

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

EKSPLOATACJA I DIAGNOSTYKA SILNIKÓW INDUKCYJNYCH TRÓJFAZOWYCH KLATKOWYCH W PRZEMYSŁE

OPERATION AND DIAGNOSTICS OF THREE-PHASE SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTORS IN THE INDUSTRY

Abstract: Electric induction motors with squirrel-cage rotors are most widely used in the industry as electric machines driving other devices. This results from many reasons, among others, from their affordable price and fairly high reliability. The most popular are 6 kV motors, i.e. high-voltage motors that drive the most important machine units. The article presents principles of operation of these motors in the industry and discusses methods of operation:

- operation until failure occurrence,
- planned and preventive operation,
- operation dependent on a machine condition.

The paper demonstrates conditions of appropriate motor operation in the industry. It also discusses the concept of “motor life” in industrial drives and types of their damages as well as damage statistics.

1. Wstęp

W przemyśle jako napędy przemysłowe najczęściej stosowane są silniki elektryczne indukcyjne z wirnikiem klatkowym. Wynika to z kilku przyczyn: między innymi z racji korzystnej ceny i stosunkowo dużej niezawodności. Szczególne miejsce zajmują silniki na napięcie 6 kV – silniki wysokonapięciowe (WN), które stanowią w większości napęd w najważniejszych zespołach maszynowych – przykład rys. 1.



Rys. 1. Napęd wentylatora spalin w jednej z krajowych elektrociepłowni, silnik indukcyjny z wirnikiem klatkowym WN o mocy 800 kW

Ogólne zasady prawidłowej eksploatacji silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych w szczególności silników WN podaje literatura, np. [4, 5, 8÷12]. Pozycje praktycznie najbardziej przydatne to wskazania producentów silników zawarte w tzw. Dokumentacji Techniczno-Ruchowej. Należy również pamiętać o stosownych normach oraz przepisach eksploatacji

maszyn elektrycznych podawanych przez odpowiednie instytuty, organizacje techniczne bądź właścicieli i użytkowników urządzeń. Obserwując od wielu lat eksploatację silników elektrycznych w licznych krajowych zakładach przemysłowych autor widzi ogromną przydatność tych zasad oraz konieczność ciągłego ich uzupełniania i wzbogacania. Współcześnie w okresie stale rosnących wymagań dotyczących wydajności oraz redukcji kosztów produkcji w przemyśle, koniecznością staje się właściwa diagnostyka maszyn. Często uszkodzenia niewielkich elementów napędowych skutkują znacznymi stratami wynikającymi z nieprzewidzianego zatrzymania procesu produkcyjnego oraz nieplanowych prac remontowych. Diagnostyka maszyn oraz monitorowanie parametrów ich pracy pozwala uniknąć skutków awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów maszyn, oraz znacznie wydłużyć czas eksploatacji maszyn.

2. Eksploatacja maszyn w przemyśle

Maszyny przemysłowe tworzą coraz to bardziej złożone zespoły, towarzyszy temu coraz intensywniejsza eksploatacja maszyn, często 24 godziny na dobę, czyli w ruchu ciągłym. Podstawowym zadaniem stawianym inżynierom jest ciągły wzrost wydajności maszyn. Wzrostowi wydajności powinno towarzyszyć zwiększenie starań o zapewnienie pełnej sprawności urządzeń. Trzeba to pogodzić ze stale malejącą li-

czelnością personelu odpowiedzialnego za utrzymanie ruchu i serwis maszyn. W ujęciu ogólnym silniki indukcyjne trójfazowe klatkowe, podstawowe maszyny napędu przemysłowego, podobnie jak i inne maszyny można eksploatować na 3 sposoby [2, 3]:

1. eksploatacja do wystąpienia awarii;
2. eksploatacja planowo-zapobiegawcza;
3. eksploatacja zależna od stanu maszyny.

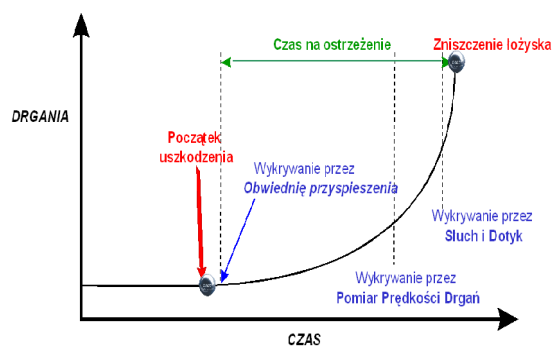
Takie ujęcie zagadnienia eksploatacji silników określa jednocześnie metody ich remontów. Wyróżnia się w związku z tym:

1. remont poawaryjny;
2. remont zapobiegawczy uwarunkowany okresem eksploatacji;
3. remont uwarunkowany stanem technicznym.

