

Piotr Zientek, Roman Niestrój, Politechnika Śląska, Gliwice  
 Józef Kwak, KOPEX Machinery SA, Zabrze

## NAPIĘCIE WAŁOWE W SILNIKU INDUKCYJNYM DUŻEJ MOCY Z IZOLOWANĄ KLATKĄ UZWOJENIA WIRNIKA

### SHAFT VOLTAGE IN HIGH POWER INDUCTION MOTOR WITH INSULATED ROTOR CAGE

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wstępne pomiary napięć wałowych w silniku indukcyjnym dużej mocy z izolowaną klatką uzwojenia wirnika. W rozdziale 1 na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono różne rodzaje uszkodzeń łożysk badanego silnika. Rozdział 2 zawiera opis stanowiska laboratoryjnego i modernizacji wirnika badanego silnika. Na rysunkach od 8 do 15 przedstawiono zmodernizowany wirnik silnika. Wyniki badań laboratoryjnych zawarto w rozdziale 3. Na rysunku 16 przedstawiono schemat układu pomiarowego. Przebiegi czasowe napięć i prądów i ich transformaty Fouriera przedstawiono na rysunkach 17 i 18. Wnioski z badań laboratoryjnych zawarto w rozdziale 4.

**Abstract:** Initial results of shaft voltage tests in high power induction motor with insulated rotor cage are presented in the paper. Different types of bearing faults occurring in tested motor are shown in Figs. 3,4 and 5 in section 1. Descriptions of lab test stand and rotor modernization of tested motor are given in section 2. Figs. 8 to 15 show the modernized rotor. The results of lab tests are given in section 3. The test measurement scheme is shown in Fig.16. The wavecourses and their Fourier transforms are presented in Figs. 17 and 18. Conclusions drawn from lab tests are stated in section 4.

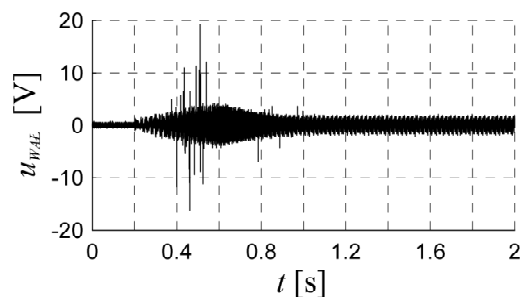
**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, prądy łożyskowe, napięcia wałowe

**Keywords:** electrical machines, bearing currents, shaft voltages

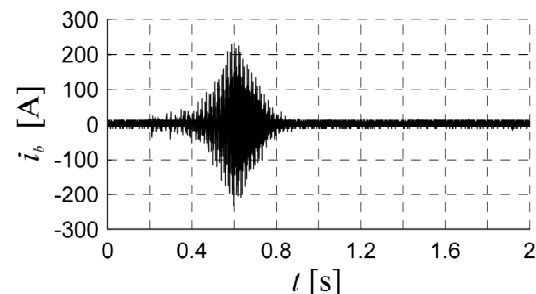
#### 1. Wstęp

W silnikach indukcyjnych trójfazowych o mocach od 200 do 630 kW i napięciach znamionowych 1000V lub 3300V przeznaczonych do napędu organów urabiających górniczych kombajnów ścianowych stwierdzono wysoki poziom napięć wałowych wywołanych bezpośrednim załączeniem zasilania silników do sieci [2]. Przedmiotowe silniki są przystosowane do takiego rozruchu i w związku z tym w kombajnach nie stosuje się urządzeń rozruchowych. Występujący wysoki poziom napięć wałowych podczas rozruchu bezpośredniego (rys. 1) jest źródłem prądów łożyskowych (rys. 2), które inicjują i silnie przyspieszają uszkodzenia węzłów łożyskowych (rys. 3, 4, 5).

