

ZASTOSOWANIE ALGORYTMU POGONI ZA DOPASOWANIEM DO OCENY EMISJI NIESTACJONARNEGO POLA MAGNETYCZNEGO

W artykule przedstawiono sposób wyznaczania wskaźnika ekspozycji na niestacjonarne pola magnetyczne na podstawie adaptacyjnej analizy czasowo-częstotliwościowej, zarejestrowanych przebiegów czasowych indukcji pola magnetycznego B. Metodę adaptacyjną analizy czasowo-częstotliwościowej, opartą na algorytmie pogoni za dopasowaniem (ang. Matching Pursuit MP) zaimplementowano w wirtualnym analizatorze czas-częstotliwość, zaprojektowanym w graficznym środowisku programowania LabVIEW. Algorytm MP opiera się na redundantnym słowniku funkcji analizujących, z którego iteracyjnie wybierane są funkcje – atomy, najlepiej pasujące do składowych sygnału. Dzięki zmiennej długości okna oraz zmiennej częstotliwości modulacji algorytm MP pozwala na adaptacyjną, tzn. dopasowującą się do lokalnych struktur, reprezentację sygnału. Metoda adaptacyjna zastosowana 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 w porównaniu z innymi kwadratowymi czasowo-częstotliwościowymi reprezentacjami sygnału. Spektrogram adaptacyjny nie zawiera również składowych interferencyjnych. Zaprezentowano przykładowe wyniki analiz małowartościowego pola magnetycznego, zarejestrowanego na statku morskim.

Słowa kluczowe: pomiary pola magnetycznego, analiza czasowo-częstotliwościowa, algorytm pogoni za dopasowaniem.

WSTĘP

Metody analizy sygnałów o parametrach zmiennych w czasie opierają się na rozwinięciach sygnału względem określonych zbiorów funkcji – słowników, które najlepiej dopasowane są do jego kształtu. Reprezentacje liniowe względem pojedynczej bazy, np. Fouriera, nie są najlepszym rozwinięciem funkcji dobrze zlokalizowanych w czasie. Natomiast reprezentacje oparte na bazach falkowych nie są odpowiednie do reprezentacji sygnałów o wąskich widmach częstotliwościowych, położonych w zakresie wielkich częstotliwości [3, 4]. Związłą interpretację sygnału niestacjonarnego otrzymuje się, opisując go liniową kombinacją funkcji – atomów, najlepiej odpowiadających jego strukturze, które wybrano z dużego, redundantnego słownika funkcji elementarnych [3, 4]. Optymalną reprezentację sygnału uzyskuje się wówczas, gdy określony podzbiór elementów słownika reprezentuje największy procent energii sygnału wśród wszystkich podzbiorów o tej samej liczności. Wybór takiej reprezentacji daje iteracyjny algorytm „pogoni za dopa-

sowaniem” MP (ang. *Matching Pursuit*) [10]. Jest to metoda analizy sygnałów o wysokiej rozdzielczości w przestrzeni czasowo-częstotliwościowej, która opiera się na adaptacyjnych przybliżeniach sygnału za pomocą niewielu atomów, wybieranych ze słownika funkcji, zapewniających optymalną lokalizację w płaszczyźnie czas-częstotliwość elementów składowych sygnału [1, 2, 4, 5, 6, 14].

W prezentowanym artykule przedstawiono zastosowanie analizy adaptacyjnej, opartej na algorytmie MP ze słownikiem typu *chirplet* do oceny emisji niestacjonarnego pola magnetycznego [7]. Poziom emisji oszacowano w odniesieniu do dopuszczalnych wartości indukcji magnetycznej zawartych w zaleceniach międzynarodowych *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) [8]. Zaproponowaną metodę zaimplementowano w wirtualnym analizatorze czas-częstotliwość, zaprojektowanym w graficznym środowisku programowania LabVIEW [9].

