

Magnetowizja słabych pól magnetycznych w systemach zapewnienia bezpieczeństwa publicznego

Michał Nowicki*, Roman Szewczyk**

*Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Warszawska

**Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

Streszczenie: W artykule przedstawiono zastosowanie pomiaru magnetowizyjnego do pasywnego wykrywania obiektów niebezpiecznych. Zbudowano układ pomiarowy do badania rozkładu wektorów indukcji pola magnetycznego. Przeprowadzono pomiary zaburzeń pola ziemskiego powodowanego przez przedmioty ferromagnetyczne. Wykazano możliwość wykrycia wybranych obiektów niebezpiecznych i określenia ich położenia.

Słowa kluczowe: magnetowizja, czujniki magnetorezystancyjne, obrazowanie magnetyczne

1. Wprowadzenie

Magnetowizja polega na pomiarze rozkładu wartości indukcji pola magnetycznego w określonej płaszczyźnie lub w przestrzeni i przedstawieniu go za pomocą obrazu 2D (dla płaszczyzny) lub 3D (dla przestrzeni). Nazwa pochodzi od analogii z termowizją, ponieważ kolor w obrazie magnetowizyjnym odpowiada wartości indukcji pola magnetycznego lub wartości natężenia pola magnetycznego w danym punkcie. Istnieje również możliwość uzyskania obrazu monochromatycznego, w postaci izol linii. Najprostszym urządzeniem do obrazowania jest dwuwymiarowy układ skanujący XY, przemieszczający po meandrującej ścieżce w określonym, zazwyczaj prostokątnym obszarze, czujnik hallotronowy lub magnetorezystancyjny [4].

Możliwe jest również zbudowanie (metodami typowymi dla produkcji układów scalonych) układu dwuwymiarowego z czujnikami rozmieszczonymi w określonej liczbie rzędów i kolumn, na wzór matrycy CCD. Układ taki nie musi być ruchomy, ma jednak określony na stałe, ograniczony obszar pomiarowy [7].

Najodpowiedniejszymi czujnikami na potrzeby magnetowizji są cienkowarstwowe czujniki magnetorezystancyjne. Charakteryzują się one zarówno wysoką czułością, jak i niewielkimi wymiarami – typowo 1 mm × 1 mm [3]. Rozdzielczość uzyskiwanych obrazów zależy bezpośrednio od liczby wyznaczonych punktów pomiarowych. W przypadku układu XY z pojedynczym czujnikiem decydującym ograniczeniem wpływającym na czas pomiaru jest liczba linii, wzdłuż których porusza się czujnik. Możliwe jest uzyskanie obrazu „televizyjnego”, tj. sygnału ciągłego (lub znacznej liczby punktów pomiarowych) wzdłuż ograniczonej liczby linii skanowania.

Dotychczasowe badania nad magnetowizją skupiały się na możliwości pomiaru naprężeń w materiałach ferromagne-

tycznych, w odniesieniu do magnetosprężystego efektu Villariiego [5]. Przez pomiar natężenia pól magnetycznych przy powierzchni obciążanych próbek uzyskiwano dobrą korelację uzyskanych obrazów magnetowizyjnych z rozkładem naprężeń wewnątrz badanych elementów. Pozwoliło to na nieniszczące badania procesów zmęzeniowych w warunkach cyklicznego obciążenia w zakresie wysokiej częstotliwości. W przypadku wykorzystania efektu Villariiego nie stosowano zewnętrznych źródeł pola magnetycznego [6].

Następnym obiecującym zastosowaniem magnetowizji są badania nieniszczące materiałów ferromagnetycznych, w szczególności stali. W takim przypadku rozkład natężenia pola magnetycznego może być wykorzystany do badania właściwości materiału. Uzyskiwano dobrą korelację między rozkładem ziaren w próbce a obrazem magnetowizyjnym tuż przy jej powierzchni [8]. Istnieje również możliwość wykonania mapy domen magnetycznych i współczynnika strat mocy oraz wykrycia zakłóceń struktury krystalicznej, mikropęknięć i naprężeń powstałych przy obróbce. Najważniejszą zaletą magnetowizji jest możliwość badania elementów (również pokrytych powłokami) w trakcie produkcji, bez specjalistycznych przygotowań próbek do badań niszczących. Pozwala to na szybkie wykrycie elementów o niepożądanych właściwościach.