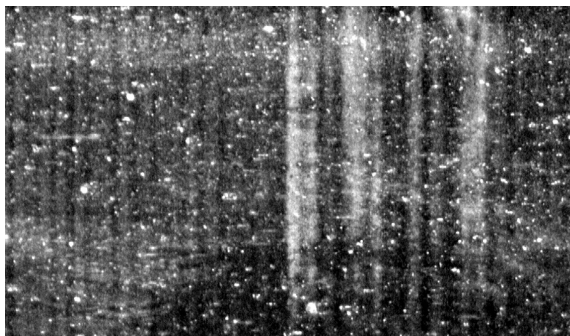
Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań naświetlają zagrożenia dla trwałości węzłów łożyskowych silnika oraz są kontynuacją i uzupełnieniem badań prowadzonych w latach ubiegłych.



Rys. 1. Przebieg napięcia wałowego w silniku indukcyjnym o mocy 300 kW, zasilanym napięciem sieciowym 1000 V



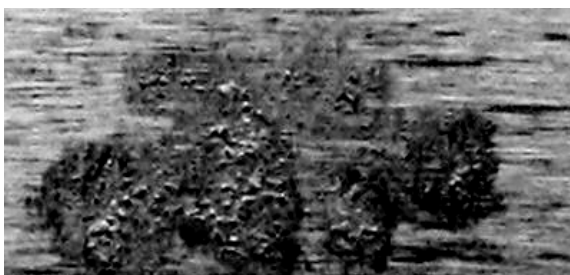
Rys. 2. Przebieg prądu łożyskowego w silniku indukcyjnym o mocy 300 kW, zasilanym napięciem sieciowym 1000 V



Rys. 3. Wżery na bieżni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego



Rys. 4. Krater i małe wżery na powierzchni wewnętrznej pierścienia wewnętrznego



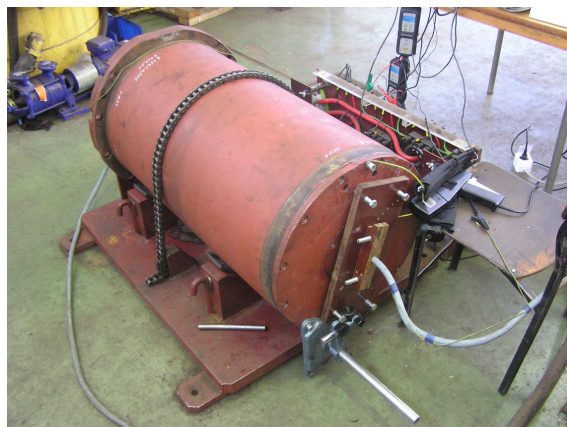
Rys. 5. Widoczny krater na powierzchni zewnętrznej pierścienia zewnętrznego

W artykule przedstawiono nowatorskie wstępne badania napięć wałowych w silniku o mocy 300 kW i napięciu 1000 V ze zmodernizowanym wirnikiem. Modernizacja polegała na wykonaniu uzwojenia wirnika z izolowaną od pakietu klatką. Zastosowanie izolacji uzwojenia klatkowego eliminuje zjawisko powstawania prądów w pakiecie blach wirnika spowodowanych zwarciami uzwojenia klatkowego do rdzenia wirnika. Opis modernizacji wirnika przedstawiono w rozdziale 2, natomiast wstępne wyniki badań w rozdziale 3.

Informacje na temat przyczyn powstawania prądów łożyskowych w maszynach indukcyjnych zostały szeroko opisane w literaturze [1, 2, 3, 4, 5].

## 2. Opis modernizacji wirnika badanego silnika indukcyjnego

Obiektem badań był silnik indukcyjny typu dSKgw315L-4 przeznaczony do napędu organów urabiających górniczych kombajnów ściennych (rys. 6).

