

**Leon SWĘDROWSKI, Ariel DZWONKOWSKI**  
POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI,  
KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW INFORMACYJNYCH

## Badania symulacyjne wpływu uszkodzeń łożysk silnika indukcyjnego na przebieg chwilowych wartości prądu i napięcia

Dr hab. inż. Leon SWĘDROWSKI

Leon Swędrowski ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Gdańskiej w 1972 roku. Pracę doktorską obronił na tym samym Wydziale w roku 1980. Od ukończenia studiów pracuje w Katedrze Miernictwa Elektrycznego Wydziału Elektrycznego Politechniki Gdańskiej. W roku 2005 uzyskał stopień doktora habilitowanego. Dziedziny jego zainteresowań to pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, diagnostyka techniczna, pomiary o wysokiej dokładności.

e-mail: l.swedrowski@ely.pg.gda.pl



Mgr inż. Ariel DZWONKOWSKI

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej w 2004 roku. Obecnie jest asystentem w Katedrze Metrologii i Systemów Informacyjnych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Interesuje się diagnostyką i komputerowymi systemami pomiarowymi. Przygotowuje się do wszczęcia przewodu doktorskiego.

e-mail: a.dzwonkowski@ely.pg.gda.pl



### Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wpływu uszkodzeń łożysk silnika indukcyjnego na przebiegi wartości chwilowych prądu i napięcia. Do analizy przyjęto model zjawisk zachodzących w silniku, polegający na tym, iż odkształcenia prądu i napięcia są skutkiem nieregularności momentu obciążenia silnika, które powodowane są zmiennym momentem oporowym od uszkodzonego łożyska. Odkształcenia mają postać dodatkowych harmonicznych widma, pojawiających się wskutek modulacji przebiegów harmonicznych o częstotliwościach charakterystycznych dla danego typu uszkodzenia. Przedstawiono wyniki analizy symulacyjnej, wykonanej w programie PSpice. Badania wykonane zostały z wykorzystaniem uproszczonego modelu silnika indukcyjnego, składającego się z rezystancji zmiennej w czasie oraz z indukcyjności. Dla porównania przedstawiono również badania, wykonane przy stałych wartościach parametrów modelu silnika. Następnie omówiono wnioski płynące z wyników przeprowadzonych przez autorów badań.

**Słowa kluczowe:** Diagnostyka silnika, silniki indukcyjne, system diagnostyczny, analiza prądu, prąd stojana, widmo.

### Simulation researches on influence of bearings damages in induction motor on instantaneous value of current and voltage wave

#### Abstract

The paper presents simulation researches of influence of damages in bearings in induction machine on instantaneous current and voltage supply. For analyze was adopted model of phenomena, which rely on the fact, that current and voltage deformation is result of irregularity of load torque in machine. Damages, which appear in the wave, are visible as additional harmonics in the spectrum, owing from modulation of waves by characteristic frequencies for given type of bearings damages. Results of simulations, made in PSpice program, are also shown in this paper. Simulations were made using simple model of induction machine, which consist of oscillating resistance and inductor circuit. Conclusions, which came from those simulations, are also showed.

**Keywords:** Induction motors, current measurements, diagnostics, spectrum, current supply.

### 1. Wstęp

Silnik indukcyjny jest najczęściej spotykaną maszyną w przemyśle – szacuje się, że około 65% energii elektrycznej wytwarzanej na świecie, zużywanej jest przez ten rodzaj maszyn.

W silniku indukcyjnym mogą się pojawiać uszkodzenia elementów mechanicznych, takich jak łożyska, wirnik, wał lub

uszkodzenia elementów układu elektromagnetycznego, np. uzwojeń stojana, wirnika, czy obwodu magnetycznego. Statystyki wskazują jednak, że najczęstszą przyczyną awarii silników indukcyjnych są uszkodzenia łożysk (różne źródła podają, iż jest to od 40% do 90% uszkodzeń) [1].

W literaturze opisywane są różne metody diagnostyki łożysk oparte o analizę odkształceń prądu zasilającego silnik indukcyjny [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Odkształcenia, które pojawiają się w widmie prądu, mają postać dodatkowych harmonicznych widma, pojawiających się wskutek modulacji przebiegów harmonicznych o częstotliwościach charakterystycznych dla danego typu uszkodzenia.

