

Wrocław, 15. stycznia 2018 r.

prof. dr hab. inż. Jerzy Kaleta, prof. zw. PWr
Kierownik Katedry Mechaniki i Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny
Politechniki Wrocławskiej
ul. Smoluchowskiego 25
50-370 Wrocław

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pod tytułem
**Lokalizacja obiektów ferromagnetycznych na podstawie analizy
trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych**
autorstwa Mgr. inż. MICHAŁA NOWICKIEGO,
wykonanej pod kierunkiem promotora
Dr. hab. inż. ROMANA SZEWCZYKA, prof. PW.
i promotora pomocniczego
Dr. hab. inż. JACKA SALACHA
z Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

Opis identyfikacyjny: rozprawa sygnowana przez Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej (2017).

Zleceniodawca: Dziekan Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, Pani Prof. dr hab. NATALIA GOLNIK. Pismo nr WMt-521.2017 z dnia 01. grudnia 2017 r.

Miejsce przygotowania rozprawy: Zakład Sensorów i Systemów Pomiarowych, Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

OCENA PRACY DOKTORSKIEJ

1. Wprowadzenie

Głównym zamierzeniem Autora było opracowanie metody przestrzennej lokalizacji obiektów ferromagnetycznych z użyciem skanera magnetowizyjnego i dedykowanego oprogramowania. Przedsięwzięcie o dużej skali trudności miało charakter interdyscyplinarny, a osiągnięcie celu wymagała rozwiązania wielu szczegółowych zagadnień z zakresu budowy aparatury pomiarowej, metrologii wielkości magnetycznych i metod matematycznego modelowania rozkładu ziemskiego pola magnetycznego zaburzonego przez poszukiwany obiekt. Za podstawowy zakres docelowej aplikacji uznano możliwość efektywnego wykrywania niewybuchów i innych przedmiotów niebezpiecznych oraz ograniczenie wad dotychczas stosowanych rozwiązań.

Podsumowując na wstępie zamierzenie Autora pracy, należy przyjąć, iż jest ono aktualnym i ważkim zagadnieniem w zakresie badań głównie stosowanych. Pozwala to łącznie stwierdzić, że wybór tematyki badawczej, zawartej w przedłożonej rozprawie jest w pełni aktualny naukowo i aplikacyjnie.

2. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa podzielona została na jedenaście rozdziałów oraz zestawienie literatury oraz 26 podrozdziałów. Monografia obejmująca 127 stron, zilustrowana została 67 rysunkami i wykresami oraz 10 tabelami. Zestawienie cytowanej literatury zawiera 111 pozycji, w tym 16, których współautorem jest mgr inż. M. Nowicki. Pracę poprzedzają streszczenia w języku polskim i angielskim; brak jest natomiast wykazu rysunków i tabel. Pomyłkowo oznaczono podrozdziały w rozdziale 7, tzn. po numerze. 7.2 (str. 71) występuje 7.4 (str. 75).

W pierwszym rozdziale (Wstęp) opisano skalę zagrożenia związaną z globalnym i masowym - w wybranych rejonach świata – występowaniem min lądowych i innych wybuchowych pozostałości konfliktów zbrojnych. Problem dotyczy również Europy i to zarówno w związku z niewybuchami z okresu II Wojny Światowej jak i niedawnymi konfliktami na Bałkanach. W wielu rejonach obszary zaminowane ograniczają rozwój ekonomiczny krajów wychodzących z konfliktów. Szacuje się, iż unieszkodliwienie wymaga obecnie ok. 100 mln min lądowych. Stosunkowo nowym zagrożeniem w krajach objętych działaniami wojennymi, są tzw. IED (Improvised Explosive Device), czyli improwizowane ładunki wybuchowe, zazwyczaj zdalnie detonowane sygnałem radiowym. To właśnie one pochłaniają najwięcej ofiar, dlatego ich lokalizacja i unieszkodliwienie jest zagadnieniem kluczowym. Problem unieszkodliwiania min lądowych dotyczy również polskich oddziałów angażowanych okresowo w różnych misjach, w tym często na obszarach od naszego kraju odległych.

