

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

ANALIZA USZKODZEŃ ŁOŻYSK SPOWODOWANYCH PRĄDAMI ŁOŻYSKOWYMI

THE ANALYSIS OF BEARING DAMAGE CAUSED BEARING CURRENTS

Abstract: The negative influence of bearing currents on the durability of rolling bearings in the alternating current electric motors are shown. The reasons of bearing current formation in electric motors are given. Examples of bearing races damages of cooperating rolling bearing elements are presented. Analysis of dents distribution in the roller, roll-neck and ball bearing races are made. Conclusions drawn from laboratory researches are presented in chapter 6.

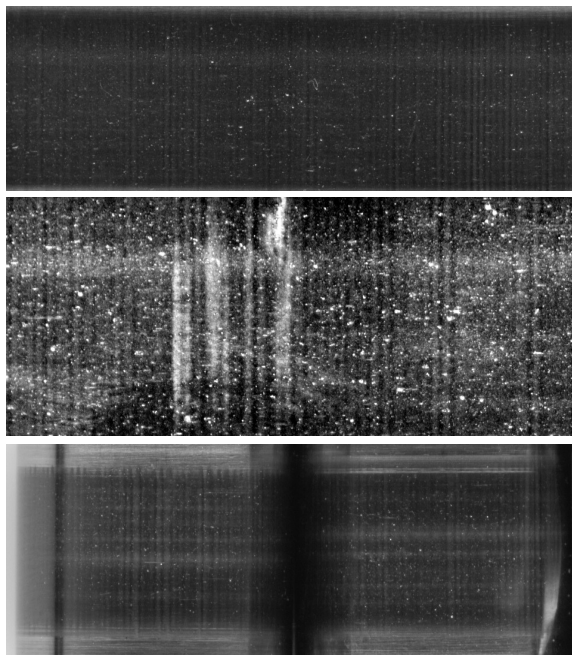
1. Wstęp

Analiza historii eksploatacji silników indukcyjnych, a w szczególności silników dużej mocy pracujących w napędach potrzeb własnych elektrowni zawodowych i elektrociepłowni oraz silników wykorzystywanych w organach urabiających i w napędach jezdnych górniczych kombajnów ścianowych wskazuje, że coraz częściej wymagana jest wymiana łożysk tocznych w tych silnikach. Charakter występujących w nich uszkodzeń bardzo często wskazuje na występowanie prądów łożyskowych [1, 2, 3]. Uszkodzenia łożysk tocznych coraz częściej występują z chwilą zastosowania zasilania silników z falowników PWM. Spowodowało to, że zagadnienie prądów łożyskowych w silnikach indukcyjnych jest problemem aktualnym. Należy jednocześnie zaznaczyć, że awarie silników spowodowane uszkodzeniami łożysk tocznych nie występują tak często. Wynika to z faktu, że od szeregu lat rozwinęła się nowoczesna technika badań łożysk tocznych, dzięki której dokonywana jest wymiana łożysk na nowe, przed ostatecznym zniszczeniem łożyska, które prowadzi do awarii silnika (zarówno wirnika jak i stojana). Charakter występujących uszkodzeń łożysk tocznych pod wpływem prądów łożyskowych uzależniony jest od rodzaju zasilania silników indukcyjnych. Zarówno zasilanie silników napięciem sieciowym, jak również z falowników PWM powoduje powstanie takich zmian na bieżniach i elementach tocznych łożysk, które wymagają wyłączenia silnika i wymianę łożysk na nowe. Jedynie dokładna analiza tych uszkodzeń pozwala stwierdzić z jakiego źródła zasilany był silnik [33].

