

## Badania pola magnetycznego modelu okrętu podczas demagnetyzacji

**Streszczenie.** Przedstawiono system pomiarowy do badania pola magnetycznego modelu okrętu. System ten będzie wykorzystany przy opracowaniu algorytmów demagnetyzacji okrętów wojennych. Omówiono sposób kompensacji zakłóceń magnetycznych występujących w środowisku.

**Abstract.** A measurement system for investigations of the magnetic field of a ship model is presented in the study. The system will be applied in order to work out algorithms for degaussing process of warships. A method of magnetic disturbances compensation occurring in the environment is discussed. (Investigations of magnetic field of model of ship during degaussing process).

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

**Keywords:** magnetic field, degaussing, model of ship, magnetic measurements.

### Wstęp

Okręty wojenne ulegają w ziemskim polu magnetycznym namagnesowaniu. Rozróżnia się dwa rodzaje takiego namagnesowania: namagnesowanie indukowane zależne od kursu okrętu oraz namagnesowanie stałe, najczęściej wynikające z długotrwałego postoju w stałym zewnętrznym polu magnetycznym np. w porcie [1]. W przypadku okrętów wojennych namagnesowanie indukowane minimalizowane jest dzięki zastosowaniu automatycznego urządzenia demagnetyzacyjnego (AUD), które steruje prądami w cewkach umieszczonych wewnątrz okrętu zależnie od kursu. Namagnesowanie stałe również częściowo minimalizuje AUD, ale w przypadku większego namagnesowania okrętu zwiększa się potencjalne zagrożenie ze strony min morskich. W takiej sytuacji istnieje potrzeba minimalizacji namagnesowania stałego okrętu, które przeprowadza się na stacji demagnetyzacji. Proces demagnetyzacji okrętu jest złożony i czasochłonny. Mimo istniejących rozwiązań demagnetyzacji okrętów, w wielu ośrodkach badawczo-rozwojowych trwają prace nad nowymi, efektywniejszymi metodami. W pracy przedstawiono stanowisko badawcze i zastosowaną metodę kompensacji zakłóceń magnetycznych podczas badania pola magnetycznego modelu okrętu.

### Model okrętu

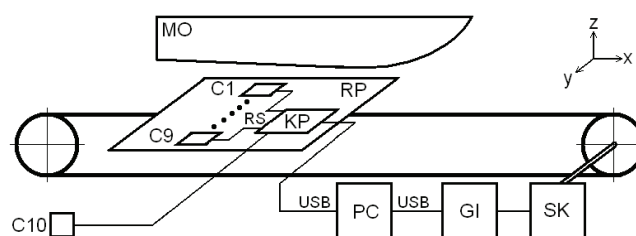
Na rysunku 1 przedstawiono fotografię modelu okrętu wojennego ORP Orkan wykonanego w skali 1:20. W modelu umieszczono wewnętrzne grodzie oraz uzwojenia urządzenia AUD. Model podwieszony jest do konstrukcji stanowiska badawczego.



Rys.1. Model okrętu na stanowisku badawczym

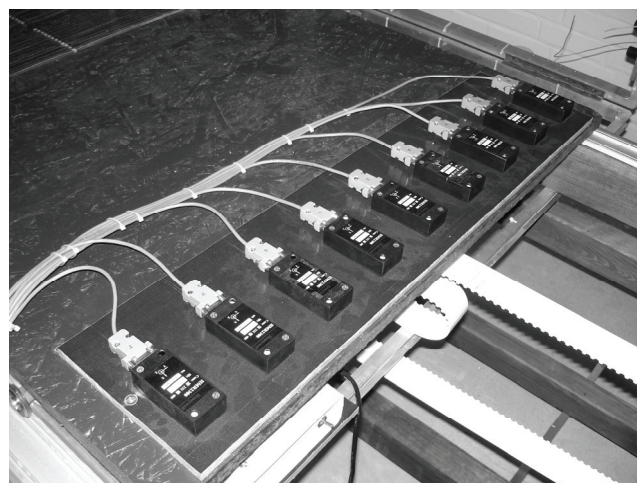
### System pomiarowy

Schemat blokowy systemu do pomiaru pola magnetycznego przedstawiony jest na rysunku 2.



Rys.2. 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

Pod powieszonym modelem okrętu przemieszczana jest ruchoma platforma z umieszczonymi na niej dziewięcioma czujnikami pola magnetycznego, rozstawionymi równomiernie na szerokości 0,5 m (rys.3).



