

## System pomiaru pola magnetycznego w procesie demagnetyzacji modeli okrętów

**Streszczenie.** *Obiekt ferromagnetyczny umieszczony w ziemskim polu magnetycznym ulega namagnesowaniu. Obiekty ferromagnetyczne, którymi są okręty wojenne, powinny podlegać okresowej demagnetyzacji. Demagnetyzacja tak dużego obiektu jest zadaniem złożonym i pracochłonnym. Artykuł przedstawia wybrane problemy związane z budową stanowiska badawczego oraz badaniami nowych metod demagnetyzacji okrętów prowadzonych na modelach. Przedstawiono zautomatyzowany system pomiarowy do badania pola magnetycznego modelu okrętu. Omówiono strukturę i funkcje układu pomiarowego oraz metodę ograniczania błędów wynikających z przemieszczania czujników pomiarowych względem pola magnetycznego. Podano przykładowe wyniki pomiarów.*

**Abstract.** *Ferromagnetic objects have induced and permanent magnetisation. The permanent magnetisation in case of warships has to be decreased by a degaussing process for minimization of the magnetic field of a ship. The degaussing process is a complicated and time-consuming task. The cheapest method of investigation of degaussing process is research on ship models. The measurement system for investigation of the magnetic field of a ship model is presented in this paper. The measurement system is completely automated and allows for efficient measurements. The computer program of this system was carried out in LabVIEW. The structure and functions of the measurement system and the method for decreasing errors connected with the move of magnetic sensors on the platform were discussed. The 3-axis magnetoresistive magnetometers HMR2300 are used in the measurement system. The sensitivity and accuracy of these magnetometers are sufficient enough for measurements of the magnetic field of a ship model. The sequential method of communication between a computer and magnetometers provides approximately simultaneous measurements from all sensors. The result of a degaussing process of the ship model is presented in this paper. (System for magnetic field measurement in degaussing process of ships).*

**Słowa kluczowe:** pole magnetyczne, demagnetyzacja, model okrętu, pomiary magnetyczne

**Keywords:** magnetic field, degaussing process, magnetic measurements

### Wstęp

Statki i okręty, jako obiekty ferromagnetyczne ulegają w ziemskim polu magnetycznym namagnesowaniu. W jego wyniku powstaje zaburzenie rozkładu pola magnetycznego, nazywane polem własnym okrętu. Rozróżnia się dwa rodzaje namagnesowania: indukowane - zależne od położenia, kursu, przechylenia okrętu oraz stałe - wynikające m.in. z uderzeń mechanicznych lub z długotrwałego postoju w porcie. W przypadku zbyt dużego namagnesowania okrętu zwiększa się potencjalne zagrożenie ze strony min morskich [1]. Z tego względu dąży się do jego minimalizacji. Namagnesowanie indukowane zmniejszane jest dzięki zastosowaniu automatycznego urządzenia demagnetyzacyjnego (AUD), które steruje prądami w cewkach umieszczonych wewnątrz okrętu, zależnie od jego kursu. Minimalizację namagnesowania stałego okrętu przeprowadza się w stacji demagnetyzacyjnej. Proces demagnetyzacji okrętu jest złożony i czasochłonny, co wynika z konieczności nałożeniu na okręt odpowiednich uzwojeń. Z tego powodu w ośrodkach badawczo-rozwojowych trwają prace nad nowymi, efektywniejszymi metodami demagnetyzacji [2-4]. W celu zmniejszenia kosztów, badanie nowych metod demagnetyzacji okrętów przeprowadza się na modelach wykonanych w odpowiedniej skali. W pracy przedstawiono system pomiarowy do badania stanu namagnesowania modelu okrętu w trakcie jego demagnetyzacji. System pozwala na uzyskanie informacji o rozkładzie pola magnetycznego modelu okrętu, umożliwiając porównanie badanych metod demagnetyzacji.

### Budowa systemu pomiarowego

#### Model okrętu

Prowadzenie badań na okręcie jest kłopotliwe, dlatego przygotowano modele okrętów pomniejszone w stosunku do obiektów rzeczywistych. Na rysunku 1 pokazana jest fotografia modelu okrętu wojennego ORP Orkan na stanowisku badawczym. Wymiary tego okrętu wynoszą: długość 48,9 m, szerokość 8,65 m, zanurzenie 2,15 m. Model został wykonany w skali 1:16. W modelu

umieszczono wewnętrzne grodzie oraz uzwojenia urządzenia AUD. Model podwieszony jest do konstrukcji stanowiska badawczego.