Eksploatację silników typu „do wystąpienia awarii” prowadzi się najczęściej w zakładach, w których procesy technologiczne obsługują napędy z dużą liczbą silników małej i średniej mocy, a każdy ważny proces technologiczny jest dodatkowo zabezpieczony silnikami zapasowymi. Silniki przy takim rodzaju eksploatacji pracują najczęściej do awarii. Straty w produkcji są wtedy stosunkowo niewielkie, bo silniki zapasowe zastępują te uszkodzone. Jeżeli duże silniki nie mające rezerwy pracują aż do awarii to straty mogą być bardzo znaczne, wielokrotnie przewyższające koszt nowego silnika i zakładowi może grozić długotrwały postój. Eksploatację silników typu „planowo-zapobiegawczą” prowadzi się najczęściej w zakładach, w których nie wszystkie ważne napędy mają swoich dublerów lub tam gdzie nieplanowane zatrzymanie produkcji może powodować bardzo duże straty ekonomiczne i społeczne. Produkcję w takich zakładach zatrzymuje się w ściśle określonych terminach i prowadzi następnie remont zapobiegawczy. Jest to na przykład raz w roku. Wskaźnik awaryjności wielu maszyn nie zmniejsza się w wyniku wymiany określonych części np. łożysk, uszczelnień, itd. Bardzo często po takim remoncie, jak pokazuje praktyka przemysłowa, przynajmniej przez jakiś czas awaryjność maszyn wzrasta (dzięki niefortunnej ingerencji serwisanta w maszynę). Pogorszenie się stanu technicznego danego silnika czy maszyny jest sprawą bardzo indywidualną i nie da się ściśle na sztywno określić dla wszystkich maszyn (jednakowo) czasookresu bezawaryjnej ich eksploatacji. Okresy międzyremontowe są często określane statystycznie jako takie, podczas których oczekuje się, że nie więcej jak np. 2% maszyn nowych lub w pełni

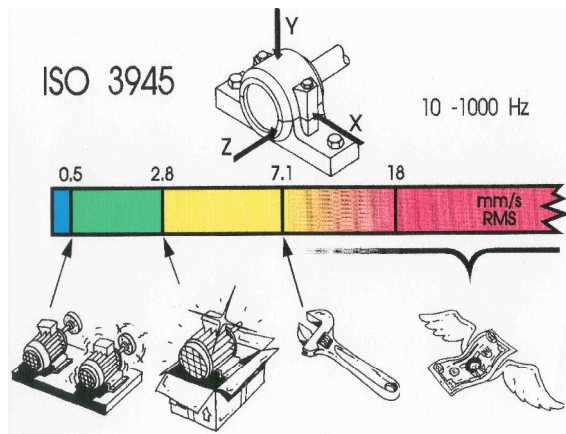
wyremontowanych ulegnie awarii. W eksploatacji planowo-zapobiegawczej bardzo często oddaje się do remontu silniki, które tego remontu nie wymagają. Remont zapobiegawczy silników przy eksploatacji planowo-zapobiegawczej jest bardzo często technicznie i ekonomicznie nieuzasadniony.

W metodzie eksploatacji silników zależnej od ich stanu technicznego każdy silnik traktowany jest w sposób indywidualny [2, 3]. Czas remontów nie jest z góry sztywno zaplanowany, tylko uwarunkowany stanem technicznym danej maszyny. Remont silnika przeprowadzamy tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Wcześniej systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne silników, określa się ich stan techniczny, indywidualnie dla każdego silnika [2, 3, 10]. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój, określać trend zmian. Przykładowo mogą to być łożyska silnika – rys. 2.

