

Paweł Dybowski<sup>1</sup>, Saleh S. Hamad Elawgali<sup>2</sup>  
AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza<sup>1</sup>, Kraków; Sirte University<sup>2</sup>, Sirte, Libia

## DIAGNOSTYKA SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO – WYKRYWANIE NIECENTRYCZNOŚCI

### DIAGNOSTICS OF THE SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTOR – INVESTIGATION OF ECCENTRICITY

**Streszczenie:** W artykule autorzy przedstawiają wyniki prac dotyczących metody wykrywania niecentryczności statycznej i dynamicznej wirnika służącej do diagnostyki silnika indukcyjnego klatkowego. Metoda polega na wykorzystaniu dostępnych sygnałów diagnostycznych zawartych w widmie prądów stojana. Dysponując bazą danych prądów stojana dla różnych uszkodzeń wirnika, autorzy chcieliby przedstawić możliwości wykrywania niecentryczności w różnych przypadkach. Model dynamiczny silnika użyty do obliczeń uwzględnia wyższe harmoniczne indukcyjności stojana, wirnika i indukcyjności stojan-wirnik oraz zmienną prędkość obrotową wirnika.

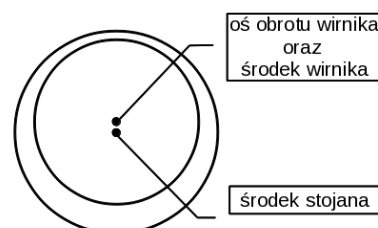
**Abstract:** In this paper the authors present the results of work on methods to detect static and dynamic eccentricity of the rotor used for diagnosis of induction motor. The method relies on the use of available diagnostic signals contained in the spectrum of the stator currents. On the basis of the stator currents for different rotor fault, the authors would like to show the ability to detect different cases of eccentricity. A dynamic model of the motor used in the calculation includes the presence of the higher harmonics of: the stator inductances, the rotor inductances and stator-rotor inductances. The model allows doing the calculations for a variable rotor speed.

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, silnik indukcyjny, badania diagnostyczne, niecentryczność  
**Keywords:** electrical machines, induction motor, diagnostics, eccentricity

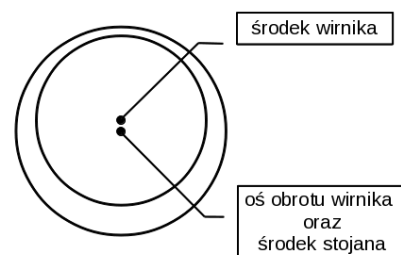
#### 1. Wstęp

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń widm prądów stojana silnika indukcyjnego, klatkowego. Obliczenia wykonane zostały dla czterobiegunowego silnika o mocy 7,5kW, posiadającego 36 żłobków na stojanie i 28 na wirniku, o klatce odlewanej, aluminiowej. Silnik ma kategorię 012 wyznaczoną na podstawie [10]. 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. Silnik był zasilany napięciem trójfazowym o wartości skutecznej 380V. Fazy silnika skojarzono w gwiazdę bez przewodu neutralnego. Obliczenia dotyczyły stanu ustalonego przy obciążeniu momentem znamionowym 50Nm. Poślizg przy takim obciążeniu wynosił  $s=2,71\%$ . Częstotliwości żłobkowe w pierwszej strefie żłobkowej wynoszą  $f_{Sh11}=731\text{Hz}$  i  $f_{Sh12}=631\text{Hz}$ . W drugiej strefie żłobkowej wynoszą odpowiednio  $f_{Sh21}=1412\text{Hz}$  i  $f_{Sh22}=1312\text{Hz}$ . Prezentowane wyniki dotyczą silnika bez usz-

kodzeń z występującym niecentrycznym położeniem wirnika.



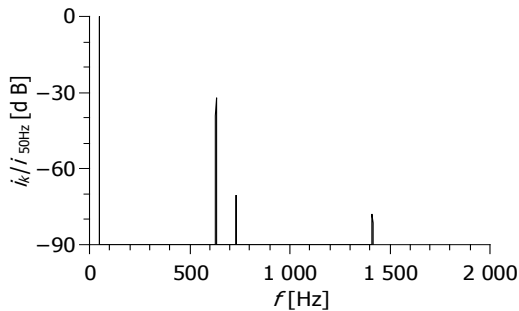
Rys. 1. Położenie wirnika maszyny indukcyjnej dla niecentryczności statycznej