Rys.3. Czujniki pola magnetycznego na ruchomej platformie

Jako czujniki pomiarowe wykorzystano magnetometry HMR2300 firmy Honeywell [2]. Czujniki te wykorzystują zjawisko magnetorezystancyjne [3], 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.

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

Dziesiąty, nieruchomy czujnik HMR2300, nazywany dalej czujnikiem referencyjnym, umieszczony jest poza polem magnetycznym okrętu. Wynik pomiaru z tego czujnika odejmowany jest jako offset od wyników uzyskanych z czujników umieszczonych pod modelem okrętu. Pozwala to na uwzględnienie pola magnetycznego Ziemi przy detekcji pola okrętu.

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

Oprogramowanie systemu pomiarowego zostało przygotowane w środowisku LabVIEW firmy National Instruments [4]. Panel programu posiada pięć zakładek: konfiguracja sprzętu, wykonanie pomiaru i archiwizacja wyników, wykonanie obliczeń i wizualizacja, pomiary pola magnetycznego do kompensacji zakłóceń oraz informacja o obsłudze systemu i jego autorach.

W trakcie konfiguracji sprzętu użytkownik podaje numery portów szeregowych, do których podłączone są kolejne czujniki pola magnetycznego. Do komunikacji z czujnikami wykorzystane są sterowniki VISA. Czujniki zostają przełączone w tryb binarny, w którym wyniki pomiaru przesyłane są na 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.

Po przełączeniu na zakładkę „Pomiar” możliwe jest wykonanie pomiaru. Po uruchomieniu pomiaru należy podać odległość, o jaką ma zmienić położenie platforma z czujnikami oraz kierunek ruchu. Dla przyjętej częstotliwości sygnału impulsowego doprowadzonego do silnika krokowego, prędkość platformy wynosi 1,446 cm/s. Pozwala to na wykonanie pomiaru na długości całego modelu okrętu (3 m) w czasie poniżej 3,5 minuty.

Ponieważ w trakcie pomiarów platforma znajduje się cały czas w ruchu, a komunikacja z poszczególnymi czujnikami realizowana jest sekwencyjnie, powoduje to, że pomiar przez każdy z czujników wykonany jest w innej chwili, a w rezultacie w innym położeniu. Negatywne skutki tej sytuacji zostały zmniejszone w ten sposób, że program nadzorujący wysyła polecenia wykonania pomiaru do wszystkich czujników. Dopiero po opóźnieniu wynikającym z czasu transmisji, interpretacji i wykonania rozkazu oraz odesłania wyniku, wyniki odbierane są sekwencyjnie ze wszystkich czujników. W czasie, gdy polecenie wykonania pomiaru wysłane jest do 10 czujników, zmiana położenia platformy jest mniejsza od 0,1 mm.

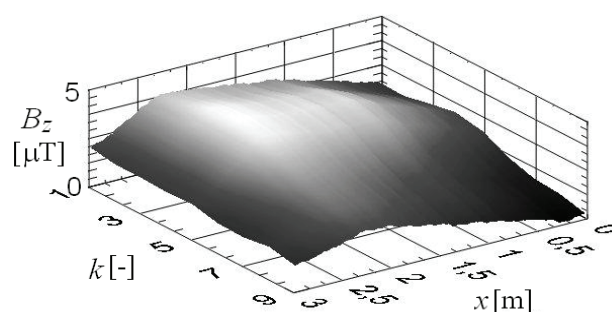
Pomiar położenia platformy dokonywany jest pośrednio przez pomiar czasu ruchu. Odstęp między pomiarami może

być zadawany przez użytkownika. Minimalna wartość tego odstępu, dla przyjętej prędkości platformy, wynosi 0,4 mm.

Wyniki pomiarów z wszystkich czujników przedstawiane są w trakcie pomiaru w postaci numerycznej oraz na wykresie w funkcji położenia. Umożliwia to na bieżąco podgląd działania systemu. Po zakończonych pomiarach wyniki wraz z przypisanymi do nich 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 położzeń zostają wyznaczone z interpolacji.

Uzyskane z pomiarów składowe  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  indukcji magnetycznej przedstawiane są na wykresach Intensity Graph oraz 3D Graph. Na rys. 4 przedstawiono rozkład składowej  $B_z$  indukcji magnetycznej.