2. Uszkodzenia łożysk tocznych w silnikach indukcyjnych dużej mocy zasilanych napięciem sieciowym

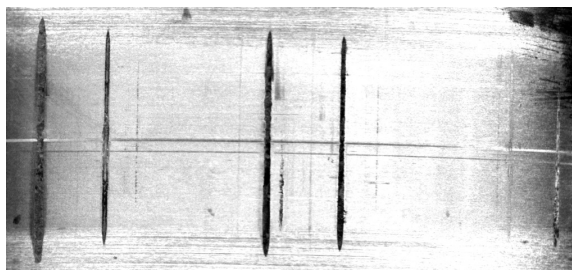
W silnikach indukcyjnych zasilanych sinusoidalnym napięciem sieciowym, źródłem prądów łożyskowych jest indukowana wzdłuż wału maszyny SEM, zwana napięciem wałowym. Pod wpływem tego napięcia płyną prądy łożyskowe w obwodzie złożonym z wału maszyny, obu łożysk i kadłuba silnika. W prawidłowo pracującym łożysku tocznym występuje warstwa oleju (film olejowy) pomiędzy bieżniami pierścieni łożysk i elementami tocznymi w czasie obrotów łożyska. Napięcie łożyskowe może spowodować przebicie tego filmu i przeskok iskry między pierścieniami i elementami tocznymi, która wywołuje miejscowe wżery na powierzchniach bieżni pierścieni oraz na elementach tocznych. W wyniku tych przebieg, powierzchnie bieżni pierścieni i elementów tocznych są pokryte gęstą siatką różnie rozłożonych wżerów elektrycznych (rys.1).

W początkowej chwili rozruchu silnika, przy zerowej prędkości obrotowej, występuje styk metaliczny między bieżniami łożysk i kilkoma elementami tocznymi. Wtedy impedancja łożysk przyjmuje bardzo małe wartości. Skutkiem tego, w początkowej chwili rozruchu (kiedy nie wytworzyła się jeszcze warstwa filmu olejowego) w łożyskach płyną bardzo duże wartości prądów łożyskowych powodujące wżery na bieżniach łożysk.

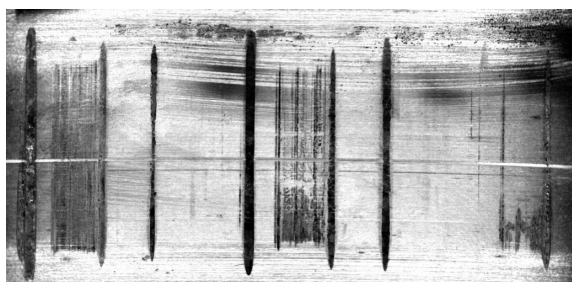


Rys. 1. Wżery: a) na bieżni zewnętrznej pierścienia wewnętrznego, b) na bieżni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego, c) na powierzchniach walczków

W łożyskach walcowych najczęściej są to wżery wzdłuż linii styku walczków z bieżnią pierścienia (rys. 2 i 3). Ze zdjęć przedstawionych na rysunku wynika, że wżery te wystąpiły przy dwóch (rys. 2) oraz trzech rozruchach silnika (rys. 3), przy różnych początkowych położeniach obwodowych walczków jednocześnie stykających się z pierścieniami.



Rys. 2. Wżery liniowe na bieżni pierścienia łożyska walcowego po dwóch rozruchach

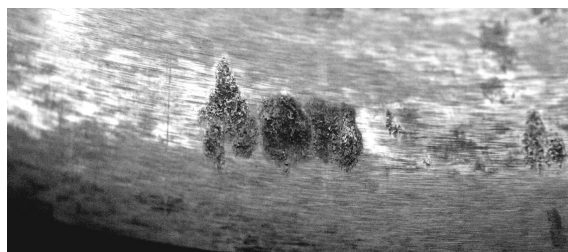


Rys. 3. Wżery liniowe na bieżni pierścienia łożyska walcowego po trzech rozruchach

W pierwszych chwilach rozruchu silnika powstają także bardzo nieregularne rozległe wżery na bieżniach pierścieni łożysk, przedstawione na rysunkach 4 i 5. Na rysunku 4 widoczne są także regularnie rozłożone prążki na fragmencie powierzchni wewnętrznej bieżni pierścienia zewnętrznego.

