

Zastosowanie transformaty falkowej do analizy przebiegów napięć zasilających napędy z częstotliwościową regulacją prędkości obrotowej

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania ciągłego przekształcenia falkowego do analizy przebiegów napięć i prądów silników asynchronicznych zasilanych z przemienników częstotliwości. Zaprezentowano algorytm i program obliczeniowy umożliwiający przekształcenie przebiegów czasowych w odpowiadające im trójwymiarowe charakterystyki amplitudowe w dziedzinie czasu i częstotliwości. Rozważania teoretyczne zilustrowano wynikami pomiarów i obliczeń wykonanymi dla rzeczywistego układu napędowego.

Abstract. The paper presents the application of the continuous wavelet transform to the analysis of voltage and current waveforms of induction motors, which are supplied from frequency converters. The described algorithm and computation procedure are used to transform data time serious into relevant 3D time dependent magnitude characteristics. The theoretical considerations are then illustrated using measurement data and calculations made for a real electrical drive system. (**Application of wavelet transform to analyze the waveform of voltage supplied drives with frequency speed control**).

Słowa kluczowe: przekształcenia falkowe, przemiennik częstotliwości, wyższe harmoniczne

Keywords: wavelet transform, frequency converter, higher harmonics.

Wstęp

W ostatnich latach w realizacji wielu procesów technologicznych obserwuje się coraz szersze zastosowanie napędów z częstotliwościową regulacją prędkości obrotowej. Ułatwia to automatyzację procesów oraz pozwala na zwiększenie ich sprawności [1].

Podstawowymi urządzeniami wykorzystywanymi w takich napędach są przemienniki częstotliwości. Przemienniki częstotliwości mają zastosowanie m.in. we wszelkiego rodzaju układach napędu sterowanego, w elektrowniach wiatrowych (łącznie z silnikami asynchronicznymi dwustronnie zasilanymi), w pojazdach elektrycznych, w napędach urządzeń potrzeb własnych elektrowni, w systemach trakcyjnych prądu przemiennego, itd.

Przemienniki częstotliwości zawierają prostownik, łączy prądu stałego i autonomiczny inwertor (falownik) kształtujący przebiegi napięć wyjściowych zasilających silniki asynchroniczne. Regulacja prędkości obrotowej silnika uzyskiwana jest przez zmianę częstotliwości napięcia wyjściowego przy zachowaniu stałej wartości stosunku U/f.

W sterowaniu pracą inwertora wyjściowego wykorzystuje się metodę modulacji szerokości impulsów (PWM). We współczesnych inwertorach stosuje się najczęściej w pełni sterowalne tranzystory IGBT, które komutują się z bardzo dużą prędkością narastania napięcia wyjściowego (do 50 kV/μs) oraz mają duże częstotliwości przełączania tranzystorów (rzędu 5...50 kHz). Powoduje to, że w krzywych napięcia i prądu wyjściowego przemienników częstotliwości powstają składowe o wysokiej częstotliwości odpowiadającej częstotliwości przełączania tranzystorów. Przebiegi napięć i prądów na wyjściu falownika są mocno zniekształcone i często niestacjonarne. Napędy takie mają wpływ na jakość energii w sieciach zasilających [2, 3].

Znajomość i analiza widma częstotliwościowego takich przebiegów napięcia oraz prądu, a także charakterystyk czasowych dotyczących występujących składowych o wysokiej częstotliwości (czas trwania czy okresowość powstawania) pozwala na rozwiązywanie różnych zadań kompatybilności elektromagnetycznej (EMC): prawidłowego doboru filtrów, sposobów ekranowania, oszacowania oddziaływania zniekształconych sygnałów na kondensatory w łączy prądu stałego oraz izolację uzwojeń silnika napędzanego i kabli łączących, itd.

W celu otrzymania dokładnych informacji o składowych częstotliwościowych sygnałów ze złożonym składem widmowym stosuje się różne przekształcenia, pomiędzy którymi najbardziej popularnym jest przekształcenie Fouriera.

