

**Bronisław Drak, Piotr Zientek, Roman Niestrój, Politechnika Śląska, Gliwice  
Józef Kwak, Zabrzeńskie Zakłady Mechaniczne, Zabrze**

## **NAPIĘCIA I PRĄDY WAŁOWE W SILNIKACH INDUKCYJNYCH DUŻEJ MOCY UŻYTYCH W ORGANACH URABIAJĄCYCH KOMBAJNÓW GÓRNICZYCH**

### **SHAFT VOLTAGES AND CURRENTS IN LARGE POWER INDUCTION MOTORS OF HEADING MACHINE**

**Abstract:** The paper presents results of researches aimed at bearing faults detection in the high power induction motors. In the chapter 2 is presented description of laboratory stand. In the chapter 3, on the figures from 2 to 9 are shown different kinds of bearing damages arising in considered motors. In the chapter 4 is presented influence of supply voltage unbalance on the value of shaft currents and voltages. The figure 10 presents diagram of measuring system. On the figures 12, 13 and 14 are presented waveforms of shaft voltages and currents as well as their Fourier transforms. In the chapter 5 is presented influence of number of motor start-ups on the value of bearing current. On the figure 17 are presented waveforms of shaft voltages and currents. Conclusions drawn from laboratory researches are presented in chapter 6.

#### **1. Wstęp**

W silnikach indukcyjnych trójfazowych o mocach 300 kW i napięciach znamionowych 1000V lub 3300V przeznaczonych do napędu organów urabiających górniczych kombajnów ścianowych stwierdzono wysoki poziom napięć wałowych w stanach dynamicznych, wywołanych bezpośrednim załączeniem zasilania z sieci [2]. Przedmiotowe silniki są przystosowane do takiego rozruchu i w związku z tym w kombajnach nie stosuje się urządzeń rozruchowych. Wysoki poziom napięć wałowych może wywoływać prądy łożyskowe, co znacznie przyspiesza uszkodzenie łożysk.

Producenci kombajnów, ze względu na konkurencyjność swoich wyrobów, postulują zwiększenie mocy silników napędowych organów urabiających przy zachowaniu ich gabarytów. Spełnienie tych postulatów wymaga zwiększenia nasycenia w obwodach magnetycznych silników i niestety będzie prowadzić również do dalszego wzrostu poziomu napięć wałowych, w związku z czym zagrożenie uszkodzenia łożysk przez prądy łożyskowe zwiększy się.

Produkowane obecnie w kraju silniki o mocach 300kW i większych do napędu organów urabiających są wyposażone w wyprężniki obrotów, a ich moment obrotowy przenoszony jest do przekładni w ramieniu poprzez wałek bezpieczeństwa umieszczony wewnątrz drążonego wału silnika. Należy podkreślić, iż w przypadku silników z wyprężnikami obrotów, po ich zabudowaniu w ramieniu kombajnu,

istnieją dwa obwody, w których mogą indukować się napięcia wałowe.

Jeden obwód stanowi: przelotowy wał drążony silnika, obydwie łożyska wału oraz tarcze łożyskowe i korpus silnika. Napięcie wałowe indukowane w tym obwodzie wywołuje zagrożenie prądami łożyskowymi dla łożysk wirnika silnika. Drugi obwód stanowią: wałek bezpieczeństwa, łożysko wyprężnika, tarcza łożyskowa strony napędowej, część korpusu ramienia, w którym posadowiony jest silnik oraz obudowa i łożysko przekładni ramienia od strony silnika. Napięcie indukowane w tym obwodzie wywołuje zagrożenie prądami łożyskowymi łożyska wyprężnika i łożyska przekładni ramienia. Z powyższego wynika, że w trakcie eksploatacji nadmierne napięcia wałowe silników mogą oddziaływać negatywnie zarówno na łożyska własne silnika, jak i na łożyska przekładni przenoszącej napęd z silnika do organu urabiającego. Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań naświetlają zagrożenia dla trwałości węzłów łożyskowych silnika oraz w pewnym stopniu przekładni ramienia, i mogą być cennym wkładem do poprawy niezawodności napędu górniczych kombajnów ścianowych. Informacje na temat przyczyn powstawania prądów łożyskowych w maszynach indukcyjnych szeroko opisane zostały w literaturze [1, 2, 3, 4, 5].

## 2. Opis stanowiska badawczego

Obiektem badań był silnik indukcyjny typu: dSKgw315L-4 przeznaczony do napędu organów urabiających górniczych kombajnów ściarnowych (rys. 1).