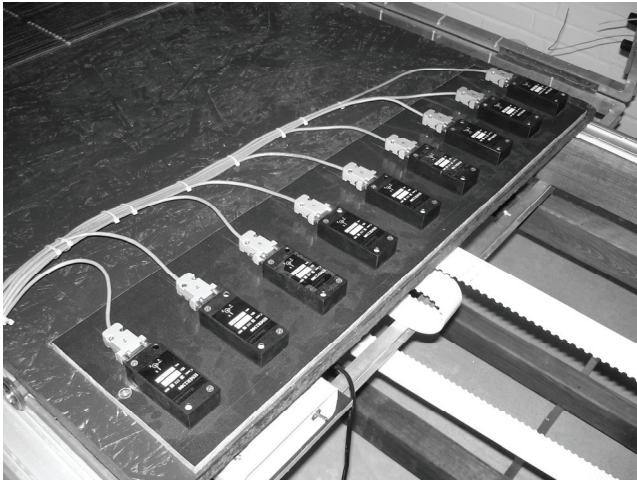


Rys. 1. Model okrętu na stanowisku badawczym

### Czujniki do pomiaru pola magnetycznego

System pomiaru pola magnetycznego powinien umożliwiać pomiar rozkładu indukcji magnetycznej pod modelem okrętu. W tym celu pod modelem przemieszczana jest ruchoma platforma z umieszczonymi na niej dziewięcioma czujnikami pola magnetycznego, rozdawanymi równomiernie na szerokości 0,5 m (rys. 2).

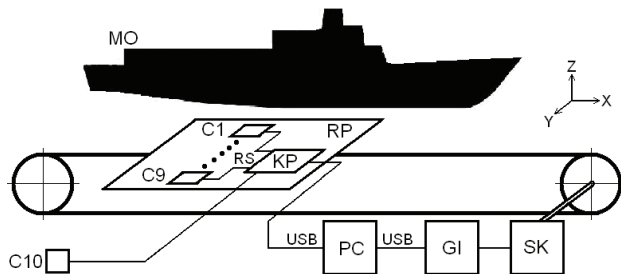
Jako czujniki pomiarowe wykorzystano magnetometry HMR2300 firmy Honeywell [5]. Czujniki te wykorzystują zjawisko magnetorezystancyjne [6], umożliwiając pomiar trzech składowych ( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ) indukcji magnetycznej w zakresie  $\pm 200 \mu\text{T}$  z rozdzielczością 7 nT. Główną częścią czujnika jest układ pomiarowy HMC2003, uzupełniony o 16-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy, mikrokontroler, pamięć EEPROM, umożliwiającą zapisanie bieżącej konfiguracji oraz układ interfejsu. Czujniki wyposażone są w interfejs RS-232/485. Komunikacja z czujnikiem realizowana jest za pomocą specjalnych poleceń.



Rys.2. Czujniki pola magnetycznego na ruchomej platformie

### Struktura systemu

Schemat blokowy systemu do pomiaru pola magnetycznego przedstawiony jest na rysunku 3.



Rys.3. Schemat blokowy systemu pomiarowego; MO – model okrętu, RP – ruchoma platforma, C1...C10 – czujniki pomiarowe, KP – konwerter portów, PC – komputer, GI – generator impulsów, SK – silnik krokowy, USB – interfejs USB, RS – interfejs RS-232  
Fig.3. Block diagram of measurement system; MO – ship's model, RP – moving platform, C1...C10 – sensors, KP – port's converter, PC – computer, GI – pulse generator, SK – stepping motor, USB – interface USB, RS – interface RS-232

W zbudowanym systemie czujniki podłączone są poprzez interfejs RS-232 do konwertera portów UPort 1650-16 firmy MOXA. Konwerter ten pozwala na podłączenie do interfejsu USB komputera do 16 urządzeń wyposażonych w interfejsy RS-232/422/485. Zaletą urządzenia jest to, że porty szeregowo nie wymagają przerwań IRQ, kanałów DMA oraz adresów I/O, dzięki czemu nie ma zagrożenia konfliktów sprzętowych.