Wynikiem zastosowania przekształcenia Fouriera do analizy sygnału określonego w dziedzinie czasu, jest jego przedstawienie widmowe. Przekształcenie Fouriera podaje informację częstotliwościową zawartą w sygnale, tzn. podaje ilościowe oszacowanie zawartości każdej harmonicznej. Zakłada się przy tym, że każda składowa istnieje w ciągu całego czasu trwania sygnału. W praktyce dany przypadek jest tylko szczególnym, ponieważ sygnały rzeczywiste nie zawsze są stacjonarne. Dla analizy procesów wyraźnie niestacjonarnych należy stosować przekształcenia, pozwalające na jednoczesne przedstawienie sygnału w dziedzinie czasu i częstotliwości. Takim przekształceniem, mającym zastosowanie do analizy odkształconych niestacjonarnych przebiegów wielkości elektrycznych jest przekształcenie falkowe (*ang.*: *Wavelet Transform* - WT) [4, 5]. Przekształcenie falkowe może być ciągłe lub dyskretne. Ciągłe przekształcenie falkowe (*ang.*: *Continuous Wavelet Transform* - CWT) wykorzystywane jest często w analizie harmonicznych przebiegów elektrycznych [6, 7, 8] oraz do badania innych zjawisk elektromagnetycznych w sieciach elektroenergetycznych [9, 10, 11, 12, 13].

W artykule zaprezentowano zastosowanie prądów zarejestrowanych w laboratoryjnym układzie napędowym z przemiennikiem częstotliwości typu ACS 800 prod. ABB. Przedstawiono algorytm analizy i opracowany na jego podstawie program obliczeniowy. Wyniki analizy przebiegów przedstawiono w postaci trójwymiarowych wykresów amplitudowych napięć i prądów w dziedzinie czasu i częstotliwości.

Metoda analizy

Przekształcenie falkowe zastosowane do ciągłego przebiegu $f(t)$ zdefiniowane jest w następujący sposób [4, 5, 8]:

$$(1) \quad Wf(u, s) = \langle f, W_{u,s} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt$$

gdzie; $f(t)$ – sygnał przetwarzany, $\Psi(t)$ – zespolona macierzysta funkcja falkowa (*ang.*: *mother wavelet*), $\Psi^*(t)$ – wartość sprzężona funkcji $\Psi(t)$, s – parametr skali, u – parametr przesunięcia w czasie.

Funkcja falkowa musi spełniać następujące warunki:

- mieć skończoną energię, i
- nie zawierać składowej stałej.

Funkcje falkowe mogą mieć różnorodne postacie [4,5,12]. Do celów analizy harmonicznej często stosowana jest zespolona funkcja falkowa Morleta (*ang.*: *Complex Morlet Wavelet* - CMW) [8, 14]:

$$(2) \quad \underline{\Psi}(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-\frac{t^2}{f_b}} e^{j2\pi f_c t}$$

gdzie: f_b – parametr określający szerokość pasma przenoszenia częstotliwości, f_c – częstotliwość centralna funkcji falkowej.

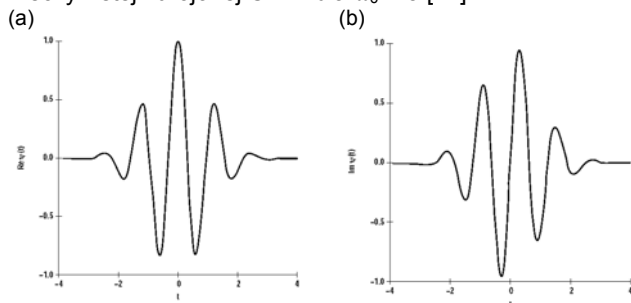
Zespolona funkcja falkowa Morleta jest w istocie zmodulowaną funkcją Gaussa. Jest szczególnie przydatna dla analizy harmonicznych ze względu na jej gładkość i kształt podobny do fali harmonicznej.

Funkcja falkowa Morleta (2) może być przedstawiona w postaci [8]:

$$(3) \quad \underline{\Psi}(t) = g(t)e^{j\omega_0 t}$$

gdzie: $g(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-\frac{t^2}{f_b}}$ oraz $\omega_0 = 2\pi f_c$

Na rysunku 1 pokazano przebiegi czasowe składowych rzeczywistej i urojonej CMW dla $\omega_0 = 5$ [14].



