

OCENA POZIOMU EMISJI WOLNOZMIENNEGO POLA MAGNETYCZNEGO

Beata PAŁCZYŃSKA

Akademia Morska w Gdyni, Katedra Telekomunikacji Morskiej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia,
tel.: (58) 690 15 52, e-mail: palbeata@am.gdynia.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono sposób oceny poziomu ekspozycji na wolnozmiennie pola magnetyczne w odniesieniu do dopuszczalnych wartości, zawartych w zaleceniach międzynarodowych *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP). Estymację wskaźnika ekspozycji przeprowadzono na podstawie adaptacyjnej analizy czasowo-częstotliwościowej, zarejestrowanych przebiegów czasowych indukcji pola magnetycznego. Analizę adaptacyjną, opartą na algorytmie pogoni za dopasowaniem (*ang. matching pursuit MP*) zaimplementowano w graficznym zintegrowanym środowisku programowania LabVIEW. Przedstawiono wyniki analiz sygnału pomiarowego, reprezentującego poziom indukcji wolnozmiennego pola magnetycznego, zarejestrowanego w otoczeniu okrętowych odbiorników dużej mocy.

Słowa kluczowe: małowartościowe pole magnetyczne, adaptacyjna analiza czasowo-częstotliwościowa, algorytm pogoni za dopasowaniem, wskaźnik ekspozycji na pole magnetyczne.

1. WPROWADZENIE

Występowanie wolnozmiennych, zakłócających pól magnetycznych w środowisku statku morskiego może w sposób niepożądany wpływać na niezawodność urządzeń i systemów elektrycznych i elektronicznych, co jest silnie powiązane z bezpieczeństwem żeglugi. Jest również nieobojętne dla bezpieczeństwa ludzi przebywających w pobliżu silnych źródeł tych pól. Biorąc pod uwagę te dwa aspekty, dopuszczalne poziomy natężenia wolnozmiennego pola magnetycznego, zdefiniowane w międzynarodowych dokumentach normalizacyjnych, określone są zarówno w kontekście kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń technicznych jak i w odniesieniu do oceny dopuszczalnych dla człowieka poziomów ekspozycji na te pola.

W środowisku statku morskiego wymagania kompatybilności elektromagnetycznej dotyczą głównie badania emisyjności oraz odporności urządzeń i systemów na zakłócenia radioelektryczne. Zalecenia okrętowych towarzystw klasyfikacyjnych nie biorą pod uwagę problemu wpływu wolnozmiennych pól magnetycznych, które występują w środowisku zawodowym, na zdrowie i bezpieczeństwo załóg. Tematyka związana z ekspozycją pól elektromagnetycznych w szerokim zakresie częstotliwości w środowisku pracy poruszana jest głównie w kontekście bezpieczeństwa pracy w środowisku lądowym oraz przepisów z nimi powiązanych [1, 2, 3]. Dostępne są opracowania i publikacje dotyczące wpływu silnych pól

elektromagnetycznych na zdrowie ludzkie [4, 5]. Zaproponowanie techniki pomiarowej i sposobu oceny poziomu emisji małowartościowego pola magnetycznego, gwarantujących poprawność i powtarzalność wyników pomiarów są więc niezwykle ważne z praktycznego punktu widzenia.

Z analizy wstępnych pomiarów natężenia pola elektromagnetycznego w paśmie częstotliwości od 5 Hz do 400 kHz, przeprowadzonych na statku badawczo-szkoleniowym m/v „Horyzont II” wynika, że występuje tam pole elektryczne o pomijalnie małej intensywności. Natomiast zlokalizowano obszary występowania wysokiego poziomu pól magnetycznych, o dużej dynamice zmian. Widmo pola magnetycznego o podwyższonej intensywności rozciąga się głównie w zakresie małych częstotliwości [6]. Sygnały pomiarowe, reprezentujące przebiegi czasowe natężenia wolnozmiennego pola magnetycznego, zawierające składowe okresowe, których amplitudy, częstotliwości i fazy chwilowe zmieniają się w funkcji czasu, posiadają widma o charakterze ewolucyjnym. Widma ewolucyjne sygnałów zawierają również zmieniające się w czasie składowe szerokopasmowe. Najbardziej skuteczną metodą analizy sygnałów o widmach ewolucyjnych jest spektrogram adaptacyjny, wykorzystujący algorytm pogoni za dopasowaniem MP [7].