Stosowane powszechnie ręczne, aktywne wykrywacze metali mogą uruchomić czuły zapalnik magnetyczny min. Skutecznym rozwiązaniem mogą być zatem wykrywacze z systemem pasywnym. Dlatego w rozprawie podjęto zagadnienie lokalizacji obiektów ferromagnetycznych na podstawie analizy trójwymiarowych rozkładów pól magnetycznych przy wykorzystaniu magnetowizji. Dążono do wykazania, iż zaproponowany sposób - przez połączenie wyników pomiarów i modelowania - umożliwi ilościową ocenę położenia obiektu w przestrzeni oraz wyznaczenie jego wypadkowego momentu magnetycznego.

W rozdziale drugim (Cel i zakres pracy) zdefiniowano zamierzenia Autora. Przyjęto zatem, iż głównym celem pracy jest wykorzystanie autorskiego modelu i pomiarów magnetowizyjnych do:

- przestrzennej (trójwymiarowej) lokalizacji ukrytych obiektów ferromagnetycznych,
- wyznaczenia wartości i kierunku momentu magnetycznego, ukrytego, nieznanego obiektu ferromagnetycznego.

Przyjęto, iż do osiągnięcia tak zaplanowanego celu niezbędne było podjęcie następujących działań, a w tym:

- stworzenie trójwymiarowego modelu opisującego oddziaływanie obiektów ferromagnetycznych na jednorodne pole magnetyczne, w którym się one znajdują,
- weryfikację modelu z użyciem aparatury magnetowizyjnej,
- rozwiązania zagadnienia odwrotnego, czyli wyznaczenia położenia i momentu magnetycznego obiektu ferromagnetycznego na podstawie korelacji danych pomiarowych i wyników modelowania,
- sprawdzenia zaproponowanych przez Autora procedur wizualizacji z wykorzystaniem znanych obiektów ferromagnetycznych, a w tym certyfikowanych wzorców momentu magnetycznego.

Nie sformułowano natomiast jawnie tezy pracy.

Przyjęto jednocześnie dwa możliwe obszary zastosowań, a mianowicie:

- lokalizację ukrytych obiektów ferromagnetycznych takich elementy min i pocisków,
- badanie w warunkach przemysłowych wybranych parametrów elementów wykonanych z magnetyków twardych.

W obszernym rozdziale trzecim (*Stan wiedzy*), w części pierwszej przytoczono (głównie podręcznikową) wiedzę związaną z opisem układów magnetostatycznych równaniami Maxwella. Szczególną uwagę zwrócono na rolę indukcji pola magnetycznego, opisującej wartość anomalii magnetycznych, których modelowaniem i pomiarami zajął się Autor w kolejnych rozdziałach. Przytoczono definicję momentu magnetycznego w systemie SI oraz zdefiniowano magnetyzację obiektu jako gęstość dipolowych momentów magnetycznych, co upraszcza zarówno obliczenia analityczne, jak i modelowanie metodą elementów skończonych. Przytoczono definicje natężenia pola magnetycznego oraz potencjału magnetycznego w układach magnetostatycznych. Dalej wyjaśniono różnice pomiędzy indukcją pola magnetycznego w próżni oraz w materiałach. Ponadto Autor zdefiniował pojęcia przenikalności, co z kolei pozwoliło na rozróżnianie materiałów jako diamagnetycznych, paramagnetycznych i ferromagnetycznych. Te ostatnie były dalej obiektem badań i tradycyjnie podzielone, ze względu na wartość pola koercji na magnetycznie miękkie i twarde.

W drugiej części rozdziału opisano stosowane metody lokalizacji obiektów ferromagnetycznych z użyciem metod aktywnych i pasywnych. Scharakteryzowano też uwarunkowania, w tym i fakt często głębokiej lokalizacji niewybuchów (nawet kilka metrów) i ograniczeń aparatury diagnostycznej. Przykładowo standardowy aktywny wykrywacz metalu posiada zasięg roboczy poniżej 20 cm. Głębiej położone niewybuchy wykrywa się z użyciem metod dalekiego zasięgu i stosowaniem metod aktywnych i pasywnych. Metody aktywne wykorzystują układy o dużej średnicy cewek nadawczych i odbiorczych i mogą być stosowane do wykrywania obiektów przewodzących nawet do głębokości 3 m, ale przy malejącej czułości. W metodach pasywnych wykorzystuje się czułe magnetometry, mierzące wartość skalarną lub wektorową ziemskiego pola magnetycznego zaburzonego obiektem ferromagnetycznym takim jak mina czy bomba lotnicza. Spektrum używanych przyrządów obejmuje współcześnie czułe magnetometry, w tym miniaturowe magnetometry transduktorowe oraz konstrukcje hybrydowe. Stosuje się również czujniki NMR i magnetometry nadprzewodzące.