W artykule przedstawiono próbę zastosowania pomiaru magnetowizyjnego do opracowania metody pasywnego wykrywania metalowych obiektów niebezpiecznych. Uzyskanie obrazów magnetowizyjnych nieznanymi obiektami z większej odległości i o większej powierzchni wymagało opracowania nowych metod pomiaru i przetwarzania wyników.

Zastosowanie pasywnego systemu magnetowizyjnego jest o tyle istotne, że aktywne systemy wykrywacze metalu mogą spowodować reakcję specjalnie do tego celu konstruowanych zapalników – szczególnie w przypadku nowszych generacji min lądowych, reagujących na obecność aktywnych wykrywaczy, co stanowi bezpośrednie zagrożenie dla sapera [1, 2].

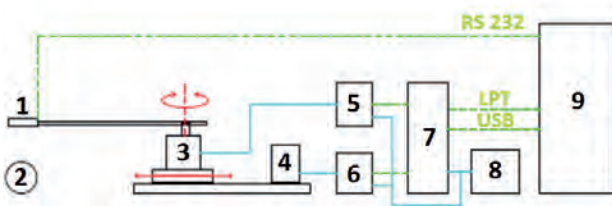
2. Metodyka i przedmiot badań

W celu wykonania badań został zbudowany i przetestowany układ skanujący XY z pojedynczym, trójosiowym czujnikiem magnetorezystancyjnym Honeywell HMR2300, przedstawiony schematycznie na rys. 1.

W układzie tym dokonano pomiaru rozkładu wektorów indukcji pola magnetycznego w płaszczyźnie pomiarowej oraz rozkład ten przetworzono na obraz magnetowizyjny.

Zastosowanie czujnika trójosiowego umożliwiło uzyskanie obrazów indukcji pola magnetycznego w układzie trzech osi XYZ, dzięki czemu uzyskano informację o wartości indukcji pola magnetycznego i jej kierunku w odniesieniu do każdego punktu pomiarowego. Pomimo że indukcja pola magnetycznego jest wielkością wektorową, to jednak w dotychczasowych systemach magnetowizyjnych było to pomijane.

Podczas pomiarów nie stosowano dodatkowych pól magnesujących, a mierzono jedynie zaburzenia tła, tj. głównie naturalnego ziemskiego pola magnetycznego. Układ skanujący przemieszczał czujnik wzdłuż równoległych linii o zadanym odstępnie, wyznaczając płaszczyznę pomiarową. Do badań przyjęto obszar 200 mm × 200 mm, na którym poprowadzono 11 równoległych linii pomiarowych. Na każdej linii znajdowało się 100 punktów pomiarowych. Parametry te dobrano w zależności od pożądanej rozdzielczości i czasu pomiaru. Uzyskane wyniki przeliczano w programie MATLAB, przyporządkowując je do poszczególnych linii pomiarowych. Następnie interpolowano wyniki uzyskanej macierzy 100 × 10 do 100 × 100 punktów, co pozwalało na uzyskanie wyraźnego obrazu.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego: 1 – czujnik magnetorezystancyjny HMR 2300, 2 – obiekt badany, 3, 4 – silniki krokowe, 5, 6 – sterowniki silników, 7 – generator trajektorii MI 3.8.9, 8 – zasilacz, 9 – komputer PC

Fig. 1. Diagram of the measuring system: 1 – magnetoresistive sensor HMR 2300, 2 – object studied, 3, 4 – stepper motors, 5, 6 – motor controllers, 7 – MI 3.8.9 trajectory generator, 8 – power supply, 9 – PC computer

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 poprzez wykonanie pomiaru bez badanego obiektu i odjęcie od niego wyniku pomiaru z obiektem. Metoda ta daje najlepsze wyniki, umożliwiając precyzyjne rozdzielanie rozkładu indukcji magnetycznej tła i obiektu, co pozwala na uzyskanie niskiego poziomu szumu w obrazie magnetowizyjnym.

Zastosowanie tej metody jest możliwe tylko w określonych warunkach, tj. 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 jak i innych, lecz oddalonych, jego źródeł.

W najprostszej formie pomiar różnicowy polega na wykonaniu pomiaru w dwu płaszczyznach:

- P_1 – na wysokości x nad badanym obiektem oraz
- P_2 – na wysokości $x + h$, gdzie:
- x – znana w przybliżeniu odległość między obiektem a płaszczyzną pomiarową 1,
- h – znana odległość 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 \vec{m} . Indukcja pola magnetycznego na osi magnesu, w próżni, w odległości x od jego środka jest wyrażona zależnością:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi x^3} \vec{m} = C \frac{1}{x^3} \quad (1)$$

przy czym:

\vec{m} – magnetyczny moment dipolowy,

$\mu_0 = 12,5664 \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$ – przenikalność magnetyczna próżni,

$C = \frac{\mu_0 \vec{m}}{2\pi}$ – stała zastępcza indukcji.

