

**Sławomir Szymaniec**  
**Politechnika Opolska, Opole**

## **DOŚWIADCZENIA WŁASNE W DIAGNOSTYCE EKSPLOATACYJNEJ ZESPOŁÓW NAPĘDOWYCH KRYTYCZNYCH W PRZEMYSŁE**

### **OWN EXPERIENCE IN OPERATING DIAGNOSTICS OF CRITICAL POWER UNITS IN THE INDUSTRY**

**Abstract:** Each machine goes through four phases of its existence: construction, manufacture, operation and disposal. Each stage requires relevant diagnostics. For the purpose of management of owned machine, it is useful to divide them into 3 groups in terms of their importance: critical machines; quasi-critical machines; and auxiliary machines. It is also advisable to adopt the principle that critical machines should be subject to continuous on-line monitoring. Monitoring systems should involve systems that can simultaneously carry out measurements at all defined measurement channels at one time with current updates. Defects in operation of machine units using such systems are detected almost immediately. The article presents examples based on own research.

#### **1. Wstęp**

Maszyny elektryczne mają zastosowanie dziś niemal we wszystkich dziedzinach życia. Wdrażanie nowych rozwiązań technicznych prawie za każdym razem wiąże się z użyciem różnego rodzaju zespołów napędowych opartych o jakiś silnik elektryczny. Napędy elektryczne są coraz to bardziej eksploatowane, często 24 godziny na dobę, czyli w ruchu ciągłym. Podstawowym zadaniem stawianym inżynierom jest stały wzrost wydajności maszyn. Wzrostowi wydajności powinno towarzyszyć zwiększenie starań o zapewnienie pełnej sprawności maszyn i urządzeń. W przemyśle silniki elektryczne indukcyjne są najczęściej stosowanymi maszynami napędzającymi. Szczególnie wykorzystywane są jako silniki dużej mocy (sięgające mocą kilku MW) na napięcie zasilające 6kV. Ich atutem jest stosunkowo duża niezawodność, przystępna cena i prosta budowa. Diagnostyka tych silników, a właściwie całych napędów jest jednym z najważniejszych zadań dla służb utrzymania ruchu w każdym zakładzie przemysłowym. Niniejszy artykuł ma na celu ukazanie doświadczeń własnych autora w uwarunkowaniach prowadzenia badań diagnostycznych napędów elektrycznych krytycznych w warunkach dużego zakładu przemysłowego.

Każda maszyna przechodzi cztery fazy swego istnienia: konstruowanie, wytwarzanie, eksploatację i złomowanie. Na etapie każdego z nich

należy prowadzić stosowną diagnostykę. W sposób poglądowy przedstawiono to na rys. 1.

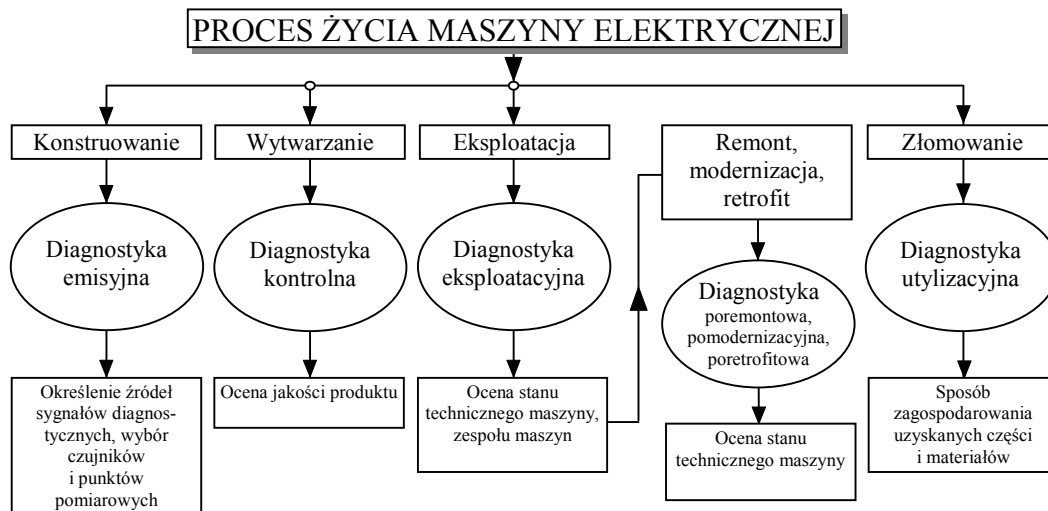
W ujęciu ogólnym maszyny elektryczne podobnie jak i inne maszyny można eksploatować na 3 sposoby [6]:

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 [6]:

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 (niedrogich stosunkowo maszyn), 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.



Rys. 1. Cele diagnostyki na poszczególnych etapach „życia” maszyny

W tej sytuacji bardzo ważne jest, aby wiedzieć co ulega uszkodzeniu w maszynie i kiedy awaria może nastąpić. Wiedząc to można lepiej przygotować remont.

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, pasków, łańcuchów, itd. Bardzo często po takim remoncie, jak pokazuje praktyka przemysłowa, przynajmniej przez jakiś czas, awaryjność maszyn wzrasta (dzięki niefortunnej ingerencji remontowca w maszynie). 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. 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. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój, określać trend zmian. Wyniki pomiarów można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania silnika. Analizując wyniki pomiarów, obok określenia terminu koniecznego zatrzymania ze względu na stan techniczny, można określić zakres remontu, przewidzieć i zaplanować z wyprzedzeniem czasowym stronę techniczną oraz ekonomiczną remontu.

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 kadre techniczną. Nieuchronne są przy tym koszty na organizację i utrzymanie na dobrym poziomie służb diagnostycznych [1, 2, 5÷7]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [1÷3, 5, 6], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie strat finansowych w poszczególnych rodzajach przemysłu w USA, strat spowodowanych przestojem w produkcji w wyniku nieoczekiwanej awarii maszyn. Nie wykonywano diagnostyki, diagnostyka była nietrafna lub niewystarczająca [6, 7]. Usunięcie przyczyn awarii, czyli naprawa maszyn, średnio trwały 3-4 dni [6, 7]. 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.

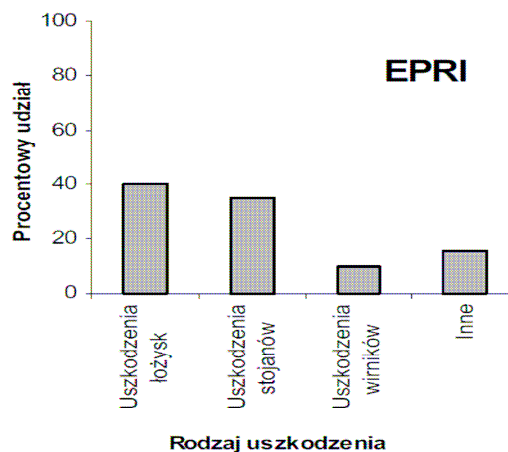
Tabela 1. Zestawienie strat finansowych w poszczególnych rodzajach przemysłu w USA, spowodowanych przestojem w produkcji w wyniku nieoczekiwanej awarii maszyn [6]