Rys. 1. Stanowisko laboratoryjne do badań prądów łożyskowych

Cechą charakterystyczną badanego silnika jest:

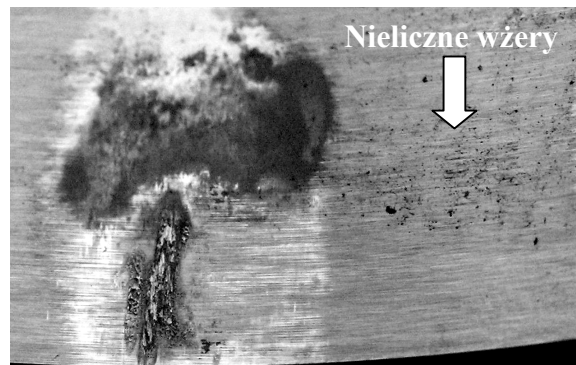
- wyposażenie w system chłodzenia wodą, która swobodnie przepływa kanałami wokół komór w tarczach łożyskowych oraz w kanałach utworzonych w przestrzeni między dwoma współśrodkowymi cylindrami stalowymi stanowiącymi konstrukcję kadłuba silnika,
- drążony wał przelotowy,
- rozruch poprzez bezpośrednie załączenie napięcia zasilania z sieci,
- zastosowanie izolacji obu łożysk silnika.

Do pomiaru prądów fazowych zastosowano przekładniki prądowe o zakresie pomiarowym 600A, przeciążalności prądowej równej 5 i klasie dokładności 0,2. Pomiar prądów łożyskowych wykonano przy pomocy boczników napięcia. Jako urządzenie rejestrujące zastosowano oscyloskop cyfrowy DPO typu TDS3054B firmy Tektonix z przetwornikiem 9-bitowym i zasilaniem akumulatorowym wraz z sondami prądowymi TCP312 (włączanymi w obwody wtórne przekładników prądowych) i sondami napięciowymi P5205 do rejestracji napięć fazowych. Dodatkowo, do długotrwałych rejestracji przebiegów zastosowano kartę sterownika DS1103 firmy dSPACE z przetwornikiem 16-bitowym. W roli czujnika prędkości obrotowej silnika użyta została precyzyjna tachoprędnica. W celu zapewnienia bezpieczeństwa urządzeń rejestrujących, do niektórych pomiarów zastosowano wzmacniacz z izolacją galwaniczną oparty na specjalizowanych

podzespołach firmy Texas Instruments. Do zasilania wszystkich urządzeń rejestrujących użyto transformatora separacyjnego z filtrem przeciwzakłóceń.

## 3. Charakter uszkodzeń łożysk tocznych badanego silnika.

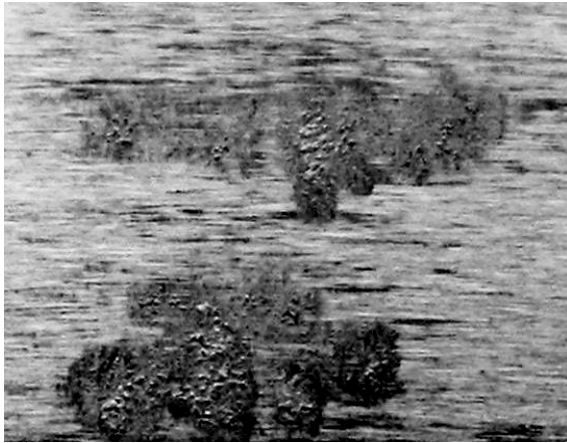
Okres bezawaryjnej pracy nowego lub remontowanego silnika do uszkodzenia węzłów łożyskowych wynosi przeciętnie kilka miesięcy. Charakter uszkodzeń elementów tocznych, bieżni łożysk i czopów wału omawianych silników wskazuje na uszkodzenia termiczne i mechaniczne oraz na uszkodzenia będące skutkiem przepływu prądów przez łożyska. W celu określenia jaki procent uszkodzeń łożysk spowodowany został prądami łożyskowymi, przez okres kilkunastu miesięcy gromadzone były łożyska z określonego typu silnika. W większości z nich charakter uszkodzeń wskazywał na występowanie prądów łożyskowych o dość znacznej wartości (rys. 2, 3, 4). Przeprowadzone wstępne badania laboratoryjne [2] wykazały, obecność występowania napięć wałowych i prądów łożyskowych w przedmiotowych silnikach. Można więc stwierdzić, że przedstawione na rysunkach od 2 do 6 uszkodzenia łożysk spowodowane zostały prądami łożyskowymi.