Przytoczono też cechy metody magnetowizyjnej jako stosunkowo nowej, zaliczanej do grupy metod pasywnych umożliwiającej pomiar rozkładu pola magnetycznego wokół anomalii z dużą rozdzielczością przestrzenną i oczekiwania związane z jej użyciem do identyfikacji niewybuchów i innych obiektów.

W rozdziale czwartym (*Przedmiot badań*) przyjęto dziesięć ferromagnetycznych obiektów wykorzystanych w badaniach własnych, charakteryzujących się zróżnicowaną wartością remanencji, przenikalności magnetycznej oraz geometrii. Przyjęto za nie atrapy trzech przedmiotów niebezpiecznych (korpus granatu w dwóch wersjach i nóż składany) oraz siedem wzorców z określoną innymi metodami wartością momentu magnetycznego, w tym materiałów takich jak magnesy trwałe. Pozwoliło to na ilościową interpretację wyników magnetowizyjnych przy wykrywaniu obiektów ferromagnetycznych. Z kolei do analizy wpływu zewnętrznego, słabego pola magnetycznego na pomiar magnetowizyjny zastosowano wzorce z grupy materiałów

magnetycznie miękkich w formie walców z wybranej stali. Wzorcowe obiekty zestawiono w tabeli charakteryzując ich przenikalność, remanencję i geometrię.

W rozdziale piątym (Metodyka badań) zaprezentowano oryginalny skaner magnetowizyjny umożliwiający otrzymywanie obrazów w płaszczyźnie XY, przy ustalonej wartości Z, na obszarze 200 mm × 200 mm. Do budowy wykorzystano precyzyjny magnetorezystor umożliwiający pomiar indukcji magnetycznej w trzech osiach. Możliwe było wykorzystanie drugiego magnetorezystora usytuowanego nad pierwszym o zadaną wartość. Do sterowania i akwizycji danych wykorzystano Komputer PC z aplikacją napisaną w środowisku LabView. Nie stosowano analizy wpływu dodatkowych pól magnesujących i mierzono zaburzenie naturalnego ziemskiego pola magnetycznego. Analizę danych i wizualizację wykonywano z użyciem programu Matlab. Zapewniono także możliwość kalibracji kanałów pomiarowych na stanowisku wzorcowym z cewkami Helmholtza. W celu kompensacji wpływu ziemskiego pola magnetycznego obiekt badań umieszczano w jednorodnym polu generowanym przez układ cewek Helmholtza. W rezultacie pomiar magnetowizyjny dotyczył rozkładu pola magnetycznego nad obiektem tylko od remanencji obiektu, a więc od jego momentu magnetycznego. Kolejnym podzespołem warsztatu pomiarowego stworzonego przez Doktoranta było stanowisko do pomiaru momentu magnetycznego przy zastosowaniu cewek Helmholtza i całkującego strumieniomierza z dedykowanym oprogramowaniem. Ponadto, w celu walidacji zastosowano drugą metodę pomiaru momentu magnetycznego polegającą na pomiarach indukcji magnetycznej pojedynczym magnetometrem w znanej odległości od obiektu.

W rozdziale szóstym (Wyniki własnych badań eksperymentalnych) zaprezentowano liczny zestaw obrazów magnetowizyjnych otrzymanych z wykorzystaniem opisanego uprzednio stanowiska. Użycie oprogramowania Matlab umożliwiło odtworzenie rozkładu wektorów pola magnetycznego. W celu wyznaczenia wpływu badanego obiektu, w warunkach laboratoryjnych zastosowano pomiar różnicowy (z obiektem i bez). Zestaw wyników obejmował rezultaty pomiarów dla obiektów wzorcowych a następnie ukrytych. Rozważano m.in. wpływ odległości czujnika od badanego obiektu. Wykorzystano też trójosiowe cewki Helmholtza do kompensacji pola ziemskiego. W kolejnym kroku wyznaczano trójwymiarowe rozkłady indukcji pola magnetycznego stosując w tym celu dwie procedury. Wyniki pomiarów momentu magnetycznego wybranych obiektów zestawiono w tabeli.