1. DOPUSZCZALNE POZIOMY EMISJI MAŁOCZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO POLA MAGNETYCZNEGO

Dopuszczalne poziomy emisji pola magnetycznego, które zapewniają ochronę przed niekorzystnymi skutkami zdrowotnymi ekspozycji na te pola, są określone w międzynarodowych dokumentach normalizacyjnych [8]. Najbardziej reprezentatywne zalecenia z tego punktu widzenia, opublikowane przez ICNIRP, definiują formułę sumacyjną stosowaną w przypadku jednoczesnego narażenia na niestacjonarne magnetyczne pola sinusoidalne o wielu składowych częstotliwościowych [8],

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

przy czym $B_k(t)$, $k = m, l$ jest zależną od czasu składową indukcji pola magnetycznego o częstotliwości f_k , M_1 odnosi się do składowej sinusoidalnej o częstotliwości mniejszej lub równej 800 Hz dla ekspozycji w środowisku publicznym i 820 Hz w środowisku zawodowym, M_2 odnosi się do składowej sinusoidalnej o częstotliwości mniejszej niż 40 kHz, $B_{L,m}$ i B_r są granicznymi poziomami indukcji pola magnetycznego określonymi w zaleceniach [8].

Powyzsza zależność (1) powinna być spełniona w całym czasie obserwacji. Chwilowe, spróbkowane wartości $B_k(t)$ wyznaczono na podstawie spektrogramu adaptacyjnego, zarejestrowanych przebiegów czasowych indukcji pola magnetycznego.

2. ADAPTACYJNA ANALIZA CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWA

Estymatę gęstość energii sygnału niestacjonarnego w przestrzeni czas-częstotliwość – spektrogram otrzymuje się na podstawie łącznej czasowo-częstotliwościowej kwadratowej dystrybucji sygnału [5]. Metoda adaptacyjna polega na dekompozycji sygnału analizowanego na liniową kombinację funkcji elementarnych (atomów), a następnie odpowiednim zsumowaniu transformat Wigner-Ville (WVD) każdego z atomów w celu obliczenia gęstości energii sygnału badanego [6].

2.1. Adaptacyjna aproksymacja sygnału

Adaptacyjne rozszerzenie sygnału $b(t)$, będące liniową serią funkcji analizujących $g_{\gamma_n}(t)$, w przybliżeniu może być wyrażone następująco [4]:

$$b(t) = \sum_{n=0}^{M-1} a_n g_{\gamma_n}(t) \quad (2)$$

przy czym a_n jest zespoloną amplitudą atomu $g_{\gamma_n}(t)$ (współczynnikiem rozwinięcia), a M określa rozmiar słownika czasowo-częstotliwościowego (liczbę funkcji elementarnych).

Funkcje elementarne wybierane są z redundantnego słownika, który generowany jest przez skalowanie ($s > 0$), przesunięcie (τ) i modulację (ξ) pojedynczego atomu $g_{\gamma}(t)$ o postaci [10]:

$$g_{\gamma}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{t-\tau}{s}\right) e^{j\xi t} \quad (3)$$

Kształt funkcji elementarnych w słowniku powinien być jak najbardziej dopasowany do cech analizowanego sygnału. Zależnie od dokonanego wyboru atomów $g_{\gamma}(t)$ współczynniki rozwinięcia a_n reprezentują różne cechy sygnału $b(t)$. Parametry atomów słownika czasowo-częstotliwościowego obliczane są z zastosowaniem algorytmu pogoni za dopasowaniem MP [10].

2.2. Algorytm pogoni za dopasowaniem MP

Algorytm MP jest iteracyjną, nieliniową procedurą dekompozycji sygnału $b(t)$ na liniową sumę funkcji elementarnych wybranych ze słownika $G = \{g_1(t), g_2(t), \dots, g_n(t)\}$ takich, że zapewniona jest normalizacja energii atomów słownika, tzn. $\|g_i(t)\| = 1$ dla każdego i . W pierwszym kroku ($n = 0$) wybierana jest

funkcja g_{γ_0} , dająca największy iloczyn skalarny $|\langle R^n b, g_{\gamma_0} \rangle|$ z sygnałem b , wówczas [10]:

$$b = \langle b, g_{\gamma_0} \rangle g_{\gamma_0} + R^1 b \quad (4)$$

Iteracyjna procedura jest wykonywana dla następnego residuum, pozostałego po odjęciu wyniku poprzedniej iteracji [10]:

$$\begin{cases} R^0 b = b \\ R^{n+1} b = R^n b - \langle R^n b, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n} \\ g_{\gamma_n} = \arg \max_{g_{\gamma_i}} |\langle R^n b, g_{\gamma_i} \rangle| \end{cases} \quad (5)$$

