

Piotr Zientek, Roman Niestrój, Sebastian Berhausen
Politechnika Śląska, Gliwice

PRĄDY ŁOŻYSKOWE W SILNIKACH INDUKCYJNYCH DUŻEJ MOCY ZASILANYCH NAPIĘCIEM SIECIOWYM - BADANIA LABORATORYJNE

BEARING CURRENTS IN LARGE POWER INDUCTION MOTORS SUPPLIED FROM LINE VOLTAGE – EXPERIMENTAL RESEARCH

Abstract: The paper presents results of scientific researches of large power induction motors. In chapter 2 are presented the causes of bearing currents forming supplied from line voltage. The figure 2 are presented influence rotational speed on the bearings resistance. The figure 3 are presented bearing current density versus life curve. The figure 5 are presented equivalent measurement system. In the chapter 4.2 are presented laboratory results. Figures 8 and 9 show characteristics determining influence of average bearing temperature, shaft voltage and rotational speed on bearing current. Conclusions drawn from laboratory researches are presented in chapter 5.

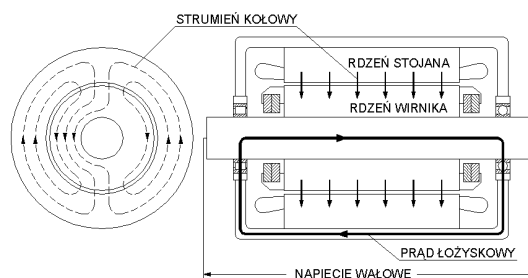
1. Wstęp

W silnikach indukcyjnych trójfazowych dużej mocy przeznaczonych do pracy w górnictwie, zasilanych napięciem sieciowym stwierdzono zbyt małą trwałość węzłów łożyskowych. Charakter uszkodzeń elementów tocznych i bieżni łożysk omawianych silników wskazuje na uszkodzenia termiczne i mechaniczne oraz na uszkodzenia będące skutkiem przepływu prądów przez łożyska. Przeprowadzone badania laboratoryjne wykazały obecność prądów łożyskowych o znacznej wartości. Wyniki badań laboratoryjnych oraz przeprowadzone oględziny uszkodzeń łożysk wykazały, że prądy te mogły być przyczyną awarii łożysk. Ich wartości są szczególnie duże w stanach dynamicznych silnika, głównie podczas jego rozruchu. Prądy płynące przez łożyska powodujące uszkodzenia elementów tocznych oraz bieżni są wywołane nadmiernymi napięciami wałowymi. Przeprowadzone badania wykazały bezpośrednią zależność pomiędzy napięciem wałowym i średnią temperaturą tarcz łożyskowych, a wartością prądu łożyskowego. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki eksperymentalnych badań laboratoryjnych prezentujących zależności pomiędzy tymi wielkościami.

2. Przyczyny powstawania prądów łożyskowych w silnikach indukcyjnych

Jedną z głównych przyczyn powstawania prądów łożyskowych jest indukowana w wale SEM zwana napięciem wałowym. Powstaje ona

wtedy, gdy istnieje zmienny strumień magnetyczny zamykający się w obwodzie wzdłuż jarzma rdzenia stojana i wirnika obejmujący wał maszyny indukcyjnej (rys. 1) [2, 4].



Rys. 1. Powstawanie prądu łożyskowego

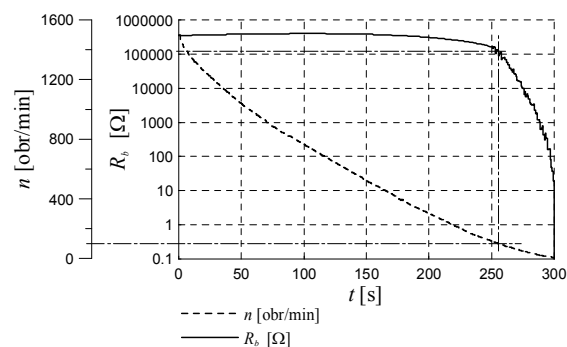
Jeżeli napięcie to spowoduje przebicie filmu olejowego w łożysku, to występuje iskrzenie pomiędzy bieżniami łożyska i elementami tocznymi. W tym to momencie pojawia się wyładowczy impuls EDM (Electrical Discharge Machining) prądu łożyskowego powodujący powstawanie wżerów na bieżniach pierścieni i elementach tocznych łożysk silnika. Podczas pracy silnika, pomiędzy bieżniami a elementami tocznymi łożyska powstaje film olejowy, którego grubość uzależniona jest od rodzaju smaru i jego temperatury oraz od sił obciążających łożysko. Według danych literaturowych [5], grubość filmu olejowego w łożyskach tocznych zawiera się w granicach od 0,2 do 2 μm . Wraz ze wzrostem temperatury łożysk grubość filmu olejowego znacznie maleje, co jest powodem zaniku wyładowań EDM prądu łożyskowego.

