

**Beata PAŁCZYŃSKA, Ludwik SPIRALSKI, Jacek WYSZKOWSKI**

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY, AKADEMIA MORSKA,  
ul. MORSKA 83, 81-225 GDYNIA

## Sposób oceny małowartościowego pola magnetycznego na statkach morskich

**dr inż. Beata PAŁCZYŃSKA**

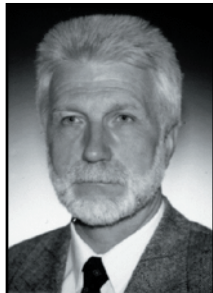
Adiunkt na Wydziale Elektrycznym Akademii Morskiej w Gdyni. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskała w 2000 roku na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Tematyka badawcza: pomiary zakłóceń, a w szczególności, cyfrowe systemy pomiarowe oraz cyfrowe przetwarzanie sygnałów w miernictwie elektrycznym i elektronicznym.



e-mail: palbeata@am.gdynia.pl

**mgr inż. Jacek WYSZKOWSKI**

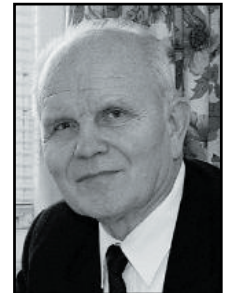
Starszy wykładowca na Wydziale Elektrycznym Akademii Morskiej w Gdyni. Wieloletni oficer elektryk na statkach armatorów krajowych i zagranicznych. Tematyka badawcza: pomiary zakłóceń elektrycznych i hałasu silników asynchronicznych zasilanych z przemienników częstotliwości oraz pomiary pola magnetycznego i elektrycznego na statkach morskich.



e-mail: jacekw@am.gdynia.pl

**prof. dr hab. inż. Ludwik SPIRALSKI**

Profesor w Politechnice Gdańskiej i Akademii Morskiej w Gdyni. Autor i współautor ponad 200 publikacji, w tym 10 książek, z czego 8 monografii z metrologii. Tematyka badawcza: teoria i technika pomiarów właściwości szumowych elementów, układów i systemów elektronicznych, kompatybilność elektromagnetyczna, zakłócenia.



e-mail: kapsz@pg.gda.pl

### Streszczenie

Przedstawiono sposób pomiaru natężenia pola magnetycznego w zakresie małych częstotliwości. Opisano komputerowy system pomiarowy, który umożliwia izotropowy pomiar wartości skutecznej oraz rejestrację przebiegów czasowych natężenia pola magnetycznego, a następnie metodą off-line dokonuje analizy częstotliwościowej sygnału pomiarowego. Przedstawiono wybrane wyniki pomiarów laboratoryjnych oraz przeprowadzonych w siłowni okrętowej statku badawczo-szkoleniowego.

**Słowa kluczowe:** pomiary pola elektromagnetycznego, natężenie pola magnetycznego

### The way of assessment of low frequency magnetic field on board of ships

#### Abstract

The way of magnetic field measurement in low frequency range is presented. The computer measurement system, that allows isotropic measurement of magnetic field intensity RMS value and recording its waveforms and than off-line time-frequency analysis of the measured signal is described. Some selected results of the measurements, that were carried out in a laboratory and in the engine room of the research-training vessel are presented.

**Keywords:** electromagnetic field measurement, magnetic field intensity

### 1. Wprowadzenie

Na statku morskim, gdzie pracują prądnice i odbiorniki energii elektrycznej dużej mocy (m.in. silniki elektryczne, przekształtniki energoelektroniczne) występują pola magnetyczne o dużych poziomach w zakresie małych częstotliwości. Na podstawie

analizy wyników pomiarów, przeprowadzonych na statku badawczo-szkoleniowym m/v „Horyzont II” dokonano oceny poziomu natężenia pola elektromagnetycznego w paśmie częstotliwości od 5 Hz do 400 kHz [1]. Zaobserwowano dużą dynamikę zmian poziomu natężenia pola magnetycznego. Najwyższe poziomy natężenia pól magnetycznych występowały w siłowni okrętowej w pobliżu pracujących prądnic. Widmo pola magnetycznego o podwyższonej intensywności rozciąga się głównie w zakresie małych częstotliwości, poniżej 2 kHz.

