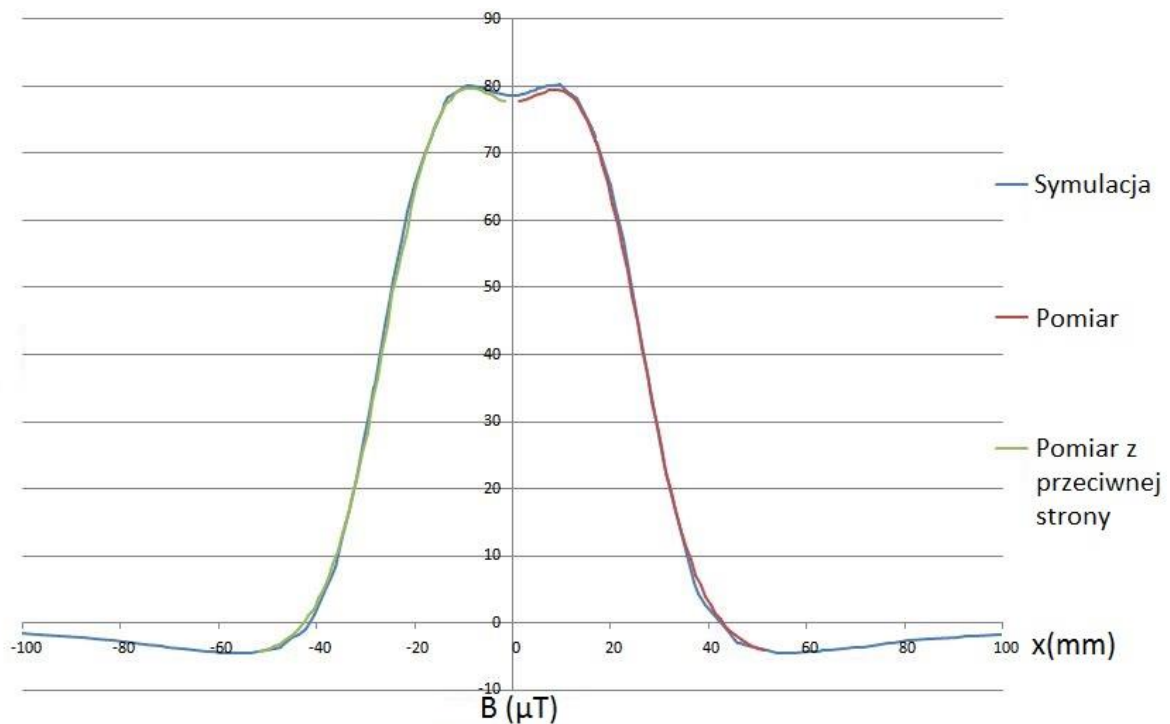
Wyniki modelowania dla poprawionej wartości magnetyzacji oraz odpowiadające im wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 7.5. W tym przypadku modelowanie wykazało zgodność z wynikami pomiarów.



Rys.7.5. Zależność indukcji B pola magnetycznego wzdłuż osi magnesu, dla modelowania w programie Elmer FEM oraz odpowiadające im wyniki pomiarów w odniesieniu do obiektu rzeczywistego. Przyjęta, skorygowana wartość magnetyzacji $M = 265000$ A/m

W celu faktycznej walidacji poprawności symulacji magnetostatycznych, przeprowadzono stosowne obliczenia i pomiary dla bardziej skomplikowanego układu – dwóch magnesów pierścieniowych, umieszczonych współosiowo. Porównano zmierzone wartości indukcji B pola magnetycznego i wyniki symulacji, dla osi prostopadłej do osi Z magnesów, przebiegającej przez środek układu. Wyniki przedstawiono na rysunku 7.6.

Podsumowując, modelowanie magnetostatyczne w programie Elmer FEM jest możliwe w odniesieniu do układów o stopniu komplikacji poważnie utrudniającym (lub wręcz uniemożliwiającym) obliczenia analityczne. W przypadku układu wielu obiektów konieczna jest dokładna znajomość ich parametrów, lub przeprowadzenie symulacji i pomiarów dla pojedynczych elementów układu, i wyznaczenie szukanych wielkości.



Rys.7.6. Wartości indukcji B pola magnetycznego w osi prostopadłej do osi symetrii układu dwóch magnesów pierścieniowych. Wyniki modelowania w programie Elmer FEM, oraz odpowiadające im wyniki pomiarów obiektu rzeczywistego. Przyjęta, skorygowana wartość magnetyzacji $M = 265000 \text{ A/m}$

7.4 Oszacowanie niepewności pomiarów

Przed przystąpieniem do pomiarów rozkładu pola magnetycznego magnesu pierścieniowego, w celu usunięcia niepewności spowodowanej warunkami otoczenia, przeprowadzono pomiar pola tła. Wraz z obniżaniem sondy pomiarowej w osi Z zaobserwowano stopniowy wzrost mierzonej wartości indukcji pola magnetycznego. Wynika to z dryftu wskazań hallotronu, interakcji z wykorzystywanym urządzeniem, a także zakłóceń w laboratorium. W najniższej pozycji sondy wartość zmierzonej indukcji pola wynosiła od 40 do 50 μT . Jest to wartość znacząco mniejsza od indukcji pola magnesu i jej wpływ na wyniki pomiaru może być pominięty.

Bardziej znaczący jest wpływ błędu pozycjonowania sondy względem położenia magnesów. W wyniku analizy niepewności pozycjonowania magnesu i sondy w kierunku poziomym oszacowano, że maksymalna różnica wskazań nie przekracza 50 μT .

Kolejnym elementem składowym niepewności była niepewność przemieszczania pionowego sondy. Jej wpływ na wskazanie wzrastał odwrotnie proporcjonalnie do sześciątku odległości i wynosił maksymalnie 900 μT .

Ostatnią składową budżetu niepewności jest ograniczona dokładność sondy pomiarowej i teslomierza. Całkowita niepewność tych urządzeń wynosi $10 \mu\text{T}$.

Całkowita niepewność przeprowadzonych pomiarów jest wystarczająca do określenia procedury pomiarowej jako precyzyjnej. Potwierdza to także wysoka zgodność wyników zarówno symulacyjnego jak i eksperymentalnego określania wartości pola magnetycznego.

7.5 Podsumowanie

Wyniki pomiarów wykazują zgodność z modelem uzyskanym w wyniku symulacji MES. Potwierdza to poprawność przyjętej metody obliczeń. Podczas modelowania skomplikowanych układów magnetostatycznych, poszczególne elementy należy jednak zarówno modelować, jak i eksperymentalnie określać ich parametry. Jest to niezbędne do uzyskania potwierdzenia poprawności założonych parametrów symulacji. Takie podejście zapewnia poprawność modelowanego trójwymiarowego rozkładu pola magnetycznego. Szczególnie godnym polecenia jest oprogramowanie Elmer FEM, które umożliwia przeprowadzenie symulacji różnych zjawisk z wykorzystaniem MES, a w tym zjawisk magnetostatycznych i magnetodynamicznych. Poza tym oprogramowanie to umożliwia modelowanie przepływów cieczy, rozkładów naprężeń w materiałach, przepływu ciepła (walidację tych obliczeń przedstawiono w [104]) i wielu innych zjawisk fizycznych [105]. Dodatkowo pozwala na opracowanie modułów obliczeniowych na bazie własnych układów równań. Wszystkie omówione powyżej programy są ogólnie dostępne na licencji open-source.

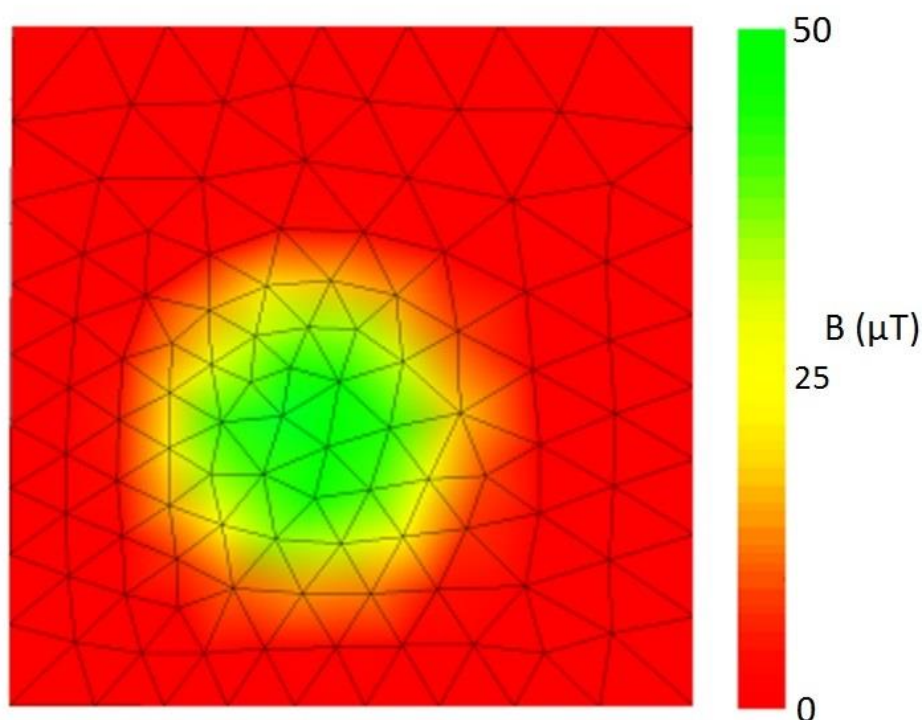
Omówioną metodę modelowania zastosowano do uzyskania symulowanych wyników pomiarów magnetowizyjnych. Wyniki te posłużyły w szczególności do opracowania metod pomiaru odległości i momentu magnetycznego opisanych następnie w punktach 8.3 i 8.4.

8. Nowa metoda lokalizacji obiektów z wykorzystaniem pomiarów magnetowizyjnych

Uzyskane wyniki wskazują na możliwość wykorzystania opracowanej metodyki pomiarów magnetowizyjnych do detekcji i lokalizacji obiektów ferromagnetycznych. Jest to szczególnie istotne ze względu na opisany w rozdziale 3.2 ograniczony zasięg i rozdzielczość aktywnych wykrywaczy metalu. Drugim ważnym czynnikiem jest pasywny charakter wykonywanych pomiarów, co znacząco wpływa na bezpieczeństwo operatora.

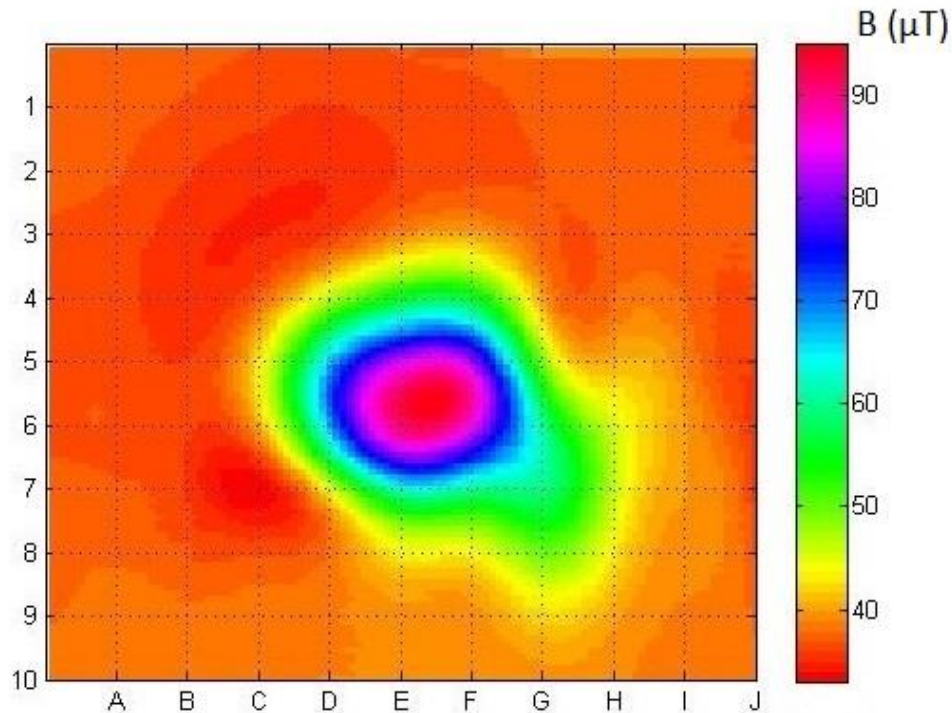
8.1. Metoda określania położenia obiektu ferromagnetycznego

Efektom opracowanej metody jest uzyskanie obrazu rozkładu wartości indukcji pola magnetycznego w płaszczyźnie pomiarowej, a więc i obrazu lokalnych minimów i maksimów anomalii magnetycznych, wywołanych przez obiekty ferromagnetyczne. W najprostszym możliwym przypadku, tj. w odniesieniu do dipola magnetycznego o osi prostopadłej do płaszczyzny pomiarowej, uzyskany obraz pojedynczego symetrycznego ekstremum podano na rysunku 8.1.



Rys. 8.1. Obraz rozkładu indukcji pola magnetycznego dla dipola magnetycznego o osi głównej skierowanej prostopadle do płaszczyzny pomiarowej uzyskany z symulacji MES [103]

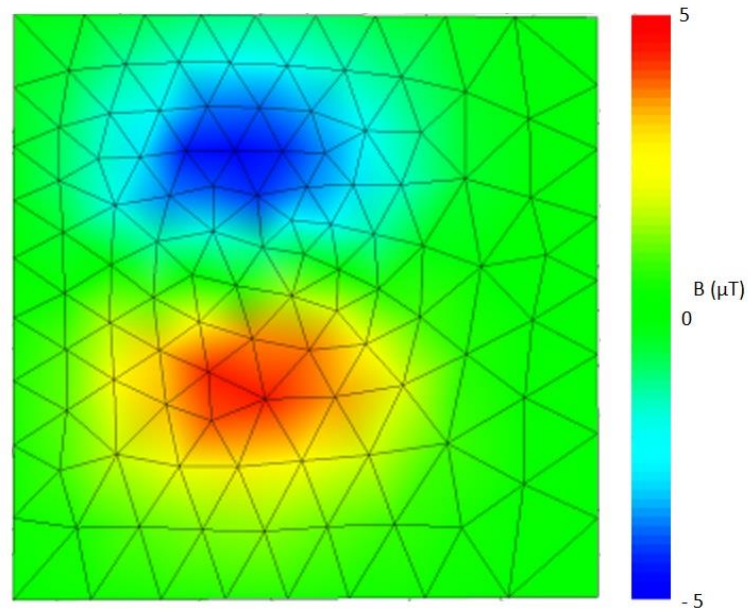
Na rysunku 8.2 przedstawiono analogiczny rozkład, ale dla obiektu rzeczywistego nr 7 – stalowego walca o średnicy 40mm, w odległości 50mm od płaszczyzny pomiarowej. Widoczne niejednorodności rozkładu pola, wywołane niejednorodnością magnetyzacji próbki, nie wpływają znacząco na możliwość jej lokalizacji.



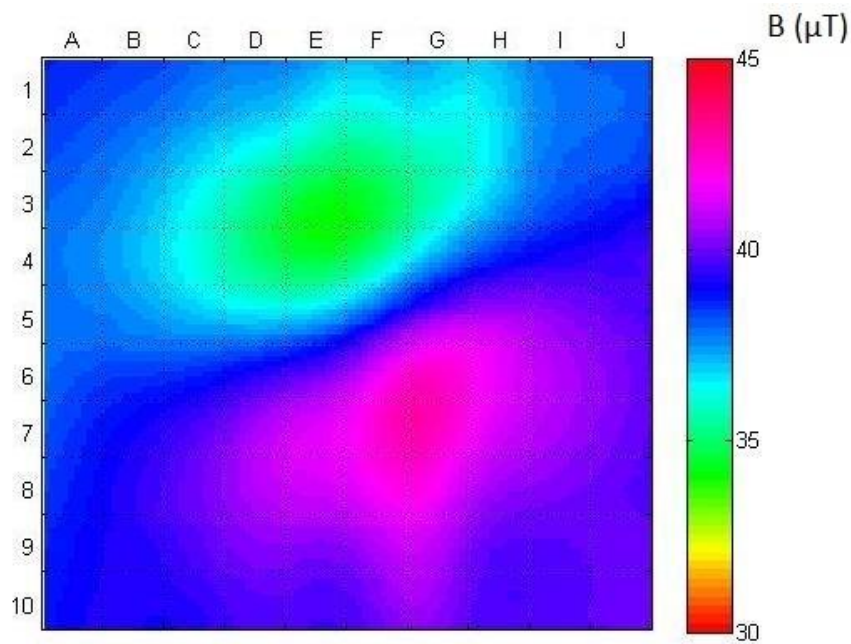
Rys. 8.2. Obraz magnetowizyjny rozkładu indukcji pola magnetycznego walcowej próbki stalowej o osi głównej skierowanej prostopadle do płaszczyzny pomiarowej

Oś obiektu, a więc jego współrzędne XY względem płaszczyzny pomiarowej znajdują się wówczas w środku obserwowanej anomalii. Lokalizację można więc zautomatyzować poprzez wyszukanie lokalnych ekstremów na uzyskanym obrazie.

W bardziej uogólnionym przypadku, tj. w odniesieniu do dipola magnetycznego o osi nachylonej pod kątem φ do płaszczyzny pomiarowej, uzyskany zostanie obraz dwóch niesymetrycznych ekstremów – maksimum i minimum. Obiekt znajduje się wówczas pomiędzy tymi ekstremami. Wyznaczenie jego przybliżonego położenia XY następuje wówczas poprzez wyznaczenie punktu w połowie odcinka pomiędzy lokalnymi minimum i maksimum co pokazano na rysunkach 8.3 i 8.4.

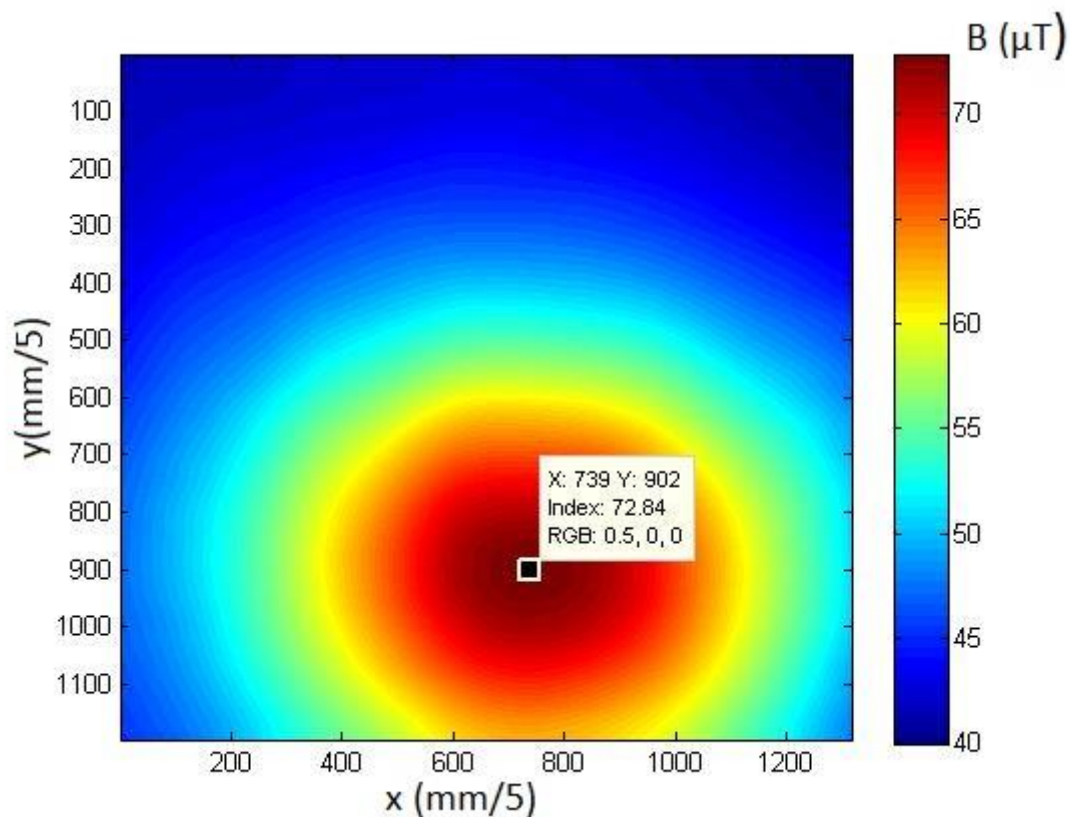


Rys. 8.3. Symulowany obraz rozkładu indukcji pola magnetycznego dipola magnetycznego o osi głównej skierowanej pod kątem $\varphi = 90^\circ$ do płaszczyzny pomiarowej. Widoczne lokalne minimum i maksimum wartości bezwzględnej indukcji magnetycznej B [103]



Rys. 8.4. Pomiar magnetowizyjny rozkładu indukcji pola magnetycznego próbki nr 7, walca stalowego o osi głównej skierowanej pod kątem $\varphi = 90^\circ$ do płaszczyzny pomiarowej. Widoczne lokalne minimum i maksimum wartości bezwzględnej indukcji magnetycznej B

W celu sprawdzenia powtarzalności lokalizacji ukrytego obiektu ferromagnetycznego, przeprowadzono serię pomiarów magnetowizyjnych w płaszczyźnie na wysokości 160 mm nad wzorcem momentu magnetycznego ME8 (obiekt nr 1), umieszczonym względem płaszczyzny pomiarowej pod kątami $\varphi = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$.