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 \$

## 2. Przyczyny uszkodzeń napędów elektrycznych

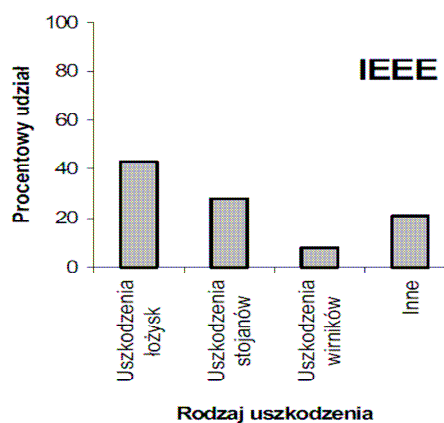
Awaryjność napędów elektrycznych w przemyśle w ostatnich latach wyraźnie spada. Wynika to przede wszystkim z: prowadzenia na coraz wyższym poziomie eksploatacji, obsługi i diagnostyki silników. Zmienia się statystyka przyczyn uszkodzeń napędów. Zmniejsza się liczba uszkodzeń obwodów elektrycznego i magnetycznego silników, natomiast relatywnie po-

większa się liczba uszkodzeń typu mechanicznego. Statystyki uszkodzeń maszyn elektrycznych podaje literatura – rys.2 i 3 [6, 7]. Wnioski autora z wieloletnich obserwacji przyczyn awarii silników elektrycznych w kraju są zbliżone do wyników przedstawionych na rys.2 i 3.



Rys. 2. Procentowy udział rodzajów uszkodzeń silników elektrycznych według EPRI [6]

Najczęstszymi przyczynami awarii i nieplanowanych postojów napędów elektrycznych w kraju są: uszkodzenia łożysk tocznych i uszkodzenia stojanów w tym izolacji uzwojeń. Węzeł łożyskowy z łożyskami tocznymi i izolacja uzwojeń stojana są newralgicznym elementem napędów elektrycznych określającym ich niezawodną pracę [7].



Rys. 3. Procentowy udział rodzajów uszkodzeń silników elektrycznych według IEEE [6]

Przesłanki do obiektywnej oceny stanu danej maszyny dają pomiary dostępnych do obserwacji symptomów (objawów) stanu technicznego i następnie wnioskowania na podstawie otrzymanych danych. Symptom stanu zawiera w sobie trzy grupy parametrów i charakterystyk możliwych do obserwacji:

- parametry funkcjonalne, robocze maszyny elektrycznej (np. moc, prędkość, prąd),
- parametry i charakterystyki będące bezpośrednim symptomem zużycia (np. luzy, odchyłki kształtu i wymiarów w stosunku do wzorca),
- badanie procesów resztkowych (np. drgania, hałas, strumień osiowy, wyładowania niezpełne).

Maszyny użytkowane w danym zakładzie przemysłowym przynależą do różnych grup ważności. Na rzecz zarządzania tymi maszynami wprowadza się najczęściej podział na 3 grupy [4]:

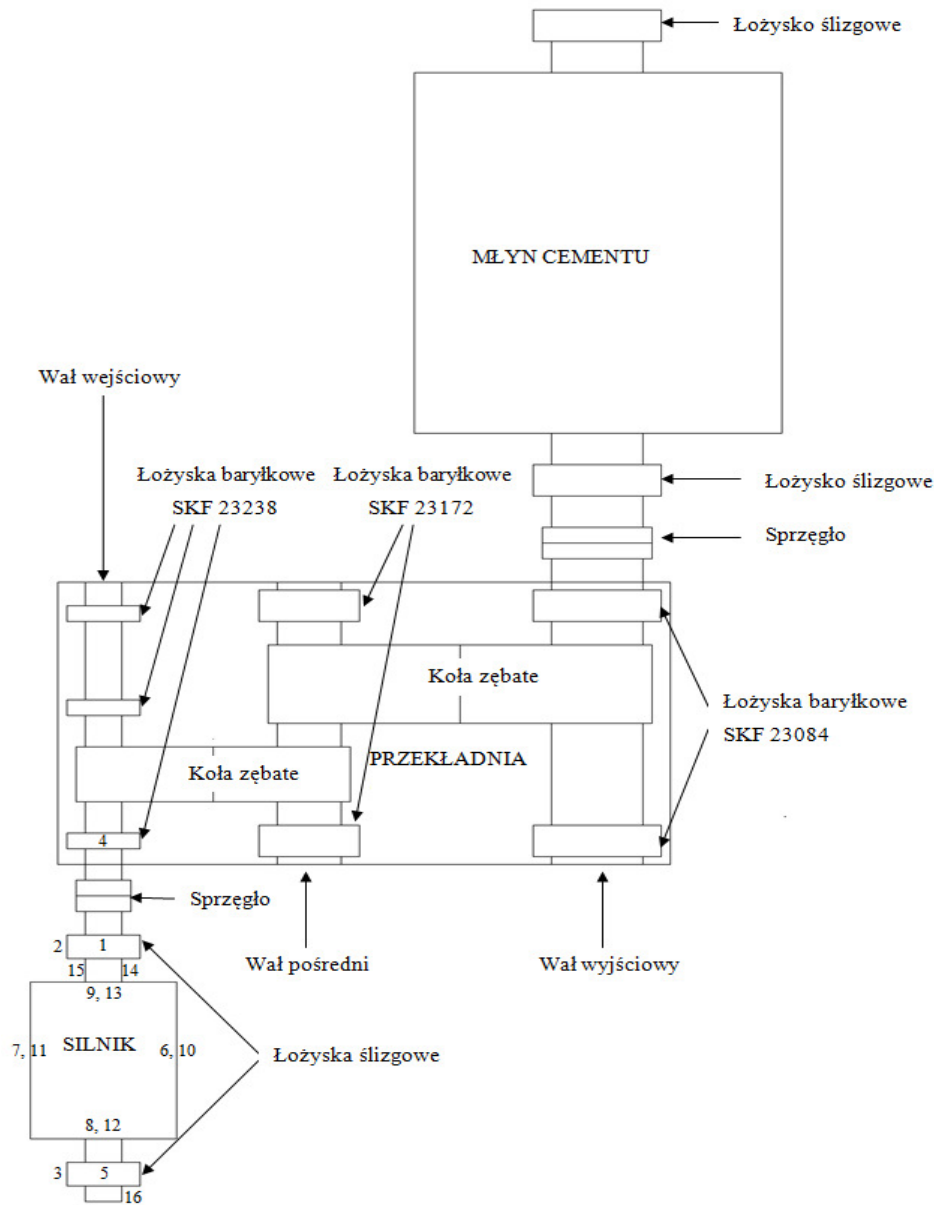
- **Maszyny krytyczne** tzn. takie, które nie posiadają dublerów, koszt zakupu tych maszyn jest bardzo duży. Ich prawidłowe funkcjonowanie wpływa w sposób zasadniczy na wynik ekonomiczny zakładu przemysłowego.
- **Maszyny quasi-krytyczne** tzn. takie, które na ogół nie posiadają dublerów. Koszt zakupu tych maszyn jest duży, ale nie jest tak duży jak w przypadku maszyn krytycznych. Awaria maszyn quasi-krytycznych wpływa w sposób znaczący na pracę maszyn krytycznych, dolegliwie ogranicza. Ich prawidłowe funkcjonowanie wpływa w sposób istotny na wynik ekonomiczny zakładu przemysłowego.
- **Maszyny pomocnicze** tzn. takie, które posiadają rezerwę. Koszt zakupu tych maszyn jest niewielki w porównaniu z kosztami zakupu maszyn krytycznych.