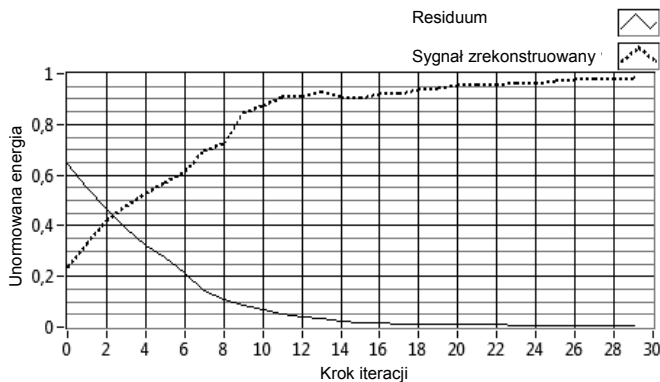
W wyniku procedury MP sygnał $b(t)$ jest wyrażony jako suma atomów słownika, wybranych z uwzględnieniem najlepszego dopasowania do jego residuów [10].

$$b(t) = \sum_{n=0}^{M-1} \langle R^n b, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n} + R^M b \quad (6)$$

Współczynniki rozwinięcia a_n w zależności (2) określone są następująco [10]:

$$a_n = \langle R^n x, g_{\gamma_n} \rangle \quad (7)$$

Residuum $R^M b$ w zależności (6) można interpretować jako błąd aproksymacji rozwinięcia adaptacyjnego sygnału, który maleje eksponentalnie z każdym krokiem iteracji i asymptotycznie dąży do stałej wartości (rys. 1). Na pewnym etapie dekompozycji, zależnym od charakteru sygnału, zwiększanie rozmiaru słownika skutkuje tylko nieznacznym wzrostem energii sygnału zrekonstruowanego.



Rys. 1. Zależność unormowanej energii residuum testowego sygnału RF po M iteracjach (linia ciągła) i jego przybliżenia adaptacyjnego (linia przerywana) od liczby iteracji algorytmu MP. Zastosowano algorytm MP ze słownikiem typu *chirplet*

Fig. 1. The normalized energy of the residue of the RF test signal after the M iterations (the solid line) and its adaptive approximation (the dashed line) as a function of the number of iterations in the MP algorithm. The MP algorithm with the chirplet dictionary was applied

Adaptacyjna reprezentacja sygnału z pewnym przybliżeniem opisana jest następująco [10]:

$$b(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \langle R^n b, g_{\gamma_n} \rangle g_{\gamma_n} \quad (8)$$

Biorąc pod uwagę równanie (7), powyższe wyrażenie przyjmuje postać zależności (2). Wybór funkcji elementarnych $g_{\gamma_n}(t)$, tworzących słownik, ma wpływ na szybkość zmniejszania się energii związanej z residuum oraz na to, jak duża część sygnału będzie tworzyć błąd aproksymacji.

2.3. Słownik czasowo-częstotliwościowy

Zastosowanie w algorytmie MP liniowych funkcji typu *chirplet* daje najlepszą łączną rozdzielczość czasowo-częstotliwościową analizy adaptacyjnej. Słownik typu *chirplet* jest zbiorem funkcji *chirp* modulowanych obwiednią Gaussa, które generowane są dla różnych zestawów parametrów $(t_n, \omega_n, \sigma_n, \beta_n)$ na podstawie funkcji elementarnej zdefiniowanej jako [2]:

$$g_{\gamma_n}(t) = (\sigma_n^2 \pi)^{-0.25} \exp \left\{ -\frac{(t-t_n)^2}{2\sigma_n^2} + j(\omega_n(t-t_n) + \frac{\beta_n}{2}(t-t_n)^2) \right\} \quad (9)$$