Rys.1. Przebiegi czasowe składowych rzeczywistej (a) i urojonej (b) CMW dla $\omega_0 = 5$

Rodzinę, rozciągniętych i przesuniętych w czasie, funkcji falkowych (*ang.*: *wavelet families*) w zależności od współczynników skali i przesunięcia opisuje równanie:

$$(4) \quad \underline{\Psi}_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \underline{\Psi}\left(\frac{t-u}{s}\right) = e^{-j\xi u} g_{s,u,\xi}(t)$$

gdzie: $g_{s,u,\xi}(t) = \sqrt{s} g\left(\frac{t-u}{s}\right) e^{j\xi t}$ oraz $\xi = \frac{\omega_0}{s}$.

Przekształcenie falkowe sygnału:

$$(5) \quad f(t) = a(t) \cos \varphi(t)$$

można zapisać w postaci zależności [4, 8]:

$$(6) \quad \underline{Wf}(u,s) = \frac{\sqrt{s}}{2} a(u) e^{j\varphi(u)} (\tilde{g}(s[\xi - \varphi'(u)]) + \varepsilon(u,\xi))$$

gdzie: $\tilde{g}(\omega)$ - przekształcenie Fouriera funkcji $g(t)$.

Poprawkę $\varepsilon(u,\xi)$ we wzorze (6) można pominąć, jeżeli sygnał $f(t)$ zawiera tylko jedną składową częstotliwościową. Jeśli sygnał zawiera wiele harmonicznych, uwzględnienie wpływu $\varepsilon(u,\xi)$ na współczynniki przekształcenia jest konieczne.

Znormalizowany skalogram przekształcenia falkowego wyznacza się jako [4, 8]:

$$(7) \quad \frac{\xi}{\omega_0} P_w f(u,\xi) = \frac{|Wf(u,s)|^2}{s}$$

i oblicza za pomocą wyrażenia:

$$(8) \quad \frac{\xi}{\eta} P_w f(u,\xi) = \frac{1}{4} a^2(u) \left| \tilde{g}(\omega_0 [1 - \frac{\varphi'(u)}{\xi}]) + \varepsilon(u,\xi) \right|^2$$

Ponieważ $|\tilde{g}(\omega)|$ w zależności (8) osiąga wartość maksymalną przy $\omega = 0$, to przy pominięciu poprawki $\varepsilon(u,\xi)$ maksymalna wartość skalogramu (8) będzie miała miejsce przy spełnieniu warunku:

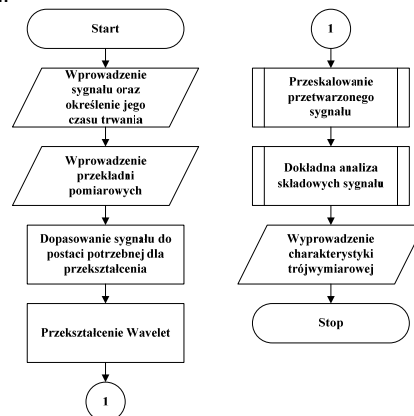
$$(9) \quad \frac{\omega_0}{s(u)} = \xi(u) = \varphi'(u)$$

Punkty $(u,\xi(u))$, obliczone według zależności (9), są nazywane grzbietami fałek (*ang.*: *wavelet ridges*), a ich amplitudy wyznacza się według wzoru [15, 16]:

$$(10) \quad a(u) = \frac{2|Wf(u,s)|}{\sqrt{s}}$$

Podany wyżej algorytm z punktu widzenia realizacji matematycznej postawionego zadania jest uniwersalny, a wykorzystanie zaproponowanej w [8] funkcji CMW jest właściwe w analizie sygnałów dowolnie zniekształconych, których kształt jest zbliżony do przebiegu sinusoidalnego, zawierającego harmoniczne.

Do analizy takich sygnałów został opracowany, w środowisku Wolfram Mathematica, specjalny program obliczeniowy, którego podstawę stanowi podany powyżej algorytm. Schemat blokowy programu pokazany jest na rysunku 2.