Przepisy okrętowych towarzystw klasyfikacyjnych nie obejmują zagadnień związanych z ochroną zdrowia załóg statków przed występującymi w środowisku pracy polami elektromagnetycznymi małych częstotliwości. Powszechnie wiadomo, że energia pól elektromagnetycznych oddziałując bezpośrednio na organizm człowieka może być przyczyną niepożądanych efektów biologicznych, zmian funkcjonowania komórek, a nawet całego organizmu człowieka. Zagadnienia te regulują przepisy, w których ustalono granice stref ochronnych pól i promieniowania elektromagnetycznego oraz zasady dopuszczalnej ekspozycji w poszczególnych strefach [2, 3]. Ze względu na to, że skutki ekspozycji są bardzo silnie uzależnione nie tylko od natężenia pól oraz od czasu trwania ekspozycji, ale również od charakterystyki zmienności natężenia pola w czasie – dopuszczalna ekspozycja zmienia się wraz z częstotliwością pól i promieniowania oddziałującego na człowieka (rys. 1). W zakresie częstotliwości do 2 kHz obserwowane wartości natężenia pola magnetycznego przekraczają dolną granicę strefy zagrożenia, rozgraniczającą strefę zagrożenia od strefy pośredniej [1].

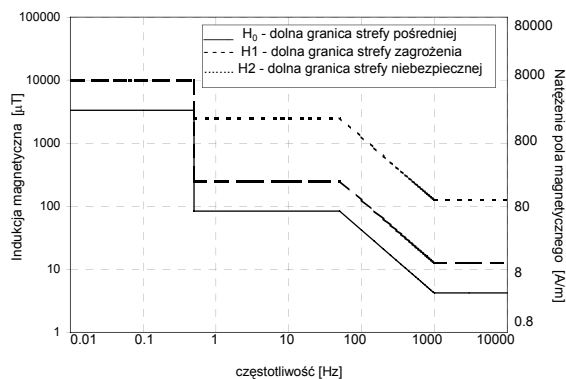
### 2. System pomiarowy

Pomiary natężenia pola magnetycznego w zakresie małych częstotliwości przeprowadzono za pomocą systemu pomiarowego, umożliwiającego jednoczesny, izotropowy pomiar wartości skutecznej natężenia pola magnetycznego  $H$  określonej w czasie 0,5s a także analizę częstotliwościową na podstawie zarejestrowanych wartości chwilowych tego pola (rys. 2). W systemie wykorzystano izotropowy miernik pola magnetycznego MASCHEK ESM-100, który pozwala na wykonanie pomiarów pola magnetycznego w paśmie częstotliwości od 5 Hz do 400 kHz w kilku zakresach pomiarowych: „all” - od 5 Hz do 400 kHz, dla częstotliwości „50 Hz”, „low” – w paśmie od 5 Hz do 2 kHz oraz „high” - od 2 kHz do 400 kHz [4]. Zmierzone wartości skuteczne natężenia pola magnetycznego  $H$  w zakresie od 1 nT do 20 mT mogą być przedstawione jednocześnie w trzech kierunkach:

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad (1)$$

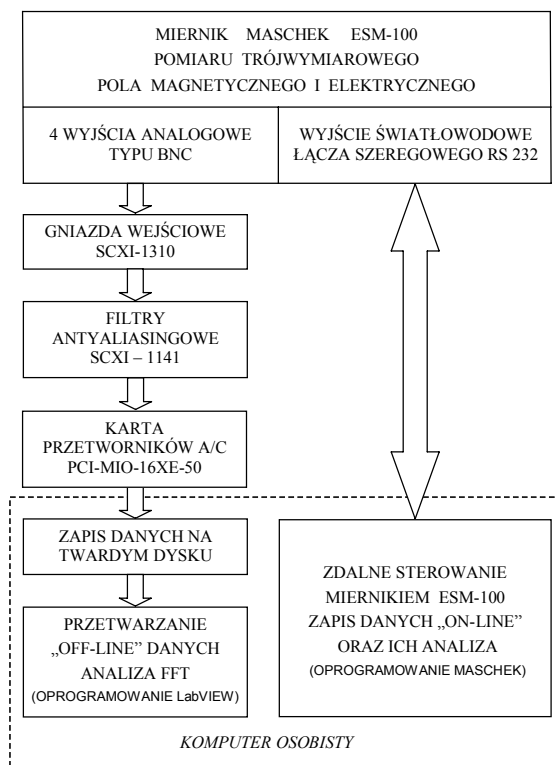
W mierniku wartości natężenia pola magnetycznego  $H$  (które powinny być podawane w A/m) wyskalowane są w jednostkach indukcji magnetycznej  $B$  (w T-teslach) czyli w rzeczywistości mierzona jest indukcja magnetyczna  $B$ , pomimo używanego przez producenta oznaczenia „ $H$ ”.