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

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

$$\vec{B}_{P1} = \vec{B}_1 + \vec{B}_{T1} \quad (2)$$

$$\vec{B}_{P2} = \vec{B}_2 + \vec{B}_{T2} \quad (3)$$

Przy założeniu:

$$\vec{B}_{T1} \approx \vec{B}_{T2}$$

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

To:

$$\vec{B}_{P1} - \vec{B}_{P2} \approx \vec{B}_1 \quad (4)$$

przy czym:

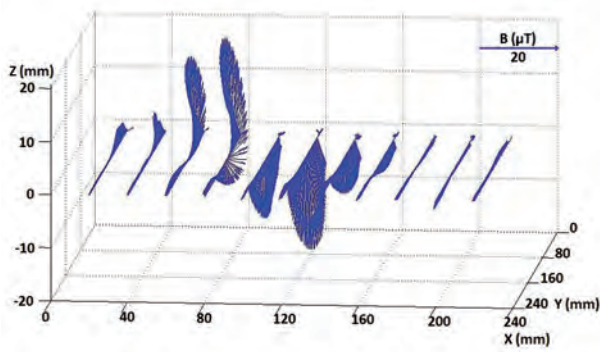
\vec{B}_{P1} – wynik pomiaru w płaszczyźnie P_1 ,

\vec{B}_{P2} – wynik pomiaru w płaszczyźnie P_2 .

$\vec{B}_{T1}, \vec{B}_{T2}$ – wartości indukcji pola magnetycznego tła w płaszczyźnie P_1, P_2 .

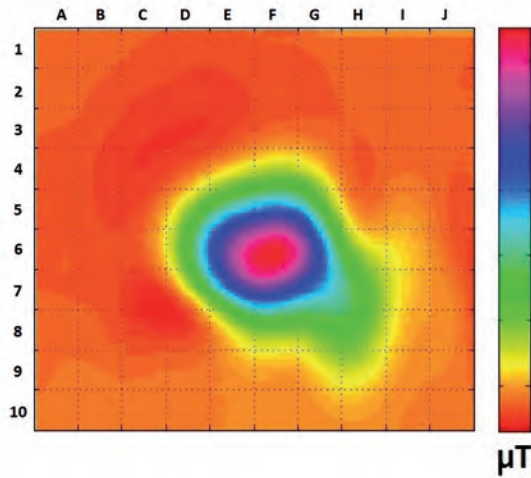
Można więc uzyskać zgrubny obraz magnetowizyjny próbki znajdującej się w niewielkiej odległości poprzez odjęcie wyniku pomiaru w płaszczyźnie 2 od wyniku w płaszczyźnie 1. Pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy podaje wartość bezwzględną różnicy wartości indukcji pola magnetycznego między płaszczyznami pomiarowymi.

Podobną metodą skompensowania wpływu tła na wynik pomiaru jest pomiar gradientowy, stosowany w astrofizyce i geologii (np. w gradiometrach grawitacyjnych). W ogólnie



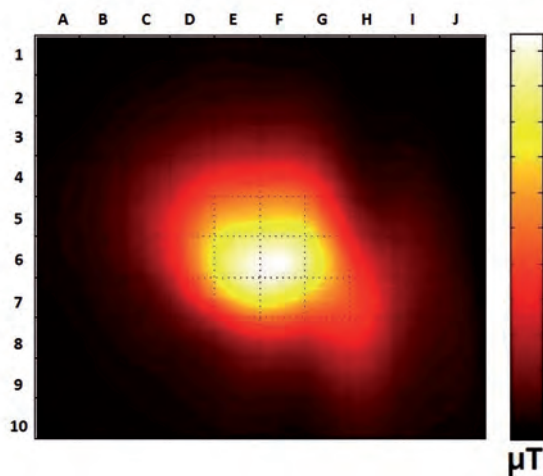
Rys. 2. Rozkład wektorów indukcji magnetycznej wzdłuż linii pomiarowych, obiekt 1

Fig. 2. Distribution of magnetic induction vectors along the measurement lines, object 1