Rys.2. Schemat blokowy programu obliczeniowego

Działanie programu zostało przetestowane poprzez przetwarzanie różnych sygnałów, w tym stacjonarnego opisanego zależnością:

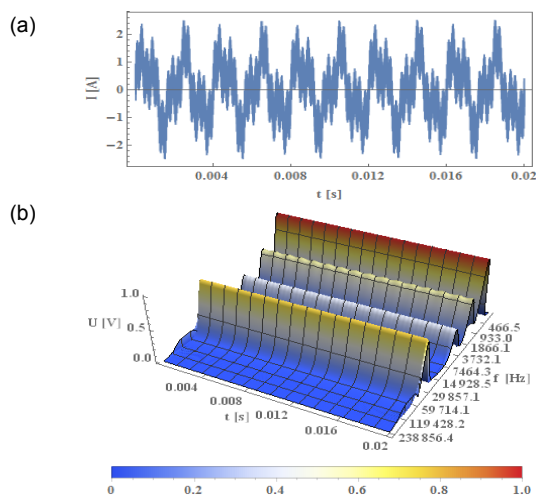
$$(11) \quad f_1(t) = \sin(2\pi \cdot 500 \cdot t) + 0,6 \sin(2\pi \cdot 1250 \cdot t) + 0,4 \sin(2\pi \cdot 3750 \cdot t) + 0,8 \sin(2\pi \cdot 31250 \cdot t)$$

oraz niestacjonarnego:

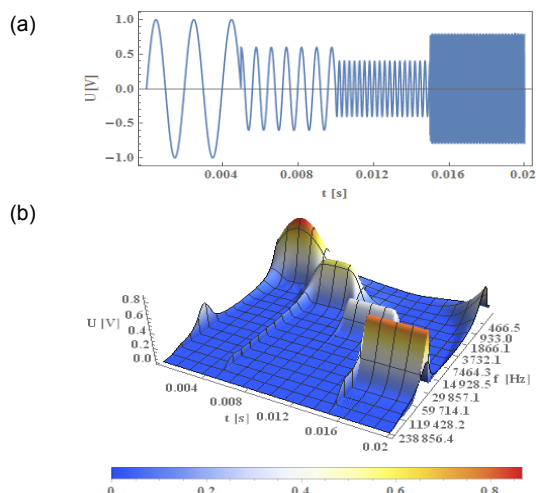
$$(12) \quad f_2(t) = \begin{cases} \sin(2\pi \cdot 500 \cdot t), & 0 \leq t < \frac{1}{4}\tau \\ 0,6 \sin(2\pi \cdot 1250 \cdot t), & \frac{1}{4}\tau \leq t < \frac{1}{2}\tau \\ 0,4 \sin(2\pi \cdot 3750 \cdot t), & \frac{1}{2}\tau \leq t < \frac{3}{4}\tau \\ 0,8 \sin(2\pi \cdot 31250 \cdot t), & \frac{3}{4}\tau \leq t < \tau \end{cases}$$

W obu przypadkach czas trwania sygnału wynosił $\tau = 20$ ms.

Wyniki analizy sygnałów przedstawiono dla funkcji $f_1(t)$ na rysunku 3, a dla funkcji $f_2(t)$ na rysunku 4.



Rys.3. Analiza sygnału stacjonarnego wykonana z wykorzystaniem przekształcenia falkowego: (a) przebieg sygnału, (b) charakterystyka amplitudowa w dziedzinach czasu i częstotliwości

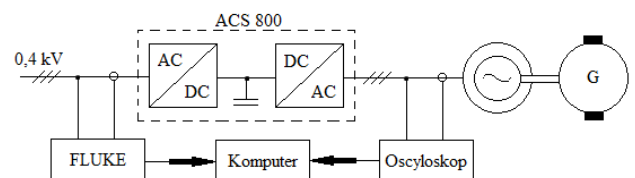


Rys.4. Analiza sygnału niestacjonarnego wykonana z wykorzystaniem przekształcenia falkowego: (a) przebieg sygnału, (b) charakterystyka amplitudowa w dziedzinach czasu i częstotliwości

W obu przypadkach trójwymiarowe charakterystyki amplitudowe w dziedzinie czasu i częstotliwości prawidłowo odwzorowują widmo częstotliwościowe sygnału i zmienność poszczególnych składowych w czasie.