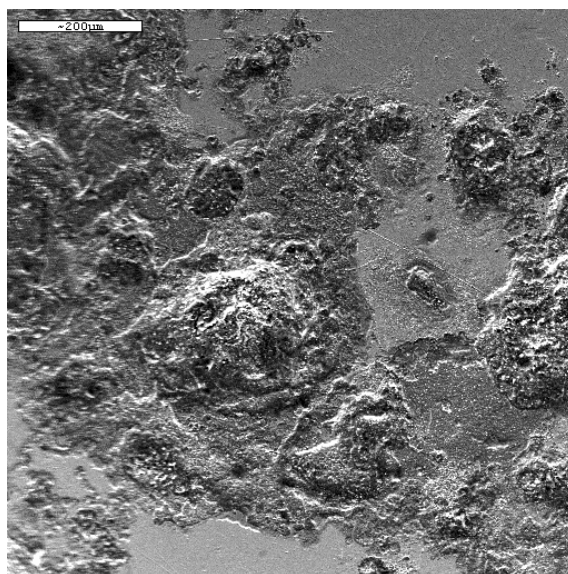


Rys. 4. Nieregularne wżery na bieżni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego oraz dodatkowo widoczne regularne prążki



Rys. 5. Nieregularne wżery na bieżni zewnętrznej pierścienia wewnętrznego

Kształt wżerów jest różny, tak na powierzchniach pierścieni łożyska jak i elementach tocznych. Na rysunku 6 przedstawiono wżer na powierzchni kulki, powiększony za pomocą mikroskopu skaningowego.

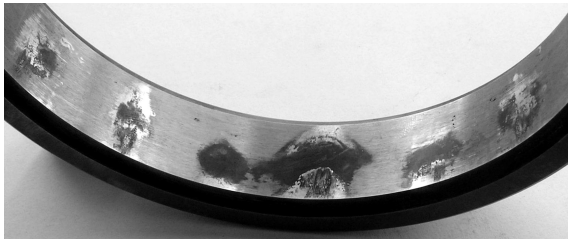


Rys. 6. Powiększony wżer na kulce łożyska tocznego

W momencie przepływu prądu, materiał łożyska jest podgrzewany do temperatury odpuszczania, a czasem nawet do temperatury jego topnienia. Prowadzi to do powstania przebarwionych powierzchni, różnych co do wielkości, na których materiał jest odpuszczany i ponownie hartowany lub stąpiany. W miejscach, w których metal został stopiony powstają kraterki różnych kształtów i różnej wielkości. Wżery takie mogą powstać także w miejscach styku czopa wału silnika z łożyskiem (rys. 7, 8, 9) lub na powierzchni zewnętrznej pierścienia zewnętrznego łożyska tocznego (rys. 10).



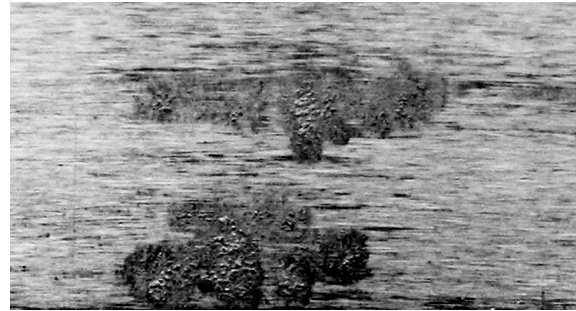
Rys. 7. Uszkodzenie czopa wału spowodowane przepływem prądu przez łożysko