Rys. 2. Widoczny krater i małe wżery na powierzchni wewnętrznej pierścienia wewnętrznego

Przedstawione na rysunkach 7, 8, 9 uszkodzenia łożysk w postaci regularnych wgniecień (prążków) na bieżniach pierścieni łożysk są wynikiem docisku toczących się po nich elementów tocznych. Działanie prądów łożyskowych znacząco przyspiesza ich powstawanie, na skutek zmiany struktury materiału pierścieni pod działaniem prądów łożyskowych.

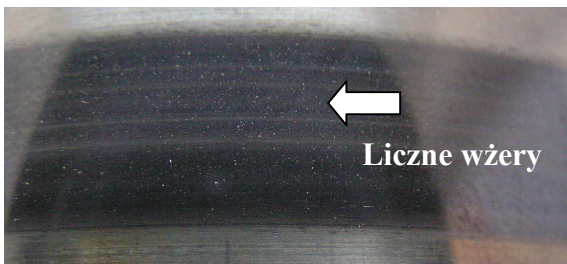




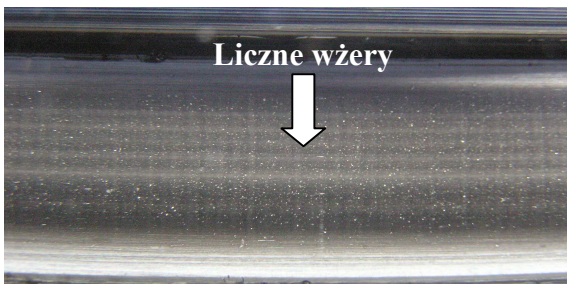
Rys. 3. Widoczny krater na powierzchni zewnętrznej pierścienia zewnętrznego



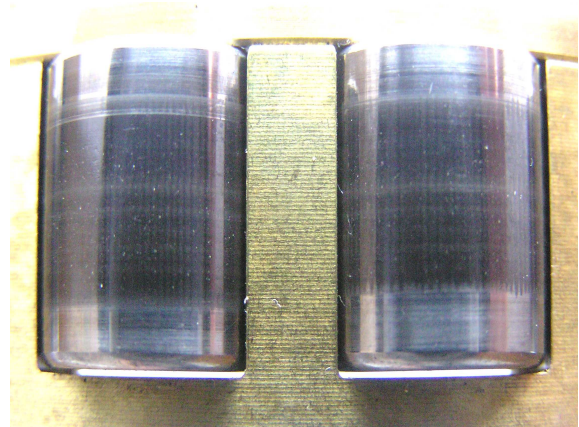
Rys. 4. Widoczne zygakowate przypalenia na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego



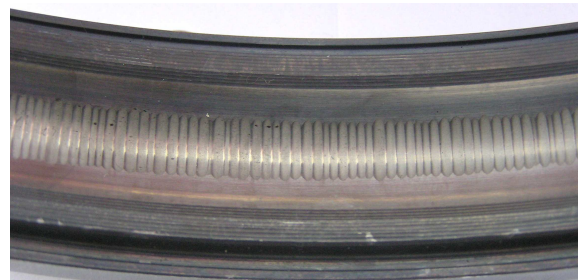
Rys. 5. Widoczne liczne małe wżery na powierzchni zewnętrznej pierścienia wewnętrznego



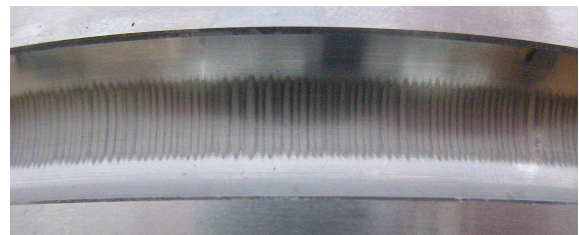
Rys. 6. Widoczne liczne małe wżery i prążki na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego



Rys. 7. Widoczne liczne małe wżery i prążki na powierzchni waleczka



Rys. 8. Widoczne prążki na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego



Rys. 9. Widoczne prążki na powierzchni zewnętrznej pierścienia wewnętrznego

#### 4. Wpływ asymetrii napięć zasilania na wartość napięć i prądów wałowych

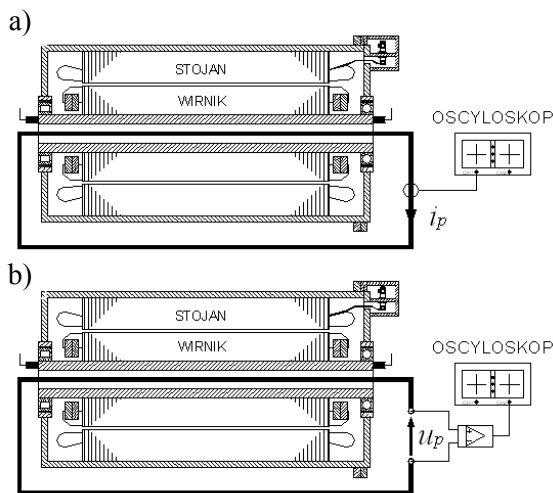
W celu określenia jaki wpływ na poziom napięć i prądów wałowych ma asymetria napięć zasilania przeprowadzono szereg pomiarów w stanie ustalonym oraz podczas rozruchu silnika. Asymetrię napięć uzyskano poprzez zmianę zaczepów w transformatorze zasilającym. Badania przeprowadzono dla następujących napięć zasilania:

- symetria napięć,
- 0, +5%, -5%,
- -5%, -5%, +5%,
- zasilanie 2-fazowe.

Podczas zasilania 2-fazowego rejestracje przeprowadzono tylko w stanie ustalonym.

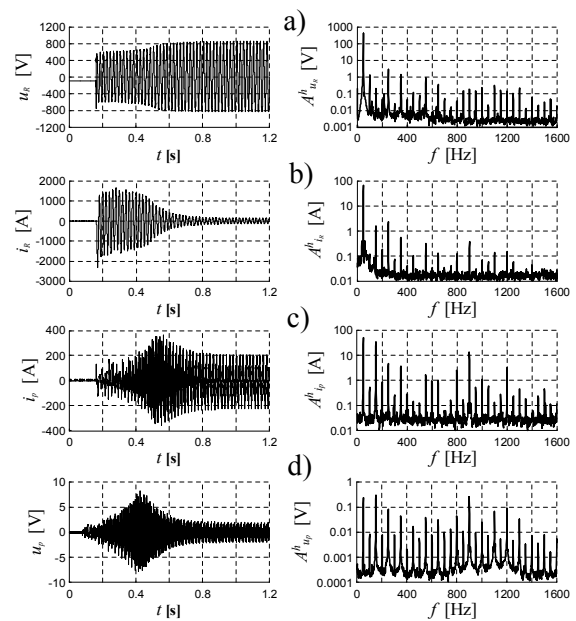
Do badań wykorzystano silnik z drążonym wałem, wewnątrz którego przeprowadzono przewód pomiarowy o przekroju  $50 \text{ mm}^2$ . Dodatkowo silnik wyposażono w izolowane łożyska.

Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 10.



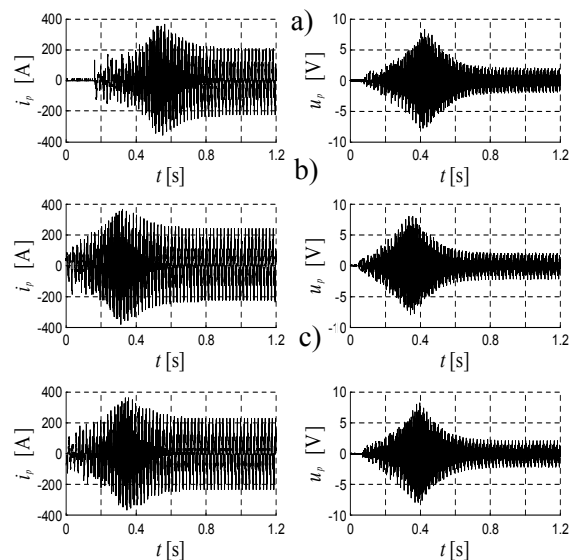
Rys. 10. Schemat układu pomiarowego

Dla każdego układu napięć zasilania, pomiary wykonano dwukrotnie. Raz mierzono napięcie na otwartym przewodzie umieszczonym wewnątrz wału silnika (rys. 10a) (napięcie to jest równe napięciu wałowemu mierzonemu na końcach wału silnika [2]), a za drugim razem przewód ten zwarto bocznikiem napięciowym i mierzono wartość prądu przepływającego tym przewodem (rys. 10b). O wartości tego prądu decyduje poziom napięcia wałowego oraz przekrój tego przewodu. W ogólnym przypadku prąd ten można porównać do prądu wałowego, płynącego w obwodzie składającym się z wału, obu łożysk i kadłuba silnika przy zwartych łożyskach. Ten sposób pomiarów pozwala uzyskać układ pomiarowy o takich samych cechach i właściwościach dla każdej serii pomiarowej. Pomiar napięcia wałowego za pomocą szczotek pomiarowych przyłożonych do końców wału silnika wnosi do przebiegów pewne zakłócenia od szczotek pomiarowych. Ma to wpływ na wynik transformaty Fouriera tych przebiegów. Na rysunku 11 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu fazowego, oraz napięcia i prądu wałowego (według zasady opisanej powyżej) oraz ich transformaty Fouriera przy symetrycznym zasilaniu.