Rys. 8.5. Obraz magnetowizyjny rozkładu indukcji pola magnetycznego wzorca ME8 o osi głównej skierowanej pod kątem $\varphi = 0^\circ$ do płaszczyzny pomiarowej. Widoczne oznaczone współrzędne maksimum anomalii

Na rysunku 8.5 przedstawiono przykładowy pomiar magnetowizyjny dla wzorca momentu magnetycznego ME8 umieszczonego w pierwszej z serii pozycji. Wzorzec był umieszczany w punktach przedstawionych na rysunku 8.6. Zaznaczono na nim również wyznaczone współrzędne obiektu. Należy podkreślić, że mimo błędu wyznaczenia koordynat x,y, znajdują się one nadal w obrębie szukanego obiektu.

W tabeli 8.1 przedstawiono wyniki pomiarów lokalizacji obiektu poprzez wyszukanie maksimum anomalii.

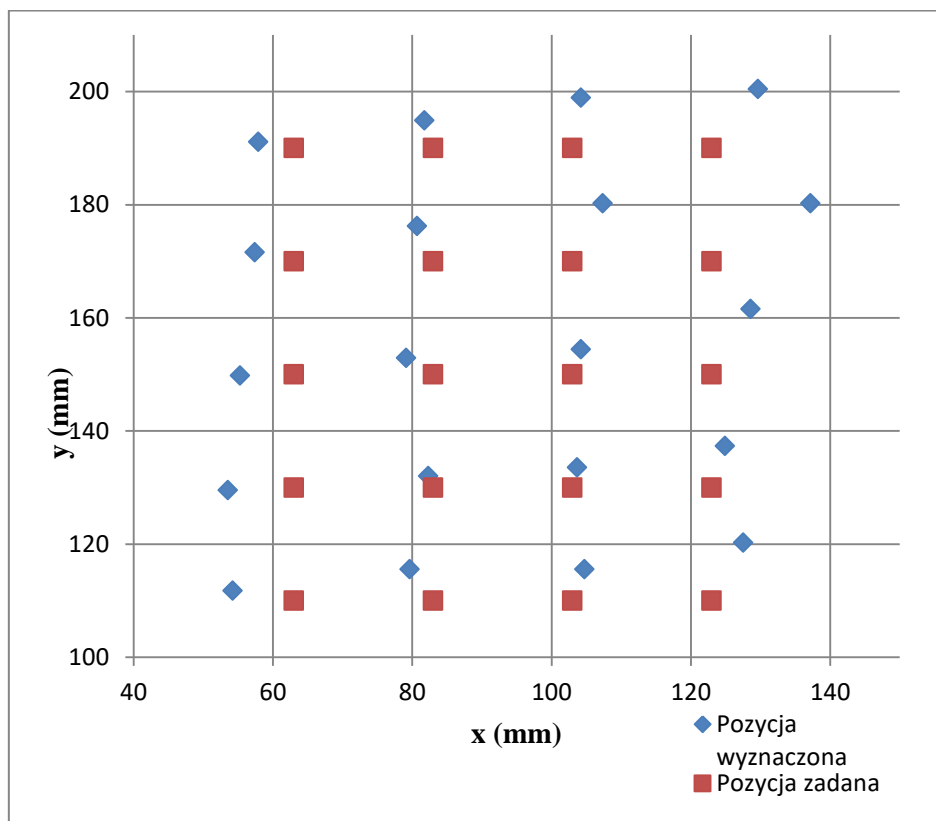
Tabela 8.1 – Wyniki pomiaru pozycji wzorca ME8 metodą wyszukania maksimum anomalii.

x zadane (mm)	y zadane (mm)	x (piksele)	y (piksele)	x (mm)	y (mm)	różnica x (mm)	różnica y (mm)
123	190	739	902	130	200	7	10
123	170	782	811	137	180	14	10
123	150	733	727	129	162	6	12
123	130	712	618	125	137	2	7
123	110	727	541	128	120	5	10
103	190	594	895	104	199	1	9
103	170	612	811	107	180	4	10
103	150	594	695	104	154	1	4
103	130	591	601	104	134	1	4
103	110	597	520	105	116	2	6
83	190	466	877	82	195	1	5
83	170	460	793	81	176	2	6
83	150	451	688	79	153	4	3
83	130	469	594	82	132	1	2
83	110	454	520	80	116	3	6
63	190	330	860	58	191	5	1
63	170	327	772	57	172	6	2
63	150	315	674	55	150	8	0
63	130	305	583	54	130	9	0
63	110	309	503	54	112	9	2
Wartość średnia						4,5	5,4
Odchylenie standardowe						3,4	3,6

Podstawową zaletą przedstawionej metody jest jej wysoka czułość, ponieważ detekcja jest zapewniona już przy amplitudzie anomalii 10 razy większej od wartości skutecznej szumu tła. Tak więc w warunkach polowych metoda może być czulsza niż np. w budynku.

Ze względu na możliwość uzyskania obrazu tylko części anomalii, np. pojedynczego ekstremum, gdy ekstremum przeciwne znajduje się poza obszarem skanowania, nie jest to jednak metoda jednoznaczna.

Problem ten można rozwiązać korzystając z pełnej informacji o wartościach poszczególnych składowych wektorów indukcji magnetycznej, zmierzonych np. przy użyciu trójosiowego czujnika magnetorezystancyjnego, oraz dipolowego modelu matematycznego opisanego w rozdziale 8.5.



Rys. 8.6. Schemat położenia x,y wzorca ME8 względem płaszczyzny pomiarowej. Punkty czerwone – pozycja zadana, punkty niebieskie – pozycja wyznaczona metodą wyszukania maksimum anomalii na obrazie magnetowizyjnym

Odchylenie standardowe wyznaczenia współrzędnych x i y wynosi mniej niż 4 mm, wszystkie wyniki mieszczą się w obrysie obiektu (\varnothing 20 mm). Zauważalne przesunięcie wyników względem wartości zadanej wynika prawdopodobnie z niepewności wyznaczenia początku układu współrzędnych (przesunięcie w osi Y). Błędy systematyczne tego typu można skompensować przez dokładniejsze pomiary geometryczne układu skaner magnetowizyjny – płaszczyzna pomiarowa-próbka.

8.2. Opracowana metoda pomiaru odległości od nieznanego obiektu

Wskazanie koordynat x , y ukrytego obiektu przy użyciu pomiaru rozkładu wartości indukcji magnetycznej na płaszczyźnie jest możliwe nawet bez analizy matematycznej wyników, jednakże wyznaczenie odległości od płaszczyzny pomiarowej/współrzędnej z obiektu sprawia pewne trudności.

W przypadku nieznanego, ukrytego obiektu ferromagnetycznego, wartościami niewiadomymi są jego współrzędne x , y , z oraz wypadkowy moment magnetyczny \mathbf{m} , a więc wartość momentu m oraz kąty β i φ względem przyjętego układu współrzędnych. Na podstawie zależności (5.3) oraz wyników modelowania MES, można wykazać że wartość bezwzględna indukcji magnetycznej B zmierzona w odległości x od obiektu jest odwrotnie proporcjonalna do x^3 .

Można zatem przyjąć prosty model tej zależności:

$$B = \frac{a}{(x + b)^3} + c \quad (8.1)$$

przy czym:

B – indukcja magnetyczna w μT .

x – odległość wzdłuż linii pomiarowej w mm,

parametr a - zastępczy dipolowy moment magnetyczny w μTmm^3 . Ze względu na brak informacji o kącie φ , parametr a nie może być bezpośrednio podstawą do określenia momentu \mathbf{m} .

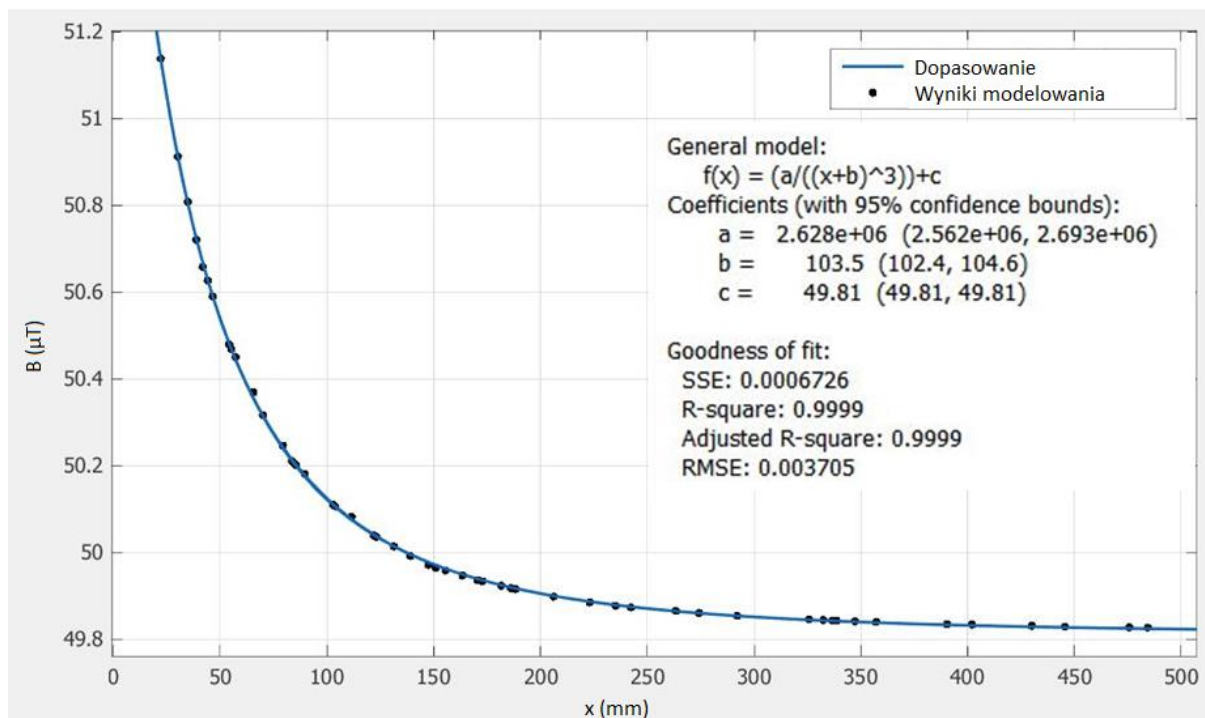
parametr b - odległość obiektu od pierwszego/najbliższego punktu pomiarowego w mm,

parametr c – składowa stała pola magnetycznego w μT , głównie pole ziemskie.

Na rysunku 8.6 przedstawiono wyniki dopasowania symulowanych wartości indukcji B pola magnetycznego do równania (8.1). Symulowanym obiektem była jednorodnie namagnesowana kulka o średnicy 15 mm, (analogiczna do obiektu 5), umieszczona w jednorodnym polu magnetycznym o wartości $B_z = 50\mu\text{T}$. Zadany kąt $\varphi = 0^\circ$, tj. współosiowość osi dipola i linii pomiarowej. Zadana odległość od pierwszego punktu pomiarowego wynosiła $h = 100$ mm.

W celu dopasowania wyników symulacji do modelu matematycznego, zastosowano nieliniową metodą najmniejszych kwadratów. Uzyskano odległość od pierwszego punktu pomiarowego $b = 103,5$ mm oraz pole stałe $c = 49,8 \mu\text{T}$.

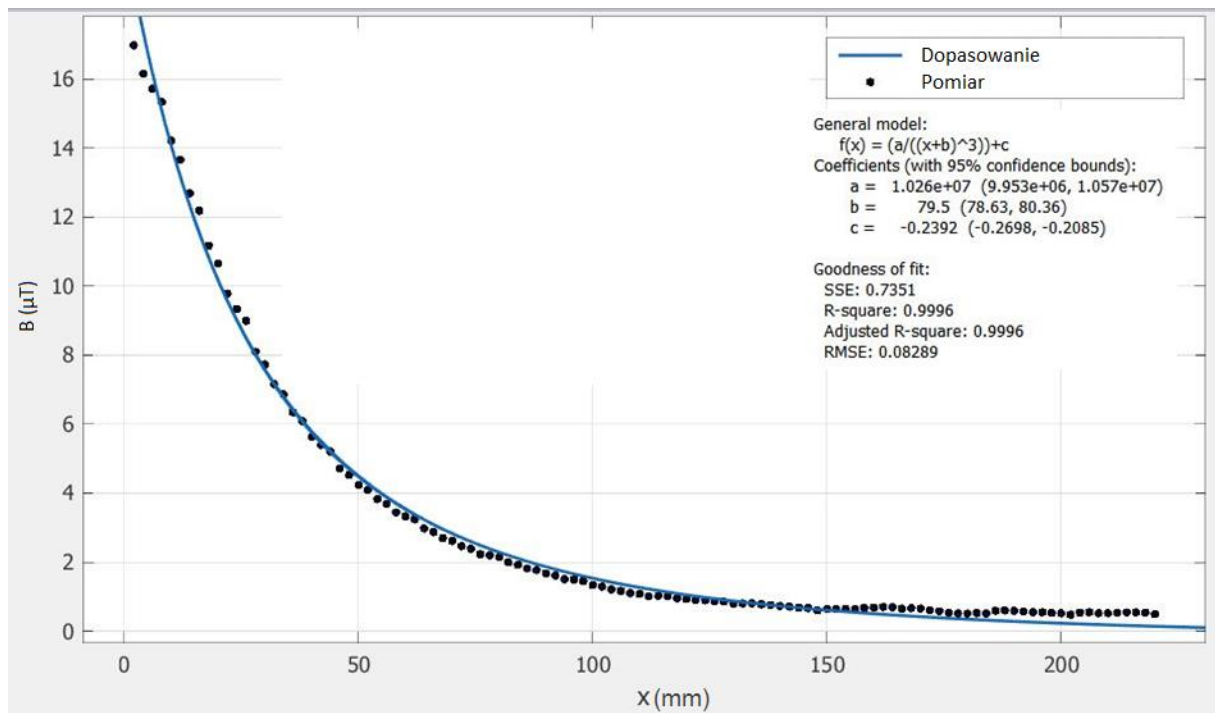
Należy podkreślić, że w rozważaniach w rozdziale 8.3 jedyną zmienną współrzędną przestrzenną jest odległość od obiektu wzdłuż osi przechodzącej przez jego środek, oznaczona jako x . W pozostałych przypadkach odległość ta oznaczana jest jako współrzędna z .



Rys. 8.6. Aproksymacja wyników modelowania MES do modelu dipolowego (8.1). Odległość zadana (traktowana jako niewiadoma) wynosi $h = 100$ mm, obliczona poprzez dopasowanie modelu: $b = 103,5$ mm

W celu wyznaczenia odległości od ukrytego obiektu ferromagnetycznego omawianą metodą należy dokonać pomiaru rozkładu indukcji magnetycznej B w osi obiektu. Pomiar można przeprowadzić poprzez standardowy, poziomy pomiar magnetowizyjny w płaszczyźnie nad obiektem. Po wyznaczeniu położenia obiektu metodą opisaną w poprzednim rozdziale (8.2), wykonuje się drugi, prostopadły skan magnetowizyjny, w osi obiektu. Efektem jest trójwymiarowy pomiar rozkładu pola, analogiczny do rysunku 7.16.

Na rysunku 8.7 przedstawiono wynik dopasowania modelu (8.1) do wyniku odpowiedniego prostopadłego skanu – przy czym kryterium wyboru linii pomiarowej była największa zarejestrowana zmiana indukcji B . Obiekt mierzony nr 7, tj. walec stalowy o średnicy 40mm. Odległość zadana (traktowana jako niewiadoma) wynosi $h = 80$ mm, obliczona poprzez dopasowanie modelu: $b = 79,5$ mm. Ponieważ pływ zewnętrznego pola został skompensowany, to $c \cong 0$.



Rys. 8.7. Aproksymacja wyników prostopadłego pomiaru magnetowizyjnego, w osi próbki 8 (walca stalowego 40mm) do modelu dipolowego (8.1). Odległość zadana (traktowana jako niewiadoma) wynosi $h = 80$ mm, obliczona poprzez dopasowanie modelu: $b = 79,5$ mm

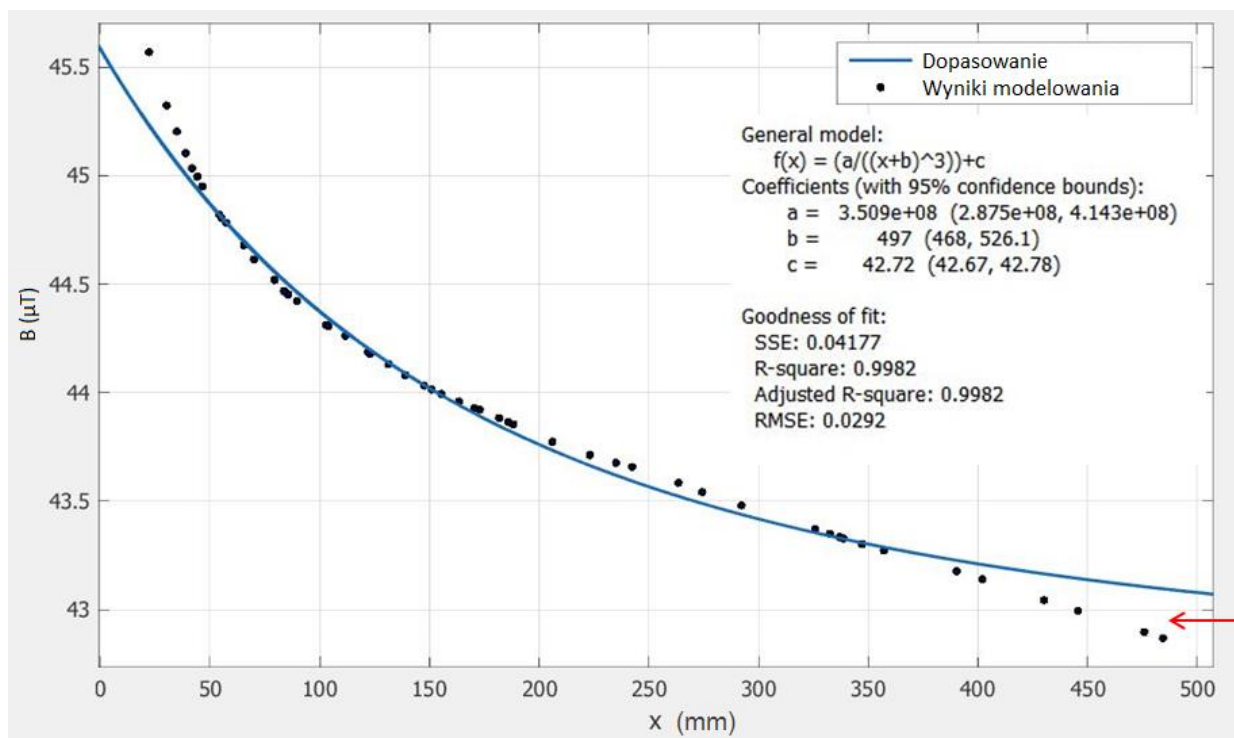
Metoda ta, ze względu na znaczne uproszczenia modelu, jest bardzo wrażliwa na niejednorodność zewnętrznego pola magnetycznego. Na rysunku 8.8 przedstawiono wynik analogicznej jak na rys. 8.6 symulacji, z dodatkem wprowadzenia stałego gradientu zewnętrznego pola magnetycznego wzdłuż linii pomiarowej, wynoszącego $5 \mu\text{T/m}$. Spowodowało to niedopasowanie modelu (8.1) i wzrost niepewności wyznaczenia odległości. Odległość zadana wynosiła nadal $h = 100$ mm, podczas gdy obliczona wartość b wynosi około 500mm , co praktycznie wyklucza zasadność tej metody.