Literatura podaje dwa modele zjawisk występujących w silniku, które są źródłem odkształcenia prądu. Pierwszy model oparty jest na założeniu, iż odkształcenie prądu jest skutkiem zaburzeń momentu obciążenia silnika, spowodowanych zmiennym momentem oporowym uszkodzonego łożyska, wskutek czego powstają zaburzenia mocy czynnej pobieranej przez silnik. Drugi model oparty jest na założeniu, iż za modulację prądu odpowiedzialne są oscylacje szerokości szczeliny powietrznej, które skutkują zmieniającą się w czasie reaktancją indukcyjną uzwojeń silnika.

Z powyższych rozważań wynika, iż uszkodzone łożysko wpływa zarówno na nierównomierność prędkości kątowej wirnika jak i na wahania mocy pobieranej przez silnik, a te zmiany w sytuacji, gdy maszyna zasilana jest napięciem wymuszonym przez źródło, skutkuje zmianami prądu pobieranego przez silnik.

### 2. Badania symulacyjne

W dotychczasowych pracach zespołu, w skład którego wchodzi autorzy niniejszego artykułu, do badań wykorzystywano uproszczony model silnika, składający się ze stałej w czasie rezystancji i zmiennej indukcyjności [8]. Model ten ma uzasadnienie przy założeniu, iż za modulację prądu odpowiedzialne są oscylacje szerokości szczeliny powietrznej, które skutkują zmieniającą się w czasie reaktancją indukcyjną uzwojeń silnika.

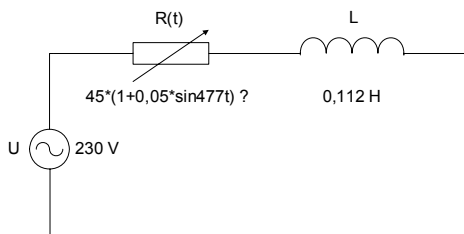
W badaniach symulacyjnych, przedstawionych w niniejszym artykule, przyjęto model zjawisk zachodzących w silniku polegający na tym, iż odkształcenia prądu i napięcia są skutkiem nieregularności momentu obciążenia silnika, które powodowane są zmiennym momentem oporowym od uszkodzonego łożyska. Pojawiające się odkształcenia mają postać dodatkowych harmonicznych widma, pojawiających się wskutek modulacji przebiegów harmonicznych o częstotliwościach charakterystycznych dla danego typu uszkodzenia.

W literaturze znane są zależności, dzięki którym można wyznaczyć wspomniane częstotliwości charakterystyczne [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Ze względu na przyjęty do badań model zjawisk zachodzących w silniku, w prezentowanym artykule przyjęto inny, uproszczony model uzwojenia silnika indukcyjnego, składający się z rezystancji zmiennej w czasie, zgodnie z zależnością:

$$R(t) = R_0 \cdot (1 + a \cdot \sin \omega t), \quad (1)$$

gdzie  $a$  jest współczynnikiem, określającym udział składowej zmiennej, oraz ze stałej indukcyjności (rys. 1). Uzasadnieniem takiego wyboru modelu jest fakt, iż zmiana momentu oporowego od uszkodzonego łożyska, wpływa na nieregularność momentu obciążenia, co w konsekwencji przekłada się na chwilowe wahania mocy czynnej, pobieranej przez silnik. Z mocą czynną ściśle powiązana jest rezystancja, dlatego też, zdaniem autorów, taki model lepiej oddaje fizyczną naturę zjawisk w silniku, niż model o zmiennej reaktancji.



Rys. 1. Uproszczony schemat zastępczy silnika, składający się z zmiennej w czasie rezystancji  $R(t)$  oraz stałej indukcyjności  $L$ .

Fig. 1. Simplification circuit of the induction machine, which be composed of resistance variable in time  $R(t)$  and inductance  $L$ .

Dla porównania przedstawiono również wyniki badań, wykonanych przy stałych wartościach parametrów modelu silnika.

## 2.1. Widmo prądu zasilającego silnik indukcyjny

Z literatury wynika, iż zaburzenia prądu zasilającego silnik indukcyjny, mają związek z częstotliwościami charakterystycznymi dla danego typu uszkodzenia i objawiają się w postaci dodatkowych składowych harmonicznych w widmie prądu stojana.