Rys. 8. Widoczne kraterki na powierzchni wewnętrznej pierścienia wewnętrznego

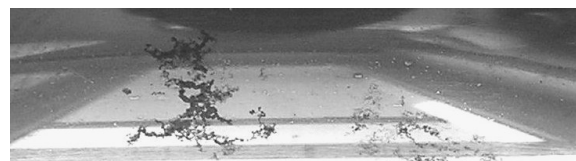


Rys. 9. Widoczny krater i małe wżery na powierzchni wewnętrznej pierścienia wewnętrznego



Rys. 10. Widoczny krater na powierzchni zewnętrznej pierścienia zewnętrznego

W przypadku gdy w początkowej chwili rozruchu silnika występują bardzo duże prądy łożyskowe, wówczas z chwilą tworzenia się filmu olejowego dochodzi do przerwania obwodu dla prądów łożyskowych i następuje przeskok iskry pomiędzy elementami tocznymi i bieżniami łożyska, co prowadzi do charakterystycznych uszkodzeń przedstawionych na rysunku 11 i 12.

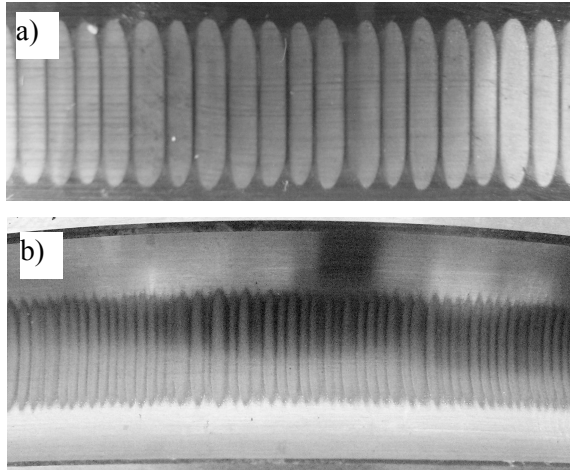


Rys. 11. Widoczne zygzakowate przypalenia: a) na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego, b) na powierzchni zewnętrznej pierścienia wewnętrznego



Rys. 12. Widoczne zygzakowate przypalenia na powierzchni kulki

Bardzo często pojawiają się także uszkodzenia łożysk w postaci widocznych regularnych prążków bez widocznych śladów występowania prądów łożyskowych (rys. 13).

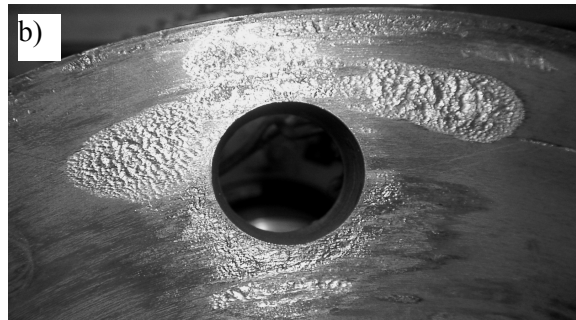
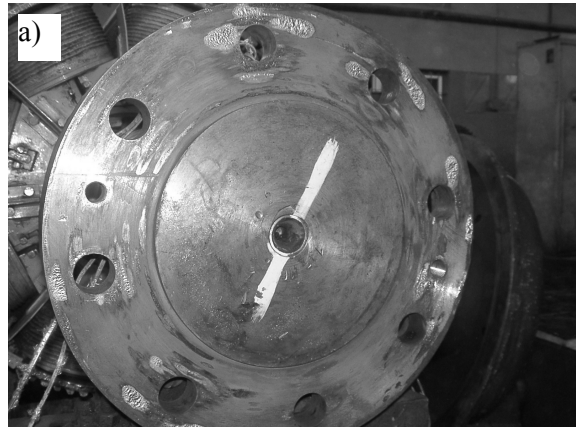


Rys. 13. Widoczne prążki: a) na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego, b) na powierzchni zewnętrznej pierścienia wewnętrznego