W rozdziale siódmym (Modelowanie rozkładu indukcji pola magnetycznego wokół obiektów magnetycznych) opisano wyniki walidacji modelowania numerycznego rozkładu indukcji pola magnetycznego wokół ferrytowych magnesów trwałych. Przyjęto, że zadowalająca zgodność wyników modelowania i pomiaru pozwoli na wykorzystanie metody elementów skończonych (MES) do opracowania metody analizy pomiarów magnetowizyjnych. Do modelowania wykorzystano dwa programy (Netgen 5.3 oraz Elmer FEM). Modelowanie rozkładu pola magnetycznego przeprowadzono w przestrzeni trójwymiarowej. Eksperymentalną walidacją obliczeń z wykorzystaniem programu Elmer FEM przeprowadzono na stanowisku pomiarowym składającym się z Gaussometru 455 DSP firmy LakeShore i statywu oraz przy użyciu dwóch sond hallotronowych. Do testów użyto dwóch ferrytowych magnesów pierścieniowych z materiału magnetycznie twardego. W kolejnym kroku oszacowano niepewność pomiarów. Rozważano w szczególności wpływ odległości sondy pomiarowej, błędu pozycjonowania sondy względem położenia magnesów i ograniczonej dokładności sondy pomiarowej i teslomierza. W konkluzji przyjęto, iż wyniki pomiarów wykazują zadowalającą zgodność z rezultatami symulacji MES.

W rozdziale ósmym (Nowa metoda lokalizacji obiektów z wykorzystaniem pomiarów magnetowizyjnych) opisano sposób wykorzystania opisanej wcześniej metody pasywnej do detekcji i lokalizacji obiektów ferromagnetycznych i eliminacji ograniczeń typowych dla współczesnych aktywnych wykrywaczy metalu. W pierwszym etapie porównano wyniki modelowania MES i pomiarów dla obiektów wzorcowych (walce stalowe), w tym przy różnym usytuowaniu osi walca w stosunku do płaszczyzny pomiarowej. Do wyznaczenia pozycji wzorca użyto metody wyszukiwania maksimum anomalii. Następnie zaproponowano sposób pomiaru odległości od nieznanego obiektu (wskazanie koordynat x , y ukrytego obiektu) przy użyciu rozkładu wartości indukcji magnetycznej. W kolejnym kroku przedstawiono metodę wyznaczania momentu magnetycznego nieznanego obiektu. Zaprezentowane procedury i analizy wyników pozwoliły w rezultacie sformułować autorską metodę lokalizacji i wyznaczania momentu magnetycznego z wykorzystaniem trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych. W podsumowaniu rozważono też wpływ szumów i stwierdzono, że jest on mniejszy w przypadku pomiarów terenowych (w porównaniu z szumem generowanym przez wyposażenie laboratorium).

W rozdziale dziewiątym (Wytyczne do wykrywania i lokalizacji obiektów ferromagnetycznych) sformułowano zwięźle zasady postępowania w celu lokalizacji obiektów ferromagnetycznych. Zwrócono uwagę na kilka aspektów. Uznano, iż stworzona aparatura pomiarowa w zadowalającym stopniu pozwala na wyznaczenie parametrów momentu magnetycznego. Zaproponowano związek pomiędzy wielkością zaburzenia a momentem magnetycznym i odległością obiektu od czujnika. Zalecono, by obszar anomalii nie wykraczał poza obrys płaszczyzny pomiarowej. Sformułowano też wymagania w zakresie rozdzielczości przestrzennej pomiaru magnetowizyjnego. Określono także arbitralnie proporcje pomiędzy wartością rozdzielczości zastosowanego magnetometru i poziomem szumu pola tła, a amplitudą zaburzenia generowana przez poszukiwany obiekt.