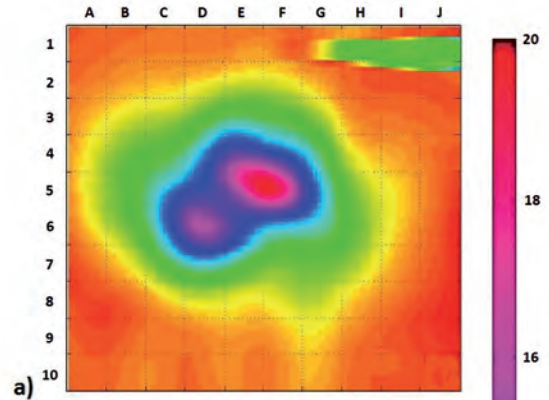
Rys. 3. Obraz obiektu 2 – walca stalowego, pomiar pojedynczy, bez odejmowania tła

Fig. 3. Image of the object 2 – steel cylinder, single measurement, without background subtraction

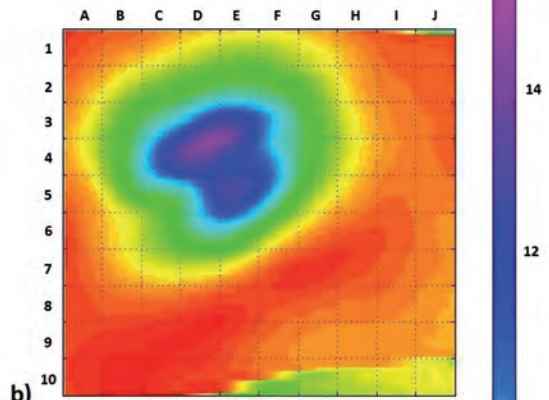


Rys. 4. Obraz obiektu 2 – walca stalowego, pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy. Wpływ tła zminimalizowany

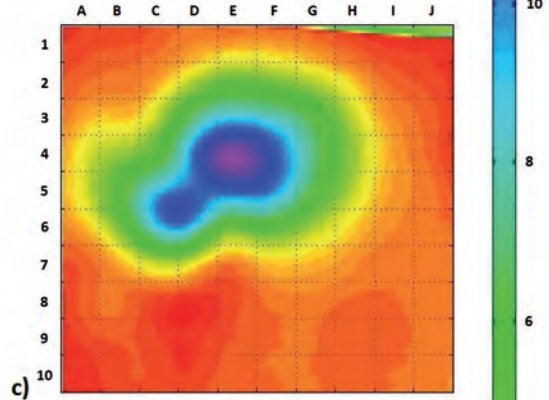
Fig. 4. Image of the object 2 – steel cylinder, biplane differential measurement. Influence of the background is minimized



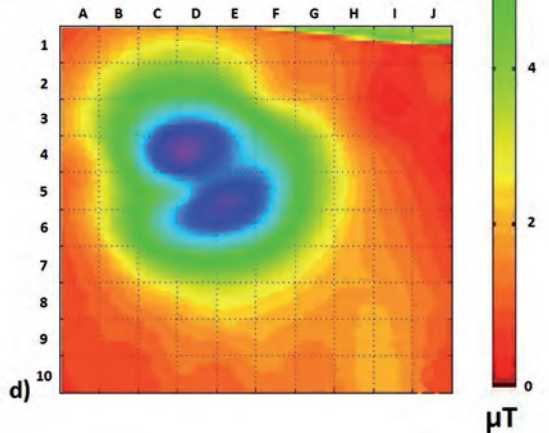
a)



b)



c)



d)

Rys. 5. Pomiar różnicowy dwu-płaszczyznowy obiektu 2 (walec stalowy). Obiekt obracany o kąt: a – 0°, b – 90°, c – 180°, d – 270° względem pola ziemskiego

Fig. 5. Biplane differential measurement of object 2 (steel cylinder). Object rotated by an angle: a – 0°, b – 90°, c – 180°, d – 270° relative to the Earth's field

ności 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. Pozwalają one odróżnić obszary dodatniego i ujemnego zaburzenia magnetycznego względem pola ziemskiego.

3. Wyniki badań

Pomiary zrealizowano na stanowisku opisanym w punkcie 2. Do badań użyto następujących próbek ferromagnetycznych:

- Obiekt 1 – walec stalowy o średnicy 80 mm i wysokości 20 mm,
- Obiekt 2 – walec stalowy o średnicy 71 mm i wysokości 35 mm,
- Obiekt 1 – nóż stalowy składany o długości 120 mm (złożony).

