

Paweł Dybowski, Waldemar Milej  
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

## DIAGNOSTYKA SILNIKA INDUKCYJNEGO Z WYKORZYSTANIEM DOSTĘPNYCH NAPIĘĆ STOJANA

### DIAGNOSTICS OF THE INDUCTION MOTOR USING AVAILABLE STATOR VOLTAGES

**Abstract:** This article continues the series of publications on the use of the measurable signal for the induction motor diagnosis. Previously presented results concern the analysis of the stator currents spectrum and search diagnostic signals in it. Using the dynamic model of the induction machine and database of calculations for different rotor faults, the possibility of using measurable stator voltage signals for the diagnosis of induction machine are presented. This type of diagnosis may be a good complement to the work based on the analysis of the stator currents. The results of calculations was verified by measurements in laboratory.

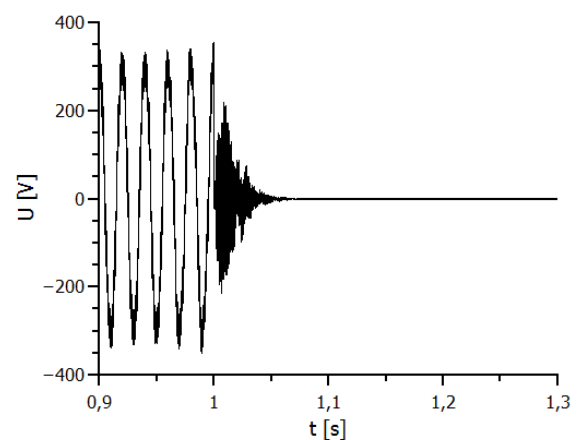
#### 1. Wstęp

Artykuł ten jest kontynuacją serii publikacji dotyczących wykorzystania dostępnych poprzez pomiar sygnałów do diagnostyki silnika indukcyjnego [3, 6, 7, 8, 9]. Dotychczas prezentowane wyniki dotyczyły analizy widma prądów stojana i poszukiwania w nim sygnałów diagnostycznych. Dysponując modelem dynamicznym maszyny indukcyjnej oraz bazą danych obliczeń dla różnych uszkodzeń wirnika, autorzy chcieliby przedstawić możliwości wykorzystania dostępnych w sposób pomiarowy sygnałów napięć stojana do diagnostyki maszyny indukcyjnej. Diagnostyka tego typu [1] może być dobrym uzupełnieniem prac bazujących na analizie prądów stojana [3, 4, 5]. Podjęto również próbę pomiarowej weryfikacji uzyskanych rezultatów obliczeń. Wykorzystano do tego celu maszynę indukcyjną dostępną w laboratorium.

#### 2. Opis obliczeń i uzyskane wyniki

Obliczenia wykonane zostały dla czterobiegunowego silnika o mocy 7,5 kW, posiadającego 36 żłobków na stojanie i 28 na wirniku, o klatce odlewanej, aluminiowej. Uzwojenie stojana nie posiadało gałęzi równoległych, a żłobki wirnika były proste (bez skosu). Użyty do obliczeń model dynamiczny maszyny uwzględniał wyższe harmoniczne indukcyjności stojana, wirnika i indukcyjności stojan-wirnik oraz zmienną prędkość obrotową wirnika. Indukcyjności wyznaczono metodą numeryczną dla 400 położenia kątowych wirnika. Indukcyjności i ich pochodne względem kąta obrotu wirnika  $\varphi$ , dla dwóch liniowo niezależnych obwodów stojana, dla wszystkich oczek wirnika plus oczko

jednego pierścienia zwierającego klatki, zostały zapisane w postaci plików. Indukcyjności te i ich pochodne były następnie wykorzystywane przy całkowaniu równań różniczkowych opisujących maszynę. Obliczenia dotyczyły stanu ustalonego przy obciążeniu momentem znamionowym 50Nm. Silnik był zasilany napięciem trójfazowym o wartości skutecznej 380V. Fazy silnika skojarzono w gwiazdę bez przewodu neutralnego. Uszkodzenie wirnika symulowane było poprzez dwudziestokrotne powiększenie rezystancji prętów wirnika. Pierwsza część obliczeń w każdym przypadku polegała na zasileniu maszyny symetrycznym napięciem trójfazowym. Czas obliczeń w tym stanie wynosił 1s. Następnie zadawano zerową wartość napięć zasilających i kontynuowano obliczenia przez 0,5s.