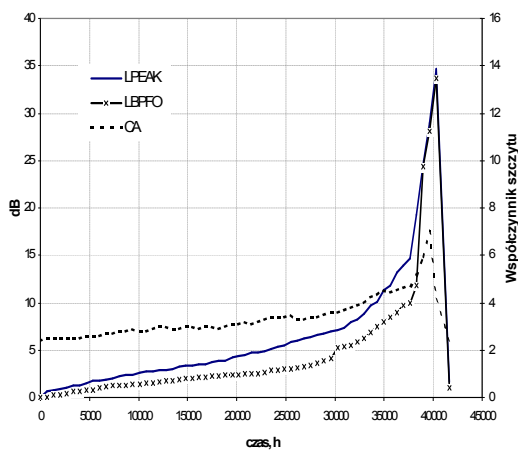


Rys. 2. Wynik pomiaru drgań węzła łożyskowego przykładowego silnika w napędzie przemysłowym, idea diagnostyki drganiowej stanu technicznego łożyska tocznego w silniku

Ocenę aktywności drganiowej silnika można wykonać w oparciu o stosowne, obowiązujące normy (rys. 3), czyli w oparciu o pomiar prędkości drgań w zakresie od 10-1000 Hz lub korzystniej w ocenie autora w oparciu o kryterium autora (zmodyfikowana metoda detekcji obwiedni, bazująca na pomiarze przyspieszenia drgań w zakresie co najmniej do 20 kHz w kierunku największego obciążenia łożyska) [10]. Wyniki pomiarów przyspieszenia drgań w metodzie detekcji obwiedni można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania silnika, w tym przypadku ze względu na uszkodzenie łożyska – rys. 4 i 5.



Rys. 3. Norma ISO 3945, wytyczne eksploatacyjne odniesione do wartości skutecznej prędkości drgań w zakresie częstotliwości (10÷1000 Hz) – V_{RMS} [2, 8]



Rys. 4. Przebieg w czasie zmian L_{PEAK} , L_{BPFO} i C_A dla łożyska FAG NU 326 w silniku o mocy 800 kW

Pomiary diagnostyczne przykładowego silnika rozpoczęto przy pierwszym uruchomieniu po wymianie łożysk w silniku. Pomiary prowadzono systematycznie co 4 tygodnie, gdy stan silnika zaczął się pogarszać, zwiększono częstotliwość pomiarów (co 2 tygodnie, a następnie co 1 tydzień). Pomiary wykonywano dla bardzo zbliżonych do siebie warunków pracy silnika, przy takim samym lub niewiele różniącym się obciążeniu. Przedstawione na rysunkach 4 i 5 wielkości są zdefiniowane przez autora następująco [10]:

$$L_{PEAK} = 20 \log \frac{A_{tPEAK}}{A_{oPEAK}}, \quad (1)$$

$$L_{BPFO} = 20 \log \frac{A_{tBPFO}}{A_{oBPFO}}, \quad (2)$$

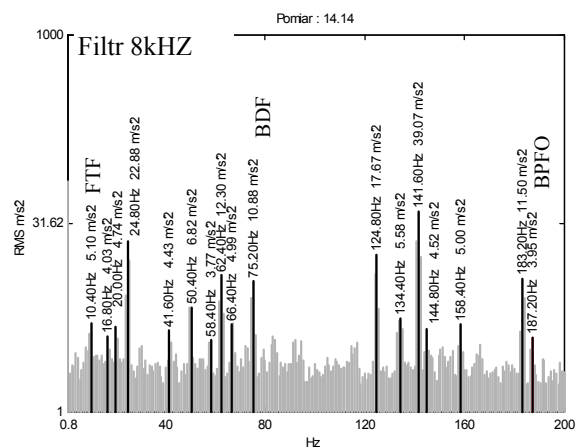
$$L_{FTF} = 20 \log \frac{A_{tFTF}}{A_{oFTF}}, \quad (3)$$