Wykorzystując oprogramowanie Graph ESM-100 Documentation Software firmy Maschek, możliwe jest zdalne sterowanie miernikiem ESM - 100 z komputera przez złącze światłowodowe, a więc dokonywanie wyboru możliwych nastaw, uruchamianie i zatrzymywanie rejestracji danych oraz ich przekazywanie, przysyłanie wykresów itp.



Rys. 1. Dopuszczalne wartości natężenia pola magnetycznego  $H$  i indukcji magnetycznej  $B$  w funkcji częstotliwości [2]

Fig. 1. Admissible levels of magnetic field strength  $H$  and magnetic flux density  $B$  versus frequency [2]



Rys. 2. Cyfrowy system pomiarowy do oceny małowartościowego natężenia pola magnetycznego

Fig. 2. Digital measurement system which allows for assessment of low frequency magnetic fields intensity

Rejestrację wartości chwilowych natężenia pola magnetycznego przeprowadzono wykorzystując kartę pomiarową z przetwornikami a/c, na wejście której podano sygnał pomiarowy z wyjść analogowych miernika ESM-100. Cztery szerokopasmowe (5Hz - 400kHz) wyjścia analogowe miernika umożliwiają pomiar wartości chwilowych przebiegu czasowego składowych pola magnetycznego w kierunkach  $x$ ,  $y$ ,  $z$  w zakresie napięć wyjściowych od 0 do 600 mV (tab. 1).

Tab. 1. Zależność zmierzonych wartości natężenia pola  $H$  od poziomu napięć na wyjściach analogowych miernika ESM - 100 [4]

Tab. 1. Relationship between the measured values of the field  $H$  and the level of the voltages at the analogue outputs of the ESM - 100 meter [4]

Zakres pola H	Wartości pola H	Napięcie wyjściowe	Rozdzielczość	Poziom napięcia stałego na wyjściu [V]
I	0 - 20 $\mu$ T	0 - 600 mV	1 nT = 30 $\mu$ V	0
II	0 - 200 $\mu$ T	0 - 600 mV	1 nT = 3 $\mu$ V	$H_x = 5, H_y = 0$
III	0 - 2 mT	0 - 600 mV	1 $\mu$ T = 300 $\mu$ V	$H_x = 0, H_y = 5$
IV	0 - 20 mT	0 - 600 mV	1 $\mu$ T = 30 $\mu$ V	$H_x = 5, H_y = 0$

Analogowy sygnał pomiarowy jest wstępnie kondycjonowany (wzmacniany, filtrowany) z wykorzystaniem podzespołów National Instruments (NI) oraz podawany na przetwornik a/c o rozdzielczości 16-bitów i częstotliwości próbkowania 20 kHz. Dopasowanie poziomu sygnału do zakresu wejściowego przetwornika a/c karty pomiarowej, realizowane jest przez wzmacniacz wejściowy o ustalonym programowo wzmacnieniu 1, 2, 5, 10, 20, 50 lub 100. Pozwala to na uzyskanie na wyjściu zakresu zmian mierzonych sygnałów napięciowych  $\pm 5$  V. Eliptyczne filtry dolno-przepustowe (8 rzędu) o częstotliwości odcięcia ustawianej programowo eliminują zjawisko nakładania się widma (ang. aliasing).

Dyskretne sygnały pomiarowe poddawane są dalszej analizie z wykorzystaniem przyrządów wirtualnych metodą off-line, w środowisku programowym LabVIEW.