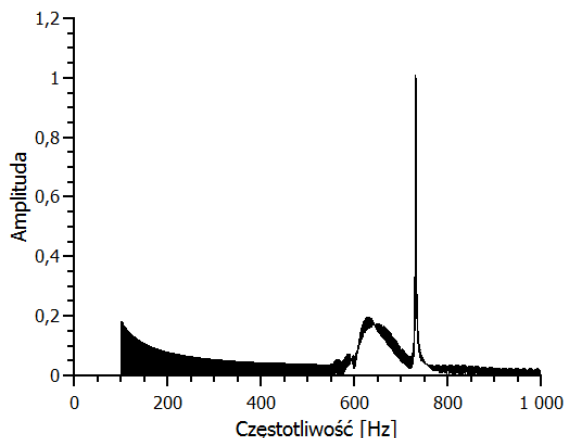


Rys. 1. Przykładowy fragment przebiegu obliczonego napięcia

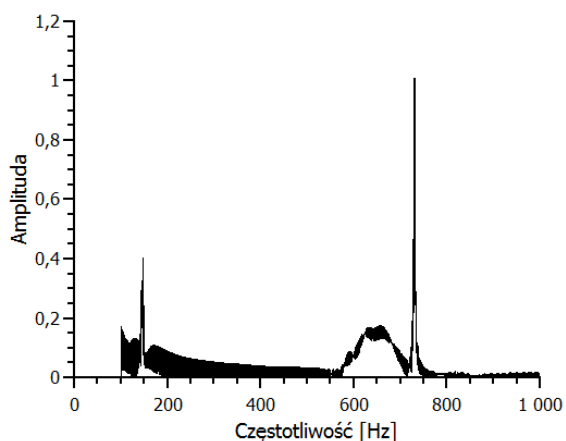
Uzyskany przebieg napięcia na uzwojeniu jednej fazy stojana poddano filtracji filtrem górnoprzepustowym o częstotliwości granicznej 100Hz w celu stłumienia podstawowej harmonicznej (50Hz) napięcia. Taki przebieg rozłożono na harmoniczne szybką transformacją Fouriera FFT. Amplitudy widma napięcia są przedstawiane w wartościach względnych. Uszkodzenie prętów wirnika symulowano poprzez powiększenie dwudziestokrotnie ich rezystancji.

### 2.1. Maszyna bez niecentryczności

Poniższe rysunki przedstawiają widmo napięcia zanikającego podczas wybiegu maszyny z nieuszkodzonym wirnikiem oraz dla maszyny z uszkodzonymi dwoma sąsiednimi prętami klatki wirnika.



Rys. 2. Widmo napięcia – silnik bez uszkodzeń wirnika

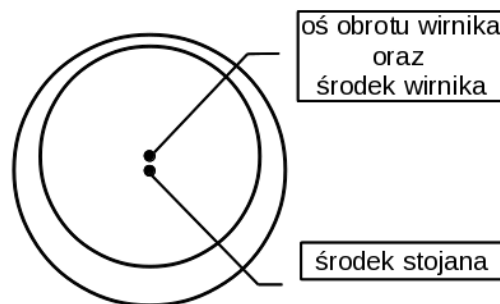


Rys. 3. Widmo napięcia – uszkodzenie dwóch sąsiednich prętów klatki wirnika

W widmie napięcia uzyskanego dla maszyny z uszkodzonym wirnikiem wyraźnie widać składową o częstotliwości 150Hz.

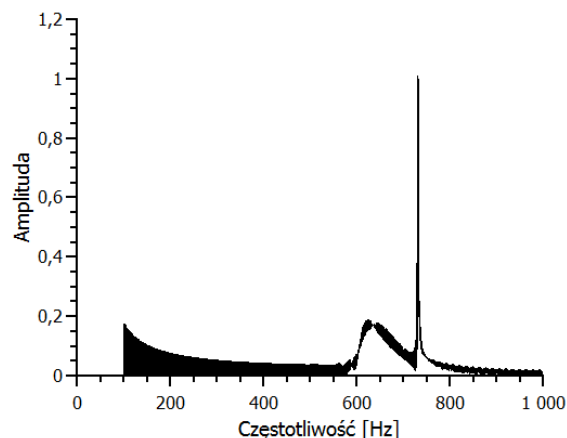
### 2.2 Niecentryczność statyczna

Obliczenia przeprowadzane były dla maszyny z niecentrycznością statyczną 30%.