żyskowego przy wyższych temperaturach łożysk. Dodatkowo zabrudzenia, mikroskopijne meta-łowe cząstki w filmie olejowym i jego nieregularna grubość powodują, że film olejowy jest zwierany. W tym przypadku impedancja łożysk jest tak mała, że napięcia wałowe o niewielkich wartościach mogą powodować powstanie znacznych prądów łożyskowych przepływających przez wał, łożyska i kadłub silnika. Wartość prądu łożyskowego jest zatem uzależniona od rezystancji tych elementów. Ponieważ rezystancja wału i kadłuba silnika jest stała i przyjmuje bardzo małe wartości, zatem o wartości prądu łożyskowego głównie decyduje rezystancja łożysk. Podczas pracy silnika, na powierzchniach wewnętrznych pierścieni łożysk i na elementach tocznych powstaje warstwa tlenku, która znacznie podwyższa rezystancję pracujących łożysk w porównaniu z rezystancją łożysk nowych. Ma ona zatem znaczący wpływ na wartość powstającego prądu łożyskowego. Prąd łożyskowy przy zwartych łożyskach pozbawiony jest wyładowań EDM w filmie olejowym, a jego wartość ograniczona jest wydajnością SEM napięcia wałowego oraz rezystancją obwodu w którym płynie. Według danych literaturowych [3] dla napięć średniej częstotliwości krytyczne wartości napięcia wałowego zawierają się w granicach od 0,5 do 1 V. Można więc stwierdzić, że w silnikach indukcyjnych, w których napięcie wałowe przekracza wartość 2 V należy liczyć się z przyspieszonym zużyciem się łożysk w wyniku zjawiska elektroerozji.

3. Wpływ prędkości obrotowej silnika na rezystancję łożysk

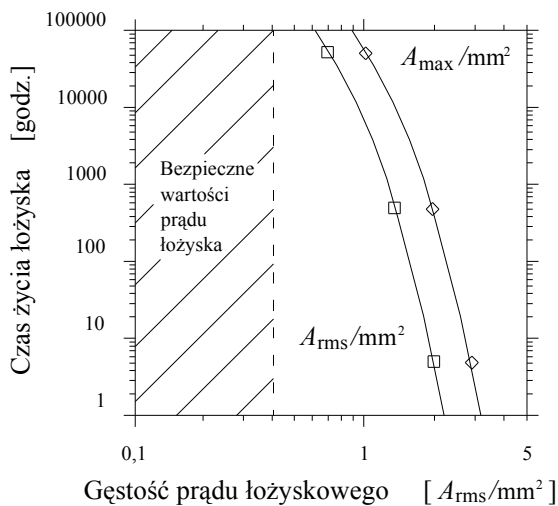
Film olejowy powstający w łożyskach silnika ma decydujący wpływ na powstawanie prądu łożyskowego. W celu określenia przy jakiej wartości prędkości obrotowej silnika zaczyna tworzyć się film olejowy dokonano jednoczesnego pomiaru rezystancji łożysk i prędkości obrotowej. Pomiar rezystancji łożysk wymaga stosowania izolowanych łożysk. W badanym silniku zastosowano izolację łożysk pomiędzy pierścieniem zewnętrznym i tarczą łożyskową. Dodatkowo do wału silnika z obu stron przytworzone zostały szczotki pomiarowe, które umożliwiają pomiar rezystancji poszczególnych łożysk podczas pracy silnika. Pomiar taki jest jednak obciążony pewnym błędem wprowadzonym przez szczotki pomiarowe. Chcąc