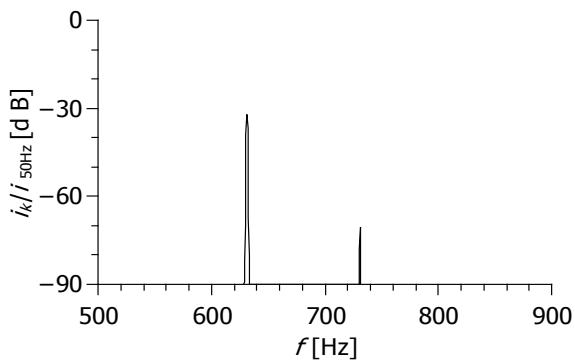
Rys. 2. Położenie wirnika maszyny indukcyjnej dla niecentryczności dynamicznej

## 2. Symetria

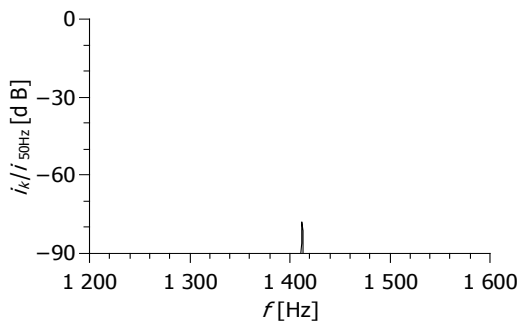
Poniżej zaprezentowane są wyniki obliczeń silnika bez niecentryczności. Przedstawiono widmo prądu jednej fazy stojana oraz powiększenia widma w pierwszej i drugiej strefie występowania harmonicznych żłbkowych.



Rys. 3. Widmo prądu fazowego stojana – maszyna bez niecentryczności



Rys. 4. Widmo prądu fazowego stojana – maszyna bez niecentryczności – pierwsza strefa żłbkowa



Rys. 5. Widmo prądu fazowego stojana – maszyna bez niecentryczności – druga strefa żłbkowa

## 3. Badanie niecentryczności

### 3.1. Niecentryczność statyczna

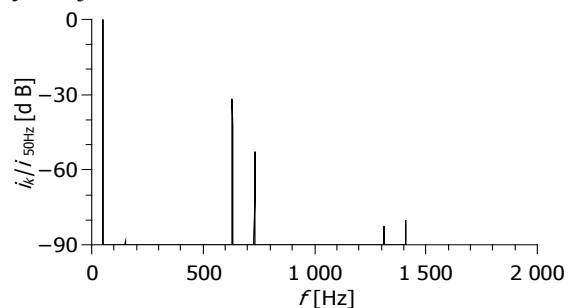
Ocenę występowania niecentryczności statycznej przeprowadzono na podstawie analizy występowania charakterystycznych par harmonicznych w pierwszej i drugiej strefie żłbkowej

[4]. Częstotliwość tych harmonicznych można wyznaczyć na postawie:

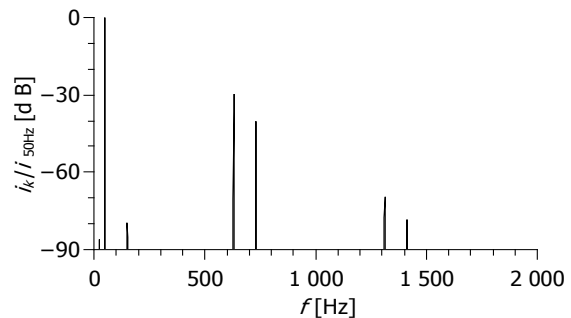
$$f_{tw1} = |f_1 + h' \cdot N_R(1-s)n_s| \quad (1)$$

$$f_{tw2} = |f_1 - h'' \cdot N_R(1-s)n_s| \quad (2)$$

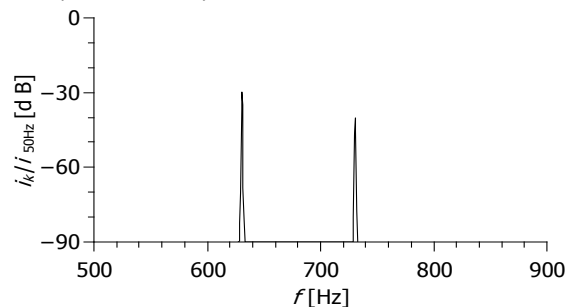
gdzie:  $s$  – poślizg,  $N_R$  – liczba żłbków wirnika,  $n_s$  – prędkość synchroniczna w obr/s,  $h'=1$  oraz  $h''=2$  – parametry klasy maszyny [10]. W pierwszej strefie żłbkowej nie pojawiają się wyraźne symptomy niecentryczności statycznej, ponieważ częstotliwości harmonicznej żłbkowej  $f_{Sh11}$  i  $f_{tw1}$  pokrywają się. Natomiast w drugiej strefie pojawia się sygnał częstotliwości  $f_{tw2}$  na lewo od harmonicznej żłbkowej  $f_{Sh21}$ , co świadczy o wystąpieniu niecentryczności statycznej.