### 3. Procedury przetwarzania sygnału

Metody analizy oparte na  $FFT$  są najprostszą metodą oszacowania widma sygnału, charakteryzują się one jednak tym, że nie jest możliwe uchwycenie, z pewną dokładnością efektów lokalnych, które pojawiają się w sygnale o parametrach zmieniających się w czasie. Jednocześnie przy ograniczonej liczbie zarejestrowanych próbek sygnału (przy stałej częstotliwości próbkowania), procedura  $FFT$  nie zapewnia dostatecznej rozdzielczości częstotliwościowej analizy sygnału.

W celu poprawienia rozdzielczości analizy widmowej zastosowano transformatę świergotową Chirp-Z ( $CZT$ ) [5, 6].

Dyskretna transformata  $CZT$   $N$  - elementowego ciągu czasowego próbek sygnału  $x(n)$ ,  $0 \leq n \leq N-1$  dla następujących  $M+1$  częstotliwości  $f_k$  unormowanych względem częstotliwości próbkowania  $f_p$

$$f_k = f_0 + k\Delta f, \quad k = 0, \dots, M \quad (2)$$

wyrażona jest równaniem:

$$X_k(z) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)z_k^{-n} \quad (3)$$

przy czym,  $z_k = \exp(j \frac{2\pi}{N} k)$ .

Przyjmując:

$$z_k = AW^{-k} \quad (4)$$

gdzie  $A = \exp(j2\pi f_0)$ ,  $W = \exp(-j\pi\Delta f)$ ,

dyskretna transformata  $CZT$  może być przedstawiona jako:

$$X_k(z) = W^{k^2} \sum_{n=0}^{N-1} y(n)v(n-k), \quad k = 0, \dots, M \quad (5)$$

przy czym:  $y(n) = x(n)A^n W^{n^2}$ ,  $v(n) = W^{-n^2}$ .

Równanie (5) reprezentuje ważony splot kołowy dwóch ciągów czasowych  $y(n)$  i  $v(n)$ , co w dziedzinie częstotliwości odpowiada operacji iloczynu widm  $Y_k$  i  $V_k$  i może zostać obliczone z wykorzystaniem algorytmu  $FFT$ .

Transformata  $CZT$  pozwala na obliczanie widma Fouriera  $X_k$  analizowanego sygnału w wąskim paśmie częstotliwości  $f_{window} = [f_0; f_g]$ , gdzie  $f_g = MAf$ , z określoną przez użytkownika rozdzielczością  $\Delta f$ :

$$\Delta f = \frac{f_{window}}{M} \quad (6)$$

Dla wartości  $M$  równej połowie liczby próbek  $N/2$  w ciągu  $x(n)$  analiza w całym paśmie częstotliwości  $f_{window} = f_p / 2$  jest równoważna analizie z zastosowaniem  $DFT$ .

Na podstawie wyznaczonych składowych widma  $X_k$  obliczana jest gęstość widmowa mocy  $G_n(k)$  metodą uśredniania odcinkowego [7]:

$$G_n(k) = \frac{G_n(k,1) + G_n(k,q) + \dots + G_n(k,Q)}{Q} \quad (7)$$

przy czym:

$$G_n(k,q) = \frac{2\Delta t}{K} |X_k|^2 \quad (8)$$

gdzie:  $\Delta t$  jest okresem próbkowania,  $Q$  jest liczbą uśrednień estymatora gęstości widmowej mocy,  $K$  jest liczbą próbek w analizowanym oknie czasowym.

W zaprojektowanym przyrządzie wirtualnym ( $VI$ ) realizującym analizę częstotliwościową sygnału pomiarowego wykorzystano funkcję ( $SubVI$ ) z biblioteki programu LabVIEW obliczającą transformatę  $CZT$  na podstawie ciągu próbek sygnału. Wymaga ona wprowadzenia następujących danych wejściowych:

- liczby  $M$  określającej długość transformaty  $CZT$  („# of bins”),
- wartości parametru  $A$ , związanego z dolną częstotliwością  $f_0$  analizowanego pasma („starting point”),
- wartości parametru  $W$  związanego z rozdzielczością  $\Delta f$  („increment”),
- określenia algorytmu - transformata może być obliczona dwiema metodami: bezpośrednio („Direct Form Method”) na podstawie splotu (5) lub z zastosowaniem  $FFT$  („Frequency Domain Method”).