uniknąć tych zakłóceń można wykonać pomiar rezystancji szeregowo połączonych łożysk poprzez wał silnika, dołączając przyrząd pomiarowy do izolowanych obu pierścieni zewnętrznych. Taki sposób pomiaru rezystancji łożysk możliwy jest tylko przy odłączonym napięciu zasilania silnika. Przy załączonym napięciu zasilania w obwodzie pomiarowym indukowała by się SEM napięcia wałowego silnika, która mogła by uszkodzić przyrząd pomiarowy rezystancji. Zaletą tego układu jest jednak to, że mierzy się rzeczywistą wartość rezystancji jaka występuje w silniku pomiędzy pierścieniami zewnętrznymi obu łożysk. Powiększając tę rezystancję o rezystancję kadłuba silnika uzyskuje się rzeczywisty obwód, w którym płynie prąd łożyskowy. Analizując powyższe wady i zalety, pomiar rezystancji łożysk wykonano niskonapięciowym omomierzem podczas wybiegu silnika jako łączną sumę rezystancji obu łożysk. Przed pomiarem omomierz skalibrowano rezystorami wzorcowymi w zakresie od 1Ω do $1M\Omega$ i zdjęto jego charakterystykę przetwarzania. Pomiar rezystancji łożysk wykonano rejestrując napięcie z wyjścia omomierza. Wyniki pomiaru prędkości obrotowej silnika i rezystancji szeregowo połączonych łożysk przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wpływ prędkości obrotowej silnika na wartość rezystancji łożysk

Przy prędkości około 7 % znamionowej, rezystancja szeregowo połączonych łożysk wyniosła ponad $100\text{ k}\Omega$. Potwierdza to powstawanie filmu olejowego i opisywaną w literaturze elektryczną izolację wirnika od stojana przy obracającym się wirniku. Według danych literaturowych [1] czas „życia” łożyska w przypadku występowania prądów łożyskowych silnie zależy od gęstości prądu pomiędzy biegniami łożysk i elementami tocznymi w miejscu występowania przebicia filmu olejowego. Zależność tę przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Zależność czasu „życia” łożyska od gęstości prądu łożyskowego

Ostatecznie można stwierdzić, że czas „życia” łożyska silnie zależy od występujących wyładowań EDM w łożysku, które powodują lokalne wytapianie materiału z bieżni i z elementów tocznych łożyska.

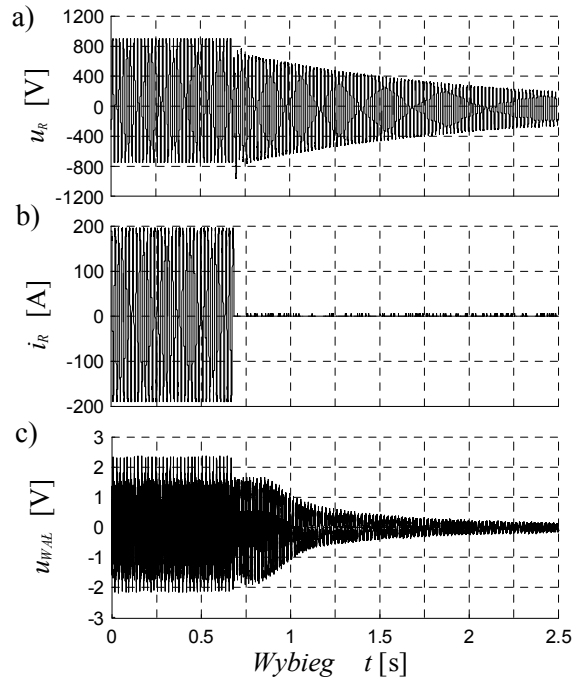
4. Pomiar prądów łożyskowych

4.1. Charakterystyka układu pomiarowego

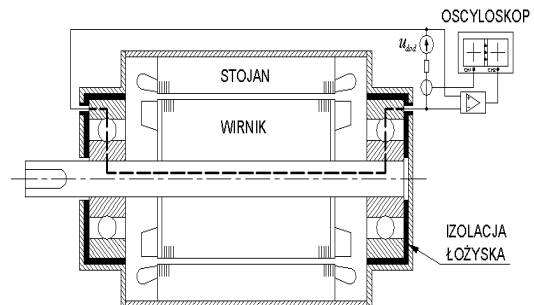
Badania laboratoryjne przeprowadzono na silniku indukcyjnym trójfazowym o mocy 300kW i napięciu znamionowym 1000 V przeznaczonym do napędu organu urabiającego w górniczych kombajnach ścianowych. W celu pomiaru napięcia i prądu wałowego płynącego przez łożyska, w silniku odizolowano oba łożyska poprzez umieszczenie pierścienia izolacyjnego pomiędzy pierścieniem zewnętrznym łożysk, a tarczami łożyskowymi silnika.