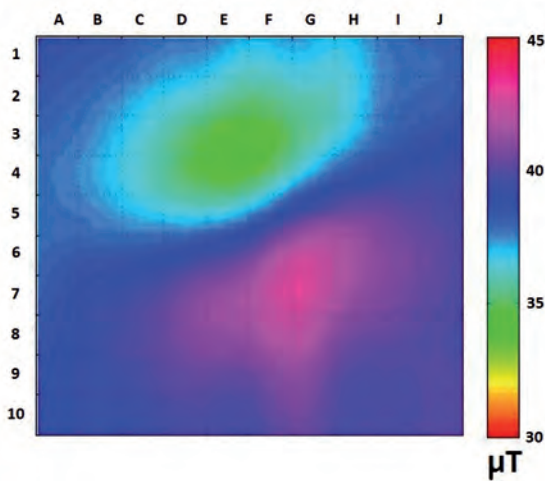
Przyjęto odległość między płaszczyznami pomiarowymi $h = 50$ mm.

Na rys. 2 przedstawiono obraz trójwymiarowego rozkładu wektorów indukcji pola magnetycznego w punktach pomiarowych dla obiektu 1. Wartości absolutne uzyskano poprzez pomiar różnicowy w jednej płaszczyźnie z pominięciem tła. Odległość obiektu od płaszczyzny pomiarowej wynosiła $x = 50$ mm.

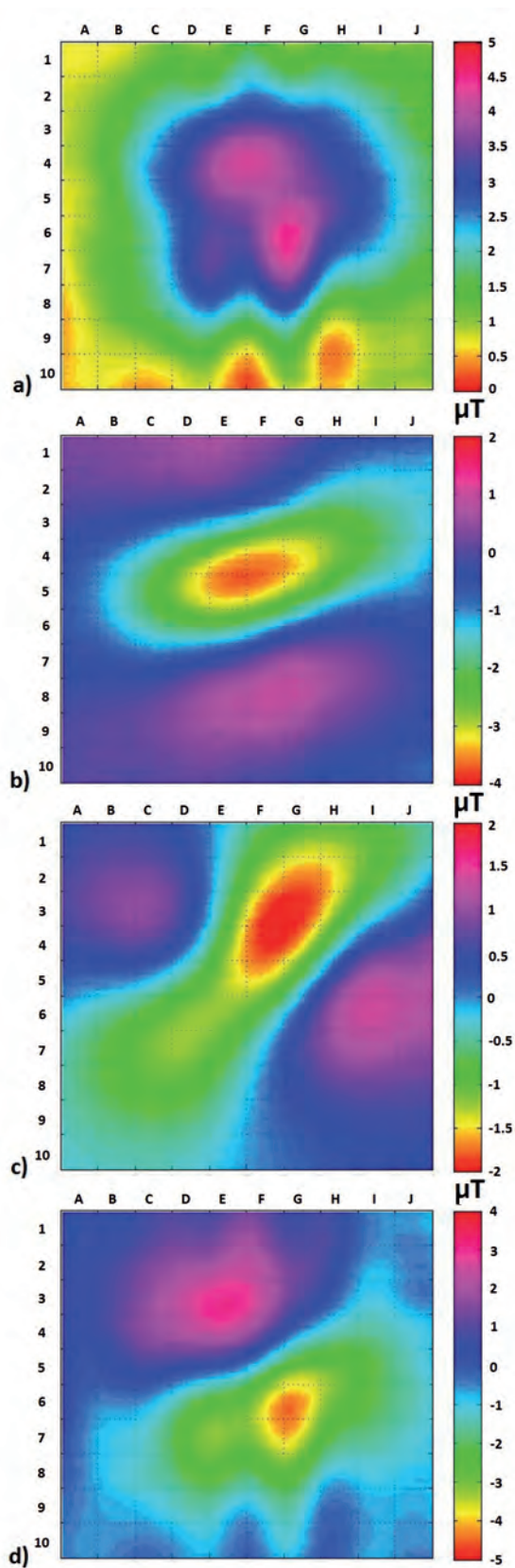
Na rys. 3 podano obraz magnetowizyjny uzyskany przez jednorazowy pomiar w odległości 20 mm od obiektu 2. Dla tak małych odległości wpływ tła staje się pomijalny. Należy podkreślić, że położenie próbki jest wyraźnie widoczne, co może być wykorzystane w systemach bezpieczeństwa.