Opis układu pomiarowego

Dla wykonania badań został zbudowany układ pomiarowy, którego schemat pokazano na rysunku 5. Układ zawiera przemiennik częstotliwości typu ACS 800 (produkcji ABB) o mocy znamionowej 1,5 kW zasilający trójfazowy silnik asynchroniczny o mocy znamionowej 1,1 kW i znamionowej prędkości obrotowej 1420 obr./min. Obciążenie silnika stanowi obciążenie prądnicą prądu stałego o mocy znamionowej 0,8 kW. Zmiana obciążenia realizowana jest przez zmianę wartości prądu wzbudzenia prądnicy przy stałej wartości rezystancji włączonej w obwód twornika.



Rys.5. Schemat układu pomiarowego

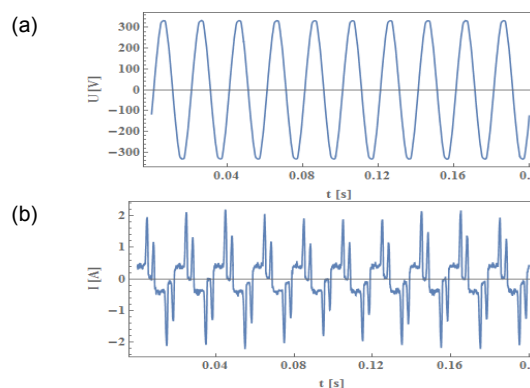
Akwizycja przebiegów napięcia i prądu układu od strony sieci zasilającej zrealizowana została za pomocą analizatora FLUKE 1760, natomiast przebiegi napięć i prądów wyjściowych przemiennika częstotliwości rejestrowane były za pomocą oscyloskopu cyfrowego. W obu przypadkach wyniki pomiarów zostały przetworzone na pliki w formacie programu Microsoft Excel.

Wyniki pomiarów

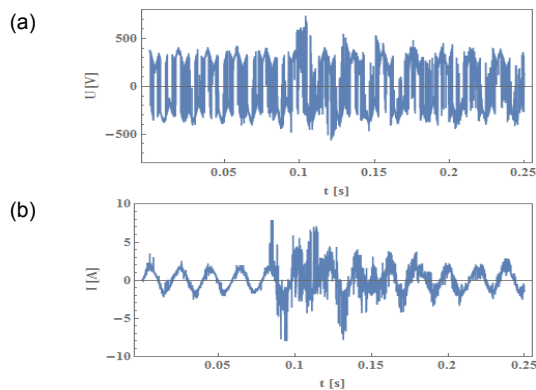
Do prezentacji w artykule wybrano zmierzone przebiegi napięcia i prądu fazowego pobieranego z sieci zasilającej przy pracy układu napędowego z prędkością równą 1500 obr./min i nieobciążoną prądnicą prądu stałego (bieg jałowy). Natomiast przebiegi napięć i prądów wyjściowych przemiennika częstotliwości zaprezentowano dla dwóch prędkości: 1500 obr./min. i 500 obr./min.

Wyżej wymienione przebiegi pokazano na rysunkach od 6 do 8.

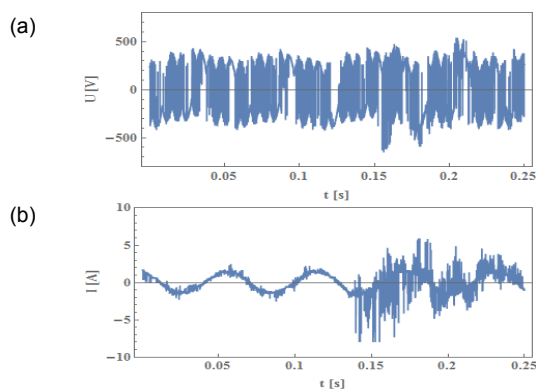
Pokazane na rysunku 6 przebiegi napięcia i prądu fazowego sieci zasilającej są w zasadzie stacjonarne. Przebieg napięcia jest praktycznie sinusoidalny. Przebieg prądu nie jest sinusoidalny i odzwierciedla charakter obciążenia, a ponadto widoczne są nieznaczne zmiany amplitudy prądu w poszczególnych okresach przebiegu.