Artykuł prezentuje sposób oceny poziomu emisji wolnozmiennego pola magnetycznego w odniesieniu do dopuszczalnych wartości, zawartych w zaleceniach międzynarodowych ICNIRP [3]. Analiza sygnałów pomiarowych przeprowadzana jest z wykorzystaniem przyrządów wirtualnych, w graficznym zintegrowanym środowisku programowania LabVIEW, w którym zaimplementowano metodę adaptacyjną analizy czasowo-częstotliwościowej.

2. DOPUSZCZALNE POZIOMY POLA MAGNETYCZNEGO

Międzynarodowe zalecenia normalizacyjne, określając dopuszczalne poziomy ekspozycji na pole magnetyczne, opierają się na wynikach badań, dotyczących stymulacji tkanki nerwowej człowieka prądami indukowanymi [4, 5]. Najbardziej reprezentatywnymi dokumentami z tego punktu widzenia są zalecenia *International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) [3]. Dopuszczalne poziomy emisji wolnozmiennego pola magnetycznego

zdefiniowane są za pomocą wartości indukcji pola magnetycznego, odpowiednio dla ekspozycji w strefie zawodowej i publicznej (rys. 1).

W przypadku jednoczesnego oddziaływania magnetycznych pól sinusoidalnych o różnych częstotliwościach warunki dopuszczalnej ekspozycji zdefiniowano za pomocą zależnego od czasu wskaźnika ekspozycji $W(t)$, którego wartość chwilowa powinna spełniać poniższą zależność [8]:

$$W(t) = \sum_{i=1}^M \frac{B_i(t)}{B_{L,i}} \leq 1 \quad (1)$$

gdzie: $B_i(t)$ - zmierzona wartość skuteczna indukcji magnetycznej o częstotliwości f_i ,
 $B_{L,i}$ - dopuszczalna wartość skuteczna indukcji magnetycznej dla częstotliwości f_i [6].

Wartość skuteczną $B_i(t)$, odpowiadającą i -tej składowej częstotliwościowej zarejestrowanego sygnału $b(t)$, reprezentującego przebieg czasowy indukcji magnetycznej, określono na podstawie analizy adaptacyjnej. Ze względu na niestacjonarny charakter sygnału pomiarowego, zmierzona wartość skuteczna dla przesuwanego się w dziedzinie czasu okna pomiarowego również jest wielkością zmieniającą się w czasie obserwacji.

W zakresie małych częstotliwości (poniżej 40 kHz) wyrażenie, określające wskaźnik ekspozycji można zmodyfikować następująco:

$$W(t) = \sum_{m=1}^{M_1} \frac{B_m(t)}{B_{L,m}} + \sum_{l=M_1+1}^{M_2} \frac{B_l(t)}{B_r} \leq 1 \quad (2)$$

gdzie: M_1 - indeks, który określa składowe sinusoidalne o częstotliwości mniejszej lub równej 800 Hz dla ekspozycji w strefie publicznej i 820 Hz w strefie zawodowej,
 M_2 - indeks dla składowych o częstotliwościach mniejszych lub równych 40 kHz,
 B_r - dopuszczalna wartość indukcji magnetycznej równa 6,25 μ T i 30,7 μ T odpowiednio dla ekspozycji w strefie publicznej i zawodowej.

Warunki bezpiecznej ekspozycji na pole magnetyczne są spełnione, jeżeli wskaźnik ekspozycji nie przekracza wartości 1 w całym przedziale czasu obserwacji.

3. ANALIZA ADAPTACYJNA

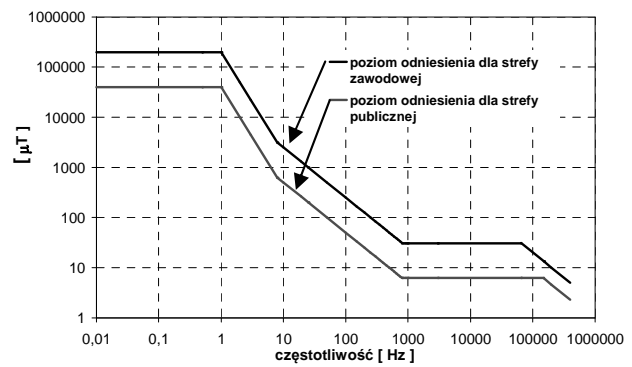
Wyznaczenie dyskretnych wartości indukcji pola magnetycznego $B_k(t)$, występujących w zależności (2):

$$B_k(t), k = m, l \quad (3)$$

przeprowadzono na podstawie spektrogramu adaptacyjnego sygnału $AS(t, f)$, będącego estymatą gęstości energii sygnału w przestrzeni czas - częstotliwość [9].