Na rys. 4 przedstawiono obraz magnetowizyjny uzyskany przez pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy w odległości 20 mm od obiektu 2. Wyraźnie widać zminimalizowanie wpływu tła na wynik pomiaru.

Na rys. 5 podano wynik pomiaru różnicowego w dwu płaszczyznach obiektu 2 w różnych położeniach kątowych względem płaszczyzny pomiarowej. Obiekt obracany był wokół osi prostopadłej do płaszczyzny pomiarowej, co pozwalało na zobrazowanie wpływu położenia próbki względem ziemskiego pola magnetycznego na uzyskany obraz.

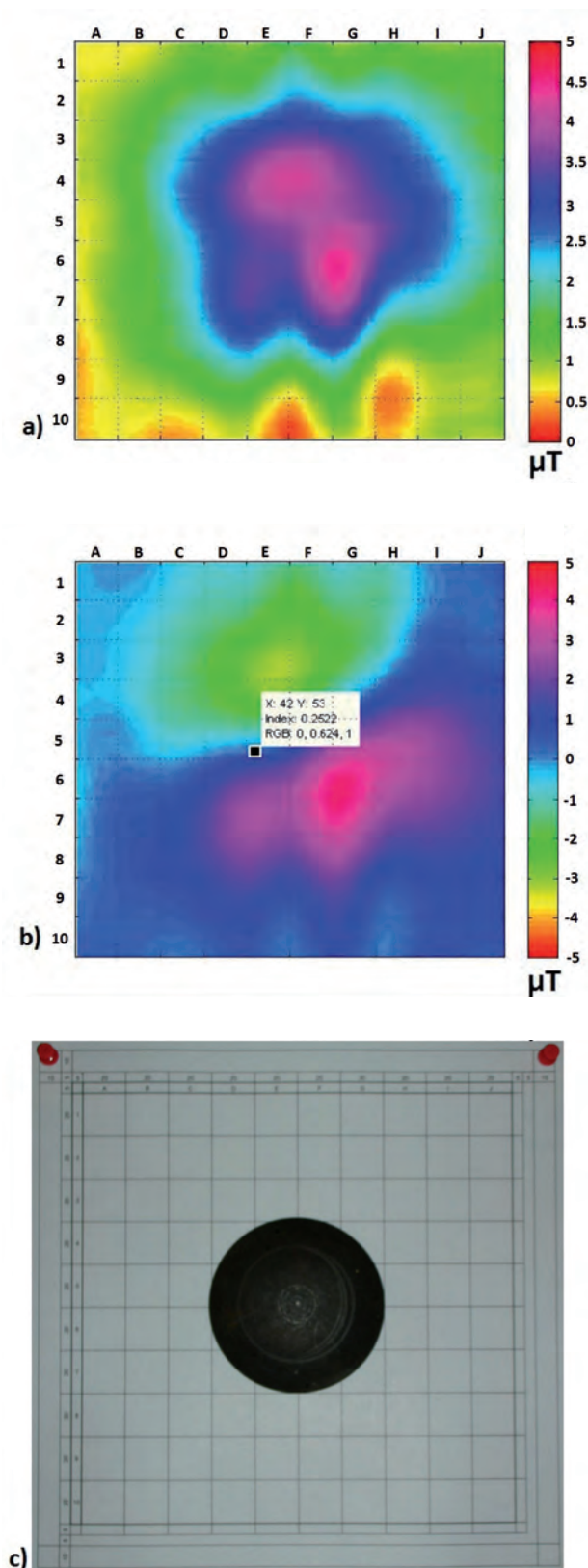


Rys. 6. Pomiar gradientowy obiektu 1, bez usuwania wpływu tła
Fig. 6. Gradient measurement of the object 1, without removing the influence of the background field



Rys. 7. Pomiar różnicowy dwu-płaszczyznowy wartości wektora indukcji magnetycznej, obiekt 1; a) wartość wypadkowa wektora indukcji magnetycznej B, b) składowa B_x , c) składowa B_y , d) składowa B_z

Fig. 7. Biplane differential measurement of magnetic induction vector, object 1; a) the value of the resultant magnetic induction vector B, b) B_x component, c) B_y component, d) B_z component



Rys. 8. Pomiar położenia obiektu 1; a) pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy, b) pomiar gradientowy, c) zdjęcie położenia rzeczywistego

Fig. 8. Measurement of the object 1 position; a) biplane differential measurement, b) gradient measurement. c) a photograph of the actual position

Na rys. 6 przedstawiono wynik pomiaru gradientowego z pominięciem wpływu tła. Należy podkreślić, że widoczna jest wyraźna różnica między obszarami dodatniego i ujemnego zaburzenia magnetycznego.