Rozwiązaniem tej niedogodności jest modyfikacja modelu (8.1) do postaci:

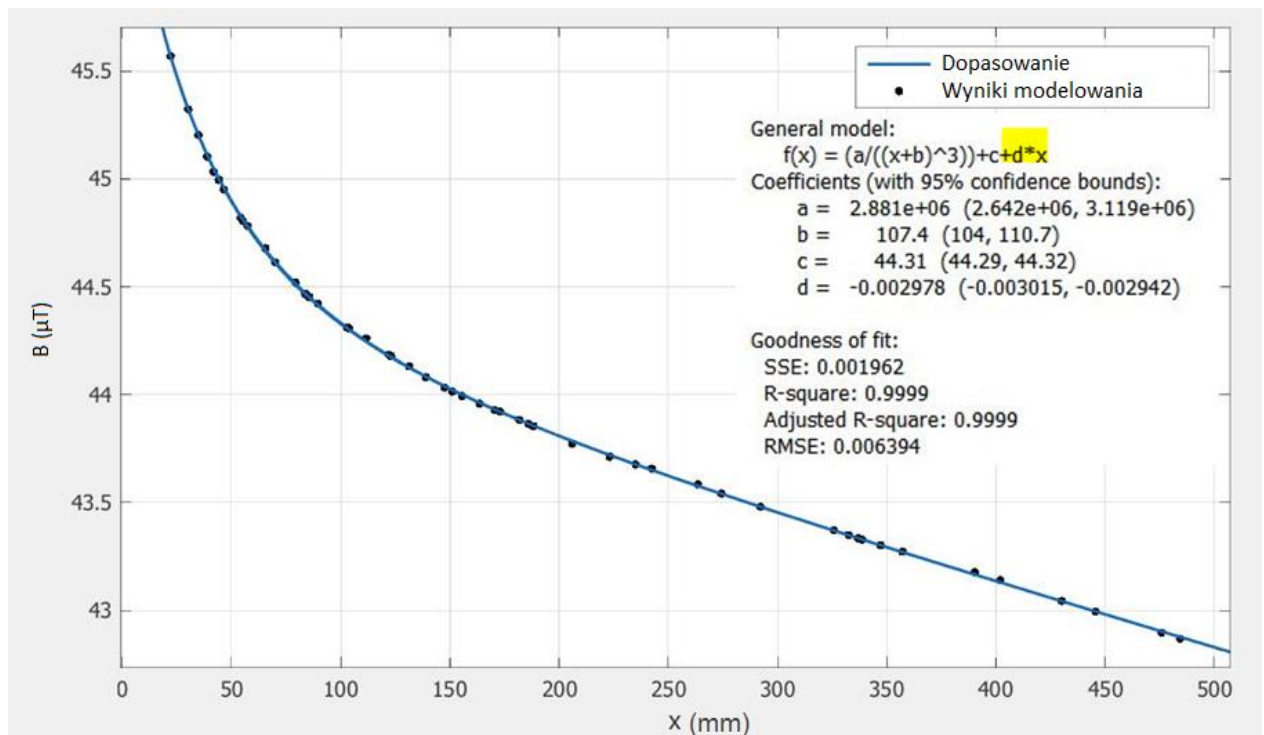
$$B = \frac{a}{(x + b)^3} + c + dx \quad (8.2)$$

Przy czym d ($\mu\text{T/mm}$) jest gradientowym współczynnikiem zastępczym. Współczynnik d sam w sobie nie jest użyteczny, pozwala jednak lepiej dopasować model matematyczny do pomiaru w warunkach wpływu zewnętrznego, liniowego gradientu indukcji pola magnetycznego. Sytuacja taka ma miejsce w przypadku wpływu dużych, lecz odległych dipoli, tj. gdy

długość linii pomiarowej jest znacząco mniejsza od odległości od obiektów zakłócających. Wpływ tych obiektów, również odwrotnie proporcjonalny do sześciangu odległości, można wówczas przybliżyć funkcją liniową.



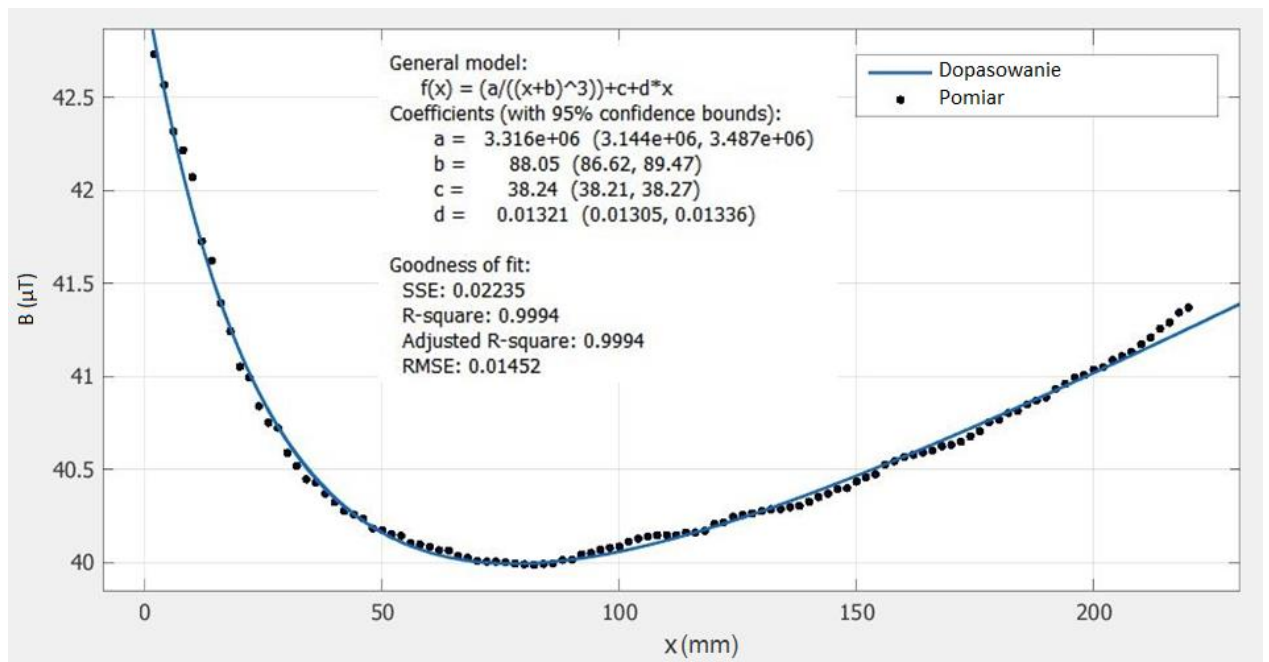
Rys. 8.8. Aproksymacja wyników modelowania MES do modelu dipolowego (8.1), z niejednorodnym polem zewnętrznym. Odległość zadana (traktowana jako niewiadoma) wynosi $h = 100$ mm, obliczona poprzez dopasowanie modelu: $b = 500$ mm. Czerwoną strzałką oznaczono widoczne niedopasowanie modelu do wyników symulacji wywołane wprowadzeniem gradientu pola zewnętrznego



Rys. 8.9. Aproksymacja wyników modelowania MES do zmodyfikowanego modelu dipolowego (8.2) (modyfikację równania oznaczono żółtym podkreśleniem), z niejednorodnym polem zewnętrznym. Odległość zadana (traktowana jako niewiadoma) wynosi $h = 100$ mm, obliczona poprzez dopasowanie modelu: $b = 107,4$ mm

Na rysunku 8.9 przedstawiono dopasowanie wyników symulacji MES do modelu (8.2). Odległość zadana wynosi $h = 100$ mm, natomiast obliczona poprzez dopasowanie modelu: $b = 107,4$ mm. Wskazuje to na znaczącą poprawę wiarygodności modelu.

Na rysunku 8.10 uwidoczniło zastosowanie modelu (8.2) do wyznaczenia odległości b od obiektu nr 7 (walca stalowego o średnicy 40mm). Pomimo znaczącego wpływu zadanego gradientu zewnętrznego pola magnetycznego na poziomie zbliżonym do zmierzonej sygnatury magnetycznej, niepewność wyznaczenia położenia obiektu jest mniejsza niż 10%.



Rys. 8.10. Dopasowanie wyników prostopadłego pomiaru magnetowizyjnego, w osi obiektu nr 7 (walca stalowego) do modelu dipolowego (8.2). Odległość zadana (traktowana jako nie-wiadoma) wynosi $h = 80$ mm, obliczona poprzez dopasowanie modelu $b = 88$ mm. Widoczny znaczący wpływ zewnętrznego gradientu indukcji pola magnetycznej.

Zaprezentowana, nowa metoda wyznaczania odległości, zweryfikowana na wynikach symulacji numerycznych oraz wynikach pomiarów rzeczywistych, pozwala na obliczenie odległości od nieznanego dipola magnetycznego zarówno w warunkach idealnych, jak i pod wpływem gradientów pola wywołanych obecnością większych, lecz odległych obiektów [98].

8.3. Opracowana metoda wyznaczania momentu magnetycznego nieznanego obiektu

Zaproponowana w poniższym rozdziale metoda jest rozwinięciem najbardziej rozpowszechnionej metody pomiaru momentu magnetycznego, korzystającej z pojedynczego magnetometru. Jednym z głównych źródeł błędu tej metody jest błąd wyznaczenia odległości między obiektem badanym a sensorem pomiarowym magnetometru. Poprzez wykonanie wielokrotnych pomiarów wartości indukcji B pola magnetycznego w różnych odległościach od obiektu badanego, i dopasowanie wyników pomiaru do równania 8.3, można określić wartość momentu magnetycznego. Metoda ta jest poprawna tylko jeżeli kąt φ osi dipola magnetycznego względem linii pomiarowej równy jest 0° . Ponadto, istotną informację stanowią wartości indukcji magnetycznej w poszczególnych punktach pomiarowych i odległości między punktami. Odległość pomiędzy magnetometrem a obiektem badanym może być traktowana jako niewiadoma i obliczona równocześnie z wartością momentu magnetycznego.

W celu przetestowania metody, skonstruowano odpowiednie stanowisko pomiarowe. Składało się ono ze stolika liniowego z pomiarem przesunięcia oraz magnetometru magnetorezystancyjnego Honeywell HMR2300. System akwizycji danych został zautomatyzowany i pracował pod kontrolą oprogramowania napisanego w środowisku LabView, co pozwoliło na dokonywanie serii pomiarów indukcji pola magnetycznego wzdłuż zdefiniowanej linii, z zadanymi odstępami pomiędzy punktami pomiarowymi.

Badane obiekty mogą być umieszczane nieruchomo wzdłuż osi ruchomego magnetometru (rysunek 8.11) lub odwrotnie – magnetometr może być nieruchomy, a obiekt umieszczany na stoliku liniowym (rysunek 8.12). Druga konfiguracja umożliwia dokładniejsze pomiary, ponieważ łatwiej jest skompensować wpływ stałych pól zewnętrznych. Pierwsza konfiguracja natomiast umożliwia pomiar momentu magnetycznego większych obiektów, potencjalnie np. samochodów czy satelitów.

Po wykonaniu pomiarów, wartości indukcji B pola magnetycznego i współrzędne punktów pomiarowych przetwarzane są w oprogramowaniu Matlab. Dane dopasowywane są do równania:

$$B = \frac{m}{(x+b)^3} + c + dx \quad (8.3)$$

przy czym:

B – wartości indukcji magnetycznej w μT ,

m – moment magnetyczny w Am^2 ,

x – współrzędna punktu pomiarowego w metrach, dla pierwszego punktu $x = 0$,

b – odległość pierwszego punktu pomiarowego od obiektu w metrach,

c – wartość pola tła w μT ,

d – stała gradientowa pola tła w $\mu\text{T/m}$ (umożliwia pomiar w niejednorodnym polu zewnętrznym, natomiast w polu jednorodnym zwiększa niepewność pomiarową).

Algorytm Levenberga-Marquardta został wybrany jako najskuteczniejszy przy dopasowaniu danych, wspólnie z wstępnym dopasowaniem metodą LAR (ang. Least Absolute Residuals).

W trakcie badań przebadano następujące próbki:

- ferrytowy magnes z materiału F30, cylindryczny, $\text{Ø}8 \times 10$ mm,

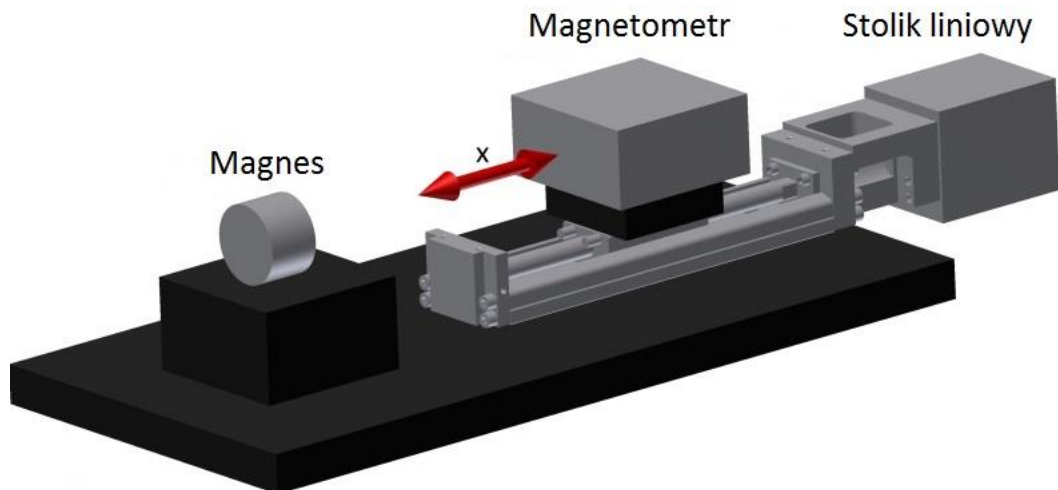
- magnes z materiału Alnico, cylindryczny, $\text{Ø}10 \times 10$ mm,

- magnes neodymowy z materiału NdFeB, kulisty, $\text{Ø}15$ mm.

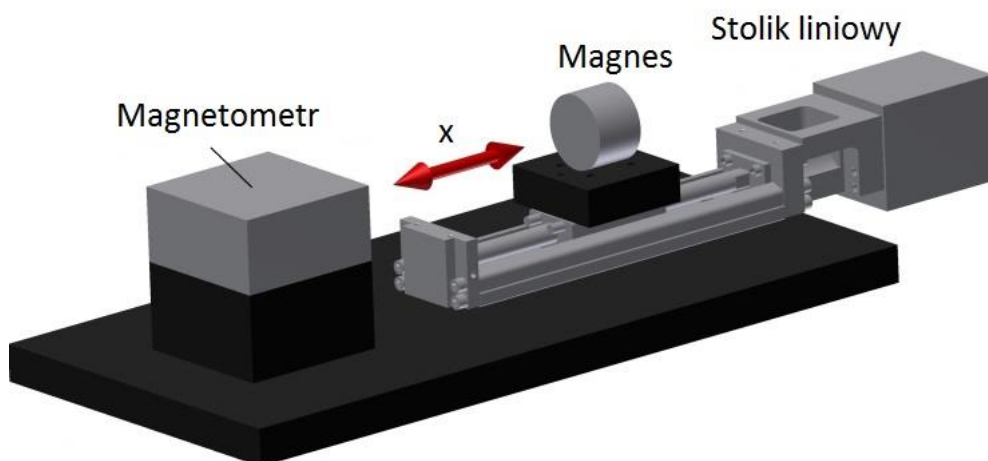
Moment magnetyczny wyznaczono przy zastosowaniu trzech metod: prostej metody z magnetometrem, pomiaru z zastosowaniem cewek Helmholtza i strumieniomierza, oraz nowej metody zaproponowanej w pracy [98].

Przykładowe wyniki dopasowania wyników pomiaru do modelu przedstawiono na rysunku 8.13, a wyniki pomiarów dla wszystkich metod pomiaru momentu magnetycznego zebrano w tabelach 8.1 oraz 8.2. Widoczne są wyraźne różnice wyników dla metody z magnetometrem, przy różnych odległościach magnetometru od obiektu (tabela 8.1) oraz rozbieżność z metodą z cewkami Helmholtza (tabela 8.2).

Nowa metoda ma poważne ograniczenia ponieważ wymagana jest współosiowość mierzonego momentu magnetycznego i linii pomiarowej. Z tego względu zaproponowana metoda może mieć tylko ograniczone zastosowanie przy wykrywaniu obiektów ukrytych. Ma ona jednak potencjał możliwy do wykorzystania w przemyśle. Metoda ta umożliwia między innymi pomiar momentu i kontrolę jakości magnesów trwałych w procesie ich produkcji. Umożliwia także pomiar momentu obiektów o znaczących rozmiarach, dla których budowa stanowiska z cewkami Helmholtza byłaby nieekonomiczna.

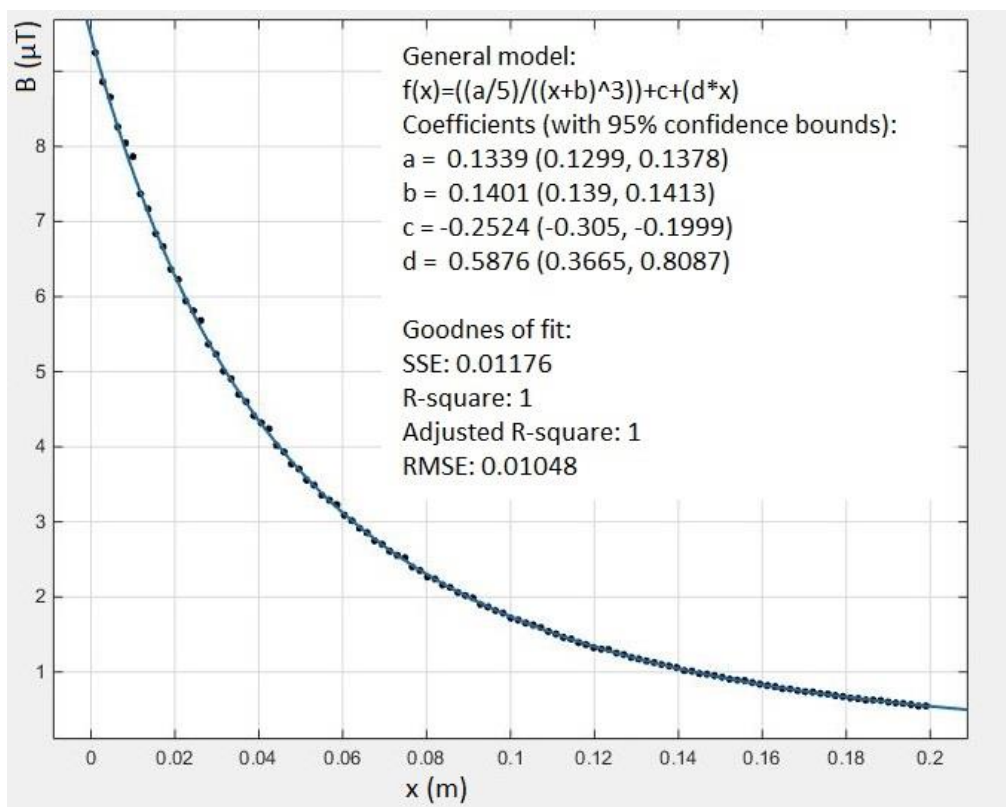


Rys. 8.11. Układ magnetometru i obiektu badanego do pomiaru momentu magnetycznego metodą dopasowania. Układ ruchomy magnetometr – nieruchoma próbka (magnes)



Rys. 8.12. Układ magnetometru i obiektu badanego do pomiaru momentu magnetycznego metodą dopasowania. Układ ruchoma próbka (magnes) – nieruchomy magnetometr

Przemysłowy potencjał metody w układzie nieruchomy magnetometr – ruchomy obiekt, został z sukcesem zweryfikowany w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Rozdzielczość i powtarzalność pomiarów na poziomie 1% pozwoliła na kontrolę jakości on-line magnesów trwałych przemieszczanych na taśmociągu.