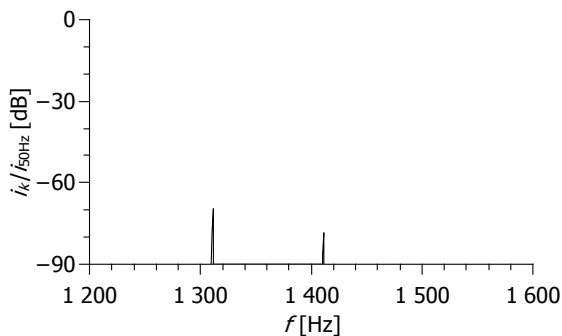
Rys. 6. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność statyczna 50%



Rys. 7. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność statyczna 70%



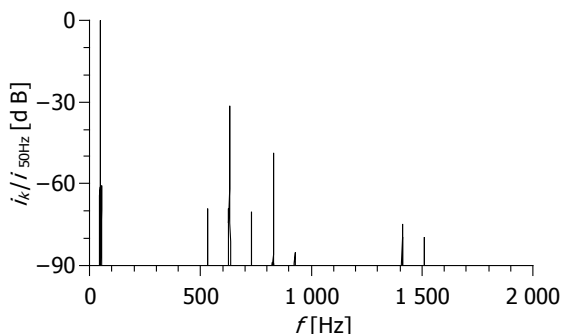
Rys. 8. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność statyczna 70% - pierwsza strefa żłbkowa



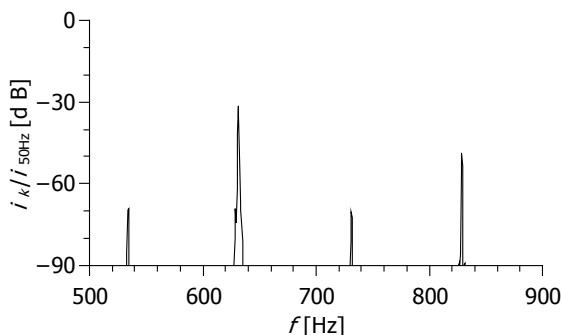
Rys. 9. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność statyczna 70% - druga strefa żłobkowa

### 3.2. Niecentryczność dynamiczna

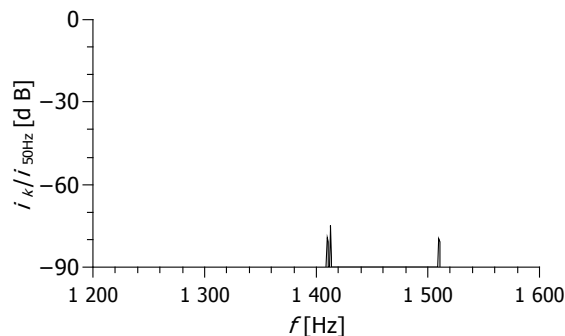
Ocenę występowania niecentryczności dynamicznej przeprowadzono na podstawie analizy występowania charakterystycznych harmonicznych odległych o  $\pm 2(1-s)f_1/p$  lub o  $\pm 4(1-s)f_1/p$  od harmonicznych  $f_{rv1}$  (1) i  $f_{rv2}$  (2) w strefach żłobkowych [4]. Wykryto obecność harmonicznych w pierwszej strefie żłobkowej o częstotliwościach 534Hz i 828Hz oraz 1409Hz i 1512Hz w drugiej strefie żłobkowej świadczących o występowaniu niecentryczności dynamicznej.



