

**Leon SWĘDROWSKI, Marek WOŁOSZYK, Michał ZIÓŁKO**

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI,  
ul. Narutowicza 11/12, 80 233 Gdańsk

## Nowe rozwiązanie przetwornika prądu w diagnostyce prądowej silników indukcyjnych

**Dr hab. inż. Leon SWĘDROWSKI**

Leon Swędrowski ukończył Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 1972 roku, i tam również uzyskał kolejno: stopień doktora w roku 1980 i stopień doktora habilitowanego w roku 2005. Od ukończenia studiów pracuje w Katedrze Metrologii i Systemów Informacyjnych tego Wydziału, aktualnie jako profesor nadzwyczajny PG. Jego zainteresowania zawodowe koncentrują się wokół pomiarów wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, diagnostyki technicznej oraz pomiarów o wysokiej dokładności.



e-mail: lswed@ely.pg.gda.pl

**Dr inż. Michał ZIÓŁKO**

Michał Ziółko ukończył Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 2002 roku i tam również uzyskał stopień doktora w roku 2009. Obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Metrologii i Systemów Informacyjnych tego Wydziału. Jego zainteresowania zawodowe koncentrują się wokół pomiarów elektroenergetycznych oraz pomiarów wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi.



e-mail: mziolko@ely.pg.gda.pl

**Dr inż. Marek WOŁOSZYK**

Uzyskał dyplom magistra inżyniera na Wydz. Elektrycznym Politechniki Gdańskiej w 1978r. w zakresie przetwarzania i użytkowania energii elektrycznej. Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał na tym samym wydziale w 1988r. Obecnie pracuje jako starszy wykładowca w Katedrze Metrologii i Systemów Informacyjnych Wydz. Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Główny kierunek działalności naukowej związany jest ze statycznymi i udarowymi metodami pomiarów uziemień.



e-mail: mawo@ely.pg.gda.pl

### Streszczenie

Wadą praktycznie wszystkich opublikowanych systemów do diagnostyki łożysk metodą pomiaru prądu zasilającego w silniku indukcyjnym jest niska jakość układów do pomiaru prądu. W prezentowanej pracy jako przetwornik prądu na napięcie zaproponowano transformator o wysokich parametrach, pracujący z przetwarzaniem prądu na napięcie. W referacie zostaną przedstawione wyniki badań przetwornika, które potwierdziły oczekiwane parametry – niskie szumy własne i liniową charakterystykę w szerokim paśmie.

**Słowa kluczowe:** pomiary prądu, diagnostyka, silnik indukcyjny, łożyska toczne.

### A new solution of current transducer for induction motor current diagnostics

#### Abstract

Vibrations, temperature, acoustic noise, current, instantaneous power [1] and magnetic flux are used for diagnostics of induction motor bearings [2, 3]. The primary source of other signals is shaft vibration. This is the source of disturbance in the machine air gap and, in effect, of the motor current modulation [4]. The main problem in current diagnostics of induction motor bearings [5, 6] is high level of noise in comparison with useful spectra components. Normally used hallotron type of current transducers have high level of noise and non-linear characteristics. In this case the special methods of data processing cannot be helpful in achieving the final result – reliable diagnosis [7, 8, 9]. In the presented paper a high quality current transformer (Fig. 1) was used as a component for current to voltage transformation. The transformer output signal is delivered to a low level noise amplifier and, finally, to a 24 bit DAQ in PXI module. The specially designed software in LabVIEW calculates the signal spectra, especially the amplitudes of spectrum components for certain damages. In the paper there are presented the results of noise investigations (Figs. 5, 6) of the constructed transducer as well as of the accuracy analyses (Figs. 3, 4, 5). All these investigations show that the proposed transducer is better than those used so far. It is expected that results of motor diagnostics obtained with use of the new transducer will have much higher reliability.