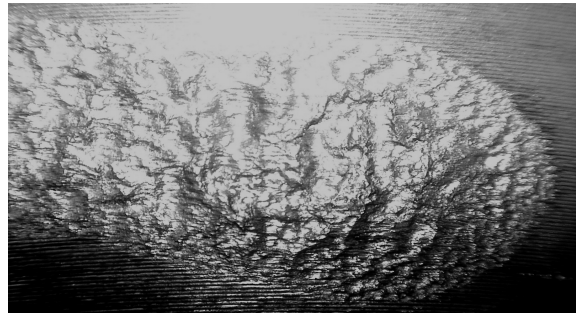
Cechą prążków spowodowanych przepływem prądu jest ich ciemna podstawa (rys. 2 i 3), w przeciwieństwie do błyszczącego lub rdzawego wyglądu prążków powstałych w wyniku drgań (rys. 13). Bardzo często prądy łożyskowe powodują uszkodzenia nie tylko łożysk silników, lecz także sprzęgieł łączących dwie maszyny (rys. 14, 15). Związane jest to ze zmianą drogi przepływu prądu łożyskowego. W zależności od budowy zespołu maszynowego i użytej architektury połączeń (przewody zasilające, uziemienia i inne metalowe połączenia), prądy łożyskowe mogą nie zamykać się w jednej maszynie. Płyną wtedy poprzez wał i przewodzące sprzęgło do drugiej maszyny, gdzie przepływając przez łożysko do masy z powrotem płyną do pierwszej maszyny, gdzie też przepływają przez łożysko z powrotem do wału silnika.

Przedstawione na rysunkach 14 i 15 uszkodzenia sprzęgła wskazują na fakt przepływu prądu wałowego o bardzo dużej wartości.

Opisane w tym rozdziale rodzaje uszkodzeń spowodowane występowaniem prądów łożyskowych mogą stanowić poważne zagrożenie w pracy silnika, następstwem czego może być poważna jego awaria.



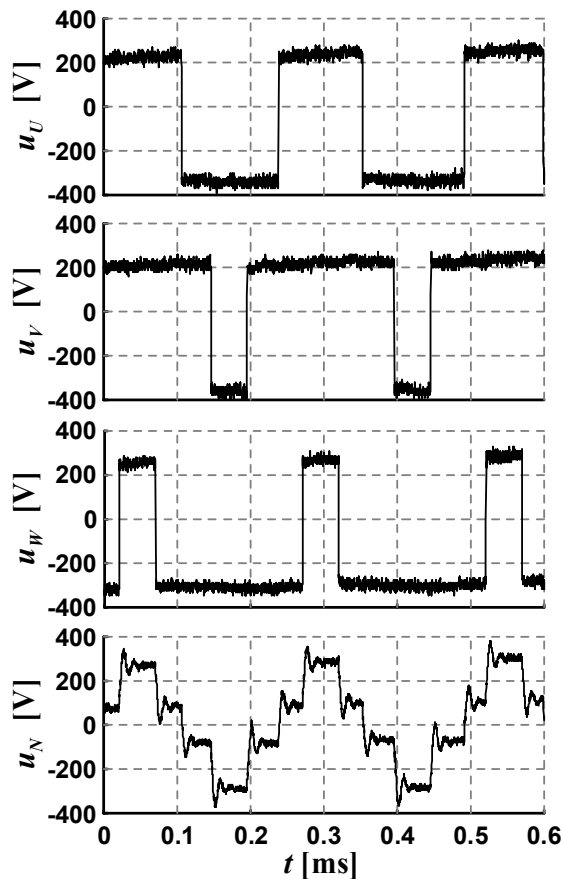
Rys. 14. Widoczne wżery i duże kratery na powierzchni sprzęgła – a, b)



