

**Sławomir Szymaniec**  
Politechnika Opolska, Opole

## **DIAGNOSTYKA EKSPLOATACYJNA USZKODZEŃ NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH W PRZEMYŚLE – DOŚWIADCZENIA WŁASNE**

### **UTILISATION DIAGNOSTICS OF DAMAGES OF ELECTRICAL DRIVES IN THE INDUSTRY – OWN EXPERIENCE**

**Abstract:** Every machine goes through four stages of its existence: construction, production, utilisation and scrapping. Relevant diagnostics needs to be performed at each of the stages. Based on the analysis of signals generated by machines and equipment, we can determine their condition. Among modern methods of diagnostic testing of equipment, we have to distinguish the very successful studies that are based on the use of information contained signals accompanying regular operation of machines. The signals include, among others, vibroacoustic signals accompanying every creative and utilisation process. Vibroacoustic signals are the reflexion of the most important physical phenomena occurring in machines. In his article, the author presents his own experience in utilisation diagnostics of electrical drives in the industry.

#### **1. Wstęp**

Wzrastająca wartość maszyn i urządzeń w przemyśle kieruje uwagę służb utrzymania ruchu i służb eksploatacyjnych na unowocześnianie zasad eksploatacji i serwisu wyposażenia technicznego. W wielu krajach technicznie i ekonomicznie wysoko rozwiniętych, w tym również coraz częściej i u nas, dostrzega się znaczące źródło efektów ekonomicznych, jakie daje przyjęcie zasad eksploatacji maszyn uzależnionych od ich stanu technicznego. Odchodzi się od zasad eksploatacji – do awarii oraz zasad uwzględniających normatywy czasu pracy. Wprowadza się diagnostykę, bieżący nadzór oraz monitorowanie stanu technicznego maszyn i urządzeń.

#### **2. Uwagi ogólne**

Intensywnie rozwijający się przemysł zwłaszcza w ostatnich latach, wytwarza i korzysta z coraz to bardziej skomplikowanych maszyn i urządzeń. Stawiane są żądania wysokiej efektywności i niezawodności. Od inżynierów żąda się maksymalnego skrócenia i potaniania procesu wytwarzania danego produktu oraz jak najdłuższego utrzymywania maszyn i urządzeń produkcyjnych w stanie zdadności do prawidłowego działania. Pociąga to za sobą konieczność opracowania i ciągłego udoskonalania metod umożliwiających zbieranie oraz analizowanie informacji o właściwościach funkcjonujących maszyn, o ich stopniu zdadności do wykonywania przewidzianych przez inżynierów zadań. Można powiedzieć, że stawiane jest

co chwilę pytanie, jaki jest stan techniczny maszyny, jak się ona zachowuje, czy ma jakieś uszkodzenia? Efektywna organizacja procesów zmierzających do odpowiedzi na postawione wcześniej pytania jest podstawowym zadaniem diagnostyki technicznej [4÷8, 10÷15]. Przesłanki [4÷7] 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 reszkowych (np. drgania, hałas, strumień osiowy, wyładowania niezupełne).

Każda maszyna przechodzi cztery fazy swego istnienia: konstruowanie, wytwarzanie, eksploatację i złomowanie. Na etapie każdego z nich należy prowadzić stosowną diagnostykę. W oparciu o analizę sygnałów generowanych przez maszyny i urządzenia określa się ich stan, przewidując przy tym terminy koniecznych przeglądów i remontów. Spośród nowoczesnych metod badań diagnostycznych maszyn należy wyróżnić bardzo efektywne badania, opierające się na wykorzystaniu informacji za-