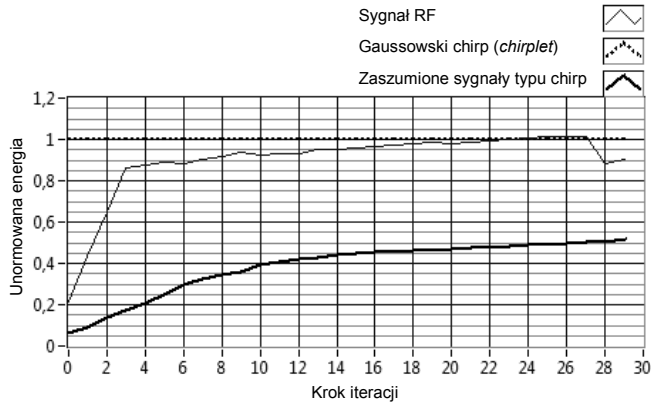
przy czym (t_n, ω_n) określa punkt centralny funkcji *chirplet* na płaszczyźnie czas-częstotliwość, σ_n jest odchyleniem standardowym obwiedni Gaussa, a β_n – współczynnikiem szybkości funkcji *chirp*.

Rozmiar słownika czasowo-częstotliwościowego determinuje dokładność analizy adaptacyjnej oraz wpływa na długość czasu obliczeń. Jednocześnie nadmierne zwiększanie liczby funkcji elementarnych, opisujących sygnał, nie prowadzi do efektywnej aproksymacji sygnału.

Rysunek 2 przedstawia zależność znormalizowanej energii przybliżenia adaptacyjnego, w stosunku do całkowitej energii sygnału, różnych sygnałów testowych w funkcji liczby iteracji algorytmu MP. Sygnały testowe to: sygnał RF, będący złożeniem składowych sinusoidalnych o zmieniającej się w czasie częstotliwości, sygnał typu *chirplet* oraz cztery składowe typu *chirp* z szumem gaussowskim. W przypadku niezaszumionego sygnału RF energia zrekonstruowanego sygnału reprezentuje ponad 90% całkowitej energii już po kilku krokach iteracji. Wynika z tego, że słownik typu *chirplet* jest koherentny z większością struktur analizowanego sygnału.

Specyficznym przypadkiem jest sygnał testowy o kształcie identycznym z atomami słownika. Zgodnie z oczekiwaniem wystarczy jedna funkcja elementarna, aby ze 100% zgodnością zrekonstruować sygnał badany, natomiast obecność

szerokopasmowego szumu w sygnale wymaga zdecydowanie większego rozmiaru słownika do efektywnej aproksymacji sygnału. Przedstawiony na rysunku 2 maksymalny rozmiar słownika zapewnia reprezentację sygnału tylko na poziomie 52%.



Rys. 2. Zależność unormowanej energii przybliżenia adaptacyjnego sygnału dla różnych sygnałów testowych od liczby iteracji algorytmu MP

Fig. 2. The normalized energy of the adaptive signal approximation for different test signals as a function of the number of iterations in the MP algorithm

2.4. Spektrogram adaptacyjny

Spektrogram adaptacyjny $AS(t, f)$ dyskretnego sygnału $b(t)$, interpretowany jako łączna czasowo-częstotliwościowa gęstość energii sygnału, definiowany jest jako [9]:

$$AS(t, f) = \sum_{n=0}^{\infty} |a_n|^2 WVDg_m(t, f) \quad (10)$$

gdzie $WVDg_m$ jest transformatą Wigner-Ville'a (WVD) atomu g_{γ_n} .

Po dekompozycji sygnału za pomocą algorytmu MP ze słownikiem typu *chirplet* transformata WVD przyjmuje postać [2]:

$$WVDg_m(t, f) = 2(\sigma_n^2 \pi)^{-0.25} \exp \left\{ -\frac{[t-t_n]^2}{2\sigma_n^2} - (2\pi)^2 \sigma_n [f - f_n - \beta_n(t-t_n)]^2 \right\} \quad (11)$$

Transformata WVD każdej pojedynczej funkcji *chirplet* jest nieujemna [2]. Spektrogram adaptacyjny dany jest zależnością [9]:

$$AS(t, f) = 2 \cdot \sum_{n=0}^{M-1} |a_n|^2 \exp \left\{ -\frac{[t-t_n]^2}{\sigma_n} - (2\pi)^2 \sigma_n [f - f_n - \beta_n(t-t_n)]^2 \right\} \quad (12)$$

W spektrogramie nie występują składowe skrośne, a jego wartości są nieujemne.