$$L_{BDF} = 20 \log \frac{A_{tBDF}}{A_{oBDF}}, \quad (4)$$

$$L_{BDFI} = 20 \log \frac{A_{tBDFI}}{A_{oBDFI}}, \quad (5)$$

$$C_A = \frac{A_{PEAK}}{A_{RMS}}, \quad (6)$$

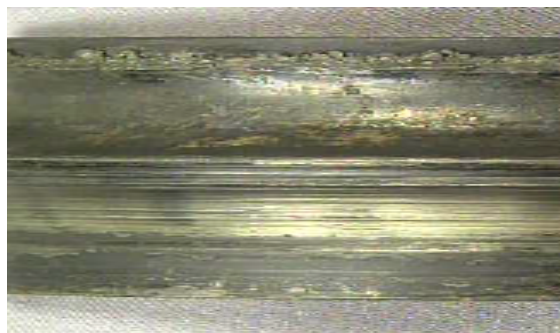
gdzie: L_{PEAK} – poziom wartości szczytowej przyspieszenia drgań łożyska, L_{BPFO} – poziom składowej BPFO (uszkodzenie bieżni zewnętrznej) (2)), w widmie obwiedni przyspieszenia drgań [10], C_A – współczynnik szczytu przyspieszenia drgań, A_{tPEAK} – wartość szczytowa przyspieszenia drgań dla chwili t , A_{oPEAK} – wartość szczytowa przyspieszenia drgań dla chwili $t=0$ (początek obserwacji), A_{tBPFO} – wartość skuteczna składowej w widmie detekcji obwiedni dla danej chwili t , związana z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej BPFO – [10], A_{oBPFO} – wartość skuteczna składowej w widmie detekcji obwiedni dla danej chwili $t=0$, związana z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej BPFO – (2). Podobnie można zdefiniować A_t i A_o dla innych uszkodzeń (3), (4), (5) otrzymamy wtedy możliwość wyznaczania L_{FTF} , L_{BSF} , L_{BPFI} [10], A_{PEAK} – wartość szczytowa przyspieszenia drgań, A_{RMS} – wartość skuteczna przyspieszenia drgań.



Rys. 5. Widmo detekcji obwiedni łożyska FAG NU 326, silnik o mocy 800 kW

Analizując wyniki pomiarów obok określenia terminu koniecznego zatrzymania ze względu na stan techniczny łożyska (rys. 4), można określić zakres remontu, przewidzieć i zapla-

nować z wyprzedzeniem czasowym stronę techniczną oraz ekonomiczną remontu. Na rysunku 6 przedstawiono fragmenty bieżni zewnętrznej i wewnętrznej uszkodzonego łożyska przykładowego silnika. Uszkodzenie łożyska wykryto i decyzję o zatrzymaniu silnika podjęto w oparciu o zmodyfikowaną metodą detekcji obwiedni [10].



Rys. 6. Fragmenty bieżni zewnętrznej i wewnętrznej uszkodzonego łożyska

Prowadzony równoległe pomiar prędkości drgań węzła łożyskowego w oparciu o normę ISO 3945 nie dawał podstawy do takiej diagnozy łożyska i podjęcia radykalnych działań eksploatacyjno-remontowych. Eksploatacja silników zależna od ich stanu technicznego jest strategią prowadzenia eksploatacji maszyn technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą, coraz częściej stosowaną w krajowych zakładach przemysłowych. W gospodarce krajów zachodnich jest strategią dominującą. Strategia ta obok korzyści ekonomicznych typu: wydłużenie okresów międzyremontowych, zwiększenie niezawodności maszyn, zwiększenie wydajności, eliminacji niepotrzebnych wymian podzespołów, skrócenie czasu napraw, zmniejszenie kosztów magazynowych, wymusza stały postęp techniczny zwłaszcza w obszarze podnoszenia poziomu wiedzy przez kadrę techniczną. Nieuchronne są przy tym koszty na organizację i utrzymanie na dobrym poziomie służb diagnostycznych [10]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [1÷3, 6÷12], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie strat finansowych w poszczególnych rodzajach przemysłu w USA, strat spowodowanych przestoje w produkcji w wyniku nieoczekiwanej awarii maszyn. Nie wykonywano diagnostyki, diagnostyka była nietrafna lub niewystarczająca [8]. Usunięcie

przyczyn awarii, czyli naprawa maszyn, średnio trwały 3-4 dni [8].

Tabela 1. Zestawienie strat finansowych w poszczególnych rodzajach przemysłu w USA, spowodowanych przestoje w produkcji w wyniku nieoczekiwanej awarii maszyn [8]

Rodzaj przemysłu	Uśrednione straty za 1 godzinę przestoju w produkcji, wynikające z nieoczekiwanej awarii maszyn
Hutniczy	10 000 \$
Papierniczy	10 000 \$
Spożywczy	500 \$
Energetyczny Blok 600 MW	15 000 \$
Lakiernia w fabryce samochodów	1 000 000 \$
Petrochemia	Kilka milionów \$

Autorowi nie są znane podobne statystyki i zestawienia dla przemysłu krajowego. Rozmiar strat w poszczególnych gałęziach przemysłu USA jednoznacznie przemawia za koniecznością stosowania diagnostyki, kompleksowej diagnostyki obejmującej wszystkie ważne maszyny produkcyjne. Przemawia to za stosowaniem eksploatacji maszyn zależnej od stanu maszyn.