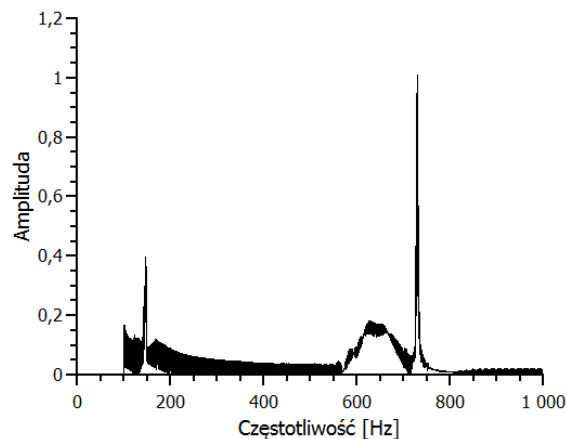


Rys. 4. Położenie wirnika w przypadku niecentryczności statycznej

Rysunki przedstawiają widmo napięcia zanikającego podczas wybiegu dla maszyny z nieuszkodzonym wirnikiem oraz dla maszyny z wirnikiem o uszkodzonych dwóch sąsiednich prętach klatki wirnika.



Rys. 5. Widmo napięcia – silnik bez uszkodzeń wirnika

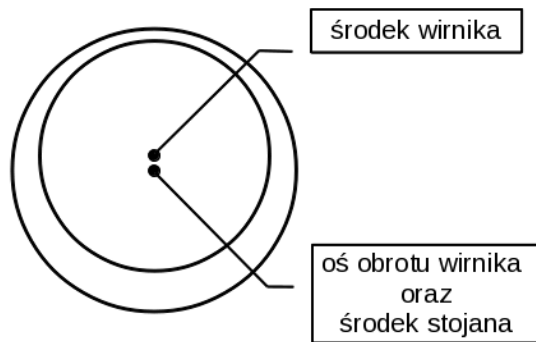


Rys. 6. Widmo napięcia – uszkodzenie dwóch sąsiednich prętów klatki wirnika

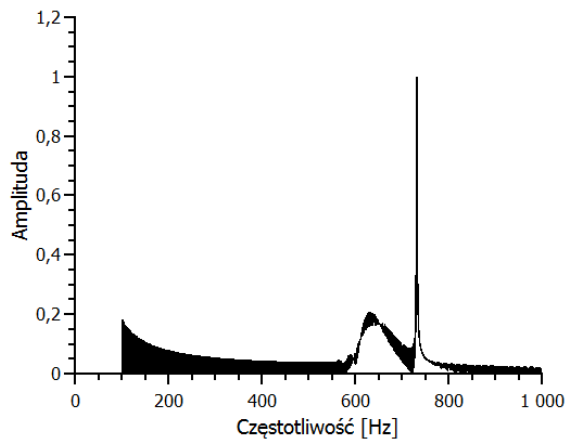
W widmie napięcia uzyskanego dla maszyny z uszkodzonym wirnikiem wyraźnie widać składową o częstotliwości 150Hz. Nie widać symptomów niecentryczności statycznej.

### 2.3. Niecentryczność dynamiczna

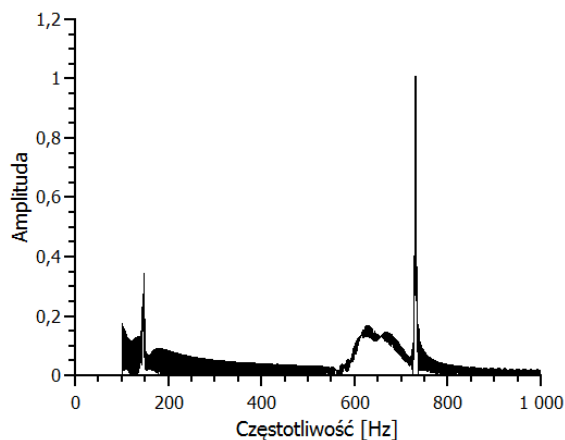
Obliczenia przeprowadzane były dla maszyny z niecentrycznością dynamiczną 30%.