Rys. 8.13. Przykładowe dopasowanie modelu dipolowego (8.3) do wyników pomiaru obiektu nr 3

Tabela 8.1. Przykładowe wyniki pomiarów momentu magnetycznego. Prosta metoda z magnetometrem

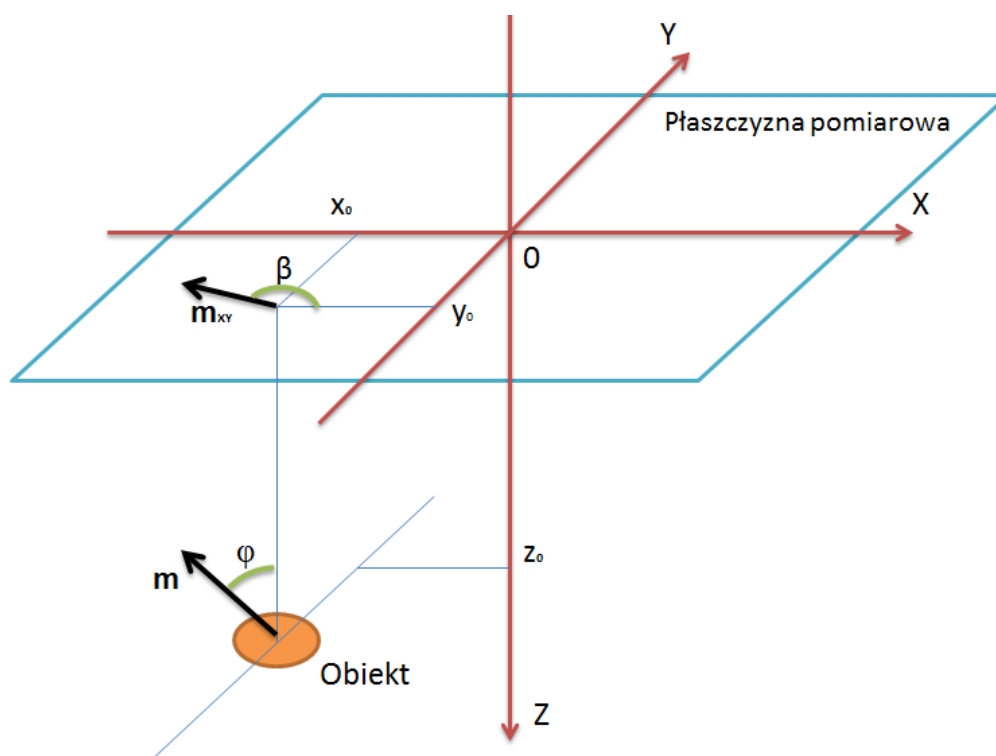
Próbka	Odległość magnetometr-próbka (m)					
	0,5	0,4	0,3	0,9	0,7	0,5
Moment magnetyczny m (Am ²)						
Nr 3 Ferryt	0,150	0,153	0,155	-	-	-
Nr 4 Alnico	0,138	0,128	0,125	-	-	-
Nr 5 NdFeB	-	-	-	1,786	1,715	1,700

Tabela 8.2. Przykładowe wyniki pomiarów momentu magnetycznego

Próbka	Metoda z cewkami Helmholtza Moment magnetyczny m (Am ²)	Metoda dopasowania Moment magnetyczny m (Am ²)
Nr 3 Ferryt	0,159	0,134
Nr 4 Alnico	0,135	0,114
Nr 5 NdFeB	1,769	1,295

8.4. Nowatorska metoda lokalizacji i wyznaczania momentu magnetycznego z wykorzystaniem trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych

Niedogodności wcześniejszych rozwiązań, zarówno znanych z literatury, jak i opisanych w niniejszej pracy, rozwiązuje metoda z wykorzystaniem płaszczyzn, pozwalająca na jednoczesne wyznaczenie wszystkich współrzędnych (x,y,z) szukanego obiektu oraz wartości i kierunku jego wypadkowego momentu magnetycznego. Metoda ta polega na analizie rozkładu wartości indukcji B pola magnetycznego w płaszczyźnie pomiarowej nad obiektem. Jest więc ona rozwinięciem podstawowego pomiaru magnetowizyjnego, który jedynie wizualizował ten rozkład. Na rysunku 8.14 przedstawiono schemat geometryczny układu obiekt - płaszczyzna pomiarowa, oraz przyjęte oznaczenia poszczególnych parametrów.



Rys. 8.14. Zasada pomiaru metodą płaszczyznową

Środek 0 lokalnego układu współrzędnych XYZ znajduje się w środku magnetowizyjnej płaszczyzny pomiarowej. Przyjęte oznaczenia: x_0, y_0, z_0 , - stanowią koordynaty środka poszukiwanego obiektu względem środka lokalnego układu współrzędnych, \mathbf{m} - wypadkowy moment magnetyczny obiektu, \mathbf{m}_{xy} - rzut wektora momentu na płaszczyznę XY, φ - kąt pomiędzy wektorem momentu \mathbf{m} a pionową osią Z, β - kąt pomiędzy osią X a wektorem \mathbf{m}_{xy} .

Na podstawie zależności przedstawionych w rozdziale 3 można wyprowadzić zależność na wartość indukcji B pola magnetycznego w poszczególnych punktach pomiarowych na płaszczyźnie w pewnej nieznannej odległości z_0 od szukanego obiektu o wypadkowym momencie magnetycznym \mathbf{m} .

$$\begin{aligned}
 B_z = & \frac{0.3 \text{ m} \sin(\varphi) \cos(\beta) (x + x_0)z_0}{((x + x_0)^2 + (y + y_0)^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \\
 & + \frac{0.3 \text{ m} \sin(\varphi) \sin(\beta) (y + y_0)z_0}{((x + x_0)^2 + (y + y_0)^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} \\
 & + \frac{0.1 \text{ m} \cos(\varphi) (2z_0^2 - (x + x_0)^2 - (y + y_0)^2)}{((x + x_0)^2 + (y + y_0)^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} + c \\
 & + dx + ey
 \end{aligned} \tag{8.4}$$

przy czym:

B_z – wartość indukcji pola magnetycznego w osi z dla danego punktu na płaszczyźnie XY w μT ,

x_0, y_0, z_0 , - koordynaty środka poszukiwanego obiektu względem środka lokalnego układu współrzędnych w metrach,

m – wartość wypadkowego momentu magnetycznego obiektu w Am^2 ,

φ – kąt pomiędzy wektorem momentu a pionową osią Z ,

β – kąt pomiędzy osią X a rzutem wektora momentu na płaszczyznę XY,

c – wartość stała pola tła w μT ,

d, e – zastępcze współczynniki gradientowe, umożliwiające dopasowanie modelu w warunkach niejednorodnego pola tła w $\mu\text{T/m}$.

Równanie (8.4) określa rozkład indukcji B pola magnetycznego w płaszczyźnie w odległości z_0 od obiektu o momencie \mathbf{m} i współrzędnych x_0, y_0 .

Dodatkowo, zastosowanie współczynników c, d i e , pozwala na uwzględnienie wpływu niejednorodnego pola tła, a więc pola ziemskiego oraz gradientów pochodzących od dużych, znacząco odległych obiektów.

Korzystając z równania (8.4) lub równań analogicznych [109] można wyznaczyć rozkład wartości pola B znając wszystkie parametry występujące z prawej strony równania (8.4), podobne przykłady znane są z literatury [109]. Można jednakże **rozwiązać zagadnienie odwrotne** – na podstawie pomiaru wartości indukcji pola magnetycznego B w punktach o znanych współrzędnych x, y wyznaczyć wszystkie parametry określające wypadkowy moment

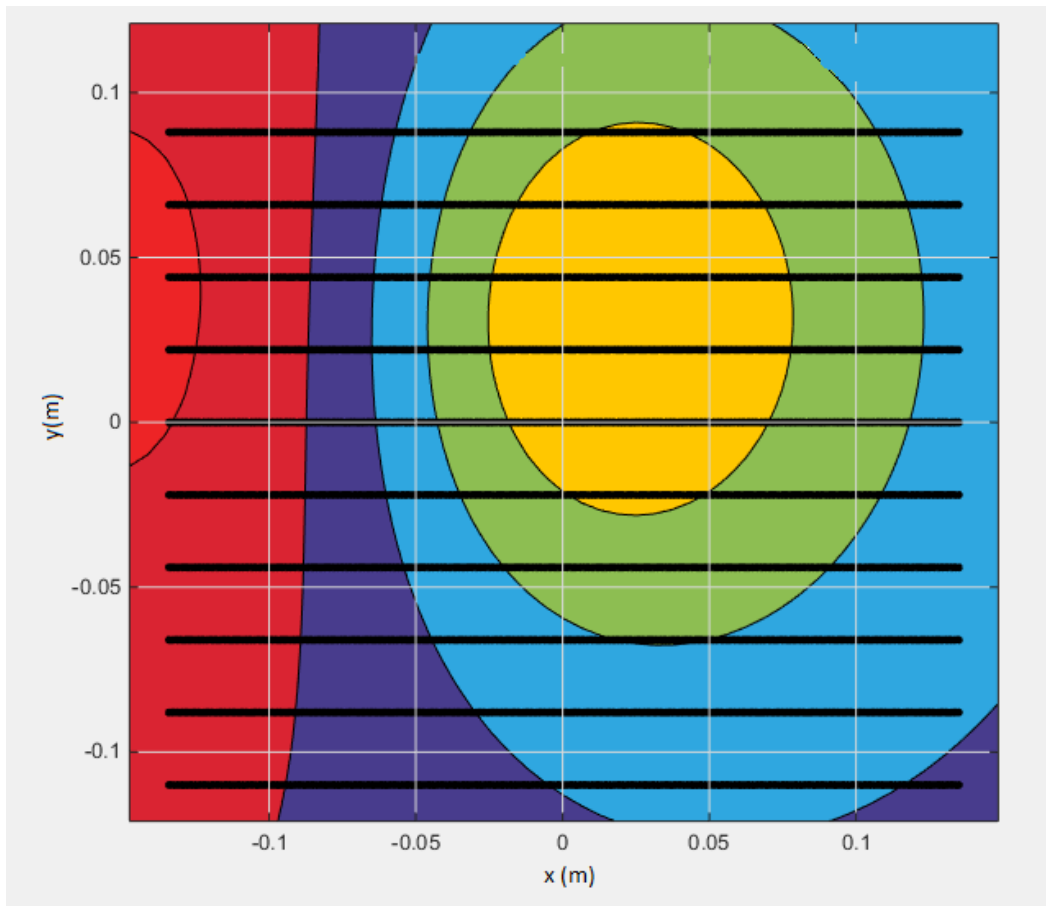
magnetyczny nieznanego, ukrytego obiektu ferromagnetycznego. Są to: wyznaczone współrzędne x_w , y_w , z_w środka wypadkowego momentu magnetycznego, wartość momentu magnetycznego m_w , kąty φ_w i β_w określające kierunek wektora momentu magnetycznego.

W celu sprawdzenia działania modelu (8.4) przeprowadzono serie pomiarów wzorca momentu magnetycznego ME8. W pierwszej serii pomiarów nie zmieniano parametrów występujących w równaniu (8.4), tj. sprawdzono powtarzalność i rozrzut wyników. Serię pomiarów magnetowizyjnych wykonano przy następujących parametrach: współrzędne $x_0 = 30$ mm, $y_0 = -30$ mm, $z_0 = 160$ mm, kąt $\beta = 0^\circ$, kąt $\varphi = 65^\circ$. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 8.2.

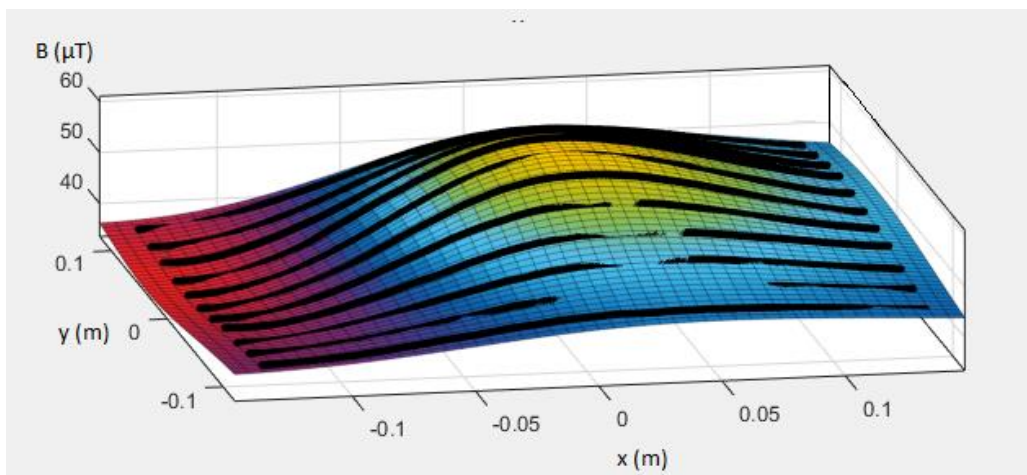
Metoda pozwoliła na wyznaczenie odległości od wzorca z niepewnością 0,5%. Dużą dokładność uzyskano również dla pomiaru wartości pola tła oraz kątów φ , β . Znacząco większa niepewność występuje przy pomiarze współrzędnych x, y oraz wartości momentu magnetycznego m . Należy jednakże podkreślić, że wyznaczony środek obiektu (x_0, y_0, z_0) znajduje się wewnątrz jego obrysu. Natomiast pomiar momentu magnetycznego wykonany jest z większą dokładnością niż przy innych znanych metodach stosowanych w praktyce, i to przy wszystkich parametrach wektora momentu przyjętych jako niewiadome. Na rysunkach 8.15-8.17 przedstawiono przykładowy wynik dopasowania metodą płaszczyznową.

Tabela 8.2. – Wyniki serii pomiarów wzorca ME8, sprawdzenie powtarzalności

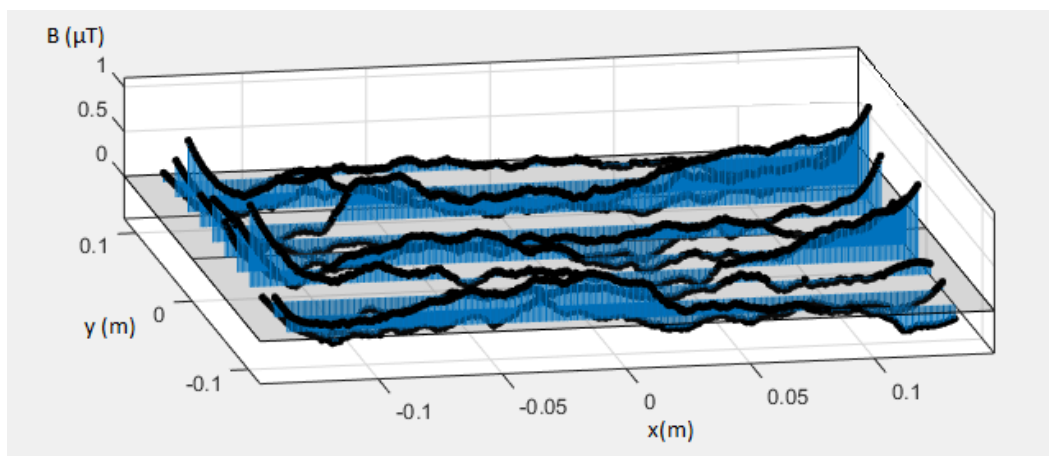
L.p.	m_w (Am ²)	z_w (mm)	x_w (mm)	y_w (mm)	φ_w (°)	β_w (°)	c (μT)
Wartość średnia	0,575	165,7	35,2	-30,9	66,0	2,0	41,2
Odchylenie standardowe	0,020	1,6	1,9	1,4	1,5	0,8	0,2
Różnica od wartości zadanej	0,059	0,7	5,2	-0,9	1,0	2,0	0,2
Błąd względny	9,7%	0,5%	14%	3%	1,5%	-	0,5%



Rys. 8.15. Aproksymacja pomiaru rozkładu indukcji pola magnetycznego wzorca ME8 (czarne linie – linie pomiarowe) do modelu (8.4). Zadane koordynaty obiektu $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,165)$ mm, $\beta = 0^\circ$, $\varphi = 65^\circ$. Widok z góry na płaszczyznę pomiarową

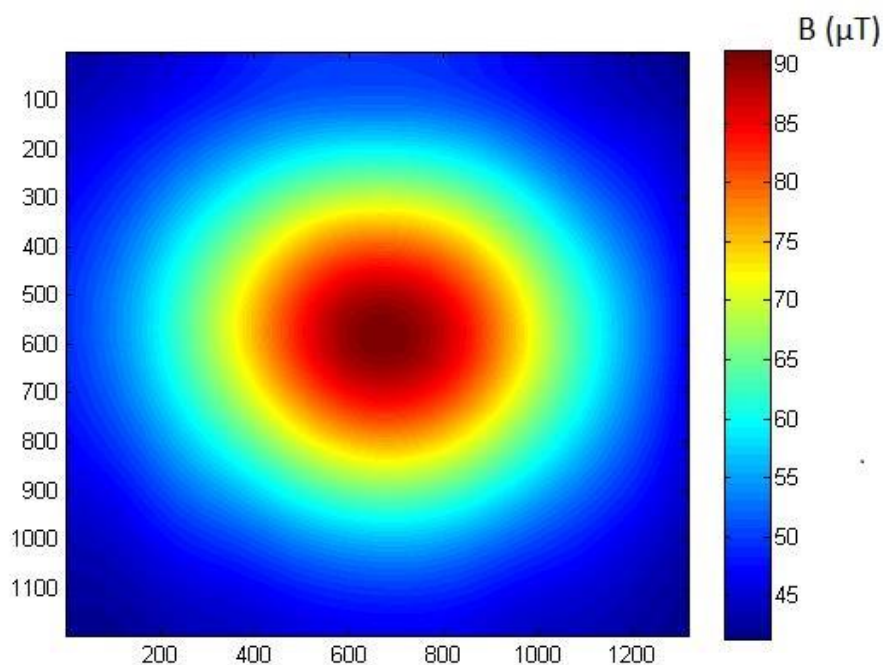


Rys. 8.16. Aproksymacja pomiaru rozkładu indukcji pola magnetycznego wzorca ME8 (czarne linie - wyniki pomiaru) do modelu (8.4). Zadane koordynaty obiektu $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,165)$ mm, $\beta = 0^\circ$, $\varphi = 65^\circ$. Trójwymiarowy wykres rozkładu indukcji B pola magnetycznego