**Keywords:** current measurements, diagnostics, asynchronous rotating machines, roll bearings.

## 1. Wprowadzenie

Silnik indukcyjny jest od wielu lat najszerzej stosowaną maszyną w napędzie elektrycznym. Jego zalety to niski koszt, prosta budowa, wysoka sprawność energetyczna, brak zużywających się elementów (jak komutator czy szczotki) – oprócz łożysk. Dlatego też łożyska są głównym źródłem uszkodzeń silników tego typu. Do diagnostyki łożysk takich silników stosuje się wszystkie klasyczne metody – pomiar wibracji, pomiary składu chemicznego smaru, pomiary temperatury, pomiary emisji akustycznej, oraz metody specyficzne dla silnika elektrycznego – pomiary prądu [2, 3, 4] i mocy zasilania [1]. Diagnostyka poprzez pomiar prądu ma atrakcyjne cechy – można ją realizować bez dostępu do silnika, można też tą samą drogą diagnozować inne elementy silnika [5, 6].

Wadą praktycznie wszystkich opublikowanych systemów do diagnostyki łożysk metodą pomiaru prądu zasilającego w silniku indukcyjnym jest niska jakość układów do pomiaru prądu. Z reguły wykorzystywany jest w tym celu hallotronowy przetwornik prądu na napięcie, np. typu LEM, który ma wysokie szumy własne i nieliniową charakterystykę przy przebiegach odkształconych. Dlatego też dane pomiarowe, wprowadzane dalej do systemów przetwarzania sygnałów, są silnie zafalszowane czyniąc wyniki diagnostyki mało wiarygodne.

W prezentowanej pracy jako przetwornik prądu na napięcie zaplanowano transformator o wysokich parametrach, pracujący z przetwarzaniem prądu na napięcie.

W dalszej części referatu zostaną przedstawione wyniki badań przetwornika, które potwierdziły jego oczekiwane parametry – niskie szumy własne i liniową charakterystykę w szerokim paśmie częstotliwości.

## 2. Przetwarzanie sygnału w diagnostyce prądowej

Ze względu na niski poziom sygnałów diagnostycznych w widmie prądu, proponowane są różne techniki wyodrębniania tych sygnałów [7, 8, 9]. Można tu wymienić kilka przykładowych metod:

### A. Wykorzystanie filtra Wienera [10]

Metoda opiera się na zasadzie filtracji szumu, przy czym jako szum traktowane są wszystkie składowe widma prądu, nie związane z uszkodzeniami łożyska. We wstępnej fazie projektowania wykonywane są pomiary na nieuszkodzonym silniku w różnych warunkach jego pracy. Uzyskane wyniki są rejestrowane przez filtr Wienera. Dalej, już w trakcie badań diagnostycznych, wszystkie składowe szumowe są usuwane w czasie estymacji parametrów filtra Wienera. Po odfiltrowaniu całego zestawu składowych widma

prądu, istniejących w silniku bez uszkodzeń, pozostają tylko nowe składowe, wynikające z uszkodzeń badanego silnika.

Określany jest wskaźnik błędu, oparty na wartości skutecznej prądu, pozostałego po filtracji.

W tej metodzie nie poszukuje się w widmie prądu składowych, związanych z poszczególnymi typami uszkodzeń łożyska, a więc nie jest potrzebna znajomość parametrów łożysk.

Filtracja szumów filtrem Wienera jest efektywna i znacznie poprawia rozróżnialność widm prądów silników nieuszkodzonych od uszkodzonych.

Posługując się tą metodą nie można jednakże rozróżnić uszkodzenia łożyska od innego typu uszkodzeń silnika.

### B. Analiza sprawności silnika [11]

Autorzy metody stwierdzają, że rozwijające się uszkodzenie w silniku powoduje obniżenie jego sprawności, a więc straty energii. Analiza sprawności wymaga pomiarów prędkości obrotowej oraz momentu obciążenia; to ostatnie wymaga drogich przyrządów. Jeśli obciążenie może być rozpatrywane jako stałe, prąd stojana może być traktowany jako wskaźnik sprawności. W pozostałych przypadkach pomiary momentu nie są wygodne w trybie „on-line” do mierzenia sprawności.

Pomiar sprawności nie daje wiarygodnych informacji diagnostycznych o stanie silnika, a szczególnie o rodzaju uszkodzenia.