Rys. 7. Położenie wirnika w przypadku niecentryczności dynamicznej



Rys. 8. Widmo napięcia – silnik bez uszkodzeń wirnika

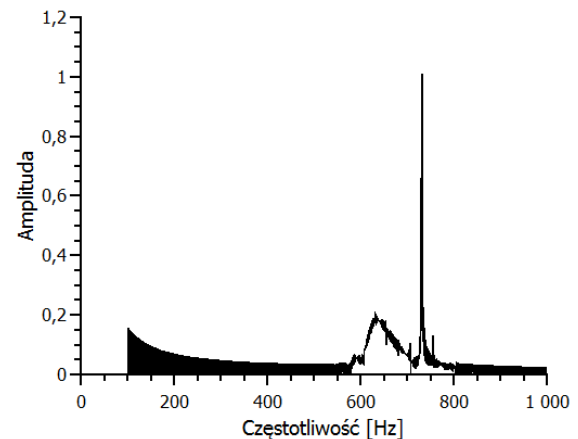


Rys. 9. Widmo napięcia – uszkodzenie dwóch sąsiednich prętów klatki wirnika

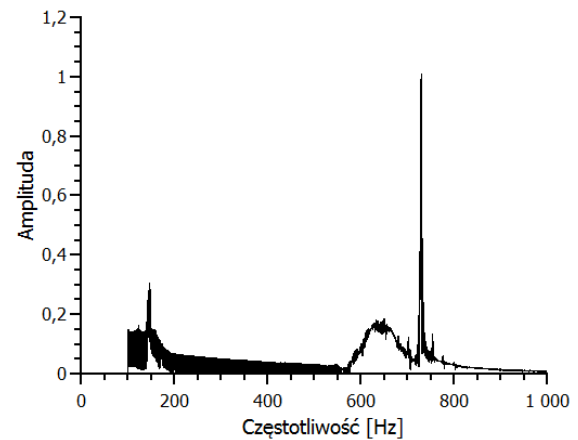
Rysunki przedstawiają widmo napięcia zanikającego podczas wybiegu dla maszyny z nieuszkodzonym wirnikiem oraz z wirnikiem o uszkodzonych dwóch sąsiednich prętach klatki wirnika. W widmie napięcia uzyskanego dla maszyny z uszkodzonym wirnikiem wyraźnie widać składową o częstotliwości 150Hz. Nie widać symptomów niecentryczności dynamicznej.

### 2.4. Niecentryczność mieszana

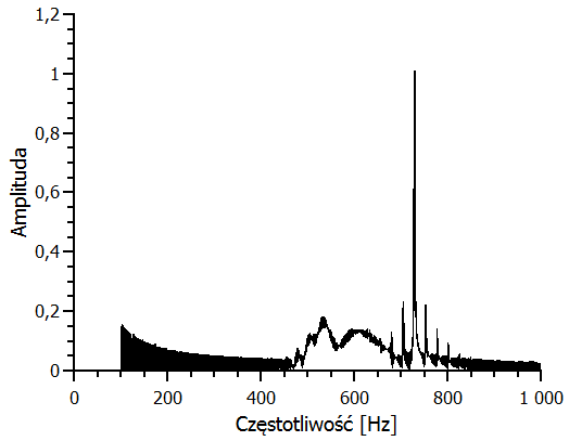
Obliczenia przeprowadzane były dla dwóch przypadków niecentryczności mieszanej: statyczna 30% i dynamiczna 30% oraz statyczna 50% i dynamiczna 30%. Rysunki przedstawiają widmo napięcia zanikającego podczas wybiegu maszyny z nieuszkodzonym wirnikiem oraz dla maszyny z wirnikiem o uszkodzonych dwóch sąsiednich prętach klatki wirnika.



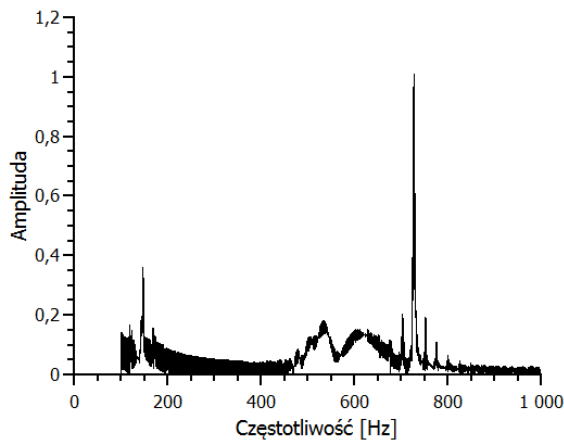
Rys. 10. Widmo napięcia – silnik bez uszkodzeń wirnika – niecentryczność statyczna 30% i dynamiczna 30%