Rys. 10. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność dynamiczna 60%



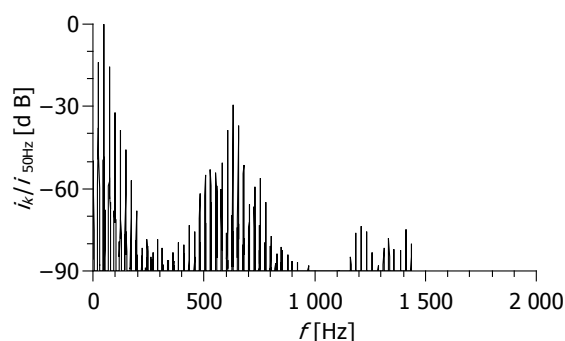
Rys. 11. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność dynamiczna 60% - pierwsza strefa żłobkowa



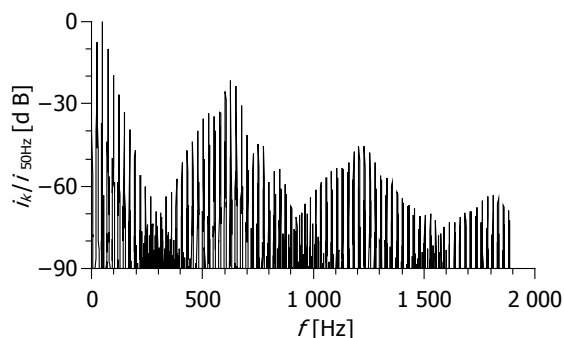
Rys. 12. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność dynamiczna 60% - druga strefa żłobkowa

### 3.3. Niecentryczność mieszana

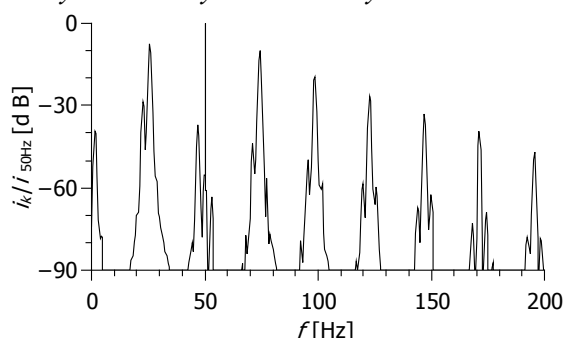
Ocenę występowania niecentryczności mieszanej (statycznej i dynamicznej) przeprowadzono na podstawie analizy występowania harmonicznych odległych od podstawowej harmonicznej  $f_1$  o  $\pm k(1-s)f_1/p$  w strefie podstawowej harmonicznej oraz harmonicznych odległych o  $\pm k(1-s)nf_1/p$  od harmonicznych żłobkowych oraz  $f_{rv1}$  (1) i  $f_{rv2}$  (2) w strefach żłobkowych [4]. Wykryto wystąpienie harmonicznych obrotowych o częstotliwościach około 26Hz i 74Hz oraz 2Hz i 98Hz. Wykryto również występowanie charakterystycznych par harmonicznych obrotowych w pierwszej strefie żłobkowej (np. para harmonicznych o częstotliwościach około 707Hz i 755Hz oraz 682Hz i 780Hz) oraz drugiej strefie żłobkowej (np. para harmonicznych o częstotliwościach około 1388Hz i 1436Hz oraz 1363Hz i 1461Hz) świadczących o wystąpieniu niecentryczności mieszanej.



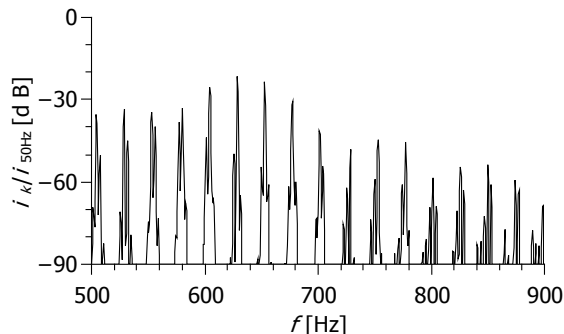
Rys. 13. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność statyczna 30% i dynamiczna 30%



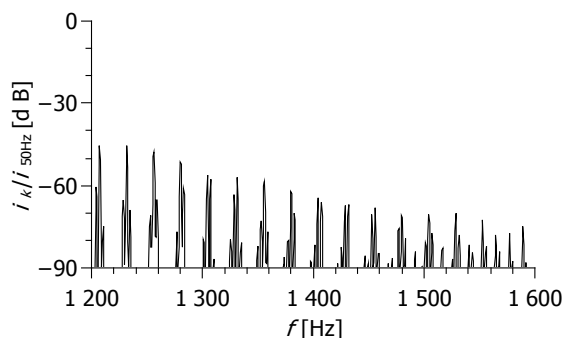
Rys. 14. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność statyczna 30% i dynamiczna 50%