### 3. Badania diagnostyczne

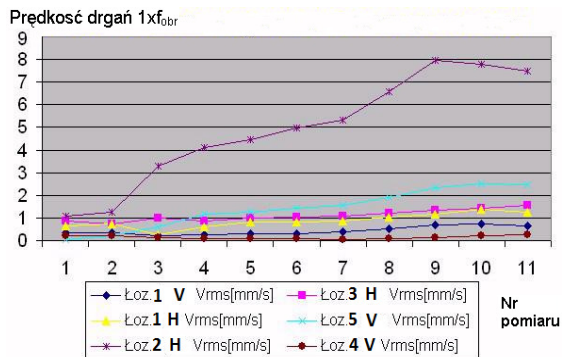
Obiektem badań autora w jednej z Cementowni był napęd krytyczny młyna cementu – rys.4. Stanowił go silnik indukcyjny 3-fazowy WN pierścieniowy o mocy 1 MW na łożyskach ślizgowych. Silnik połączony jest sprzęgłem typu omega z przekładnią dwustopniową o przełożeniu 38,2. Prędkość obrotowa na wejściu to 738 obr/min, zaś na wyjściu 20 obr/min. Przekładnia została wyposażona w siedem łożysk tocznych baryłkowych poprzecznych dwurzędowych zainstalowanych na trzech wałach przekładni. Na wale wyjściowym przekładni zesprężlonym z silnikiem indukcyjnym pierścieniowym znajdują się trzy łożyska SKF

23238. Wał pośredni posiada dwa łożyska baryłkowe SKF 23172. Prędkość obrotowa wału wyjściowego to 20 obr/min. Wał wyjściowy został wyposażony w dwa łożyska baryłkowe SKF 23084. Do monitorowania wykorzystano najnowszy system mierzący i analizujący sygnały we wszystkich kanałach jednocześnie w zakresie częstotliwości 0÷40 kHz. W celu monitoringu na stojakach łożyskowych zarówno po stronie napędowej, jak i przeciwnapędowej silnika zostały zamocowane akcelerometry mierzące drgania w kierunkach poziomym i pionowym. Jeden akcelerometr został zainstalowany na tarczy łożyskowej przekładni po stronie przeciwnapędowej, mierzył on drgania w kierunku pionowym. Kolejnymi czujnikami były czujniki wiropędowe do pomiaru drgań względnych umieszczone po stronie napędowej silnika [8]. Czujnik wiropędowy do pomiaru prędkości obrotowej został zainstalowany po stronie przeciwnapędowej maszyny. Czujniki do pomiaru temperatury i wilgotności zainstalowano na wlotach i wylotach powietrza z silnika. Poszczególne numery na rys. 4 oznaczają

- 1 – Akcelerometr SKF CMSS-2200, strona napędowa silnika kierunek pionowy (Vertical), kanał analogowy numer 1 analizatora,
- 2 – Akcelerometr SKF CMSS-2200, strona napędowa silnika kierunek poziomy
- 3 – Akcelerometr SKF CMSS-2200, strona przeciwnapędowa silnika kierunek poziomy (Horizontal), kanał analogowy numer 3 analizatora,
- 4 – Akcelerometr SKF CMSS-2200, strona napędowa przekładni, wałek szybkoobrotowy, kierunek pionowy (Vertical), kanał analogowy numer 4 analizatora,
- 5 – Akcelerometr SKF CMSS-2200, strona przeciwnapędowa silnika kierunek pionowy (Vertical), kanał analogowy numer 5 analizatora,
- 6 – Czujnik do pomiaru temperatury Pt-100, wylot powietrza z silnika, kanał analogowy numer 6 analizatora,
- 7 – Czujnik do pomiaru temperatury Pt-100, wylot powietrza z silnika, kanał analogowy numer 7 analizatora,



Rys.4. Schemat blokowy młyna cementu [5]



Rys. 5. Przykładowe wyniki monitorowania młyna cementu

Na rys. 5 przedstawiono przykładowe wyniki monitorowania młyna cementu. System monitorujący wykrył po 6 miesiącach eksploatacji poluzowanie pokrywy łożyskowej łożyska na wałku szybkoobrotowym przekładni. Napędu nie zatrzymano, usterkę usunięto w czasie normalnej pracy napędu. Zareagowano na zmianę sygnału diagnostycznego, którym był wyraźny wzrost wartości skutecznej prędkości drgań dla składowej obrotowej ( $1xf_{obr.}$ ) w ciągu godziny. Już w trakcie dokręcania śrub mocujących pokrywy zanotowano obniżenie się wartości skutecznej prędkości drgań dla składowej obrotowej ( $1xf_{obr.}$ ).