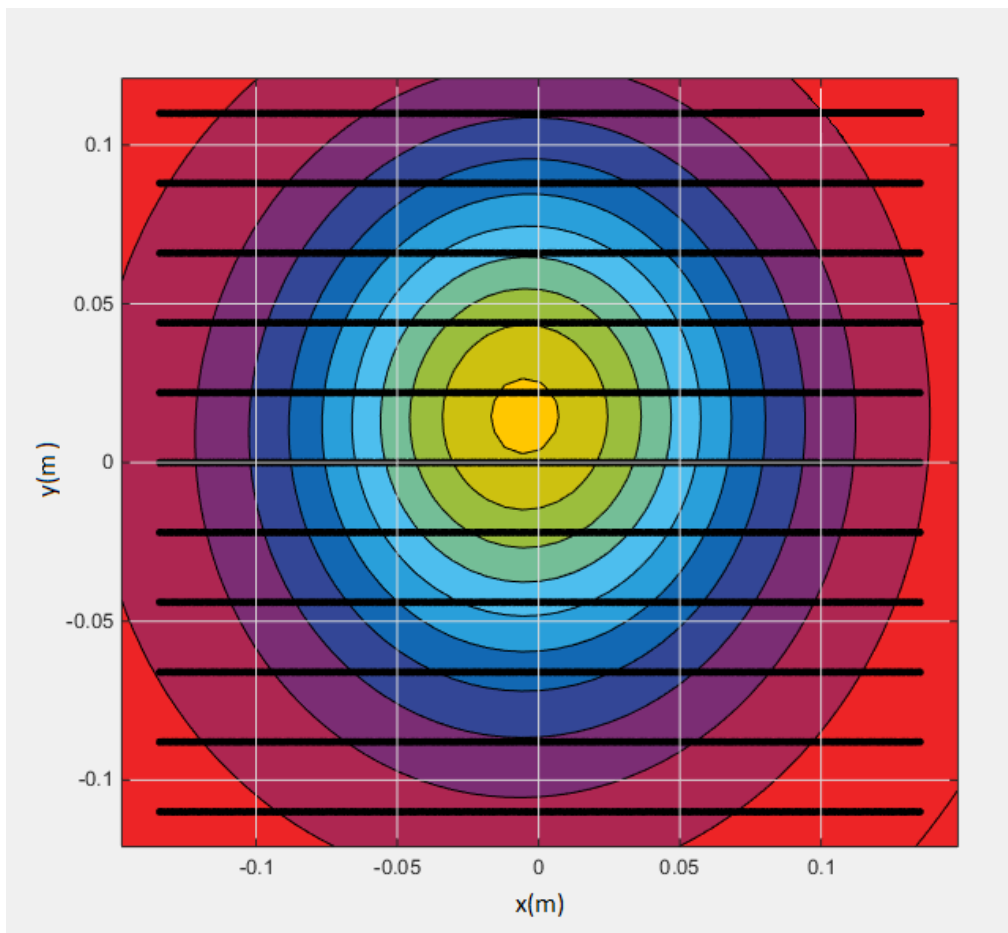
Rys. 8.17. Aproksymacja pomiaru rozkładu indukcji pola magnetycznego wzorca ME8 (czarne linie – różnice pomiędzy wynikiem pomiaru a dopasowaniem) do modelu (8.4). Zadane koordynaty obiektu $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,165)$ mm, $\beta = 0^\circ$, $\varphi = 65^\circ$. Wykres różnic między punktami pomiarowymi a wynikiem dopasowania

W kolejnej serii pomiarów wzorec umieszczono na stoliku obrotowym, umożliwiającym zmianę kąta φ względem płaszczyzny pomiarowej. Serię pomiarów magnetowizyjnych wykonano przy następujących parametrach: współrzędne $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $z_0 = 140$ mm, kąt $\beta = 0^\circ$, kąt φ zmieniany w zakresie od 0 do 90° z rozdzielczością 5° .



Rys. 8.18. Przykładowy pomiar magnetowizyjny indukcji pola magnetycznego wzorca ME8. Zadane koordynaty obiektu $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,140)$ mm, $\beta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$

Na rysunku 8.18 przedstawiono przykładowy pomiar magnetowizyjny, dla $\varphi = 0^\circ$. Na rysunkach 8.19-8.22 przedstawiono przykładowe wyniki dopasowania modelu (8.4) do wyników pomiarów dla różnych wartości kąta $\varphi = 0^\circ$ oraz 90° .

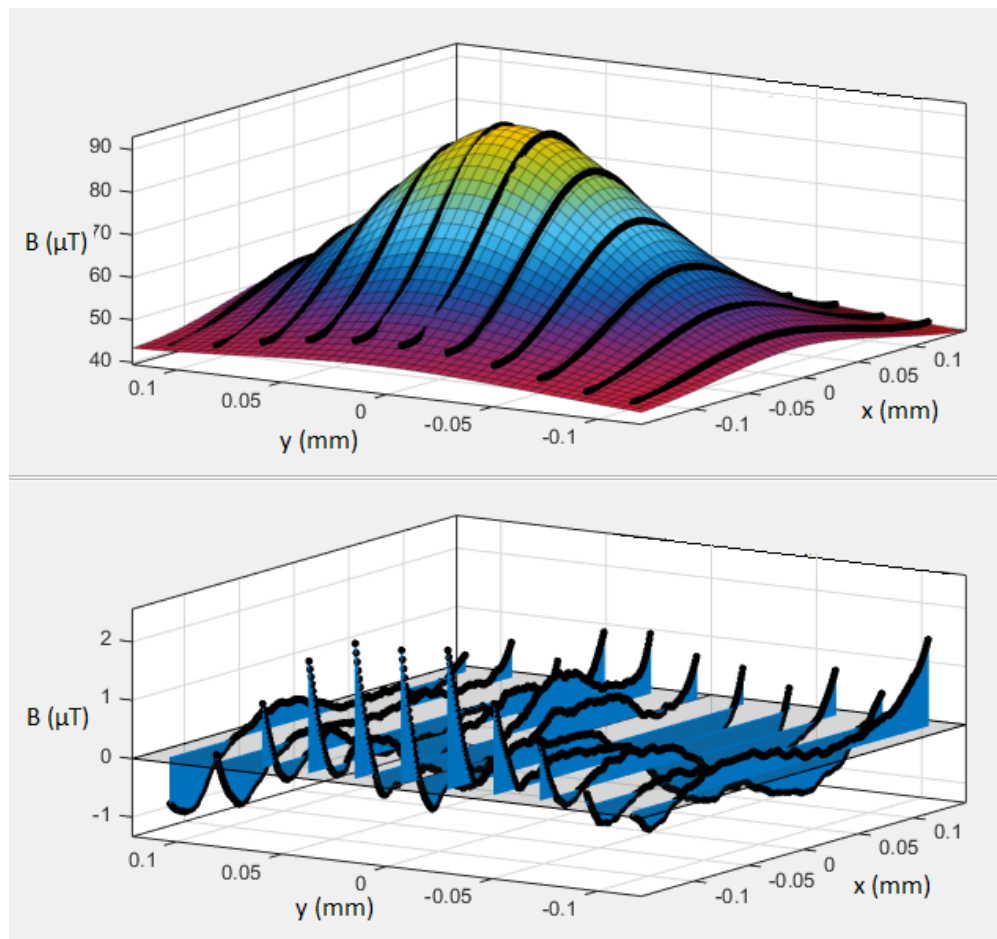


Rys. 8.19. Aproksymacja pomiaru rozkładu indukcji pola magnetycznego wzorca ME8 (czarne linie - linie pomiarowe) do modelu (8.4). Zadane koordynaty obiektu $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,140)$ mm, $\beta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$. Widok na płaszczyznę pomiarową

W tabeli 8.3 przedstawiono wyniki pomiarów wzorca ME8 dla serii ze zmianą kąta φ . Należy zwrócić uwagę na wyniki pomiaru momentu magnetycznego m_w , odległości z_w i wartości stałego pola tła. Wartości średnie zbliżone są do zadanych, odchylenie standardowe wynosi około 1%. W przypadku pomiaru współrzędnych x_w, y_w błąd jest większy, dla osi y wyraźnie zależny od wartości kąta φ . W tym przypadku błąd najprawdopodobniej wynika ze skończonych wymiarów wzorca, który nie jest dipolem punktowym, podczas gdy płaszczyzna obrotu o kąt φ pokrywała się z osią y ($\beta = 0^\circ$).

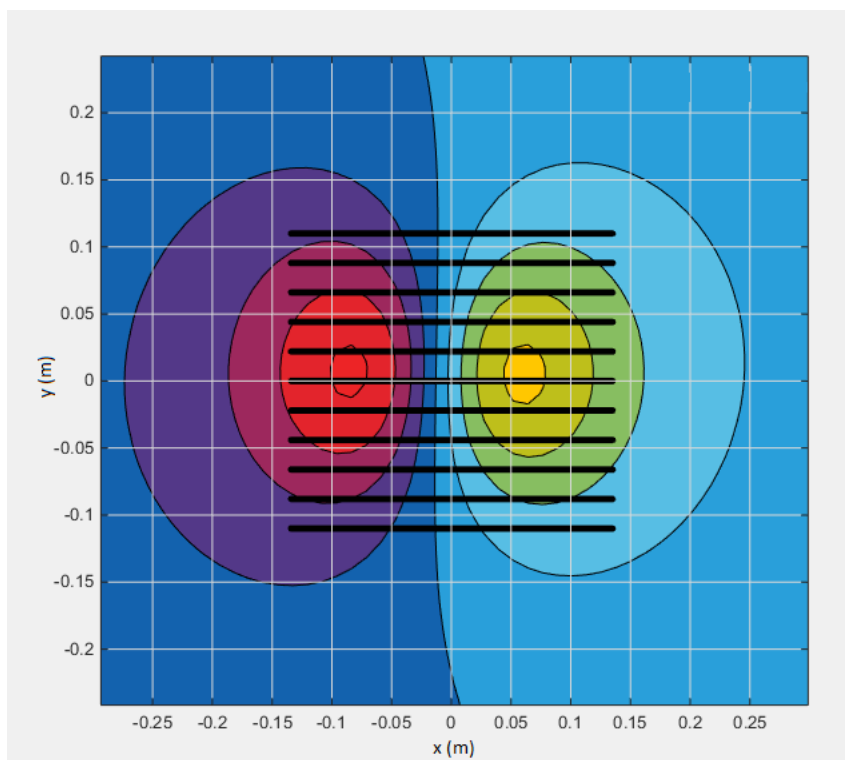
Tabela 8.3 – Wyniki pomiaru wzorca ME8, przypadek serii ze zmianą wartości kąta φ

φ zadane ($^{\circ}$)	m_w (Am^2)	z_w (mm)	x_w (mm)	y_w (mm)	c (μT)	φ_w ($^{\circ}$)	β_w ($^{\circ}$)
0,0	0,584	138	10,00	-23,00	41,47	17,19	121,35
5,0	0,605	139	7,00	-24,00	41,11	20,05	57,30
10,0	0,597	139	7,00	-21,00	41,1	20,05	42,23
15,0	0,605	140	5,00	-20,00	40,96	19,48	40,11
20,0	0,613	140	6,00	-19,00	40,88	23,84	29,22
25,0	0,613	140	5,00	-18,00	40,91	28,07	22,35
30,0	0,615	141	7,00	-15,00	40,69	32,09	13,75
35,0	0,588	139	8,00	-15,00	41,03	35,52	11,46
40,0	0,601	140	8,00	-14,00	40,60	40,11	9,74
45,0	0,607	141	6,00	-13,00	40,26	44,58	6,88
50,0	0,612	140	8,00	-13,00	40,24	50,42	5,80
55,0	0,615	141	8,00	-12,00	40,16	55,98	4,76
60,0	0,617	141	8,00	-10,00	40,06	59,99	4,01
65,0	0,615	141	8,00	-10,00	40,13	64,92	2,29
70,0	0,607	141	9,00	-9,00	40,02	68,93	2,86
75,0	0,618	142	9,00	-9,00	39,86	73,91	2,86
80,0	0,602	142	10,00	-7,00	40,13	80,44	1,72
85,0	0,601	143	10,00	-7,00	39,86	84,80	1,72
90,0	0,597	142	12,00	-6,00	40,02	89,55	1,25
Wartość średnia	0,606	140,5	7,95	-13,95	40,50	-	-
Odchylenie standardowe	0,009	1,2	1,76	5,42	0,49	-	-

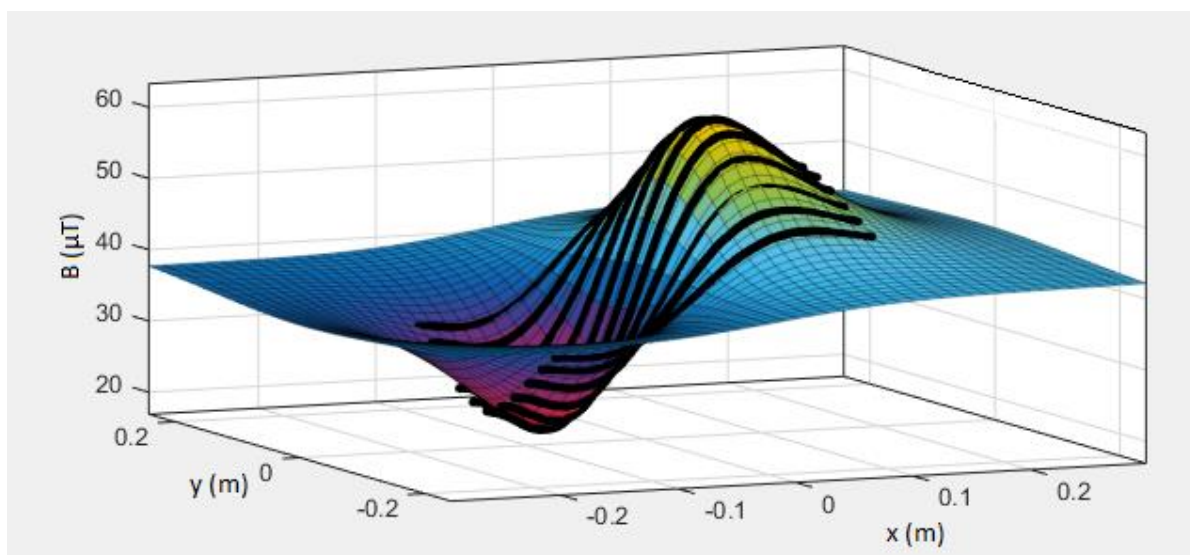


Rys. 8.20. Aproksymacja pomiaru rozkładu indukcji pola magnetycznego wzorca ME8 (czarne linie - wyniki pomiaru) do modelu (8.4). Zadane koordynaty obiektu $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,140)$ mm, $\beta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$. Trójwymiarowy wykres rozkładu indukcji pola magnetycznego B , oraz wykres różnic między punktami pomiarowymi a wynikiem dopasowania

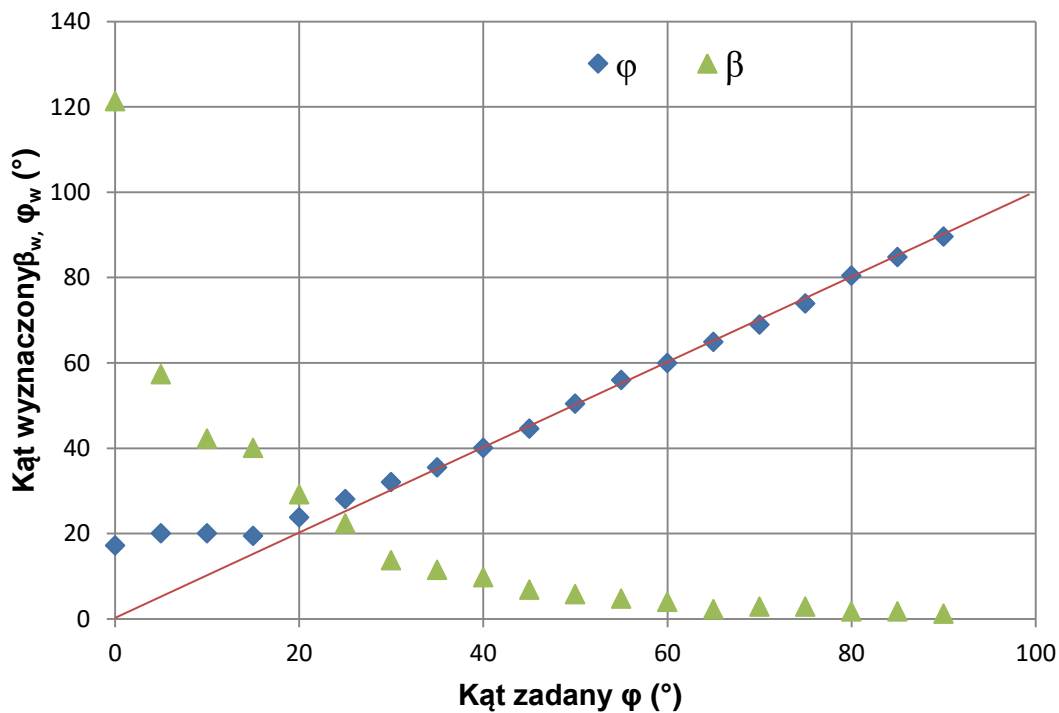
Zależność wyznaczenia kątów β i φ od zadanego kąta φ jest bardziej złożona, i przedstawiono ją na rysunku 8.23. Z wykresu wynika, że wyznaczenie kąta φ jest dokładniejsze, i obarczone wyraźnym błędem jedynie w zakresie $0-20^\circ$. Wyznaczenie kąta β natomiast jest trudniejsze, ponieważ wartość zmierzona dąży asymptotycznie do wartości zadanej w całym zakresie zmiany kąta φ . Analiza układu geometrycznego wskazuje, że dla małych kątów φ wpływ wartości kąta β na dopasowanie modelu jest minimalny, stąd tak duża niepewność jego wyznaczenia. Jednocześnie, dla małych wartości kąta φ wyznaczenie kąta β z dużą niepewnością nie wpływa w sposób istotny na wyznaczenie wartości momentu m_w i współrzędnych przestrzennych x_w, y_w, z_w .