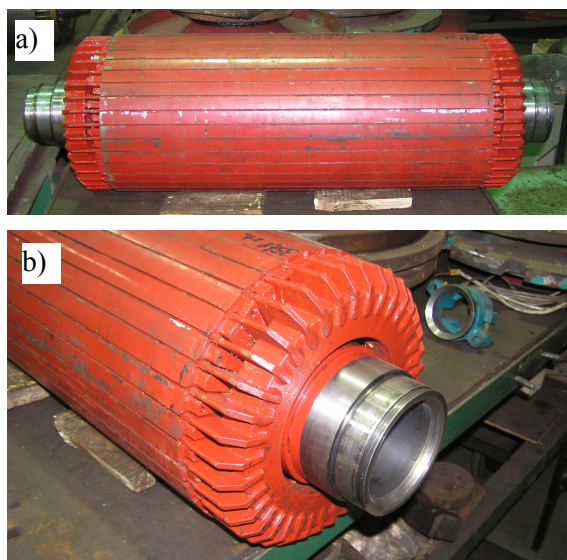


Rys. 6. Stanowisko laboratoryjne do badań prądów łożyskowych

Cechą charakterystyczną badanego silnika jest:

- zastosowanie łożyska izolowanego od strony przeciwnapędowej (podczas modernizacji),
- drażony wał przelotowy,
- rozruch poprzez bezpośrednie załączenie silnika do sieci.

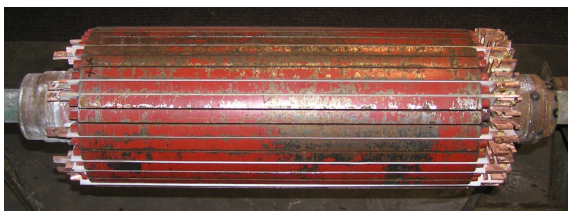
Początkowo pomiar napięć wałowych wykonano w silniku seryjnej produkcji, którego wirnik przedstawiono na rysunku 7.



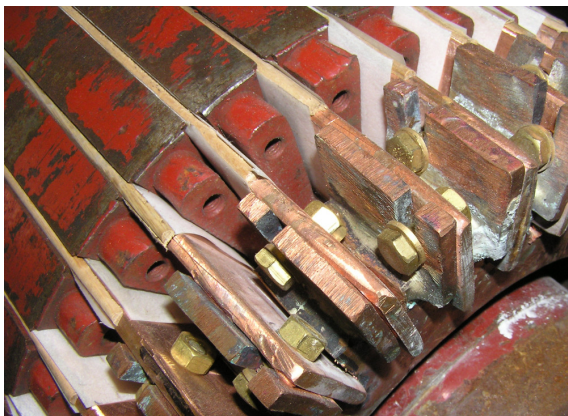
Rys. 7. Wirnik badanego silnika indukcyjnego przed modernizacją

Następnie wirnik wyjęto z silnika i poddano go modernizacji. Polegała ona na zdemontowaniu istniejącego uzwojenia klatkowego, którego

pręty są ciasno osadzone w pakiecie blach i zastąpieniu go nowym uzwojeniem. Nowe uzwojenie klatkowe wykonano w ten sposób, że poszczególne pręty uzwojenia wirnika odizolowano od pakietu blach izolacją wykonaną z NEN-u o temperaturze pracy ciągłej równej 180 °C. Izolacja ta składa się z NOMEX-u (0,05 lub 0,08 mm) oraz folii MYLAR. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wirnik w trakcie modernizacji z widoczną izolacją w poszczególnych żłobkach pakietu wirnika. Izolacja ta umożliwiła uzyskanie rezystancji izolacji uzwojenia klatkowego w stosunku do pakietu blach na poziomie  $R_{60} = 50 \text{ M}\Omega$ .