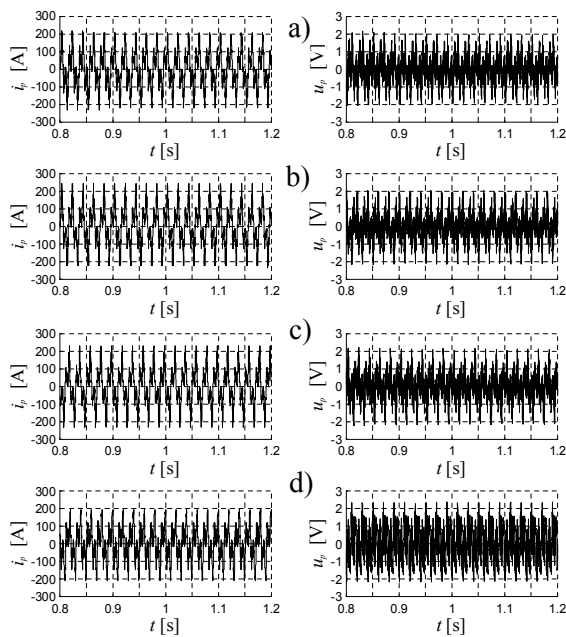


Rys. 11. Przebiegi i ich transformaty Fouriera: a) napięcie fazowe, b) prąd fazowy, c) prąd w przewodzie, d) napięcie wałowe

Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu w przewodzie przechodzącym przez wał silnika podczas rozruchu i w stanie ustalonym.

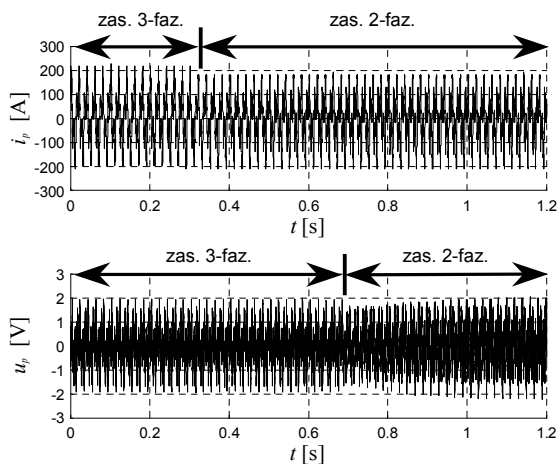


Rys. 12. Przebiegi napięć i prądów w przewodzie pomiarowym dla następujących napięć zasilania: a) symetria, b) 0, +5%, -5%, c) -5%, +5%



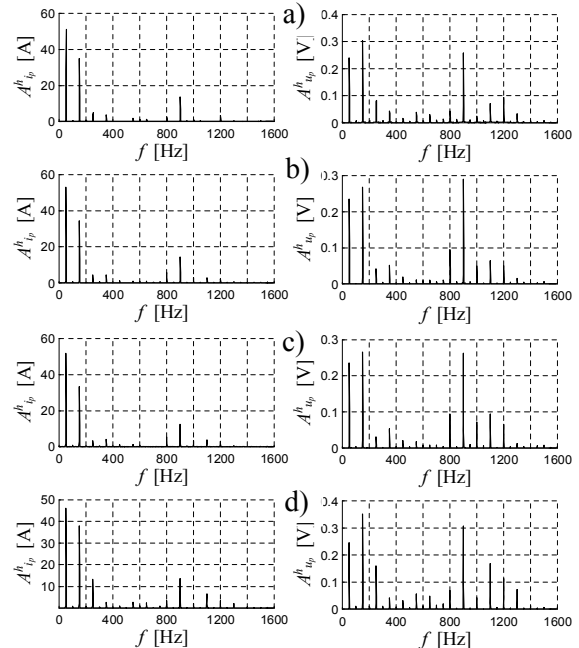
Rys. 13. Przebiegi napięć i prądów w przewodzie pomiarowym dla następujących napięć zasilania: a) symetria, b) 0, +5%, -5%, c) -5%, -5%, +5%, d) zasilanie 2-fazowe

Dodatkowo na rysunku 14 przedstawiono powyższe przebiegi zarejestrowane w chwili wyłączenia jednej fazy zasilania silnika.