Rys. 15. Widoczny nieregularny krater na powierzchni sprzęgła

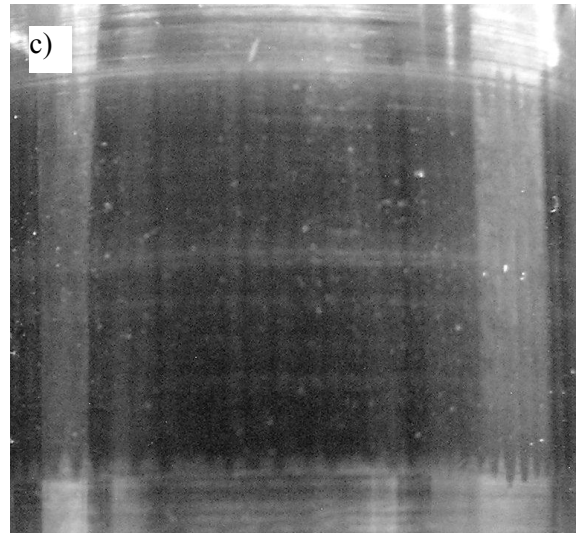
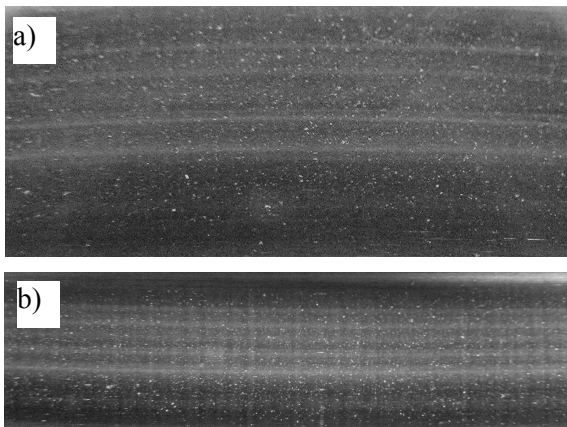
3. Uszkodzenia łożysk tocznych w silnikach indukcyjnych zasilanych z przełączników częstotliwości

W układach napędowych z przemiennikami częstotliwości występują duże częstotliwości sterowania zaworami falownika oraz duże stromości wyjściowych napięciowych impulsów falownika. W związku z tym w analizie powstawania prądów łożyskowych należy uwzględnić pojemności naturalne (wewnętrzne) występujące w silniku indukcyjnym. Występują one pomiędzy kadłubem silnika, uzwojeniem stojana i wirnikiem. W punkcie neutralnym uzwojenia stojana występuje napięcie o kształcie krzywej schodkowej, zwane napięciem nieznaczności (rys. 16).



Rys. 16. Powstawanie napięcia niezrównoważenia

Napięcie to przenosi się na elementy konstrukcyjne silnika powodując ładowanie pojemności widzianej od strony łożyska. W wyniku przekroczenia wartości progowej napięcia przebicia cienkiej warstwy filmu olejowego w łożysku, następuje rozładowanie pojemności pasożytniczej widzianej od strony łożyska, wynikiem tego są powstające wyładowcze prądy łożyskowe EDM (ang.: Electrical Discharge Machining). Prądy te powodują powstanie małych wżerów na bieżniach łożysk i elementach tocnych łożyska (rys. 17, 18, 19).



Rys. 17. Widoczne liczne małe wżery: a) na powierzchni zewnętrznej pierścienia wewnętrznego, b) na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego, c) na powierzchni wałeczka



Rys. 18. Widoczne liczne małe wżery na powierzchni wewnętrznej pierścienia zewnętrznego



Rys. 19. Widoczne liczne małe wżery na powierzchni zewnętrznej pierścienia wewnętrznego

Dodatkowo w przypadku, gdy wystąpią odpowiednie warunki podczas pracy silnika, mogą powstać na powierzchniach pierścieni oraz na wałeczkach łożyska charakterystyczne wgłębienia w postaci prążków (rys. 17 b, c). Charakter uszkodzeń łożysk jest podobny, jak w przypadku zasilania silników napięciem