Rys. 11. Widmo napięcia – uszkodzenie dwóch sąsiednich prętów klatki wirnika – niecentryczność statyczna 30% i dynamiczna 30%



Rys. 12. Widmo napięcia – silnik bez uszkodzeń wirnika – niecentryczność statyczna 50% i dynamiczna 30%

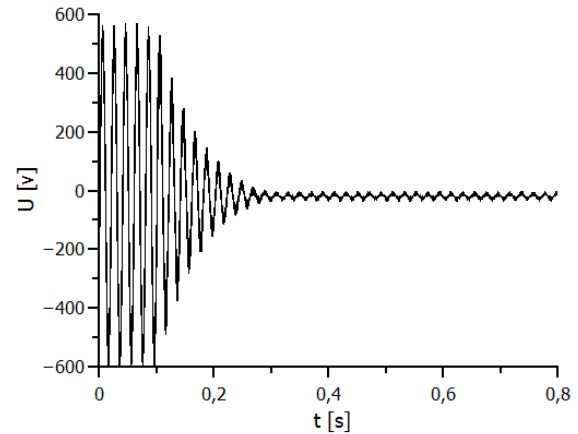


Rys. 13. Widmo napięcia – uszkodzenie dwóch sąsiednich prętów klatki wirnika – niecentryczność statyczna 30% i dynamiczna 30%

W widmie napięcia uzyskanego dla maszyny z uszkodzonym wirnikiem wyraźnie widać składową o częstotliwości 150 Hz. Widać również składowe wokół harmoniki żółbkowej 728 Hz, które mogą świadczyć o pojawieniu się niecentryczności mieszanej.

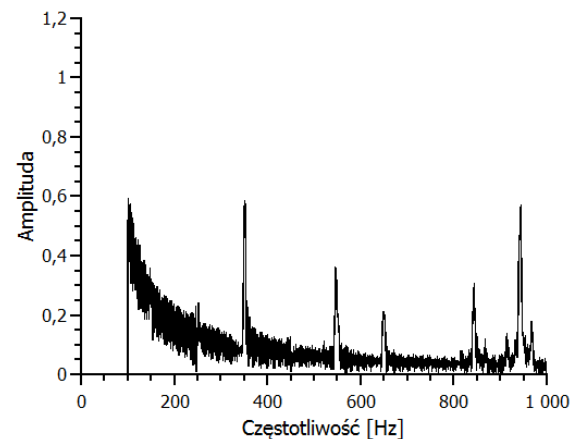
### 3. Pomiary

Rejestracje napięć zostały wykonane dla maszyny pierścieniowej SZUe44: 3 kW, 380 V, 6,6 A, 1420 obr/min. o wirniku symetrycznym oraz niesymetrycznym. Niesymetrię wirnika uzyskano poprzez dodanie dodatkowej rezystancji do jednej fazy uzwojenia. Zmierzone przebiegi napięcia zostały poddane filtracji górno-przepustowej filtrem o częstotliwości granicznej 100 Hz w celu stłumienia podstawowej harmonicznej 50 Hz. Następnie wykonano analizę harmoniczną przebiegu przy pomocy szybkiej transformacji Fouriera FFT.

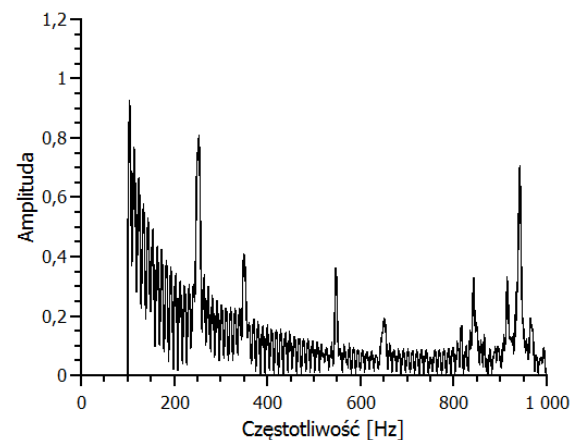


Rys. 14. Przykładowy fragment przebiegu obliczonego napięcia

Rysunki przedstawiają widmo napięcia na uzwojeniu jednej fazy stojana podczas wybiegu maszyny.