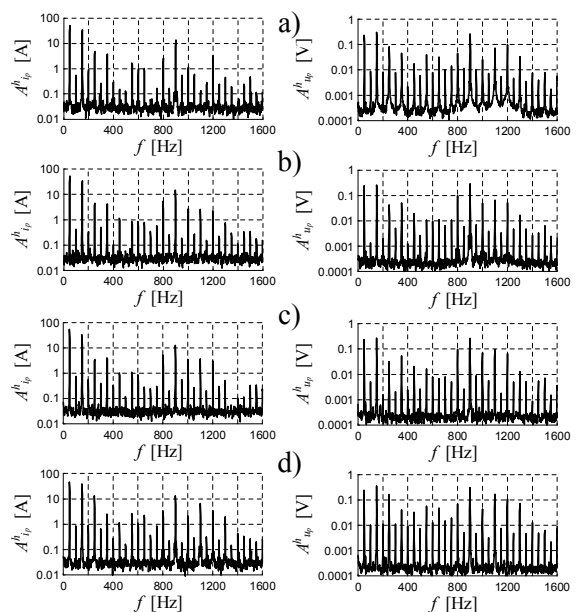


Rys. 14. Przebiegi napięć i prądów w przewodzie podczas zasilania silnika napięciem 3-fazowym i 2-fazowym

Z zarejestrowanych przebiegów ze stanów ustalonych wykonano transformaty Fouriera, a wyniki przedstawiono w skali liniowej i logarytmicznej w celu uwidocznienia prążków o małej amplitudzie (rys.15 i 16). Z otrzymanego widma harmonicznych wyodrębniono prążki o największych wartościach amplitud.



Rys. 15. Transformaty Fouriera napięć i prądów w przewodzie pomiarowym dla następujących napięć zasilania: a) symetria, b) 0, +5%, -5%, c) -5%, -5%, +5%, d) zasilanie 2-fazowe



Rys. 16. Transformaty Fouriera napięć i prądów w przewodzie pomiarowym dla następujących napięć zasilania: a) symetria, b) 0, +5%, -5%, c) -5%, -5%, +5%, d) zasilanie 2-fazowe

Porównując wyniki tych transformat z transformatami napięcia i prądu zasilania zauważa się, że we wszystkich tych przebiegach poja-

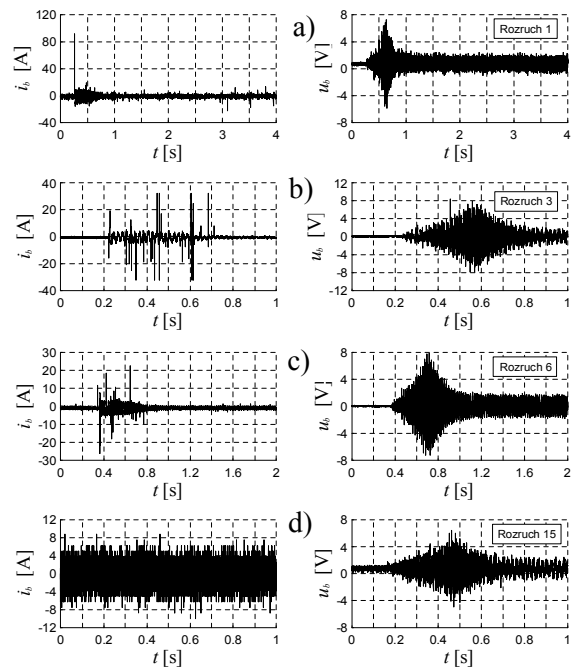
wiają się prądkami o określonej częstotliwości i znaczących wartościach amplitud. Z analizy harmonicznych widać, że dominują w niej składowe o częstotliwości 50, 150, 900, 1200 Hz. Harmoniczna 150 Hz jest prawdopodobnie wynikiem nasycenia zębów rdzenia stojana i wirnika. Harmoniczne o wyższych częstotliwościach są wynikiem żłobkowania rdzenia stojana i wirnika [6].