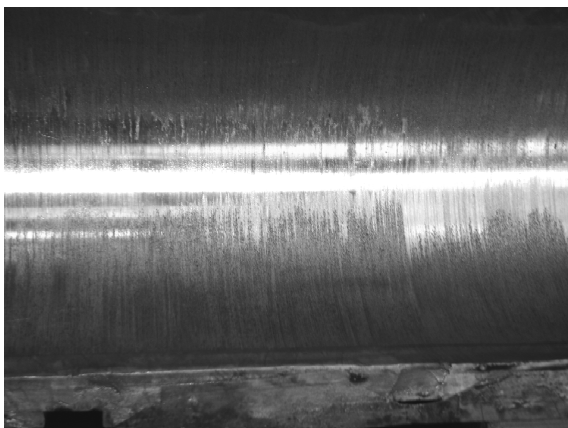
sieciowym, jednak w silnikach indukcyjnych zasilanych z falowników PWM na bieżniach łożysk i elementach tocznych pojawia się znacznie więcej małych wżerów. Jest to związane ze zjawiskiem powstawania wyładowań w łożysku, które przy tym rodzaju zasilania występuje znacznie częściej. Cechą charakterystyczną jest brak uszkodzeń bieżni łożysk (i elementów tocznych) w postaci widocznych gołym okiem kraterów (rys. 4 – 12), powstałych w wyniku przepływu znacznej wartości prądu łożyskowego.

4. Uszkodzenia łożysk ślizgowych w maszynach synchronicznych

W generatorach synchronicznych standardowo wykonuje się izolację kilku koźłów łożyskowych od płyty fundamentowej, celem przerwania obwodu dla prądów łożyskowych. Jeśli łożyska nie są dobrze izolowane i wał nie jest uziemiony, to prądy te bardzo szybko i skutecznie niszczą łożyska, powodując elektroerozję (iskrowe wytapianie materiału) zarówno czopów wałów (rys. 20), jak i panewek (rys. 21).



Rys. 20. Widoczne elektrowżery na czopie wału

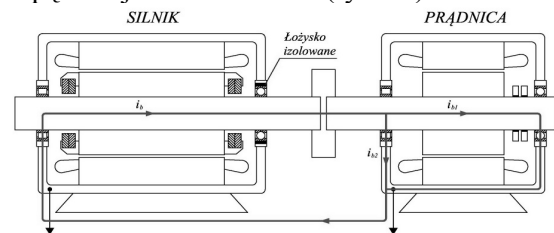


Rys. 21. Widoczne elektrowżery na panewce

5. Metody eliminacji prądów łożyskowych

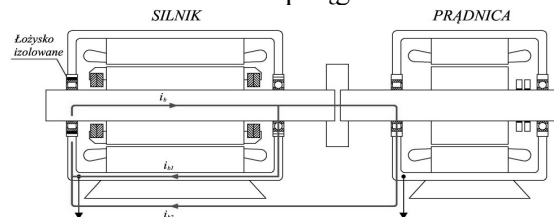
Źródłem prądów łożyskowych jest indukowana wzdłuż wału silnika SEM zwana napięciem wałowym. W przypadku występowania prądów łożyskowych w silniku, jedynym skutecznym sposobem ich wyeliminowania jest zastosowanie łożysk izolowanych. Wystarczy izolować tylko jedno łożysko silnika w przypadku, gdy silnik pracuje bez obciążenia. Może to być łożysko od strony napędowej lub od strony przeciwnapędowej. Nie ma znaczenia, w którym miejscu przerwiemy obwód przepływu prądu łożyskowego.

Inaczej wygląda sytuacja w przypadku zesprzęglenia silnika z obciążeniem. W takim układzie, w przypadku zastosowania izolowanego łożyska silnika od strony napędowej, prąd łożyskowy popłynie poprzez wał silnika i sprzęgło do obciążenia, następnie przez łożysko obciążenia do uziemionego kadłuba i z powrotem przez wspólny uziom do kadłuba silnika i przez łożysko silnika strony przeciwnapędowej do wału silnika (rys. 22).