wartych w sygnałach towarzyszących normalnej pracy maszyn. Sygnałami tymi są między innymi sygnały wibroakustyczne, które towarzyszą każdemu procesowi wytwórczemu i eksploatacyjnemu. Informują one o procesach dynamicznych zachodzących w maszynach w zakresie drgań strukturalnych i zjawisk akustycznych, których zakres częstotliwości leży w granicach od ułamka Hz do kilkudziesięciu MHz [1÷8, 10÷12, 15]. Sygnały wibroakustyczne towarzyszące pracy maszyn, jak wykazują badania [4÷7, 10÷12, 15] stanowią odbicie najistotniejszych zjawisk fizycznych zachodzących w maszynach, takich jak odkształcenia i naprężenia, współdziałanie poszczególnych części i podzespołów maszyn, stany przedawaryjne i awaryjne. Od przebiegu tych procesów w sposób zasadniczy zależy zdolność maszyn do prawidłowego ich funkcjonowania. Sygnał wibroakustyczny towarzyszący pracy danej maszyny przedstawia sobą swoiste odwzorowanie stanu technicznego wspomnianej maszyny. Przyjmuje się [1, 2, 4, 10÷12] że, aby sygnał mógł być wykorzystany jako nośnik informacji o stanie maszyny musi istnieć jednoznaczna relacja pomiędzy stanem maszyny, a strukturą sygnału. Niech  $\mathbf{x}$  będzie wektorem w przestrzeni  $P$  – wymiarowej i niech odwzorowuje przez swoje składowe stopnie swobody źródła sygnału wibroakustycznego (maszyny elektrycznej) [1, 2, 10].

$$\mathbf{x} = \text{col} (x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_p) \quad (1)$$

gdzie col – oznaczenie wektora kolumnowego.

Zmiana stanu źródła może być procesem ciągłym lub skokowym. Rozpatrzmy stany źródła wibroakustycznego w czasie  $t_1$  i  $t_2$ . Zmianę stanu maszyny elektrycznej określa wyrażenie:

$$\begin{aligned} x(t_1) - x(t_2) &= \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\mathbf{x}}{dt} dt \\ &= \left( \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_1}{dt} dt, \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_2}{dt} dt, \dots, \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_p}{dt} dt \right) \quad (2) \end{aligned}$$

gdzie:

$\mathbf{x}(t_1)$ ,  $\mathbf{x}(t_2)$  – stan źródła wibroakustycznego w chwilach  $t_1$ ,  $t_2$ ,

$\frac{d\mathbf{x}}{dt}$  – prędkość zmiany stanu źródła wibroakustycznego.

Miarą zmiany stanu źródła może być iloczyn skalarny wektorów  $\mathbf{x}(t_1)$  i  $\mathbf{x}(t_2)$  lub odległość metryczna w przestrzeni  $P$  – wymiarowej np.:

$$d[\mathbf{x}(t_1), \mathbf{x}(t_2)] = \left[ \sum_{p=1}^P (\mathbf{x}(t_{1,p}) - \mathbf{x}(t_{2,p}))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Aby sygnał wibroakustyczny  $\mathbf{u}$  mógł odwzorowywać stan maszyny elektrycznej jako obiektu rozpoznawalnego, to układ równań (3) musi spełniać warunek rozpoznawalności:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t_1) &= \Phi(u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \\ \mathbf{x}(t_2) &= \Phi(u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \\ &\dots\dots\dots \\ \mathbf{x}(t_p) &= \Phi(u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (4) \end{aligned}$$

gdzie:

$$\mathbf{u} = \text{col} (u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (5)$$

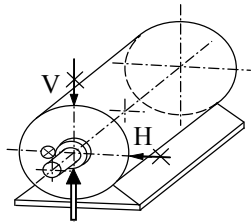
Możliwość odwzorowania stanu maszyny jest zależna od cech fizycznych źródła sygnału wibroakustycznego oraz od parametrów samego sygnału. Zakres zastosowań sygnałów wibroakustycznych towarzyszących pracy maszyn w tym maszyn elektrycznych do oceny ich stanu jest bardzo duży. Wynika to między innymi z faktu, że procesy wibroakustyczne generujące sygnały wibroakustyczne posiadają dużą pojemność informacyjną i dużą szybkość przekazywania informacji o stanie dynamicznym maszyny. Z teorii maszyn i z praktyki eksploatacji maszyn wynika, że na ich dynamikę istotny wpływ wywierają właściwości dynamiczne elementów sprzęgających poszczególne części maszyn oraz elementy maszyn najczęściej ulegające uszkodzeniom. Wynika z tego wniosek, że analizując drgania danej maszyny trzeba zwrócić szczególną uwagę na drgania generowane przez te właśnie elementy. Oznacza to w przypadku analizy drgań silników elektrycznych, konieczność określenia właściwości dynamicznych łożysk jako elementów sprzęgających część nieruchomą – stojan, korpus z częścią ruchomą – wirnikiem. Zdolność do przenoszenia informacji przez sygnał wibroakustyczny o szerokości widma  $\Delta F$  [Hz] i czasie trwania  $T$  [s] zależna jest od względnego stosunku mocy sygnału użytecznego  $N_s$  do sygnału zakłócającego  $N_n$ . Określa to wzór Shannona [12]:

$$Q = T \Delta F \lg_2 (1 + N_s / N_n) \text{ bitów} \quad (6)$$

Szybkość przekazywania informacji określa relacja:

$$C = \frac{Q}{T} = \Delta F \lg_2 (1 + N_s / N_n) \text{ bitów/s} \quad (7)$$

Dla przykładu rozpatrzmy silnik elektryczny klatkowy będący napędem wentylatora spalin. Załóżmy, że mamy ocenić stan techniczny łożysk tocznych silnika. Obserwację, pomiar i analizę sygnału drganiowego węzłów łożyskowych, a konkretnie przyspieszenia drgań prowadzimy w paśmie  $F = 0 \div 40$  kHz w punktach pomiarowych przedstawionych na rys.1. Załóżmy, że stosunek sygnału użytecznego do sygnału zakłóceń wynosi  $N_s / N_n = 15$ . Korzystając ze wzoru (7) obliczamy  $C = 8 \cdot 10^4$  bitów/s. Z przytoczonego przykładu widać, że szybkość przekazywania informacji o stanie łożyska tocznego silnika przez sygnał wibroakustyczny jest bardzo duża. Zrozumiałe jest więc szerokie zastosowanie diagnostyki wibroakustycznej do oceny stanu technicznego maszyn. Powyższy przykład określa również wymagania względem aparatury pomiarowej.