Wcześniejsze badania laboratoryjne wykazały znaczny wpływ temperatury łożysk silnika oraz napięcia wałowego na wartość prądu łożyskowego. Źródłem powstawania tych prądów jest indukowana w wale SEM zwana napięciem wałowym. Pod wpływem tego napięcia płynie prąd łożyskowy w obwodzie składającym się z wału, łożysk i kadłuba silnika. Podczas wybiegu silnika (po wyłączeniu napięcia zasilania) napięcie wałowe po kilku sekundach zanika, zatem prąd łożyskowy nie płynie (rys. 4). Wprowadzając dodatkowe napięcie zmienne u_{dod} z transformatora o dużej mocy zwarciowej do pierścieni zewnętrznych łożysk (rys. 5), można wymusić przepływ prądu łożyskowego przy odłączonym napięciu zasilania silnika (rys. 6). Moc zwarciowa transformatora decy-

duje o maksymalnej wartości prądu łożyskowego jaki występuje podczas pomiarów.

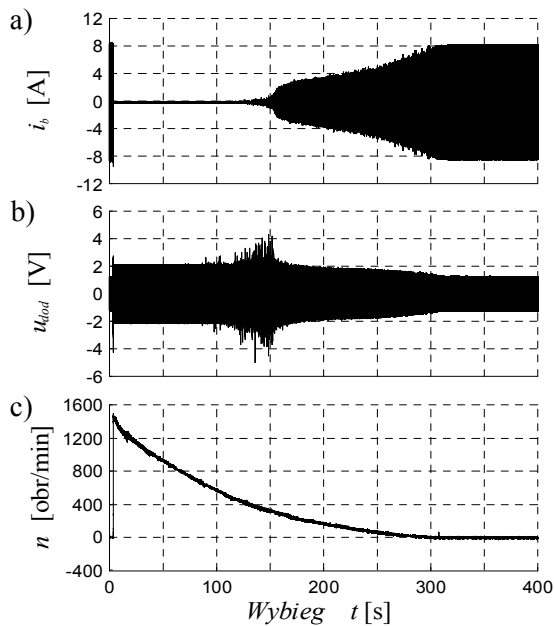


Rys. 4. Przebiegi podczas wybiegu silnika: a) napięcie fazowe, b) prąd fazowy, c) napięcie wałowe



Rys. 5. Schemat ideowy układu pomiarowego

Można zatem to napięcie dodatkowe potraktować jako napięcie wałowe z tą jednak różnicą, że w rzeczywistym układzie napięcie wałowe występuje pomiędzy pierścieniami wewnętrznymi łożysk. Napięcie to odkłada się na łożyskach silnika, a o jego podziale decydują wartości ich rezystancji. Badania laboratoryjne przeprowadzono w dwóch etapach podczas wybiegu silnika, rejestrując prędkość obrotową, prąd łożyskowy oraz napięcie dodatkowe. Dodatkowo mierzono temperaturę tarcz łożyskowych silnika. Przykładowe przebiegi przedstawiono na rysunku 6.



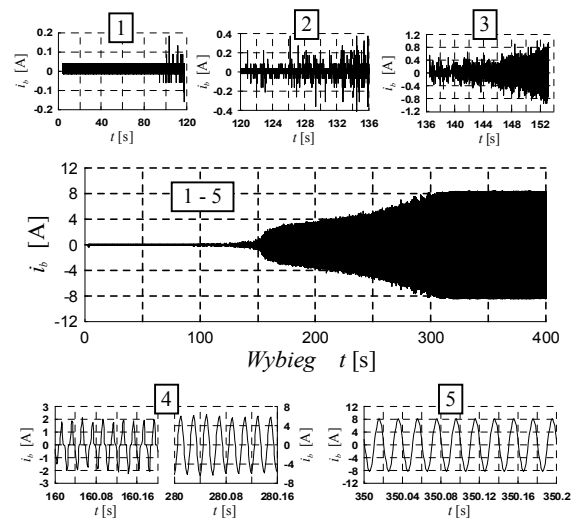
Rys. 6. Przebiegi: a) prąd łożyskowy, b) napięcie dodatkowe, c) prędkość obrotowa