Rys.6. Przebiegi napięcia (a) i prądu fazowego (b) pobieranego z sieci zasilającej przy pracy układu z prędkością 1500 obr./min.



Rys.7. Przebiegi napięcia (a) i prądu fazowego silnika (b) pobieranego z przemiennika częstotliwości przy pracy układu z prędkością 1500 obr./min.



Rys.8. Przebiegi napięcia (a) i prądu fazowego silnika (b) pobieranego z przemiennika częstotliwości przy pracy układu z prędkością 500 obr./min.

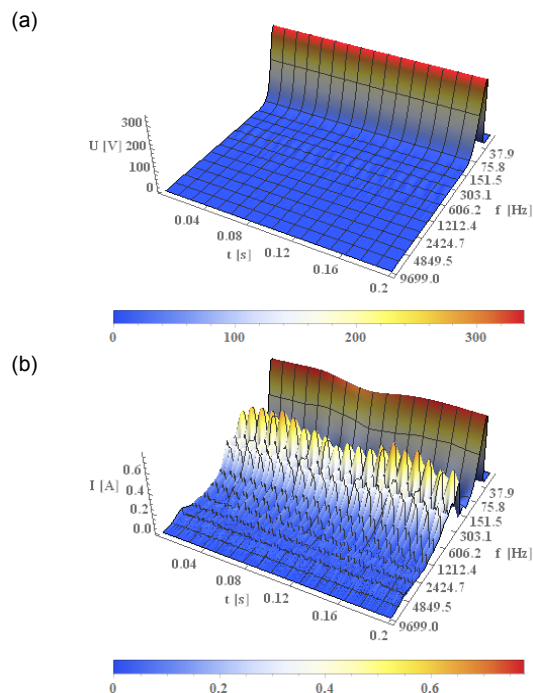
Przebiegi napięcia zasilającego silnik (rys. 7a i 8a) mają kształt fali impulsów o zmiennej szerokości i są typowe dla układów PWM. Przebiegi prądów fazowych silnika (rys. 7b i 8b) są zbliżone do przebiegów sinusoidalnych, o częstotliwościach wynikających z zadanej prędkości obrotowej, z nałożonymi na nie składowymi wynikającymi z częstotliwości przełączenia tranzystorów w falowniku. W przebiegach tych zarejestrowano również okresowo powtarzające się zaburzenia, które wstępnie zdiagnozowano jako wyładowania niezupełne w układzie izolacyjnym badanego silnika [17,18].

Analiza wyników pomiarów

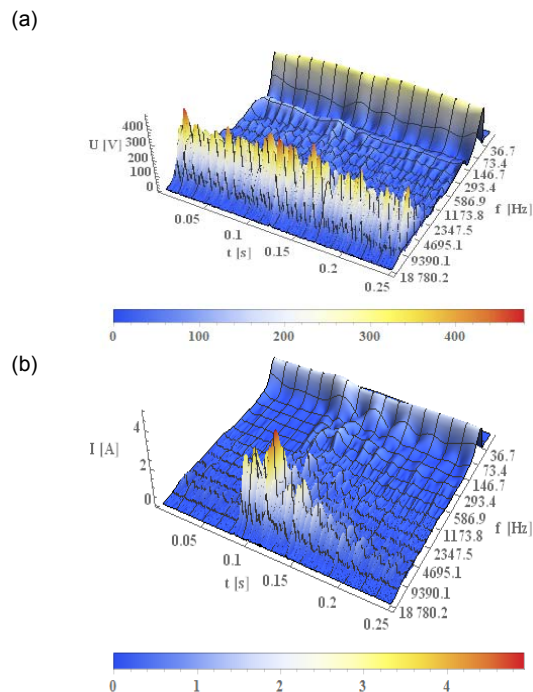
Prezentowane wyżej przebiegi napięć i prądów zostały poddane przekształceniu falkowemu za pomocą opisanego w artykule algorytmu. Wyniki tej analizy przedstawiono w postaci trójwymiarowych wykresów amplitud poszczególnych składowych w dziedzinie czasu i częstotliwości na rysunkach od 9 do 11.