$AS(t, f)$ wyznaczany jest na podstawie dystrybucji Wignera-Vielle'a funkcji elementarnych adaptacyjnego rozwinięcia sygnału $b(t)$, o postaci [7]:

$$b(t) = \sum_{n=0}^{M-1} a_n g_n(t) \quad (4)$$



Rys. 1. Dopuszczalne poziomy indukcji wolnozmiennego pola magnetycznego dla strefy zawodowej i publicznej wg ICNIRP [3]

gdzie: $g_n(t)$ - atomy czasowo-częstotliwościowe (funkcje elementarne), a_n - współczynniki rozwinięcia,
 M - liczba funkcji elementarnych, rozmiar słownika czasowo-częstotliwościowego).

Jako funkcje elementarne zastosowano liniowe gaussowskie funkcje typu chirplet, których parametry obliczane są z zastosowaniem algorytmu pogoni za dopasowaniem MP.

$$g_{\gamma_n}(t) = \sqrt[4]{\sigma_n^2 \pi} \exp\left\{-\frac{(t-t_n)^2}{2\sigma_n^2} + j[2\pi f_n(t-t_n) + \frac{\beta_n}{2}(t-t_n)^2]\right\} \quad (5)$$

gdzie: (t_n, f_n) - punkt centralny funkcji chirplet w skali czasu i częstotliwości, σ_n - odchylenie standardowe obwiedni Gaussa, β_n - współczynnik szybkości funkcji chirp.

Spektrogram adaptacyjny $AS(t, f)$ zdefiniowany jest następująco:

$$AS(t, f) = \sum_{n=0}^{\infty} |a_n|^2 WVD g_n(t, f) \quad (6)$$

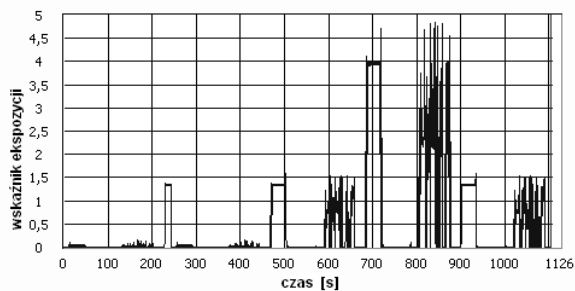
gdzie: $WVD g_n(t, f)$ - transformata Wignera-Vielle'a pojedynczego atomu $g_n(t, f)$.

4. PROCEDURA POMIAROWA

System pomiarowy w części sprzętowej wykorzystuje układy wejściowe izotropowego miernika pola magnetycznego MASCHEK ESM-100 oraz kartę pomiarową DAQ z filtrem antyaliasingowym [6]. Część programowa systemu, w tym bloki przetwarzania i analizy danych, oraz blok interfejsu graficznego zrealizowana jest w środowisku LabVIEW. Wirtualne przyrządy pomiarowe zostały oprogramowane w oparciu o autorskie procedury cyfrowego przetwarzania sygnału pomiarowego [9].

4.1. Uwarunkowania aparaturowe

Miernik MASCHEK ESM-100, pozwala na wykonanie pomiarów pola magnetycznego w kilku zakresach pomiarowych: w szerokim paśmie od 5 Hz do 400 kHz, dla częstotliwości 50 Hz, w paśmie niższych częstotliwości od 5 Hz do 2 kHz oraz wyższych częstotliwości od 2 kHz do 400 kHz. Pomiary indukcji magnetycznej przeprowadzono wykorzystując szerokopasmowe wyjścia analogowe miernika, które umożliwiają rejestrację wartości chwilowych



Rys. 6. Zmiany w funkcji czasu wskaźnika ekspozycji na pole magnetyczne, zarejestrowane w pobliżu steru strumieniowego

Wynika stąd, że w tych przedziałach czasowych zarejestrowane poziomy indukcji magnetycznej przekraczają wartości dopuszczalne, określone dla bezpiecznej ekspozycji na małowartościowe pole magnetyczne w strefie zawodowej.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Zaproponowana metoda pomiarowa pozwala na ocenę emisji wolnozmiennego pola magnetycznego w odniesieniu do dopuszczalnych dla człowieka poziomów ekspozycji na te pola, zawartych w zaleceniach międzynarodowych.

Zastosowanie metody adaptacyjnej do wyznaczania wartości chwilowej wskaźnika ekspozycji wymaga kompromisu między rozdzielczością analizy a wymaganym czasem obliczeń. Jako funkcje elementarne, zapewniające optymalną lokalizację w przestrzeni czas - częstotliwości wykorzystano liniowe gaussowskie funkcje typu chirplet.