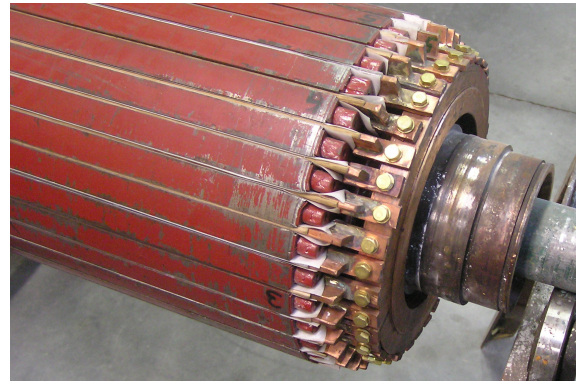
Rys. 8. Wirnik badanego silnika indukcyjnego w trakcie modernizacji



Rys. 9. Widoczne pręty owinięte izolacją NEN w poszczególnych żłobkach pakietu wirnika

Ze względu na to, że żłobki pakietu wirnika nie są w pełni otwarte, zaistniała konieczność zaprojektowania odpowiedniego sposobu montażu prętów do pierścieni zwierających. Ze względu na zastosowaną izolację w żłobkach nie było możliwości lutowania prętów do pierścieni zwierających. W początkowej fazie prac modernizacyjnych podjęto taką próbę. Okazało się jednak, że wysoka temperatura podczas lutowania (konieczna do podgrzania pierścieni zwierających) spowodowała nadpalenie zastosowanej izolacji z NEN-u. Zaistniała zatem konieczność zastosowania innych rozwiązań do przymocowania prętów z pierścieniami. Zarówno od strony napędowej jak i od strony przeciwnapędowej każdy pręt klatki wirnika

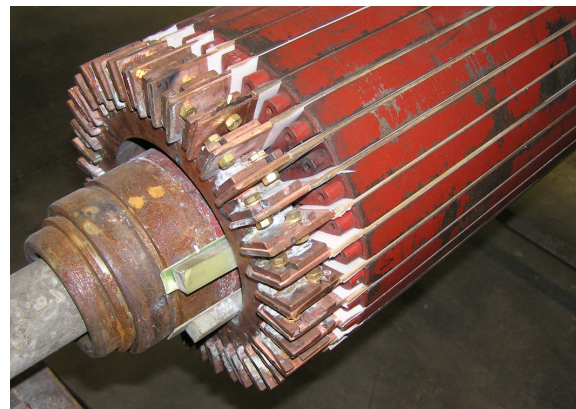
połączono z odpowiednim pierścieniem zwierającym za pomocą śrub. Połączenia takie w łatwy sposób można demontować. Sposób połączenia prętów z pierścieniem zwierającym od strony przeciwnapędowej przedstawiono na rysunkach 10 i 11, natomiast sposób ich zamocowania od strony napędowej na rysunkach 12 i 13.



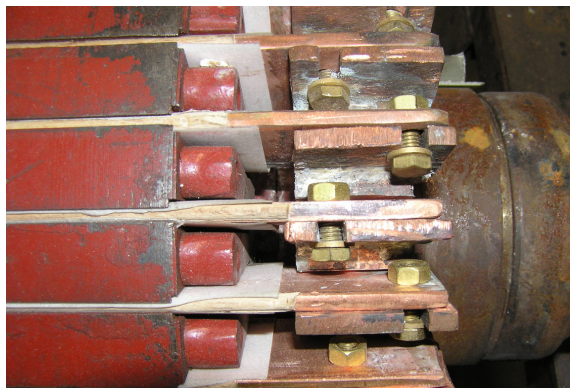
Rys. 10. Sposób podłączenia prętów do pierścienia zwierającego od strony przeciwnapędowej silnika



Rys. 11. Sposób podłączenia prętów do pierścienia zwierającego od strony przeciwnapędowej silnika