W rozdziale dziesiątym (Podsumowanie i wnioski końcowe) zestawiono główne rezultaty uzyskane w ramach pracy doktorskiej. Wyeksponowano też aspekty nowatorskie, stanowiące o oryginalności rozwiązań. Zwrócono uwagę, iż metoda obliczeń magnetostatycznych, wykorzystująca oprogramowanie Elmer FEM umożliwiła symulację układów i urządzeń magnetostatycznych. Określenia parametrów ukrytego obiektu ferromagnetycznego dokonano z użyciem autorskiej metody analizy trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych. Metoda umożliwiła identyfikację obiektu ferromagnetycznego w przestrzeni względem płaszczyzny pomiarowej oraz pozwoliła na wyznaczenie wartości i kierunku wypadkowego wektora momentu magnetycznego. Ponadto, w porównaniu z innymi metodami, możliwe było dokładniejsze wyznaczenie głębokości położenia niewybuchów. Ponadto zautomatyzowanie pomiaru zmniejszyło możliwość popełnienia błędu w procedurze pomiarowej. Sformułowano też zalecenia w zakresie stosowania metody w praktyce oraz podano zależność pomiędzy zasięgiem lokalizacji obiektów a ich momentem magnetycznym. Niektóre zadania zrealizowano w ramach grantu NCBiR, a część sprzętu przekazano do użytkowania przez Ministerstwo Spraw Wewnętrznych.

W rozdziale jedenastym (Kierunki dalszych prac) przedstawiono skrótowo możliwości dalszego rozwoju pasywnych metod wykrywania obiektów ferromagnetycznych. Uznano za zasadne kontynuowanie badań mających na celu sprawdzenie postępowania na obiektach rzeczywistych w warunkach polowych, zweryfikowanie możliwości wykorzystania procedur do lokalizacji wraków, zastosowanie macierzy czujników oraz rozwiązanie zagadnienia odwrotnego z wykorzystaniem modelowania i skanowania.

3. Pytania, uwagi krytyczne i sugestie

Mimo generalnie pozytywnej oceny rozprawy w zakresie przyjętych celów, zastosowanej metodyki, osiągniętych rezultatów i wnioskowania – niektóre kwestie wymagają rozważenia, wyjaśnienia lub korekty, szczególnie w przypadku publikowania. Wymieniono je sukcesywnie poniżej.

1. Użyte sformułowanie (12⁸⁻⁹), cyt.: "Większość spotykanych materiałów charakteryzuje się bardzo słabymi właściwościami magnetycznymi" nie jest trafne w przypadku rozprawy naukowej. Co to znaczy „bardzo słabymi właściwościami magnetycznymi”?
Podobnie ze sformułowaniem (14₃) „magnetyk twardy”. Powinno być: materiał magnetycznie twardy.
2. Sformułowanie (14₁₋₂), cyt.: „obiektów ferromagnetycznych takich jak np. stalowe elementy min lądowych i pocisków” nie jest precyzyjne. Np. stale austenityczne nie są ferromagnetykami, a też mogą występować w obiektach badanych przez Doktoranta.
3. Obszerny podrozdział 3.1. (Równania Maxwella w odniesieniu do układów magnetostatycznych; str. 15-28) zawiera dużą dawkę materiału podręcznikowego, często elementarnego, którego związek z główną częścią pracy nie zawsze jest oczywisty. Ponadto w podrozdziale dokonano wielu skrótów myślowych niezrozumiałych dla czytelnika. By nie być gołosłownym, kilka przykładów:
 - a. przy wprowadzeniu do równań (str. 15) powołano się na pracę [35]. Z całym szacunkiem dla Autora przytoczonej pracy, ale w tym przypadku wydaje się, że bardziej zasadne byłoby odwołanie do prac wcześniejszych,
 - b. przytaczanie elementarnych wzorów, np. 3.2., 3.3. jest może zasadne w pracach dyplomowych, ale nie doktorskich,
 - c. jaki sens poznawczy lub ważny informacyjnie ze względu na rozprawę mają wzory 3.4.? Do czego służą te równania Autorowi?
 - d. pisząc o momencie magnetycznym i wymieniając jednostki, w jakich jest wyrażany w różnych układach fizycznych Autor pisze (19⁷), cyt.: „Często wręcz uniemożliwia to proste porównanie wyników...”. Trudno się z tym zgodzić. Konwertery jednostek są dziś powszechnie dostępne,
 - e. w wyrażeniu (19¹¹), cyt.: „... oddziałuje moment skrecający τ . Wartość momentu skrecającego m ...”. To jakim symbolem wyrażano zatem moment skrecający?.
 - f. występujące ponownie komentarze dotyczące układu jednostek, np. (20⁴⁻⁷) „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” są zbędne, jeśli autor zdecydował się na stosowanie systemu SI,
 - g. podobna wątpliwość dotyczy zasadności komentarza (20¹⁷⁻²⁰), cyt.: „Wzorce mają podaną wartość „dipolowego momentu magnetycznego” d , wyrażonego w jednostkach V·s·cm. Strumieniomierz natomiast podaje wynik pomiaru momentu magnetycznego w mWb·cm, czyli również dipolowy moment magnetyczny.”,
 - h. mylące jest sformułowanie (20⁸⁻¹⁰), cyt.: „Wśród producentów sprzętu i dipolowym momentem magnetycznym, oznaczonym jako j ...”. Ale j , w tabeli 3.1., opisuje inną wielkość fizyczną,
 - i. czy rzeczywiście (20²¹⁻²²), cyt.: „Moment magnetyczny jest wielkością determinującą kształt i wielkość anomalii magnetycznej”? A może odwrotnie?