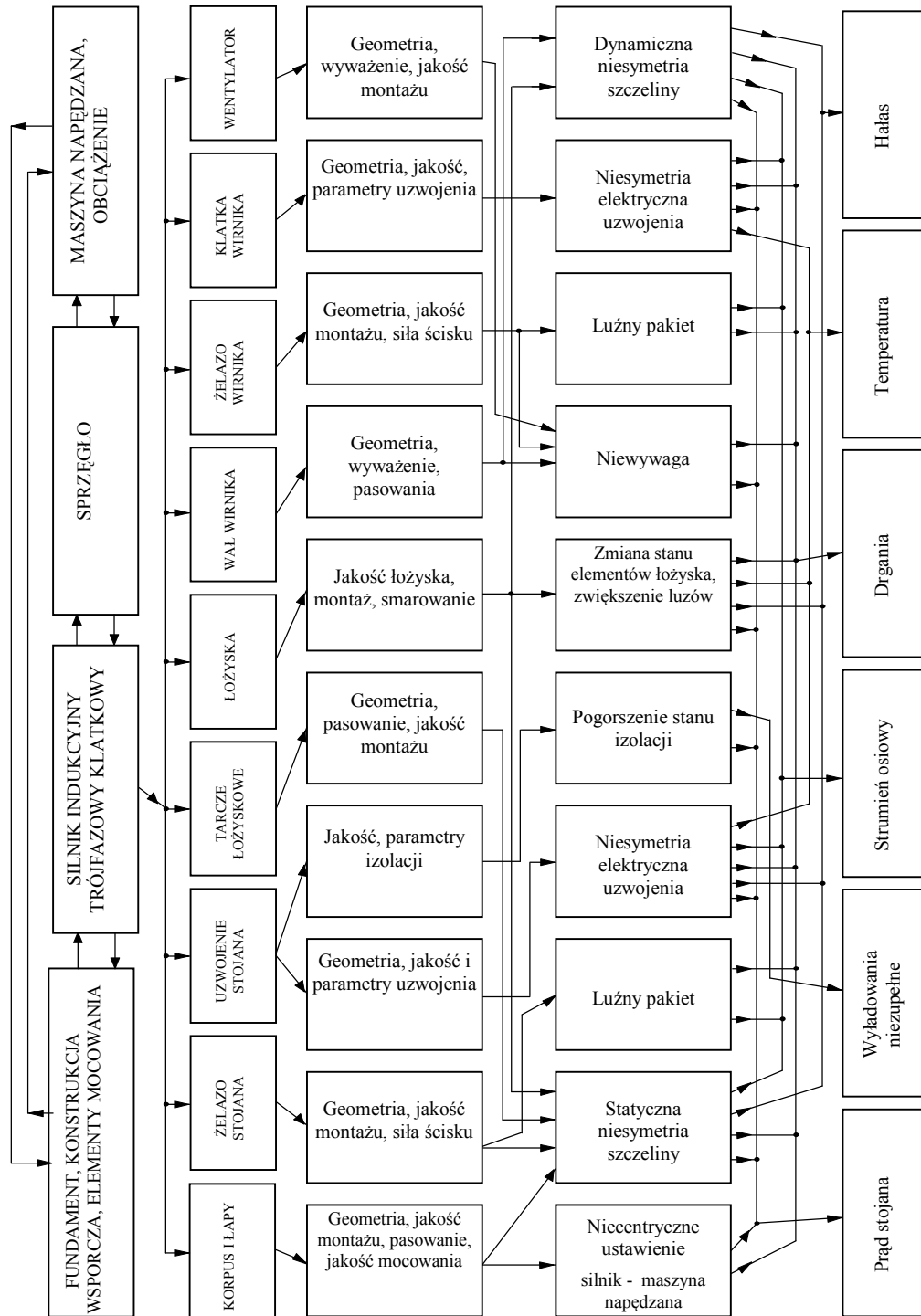


Rys. 1. Przykładowe punkty pomiaru drgań w silniku, punkty pomiaru drgań silnika wg norm [9, 13] - strzałki pojedyncze i wg propozycji autora – strzałka podwójna [15]

### 3. Symptomy uszkodzeń – zagadnienia ogólne

Określenie sposobu diagnozowania eksploatacyjnego silników indukcyjnych klatkowych, podobnie jak i dla innych maszyn musi być poprzedzone analizą mechanizmu powstawania danego uszkodzenia, które prowadzi do awarii lub do zatrzymania napędu i wykonania remontu. Trzeba prześledzić możliwą „drogę” powstawania uszkodzenia w układzie napędowym i określić symptomy towarzyszące ich eksploatacji, które będą reagowały już na początku pojawienia się uszkodzenia w możliwie najkrótszym czasie. Na rys. 2 przedstawiono opracowany przez autora uproszczony schemat przyczynowo-skutkowy występowania symptomów uszkodzenia w silnikach indukcyjnych trójfazowych klatkowych używanych w napędach przemysłowych. Pokazano w uproszczony sposób wzajemne zależności oraz drogi po-