3. „Czas życia” silników

Z wieloletnich obserwacji autora w zakresie eksploatacji silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych WN wynika, że czas eksploatacji danego silnika w przemyśle zwany niekiedy jego „czasem życia” wynosi najczęściej kilkanaście - kilkadziesiąt lat. Zdarzają się coraz częściej przypadki, gdy silnik eksploatowany jest kilkadziesiąt lat. W sporadycznych przypadkach „czas życia” to kilka lat, jeszcze rzadziej mniej niż 1 rok. Okres eksploatacji silników wyraźnie wydłuża się w zakładach przemysłowych, w których służby techniczne charakteryzują się dużą „kulturą techniczną” i stosują na co dzień diagnostykę silników.

4. Rodzaje uszkodzeń i ich statystyka

Długoletnie obserwacje w zakresie oceny przyczyn awarii silników indukcyjnych klatkowych WN w przemyśle krajowym oraz śledzenie literatury technicznej krajowej i światowej poświęconej temu tematowi upoważniają autora do stwierdzenia, że awaryjność silników w ostat-

nich latach wyraźnie spada. Wynika to przede wszystkim z poprawy jakości eksploatacji, obsługi oraz diagnostyki silników, zastosowania coraz lepszych materiałów do ich produkcji, w tym w szczególności dobrych materiałów izolacyjnych, zastosowania coraz lepszych sprzęgieł, łożysk, smarów. Zmienia się statystyka przyczyn uszkodzeń silników WN. Zmniejsza się liczba uszkodzeń obwodu elektrycznego i magnetycznego silników, a relatywnie powiększa się liczba uszkodzeń typu mechanicznego – w szczególności łożysk. Występują również coraz częściej uszkodzenia typu luz w układzie, np. wał-pakiet wirnika, łożyskatarcza łożyskowa, oraz uszkodzenia konstrukcji wsporczej i fundamentu pod napędem. Z ekonomicznego punktu widzenia dla użytkowników silników WN najkosztowniejsze są uszkodzenia ich izolacji uzwojeń oraz poważne uszkodzenia fundamentów i konstrukcji wsporczych. Remont silnika, mający na celu gruntowną poprawę stanu jego izolacji, to najczęściej przezwyciężenie, co jest bardzo kosztowne (najczęściej kilkadziesiąt procent wartości silnika). Konieczność przewijania silnika lub remontu kapitalnego fundamentu i konstrukcji wsporczej eliminuje dany napęd z cyklu produkcyjnego zakładu na okres kilku do kilkunastu tygodni, co dodatkowo komplikuje sytuację i wyraźnie zwiększa koszty awarii. Statystyka awaryjności maszyn elektrycznych, w tym napędów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi WN, w literaturze przedmiotowej występuje bardzo rzadko.

W technicznym piśmiennictwie polskim na szczególną uwagę zasługują prace dr hab. inż. Bronisława Draka, prof.PŚI [6] oraz mgr inż. Macieja Bernatta i dr inż. Jakuba Bernatta [1], w których omawiane są przyczyny awarii silników klatkowych WN w zakładach przemysłowych w kraju. Wymienieni autorzy podają również statystykę awaryjności tych silników.

W książce [9] poświęconej izolacji maszyn elektrycznych, która ukazała się w 2004 roku w USA jej autorzy podają uogólnioną statystykę przyczyn awarii maszyn elektrycznych prowadzoną przez EPRI dla 7500 maszyn. Statystykę tą przedstawiono w tabeli 2. Statystykę przedstawioną w tabeli 2 autor odbiera jako uogólnioną aktualną statystykę uszkodzeń maszyn elektrycznych świata zachodniego.

Tabela 2. Statystyka uszkodzeń maszyn elektrycznych [9]

Przyczyna awarii	Procentowy udział, [%]
Łożyska	41
Stojan	37
Wirnik	10
Osprzęt, wyposażenie dodatkowe i inne	12

Przedstawiając własne statystyki awaryjności silników indukcyjnych klatkowych WN [10], autor posłuży się przykładem jednej z krajowych elektrowni, w której w latach 1994-2003 zainstalowanych było 70 silników WN, wyprodukowanych w latach 60- i 70-tych. Statystykę uszkodzeń tych silników w rozbiu na awarie pochodzenia mechanicznego i elektrycznego przedstawia tabela 3. We wspomnianej elektrowni kultura techniczna załogi jest na wysokim poziomie, a diagnostykę techniczną autor ocenia na poziomie średnim. Z przedstawionego zestawienia widać wyraźnie, że ogólna liczba awarii silników WN w miarę upływu czasu maleje, a liczba awarii elektrycznych jest zdecydowanie mniejsza od liczby awarii mechanicznych. Autor uważa, że w większości krajowych zakładów przemysłowych jest podobnie. Analizując szczegółowo przyczyny awarii i nieoczekiwanych, nieplanowanych postojów napędów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi WN, w oparciu o własne doświadczenia i obserwacje, autor ustalił następującą listę przyczyn:

1. stan łożysk,
2. izolacja uzwojeń silników,
3. niewywaga, nieosiowość i luzy związane z ruchem wirnika,
4. niesymetria szczeliny pomiędzy stojanem a wirnikiem,
5. uzwojenie klatkowe wirnika,
6. stan fundamentów, konstrukcji wsporczych i mocowania.

Listę podano w kolejności, od przyczyn najczęściej występujących, do tych które występują najrzadziej. W ostatnich latach stan fundamentów, konstrukcji wsporczych i mocowania relatywnie stają się przyczyną wyraźnie wzrastającą.

Tabela 3. Liczba awarii silników klatkowych WN w przykładowej krajowej elektrowni

Rok	Liczba awarii ogółem	Liczba awarii mechanicz.	Liczba awarii elektrycz.
1994	44	27	17
1995	37	25	12
1996	30	21	9
1997	37	23	14
1998	31	21	10
1999	33	20	13
2000	29	18	11
2001	23	16	7
2002	27	18	9
2003	27	19	8

5. Uwagi końcowe

Eksplatacja silników w napędach przemysłowych zależy od ich stanu technicznego jest eksploatacją maszyn technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą, godną polecenia, coraz częściej stosowaną w krajowych zakładach przemysłowych. W gospodarce krajów zachodnich jest strategią dominującą. Strategia ta obok korzyści ekonomicznych typu: wydłużenie okresów międzyremontowych, zwiększenie niezawodności maszyn, zwiększenie wydajności, eliminacji niepotrzebnych wymian podzespołów, skrócenie czasu napraw, zmniejszenie kosztów magazynowych, wymusza stały postęp techniczny zwłaszcza w obszarze podnoszenia poziomu wiedzy przez kadrę techniczną. Rachunek ekonomiczny jednoznacznie przemawia za koniecznością stosowania diagnostyki w przemyśle, kompleksowej diagnostyki, obejmującej wszystkie ważne maszyny produkcyjne.

6. Literatura

[1] Bernatt J., Bernatt M.: *Ekspertyzy i oceny przyczyn uszkodzeń silników elektrycznych dużej*

mocy – cz. 2. Wyd. BOBRME, Katowice 2004, Maszyny Elektryczne, nr 68, 2004, ss. 41-46

[2] Brüel & Kjær: *Machine Condition Monitoring using Vibration Analysis*. Application notes BO 0247-11

[3] Brüel & Kjær *Condition Monitoring Systems Division: Compass*. Application notes BP 1053-13

[4] Dąbrowski M.: *Konstrukcja maszyn elektrycznych*. WNT, Warszawa, 1965, 1997

[5] DOLMEL: *Instrukcja obsługi łożysk ślizgowych WX4- 024001*, WEMA, Warszawa, 1977

[6] Drak B.: *Analiza przyczyn awarii silników potrzeb własnych elektrowni blokowych*. Wyd. BOBRME, Katowice 1995, Maszyny Elektryczne, nr 50, 1995, ss. 121-126

[7] Glinka T.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń stojana silników indukcyjnych wysokiego napięcia*. Wyd. BOBRME, Katowice 1992, Maszyny Elektryczne, nr 45, 1992, ss. 17-21

[8] SKF. Katalog 2004

[9] Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004

[10] Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z.193. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2006

[11] Tavner P.J., Penman J.: *Condition Monitoring of Electrical Machines*. Research Studies Press Ltd, Letchworth, Hertfordshire, 1987

[12] Wiśniewski W.: *Diagnostyka techniczna wytwórczych urządzeń energetycznych w elektrowniach*. PWN, Warszawa, 1991

Autor

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec, prof. PO,
e-mail: s.szymaniec@po.opole.pl

Politechnika Opolska,

Wydział Elektrotechniki, Automatyki
i Informatyki,

Instytut Układów Elektromechanicznych
i Elektroniki Przemysłowej.

ul. Luboszycka 7, 45-951 Opole