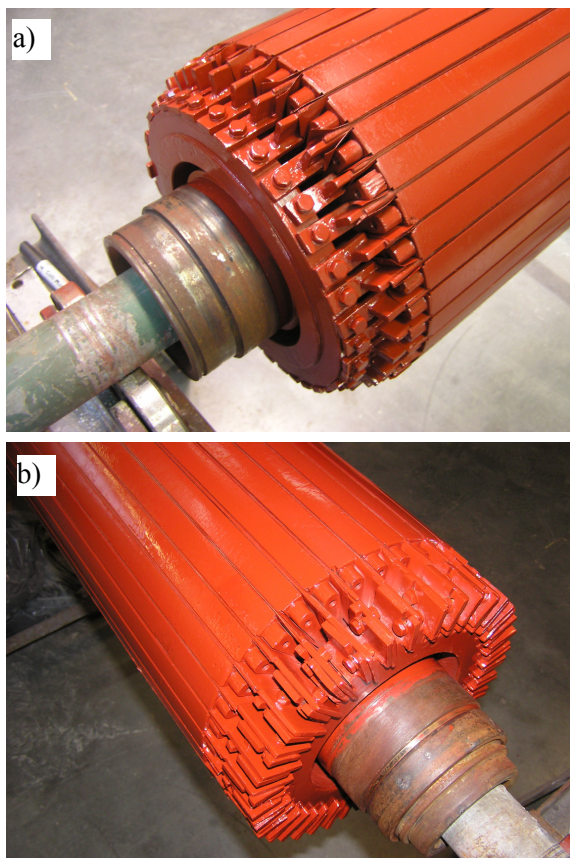


Rys. 12. Sposób podłączenia prętów do pierścienia zwierającego od strony napędowej silnika



Rys. 13. Sposób podłączenia prętów do pierścienia zwierającego od strony napędowej silnika

Taka konstrukcja klatki umożliwia wykonanie przerw w poszczególnych prętach wirnika, poprzez odkręcenie śrub mocujących i wykorzystanie silnika do innych badań diagnostycznych. W końcowym etapie modernizacji wirnik pomalowano lakierem elektroizolacyjnym (rys. 14, 15).



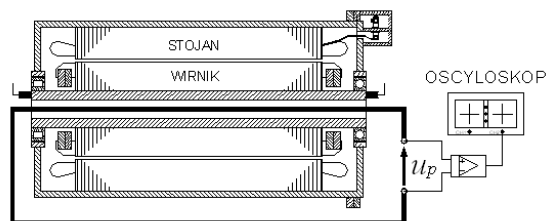
Rys. 14. Wirnik badanego silnika indukcyjnego po modernizacji



Rys. 15. Wirnik badanego silnika indukcyjnego po modernizacji

### 3. Badania laboratoryjne

Do pomiaru napięcia wałowego wykorzystano tą cechę silnika, że posiada drażony wał i izolowane łożysko od strony przeciwnapędowej. Wewnątrz drażonego wału przeprowadzono przewód pomiarowy do pomiaru napięcia wałowego [2]. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 16.