- j. równanie 3.9. jest chyba przybliżeniem równania Biota-Savarta. A jakie założenia upraszczające przyjęto? A jaki jest związek tego wzoru z dalszym wywodem pracy?
 - k. równanie 3.18. jest tożsame z równaniem 3.12.
 - l. równanie 3.29 jest słuszne dla diamagnetyków i paramagnetyków. Dla ferromagnetyków zależność nie jest liniowa,
 - m. na stronie 28³⁻⁴ użyto sformułowań, cyt.: „materiały magnetyczne miękkie, o niskiej wartości pola koercji H_c ” oraz „materiały magnetyczne twarde, o wysokiej wartości pola koercji H_c ”. Niska i wysoka wartość pola koercji to określenie zbyt „popularne” i mało precyzyjne jak na rozprawę. Autor powinien z większą starannością zdefiniować materiały magnetycznie miękkie i twarde.
4. Brak jest w pracy analizy sprzętowej układu pomiarowego pola magnetycznego. Głowicę pomiarową użytą przez Doktoranta stanowi magnetometr firmy Honeywell, a dokładniej: Smart Digital Magnetometer HMR2300. Głowica zawiera w sobie moduł HMC2003, składający się z sensorów HMC1001(jednoosiowy) i HMC1002 (dwuosiowy). Wątpliwości budzi użycie tej głowicy, szczególnie gdy Doktorant proponuje metodę z zastosowaniem wzorców pola magnetycznego o zadanej geometrii. Jest to rozwiązanie sprzed ponad 20 lat zaprojektowane do zastosowań przemysłowych (w tym w lotnictwie), dedykowanych wykrywaniu obiektów ferromagnetycznych (może służyć do odpowiedzi na pytanie, czy obiekt ferromagnetyczny jest w pobliżu lub go nie ma, lub np. użyty jako rodzaj czujnika „parkingowego”). Konstrukcja głowicy (np. przetwornik analogowo-cyfrowy, zastosowane filtry, konstrukcja obudowy) uniemożliwia, a z pewnością bardzo utrudnia, przeprowadzenie badań laboratoryjnych, szczególnie w zastosowaniu jako skaner pola magnetycznego o dużej rozdzielczości. Warto przykładowo zwrócić uwagę na różnicę w budowie pomiędzy zastosowanym przez Doktoranta rozwiązaniem, a chociażby analogowym podsystemem pomiarowym wykorzystującym magnetorezystor Honeywella HMC1043/HMC1053 (jeśli już pozostawać przy tym samym producencie), który jest bardziej quasi-punktowy, a analogowy tor pomiarowy pozwala w pełni prześledzić istotę pomiaru pola magnetycznego. Wydaje się jednak, że własna konstrukcja dedykowanej głowicy, z pewnością możliwa do wykonania przez Doktoranta, byłaby lepszym rozwiązaniem.
5. Wybrane uwagi dotyczące metodyki pomiarów:
- a. Na rysunku 5.2. przedstawiono, cyt.: „Interfejs użytkownika programu...”. A w jakim środowisku został wykonany program?
 - b. Na rysunku 5.3 brak jest oznaczenia głowicy pomiarowej magnetometru i układów współrzędnych badanego obiektu i sensorów. Schemat jest przez to mało zrozumiały.
 - c. Rysunek 5.5 (strona 45) został skopiowany z dokumentu [94] bez podania cytowania. Ponadto w „polskiej” wersji brak jest oznaczeń układu współrzędnych sensorów. Strzałki są mylące. Co jest oznaczone literą „m” – moment magnetyczny, masa? Czy pomiar dokonywany był w warunkach tzw. pomiaru punktowego, czy na powierzchni sensora?
 - d. Na rysunku 8.14. przedstawiono, cyt.: „Zasadę pomiaru metodą płaszczyznową”. A w którym miejscu jest sensor? Czy aby nie powinien mieć swojego układu odniesienia?
 - e. Wątpliwości budzą też przyjęte tak różne wzorce pola magnetycznego (z jednej strony magnesy neodymowe, z drugiej – walce ferromagnetyczne). Czy można używać tych samych czujników do badania tak różnych obiektów? Poza tym zakres pomiarowy czujnika powinien umożliwiać pomiar również po zetknięciu z wzorcem.
 - f. Szkoda, że w pracy nie wykorzystano do skalowania układu pomiarowego wzorcowego rozkładu pola magnetycznego związanego z przepływem prądu