Przedstawione widma harmonicznych prądów i napięć uzyskano za pomocą transformacji Fouriera wykonanej dla zarejestrowanych fragmentów przebiegów w stanie ustalonym. W celu uzyskania odpowiedniej rozdzielczości osi częstotliwości, transformatę obliczono z szesnastu tysięcy próbek przebiegu. W celu wyeliminowania szumów z wyników końcowych zastosowano uśrednianie wielu transformat Fouriera, uzyskanych metodą nakładania okien czasowych w obrębie zarejestrowanego fragmentu przebiegu. Zastosowana metoda wyznaczenia widma harmonicznych może skutkować niewielkimi przekłamaniami poziomów niektórych prądków, ale pozwala w stosunkowo wiarygodny sposób, uwidoczniać prądkami o niewielkiej amplitudzie, które w wynikach poszczególnych transformacji (przed uśrednieniem), zatopione są w szumie. Wszystkie obliczenia przeprowadzono za pomocą programu opracowanego w środowisku Matlab.

## 5. Wpływ liczby rozruchów silnika na wartość prądu łożyskowego

W celu określenia jaki wpływ na wartość prądów łożyskowych mają rozruchy silnika, dokonano serii piętnastu rozruchów silnika rejestrując przebiegi napięcia i prądu fazowego oraz napięcia na łożyskach oraz prądu łożyskowego. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 17.

W celu określenia jakie mogą być przyczyny takiego spadku prądu łożyskowego dokonano pomiaru rezystancji łożysk nowych, łożysk po piętnastu rozruchach silnika oraz po 4 miesiącach pracy. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 17. Wpływ liczby rozruchów na wartość prądu łożyskowego i napięcia na łożyskach podczas: a) pierwszego rozruchu silnika, b) trzeciego rozruch, c) szóstego rozruch, d) piętnastego rozruch

Tabela 1.

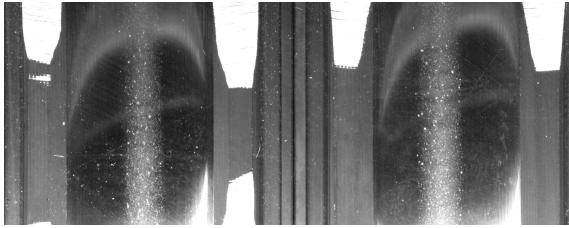
Rezystancja łożysk w zależności od czasu ich pracy

Czas pracy łożyska	Rodzaj łożyska	
	Walczkowe NU1022M1.C3 (FAG)	Kulkowe 6024.2ZR.C3.L100 (FAG)
Nowe, nie używane	0,3 mΩ	0,5 mΩ
Po 20 rozruchach	2,4 mΩ	1,85 mΩ
Po 4 miesiącach	3,3 Ω	2,8 Ω

Tak intensywny wzrost rezystancji łożysk spowodowany jest prawdopodobnie powstaniem na bieżniach łożysk warstwy tlenku (rys. 5, 6, 7, 8, 9).

Dodatkowo po wykonaniu 20 rozruchów silnika wymontowano z niego łożyska, rozcięto i poddano analizie. Okazało się, że na bieżniach łożysk widoczne są ślady występowania prądów łożyskowych (rys. 18 - 22).

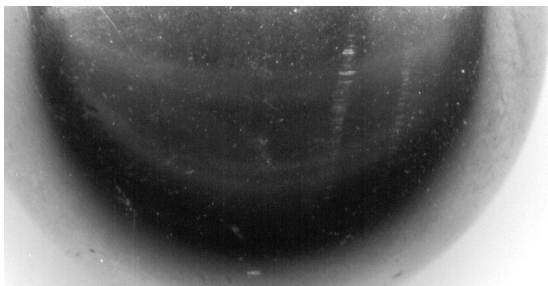




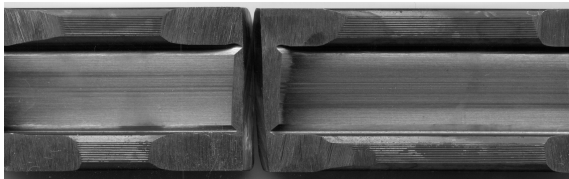
Rys. 18. Widoczne liczne małe wżery na powierzchni zewnętrznej pierścienia wewnętrznego łożyska kulkowego



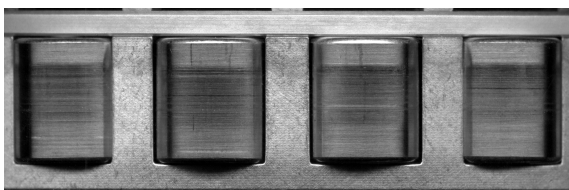
Rys. 19. Widoczne liczne małe wżery na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego łożyska kulkowego



Rys. 20. Widoczne liczne małe wżery na powierzchni kulki



Rys. 21. Widoczne liczne małe wżery i smugi obwodowe na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego łożyska wałeczkowego