wstawiania zmian danego symptomu. Autor zwraca uwagę na bardzo złożony mechanizm powstawania przydatnych diagnostycznie wielkości fizycznych umożliwiających określenie stanu technicznego napędu, a silnika w szczególności. Nie sposób ograniczyć się tylko do samego silnika. Wzajemne oddziaływania pomiędzy silnikiem, sprzęgłem, maszyną napędzaną oraz fundamentem, konstrukcją wsporczą i elementami mocowania są natury podstawowej i decydują o koniecznym „uogólnionym” sposobie podejścia do diagnostyki eksploatacyjnej wspomnianych silników w przemyśle. Bardzo często o złej pracy silnika, np. o jego bardzo dużych drganiach decyduje nie jego stan techniczny, a uszkodzone sprzęgło, niewyważony wentylator, czy luz w mocowaniu do fundamentu [15]. Ograniczenie się w rozważaniach tylko do samego silnika nie doprowadziłoby, jak pokazuje praktyka, do pozytywnych rezultatów. Określenie, identyfikacja symptomów umożliwiających przeprowadzenie diagnostyki jest możliwe przy wykorzystaniu eksperymentu diagnostycznego lub na drodze modelowania matematycznego. Każda z tych metod ma swoje silne i słabe strony. Eksperyment diagnostyczny wymaga najczęściej przeprowadzenia bardzo kosztownych i licznych badań dla maszyn sprawnych i uszkodzonych, przy czym uszkodzenia muszą być dokładnie znane. Ścisłe określone i powtarzalne muszą być warunki w jakich wykonuje się eksperyment i pomiary. Wykorzystywanie pomiarów diagnostycznych z bieżącymi uszkodzającymi się maszynami nie wyczerpuje w pełni możliwych przypadków uszkodzeń. Modelowanie matematyczne umożliwia wykonanie obliczeń numerycznych przy ściśle określonych zasymulowanych uszkodzeniach i przy dokładnie znanych warunkach pracy silnika. Jednak każdy model tylko częściowo odwzorowuje rzeczywistość i nie wszystkie właściwości maszyny są uwzględnione. Uwzględnianie coraz to pełniejszych właściwości maszyn prowadzi do stopniowego komplikowania modeli aż do niemożliwości ich zbudowania i wykorzystania [15]. Symptomy diagnostyczne dają podstawę do zbudowania metod diagnostycznych użytecznych dla określenia stanu technicznego maszyny. Praktyka weryfikuje przydatność poszczególnych metod, wiele z nich z upływem czasu nie jest stosowana ze względu na ograniczenia przemysłowe np. zakłócenia, ograniczenia metrologiczne.



Rys. 2. Ogólny, uproszczony schemat przyczynowo-skutkowy występowania symptomów uszkodzenia w silnikach indukcyjnych trójfazowych klatkowych [15]

Pojawiają się natomiast nowe metody, które są rezultatem najnowszych badań jak np. wykorzystanie wylądowań niezupełnych do określenia stanu technicznego izolacji uzwojeń silników w warunkach on-line. Intensywny rozwój elektroniki zwłaszcza cyfrowej, rozwój technik komputerowych umożliwia budowanie z dostępnych już prawie powszechnie komponentów, złożonych układów diagnostycznych, których przydatność można sprawdzać w przemyśle.

#### 4. Rodzaje uszkodzeń i ich statystyka

Długoletnie obserwacje w zakresie oceny przyczyn awarii silników indukcyjnych klatkowych WN w przemyśle krajowym upoważniają autora do stwierdzenia, że awaryjność silników w ostatnich 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 mate-

riałów 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, łożyska-tarcza 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. Statystyka awaryjności maszyn elektrycznych, w tym napędów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi WN, w literaturze przedmiotowej występuje bardzo rzadko. Zakłady przemysłowe bardzo niechętnie udostępniają swoje statystyki przyczyn awarii maszyn, liczby przestojów spowodowanych stanem technicznym maszyn, ilości zużytych łożysk, liczby remontów, itd. Pewną furtkę dla uzyskania informacji na powyższy temat dają działania firm ubezpieczeniowych, które „likwidują zaistniałą szkodę” w danym zakładzie. W technicznym piśmiennictwie polskim na szczególną uwagę zasługują prace prof. Bronisława Draka oraz Macieja Bernatta i Jakuba Bernatta, prezentowane w Zeszytach Problemowych KOMELU w których omawiane są przyczyny awarii silników klatkowych WN w zakładach przemysłowych w kraju. Wymienieni autorzy podają również statystykę awaryjności tych silników. W książce [14] autorzy amerykańscy podają uogólnioną statystykę przyczyn awarii maszyn elektrycznych prowadzoną przez EPRI dla 7500 maszyn. Statystykę tą przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Statystyka uszkodzeń maszyn elektrycznych [14]

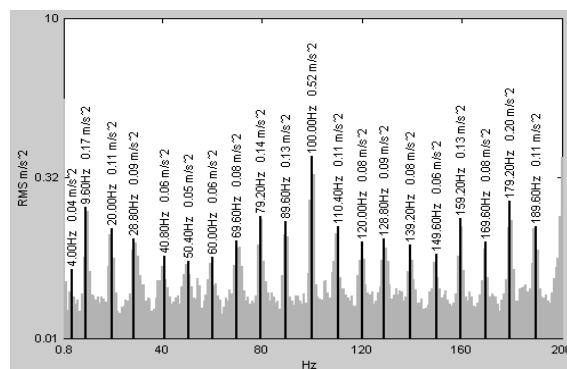
Przyczyna awarii	Procentowy udział, [%]
Łożyska	41
Stojan	37
Wirnik	10
Osprzęt, wyposażenie dodatkowe i inne	12