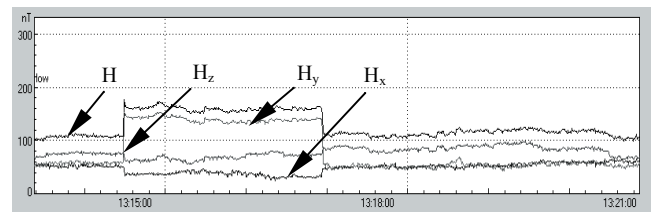
Wykorzystując zaprogramowany przyrząd wirtualny przeprowadzono analizę częstotliwościową zarejestrowanych wyników pomiaru natężenia pola magnetycznego w zakresie małych częstotliwości.

## 4. Badania eksperymentalne

Wstępne badania z wykorzystaniem opracowanego systemu pomiarowego przeprowadzono w laboratorium. Dokonano rejestracji wartości skutecznych (rys. 4) oraz przebiegów czasowych natężenia pola magnetycznego (rys. 5) w długim (ok. 1 godz.) czasie obserwacji. Zarejestrowane chwilowe przebiegi czasowe składowej magnetycznej wskazują na występowanie głównej składowej pola o częstotliwości 50 Hz zmodulowanej przypadkowym przebiegiem wolnozmiennym (rys. 5). W widmie sygnału występują również składowe

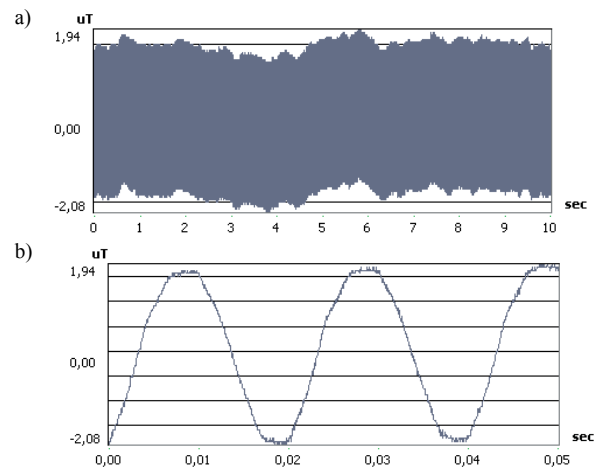
okresowe, harmoniczne podstawowej 50 Hz (rys. 6). Wykorzystując algorytm  $CZT$  dokonano szczegółowej analizy pasmowej sygnału ze zmienną rozdzielczością w zakresie częstotliwości poniżej 2kHz (rys. 7). Pozwala to na znaczne skrócenie czasu analizy przy tej samej dokładności pomiarów w poszczególnych pasmach w porównaniu z analizą  $FFT$ .

Badania eksperymentalne przeprowadzono również w siłowni okrętowej statku badawczo-szkoleniowego Akademii Morskiej w Gdyni, zacumowanym przy nabrzeżu. Rejestracji pola magnetycznego dokonano w pobliżu generatora No 1, na terenie siłowni statku, przy użyciu miernika ESM-100, który został umieszczony na statywie drewnianym obok generatora, w jego osi (rys. 8). W trakcie pomiarów czasowo włączono sąsiedni generator No 2, a także załączano dodatkowe obciążenia (nagrzewnice centrali klimatyzacyjnej, zasilanie wentylatorów: centrali klimatyzacyjnej, nawiewowych siłowni oraz wyciągowego siłowni). Obserwowano dużą dynamikę zmian poziomu natężenia pola magnetycznego w zależności od czasu wykonywania pomiarów (rys. 9).