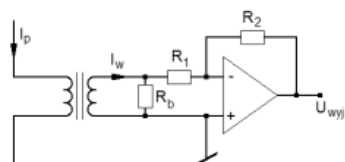
### C. Obserwator prędkości [12]

Uszkodzone łożyska wywołują oscylacje momentu obciążenia, które wpływają na modulację fazy w teoretycznym modelu prądu stojana. Wskutek tego, teoretycznie estymowany strumień wirnika i prędkość kątowa wykazują obecność harmonicznych powiązanych z oscylacją momentu obciążenia. Składowe te pojawiają się w estymowanym widmie prędkości i mogą być wykorzystywane do diagnostyki. Pomiary wskazują, że energia widma prędkości jest modyfikowana w określonych zakresach częstotliwości odpowiadających uszkodzeniom łożysk.

Zdaniem autorów artykułu, najłabszym ogniwem w łańcuchu przetwarzania sygnału jest przetwornik prądu. Tutaj kryją się możliwości uzyskania wyników pomiarów wystarczająco wiarygodnych, aby osiągnąć dobrą trafność diagnoz bez nadmiernej komplikacji członów przetwarzających sygnał. Dlatego też zaproponowano układ, przedstawiony poniżej, który daje szansę na osiągnięcie dobrych wyników w diagnostyce.

## 3. Proponowany układ pomiarowy i jego badania

Do pomiaru prądu zasilającego silnik zaproponowano układ pomiarowy, którego uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ideowy zaproponowanego układu pomiarowego  
Fig. 1. Schematic diagram of the proposed measurement unit

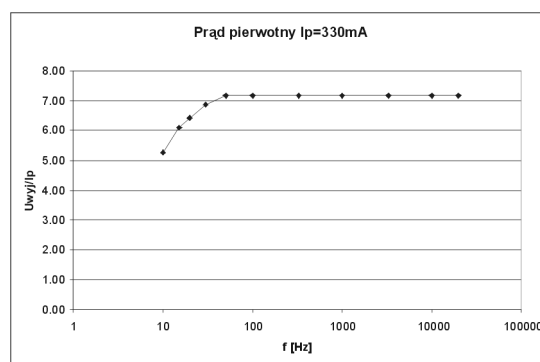
Główną częścią układu jest transformator, nawinięty na rdzeniu ferrytowym wysokiej klasy oraz wzmacniacz operacyjny o najniższych szumach własnych, wśród elementów osiągalnych na rynku. Transformator pracuje z wymuszeniem prądowym - przez jego uzwojenie pierwotne przepływa prąd zasilający uzwojenie silnika.

W trakcie prac nad układem pomiarowym autorzy poświęcili wiele uwagi temu, aby niewralgiczna część układu była możliwie

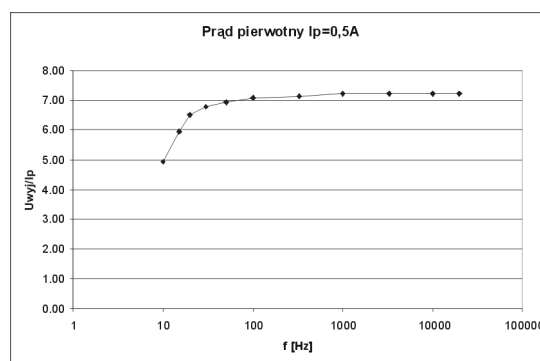
prosta i zawierała jak najmniej elementów, które mogłyby wnosić szumy własne do pracy układu. Również na etapie projektowania płytki z obwodem drukowanym dokładano wszelkich starań aby projektowany układ pomiarowy nie tylko wnosił możliwie najmniejsze szumy własne ale również by był możliwie mało wrażliwy na ewentualne zewnętrzne sygnały zakłócające - zarówno indukowane przez pole elektromagnetyczne jak i te przenoszone przez zasilanie.

Przetwornik został przebadany w układzie laboratoryjnym, w którym sygnał z układu pomiarowego jest podany na 24 bitową kartę przetwarzania A/C w kasecie PXI. Układ pomiarowy zasilany był z akumulatorów i zamknięty w ekranującej od pól magnetycznych obudowie. Do badań stworzono specjalne oprogramowanie w środowisku LabVIEW.