Rys. 15. Widmo napięcia – silnik z wirnikiem bez symptomów niesymetrii



Rys. 16. Widmo napięcia – silnik z wirnikiem wykazującym symptomy niesymetrii

W widmie napięcia uzyskanego dla maszyny z uszkodzonym wirnikiem wyraźnie widać składową, tym razem o częstotliwości 250Hz. Widać również składowe wokół harmoniki żłobkowej w pobliżu częstotliwości 940Hz, które mogą świadczyć o pojawieniu się niecentryczności mieszanej.

#### 4. Podsumowanie

W przedstawionych przykładach widać, że przebieg zanikającego napięcia po wyłączeniu zasilania może zostać z powodzeniem wykorzystany jako uzupełnienie diagnostyki silników indukcyjnych prowadzonej na podstawie dostępnych pomiarowo sygnałów, a w szczególności diagnostyki bazującej na analizie przebiegów prądów stojana [3, 4, 5, 6, 7]. Niesymetria klatki wirnika powoduje pojawienie się w widmie napięcia składowych, na podstawie których można wnioskować o uszkodzeniu klatki. Składowe te pojawiają się w przebiegach uzyskanych z obliczeń (rysunki 3, 6, 9, 11 i 13) oraz zarejestrowanych dla rzeczywistego obiektu (rysunek 16). W widmie napięcia uzyskanym dla obliczeń niecentryczności mieszanej pojawia się dodatkowo para składowych w pobliżu harmonicznej żłobkowej. Sygnał ten może być wskaźnikiem wystąpienia niecentryczności mieszanej w maszynie. Można w ten sposób uzupełnić metody wykrywania niecentryczności poprzez analizę widma prądów stojana [2, 4]. Praktyczne zastosowanie tego sygnału wymaga oczywiście dalszych prac w tym kierunku.

#### 5. Literatura

- [1]. Hamdani S., Bouzida A., Touhami O., Ibtouen R.: *Diagnosis of Rotor Fault in Induction Motor Using the MUSIC Analysis of the Terminal Voltage After Switch-off*. Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines.
- [2]. Rusek J.: *Reflection of eccentricities in spectral composition of currents of induction machines*. ICEM'96 Proceedings. Vol. 2, ETSEM – Universidade de Vigo, Spain, s. 470 – 475.
- [3]. Dybowski P.: *Pomiary i modelowanie prądowych symptomów uszkodzeń maszyn indukcyjnych*. Rozprawa doktorska, AGH Kraków 2001.
- [4]. Rams W., Rusek J.: *Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych*. Zeszyty Problemowe BOBRME KOMEL Nr 68/2004, Katowice 2004, s. 1-5.
- [5]. Weinreb K., Węgiel T., Sułowicz M.: *Nieinwazyjna diagnostyka wirnika maszyny asynchronicznej*. Zeszyty Problemowe BOBRME KOMEL Nr 69/2004, Katowice 2004, s. 35-40.
- [6]. Dybowski P.: *Diagnostyka silnika indukcyjnego z zastosowaniem sygnału skutecznej wartości ruchomej prądu*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 77/2007 BOBRME KOMEL, Katowice 2007, s.27-32.
- [7]. Dybowski P.: *Zastosowanie sygnału skutecznej wartości ruchomej prądu stojana w diagnostyce silnika indukcyjnego podczas rozruchu*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 82/2009 BOBRME KOMEL, Katowice 2009, s.123-128.
- [8]. Dybowski P.: *Wpływ stopnia uszkodzenia wirnika na widmo składowych symetrycznych prądów stojana silników klatkowych niesymetrycznych*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 72/2005 BOBRME KOMEL, Katowice 2005, s. 107-112.
- [9]. Dybowski P.: *Możliwość detekcji niecentrycznego położenia wirnika w widmie prądów stojana silnika indukcyjnego klatkowego*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 75/2006 BOBRME KOMEL, Katowice 2006, s. 153-158.

#### Autorzy

Dr inż. Paweł Dybowski

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, Katedra Maszyn Elektrycznych, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel. (+48 12) 617-28-97  
e-mail: dybowski@agh.edu.pl

Dr inż. Waldemar Milej

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, Katedra Maszyn Elektrycznych, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel. (+48 12) 617-28-98  
e-mail: milej@agh.edu.pl

Publikację opracowano w ramach pracy statutowej 11.11.120.873