Charakterystyki amplitudowe napięcia i prądu fazowego sieci w dziedzinach czasu i częstotliwości oddają w pełni cechy analizowanych przebiegów. W charakterystyce napięcia (rys. 9a) dominuje składowa podstawowa (50 Hz) o stałej wartości w czasie. Można również zauważyć występowanie piątej harmonicznej o nieznacznej wartości. Charakterystyka prądu (rys. 9b) zawiera informacje o widmie częstotliwościowym prądu, gdzie obok podstawowej występują również wyższe harmoniczne (5., 7., 11., 13., itd.) oraz o zmianach tych składowych w czasie. W charakterystykach amplitudowych napięcia zasilającego silnik (rys. 10a i 11a) obok składowych podstawowych o częstotliwościach odpowiadających zadany wartościom prędkości obrotowej występują składowe, wynikające z

przełączania tranzystorów o częstotliwościach z zakresu $4 \div 6$ kHz, o znaczących wartościach. Należy też zauważyć, że składowe podstawowe napięcia w obu przypadkach przyjmują wartości odpowiednie dla zachowania stałości stosunku U/f .

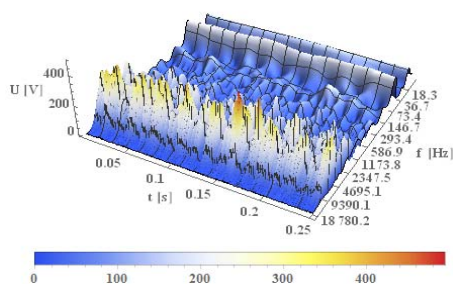


Rys.9. Charakterystyki amplitudowe w dziedzinach czasu i częstotliwości napięcia (a) i prądu fazowego (b) pobieranego z sieci zasilającej przy pracy układu z prędkością 1500 obr./min.

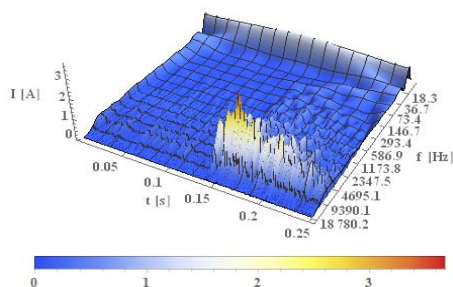


Rys.10. Charakterystyki amplitudowe w dziedzinach czasu i częstotliwości napięcia (a) i prądu fazowego silnika (b) pobieranego z przemiennika częstotliwości przy pracy układu z prędkością 1500 obr./min.

(a)



(b)



Rys.11. Charakterystyki amplitudowe w dziedzinach czasu i częstotliwości napięcia (a) i prądu fazowego silnika (b) pobieranego z przemiennika częstotliwości przy pracy układu z prędkością 500 obr./min.

W charakterystykach amplitudowych prądu silnika (rys. 10b i 11b) składowe związane z częstotliwością przełączenia tranzystorów są małe, a znaczące ich wartości pojawiają się podczas wyładowań niepełnych w układzie izolacyjnym silnika.

Podsumowanie

W układach napędowych z częstotliwościową regulacją prędkości obrotowej przebiegi napięć i prądów silników zasilanych z przemienników częstotliwości są odkształcone i często niestacjonarne. Do analizy częstotliwościowej takich przebiegów ograniczone zastosowanie ma przekształcenie Fouriera. Znacznie lepsze rezultaty można uzyskać wykorzystując przekształcenie falkowe pozwalające na analizę przebiegów w dziedzinach czasu i częstotliwości jednocześnie.

Przedstawiony w artykule algorytm i opracowany program obliczeniowy umożliwiające przekształcenie pomierzonych przebiegów napięcia i prądu na odpowiadające im trójwymiarowe charakterystyki amplitudowe w dziedzinach czasu i częstotliwości. Poprawność działania programu potwierdziły obliczenia wykonane dla zadanych przebiegów analitycznych.