Podczas pierwszej serii pomiarowej doprowadzono napięcie dodatkowe u_{dod} o wartości 1,5 V do pierścieni zewnętrznych łożysk silnika, a pomiary wykonywano dla różnych wartości temperatury łożysk silnika. Drugi etap pomiarów polegał na utrzymywaniu stałej temperatury silnika ($t=28^{\circ}\text{C}$) i wykonywaniu pomiarów dla różnej wartości napięcia dodatkowego doprowadzonego do pierścieni łożysk. Było to możliwe, ponieważ silnik ten wyposażony jest 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.

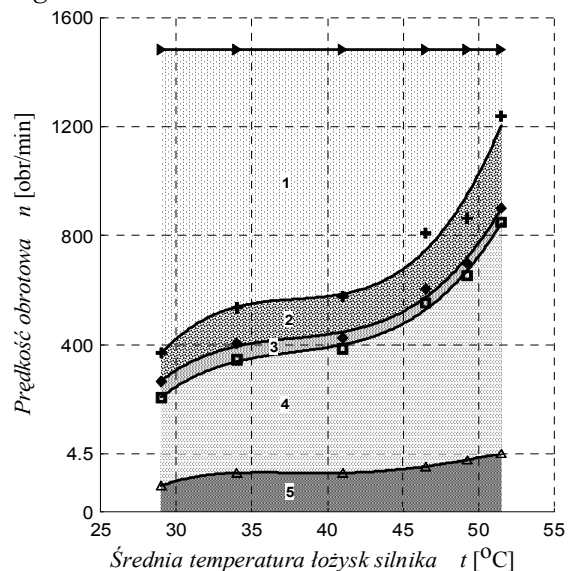
4.2. Charakterystyki prądów łożyskowych

Zarejestrowane przebiegi prądu łożyskowego podzielone zostały na 5 przedziałów, z których każdy posiada pewne cechy charakterystyczne (rys. 7). Nazwy tych przedziałów określono w ten sposób, aby określały one zachowanie się prądu łożyskowego w tych przedziałach: 1 - brak prądów łożyskowych, 2 - pojawianie się pojedynczych impulsów prądu łożyskowego, 3 - gwałtowny wzrost prądu, 4 - przechodzenie z postaci impulsowej prądu na postać sinusoidalną oraz 5 - zwarcie łożyska (rys. 7). W każdym z tych przedziałów prąd łożyskowy przyjmuje inne wartości maksymalne prądu. W pierwszym przedziale, kiedy w łożysku powstaje najgrubsza warstwa filmu olejowego,

prąd łożyskowy nie płynie. W miarę zmniejszania się prędkości obrotowej silnika, grubość filmu olejowego maleje i zaczynają pojawiać się pojedyncze impulsy prądu łożyskowego (przedział 2). Sukcesywnie prąd łożyskowy zaczyna gwałtownie rosnać (przedział 3), powodując w pewnym momencie przejście z postaci impulsowej na postać sinusoidalną (przedział 4), kiedy łożysko jest zwarte przy zerowej prędkości obrotowej silnika (przedział 5).



Rys. 7. Przedziały występowania prądu łożyskowego



- 1 - Brak prądów łożyskowych
- 2 - Pojedyncze impulsy prądu łożyskowego
- 3 - Gwałtowny wzrost prądów łożyskowych
- 4 - Przejście z postaci impulsowej na sinusoidalną
- 5 - Zwarcie łożyska