Rys.4. Przykładowy wykres rozkładu indukcji magnetycznej modelu okrętu;  $k$  – numery kolejne magnetometrów (wzdłuż osi  $y$ ),  $x$  – współrzędna wzdłuż osi  $x$

#### Kompensacja zakłóceń magnetycznych na stanowisku pomiarowym

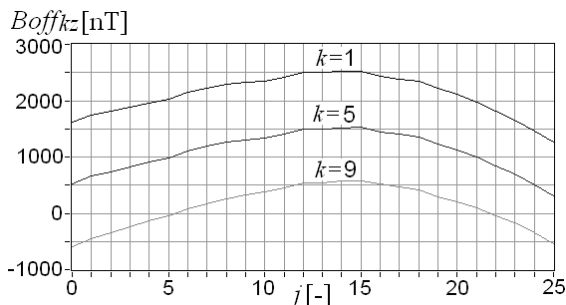
Ważnym zadaniem przygotowanego oprogramowania systemu pomiarowego jest kompensacja zakłóceń magnetycznych. Kompensacja ta umożliwi wyeliminowanie zarówno wpływu zmian pola magnetycznego Ziemi, jak i lokalnej anomalii magnetycznej, której źródłem są elementy ferromagnetyczne znajdujące się w pobliżu stanowiska pomiarowego (np. elementy ferromagnetyczne budynku, przyrządy pomiarowe).

W celu kompensacji zakłóceń magnetycznych występujących na stanowisku badawczym zastosowano magnetometr referencyjny (C10 na rysunku 2) oraz wyniki pomiarów indukcji magnetycznej wzdłuż toru pomiarowego bez modelu okrętu. Pomiary te wykonywane są z zadaniem odstępem między kolejnymi położeniami platformy i zadaną liczbą  $n$  pojedynczych pomiarów przy danym położeniu (w trakcie pomiarów dla danego położenia platforma jest nieruchoma). Pomiary należy powtórzyć przy każdej zmianie położenia elementów ferromagnetycznych, znajdujących się w pobliżu stanowiska.

Po przeprowadzeniu pomiarów program oblicza różnicę średnich wartości indukcji magnetycznej między poszczególnymi składowymi indukcji uzyskanej z magnetometrów, a analogicznymi składowymi z magnetometru referencyjnego:

$$(1) \quad B_{off_{ksj}} = \frac{\sum_{i=1}^n B_{ksji}}{n} - \frac{\sum_{i=1}^n B_{rsji}}{n}$$

gdzie:  $k$  – numer czujnika ( $k = 1 \dots 9$ ),  $s$  – składowa indukcji ( $s = x, y, z$ ),  $j$  – kolejne położenie platformy,  $i$  – kolejny pomiar dla  $j$ -tego położenia ( $i = 1 \dots n$ ),  $n$  – liczba pomiarów dla każdego położenia,  $B_{ksji}$  – wartość składowej  $s$  indukcji magnetycznej z  $k$ -tego magnetometru w  $i$ -tym pomiarze dla  $j$ -tego położenia,  $Br_{sji}$  – wartość składowej  $s$  indukcji magnetycznej z magnetometru referencyjnego w  $i$ -tym pomiarze dla  $j$ -tego położenia platformy.



Rys.5. Składowa  $B_{off_{kz}}$  różnicy indukcji magnetycznej obliczona z wzoru (1) dla trzech czujników w funkcji kolejnych położen platformy

Na rysunku 5 przedstawiono obliczoną z zależności (1) składową  $B_{off_{kz}}$  różnicy wartości średnich indukcji magnetycznej otrzymaną na podstawie wyników z trzech wybranych czujników na platformie i czujnika referencyjnego, dla 25 kolejnych położen platformy ( $j = 1 \dots 25$ ), co 10 cm.

Po wykonaniu pomiarów indukcji magnetycznej z modelem okrętu, z wzoru (2) można wyznaczyć rozkład indukcji magnetycznej pochodzącej od modelu okrętu – tzw. własne pole modelu okrętu, według wzoru:

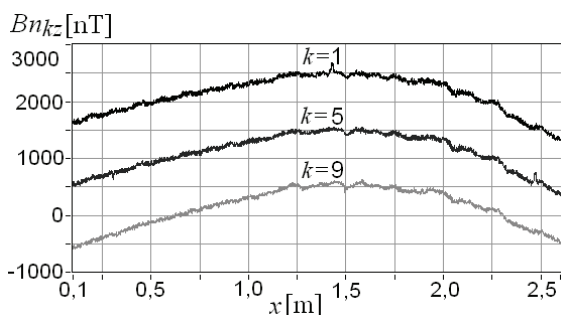
$$(2) \quad Bk_{ks}(x) = B_{ks}(x) - B_{off_{ks}}(x) - Br_s(x)$$

gdzie:  $Bk_{ks}$  – składowa  $s$  indukcji magnetycznej po kompensacji zakłóceń dla  $k$ -tego czujnika,  $B_{ks}$  – zmierzona składowa  $s$  indukcji magnetycznej z  $k$ -tego czujnika,  $x$  – położenie platformy.