#### 4. Uwagi i wnioski końcowe

Eksploracja maszyn może odbywać się na kilka sposobów. Spośród różnych rodzajów eksploatacji maszyn, najkorzystniejszą pod względem technicznym i ekonomicznym jest eksploatacja zależna od ich stanu. Wymaga ona od służb technicznych indywidualnego traktowania każdej z maszyn i prowadzenia diagnostyki eksploatacyjnej. W metodzie eksploatacji silników zależnej od ich stanu technicznego każdy silnik, każda maszyna traktowana jest w sposób indywidualny. Czas remontów nie jest z góry sztywno zaplanowany, tylko uwarunkowany stanem technicznym danej maszyny. Remont maszyny przeprowadzamy tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Wcześniej systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne maszyn, określa się ich stan techniczny, indywidualnie dla każdej maszyny. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój, określać trend zmian. Wyniki pomiarów można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania silnika. Analizując wyniki pomiarów, obok określenia terminu koniecznego zatrzymania ze względu na stan techniczny, można określić zakres remontu, przewidzieć i zaplanować z wyprzedzeniem czasowym stronę techniczną oraz ekonomiczną remontu.

W ocenie autora bardzo trafnym jest przyjęcie w dużych krajowych zakładach przemysłowych dla potrzeb zarządzania posiadanymi maszynami podziału na 3 grupy ważności:

- Maszyny krytyczne.
- Maszyny quasi-krytyczne.
- Maszyny pomocnicze.

Bardzo celowym jest również przyjęcie zasady, że maszyny krytyczne powinny być objęte ciągłym monitoringiem on-line. Jako systemy monitoringu należy stosować systemy, które mają możliwość pomiaru równocześnie we wszystkich zdefiniowanych kanałach pomiarowych w jednym czasie z bieżącą aktualizacją. Wykrywanie usterek w pracy zespołów maszynowych ma miejsce prawie natychmiast. Możliwa więc jest prawie natychmiastowa reakcja serwisowo-naprawcza.

#### Literatura

- [1]. Brüel & Kjær: *Machine Condition Monitoring*. Application notes BR 0267-13.  
 [2]. Brüel & Kjær: *Systematic Machine Condition Monitoring*. Application notes BO 0299-11.

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

[4]. Dwojak J.: *Opracowanie efektywnej diagnostyki eksploatacyjnej zespołów maszynowych w energetyce na przykładzie PGE ELEKTROWNI OPOLE S.A.* Komunikat prywatny, 03.2012.

[5]. Młyński M.: Diagnostyka silnika indukcyjnego w warunkach przemysłowych przy użyciu SKF Multilog on-line system IMX-S. Praca dyplomowa, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej, Opole, 2011.

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

[7]. 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.

[8]. TECHNICAD; *TNC 2010 aparatura do nadzoru maszyn wirnikowych*. Nota Aplikacyjna, Gliwice 2000.

#### Autor

dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO.  
 Politechnika Opolska  
 Wydział Elektrotechniki, Automatyki  
 i Informatyki  
 Instytut Układów Elektromechanicznych  
 i Elektroniki Przemysłowej  
 45-758 Opole ul. Prószkowska 76, bud. Nr 1.  
 s.szymaniec@po.opole.pl

Artykuł napisano w ramach realizacji projektu RPOP.01.03.01-16-003/10-00 „Nowoczesna eksploatacja, diagnostyka, monitoring i serwis łożysk tocznych w napędach elektrycznych – laboratorium Instytutu Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Opolskiej w Opolu”. Projekt finansowany przez Unię Europejską, w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Opolskiego na lata 2007-2013 i Politechnikę Opolską.