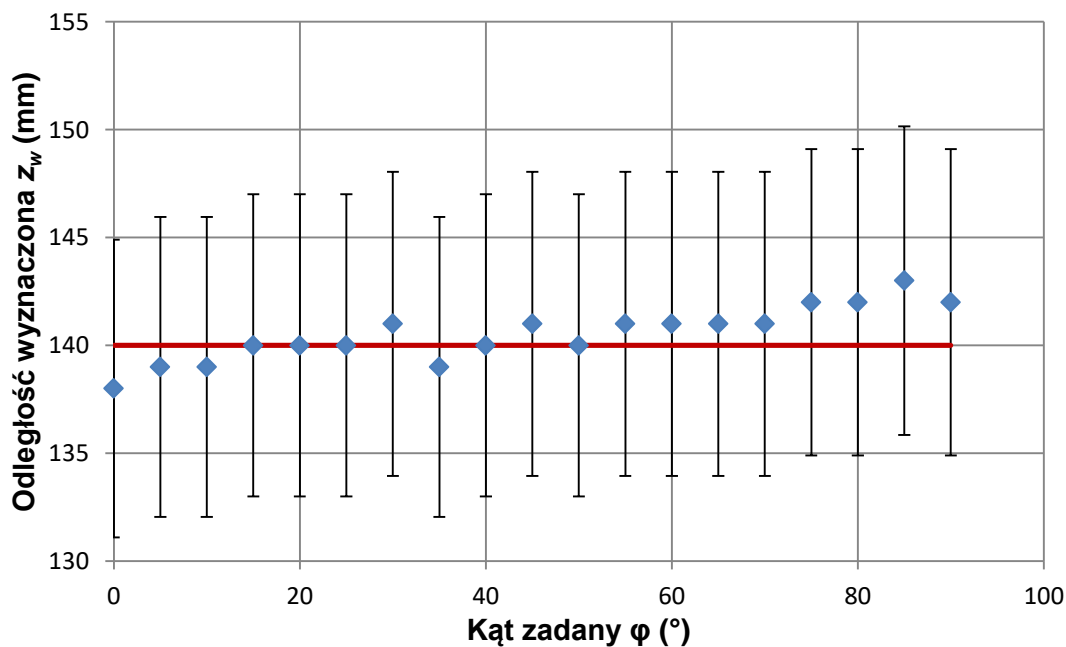
Rys. 8.21. Aproksymacja pomiaru rozkładu indukcji pola magnetycznego wzorca ME8 (czarne linie - linie pomiarowe) do modelu (8.4). Zadane koordynaty obiektu $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,140)$ mm, $\beta = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$)



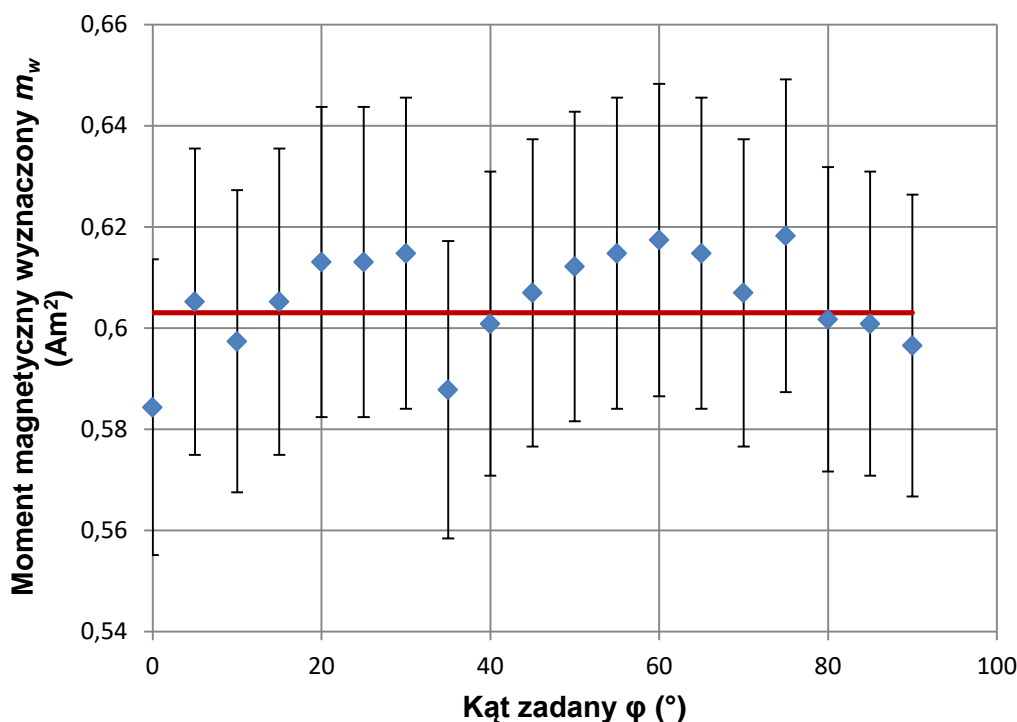
Rys. 8.22. Aproksymacja pomiaru rozkładu indukcji pola magnetycznego wzorca ME8 (czarne linie - wyniki pomiaru) do modelu (8.4). Zadane koordynaty obiektu $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,140)$ mm, $\beta = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$). Trójwymiarowy wykres rozkładu wartości pola. Płaszczyzna pola tła pochylona ze względu na gradient pola magnetycznego – niejednorodność pola tła



Rys. 8.23. Zależność wyznaczonych wartości kątów φ_w , β_w , od zadanego kąta φ . Zadane koordynaty wzorca ME8 $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,140)$ mm



Rys. 8.24. Zależność wyznaczonej wartości odległości z_w od obiektu, od zadanego kąta φ . Zadane koordynaty wzorca ME8 $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,140)$ mm. Czerwona linia – zadana wartość współrzędnej z_0 obiektu



Rys. 8.25. Zależność wyznaczonej wartości momentu magnetycznego m_w obiektu od zadanego kąta φ . Zadane koordynaty wzorca ME8 $(x_0, y_0, z_0) = (0,0,140)$ mm. Czerwona linia – prawidłowa wartość momentu magnetycznego m

Na rysunku 8.24 przedstawiono wykres zależności zmian zmierzonej odległości od obiektu dla różnych zadanych kątów φ . Kąt φ nie ma wyraźnego wpływu na wyznaczenie odległości od ukrytego obiektu ferromagnetycznego. Analogiczna sytuacja zachodzi dla pomiaru momentu magnetycznego (rysunek 8.25). Tu również wpływ kąta φ jest pomijalny w porównaniu do niepewności pomiaru.

Najistotniejsze w wynikach tych badań jest to, że kierunek wektora momentu magnetycznego szukanego obiektu względem płaszczyzny pomiarowej (kąty β, φ) może być dowolny i nie wpływa na najistotniejszą wyznaczaną wartość jaką jest głębokość, na której wykryty obiekt się znajduje.

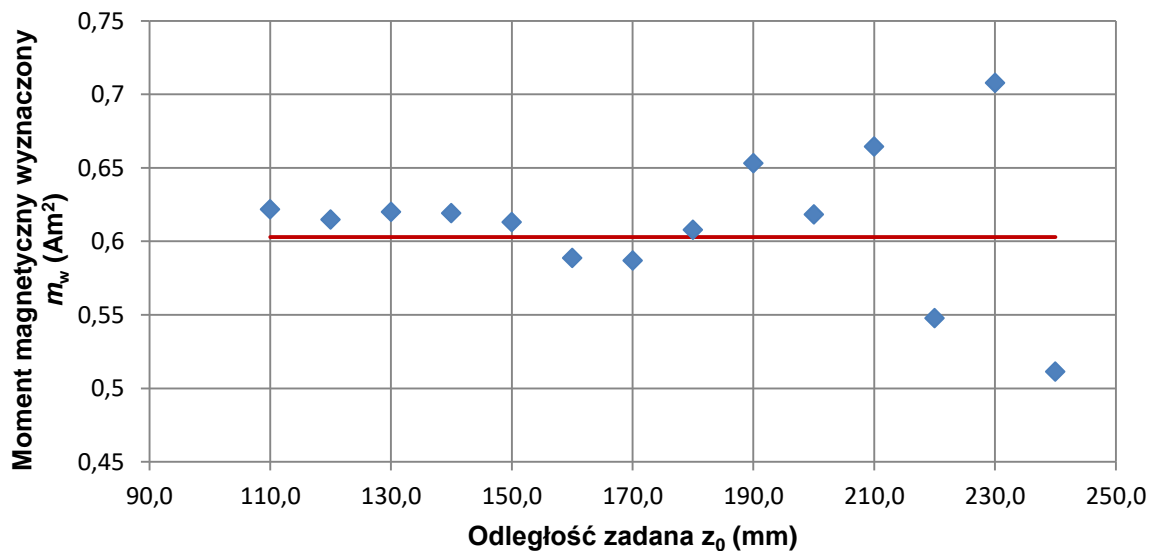
W następnej serii pomiarów wzorzec umieszczony był na stoliku liniowym, umożliwiającym zmianę współrzędnych x, y względem środka płaszczyzny pomiarowej. Serię pomiarów magnetowizyjnych wykonano przy następujących parametrach: współrzędne x_0 zmieniane od -60 do 20 mm (oznaczone w tabeli od 1 do 5), y_0 zmieniane w zakresie od -20 do 40 mm (oznaczone od A do D), $z_0 = 160$ mm, kąt $\beta = 0^{\circ}$, kąt $\varphi = 0^{\circ}$.

W tabeli 8.4 przedstawiono wyniki pomiarów. Widoczne są wyraźne błędy wyznaczenia pozycji x_w , y_w obiektu, najmniejsze w okolicy środka płaszczyzny pomiarowej.

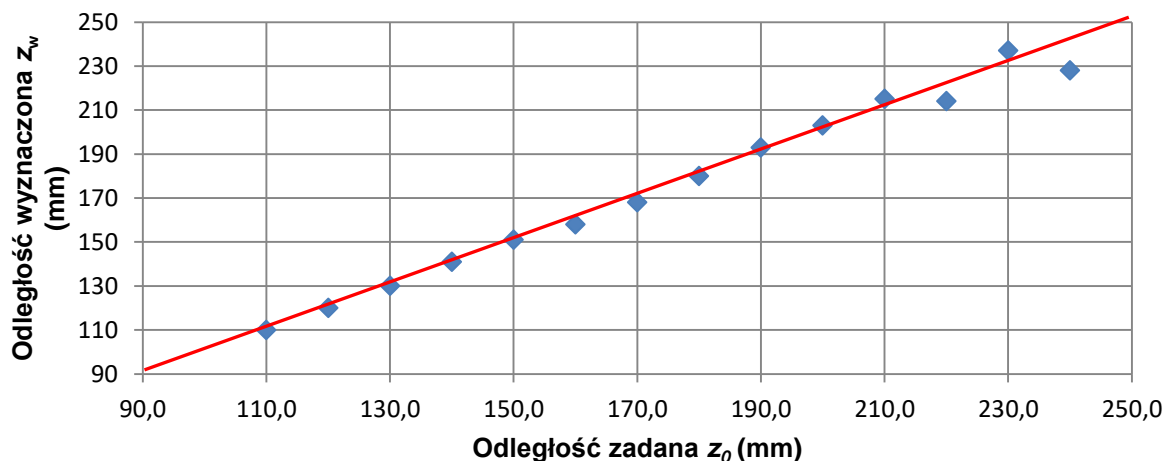
Tabela 8.4. – Wyniki pomiarów wzorca ME 8, seria ze zmianą położenia x,y

Punkt pomiarowy	m_w ($A\cdot m^2$)	Z_w (mm)	x_w (mm)	y_w (mm)	zadane x_0 (mm)	zadane y_0 (mm)	x_w-x_0 (mm)	y_w-y_0 (mm)	c (μT)
A1	0,730	171,00	-69	-33	-60	-20	9	13	40,28
A2	0,669	167,00	-42	-36	-40	-20	2	16	40,98
A3	0,643	164,00	-21	-36	-20	-20	1	16	41,18
A4	0,578	161,00	2	-31	0	-20	2	11	41,82
A5	0,542	158,00	11	-34	20	-20	9	14	42,03
B1	0,643	165,00	-69	0	-60	0	9	0	41,04
B2	0,628	164,00	-49	0	-40	0	9	0	41,10
B3	0,580	161,00	-27	4	-20	0	7	4	41,68
B4	0,640	165,00	5	-5	0	0	5	5	41,01
B5	0,574	160,00	19	-8	20	0	1	8	41,72
C1	0,603	162,00	-63	24	-60	20	3	4	41,56
C2	0,609	162,00	-45	28	-40	20	5	8	41,35
C3	0,608	161,00	-26	35	-20	20	6	15	41,33
C4	0,594	161,00	-8	34	0	20	8	14	41,74
C5	0,601	161,00	10	35	20	20	10	15	41,55
D1	0,550	158,00	-58	49	-60	40	2	9	42,12
D2	0,607	162,00	-37	44	-40	40	3	4	41,00
D3	0,539	157,00	-20	56	-20	40	0	16	41,95
D4	0,534	154,00	-3	58	0	40	3	18	41,80
D5	0,598	162,00	16	56	20	40	4	16	41,62
Wartość średnia	0,603	161,80	-	-	-	-	4,9	10,3	41,44
Odchylenie standardowe	0,047	3,61	-	-	-	-	3,2	5,7	0,44

W serii pomiarów ze zmianą współrzędnej z_0 wzorzec umieszczony był na pionowym stole liniowym. Serię pomiarów magnetowizyjnych wykonano przy następujących parametrach: współrzędne $x_0 = 0$, $y_0 = 0$ mm, z_0 zmieniane w zakresie od 110 do 240 mm, kąt $\beta = 0^\circ$, kąt $\varphi = 0^\circ$. Na rysunku 8.26 podano zależność wartości wyznaczonego momentu magnetycznego m_w obiektu od zadanej odległości z_0 , natomiast na rysunku 8.27 zależność odległości zmierzanej z_w od zadanej z_0 . W tabeli 8.5 zestawiono wyniki pomiarów dla tej serii.



Rys. 8.26. Zależność wartości wyznaczonego momentu magnetycznego obiektu (m_w) od zadanej odległości z_0 . Położenie wzorca ME8 (x_0, y_0, z_0) = (0,0,110:240) mm. Czerwona linia – zadana wartość momentu magnetycznego m



Rys. 8.27. Wykres zależności wartości wyznaczonej odległości od obiektu (współrzędna z_w) od zadanej odległości z_0 . Położenie wzorca ME8 (x_0, y_0, z_0) = (0,0,140:240) mm. Czerwona linia – zadana wartość współrzędnej z_0 obiektu

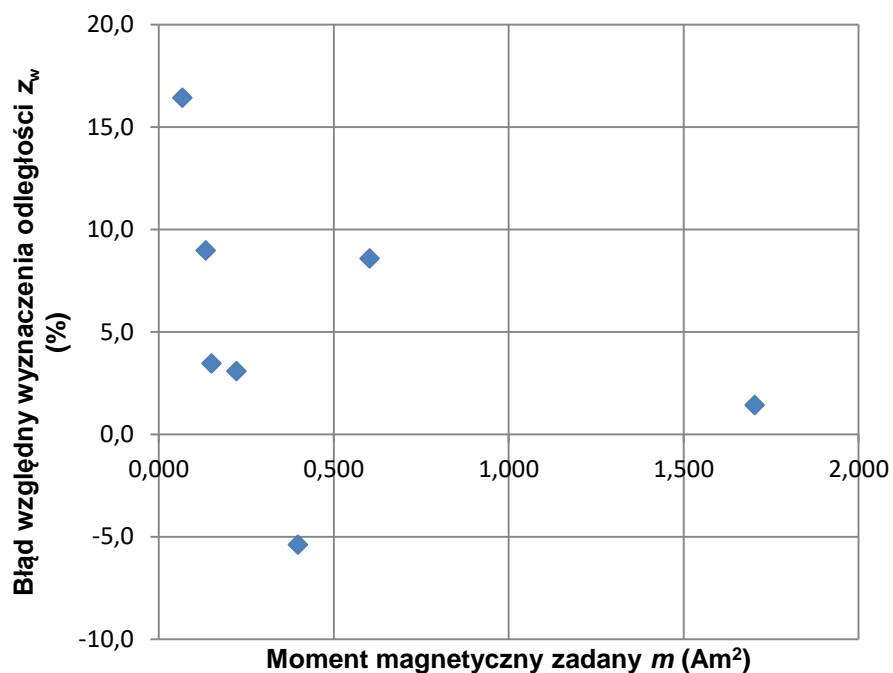
Tabela 8.5 – Wyniki pomiaru wzorca ME8, seria ze zmianą odległości z_0

z_z zadane (mm)	m_w (Am ²)	z_w (mm)	$z_w - z_0$ (mm)	x_w (mm)	y_w (mm)	c (uT)
110,0	0,622	110	0	-4	4	39,44
120,0	0,615	120	0	-6	5	39,54
130,0	0,620	130	0	-3	-3	39,72
140,0	0,619	141	1	-4	12	39,42
150,0	0,613	151	1	-8	17	39,56
160,0	0,589	158	2	-6	12	39,85
170,0	0,587	168	2	-6	12	39,89
180,0	0,608	180	0	4	0	39,79
190,0	0,653	193	3	6	-3	39,5
200,0	0,618	203	3	10	-1	39,5
210,0	0,664	215	5	7	-8	39,26
220,0	0,548	214	6	-8	18	39,84
230,0	0,708	237	7	7	-16	38,99
240,0	0,511	228	12	-13	19	40,18
Wartość średnia	0,612	-	3,0	-1,7	4,9	39,61
Odchylenie standardowe	0,046	-	3,3	6,8	10,2	0,29

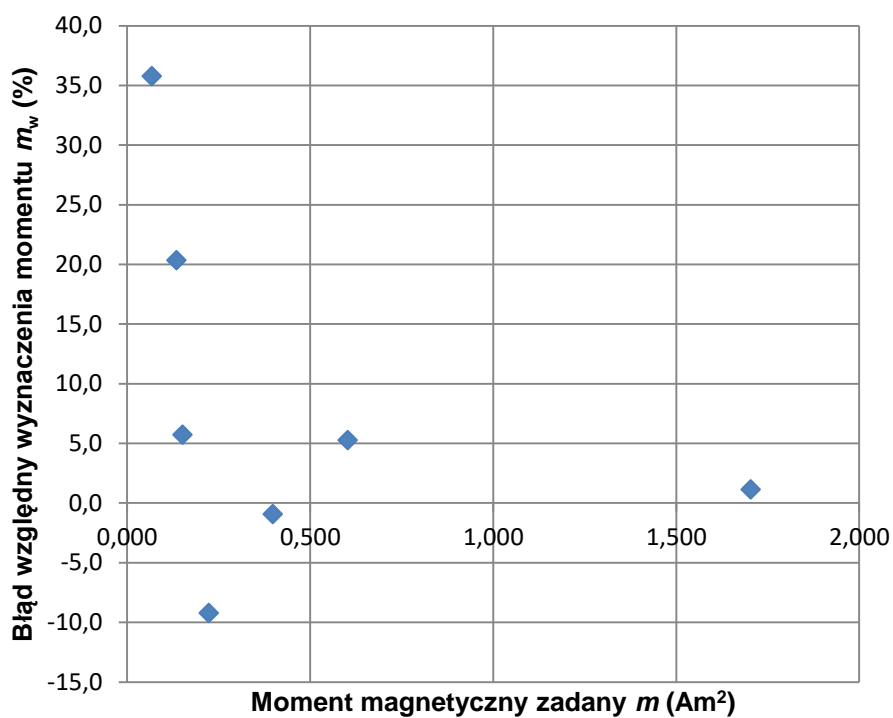
Następnie wykonano pomiary magnetowizyjne dla różnych obiektów w następujących warunkach: współrzędne $x_0 = 0$, $y_0 = 0$ mm, z_0 od 130 do 140 mm (w zależności od wymiarów obiektu), kąt $\beta = 45^\circ$, kąt $\varphi = 45^\circ$. Wyniki przedstawiono w tabeli 8.6.