Na rys. 7 przedstawiono obraz pomiaru różnicowego dwupłaszczyznowego obiektu 1 (rys. 6a), oraz obrazy poszczególnych składowych wektora indukcji magnetycznej (B_x – 6b, B_y – 6c, B_z – 6d). Wyniki wskazują jednoznacznie, że na obrazie magnetowizyjnym najłatwiej rozpoznać położenie próbki na płaszczyźnie (x,y) dla obrazu wartości wypadkowej indukcji pola magnetycznego \vec{B} (rys. 6a) oraz składowej B_z (rys.6d), prostopadłej do płaszczyzny pomiarowej.

Na rys. 8 zaprezentowano porównanie wyników zastosowania metody różnicowej dwupłaszczyznowej (rys. 7a) i gradientowej (rys. 7b) do ustalenia położenia obiektu 1 względem płaszczyzny pomiarowej (Odległość pomiaru 50 mm). Położenie rzeczywiste próbki pokazano na rysunku 7c. Obie metody pozwalają na znaczne zmniejszenie wpływu tła na wynik pomiaru, oraz ustalenie położenia próbki.

Na rys. 9 przedstawiono wyniki zastosowania opracowanej metody pomiarowej. Próbką poddaną badaniu był obiekt 3 – stalowy nóż składany. Odległość pierwszej płaszczyzny pomiarowej od obiektu wynosiła 50 mm. Zastosowano pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy – rys. 8a, pomiar gradientowy bez usuwania wpływu tła – rys. 8b. Zdjęcie rzeczywistego położenia próbki na siatce referencyjnej przedstawiono na rys. 8c. Uzyskano odczyty zaburzeń rzędu 12 μT wartości bezwzględnej (rys. 8a) oraz $\pm 12 \mu\text{T}$ względem tła dla pomiaru gradientu (rys. 8b).

Na podstawie otrzymanych wyników można określić położenie i rozmiar obiektu.

4. Podsumowanie

W przedstawionej pracy opracowano stanowisko do badań magnetowizyjnych rozkładu wektorów indukcji magnetycznej w płaszczyźnie. Opracowano także nową metodę pomiaru, pozwalającą na zmniejszenie wpływu tła magnetycznego i efektywną wizualizację wyników. Opracowane metody wizualizacji pozwalają uzyskać obraz wartości wektora indukcji magnetycznej, jej gradientu lub wartości i kierunku wektora indukcji magnetycznej w poszczególnych punktach pomiarowych.

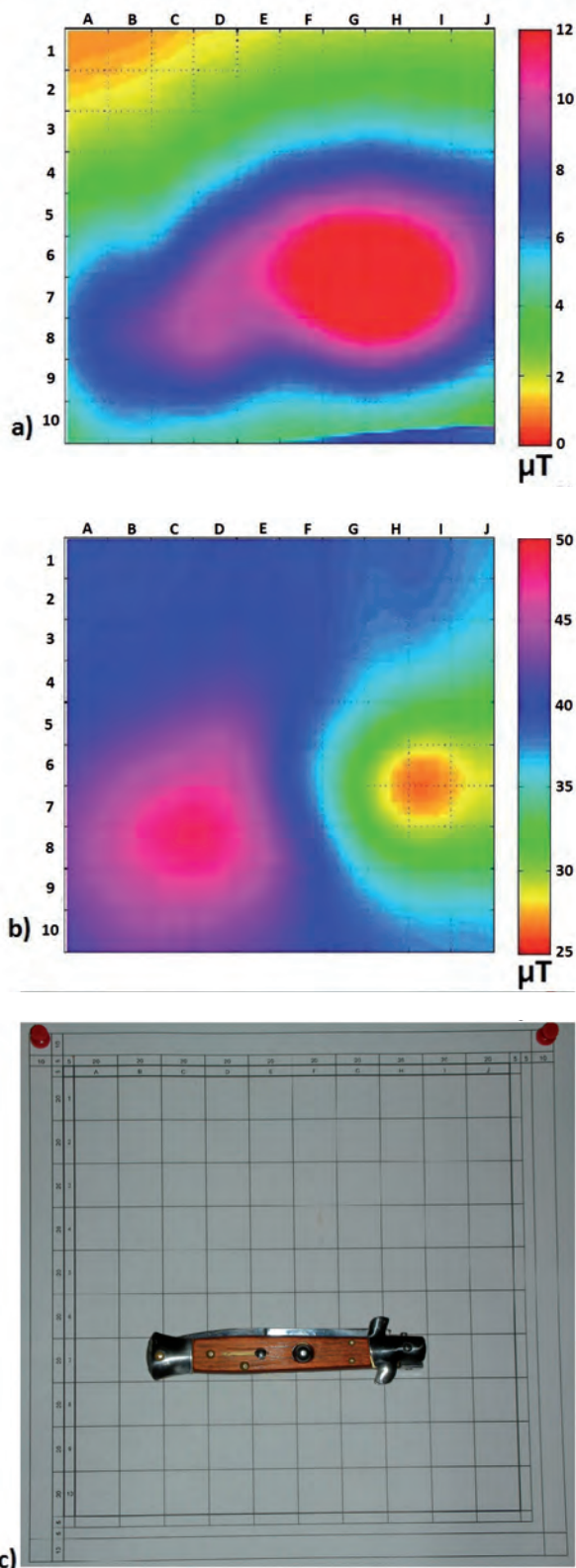
Uzyskano wyniki, które wskazują, że istnieje możliwość określenia położenia i rozróżnienia obiektów niebezpiecznych. Otwiera to drogę do wykorzystania magnetowizji w systemach zapewnienia bezpieczeństwa publicznego, w szczególności przy wykrywaniu obiektów niebezpiecznych z użyciem robotów policyjnych i saperskich. System tego typu może też znaleźć zastosowanie w badaniach nieniszczących, wykrywaniu wad strukturalnych wewnątrz elementów.