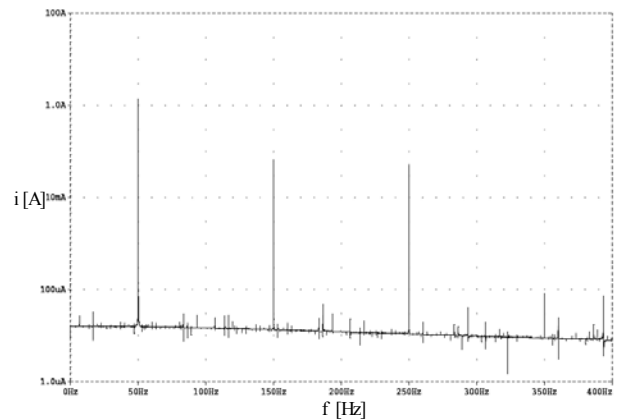
Częstotliwości charakterystyczne wynikają z prędkości obrotowej wirnika oraz z wymiarów geometrycznych łożyska. Natomiast dodatkowe harmoniczne, obecne w widmie prądu, są skutkiem modulacji harmonicznych o częstotliwościach obecnych w widmie prądu silnika nieuszkodzonego przez wspomniane częstotliwości, charakterystyczne dla konkretnego typu uszkodzenia.

W badaniach symulacyjnych, których wyniki przedstawiono poniżej założono obecność pierwszej, trzeciej i piątej harmonicznej w napięciu zasilającym.

W widmie prądu stojana, uzyskanym w badaniach symulacyjnych bez zamodelowanych uszkodzeń (rys. 2) zidentyfikowano prążki o częstotliwościach: 50 Hz, 150 Hz i 250 Hz.

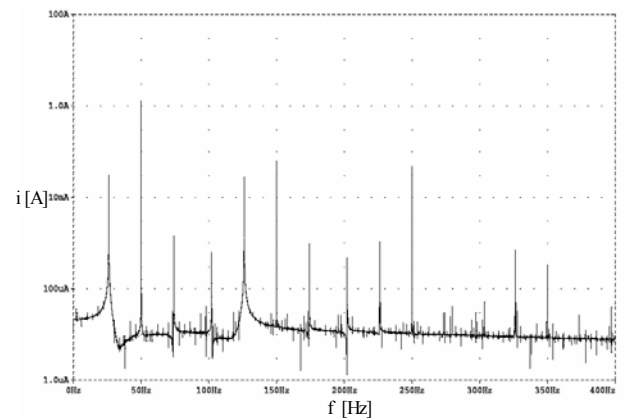
Uszkodzenie stojana zasymulowano wprowadzając rezystancję składającą się z dwóch składowych: stałej i zmiennej o częstotliwości 76 Hz.

W widmie prądu stojana, uzyskanym w badaniach symulacyjnych z zamodelowanymi uszkodzeniami (rys. 3), oprócz harmonicznych istniejących w silniku bez uszkodzeń, pojawiają się prążki o częstotliwościach 26 Hz, 74 Hz, 126 Hz, 174 Hz, 226 Hz i 326 Hz.



Rys. 2. Widmo prądu stojana, uzyskane w programie PSpice dla przypadku prostego obwodu RL z rezystancją stałą w czasie

Fig. 2. Spectrum of stator current, made in PSpice program for simple RL circuit with resistance which is constant in time



Rys. 3. Widmo prądu stojana, uzyskane w programie PSpice dla przypadku prostego obwodu RL z rezystancją zmienną w czasie

Fig. 3. Spectrum of stator current, made in PSpice program for simple RL circuit with resistance variable in time

Składowe 26 Hz i 126 Hz stanowią kombinację częstotliwości:  $|f \pm f_r|$ , przy czym  $f$  jest częstotliwością napięcia zasilającego a  $f_r$  jest częstotliwością wprowadzonej oscylacji składowej zmiennej rezystancji. Prążki o częstotliwościach 74 Hz i 226 Hz to kombinacja częstotliwości  $3f - f_r$  i  $3f + f_r$ . Prążki o częstotliwościach 174 Hz i 326 Hz to kombinacja częstotliwości  $5f - f_r$  i  $5f + f_r$ .