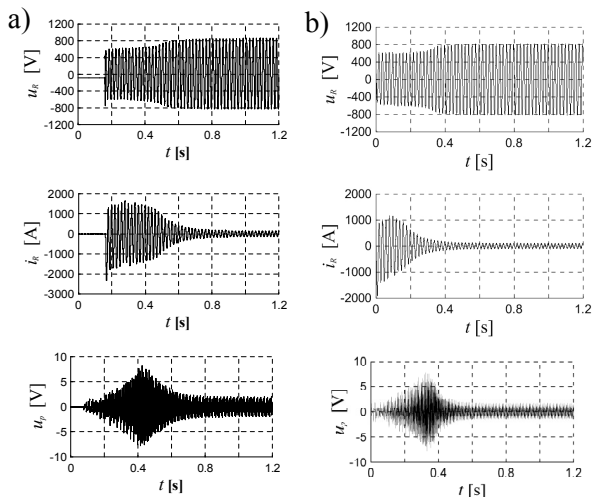


Rys. 16. Schemat układu pomiarowego

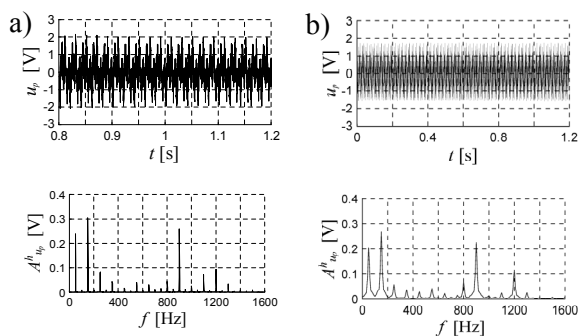
Taki sposób pomiaru napięcia wałowego jest pozbawiony zakłóceń od szczotek pomiarowych. Ma to korzystny wpływ na wynik transformaty Fouriera tych przebiegów.

Jako urządzenie rejestrujące zastosowano oscyloskop cyfrowy DPO typu DPO3034 firmy Tektonix wraz z sondami prądowymi TCP0030 (włączanymi w obwody wtórne przekładników prądowych) i sondami napięciowymi P5205. Do zasilania wszystkich urządzeń rejestrujących użyto transformatora separacyjnego z filtrem przeciwzakłóceniovym.

Na rysunku 17 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu fazowego, oraz napięcia wałowego podczas rozruchu silnika i w stanie ustalonym. Dodatkowo z napięcia wałowego w stanie ustalonym obliczono transformatę Fouriera (rys. 18).



Rys. 17. Przebieg napięcia fazowego, prądu fazowego i napięcia w przewodzie pomiarowym dla wirnika standardowego –a) oraz dla wirnika zmodernizowanego –b)



Rys. 18. Przebiegi napięcia w przewodzie pomiarowym dla wirnika standardowego –a) oraz dla wirnika zmodernizowanego –b)

Z analizy harmoniczných 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.

Przedstawione widma harmoniczných 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 kilkunastu 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 harmoniczných może

skutkować niewielkimi przekłamaniami poziomów niektórych prążków, ale pozwala w stosunkowo wiarygodny sposób, uwidocznic prążki o niewielkiej amplitudzie, które w wynikach poszczególnych transformacji (przed uśrednieniem), zatopione są w szumie. Wszystkie obliczenia przeprowadzono za pomocą programu opracowanego w środowisku Matlab.

#### 4. 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 czas pracy łożyska znacznie się skraca.

Przedstawione wstępne nowatorskie badania laboratoryjne pomiaru napięć wałowych wykazały, że zastosowanie izolowanego od pakietu blach uzwojenia klatkowego wirnika nie wpływa w znaczący sposób na wartość napięć wałowych, zarówno podczas rozruchu silnika jak i w stanie ustalonym.

Prądy spowodowane zwarcie uzwojenia klatkowego do pakietu blach nie zmieniają rozkładu pola elektromagnetycznego w wirniku w sposób, który mógłby wpłynąć na wartość powstających napięć wałowych. Różnice w wynikach transformacji Fouriera na rysunku 18 (w widocznym przecieku widmowym) są spowodowane innym doбором parametrów rejestracji sygnałów pomiarowych. Nie wynikają one ze zmiany konstrukcji wirnika.

#### 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., Nistrój R., Kwak J.: Uszkodzenia łożysk w silnikach indukcyjnych użytych w organach urabiających kombajnów górniczych. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 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.

### **Autorzy**

dr inż. Piotr Zientek  
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny  
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie

ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice  
tel: 032-2371885  
e-mail: Piotr.Zientek@polsl.pl

dr inż. Roman Niestrój  
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie  
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice  
tel: 032-2372526  
e-mail: Roman.Niestroj@polsl.pl

mgr inż. Józef Kwak  
KOPEX Machinery S.A.  
ul. 3-go Maja 89, 41-800 Zabrze  
tel.: 032-7755301