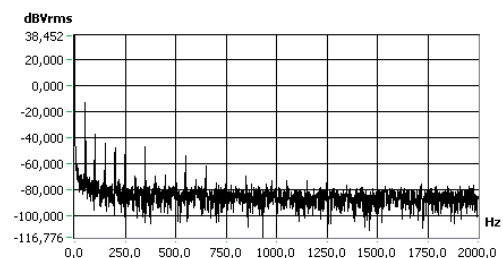
Rys. 4. Wartości skuteczne natężenia pola magnetycznego dla pasma pomiarowego miernika - „low” (zakres częstotliwości od 5 Hz do 2 kHz) - oprogramowanie Graph ESM-100

Fig. 4 RMS values of magnetic field intensity for the range „low” of the M/E field meter (frequency range from 5 Hz to 2 kHz) - Graph ESM-100 software



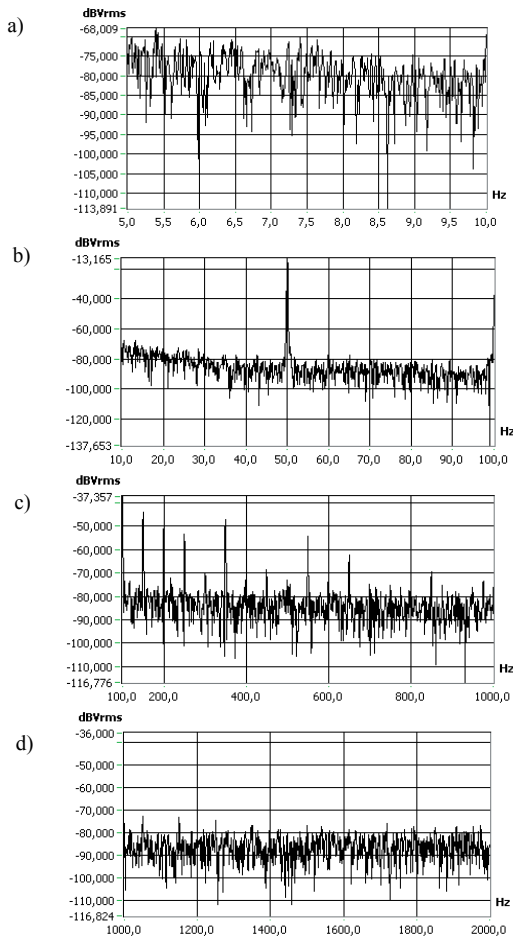
Rys. 5. Przebiegi czasowe składowej „y” natężenia pola magnetycznego dla okresu czasu 10 s (a) i 0,05 s (b)

Fig. 5. Time waveforms of magnetic field intensity in „y” direction for the time period of 10 s (a) and 0,05 s (b)

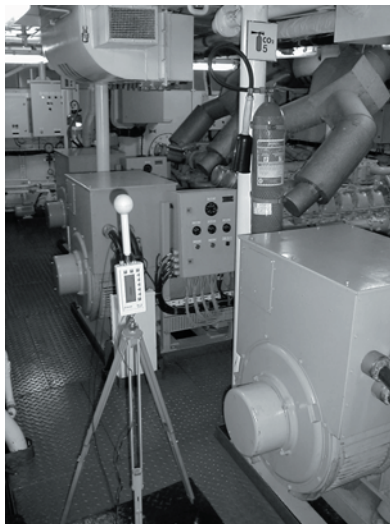


Rys. 6. Widmo częstotliwościowe składowej „y” pola magnetycznego w paśmie do 2 kHz (rozdzielczość analizy FFT wynosiła 1 Hz, liczba uśrednień gęstości widmowej mocy wynosiła 100)

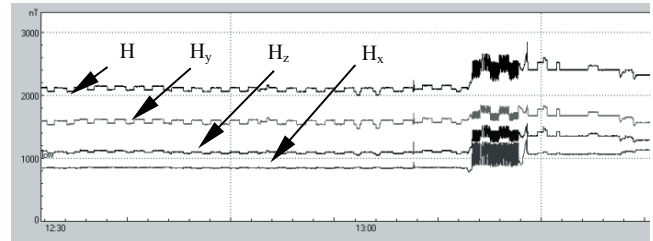
Fig. 6. Frequency spectrum of magnetic field intensity in „y” direction for the range up to 2 kHz (FFT analysis resolution was 1 Hz, the number of averaging of spectrum power density equal to 100)