Rys. 15. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność statyczna 30% i dynamiczna 50% - strefa harmoniczej podstawowej



Rys. 16. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność statyczna 30% i dynamiczna 50% - pierwsza strefa żłobkowa



Rys. 17. Widmo prądu fazowego stojana – niecentryczność statyczna 30% i dynamiczna 50% - druga strefa żłobkowa

#### 4. Podsumowanie

W przedstawionych przykładach widać, że widmo prądu stojana zawiera w sobie informację dotyczącą niecentrycznego położenia wirnika maszyny indukcyjnej. Pojawienie się charakterystycznych częstotliwości w widmie dla różnych typów niecentryczności zależy od konstrukcji silnika i od jego kategorii. Widma prądów stojana dla różnych przypadków niecentryczności zawierają składowe zależne od liczby żłobków wirnika oraz jego prędkości obrotowej. Zdecydowanie najtrudniej jest wykryć na podstawie analizy widma częstotliwościowego prądu stojana wystąpienie niecentryczności statycznej. Często sygnały w widmie odpowiadające za detekcję takiego przypadku pokrywają się z harmonicznymi żłobkowymi lub są o bardzo zbliżonej częstotliwości. Sytuacja ulega poprawie dla niecentryczności dynamicznej. Tutaj łatwiej wykryć częstotliwości pojawiające się w widmie przy wystąpieniu tego typu niecentryczności. W przypadkach, gdy niecentryczność statyczna występuje wraz z niecentrycznością dynamiczną widmo jest znacznie bogatsze i zawiera szereg częstotliwości związanych z występującą niecentrycznością. Na ich podstawie pojawienia się tych dodatkowych częstotliwości istnieje możliwość detekcji mieszanej niecentryczności wirnika oraz pośrednio, niecentryczności statycznej.

#### 5. Literatura

- [1]. Rams W., Rusek J.: *Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych pracujących w systemie potrzeb własnych elektrociepłowni* Przegląd Elektrotechniczny R.81 nr 10/2005.
- [2]. *Wykonanie pomiarów diagnostycznych silników 6kV metodą AGH* Praca zlecona AGH nr 5.5.120.663/2006, zam. Elektrociepłownia KRAKÓW S.A. nr 4500048609 z dnia 18.09.2006r.
- [3]. *Diagnostyka klatek maszyn asynchronicznych 200kW – 4MW, 6kV, w układach potrzeb własnych Elektrociepłowni Kraków Grupa EDF* Praca zlecona AGH nr 5.5.120.033/2011, zam. Elektrociepłownia KRAKÓW S.A. nr 6510001503/PBB/2011 z dnia 10.03.2011r.
- [4]. Elawgali S.S.H.: *Diagnosis of rotor eccentricity and clutch wobbling of the induction machines, based on inspection of spectrums of the calculated and registered currents*. Rozprawa doktorska AGH 2007r.
- [5]. 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.

- [6]. Sobczyk T.J., Vas P., Tassoni C.: *A comparative study of effects due to eccentricity and external stator and rotor asymmetries by monoharmonic models*. ICEM'2000 Proceedings. Vol. II. Helsinki University of Technology. Espoo, Finland, s. 946 – 950.
- [7]. Dybowski P.: *Pomiary i modelowanie prądowych symptomów uszkodzeń maszyn indukcyjnych*. Rozprawa doktorska, AGH Kraków 2001.
- [8]. Weinreb K., Węgiel T., Sułowicz M.: *Nieinwazyjna diagnostyka wirnika maszyny asynchronicznej*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, KOMEL, Nr 69/2004, Ustroń 2004, s. 35-40
- [9]. Dybowski P.: *Możliwość detekcji niecentrycznego położenia wirnika w widmie prądów stojana silnika indukcyjnego klatkowego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, KOMEL, nr 75/2006, Katowice 2006, s. 153-158.
- [10]. Rusek, J.: *Categorization of Induction Machines Resulting from Their Harmonic-Balance*

*Model*. Electromagnetics, Vol. 23, No. 3, April 2003, Taylor&Francis, pp. 277-292

### Autorzy

dr inż. Paweł Dybowski,  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Al. A. Mickiewicza 30 30-059 Kraków tel. (+48 12) 617-28-97  
e-mail: dybowski@agh.edu.pl

dr inż. Saleh S. Hamad Elawgali, Sirte University, Faculty of Engineering, Electrical and Electronic Engineering Department, PO BOX 633, Sirte, Libia  
e-mail: Elawgali2002@su.edu.ly