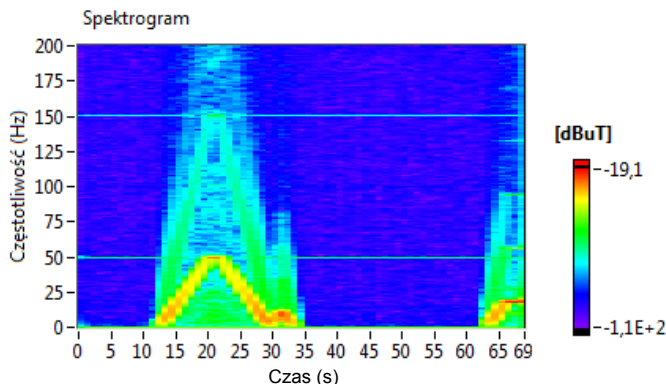
3. PRZYKŁADOWE WYNIKI ANALIZ POLA MAGNETYCZNEGO

Przedstawioną metodę analizy adaptacyjnej zaimplementowano w wirtualnym analizatorze, zaprojektowanym w graficznym środowisku programowania LabVIEW, który składa się z części: sprzętowej (akwizycji danych pomiarowych) i programowej (przetwarzania danych według prezentowanych algorytmów). Pomiar małowartościowego pola magnetycznego przeprowadzono na statku badawczym Akademii Morskiej w Gdyni, w otoczeniu silnika steru strumieniowego [12, 13]. W czasie manewrów zarejestrowano chwilowe wartości indukcji magnetycznej (rys. 3), a następnie metodą *off-line* przeprowadzono analizę czasowo-częstotliwościową, wykorzystującą algorytm MP ze słownikiem typu *chirplet* o liczebności 50 (rys. 4). Na płaszczyźnie czas-częstotliwość widoczne są zmienne w czasie składowe pochodzące od częstotliwości wyjściowych przemiennika częstotliwości i ich harmoniczne (rys. 4). W spektrogramie w ciągu całego czasu obserwacji występuje również składowa podstawowa 50 Hz i jej harmoniczne (rys. 4).



Rys. 3. Przebieg czasowy indukcji pola magnetycznego, zarejestrowany na statku morskim w trakcie manewrów [11]

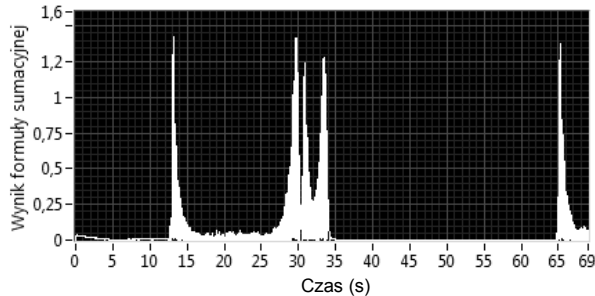
Fig. 3. The time waveform of the magnetic field induction, recorded onboard during the maneuvering [11]



Rys. 4. Spektrogram adaptacyjny zakresie częstotliwości do 200 Hz wyznaczony dla aproksymacji sygnału przedstawionego na rysunku 3

Fig. 4. The adaptive spectrogram in the frequency range up to 200 Hz, obtained for the signal approximation presented in Fig. 3

Na podstawie zależności chwilowych wartości formuły sumacyjnej w funkcji czasu można stwierdzić, że nie są spełnione warunki bezpiecznej ekspozycji na pole magnetyczne w pełnym zakresie czasu (rys. 5).