Rys. 7. Widmo częstotliwościowe składowej „y” pola magnetycznego w pasmach: od 5 do 10 Hz ( $\Delta f = 0,01$  Hz) (a), od 10 do 100 Hz ( $\Delta f = 0,1$  Hz) (b), od 100 do 1000 Hz ( $\Delta f = 1$  Hz) (c), od 0,1 do 2 kHz ( $\Delta f = 10$  Hz) (d)  
 Fig. 7. Frequency spectrum of magnetic field intensity in “y” direction for the range: 5 Hz to 10 Hz ( $\Delta f = 0,01$  Hz) (a), from 10 Hz to 100 Hz ( $\Delta f = 0,1$  Hz) (b), from 100 Hz to 1000 Hz ( $\Delta f = 1$  Hz) (c), from 0,1 kHz to 2 kHz ( $\Delta f = 10$  Hz) (d)



Rys. 8. Pomiar natężenia pola magnetycznego w pobliżu generatora No 1 w silowni statku badawczo-szkoleniowego m/v „Horyzont II”  
 Fig. 8. Measurement of magnetic field intensity close to generator No 1, in the engine room of the research-training vessel m/v “Horyzont II”



Rys. 9. Wartości skuteczne natężenia pola magnetycznego w pobliżu generatora No 1 dla pasma pomiarowego miernika - „low” (zakres częstotliwości 5 Hz - 2 kHz) - oprogramowanie Graph ESM-100  
 Fig. 9. RMS values of magnetic field intensity close to generator No 1 for range “low” of M/E field meter (frequency range from 5 Hz up to 2 kHz) - Graph ESM-100 software

## 5. Uwagi końcowe

Zaproponowany system pomiarowy umożliwia rejestrację wartości chwilowych natężenia pola magnetycznego a następnie analizę widmową tego pola. Jest to istotne szczególnie wówczas gdy pomiary ukierunkowane są na badania środowiska elektromagnetycznego pod kątem sprawdzania dotrzymania dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych.

Zastosowanie procedury CZT w torze przetwarzania dyskretnego sygnału pomiarowego zwiększa dokładność wyznaczania widma częstotliwościowego przy jednoczesnych skróceniu czasu trwania przetwarzania sygnału.

Tematyka badawcza związana z oceną pola elektromagnetycznego, a głównie składowej magnetycznej tego pola w zakresie małych częstotliwości, występujących na statkach morskich jest obecnie kontynuowana. Wykonywane są dalsze analizy m.in. typu „czas- częstotliwość” zarejestrowanych przebiegów czasowych natężenia pola magnetycznego w celu identyfikacji sygnału w przedziałach czasowych. Pozwala to na wyznaczenie z pewną rozdzielczością czasową momentów wystąpienia składowych analizowanego sygnału o różnych częstotliwościach.

Planowane są również pomiary pola elektromagnetycznego w warunkach eksploatacyjnych statku morskiego.

## 6. Literatura

- [1] Pałczyńska B., Spiralski L., Wyszowski J.: Assessment of low frequency electromagnetic field intensities on board of ships. IMEKO XVIII World Congress Metrology, „Metrology for a Sustainable Development”, Rio de Janeiro –Brazylia, Sept. 17-22 2006, streszczenie p. 169, pełny tekst dostępny z płyty CD – 5 str.
- [2] PN-T-065080-1, -2, -3, Work protection in electro-magnetic radiation fields of frequency 0 Hz to 300 GHz.
- [3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1998) “Guidelines for limiting exposure in time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, Health Phys. 74, pp.494-522.
- [4] 3D H/E fieldmeter ESM-100, Maschek Technical Publication, Maschek Elektronik Germany, 2001.
- [5] Matz V., Ramos P., Bras N., Cruz Serra A.: A comparative evaluation between frequency estimation algorithms for power quality assessment in DSP implementation. IMEKO XVIII World Congress Metrology, „Metrology for a Sustainable Development”, Rio de Janeiro –Brazylia, Sept. 17-22 2006, pełny tekst dostępny z płyty CD – 6 str.
- [6] Zieliński T.P.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań. WKŁ, Warszawa 2005.
- [7] Hasse L., Spiralski L.: Szumy elementów i układów elektronicznych, WNT, Warszawa 1981.