Tabela 8.6 – Wyniki pomiarów dla próbek o różnych wartościach momentu magnetycznego

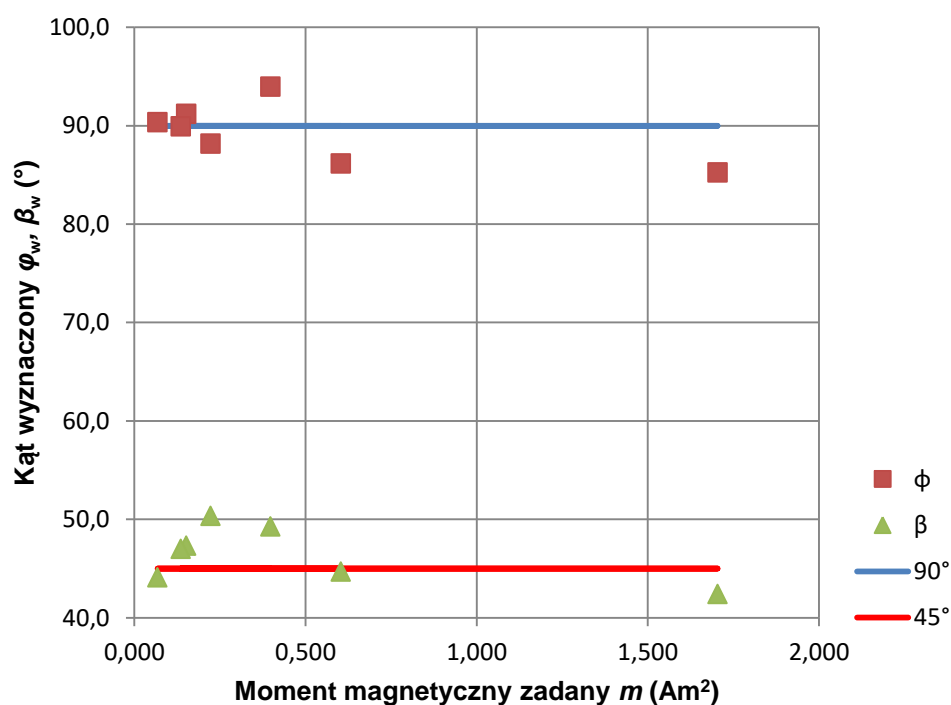
Nazwa obiektu	m (Am ²)	m _w (Am ²)	Δm (%)	z _w (mm)	z ₀ (mm)	Δz (%)	
Wzorzec ME8	0,603	0,571	5,3	128	140	8,6	
Wzorzec ME7	0,068	0,043	35,7	117	140	16,4	
Magnes neodymowy kulka Ø15mm	1,704	1,684	1,1	138	140	1,4	
Magnes ferrytowy walec Ø8x10mm	0,151	0,143	5,7	140	145	3,4	
Magnes alnico walec Ø10x10mm	0,135	0,108	20,3	132	145	9,0	
Granat F1 - korpus	0,223	0,243	-9,2	126	130	3,1	
Granat F1 – korpus, zapalnik, łyżka	0,398	0,402	-0,9	137	130	-5,4	
Wartość średnia	-	-	8,29	-	-	5,22	
Odchylenie standardowe	-	-	13,93	-	-	6,39	
Nazwa obiektu	x _w (mm)	y _w (mm)	c (μT)	φ _w (°)	β _w (°)	Δφ (%)	Δβ (%)
Wzorzec ME8	3	6	41,12	86,2	44,7	4,3	0,7
Wzorzec ME7	-10	3	40,07	90,4	44,1	-0,4	2,0
Magnes neodymowy kulka Ø15mm	1	9	41,6	85,3	42,4	5,3	5,8
Magnes ferrytowy walec Ø8x10mm	-3	12	41,39	91,2	47,3	-1,3	-5,2
Magnes alnico walec Ø10x10mm	-3	6	41,3	90,0	47,0	0,1	-4,4
Granat F1 - korpus	-3	10	41,3	88,2	50,4	2,0	-11,9
Granat F1 – korpus, zapalnik, łyżka	-12	16	41,18	94,0	49,3	-4,4	-9,5
Wartość średnia	-3,86	8,86	41,14	89,3	46,45	0,78	-3,22
Odchylenie standardowe	5,03	4,02	0,46	2,79	2,65	3,10	5,90



Rys. 8.28. Zależność błędu względnego wyznaczenia odległości z_w w zależności od momentu magnetycznego m próbki. Wraz ze wzrostem wartości momentu, błąd maleje



Rys. 8.29. Zależność błędu względnego wyznaczenia momentu m_w w zależności od momentu magnetycznego m próbki. Wraz ze wzrostem wartości momentu, błąd maleje



Rys. 8.30. Zależność wartości wyznaczonych kątów ϕ_w i β_w w zależności od momentu magnetycznego m próbki. Niebieska linia – wartość zadana kąta ϕ , czerwona linia - wartość zadana kąta β

Na rysunkach 8.28- 8.30 przedstawiono wybrane wyniki pomiarów uwzględniające zróżnicowane próbki. Zgodnie z oczekiwaniami, przy wszystkich pozostałych parametrach stałych, zadany moment magnetyczny będący współczynnikiem proporcjonalnym w równaniu (8.4) ma poważny wpływ na błąd względny wyznaczenia poszczególnych parametrów opisujących szukany dipol magnetyczny. Innymi słowy, im mniejsza jest jego wartość, tym większy jest błąd – ponieważ proporcjonalnie mniejsza jest zmierzona amplituda anomalii magnetycznej, która dopasowywana jest do równania (8.4). Warto też zauważyć, że charakter tego błędu jest losowy.

Parametry próbek o wyraźnie większych rozmiarach i skomplikowanym kształcie, takie jak granat F1, wyznaczono z błędem na poziomie podobnym do przypadku małych magnesów trwałych, a więc obiektów bardziej zbliżonych do punktowego modelu dipolowego.

Przedstawione stanowisko pomiarowe pozwala na lokalizację i wyznaczenie parametrów wzorca momentu magnetycznego ME8 o wartości $0,603\text{Am}^2$ do odległości $z = 0,2$ m z niepewnością względną poniżej 10 % (wyniki pomiarów przedstawione na rysunkach 8.26, 8.27).

Na podstawie uproszczenia wzoru 8.4 można przedstawić szacunkową zależność zasięgu wykrywania i lokalizacji obiektów ferromagnetycznych przy wykorzystaniu przedstawionego magnetometru, dla danego poziomu szumów tła:

$$m_n/z^3 = 0,6/(0,2)^3 \left[\text{Am}^2/\text{m}^3 \right] \quad (8.5)$$

przy czym:

z – zasięg wykrywania w m,

m_n – moment magnetyczny poszukiwany w Am^2

Tak więc:

$$z = \sqrt[3]{m_n/75} \quad [\text{m}] \quad (8.6)$$

W warunkach laboratoryjnych ograniczeniem był szum generowany przez wyposażenie laboratorium, na poziomie od 0,1 do 1 μT . W warunkach polowych, poza strefami industrialnymi, szum tła jest znacząco mniejszy, co umożliwia detekcję obiektów przy użyciu magnetometrów typu SQUID i transduktorowych na dużych głębokościach (do 5 m) [1, 110].

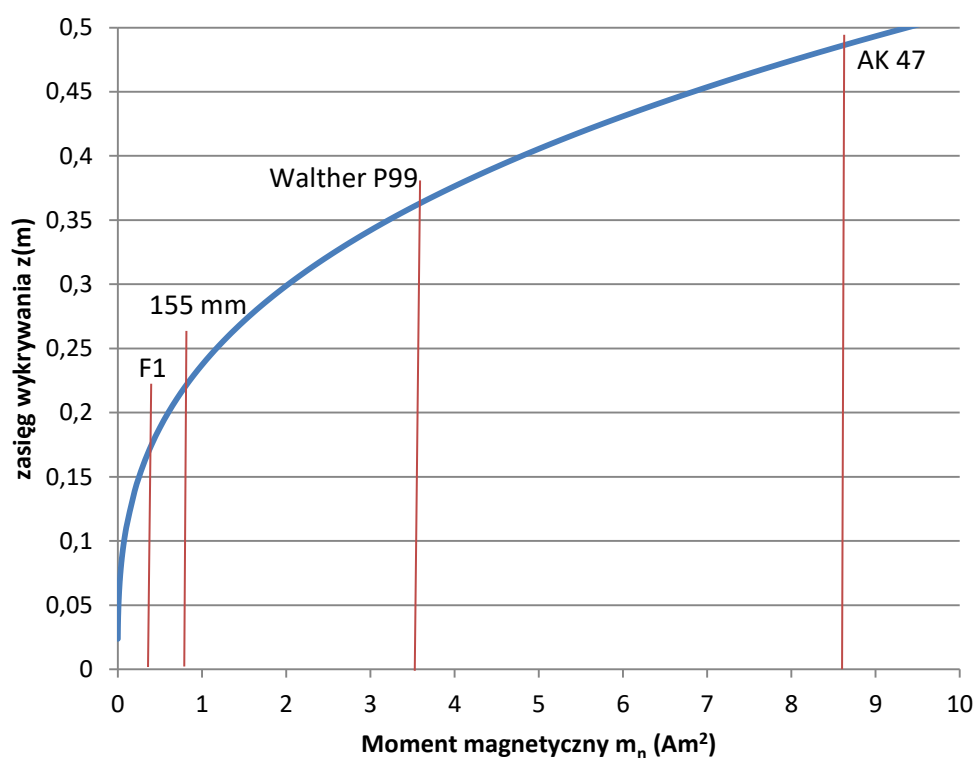
9. Wytyczne do wykrywania i lokalizacji obiektów ferromagnetycznych

Na podstawie zaprezentowanych wyników badań można przedstawić następujące wytyczne do wykrywania i lokalizacji obiektów ferromagnetycznych poprzez analizę pomiarów magnetyzacyjnych:

- Przedstawione stanowisko pomiarowe pozwala na poprawną (z niepewnością względną poniżej 10%) lokalizację i wyznaczenie parametrów nieznanego momentu magnetycznego \mathbf{m} , tj. jego współrzędnych x, y, z , wartości i kierunku wektora momentu magnetycznego. Dla magnetometru o danej czułości, i danych niskoczęstotliwościowych zaburzeń pola tła, otrzymuje się uproszczoną zależność zasięgu wykrywania momentu m o danej wartości od odległości z między obiektem a płaszczyzną pomiarową:

$$z = \sqrt[3]{m_n/w} \quad [\text{m}] \quad (9.1)$$

Przy czym: z – zasięg wykrywania w m, m_n – poszukiwany moment magnetyczny w Am^2 , w – współczynnik stanowiska, dla stanowiska przedstawionego w pracy $w = 75 \text{ A/m}$



Rys. 9.1. Wykres zależności zasięgu poprawnego wyznaczania parametrów ukrytego momentu magnetycznego w zależności od jego wartości [62]

W rezultacie moment m_n o wartości 75 Am^2 zostanie poprawnie wykryty z odległości $z \leq 1 \text{ m}$. Dalsze zwiększenie zasięgu można osiągnąć poprzez pomiar magnetometrem o wyższej rozdzielczości, oraz zmniejszając szum tła, co pozwoli zmniejszyć współczynnik stanowiska w.

Tabela 9.1 – Typowe wartości momentu magnetycznego m dla różnych obiektów ferromagnetycznych [62][111]

Obiekt	Typowa wartość momentu magnetycznego m (Am^2)
Granat ręczny	0,3
Pocisk artyleryjski	0,8
Pistolet	2-4
Karabin	5-10
Samochód osobowy	200
Samochód ciężarowy	2000

- Amplituda zaburzenia generowana przez obiekt jest proporcjonalna do jego momentu magnetycznego i w uproszczeniu odwrotnie proporcjonalna do sześcianu odległości (oś Z). Z tego względu dziesięciokrotne zwiększenie odległości płaszczyzny pomiarowej od danego obiektu spowoduje 10^3 krotny spadek amplitudy zaburzenia. Przedstawione w rozdziale 8 wyniki dotyczą odległości od obiektu rzędu 0,2 m. W celu poprawnego wykrycia i lokalizacji takich obiektów znajdujących się w odległości 2 m należałoby więc zastosować magnetometr o 10^3 razy mniejszej rozdzielczości, przy zapewnieniu poziomu szumu tła na podobnym poziomie.

- Płaszczyzna pomiarowa powinna obejmować całe mierzone, tj. większe od szumu tła, zaburzenie pola generowane przez poszukiwany obiekt. Wyniki przedstawione w tabeli 8.1 i na rysunku 8.6 wskazują na zwiększenie błędu lokalizacji w sytuacji, gdy obszar anomalii wykraczał znacząco poza obrys płaszczyzny pomiarowej. Można to zapewnić poprzez pomiar magnetowizyjny na większym obszarze, a następnie pomiar z większą rozdzielczością przestrzenną w punktach wystąpienia anomalii. W takim przypadku płaszczyzna pomiarowa powinna stanowić kwadrat o boku większym bądź równym szacowanej odległości z od obiektu.

- Wymagana jest odpowiednia rozdzielczość przestrzenna pomiaru magnetowizyjnego, przy czym może być ona niesymetryczna - minimum 10 linii pomiarowych po 100 pkt pomia-

rowych w każdej linii, w obszarze wystąpienia anomalii. Wstępne badania eksperymentalne wskazują na brak poprawy wyznaczenia lokalizacji przy dalszym zagęszczaniu linii pomiarowych [97]. Zmniejszenie rozdzielczości natomiast powoduje niedokładne odwzorowanie kształtu anomalii i tym samym zwiększenie błędu wyznaczania parametrów obiektu.

- W celu poprawnego wyznaczenia współrzędnych XY obiektu przy użyciu metody poszukiwania ekstremów obrazu magnetowizyjnego (rozdział 8.2), zarówno wartość rozdzielczości zastosowanego magnetometru, jak i poziom niskoczęstotliwościowego szumu pola tła powinny być 5 razy mniejsze niż amplituda zaburzenia generowana przez poszukiwany obiekt. Jest to kryterium arbitralne umożliwiające odróżnienie anomalii generowanej przez poszukiwany obiekt od szumu tła.

- W celu poprawnego wyznaczenia wszystkich parametrów poszukiwanego obiektu, tj. współrzędnych x, y, z i wartości oraz kierunku wektora momentu magnetycznego (rozdział 8.5), zarówno wartość rozdzielczości zastosowanego magnetometru, jak i poziom niskoczęstotliwościowego szumu pola tła powinny być 10 razy mniejsze od amplitudy zaburzenia generowanego przez poszukiwany obiekt.

10. Podsumowanie i wnioski końcowe

Zaprezentowana i zwalidowana metoda obliczeń magnetostatycznych MES oparta o rozwijane wspólnie z CSC - IT Center For Science Ltd. w Espoo, Finlandii otwarte oprogramowanie umożliwia symulację układów i urządzeń magnetostatycznych [103] oraz magnetodynamicznych [102]. Oprogramowanie Elmer FEM można też zastosować do innych problemów fizycznych, takich jak przepływ ciepła [104] czy modelowanie mikrofalowe [105].

Opracowana, nowatorska metoda analizy trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych [79] umożliwia zdalne określenie parametrów ukrytego obiektu ferromagnetycznego. Metoda płaszczyznowa, opisana w rozdziale 8.5, pozwala na jednoczesny pomiar położenia obiektu w przestrzeni (współrzędne x,y,z) względem płaszczyzny pomiarowej, jak i wartości i kierunku wypadkowego wektora momentu magnetycznego. Kluczową pozyskiwaną informacją jest głębokość, na której znajduje się ukryty obiekt, ponieważ o ile wszystkie dostępne metody wykrywania obiektów ukrytych umożliwiają podanie koordynat x,y jego położenia, to jego głębokość jest jedynie szacowana. W trakcie przeprowadzonych w pracy pomiarów eksperymentalnych odległość z wyznaczana była z mniejszą niepewnością niż współrzędne x,y ; wszystkie współrzędne natomiast zawierały się w obrysie próbki/objektu badanego. Umożliwia to jednoznaczne określenie położenia ukrytego obiektu ferromagnetycznego. Zautomatyzowanie pomiaru zmniejsza możliwość błędu ludzkiego, jego pasywny charakter natomiast zwiększa bezpieczeństwo w przypadku poszukiwania obiektów niebezpiecznych.

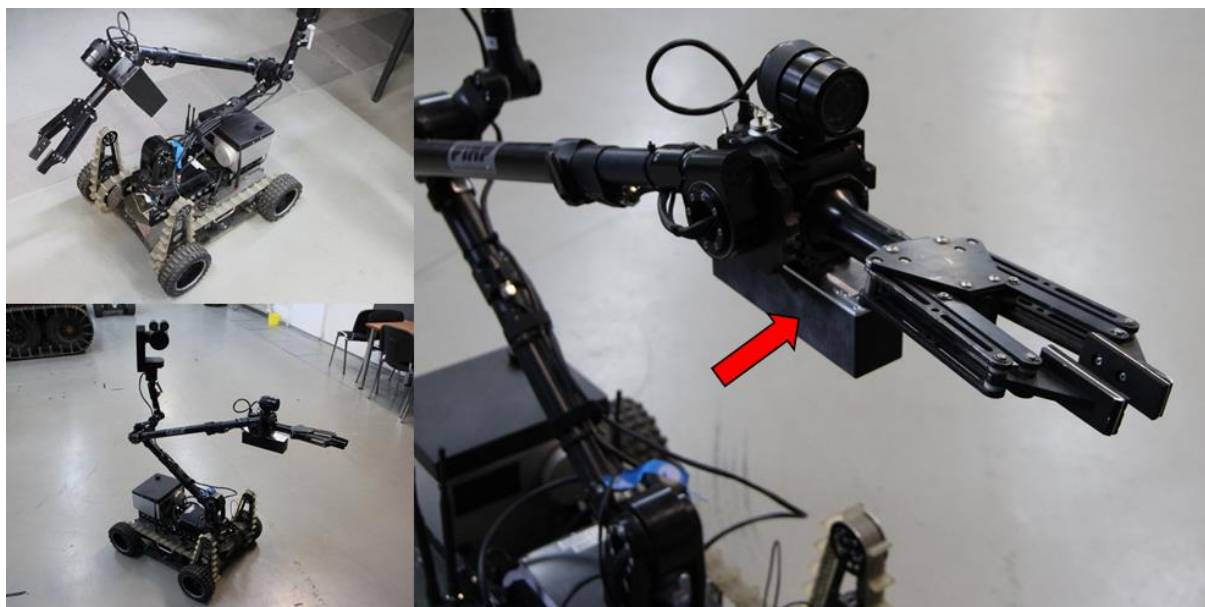
Możliwość określenia wartości i kierunku momentu magnetycznego umożliwia natomiast podjęcie prac nad identyfikacją ukrytego obiektu. Dostępna literatura w tym zakresie wskazuje np. na istnienie wyróżnionych kierunków dla niewybuchów (pociski moździerzowe, bomby lotnicze), które uderzyły w ziemię [63]. Pomiar wartości momentu magnetycznego m obiektu wykonywany jest z mniejszą niepewnością niż w przypadku innych metod tego typu [60].

Metoda detekcji i lokalizacji została zweryfikowana przy wykorzystaniu certyfikowanych wzorców momentu magnetycznego, co umożliwiło ilościową ocenę skuteczności, zakresu stosowalności oraz niepewności wyznaczenia poszczególnych parametrów modelu.

W pracy przedstawiono wytyczne umożliwiające zastosowanie opracowanej metody w praktyce oraz podano zależność zasięgu lokalizacji obiektów od ich momentu magnetycznego.

Część przedstawionych prac zrealizowano w ramach grantu NCBiR: 0015/R/ID 1/2011/01 „Zaprojektowanie mobilnej platformy do wsparcia badań kryminalistycznych miejsc zdarzeń, w których może występować zagrożenie CBRN”. W ramach badań opracowano trójosiowy

magnetometr magnetorezystancyjny oparty o podzespoły produkcji Honeywell, zaimplementowany na robocie mobilnym (rys. 10.1). Wstępne badania zrealizowane przed przekazaniem sprzętu Ministerstwu Spraw Wewnętrznych wskazały na możliwość wykonywania skanów magnetowizyjnych.



Rys. 10.1. Opracowany w ramach grantu NCBiR: 0015/R/ID 1/2011/01 trójosiowy magnetometr magnetorezystancyjny, zaimplementowany na robocie mobilnym przeznaczonym dla Centralnego Laboratorium Kryminalistycznego Policji

Przedstawione w rozdziałach 8.2 i 8.3 uproszczone metody pomiaru odległości [107] i momentu magnetycznego [108] na podstawie rozkładu wartości indukcji magnetycznej w osi obiektu mogą być zastosowane w pomiarach przemysłowych, koniecznych np. przy sortowaniu magnesów trwałych.

11. Kierunki dalszych prac

Przeprowadzone w ramach pracy badania i opracowana metoda analizy obrazów magnetowizyjnych stwarzają podstawy do dalszego rozwoju pasywnych metod wykrywania obiektów ferromagnetycznych. W tym zakresie można wyróżnić następujące kierunki dalszych prac:

1. Sprawdzenia działania metody na obiektach rzeczywistych w warunkach polowych, z wykorzystaniem magnetometrów o większej rozdzielczości. Umożliwi to zwiększenie zasięgu wykrywania obiektów ferromagnetycznych.
2. Zastosowanie metody na zbiorach danych pomiarowych z dużych obszarów morskich, w celu sprawdzenia możliwości określania położenia dużych obiektów, np. wraków statków.
3. Opracowanie metod szybszego/dokładniejszego wykonywania skanów magnetowizyjnych, np. poprzez zastosowanie szeregu lub macierzy czujników pola magnetycznego.
4. Połączenie magnetostatycznego modelowania MES z analizą skanów magnetowizyjnych, w celu opracowania dyskretnego przekształcenia odwrotnego.