- elektrycznego przez (miedziany) przewód (układ przewodów) lub profil o zadanym kształcie. Wiadomo przecież, że przepływ prądu przez przewód prostoliniowy daje najprostszą postać pola wektorowego. Ułatwiłoby to sprawdzenie zdolności rozdzielczej przyrządów pomiarowych, jak również skanera pola magnetycznego.
6. Barwne mapy z pomiarów - jako magnetyczne wizualizacje badanych obiektów - budzą wątpliwości interpretacyjne. Mapy mają małą rozdzielczość, ponadto nie zawierają często informacji o składowych wektora, czyli H_x , H_y , H_z mimo, że zastosowana głowica zawiera trzy czujniki. Autor nie pokazuje też wektora pola magnetycznego. Przeszkodą są też zbyt lapidarne komentarze do wielu ilustracji w rozdziale 8. Kilka przykładów usterek przytoczono poniżej.
 - a. Na rysunku 6.1. na osi poziomej podano czas a nie ilość zarejestrowanych punktów pomiarowych (próbek). Przebiegi są trudne do interpretacji. Co jest tutaj istotne: składowa stała, czy zmienna?
 - b. Na rysunku 6.3. nie podano odległości od obiektu badanego, składowej wektora indukcji magnetycznej, czy modułu wektora.
 - c. Na rysunku 6.4. przedstawiono, cyt.: „Obraz magnetowizyjny rozkładu indukcji magnetycznej obiektu nr 7 - walca stalowego, pomiar różnicowy dwupłaszczyznowy. Wpływ tła wyraźnie zminimalizowany”. Co to znaczy „wyraźnie zminimalizowany”? Obraz nie jest bardziej poprawny – nadal widać pojedynczy obiekt, który nie jest wzorcem fizycznym dla pola magnetycznego. Każdy inny obiekt ferromagnetyczny o polaryzacji N-0-S, ustawiony prostopadle do okna mapowania, da podobny obraz dla składowej B_z . Wątpliwości budzi też paleta barw z uwagi na szумы w obrazie.
 - d. Czy mapa na rysunku 6.5. ma sugerować nachylenie głowicy pomiarowej względem obiektu, co oznaczałoby mapowanie składowej planarnej B_y ?
 - e. Mapy ukazane są we współrzędnych kartezjańskich, co oznacza że niezbędne jest ukazanie położenia czujników (lokalny układ współrzędnych) względem badanego obiektu (globalny układ współrzędnych). Brakuje takiego opisu na każdym z rysunków.
 7. Inne przykłady usterek (o różnym charakterze):
 - a. Na stronie 35¹⁰⁻¹² stwierdzono, cyt.: „Najważniejszymi spośród użytych próbek są wzorce momentu magnetycznego ME 8 oraz ME 7 [81], będące wysokostabilnymi magnesami produkcji Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, wyposażonymi w odpowiednie certyfikaty kalibracji.” Czy te magnesy stałe, mogą być użyte w pracy do kalibracji układu w odniesieniu do min i bomb, które to zazwyczaj wykazują własności magnetycznie miękkie?
 - b. W tabeli 4.1 wielokrotnie użyto określenia „niska” i „wysoka” przenikalność. Nie jest to precyzyjne.
 - c. Przypis literaturowy [92] (na stronie 42) odnoszący się do wzoru 5.1 jest niepoprawny.
 - d. Przy wzorze 5.1. (na stronie 42) Autor pominął szereg założeń, dla których wzór ten jest słuszny,
 - e. Stwierdzenie (44¹⁻⁴), cyt.: „Strumieniomierz podaje wartość momentu magnetycznego w mWbcm, a nie w przyjętych w układzie SI jednostkach (Am²). Próba konwersji jednostek wprost jest utrudniona, ponieważ sam sens fizyczny momentu magnetycznego jest inny – w tym wypadku jest to tzw. moment dipolowy” jest dyskusyjne jak wcześniejsze uwagi Autora dotyczące jednostek i ich przeliczania.
 - f. Fragment (45⁷) zaczynający się od słów, cyt.: „W przypadku a), tj. współosiowym układzie magnetometr-próbka, czułość i uzyskany wynik pomiaru pola B jest dwukrotnie większa ...” został przetłumaczony z dokumentu [94] bez przytoczenia źródła.
 - g. Wzór 6.1. (strona 49) nie posiada odnośnika literaturowego.