Dziesiąty, nieruchomy czujnik HMR2300, nazywany dalej czujnikiem odniesienia, umieszczony jest poza polem magnetycznym okrętu. Wynik pomiaru z tego czujnika odejmowany jest od wyników uzyskanych z czujników umieszczonych pod modelem okrętu. W efekcie uzyskuje się wartość indukcji magnetycznej wynikającą jedynie z zaburzenia pola magnetycznego modelu okrętu.

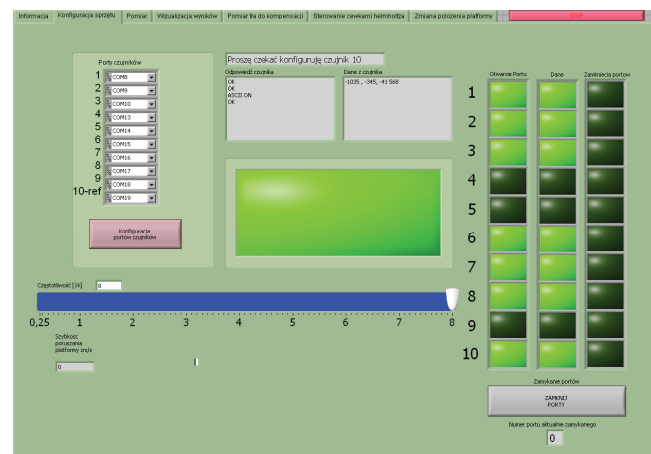
Dodatkowym zadaniem systemu pomiarowego jest sterowanie położeniem ruchomej platformy. Wykorzystano do tego celu silnik krokowy oraz generator impulsów modułu NI USB-6225 produkcji National Instruments.

### Oprogramowanie systemu pomiarowego

Oprogramowanie systemu pomiarowego zostało przygotowane w środowisku LabVIEW firmy National Instruments [7]. Panel programu posiada siedem zakładek: konfiguracja sprzętu, wykonanie pomiaru i archiwizacja wyników, wykonanie obliczeń i wizualizacja, pomiary pola

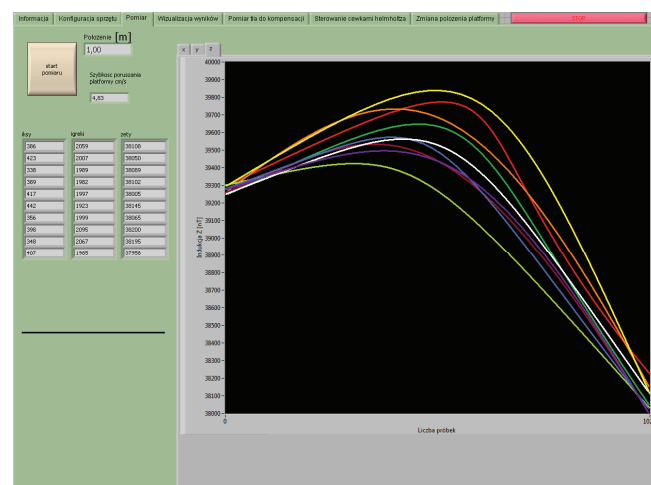
magnetycznego do kompensacji zakłóceń, sterowanie cewkami Helmholtz'a, zmiana położenia platformy oraz informacja o obsłudze systemu i jego autorach. Cewki Helmholtz'a obejmujące obszar, w którym umieszczony jest model okrętu, służą do symulacji kursów okrętu w różnych kierunkach magnetycznych.

W trakcie konfiguracji sprzętu użytkownik podaje numery portów szeregowych, do których podłączone są kolejne czujniki pola magnetycznego (rys. 4). Do komunikacji z czujnikami wykorzystane są sterowniki VISA. Czujniki zostają przełączone w tryb binarny, w którym wyniki pomiaru przesyłane są w siedmiu bajtach (dwa bajty na wynik w każdej osi, uzupełnione o znak powrotu karetki). W przeciwieństwie do trybu binarnego, przesłanie wyniku w trybie ASCII wymaga 28 bajtów, zajmując więcej czasu. Skonfigurowanie każdego z czujników i prawidłowa komunikacja potwierdzana jest oddzielnym wskaźnikiem na panelu. Dodatkowo zakładka konfiguracji pozwala ustawić kanał fizyczny modułu wykorzystanego do sterowania silnikiem krokowym.