Rys. 22. Widoczne liczne małe wżery i smugi obwodowe na powierzchni wałeczków łożyska wałeczkowego

## 6. Wnioski

Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań oraz opisane informacje literaturowe można z bardzo dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że zaobserwowane i przedstawione uszkodzenia łożysk spowodowane zostały przepływem prądów przez łożyska. Źródłem tych prądów jest indukowana wzdłuż wału maszyny SEM zwana napięciem wałowym. Napięcie to jest szczególnie wysokie w stanach dynamicznych silnika, głównie podczas rozruchu, po bezpośrednim załączeniu napięcia. Wartości zmierzonych napięć podczas rozruchu znacznie przekraczają wartości dopuszczalne podawane w literaturze. Po przekroczeniu napięcia przebicia filmu olejowego prąd łożyskowy silnie wzrasta, a okres pracy łożyska bardzo się skraca. Okres pracy łożysk w przypadku istnienia prądów łożyskowych zależy także bardzo silnie od gęstości prądu w miejscu przebicia filmu olejowego. Przyspieszenie zużycia łożysk spowodowane jest lokalnym wytapianiem materiału bieżni i elementów tocznych, gdy wydzielana lokalnie energia cieplna jest zbyt duża. Istotne jest badanie przebiegów napięć i prądów wałowych w stanach nieustalonych ze względu na ich wartości wielokrotnie wyższe niż w stanach ustalonych. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zaobserwowane uszkodzenia łożysk w badanym silniku są wynikiem występowania prądów łożyskowych:

- występujące regularne wgniecenia (prążki) na bieżniach pierścieni łożysk tocznych są wynikiem docisku toczących się po nich elementów tocznych. Działanie prądów łożyskowych znacząco przyspiesza ich powstawanie, na skutek zmiany struktury materiału pierścieni pod działaniem prądów łożyskowych,
- powstające zygzakowate przypalenia na bieżniach i elementach tocznych są wynikiem występujących wyładowań w łożysku pomiędzy bieżnią, a elementami tocznymi na wskutek przebicia filmu olejowego,
- występujące duże wartości prądów łożyskowych w początkowej chwili rozruchu przy zerowej prędkości obrotowej silnika powodują powstawanie bardzo nieregularnych

rozległych wzerów na bieżniach pierścieni łożysk.

Przedstawione badania laboratoryjne wykazały także, że asymetria napięć zasilania silnika nie wpływa w znaczący sposób na wartość maksymalną napięć i prądów wałowych.

### Literatura

- [1]. Donner G., Oakes B.K., Evon S.T.: *Motor Primer – Part III*. IEEE Trans On Ind. Appl., Vol. 39, No. 5, September/October 2003, pp. 1467-1474.
- [2]. Drak B., Zientek P., Niestrój R., Kwak J.: Uszkodzenia łożysk w silnikach indukcyjnych użytych w organach urabiających kombajnów górniczych. *Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne*, nr. 75/2006, ss. 137-146.
- [3]. Erdman J., Kerkman R.J., Schlegel D., Skibinski G.: *Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages*. IEEE Trans On Ind. Appl., Vol. 32, No. 2, March/April 1996, pp. 250-259.
- [4]. Gambica/Rema Technical Guide: *Motor Shaft Voltages and Bearing Currents under PWM Inverter Operation*. Technical Report No. 2 First Edition, 2002.
- [5]. Kerszenbaum I.: *Shaft currents in electric machines fed by solid-state drives*. IEEE Conference Record of the Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1992. Conference Record, Papers Presented at the 1992 Annual Meeting, 4-7 May 1992, pp. 71-79.

- [6]. Vas P.: *Sensorless vector and direct torque control*. Oxford University Press 1998.

### Autorzy

Dr hab. inż. Bronisław Drak, prof. Pol. Śl.  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych  
Politechniki Śląskiej  
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice  
tel/fax: 032-2371447  
e-mail: Bronislaw.Drak@polsl.pl

Mgr inż. Piotr Zientek  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych  
Politechniki Śląskiej  
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice  
tel: 032-2372652  
e-mail: Piotr.Zientek@polsl.pl

Mgr inż. Roman Niestrój  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych  
Politechniki Śląskiej  
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice  
tel: 032-2372526  
e-mail: Roman.Niestroj@polsl.pl

Mgr inż. Józef Kwak  
Zabrzańskie Zakłady Mechaniczne S.A.  
ul. 3-go Maja 89, 41-800 Zabrze  
tel: 032-7755301