Na podstawie pomiarów wykonanych dla rzeczywistego układu napędowego z przemiennikiem częstotliwości i przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że widmo częstotliwościowe napięcia wyjściowego przemiennika częstotliwości zawiera szereg składowych, z których znaczące wartości mają składowa podstawowa (o częstotliwości odpowiadającej zadanej prędkości obrotowej) i składowe wynikające z przełączania tranzystorów o częstotliwości z zakresu $4 \div 6$ kHz. Składowe o podwyższonej częstotliwości, charakteryzujące się dużą stromością narastania napięcia dU/dt , mogą być przyczyną przyspieszenia procesów starzeniowych izolacji w zasilanych silnikach i powodować wyładowania niepełne w ich układach izolacyjnych.

LITERATURA

- [1] Kubera T., Szulc Z., Poprawa efektywności energetycznej układu napędowego pompy wody zasilającej dużej mocy, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 78 (2007), 99-104
- [2] Pawełek R., Wasiak I., Oddziaływanie przemienników częstotliwości na jakość energii elektrycznej w układzie potrzeb własnych elektrowni. Część I - Badania obiektowe, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014) nr 1, 24-28
- [3] Wasiak I., Gburczyk P., Pawełek R.: Oddziaływanie przemienników częstotliwości na jakość energii elektrycznej w układzie potrzeb własnych elektrowni. Część II - Badania symulacyjne. *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014) nr 1, 29-33
- [4] Mallet S., A Wavelet Tour of Signal Processing, St. Luis (Missouri), *Academic Press*, 1998, pp. 577
- [5] Teolis A., Computational signal processing with wavelets, Birkhauser, 1998, pp.344
- [6] Chan W.L., So A.T.P., Lai L.L., Harmonics load signature recognition by wavelets transforms, Proc. of the International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, April 2000, 666-671.
- [7] Pham V.L., Wong K.P., Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system waveforms, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 146 (1999), No. 3, 249-254
- [8] Tse N.C.F., Practical Application of Wavelet to Power Quality Analysis, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Quebec (Canada), 18-22 June 2006, 1-5
- [9] Rak R., Majkowski A.: Falkowa analiza sygnałów. *Przegląd Elektrotechniczny*, 80 (2004) nr 6, 646-652.
- [10] Marcinkowski Z., Musierowicz K.: Transformata falkowa i graficzne metody analizy sygnałów pomiarowych w systemach elektroenergetycznych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 82 (2006) nr 7-8, 117-120
- [11] Wen H., Xiao W., Wen X., Armstrong P., Analysis and evaluation of DC-link capacitors for high-power-density electric vehicle drive systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 61 (2012), No. 7, 2950-2964
- [12] Huang S.J., Huang C.T., Hsieh S.J., Huang C.L., Application of Morlet Wavelets to supervise power system disturbances, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14 (1999), No. 1, 235-243
- [13] Skomudek W., Zastosowanie przekształceń czasowo-częstotliwościowych do analizy zjawisk falowych w sieciach elektroenergetycznych, *Elektroenergetyka*, (2009), nr 2, 36-43
- [14] Lee D.T.I., Yamamoto A., Wavelet Analysis: Theory and Applications, Hewlett-Packard Journal, December 1994, 44-52
- [15] Carmona R.A., Hwang W.L., Torresani B., Multi-ridge detection and time-frequency reconstruction, *IEEE Transactions on Signal Processing*. 47 (1999), No. 2, 480-492
- [16] Carmona R.A., Hwang W.L., Torresani B., Characterization of signals by the ridges of their wavelet transforms, *IEEE Transactions on Signal Processing*. 45 (1997), No. 10, 2586-2590
- [17] Zientek P., Wpływ parametrów wyjściowych falowników PWM i kabla zasilającego na zjawiska pasożytnicze w silnikach indukcyjnych, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 71 (2005), 119-124
- [18] Glinka T., Kulesz B., Wyładowania niepełne w izolacji zwojowej silników indukcyjnych zasilanych z falowników PWM. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, 49 (2000), 96-103

Autorzy: inż. Ivan Taranenko, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: i.a.taranenko.pl@gmail.com; dr inż. Ryszard Pawełek, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl; dr inż. Oleksandr Gorpynich, Przyazowski Państwowy Uniwersytet Techniczny w Mariupolu, ul. Uniwersytecka 7, 87500 Mariupol, Ukraina, E-mail: gorpynich@ieeee.org