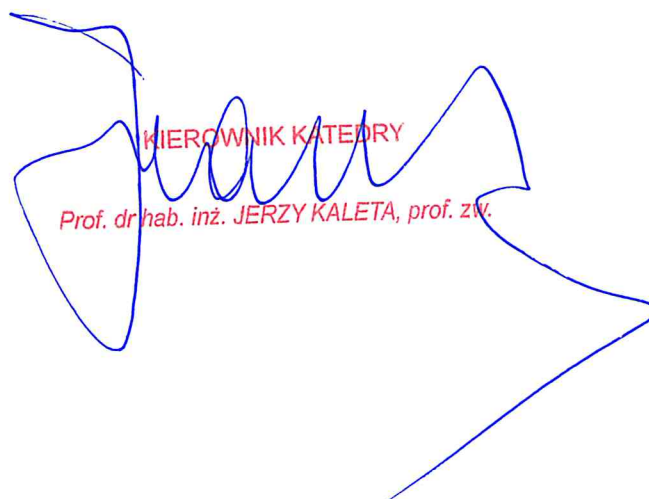
- h. Na stronie 110₇ użyto nowego oznaczenia momentu magnetycznego (m_n). Jak się to ma do wcześniejszych oznaczeń?
- i. Pozycja [27] (strona 119) została źle zacytowana. Autorami pracy są: Hongfeng Pang, Mengchun Pan, Chengbiao Wan, Jinfei Chen, Xuejun Zhu, and Feilu Luo.
- j. Podobnie z pozycją [28], również źle zacytowaną. Autorami są bowiem: Laurens Beran, Stephen Billings, and Doug Oldenburg.

PODSUMOWANIE

Przedstawioną pracę o tytule **Lokalizacja obiektów ferromagnetycznych na podstawie analizy trójwymiarowych pomiarów magnetowizyjnych** oceniam całościowo pozytywnie. Zdecydowanie wyżej jednak lokuję osiągnięte rezultaty niż sposób ich zaprezentowania przez Doktoranta w monografii. Podkreślenia wymaga, iż podjęte zagadnienie jest bardzo aktualne, trudne i interdyscyplinarne. Przydatność zaproponowanej metody wykazano w przypadku badań laboratoryjnych i warta jest teraz potwierdzenia w warunkach polowych. Można też uznać, iż założone na wstępie pracy cele osiągnięto. Wskazano ponadto dalsze kierunki badań i możliwości nowych aplikacji.

Na szczególne podkreślenie zasługuje (współautorski) dorobek publikacyjny Doktoranta obejmujący 15 pozycji (łącznie artykuły i prace konferencyjne, w tym głównie zagraniczne). Należy też docenić efektywną współpracę z naukowym partnerem fińskim (CSC - IT Center For Science Ltd. w Espoo) oraz fakt finansowania znaczącej części badań w ramach grantu NCBiR.

*Mając na uwadze wszystkie wymienione powyżej aspekty stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595 ze zmianami w Dz.U. z 2005 r.) i **może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn**. Wnoszę jednocześnie o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.*


KIEROWNIK KATEDRY
Prof. dr hab. inż. JERZY KAŁETA, prof. zw.