Podziękowania

Praca współfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu O ROB0015 1/ID15/1.

Bibliografia

1. Guelle D., Smith A., Lewis A., Bloodworth T., *Metal detector handbook for humanitarian demining*, Office for



Rys. 9. Pomiar położenia przedmiotu niebezpiecznego; a) pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy, b) pomiar gradientowy bez oddzielenia wpływu tła, c) zdjęcie położenia rzeczywistego

Fig. 9. Measurement of the dangerous object position; a) Biplane differential measurement, b) gradient measurement without background separation, c) a photograph of the actual position

- Official Publications of the European Communities, 2003.
- Billings S.D., Pasion C., Walker S., Beran L., *Magnetic Models of Unexploded Ordnance*, "IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing", 44 (2006) 2115.
 - Tumański S., *Cienkowarstwowe czujniki magneto-rezystancyjne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki.
 - Tumański S., *Magnetovision in AccessScience*, McGraw-Hill Companies, 2000, [www.accessscience.com].
 - Kaleta J., Zebracki J., *Application of the Villari effect in a fatigue examination of nickel*, "Fatigue Fracture Eng. Mater. Struc.", 19:1435–1443, 1996.
 - Mohd Ali B.B., Moses A.J., *A grain detection system for grain-oriented electrical steels*, "IEEE Trans. Magnetism", 25:4421–4426, 1989.
 - Pfützner H., *Computer mapping of grain structure in coated silicon iron*, "J. Magnetism Magnet. Mater.", 19:27–30, 1980.
 - Tumanski S., Stabrowski M., *The magnetovision method as a tool to investigate the quality of electrical steel*, "Meas. Sci. Technol.", 9:488–495, 1998. ■

Magnetovision of weak magnetic fields in public security systems

Abstract: Paper presents an application of magnetovision for passive detection of dangerous objects. Measurement system was constructed to study the magnetic field vector distributions. The measurements of the Earth's field disturbances caused by ferromagnetic objects were conducted. The ability to detect selected dangerous objects and determine their location was demonstrated.

Keywords: magnetovision, magnetoresistive sensors, magnetic imaging

mgr inż. Michał Nowicki

Od lutego 2012 r. doktorant w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. W pracy naukowej zajmuje się badaniami rozkładu pól magnetycznych.

e-mail: m.nowicki@mchtr.pw.edu.pl



prof. nzw. dr hab. inż. Roman Szewczyk

Od 2000 r. pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów oraz Instytutu Metrologii i Inżynierii Biomedycznej Politechniki Warszawskiej. Zaangażowany w prace związane z modelowaniem zjawisk magnetomechanicznych, opracowaniem sensorów mechatronicznych, miernictwem elektrycznym oraz prognozowaniem rozwoju technologii (technological foresight).

e-mail: rszewczyk@piap.pl