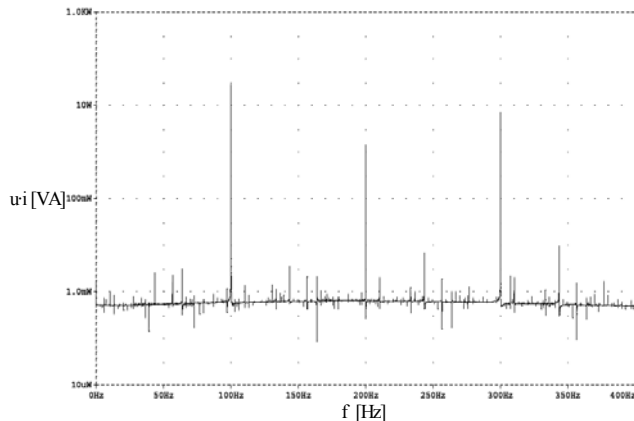
Te zależności zgadzają się z poprzednimi wynikami badań autorów [1].

## 2.2. Widmo iloczynu chwilowych wartości prądu stojana i napięcia zasilającego silnik

Na rysunkach 4 i 5 podano wyniki obliczeń iloczynu chwilowych wartości prądu stojana i napięcia zasilającego silnik, uzyskane w procesie symulacji, odpowiednio ze stałą i zmienną w czasie wartością rezystancji.

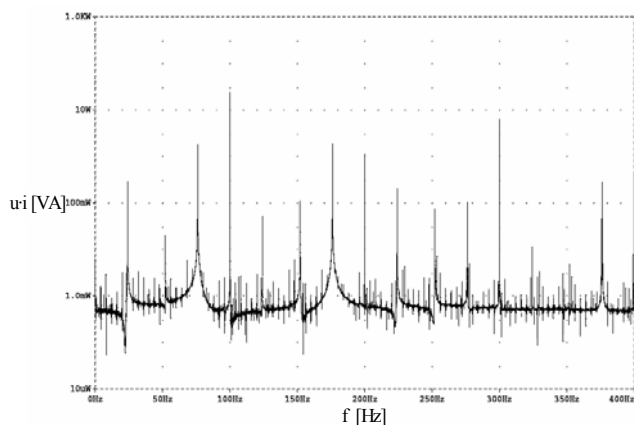
W widmie iloczynu chwilowych wartości prądu stojana i napięcia zasilającego silnik bez uszkodzeń widoczne są prążki o częstotliwościach: 100 Hz, 200 Hz i 300 Hz (odpowiednio:  $2f$ ,  $4f$ ,  $6f$ ).

Natomiast w przypadku symulacji pracy silnika uszkodzonego, w widmie iloczynu chwilowych wartości prądu stojana i napięcia zasilającego, oprócz powyższych harmonicznym pojawiają się prążki o częstotliwościach 24 Hz, 76 Hz, 124 Hz, 152 Hz, 176 Hz, 224 Hz i 276 Hz, przy czym 76 Hz i 152 Hz to pierwsza i druga harmoniczna częstotliwości symulowanych zmian zmiennej w czasie rezystancji.



Rys. 4. Widmo iloczynu chwilowych wartości prądu stojana i napięcia zasilającego, uzyskane w programie PSpice dla przypadku prostego obwodu RL z rezystancją stałą w czasie

Fig. 4. Spectrum of product of instantaneous stator current and supply voltage, made in PSpice program for simple RL circuit with resistance constant in time



Rys. 5. Widmo iloczynu chwilowych wartości prądu stojana i napięcia zasilającego, uzyskane w programie PSpice dla przypadku prostego obwodu RL z rezystancją zmienną w czasie

Fig. 5. Spectrum of product of instantaneous stator current and supply voltage, made in PSpice program for simple RL circuit with resistance variable in time

Składowe 24 Hz i 176 Hz stanowią kombinację częstotliwości:  $2f - f_r$  i  $2f + f_r$ , składowe: 124 Hz i 276 Hz to kombinacja częstotliwości  $4f - f_r$  i  $4f + f_r$ , a prążek o częstotliwości 224 Hz to kombinacja częstotliwości  $6f - f_r$ .