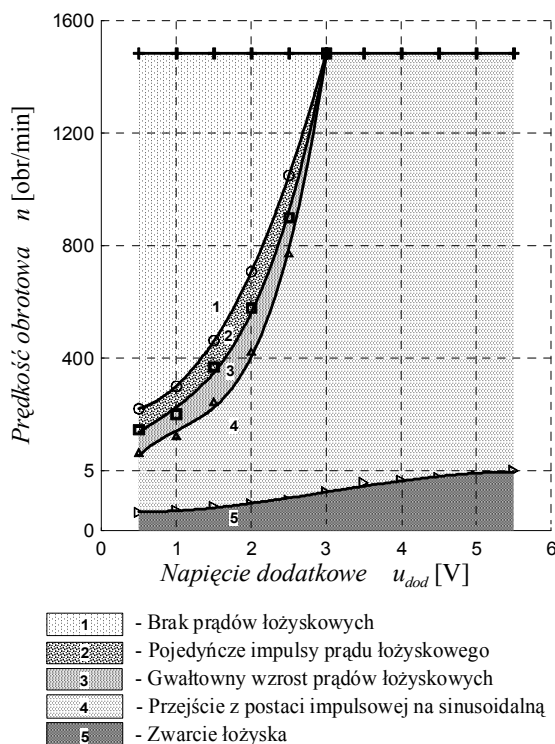
Rys. 8. Wpływ temperatury łożysk silnika na wartość prądów łożyskowych

Na rysunku 8 przedstawiono wykres warstwowy określający wpływ średniej temperatury tarcz łożyskowych silnika na wartość prądów łożyskowych, przy napięciu dodatkowym u_{dod} o wartości 1,5 V doprowadzonym do pierścieni zewnętrznych łożysk silnika. Należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem temperatury łożysk grubość filmu olejowego maleje i zjawisko to ma duży wpływ na wartość powstających prądów łożyskowych. Zakresy prądów łożyskowych występujących w poszczególnych warstwach przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.

Zakresy prądów łożyskowych występujących w poszczególnych warstwach charakterystyki

Nr. warstwy	Przedział maksymalnej wartości prądów łożyskowych [A]
1	Brak prądów łożyskowych
2	0,2 – 0,4
3	0,4 – 1,0
4	1,0 – 8,0
5	8,0



Rys. 9. Wpływ napięcia dodatkowego na wartość prądów łożyskowych

Podobny wykres przedstawiono na rysunku 9. Różnica polega jednak na tym, że podczas pomiarów utrzymywano możliwie stałą tempe-

ratuę tarcz łożyskowych silnika na poziomie $t=28\text{ }^{\circ}\text{C}$, a pomiary wykonywane były dla różnej wartości napięcia dodatkowego doprowadzonego do pierścieni łożysk. Z powyższego wykresu wynika, że przy napięciu dodatkowym przekraczającym wartość 3 V prąd łożyskowy zaczyna przechodzić z postaci impulsowej na postać sinusoidalną w całym zakresie prędkości obrotowej silnika. Zanikają pierwsze trzy obszary występowania prądów łożyskowych. Świadczy to o bardzo częstym przebiciu warstwy filmu olejowego. Łożyska zaczynają przechodzić w stan przewodzenia ciągłego.

5. Wnioski

1. Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz opisane informacje literaturowe, można z bardzo dużym prawdopodobieństwem stwierdzić, że wartość napięcia wałowego w silnikach indukcyjnych zasilanych napięciem sieciowym ma bardzo duże znaczenie na poziom występujących prądów łożyskowych.
2. Napięcia wałowe po przekroczeniu pewnej wartości mogą powodować powstawanie bardzo szkodliwych wyładowczych prądów łożyskowych EDM, znacznie ograniczających mechaniczną trwałość łożysk.
3. Amplituda powstających wyładowczych prądów łożyskowych EDM znacznie zależy od temperatury łożysk. Związane jest to ze zmniejszeniem się grubości filmu olejowego pod wpływem wzrostu temperatury łożysk. Przy wysokich temperaturach łożyska zaczynają przewodzić prąd i zmienia się charakter prądu z postaci impulsowej na postać sinusoidalną.

Literatura

- [1]. Busse D., Erdman J., Kerkman R., Schlegel D., Skibinski G.: *Characteristics of Shaft Voltage and Bearing Currents*. IEEE Industry Applications Magazine, November/December 1997, pp. 21-32.
- [2]. 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.
- [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]. Krzemień Z.: *Prądy łożyskowe powstające w silnikach indukcyjnych zasilanych z falowników PWM*. Rozprawa doktorska, Instytut elektrotechniki, Warszawa 1999.

Autorzy

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: Sebastian.Berhausen@polsl.pl

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