Rys.4. Zakładka do konfiguracji sprzętu pomiarowego

Po przełączeniu na zakładkę „Pomiar” możliwe jest wykonanie pomiarów (rys. 5). Przed rozpoczęciem pomiarów należy podać drogę oraz kierunek przemieszczenia platformy pomiarowej. Pomiar położenia platformy dokonywany jest pośrednio przez pomiar czasu ruchu. Odstęp między kolejnymi pomiarami może być zadawany przez użytkownika.



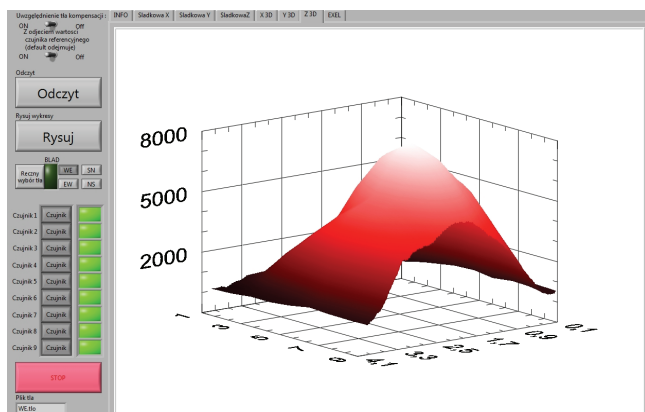
Rys.5. Zakładka do kontroli wyników pomiaru



W trakcie pomiaru wyniki z wszystkich czujników przedstawiane są w postaci numerycznej oraz na wykresie w funkcji położenia. Umożliwia to na bieżąco ich kontrolę. Po zakończonych pomiarach wyniki wraz z odpowiadającymi im współrzędnymi położeniami platformy zapisane zostają do pliku.

Kolejna zakładka programu służy do wizualizacji wyników. Po wybraniu pliku z danymi, zostają one przedstawione w postaci tabelarycznej. Następnie użytkownik wybiera zakres, w jakim mają być przedstawione wyniki na wykresie (musi się on zawierać w zakresie, w którym wykonano pomiary) oraz liczbę punktów. Wartości pola magnetycznego dla określonych w ten sposób położen zostają wyznaczone z interpolacji.

Uzyskane z pomiarów wartości składowych  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  indukcji magnetycznej przedstawiane są na wykresach Intensity Graph oraz 3D Graph (rys. 6).



Rys.6. Zobrazowanie wyników na wykresie przestrzennym

### Wpływ właściwości metrologicznych systemu na wyniki pomiarów

#### Szybkość ruchu platformy

Prędkość ruchu platformy pomiarowej może być nastawiana przez zmianę częstotliwości generatora impulsów modułu NI USB-6225 zasilającego silnik krokowy. Prędkość platformy ma wpływ na:

- całkowity czas pomiaru,
- odstęp między poszczególnymi pomiarami,
- odstęp między pomiarami wykonanymi kolejnymi czujnikami w danym cyklu,
- dokładność pomiaru.

Zbyt długi całkowity czas pomiaru powoduje wydłużenie czasu badań. Istnieje również znaczne prawdopodobieństwo, że na dokładność pomiaru będą miały wpływ zmiany w czasie pola magnetycznego Ziemi. Czas pomiarów dla modelu o długości 3 m przy prędkość platformy 1,5 cm/s wynosi 200 s.

Przy większej prędkości platformy zwiększa się odstęp między pomiarami wykonanymi przez dany czujnik, zmniejszając rozdzielczość w funkcji położenia platformy (liczbę pomiarów na jednostkę długości). Minimalna wartość odstępu między pomiarami wykonanymi tym samym czujnikiem przy prędkości platformy 1,5 cm/s wynosi 0,4 mm.