### 3. Podsumowanie

Powstanie uszkodzeń łożysk w silniku skutkuje pojawieniem się dodatkowych składowych harmonicznym w widmie prądu stojana oraz w widmie iloczynu prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny. Dla wstępnych badań oceny przydatności zaprezentowanej metody przyjęto uproszczony model silnika, składający się ze zmiennej w czasie rezystancji i stałej indukcyjności

Badania symulacyjne potwierdziły założenia przyjętego modelu zjawisk zachodzących w silniku indukcyjnym – na skutek oscylacji rezystancji, w widmie prądu stojana, jak i w widmie iloczynu napięcia zasilania i prądu stojana pojawiają się składowe harmoniczne, związane z częstotliwością charakterystyczną dla określonego typu uszkodzenia łożyska. Otrzymane wyniki są zbieżne z wynikami opisanymi w [8], w którym autorzy wykorzystali uproszczony model silnika, składający się ze stałej w czasie rezystancji i zmiennej indukcyjności.

Co ważne, w wynikach badań symulacyjnych iloczynu napięcia i prądu, dla obu uproszczonych modeli, pojawia się składowa o częstotliwości charakterystycznej dla uszkodzenia. Składowa ta nie pojawia się w widmie prądu. W planowanych badaniach eksperymentalnych obecność tej składowej powinna pozwolić na bardziej precyzyjne określenie stanu łożyska, niż korzystanie ze składowych zmodulowanych częstotliwością charakterystyczną dla uszkodzenia, co wykorzystywane jest w dotychczasowych metodach. Większa precyzja wynika z łatwiejszej identyfikacji składowej o częstotliwości zależnej tylko od rodzaju uszkodzenia i prędkości kątowej. Również liczba obliczeń pośrednich, potrzebnych do określenia częstotliwości charakterystycznych dla danego typu uszkodzenia, w porównaniu do przypadku wyznaczania częstotliwości składowych diagnostycznych powstałych na skutek modulacji składowymi o częstotliwości charakterystycznej, jest mniejsza. Pozwoli to na większą dokładność analizy.

Autorzy niniejszego artykułu przeprowadzili również badania, dotyczące wykorzystania do diagnostyki stanu technicznego łożysk w silnikach indukcyjnych innych zależności pomiędzy prądem stojana a napięciem zasilającym silnik (np. ilorazu). Jednak wyniki uzyskane tą drogą nie pozwalają na odnalezienie składowych, charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk w silniku.

Planowane są dalsze prace, związane z dokładniejszym określeniem zależności pomiędzy składowymi w widmie iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia a uszkodzeniami łożyska, w których wykorzystany zostanie pełen model obwodowy maszyny indukcyjnej.

### 4. Literatura

- [1] L. Swędrowski: Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego, oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego. Wydawnictwo PG, Gdańsk 2005.
- [2] J.R. Stack, T. G. Habetler, R. G. Harley: Bearing fault detection via autoregressive stator current modeling. IEEE, vol.2, Salt Lake City, 2003.
- [3] R. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, R. G. Bartheld: Motor bearing damage detection using stator current monitoring. IEEE vol.31, Nov/Dec 1995.
- [4] H. Calis, P. J. Unsworth: Fault diagnosis in induction motors by motor current signal analysis. IEEE SDEMPED'99, 1999.
- [5] G. B. Kliman, J. Stein: Induction motor fault detection via passive current monitoring. ICEM, MIT Cambridge USA, 1990.
- [6] B. Huo, A. M. Trzynadlowski: Stator fault detector for AC motors based on the TMS320F243 DSP controller. DSPS Fest 2000, Texas Instruments, 2000.
- [7] J. Rusek, L. Swędrowski: Wpływ uszkodzenia łożyska na spectrum prądu silnika indukcyjnego. XXXIX SME, Gdańsk 2003.
- [8] L. Wilczewski, L. Swędrowski: Badania symulacyjne wpływu modulacji prądu na przebieg mocy chwilowej pobieranej przez silnik indukcyjny dla celów diagnostyki łożysk. Zeszyty Nauk. Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 21, Gdańsk 2005.

**Leon SWĘDROWSKI, Ariel DZWONKOWSKI**

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI,  
KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW INFORMACYJNYCH