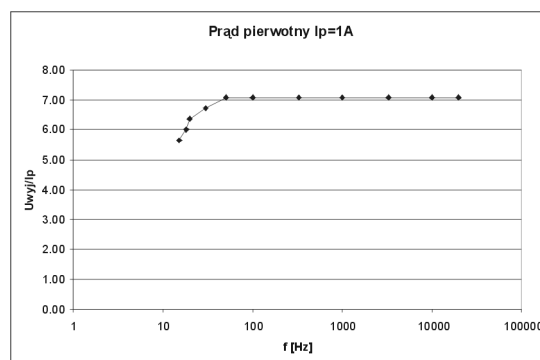
Na rysunkach 2, 3, i 4 przedstawiono wstępne wyniki badań charakterystyki przetwarzania przetwornika dla trzech różnych prądów wejściowych.



Rys. 2. Charakterystyka przetwarzania przetwornika dla prądu wejściowego I<sub>p</sub>=0,33 A  
Fig. 2. The characteristic of transducer processing for input current of I<sub>p</sub>=0,33 A

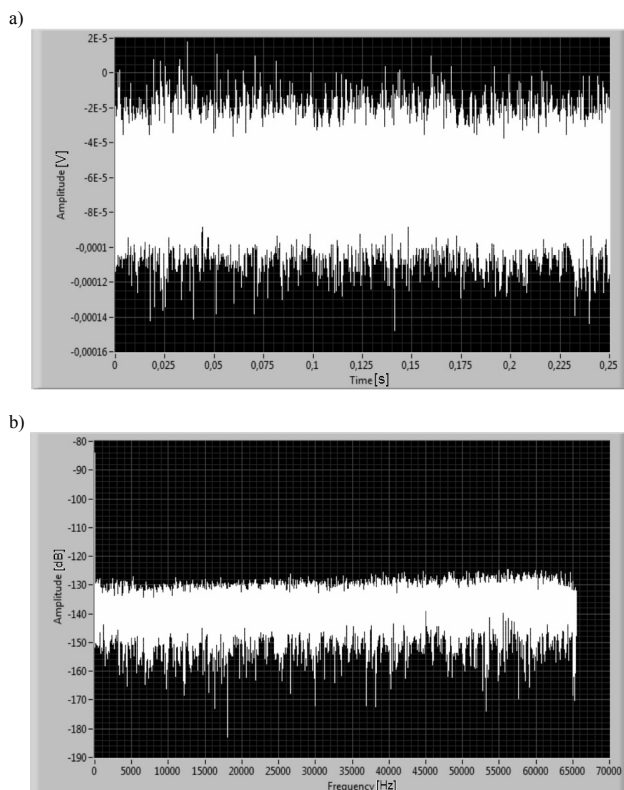


Rys. 3. Charakterystyka przetwarzania przetwornika dla prądu wejściowego I<sub>p</sub>=0,5 A  
Fig. 3. Transducer characteristic for input current I<sub>p</sub>=0,5 A



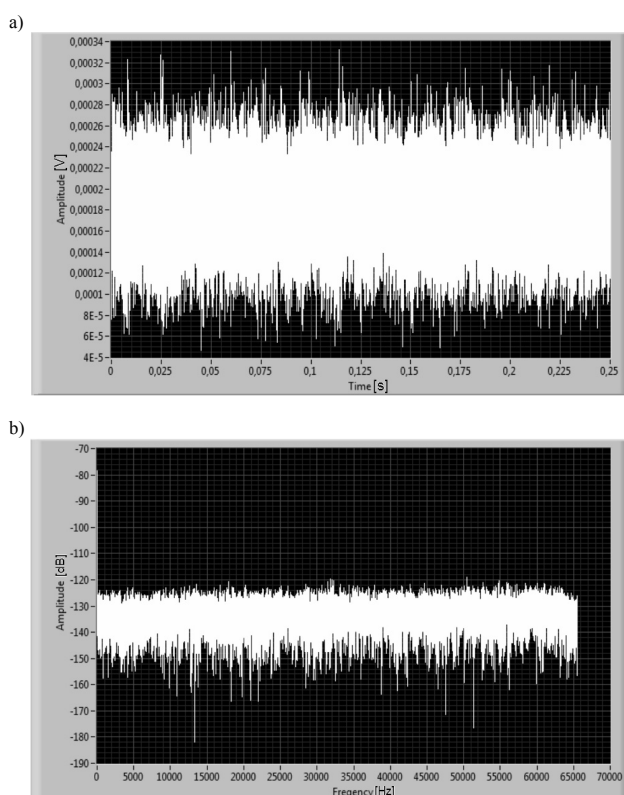
Rys. 4. Charakterystyka przetwarzania przetwornika dla prądu wejściowego I<sub>p</sub>=1 A  
Fig. 4. Transducer characteristic for input current I<sub>p</sub>=1 A

Charakterystyki przetwarzania przetwornika wskazują na możliwość wykonywania pomiarów od 20 Hz do ponad 20 kHz z akceptowalnym błędem. Dla planowanych pomiarów diagnostycznych jest to zakres całkowicie wystarczający.