Rys. 5. Chwilowe wartości formuły sumacyjnej zdefiniowanej nierównością (1)
Fig. 5. The instantaneous values of the summation formula defined in the inequality (1)

PODSUMOWANIE

Analiza adaptacyjna, oparta na algorytmie pogoni za dopasowaniem MP, może być z powodzeniem zastosowana do wyznaczania wskaźnika ekspozycji na niestacjonarne pola magnetyczne. Dzięki zmiennej długości okna oraz zmiennej częstotliwości modulacji algorytm MP pozwala na adaptacyjną, tzn. dopasowującą się do lokalnych struktur, reprezentację sygnału. Zastosowanie w słowniku atomów w postaci liniowych gaussowskich funkcji typu *chirplet* daje dla małej liczby iteracji zadowalającą dokładność aproksymacji sygnału oryginalnego. Wybór bardzo dużego rozmiaru słownika nie jest warunkiem efektywnej aproksymacji sygnału. Jest wskazany wówczas, gdy w analizowanym sygnale występują szerokopasmowe składowe losowe o dużym poziomie. Metoda adaptacyjna, zastosowana 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 w porównaniu z innymi kwadratowymi czasowo-częstotliwościowymi reprezentacjami sygnału. Spektrogram adaptacyjny nie zawiera również składowych interferencyjnych.

LITERATURA

1. Allen R.L., Mills D.W., *Signal analysis. Time, frequency, scale, and structure*, Wiley-IEEE Press, 2004.
2. Ayatollahi A., *Comparing Gaussian and chirplet dictionaries for time-frequency analysis using matching pursuit decomposition*, Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (IEEE Cat No 03EX795) ISSPIT-03, Darmstadt, Germany 2004.

3. Białasiewicz J.T., *Falki i aproksymacje*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
4. Cohen L., *Time – frequency analysis*, Prentice Hall Inc., New Jersey 1995.
5. Durka P.J., *Matching Pursuit and Unification in EEG Analysis*, Artech House 2007.
6. Durka P.J., *Między czasem a częstotliwością: elementy współczesnej analizy sygnałów*, 1999-2004, <http://brain.fuw.edu.pl/~durka/as/> (luty 2007).
7. Gribonval R., *Fast matching pursuit with a multiscale dictionary of Gaussian chirps*, IEEE Trans. Signal Process., 2001, vol. 49, no. 5, s. 994–1001.
8. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *Guidelines for limiting exposure in time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, Health Phys. 74, 1998, s. 494–522.
9. LabVIEW – *Advanced Signal Processing Toolkit – Time Frequency Analysis Tools*, User Manual, National Instruments, 2005.
10. Mallat S.G., Zhang Z., *Matching pursuit with time frequency dictionaries*, IEEE Trans. Signal Process., 1993, 41(12), s. 3397–3415.
11. Pałczyńska B., *Assessment of exposure to magnetic-field emission from ship's power frequency converters*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 85 (2009), nr 10, s. 257–261.
12. 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, s. 375–380.
13. Pałczyńska B., Wyszkowski J., *Analysis of time-varying low-frequency magnetic-field emitted from the ship's inverter-fed induction motor*, Proc. XIX IMEKO World Congress, Lisbon, Portugal, 2009, s. 2192–2197.
14. Yin Q., Qian S., Feng A., *A fast refinement for adaptive Gaussian chirplet decomposition*, IEEE Trans. Signal Process., 2003, vol. 50, no. 6, s. 1298–1306.

APPLYING THE MATCHING PURSUIT ALGORITHM TO ASSESSMENT OF NON-STATIONARY MAGNETIC FIELD EMISSIONS

Summary

The way of the estimation of the exposure level to a non-stationary magnetic field based on an adaptive time-frequency analysis of the digitized time series of magnetic field induction is presented. The adaptive spectral analysis using matching pursuit MP algorithm was implemented in a virtual time-frequency analyzer designed in LabVIEW programming environment. MP algorithm with chirplet dictionary is an iterative procedure using a redundant dictionary of functions in order to select the ones, which best match the signal components. Thanks to the varying window size and modulation frequency, MP procedure enabled an adaptive signal representation. The application of an adaptive time-frequency method certainly provides a significantly better joint time-frequency resolution in comparison with other quadratic joint time-frequency distributions. Furthermore, the spectrogram based on the chirplet dictionary is non-negative and doesn't include cross-term interference. In the paper, the exemplary results of the performed analysis of the low-frequency magnetic field recorded onboard the vessel are presented.

Keywords: magnetic field measurement, time-frequency analysis, matching pursuit algorithm.