Bibliografia

- [1] D. Guelle, Metal detector handbook for humanitarian demining, Office for Official Publications of the European Communities, 2003.
- [2] H. R. Watch, „Landmine monitor report,” International Campaign to Ban Landmines, (annual publication).
- [3] „CROMAC - Croatian mine action centre,” [Online]. Available: <https://www.hcr.hr/en/>. [Data uzyskania dostępu: 28 8 2017].
- [4] „International Comitee of Red Cross - Explosive remnants of war,” [Online]. Available: <https://www.icrc.org/en/document/explosive-remnants-of-war>. [Data uzyskania dostępu: 28 8 2017].
- [5] „Internatiolnal Campaign to Ban Landmines,” [Online]. Available: <http://www.icbl.org/en-gb/the-treaty/treaty-status.aspx>. [Data uzyskania dostępu: 28 8 2017].
- [6] „UNICEF,” [Online]. <https://www.unicef.org/sowc96pk/mines.htm>. [Data uzyskania dostępu: 28 8 2017].
- [7] „United Nations/Demining,” [Online]. Available: <http://www.un.org/en/sections/issues-depth/demining/index.html>. [Data uzyskania dostępu: 28 8 2017].
- [8] M. K. Habib, Humanitarian Demining, InTech Education and Publishing, 2008.
- [9] K. Nonami, S. Masunaga, D. Waterman, H. Aoyama i Y. Takada, „Mine Detection Robot and Related Technologies for Humanitarian Demining,” w *Humanitarian Demining*, InTech, 2008.
- [10] UNMAS, „International Mine Action Standards,” 2001.
- [11] „Global Security - IED,” [Online]. Available: <http://www.globalsecurity.org/military/intro/ied.htm>. [Data uzyskania dostępu: 28 8 2017].
- [12] H. R. W. B. Paper, „Cluster Munitions a Foreseeable Hazard in Iraq,”

- [Online]. Available:
<https://www.hrw.org/background/arms/cluster031803.htm>. [Data uzyskania dostępu: 28 8 2017].
- [13] C. Whitlock, „Washington Post - Number of U.S. casualties from roadside bombs in Afghanistan skyrocketed from 2009 to 2010,” 25 1 2011. [Online]. Available:
<http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2011/01/25/AR2011012506691.html>. [Data uzyskania dostępu: 28 8 2017].
- [14] „North Atlantic Treaty Organization,” 20 11 2015. [Online]. Available:
http://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_72809.htm. [Data uzyskania dostępu: 28 8 2017].
- [15] R. McGrath, *Landmines and unexploded ordnance: A resource book*, United Kingdom: Pluto Press, 2000.
- [16] L. Monim i A. Gallimore, *The Devils Gardens: A History of Landmines*, London: Random House, 2002.
- [17] U. Nations, „Convention On The Prohibition Of The Use, Stockpiling, Production And Transfer Of Anti-Personnel Mines And On Their Destruction,” 18 9 1997. [Online]. Available:
http://www.un.org/Depts/mine/UNDocs/ban_trty.htm.
- [18] „Coalition Military Fatalities By Year,” [Online]. Available:
<http://icasualties.org/oef/>. [Data uzyskania dostępu: 28 8 2017].
- [19] T. R. Clem, „High-Tc SQUID gradiometer for mobile magnetic anomaly detection,” tom 11, nr 1, pp. 871-875, 2001.
- [20] S. Billings, „Discrimination and Classification of Buried Unexploded Ordnance Using Magnetometry,” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, tom 42, nr 6, 2004.
- [21] S. Billings, „Field measurements of induced and remanent moments of unexploded ordnance and shrapnel,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, tom 47, nr 3, 2009.

- [22] A. Chabert, „The Hydrographic Society - Recent developments in marine geophysical methods for UXO detection,” [Online]. Available: [http://www.ths.org.uk/documents/ths.org.uk/downloads/presentation_4_-_anne_chabert_\(fugro_emu\).pdf](http://www.ths.org.uk/documents/ths.org.uk/downloads/presentation_4_-_anne_chabert_(fugro_emu).pdf). [Data uzyskania dostępu: 9 9 2017].
- [23] S. Tumański, „Magnetovision system: New method of investigating steel sheets,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, tom 160, pp. 165-166, 1996.
- [24] K. Takahashi, „Metal Detector Pinpointing Accuracy Under Field Conditions,” *Journal of Conventional Weapons Destruction*, tom 15, nr 3, 2011.
- [25] H. Kronmüller i S. Parkin, *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials*, Wiley, 2007.
- [26] S. Tumanski, *Handbook of Magnetic Measurements*, CRC Press, 2011.
- [27] P. Hongfeng, „Integrated Compensation of Magnetometer Array Magnetic Distortion Field and Improvement of Magnetic Object Localization,” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, tom 52, nr 9, pp. 5670-5676, 2014.
- [28] L. Beran, „Incorporating Uncertainty in Unexploded Ordnance Discrimination,” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, tom 49, nr 8, pp. 3071-3080, 2011.
- [29] S. Billings i D. Wright, „Optimal total-field magnetometer configuration for near-surface applications,” *Leading Edge*, tom 28, nr 5, pp. 522-527, 2009.
- [30] W. Maver, „Electricity, its History and Progress,” *The Encyclopedia Americana; a library of universal knowledge*, tom 10, 1918.
- [31] M. Faraday, „Experimental researches in electricity,” *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, tom 122, pp. 125-162, 1832.
- [32] J. Al-Khalili, „The birth of the electric machines: a commentary on Faraday (1832) ‘Experimental researches in electricity’,” *Philosophical transactions of the Royal Society A*, tom 373, 2015.

- [33] J. C. Maxwell, „A dynamical theory of the electromagnetic field,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, tom 155, pp. 459-513, 1865.
- [34] J.C. Maxwell, *Treatise on electricity and magnetism*, Oxford: Clarendon Press, 1873.
- [35] A. Szewczyk, A. Wiśniewski, R. Puźniak i H. Szymczak, *Magnetyzm i nadprzewodnictwo*, Warszawa: PWN, 2017.
- [36] B. D. Bartolo, *Classical theory of electromagnetism*, World Scientific Publishing Company Incorporated, 2004.
- [37] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, John Wiley & Sons, 1998.
- [38] J. B. Tatum, „Chapter 17 Magnetic Dipole Moment,” w *Electricity and Magnetism*, University of Victoria, 2007.
- [39] D. K. Cheng, *Field and wave electromagnetics*, Reading, Massachusetts: Addison, 1989.
- [40] A. Solin, M. Kok, N. Wahlström, T. B. Schön i S. Särkkä, *Modeling and interpolation of the ambient magnetic field by Gaussian processes.*, Pre-print arXiv:1509.04634, 2015.
- [41] S. Blundell, *Magnetism in Condensed Matter*, 2003.
- [42] Y. M. Shi, D. C. Jiles i A. Ramesh, „Generalization of hysteresis modeling to anisotropic and textured materials,” *Journal of magnetism and magnetic materials*, tom 187, nr 1, pp. 75-78, 1998.
- [43] D. C. Jiles i D. L. Atherton, „Theory of ferromagnetic hysteresis,” *Journal of magnetism and magnetic materials*, tom 61, nr 1-2, pp. 48-60, 1986.
- [44] M. Owen, „Unexploded Ordnance: What is the risk and do we understand it?,” Skanska, 2016.
- [45] C. Garret, *Modern Metal Detectors (second edition)*, Ram Publishing Company, 1995.
- [46] C. Sigrist i C. Bruschini, „Metal Detectors for Humanitarian Demining: a

- Patent Search and Analysis,” Swiss Federal Office for Education and Science , Bern, 2002.
- [47] IMAS, „International Mine Action Standards,” 2001 (updated). [Online]. Available: <https://www.mineactionstandards.org/>. [Data uzyskania dostępu: 9 9 2017].
- [48] A. Smith, Database of Demining Accidents (DDAS): software and data, GICHD, 2001.
- [49] H. Burke, Handbook of magnetic phenomena, Springer Science & Business Media, 2012.
- [50] H. Schubert i A. Kuznetsov, Detection of explosives and landmines - methods and field experience, Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [51] P. Ripka, „Review of fluxgate sensors,” *Sensors and Actuators A: Physical* , tom 33, nr 3, pp. 129-141, 1992.
- [52] J. Merayo, P. Brauer i F. Primdahl, „Triaxial fluxgate gradiometer of high stability and linearity,” *Sensors and Actuators A: Physical*, tom 120, nr 1, pp. 71-77, 2005.
- [53] R. Prigl, „A high precision magnetometer based on pulsed NMR,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, tom 374, nr 1, pp. 118-126, 1996.
- [54] C. King, Jane's Mines and Mine Clearance, United Kingdom: Jane's Information Group, (annual publication).
- [55] H. Nelson i J. McDonald, „Multisensor towed array detection system for UXO detection,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, tom 39, nr 6, pp. 1139-1145, 2001.
- [56] J. Clarke i A. Braginski, The SQUID Handbook: Applications of SQUIDS and SQUID Systems, John Wiley & Sons, 2006.
- [57] S. Billings i D. Wright, „Interpretation of high-resolution low-altitude

helicopter magnetometer surveys over sites contaminated with unexploded ordnance,” *Journal of Applied Geophysics*, tom 74, nr 4, 2010.

- [58] P. Frydrych i R. Szewczyk, „Two-axis, miniature fluxgate sensors,” *IEEE Transactions on Magnetics*, tom 48, nr 4, pp. 1485-1488, 2012.
- [59] J. Vyhnánek, M. Janosek i P. Ripka, „AMR gradiometer for mine detection,” *Sensors and Actuators A: Physical*, tom 186, pp. 100-104, 2012.
- [60] C. Wang, „A modified magnetic gradient contraction based method for ferromagnetic target localization,” *Sensors*, tom 16, nr 12, p. 2168, 2016.
- [61] S. Billings i D. Wright, „Optimal sensor configuration for total-field magnetometers,” *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pp. 1127-1131, 2008.
- [62] S. Billings, „Magnetic models of unexploded ordnance,” *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, tom 44, nr 8, pp. 2115-2123, 2006.
- [63] S. Billings i L. Beran, „Experimental measurements of shock induced changes to the magnetization of unexploded ordnance,” *Journal of Applied Geophysics*, tom 105, pp. 138-146, 2014.
- [64] A. Barto i C. Clausen, „A magnetometer survey with electronic positioning control and calculator-plotter system,” *Historical Archaeology*, tom 9, nr 1, pp. 26-40, 1975.
- [65] Z. Chang-Da, „Airborne Tensor Magnetic Gradiometry - The Latest Progress Of Airborne Magnetometric Technology,” *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, tom 5, 2006.
- [66] R. Edwards, *Ore deposit geology and its influence on mineral exploration*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [67] L. M. Alva-Valdivia, „Magnetic mineralogy and properties of the Pena Colorada iron ore deposit, Guerrero Terrane: implications for magnetometric modeling,” *Journal of South American Earth Sciences*, tom 13, nr 4, pp. 415-428, 2000.
- [68] S. Tumanski i M. Stabrowski, „The magnetovision method as a tool to

investigate the quality of electrical steel,” *Measurement Science and Technology*, tom 9, nr 3, p. 488, 1998.

- [69] S. Tumanski, „The experimental verification of the condition of the magnetic material caused by different technological processes,” *Journal of magnetism and magnetic materials*, tom 215, pp. 749-752, 2000.
- [70] S. Tumanski i A. Liszka, „The methods and devices for scanning of magnetic fields,” *Journal of magnetism and magnetic materials*, tom 242, pp. 1253-1256, 2002.
- [71] A. Michalski, „Magnetovision [magnetic field scanning system],” *IEEE instrumentation & measurement magazine*, tom 5, nr 3, pp. 66-69, 2002.
- [72] P. Baudouin, Y. Houbaert i S. Tumanski, „Magnetic local investigations of non-oriented electrical steels after tensile deformation,” *Journal of magnetism and magnetic materials*, tom 254, pp. 32-35, 2003.
- [73] A. Markin, N. Syromyatnikov i B. Cherkovich, „Magnetovisor for obtaining the images of the surfaces, emitting charged particles,” *Atomnaya Energiya*, tom 96, nr 4, pp. 285-291, 2004.
- [74] J. Kaleta, J. Bomba, D. Lewandowski i P. Wiewiórski, „Smart magnetic materials and magnetoresistive sensors in controlling of mechanical structures,” w *Smart Structures and Materials 2006: Smart Sensor Monitoring*, 2006.
- [75] J. Kaleta, D. Lewandowski, P. Wiewiórski, „3D Magnetovision Scanner as a Tool for Investigation of Magnetomechanical Principles,” *Solid State Phenomena*, tom 154, pp. 181-186, 2009.
- [76] J. Kaleta, P. Wiewiórski i D. Lewandowski, „The advanced magnetovision system for Smart application,” w *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2010*, 2010.
- [77] A. Czernuszewicz, J. Kaleta, D. Lewandowski i P. Wiewiórski, „Study Into The Magnetic Field For A Magnetocaloric Cooling System With The Use Of

- Magnetovision,” *Transactions of FAMENA*, tom 37, nr 4, pp. 55-64, 2013.
- [78] J. Kaleta, „Magnetovision Method for Determining the Martensite Phase in the Austenite in Cylindrical and Spherical Objects as a Result of the Cyclic Loads,” *Key Engineering Materials*, tom 598, pp. 86-91, 2014.
- [79] M. Nowicki i R. Szewczyk, „Ferromagnetic Objects Magnetovision Detection System,” *Materials*, tom 6, nr 12, pp. 5593-5601, 2013.
- [80] M. Nowicki i R. Szewczyk, „Application of Magnetovision for Detection of Dangerous Objects,” *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, tom 7, nr 2, pp. 42-51, 2013.
- [81] „Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH,” [Online]. Available: <http://www.magnet-physik.de/messtechnik-normale.html?L=1>. [Data uzyskania dostępu: 9 9 2017].
- [82] E. Steingroever i G. Ross, *Magnetic measuring techniques*, Köln, Germany: Magnet-Physik Dr. SteinGroever GmbH, 2008.
- [83] „Enes,” [Online]. Available: <http://www.magnesy.eu/>. [Data uzyskania dostępu: 9 9 2017].
- [84] M. Nowicki i R. Szewczyk, „Magnetowizja słabych pól magnetycznych w systemach zapewnienia bezpieczeństwa publicznego,” *Pomiary Automatyka Robotyka*, tom 16, nr 12, pp. 181-186, 2012.
- [85] M. Nałęcz i J. Jaworski, *Miernictwo magnetyczne*, Warszawa: WNT, 1968.
- [86] M. Nowicki, „Budowa stanowiska do badania magnetorezystancyjnych czujników pola magnetycznego,” *Praca dyplomowa magisterska*, 2011.
- [87] M. Nałęcz, *Metody wytwarzania jednorodnych małych pól magnetycznych*, Rozpr. Elektrot., 1957.
- [88] M. Nowicki i R. Szewczyk, „Magnetovision Scanner System Investigation of Magnetic Field Disturbance Sources,” *Mechatronics - Ideas for Industrial Application*, tom 317, pp. 353-361, 2015.
- [89] M. Nowicki i R. Szewczyk, „Modelling Of The Magnetovision Image With The Finite Element Method,” w *Proceedings of the 20th International*

conference on Applied Physics Of Condensed Matter (APCOM2014), Strbskie Pleso, 2014.

- [90] H. Helmholtz, *Fundamentals of Electricity and Magnetism* (1849), Berlin: Loeb, 1949.
- [91] S. Trout, „Use of Helmholtz coils for magnetic measurements,” *IEEE Transactions on Magnetics*, tom 24, nr 4, pp. 2108-2111, 1988.
- [92] Lake Shore Cryotronics, Inc, „Measuring Permanent Magnet Characteristics with a Fluxmeter and Helmholtz Coil,” [Online]. Available: <http://www.lakeshore.com/Documents/Measuring%20Perm%20Magnets%20App%20Note.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 9 9 2017].
- [93] J. Z. Xu i I. Vasserman, „A New Helmholtz Coil Permanent Magnet Measurement System,” w *Proceedings of ICALEPCS2011*, Grenoble, France, 2011.
- [94] Serviciencia, S.L., „Magnetic Moment easy measurement,” Application Note: NAS01-i.
- [95] Honeywell, „Smart Digital Magnetometer HMR2300,” [Online]. Available: https://aerospace.honeywell.com/~-/media/aerospace/files/datasheet/smartdigitalmagnetometerhmr2300_ds.pdf. [Data uzyskania dostępu: 9 9 2017].
- [96] M. Nowicki i R. Szewczyk, „Application of Magnetovision Scanning System for Detection of Dangerous Objects,” *Solid State Phenomena*, Tomy 1-2, pp. 355-360, 2015.
- [97] M. Nowicki i R. Szewczyk, „Magnetovision Scanning System for Detection of Dangerous Objects,” *Acta Physica Polonica A*, tom 126, nr 1, pp. 382-383, 2014.
- [98] P. Raback, „Elmer Models Manual,” CSC-IT Centre for Science, Finland, 2014.
- [99] J. Schoberl et al., „Netgen/NGSolve: Mesh Generator and Finite Element Solver,” 15 2 2007. [Online]. Available: https://www.ices.utexas.edu/media/downloadables/Netgen_presentation.pdf.

[Data uzyskania dostępu: 9 9 2017].

- [100] A. Praczkowska, M. Nowicki i R. Szewczyk, „Modelling and validation of magnetic field distribution in permanent magnet system,” *International Journal of Scientific and Engineering Research*, tom 6, nr 7, pp. 363-368, 2015.
- [101] R. Szewczyk, J. Salach, J. Ruokolainen, P. Råback, K. Stefko i M. Nowicki, „Noise Assessment in Whitney Elements Based Forward Transformation for High Resolution Eddy Current Tomography,” *Progress in Automation, Robotics and Measuring Techniques Volume 3 Measuring Techniques and Systems*, tom 352, pp. 219-224, 2015.
- [102] R. Szewczyk, J. Salach, J. Ruokolainen, P. Råback i M. Nowicki, „Forward Transformation For High Resolution Eddy Current Tomography Using Whitney Elements,” w *Proceedings of the 20th International conference on Applied Physics Of Condensed Matter (APCOM2014)*, Strbskie Pleso, 2014.
- [103] A. Praczkowska, M. Nowicki, I. Korobiichuk, R. Szewczyk i J. Salach, „Моделирование и верификация распределения магнитного поля постоянных магнитов,” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, tom 6, nr 5, pp. 1-8, 2015.
- [104] A. Praczkowska, M. Nowicki i J. Pełka, „FEM Modelling and Thermography Validation of Thermal Flow,” w *Recent Advances in Systems, Control and Information Technology, Proceedings of the International Conference SCIT 2016*, Warszawa, 2017.
- [105] J. Szalatkiewicz et al., „Advances in FEM Based Modeling of Waveguide and Waveguide Systems for Microwave Applications, Using Newly Developed Open Source Software,” w *International Conference on Systems, Control and Information Technologies 2016*, Springer International Publishing, 2016.
- [106] M. Nowicki i R. Szewczyk, „Modeling of Earth Magnetic Field Disturbances Induced by Ferromagnetic Objects,” *Journal of mechanics*

engineering and automation, tom 5, nr 7, pp. 411-414, 2015.

- [107] M. Nowicki, „Distance determination from the magnetic dipole with magnetometry and Levenberg-Marquardt algorithm,” *Advanced Mechatronics Solutions*, pp. 509-514, 2016.
- [108] M. Nowicki, D. Jackiewicz i R. Szewczyk, „Magnetic Moment of Permanent Magnet Measurement With Nonlinear Least Squares Fitting Method,” *Journal of Electrical Engineering-Elektrotechnicky Casopis*, tom 66, nr 7, pp. 54-57, 2015.
- [109] C. Nappi i E. Sarnelli, „Magnetic dipole imaging by a scanning magnetic microscope,” *Measurement Science and Technology*, tom 19, 2008.
- [110] W. Doll, „A Ground-Based Squid Magnetometer,” w *18th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2005.
- [111] S. Marshall, „Vehicle detection using a magnetic field sensor,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, tom 27, nr 2, pp. 65-68, 1978.