Ponieważ pomiary indukcji magnetycznej na stanowisku bez modelu okrętu wykonywane są dla dyskretnych położen  $j$ , wartość  $B_{off_{ks}}(x)$  dla dowolnego położenia  $x$  wyznaczana jest z dwóch sąsiednich punktów z interpolacji, przy założeniu liniowej zmiany indukcji między tymi punktami.

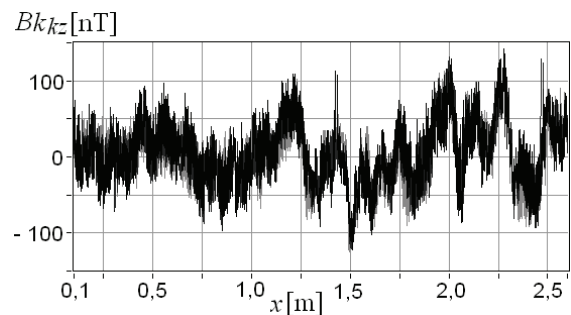
W celu sprawdzenia prawidłowości kompensacji zakłóceń wykonano pomiary bez modelu okrętu. Przykładowe wartości składowej  $Bn_{kz}(x)$  obliczone według zależności (3) przedstawione są na rysunku 6.

$$(3) \quad Bn_{kz}(x) = B_{ks}(x) - Br_s(x)$$



Rys.6. Składowa  $Bn_{kz}(x)$  indukcji magnetycznej w funkcji położenia platformy obliczona według wzoru (3)

Następnie, przy wykorzystaniu zapisanych w pamięci wartości  $B_{off_{kz}}(x)$  z zależności (2) obliczono wartość składowej indukcji magnetycznej  $Bk_{kz}(x)$  po kompensacji zakłóceń. Wyniki te przedstawione są na rysunku 7.



Rys.7. Składowa  $Bk_{kz}$  indukcji magnetycznej po kompensacji zakłóceń w funkcji położenia platformy bez modelu okrętu

W przypadku idealnej kompensacji wartości wszystkich trzech składowych indukcji na całej długości stanowiska powinny przyjmować zerowe wartości. Poziom zakłóceń magnetycznych dla wykonanego pomiaru, po kompensacji nie przekracza wartości  $\pm 150$  nT. Biorąc pod uwagę wartości ziemskiego pola magnetycznego ( $50 \mu\text{T}$ ) oraz pola, którego źródłem jest namagnesowany model okrętu (ok.  $10 \mu\text{T}$ ), jest to wartość zadawalająca. Uzyskanie całkowitej kompensacji jest niemożliwe ze względu na zmiany indukcji w funkcji czasu (do kompensacji przyjęto wartości uśrednione) oraz błędy pomiaru.

#### Podsumowanie

W artykule przedstawiono stanowisko pomiarowe do badania pola magnetycznego modelu okrętu podczas demagnetyzacji. Stanowisko to pozwoli na opracowanie efektywniejszych metod demagnetyzacji, zmniejszając zagrożenie okrętów wojennych minami morskimi.

Cały proces pomiarowy jest zautomatyzowany, a wyniki podawane w postaci tabelarycznej, jak i wygodnych do analizy wykresów. Uzyskano to dzięki oprogramowaniu opracowanemu w środowisku LabVIEW.

Przy pomiarze indukcji magnetycznej ziemskiego pola magnetycznego jej rozkład jest nierównomierny, nawet wzdłuż niewielkiej długości rzędu kilku metrów. Na przebieg indukcji magnetycznej nakładają się jej zakłócenia występujące w środowisku. Wynika stąd konieczność kompensacji zakłóceń magnetycznych. Uzyskane zakłócenia na poziomie  $\pm 150$  nT nie wpływają znacząco na wyniki pomiarów pola magnetycznego okrętu.

#### LITERATURA

- [1] Jakubiuk K., Zimny P., Młyński A., Wołoszyn M., Analiza pola magnetycznego wewnątrz cienkościennego obiektu ferromagnetycznego podczas demagnetyzacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6/2009, 35-37
- [2] Honeywell, HMR2300. Smart Digital Magnetometer. Sensor Products
- [3] Tumański S., Czujniki pola magnetycznego – stan obecny i kierunki rozwoju, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2/2004, 74-80
- [4] Świsulski D., Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych w LabVIEW, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2005

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