Rys. 5. Charakterystyka szumów własnych karty akwizycji danych:  
a) amplitudowo-czasowa; b) częstotliwościowa

Fig. 5. Self-noise of DAQ card: a) time domain; b) spectrum



Rys. 6. Charakterystyka szumów przetwornika z kartą akwizycji danych:  
a) amplitudowo-czasowa; b) częstotliwościowa

Fig. 6. Noise of transducer and DAQ card: a) time domain; b) spectrum

Dalej przeprowadzono pomiary szumów własnych układu przetwornika. Na rysunku 5 przedstawiono wynik badania szumów karty akwizycji danych, a na rysunku 6 wynik badania z układem pomiarowym dołączonym do karty. Jak widać na rysunku 6. a szumy własne układu pomiarowego wraz z kartą akwizycji nie przekraczają poziomu  $-120$  dB co jest wartością całkowicie satysfakcjonującą dla przewidywanych zastosowań układu pomiarowego.

#### 4. Wnioski

Wyniki badań przetwornika potwierdziły jego oczekiwane parametry – niskie szumy własne i liniową charakterystykę w szerokim paśmie częstotliwości.

Oczekuje się, że wyniki diagnostyki silników, realizowanej przy wykorzystaniu opracowanego przetwornika, będą miały znacznie wyższą wiarygodność, niż rozwiązania dotychczasowe.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w roku 2011 jako projekt badawczy nr 2389/B/T02/2010/38.*

#### 5. Literatura

- [1] Dzwonkowski A., Swędrowski L.: Diagnosis of bearing damage in induction motors by instantaneous power analysis, The Sixth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies CM 2010.
- [2] Immovilli F., Bellini A., Rubini R., Tassoni C.: Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals – A Critical Comparison, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, no. 4, 2010.
- [3] Swędrowski L., Dzwonkowski A.: Application of vibration methods for calibration of diagnostic system based on motor current analysis, Elektrotechnika i Elektronika, Vol. 25, Issue 2, 2006.
- [4] Swędrowski L., Rusek J.: Model and simulation tests of a squirrel-cage induction motor with oscillation of air gap, Proc. of: 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Vienna, Austria 7-9, September. IEEE, Arsenal Research, (2005).
- [5] Schoen R. R., Habetler T. G., Kamran F., Bartheld R. G.: Motor bearing damage detection using stator current monitoring. IEEE vol.31, Nov/Dec (1995).
- [6] Swędrowski L.: Diagnostics measurement of current supplying an electric motor. XVII IMEKO World Congress – Metrology in the 3rd Millennium. Dubrovnik, Croatia, June (2003).
- [7] Jack L. B., Nandi A. K.: Genetic algorithms for feature selection in machine condition monitoring with vibration signals, IEEE Proc. – Vision, Image and Signal Processing, vol.147, June 2000.
- [8] Bellini A., Cocconcelli M., Immovilli F., Rubini R.: Diagnosis of mechanical faults by spectral kurtosis energy, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008. 10-13 Nov. 2008.
- [9] Zoubek H., Villwock S., Pacas M.: Frequency Response Analysis for Rolling-Bearing Damage Diagnosis, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 55, Issue 12, Dec. 2008.
- [10] Wei Zhou, Habetler T.G., Harley R.G.: Incipient Bearing Fault Detection via Stator Current Noise Cancellation Using Wiener Filter, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Cracow 2007.
- [11] Frosini L., Bassi E., Gazzaniga C.: Effect of the bearings faults on the efficiency of the induction motors, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008. 10-13 Nov. 2008.
- [12] Trajin B., Regnier J., Faucher J.: Detection of bearing faults in asynchronous motors using Luenberger speed observer, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. 10-13 Nov. 2008.

otrzymano / received: 16.09.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.11.2011

artykuł recenzowany