Ze względu na sekwencyjną komunikację z poszczególnymi czujnikami, pomiar przez każdy z czujników wykonany jest w innej chwili czasowej, a więc w innym położeniu. Utrudnia to wykonanie wykresów rozkładu indukcji magnetycznej. Negatywne skutki tej niedogodności zostały zmniejszone przez rozwiązanie zastosowane w programie, polegające na wysłaniu polecenia wykonania pomiaru do wszystkich czujników. Dopiero po opóźnieniu

wynikającym z czasu transmisji, interpretacji i wykonania rozkazu, wyniki są odbierane sekwencyjnie ze wszystkich czujników. Czas wysłania polecenia wykonania pomiaru do 10 czujników wynosi ok. 6 ms, przy prędkości platformy 1,5 cm/s zmiana położenia jest mniejsza od 0,1 mm. Biorąc pod uwagę, że uzyskane z pomiarów największe zmiany indukcji magnetycznej pochodzącej od modelu okrętu w funkcji położenia wynoszą ok. 50 nT/mm, błąd pomiaru wynikający ze zmiany położenia platformy o 0,1 mm nie przekracza 5 nT. Wartość tego błędu jest mniejsza od składowej błęd pomiaru wynikającej z niedokładności wykorzystywanych czujników.

W tabeli 1 przedstawiono wpływ prędkości ruchu platformy na omówione parametry pomiaru. W badaniach przyjęto wartości prędkości równe 0,5, 1,5 i 5,0 cm/s.

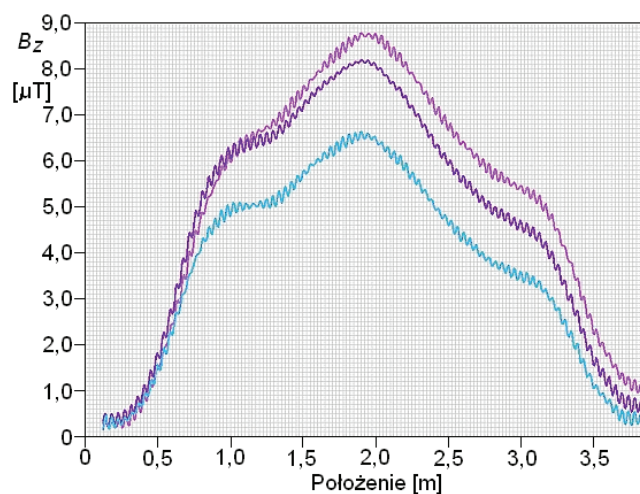
Tabela 1. Wpływ prędkości platformy na parametry pomiaru

Prędkość platformy cm/s	Całkowity czas pomiaru s	Odstęp między cyklami mm	Odstęp w jednym cyklu mm
0,5	600	0,13	0,03
1,5	200	0,4	0,09
5,0	60	1,3	0,3

#### Dokładność pomiarów

Podawana przez producenta [5] typowa wartość błędu czujnika HMR2300 w zakresie  $\pm 100 \mu\text{T}$  wynosi 0,01% zakresu, natomiast w zakresie  $\pm 200 \mu\text{T}$  - 1% zakresu. Ponieważ w pomiarach wartość indukcji nie przekraczała  $100 \mu\text{T}$  (wartości ziemskiego pola magnetycznego wynoszą ok.  $50 \mu\text{T}$  oraz pola, którego źródłem jest namagnesowany model okrętu ok.  $10 \mu\text{T}$ ), dokładność pomiaru zastosowanymi czujnikami jest zadawalająca.

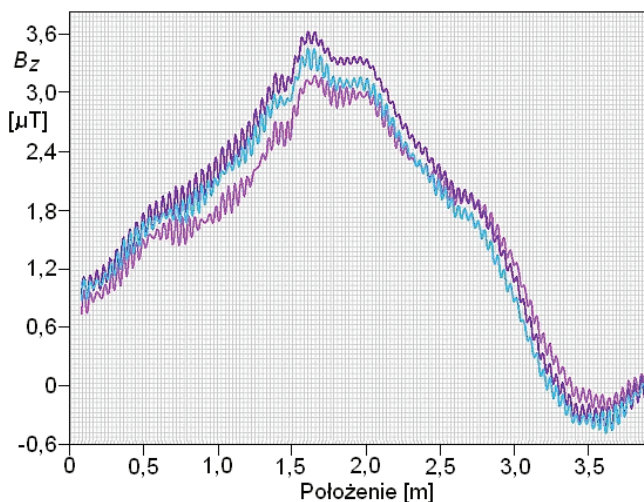
Na dokładność pomiarów, oprócz błędów wnoszonych przez zastosowane czujniki, wpływ mają również zmiany pola magnetycznego Ziemi, przemysłowe zakłócenia magnetyczne oraz lokalne anomalie magnetyczne, których źródłem są elementy ferromagnetyczne znajdujące się w pobliżu stanowiska pomiarowego (np. elementy ferromagnetyczne budynku, przyrządy pomiarowe itp.). Z tego powodu w systemie pomiarowym zastosowano kompensację zakłóceń. W celu kompensacji zakłóceń magnetycznych występujących na stanowisku badawczym zastosowano magnetometr referencyjny (C10 na rysunku 3) oraz wykorzystano wyniki pomiarów indukcji magnetycznej wzdłuż toru pomiarowego bez modelu okrętu. Szczegółowy opis zastosowanej metody kompensacji zakłóceń magnetycznych podano w pracy [8].