Metoda ta w zastosowaniu do sygnałów pomiarowych, które są sumą ograniczonych w czasie przebiegów, występujących w różnych chwilach czasowych i mających różne pasma częstotliwości ma zdecydowanie najlepszą łączną rozdzielczość czasowo - częstotliwościową [9]. Pozwala z dużą dokładnością wyznaczyć spektrogram sygnału o charakterze niestacjonarnym, a na tej podstawie oszacować poziom wskaźnika ekspozycji na pole magnetyczne. Istotnym ograniczeniem zaproponowanej procedury pomiarowej jest długi czas obliczeń, od którego uzależniona jest dokładność analizy adaptacyjnej. Przedstawione w artykule analizy przeprowadzone zostały w systemie pomiarowym, opartym na komputerze osobistym, w związku z tym zastosowano wirtualny analizator czas - częstotliwość, pracujący w trybie off-line.

ASSESSMENT OF THE LOW-FREQUENCY MAGNETIC MAGNETIC-FIELD EMISSIONS

The occurrence of low-frequency, distorting magnetic fields in ship's environment, directly affects the reliability of the electrical and electronic equipment and systems, and this way, the safety of navigation. These effects are also significant for the health of people staying near to the sources of magnetic field. Due to the above-mentioned reasons, emission limits have been defined by international committees both for the functional aspects and for limiting human exposure to magnetic emissions. For exposure to low-frequency magnetic fields, the magnetic flux density B is the parameter used by *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (the ICNIRP) for the definition of the reference levels. For the special case of simultaneous exposure to multiple frequency fields, a summation formula defined in ICNIRP guidelines was applied. In the paper, the way of the estimation of the exposure level to a low-frequency magnetic field in reference to admissible levels, proposed by ICNIRP. The instantaneous values of the safety factor were estimated with the adaptive joint time-frequency analysis of the digitized magnetic-flux density waveforms, acquired by measurement. The adaptive transform, based on the matching pursuit algorithm, was implemented in the LabVIEW software. The selected results of the analysis of the recorded signals of the safety factor of magnetic flux density in the surroundings of the ship's motor drive with the power frequency converters are presented.

Keywords: low-frequency magnetic field emission, adaptive joint time-frequency analysis, the matching pursuit algorithm.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Mariscotti A.: Measurement procedures and uncertainty evaluation for electromagnetic radiated emissions from large-power electrical machinery, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, No. 6, December 2007, pp. 2452–2462.
2. Bellan D. Betti P., Carillo D., D'Amore M., D'Arco M., De Capua, Gaggelli C., Grandolfo M., Maradei F., Mariscotti A, Pignari S., Pozzobon P., Rossi P., Violi A. G.: Measurement and analysis of low-frequency magnetic-field emissions in rolling stock, in *Proc. Eur. Symp. Electromagnetic Compatibility*, Sorrento, Italy, Sept. 9–13, 2002, pp. 1201–1204.
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. Karpowicz J., Gryz K.: Electromagnetic fields in the Polish legal system of managing ambient factors in the occupational environment, *Workshop Measurements and Criteria for Standard Harmonization in the Field of EMF Exposure*, Varna April 2001.
5. Karwat T.; Pola magnetyczne od urządzeń elektroenergetycznych, ograniczenie szkodliwego wpływu na otoczenie., *Przegląd Elektrotechniczny*, R.LXXVII 12, 2002.
6. Pałczyńska B.: Spectral analysis of nonstationary low-frequency magnetic-field emissions from ship's power frequency converters, *Conference Proceedings of IEEE 6th International Conference-Workshop Compatibility in Power Electronics*, Badajoz, Spain 2009, pp. 375-380.
7. Mallat S. G., Zhang Z.: Matching pursuit with time frequency dictionaries. *IEEE Trans. Signal Process.*, 41(12), (1993), pp.3397-3415.
8. Pałczyńska B.: Measurements of electromagnetic emissions on board of the vessel with reference to the human and environmental protection, *Maritime Transport IV*, 2009, pp. 281-292.
9. Pałczyńska B.: Adaptacyjna analiza czasowo-częstotliwościowa niestacjonarnego sygnału pomiarowego, *Pomiary Automatyka Kontrola*, vol. 58, nr 11, 2012 r.
10. 3D H/E fieldmeter ESM-100, Maschek Technical Publication, Maschek Elektronik Germany, 2001.