Rys. 22. Przepływ prądu w układzie napędowym po zastosowaniu izolowanego łożyska w silniku po stronie napędowej

Tak płynący prąd łożyskowy stwarza zagrożenie nie tylko dla łożyska silnika strony przeciwnapędowej, ale także dla łożysk obciążenia. Sytuacja taka może spowodować czasami nawet uszkodzenie sprzęgła. Jedynie izolowanie łożyska silnika od strony przeciwnapędowej powoduje wyeliminowanie prądów łożyskowych (rys. 23). Dodatkowo w razie konieczności można stosować sprzęgła izolowane.



Rys. 23. Przepływ prądu w układzie napędowym po zastosowaniu izolowanego łożyska w silniku po stronie przeciwnapędowej

6. Wnioski

Prądy łożyskowe są zjawiskiem bardzo rozpowszechnionym w maszynach elektrycznych. W większości przypadków posiadają one niewielką wartość, przez co nie wywołują widocznych skutków i pozostają niezauważalne przez obsługę techniczną. Kiedy jednak z różnych przyczyn, prądy łożyskowe osiągają znaczne wartości, powodują bardzo poważne uszkodzenia łożysk.

Przedstawione w niniejszym artykule uszkodzenia łożysk wskazują na fakt przepływu przez łożyska prądu łożyskowego o znacznej wartości lub wywołane są drganiami:

- 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. Cechą prążków spowodowanych przepływem prądu jest ich ciemna podstawa, w przeciwieństwie do błyszczącego lub rdzawego wyglądu prążków powstałych w wyniku drgań,
- powstające zygzakowate „przypalenia” na bieżniach i elementach tocznych są wynikiem występujących wyładowań elektrycznych w łożysku pomiędzy bieżnią, a elementami tocznymi na skutek przebicia filmu olejowego,
- występujące duże wartości prądów łożyskowych w początkowej chwili rozruchu od zerowej prędkości obrotowej silnika powodują powstawanie bardzo nieregularnych rozległych wżerów na bieżniach pierścieni łożysk.

Intensywność uszkodzenia łożysk zależy przede wszystkim od natężenia prądu łożyskowego i czasu jego trwania, obciążenia łożyska, prędkości obrotowej oraz rodzaju zastosowanego smaru. 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. Początek uszkodzeń łożysk tocznych zwykle występuje w czasie rozruchów silnika przy dużych wartościach prądów fazowych, a jednocześnie maksymalnych wartościach prądów łożyskowych.

Praktyka wskazuje, że problematyka prądów łożyskowych jest nadal aktualna.

Literatura

- [1]. 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.
- [2]. Drak B., Zientek P., Niestrój R., Kwak J.: *Napięcia i prądy wałowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy użytych w organach urabiających kombajnów górniczych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr. 76/2007, ss.55-62.
- [3]. Zientek P., Niestrój R., Białoń T.: *Napięcia wałowe i prądy łożyskowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy - badania laboratoryjne*. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" Z.3 (203), Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007, ss.99-112.

Autorzy

- Dr hab. inż. Bronisław Drak, prof. Pol. Śl.
Politechnika Śląska
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel/fax: 32-2371447
e-mail: Bronislaw.Drak@polsl.pl
- dr inż. Piotr Zientek
Politechnika Śląska
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 32-2372652
e-mail: Piotr.Zientek@polsl.pl
- dr inż. Andrzej Boboń
Politechnika Śląska
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 32-2372548
e-mail: Andrzej.Bobon@polsl.pl
- mgr inż. Roman Niestrój
Politechnika Śląska
Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 32-2372526
e-mail: Roman.Niestroj@polsl.pl
- mgr inż. Józef Kwak
Zabrzańskie Zakłady Mechaniczne S.A.
ul. 3-go Maja 89, 41-800 Zabrze
tel: 32-7755301

Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr. N N510 351236.