Rys.7. Krzywa rozkładu składowej  $B_z$  indukcji magnetycznej przed demagnetyzacją

### Przykładowe wyniki pomiarów

Na rysunku 7 przedstawiono rozkład składowej  $B_z$  indukcji magnetycznej pod stępką, po lewej i prawej burcie modelu okrętu przed demagnetyzacją. Ze względu na czytelność rysunku podano wyniki trzech spośród dziesięciu czujników pomiarowych. Na wykresach widoczne są zakłócenia magnetyczne o amplitudzie rzędu 150 nT (błąd pomiaru nie większy niż 1.5%), które wynikają z przesunięć fazowych przemysłowych zakłóceń magnetycznych między czujnikami na platformie a czujnikiem referencyjnym.



Rys.8. Krzywa rozkładu składowej  $B_z$  indukcji magnetycznej po demagnetyzacji

Na rysunku 8 przedstawiono natomiast rozkład składowej  $B_z$  indukcji magnetycznej pod stępką, po lewej i prawej burcie modelu okrętu po demagnetyzacji.

### Wnioski

Na podstawie doświadczeń autorów przy opracowywaniu systemu pomiarowego oraz wykonanych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- W zbudowanym układzie pomiarowym, do badania rozkładu indukcji magnetycznej na dużej powierzchni, zastosowano niewielką liczbę czujników (9 sztuk).

Rozkład indukcji magnetycznej uzyskano metodą przemieszczania czujników wzdłuż badanego pola;

- Zastosowane czujniki magnetorezystancyjne posiadają odpowiednie parametry do pomiaru indukcji magnetycznej w procesie demagnetyzacji modeli okrętów;
- Zastosowanie do przygotowania oprogramowania środowiska LabVIEW pozwoliło na pełne sterowanie zautomatyzowanym stanowiskiem do badania metody demagnetyzacji modeli okrętów oraz uzyskanie wyników w wygodnych do dalszej analizy postaciach tabelarycznych i graficznych;
- Zastosowana metoda sekwencyjnej komunikacji z poszczególnymi czujnikami pomiaru indukcji magnetycznej pozwala na w przybliżeniu jednoczesny pomiar przez wszystkie 10 czujników pomiarowych.

### LITERATURA

- [1] Karwan H. M., Obrona przeciwminowa w Marynarce Wojennej RP, *Przegląd Morski*, nr 2, sierpień 2007, 4-14.
- [2] Jakubiuk K., Zimny P., Młyński A., Wołoszyn M., Analiza pola magnetycznego wewnątrz cienkościennego obiektu ferromagnetycznego podczas demagnetyzacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6/2009, 35-37.
- [3] Wołoszyn M., Zimny P., Jakubiuk K., Analysis of degaussing process of ferromagnetic objects, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 1/2010.
- [4] Baynes T. M., Russell G. J., Bailey A., Comparison of stepwise demagnetisation techniques, *IEEE Transactions on Magnetics*. 38 (2002), n.4, 1753-1758.
- [5] Honeywell, HMR2300. Smart Digital Magnetometer. Sensor Products.
- [6] Tumański S., Czujniki pola magnetycznego – stan obecny i kierunki rozwoju, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2/2004, 74-80.
- [7] Świsulski D., Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych w LabVIEW, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2005.
- [8] Świsulski D., Jakubiuk K., Zimny P., Wołoszyn M., Badania pola magnetycznego modelu okrętu podczas demagnetyzacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4/2010, 115-117.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Kazimierz Jakubiuk, dr hab. inż. Dariusz Świsulski, dr inż. Mirosław Wołoszyn, mgr inż. Jacek Łubkowski, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: {k.jakubiuk, d.swisulski, m.woloszyn}@ely.pg.gda.pl, jaclubko@pg.gda.pl.