Statystykę przedstawioną w tabeli 1 autor traktuje jako uogólnioną statystykę uszkodzeń maszyn elektrycznych świata zachodniego. Analizując szczegółowo przyczyny awarii i nieocze-

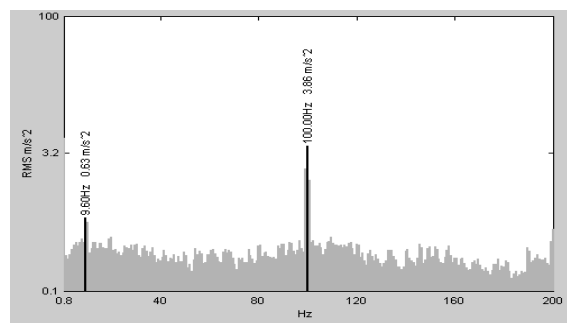
kiwanych, nieplanowanych postojów napędów w oparciu o własne doświadczenia i obserwacje, autor ustalił następującą listę przyczyn:

1. Stan łożysk.
2. Izolacja uzwojeń silników.
3. Niewyważa, 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. Poniżej przedstawiono przykład uszkodzeń silników z jakimi autor spotyka się w praktyce najczęściej. Jest to przykład defektu łożyska tocznego i niesymetrii szczeliny w silniku o mocy 800 kW. Na rys. 3÷5 przedstawiono wyniki pomiarów diagnostycznych wraz z komentarzem.

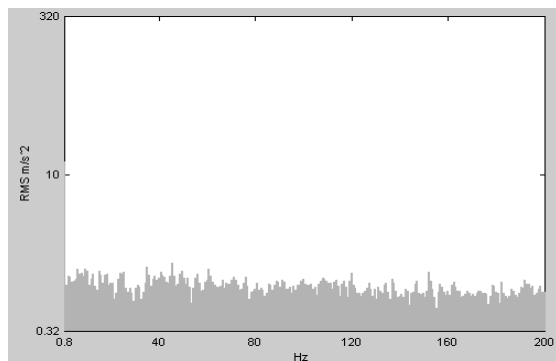


Rys. 3. Widmo detekcji obwiedni węzła łożyskowego, silnik o mocy 800 kW, przed wymianą łożyska. **Widmo detekcji świadczy o poważnym uszkodzeniu łożyska oraz o niesymetrii szczeliny. Zalecenia: wymiana łożysk, wymiana tarcz łożyskowych, legalizacja tarcz, pomiary luzów.**



Rys. 4. Widmo detekcji obwiedni węzła łożyskowego, silnik o mocy 800 kW, po wymianie łożysk, niestety pomimo zaleceń autora nie wymieniono tarcz łożyskowych, nie wykonano le-

galizacji tarcz. **Widmo detekcji świadczy o niesymetrii szczeliny, na skutek wymiany łożysk i prac z tym związanych, niesymetria szczeliny pogłębiła się. Zalecenia: wymiana tarcz łożyskowych, legalizacja tarcz, pomiary luzów.**



Rys. 5. Widmo detekcji obwiedni węzła łożyskowego, silnik o mocy 800 kW, po wymianie łożysk oraz wymianie tarcz łożyskowych. Pomiary luzów nie wykazały odchylek od normy.

## 5. Uwagi końcowe

Eksploatacja silników w napędach przemysłowych zależna od ich stanu technicznego jest eksploatacją maszyn technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą. Najczęstszymi przyczynami awarii i nieplanowanych postojów silników indukcyjnych klatkowych są uszkodzenia łożysk tocznych którym coraz częściej towarzyszy niesymetria szczeliny. Sygnał wibroakustyczny towarzyszący pracy danej maszyny przedstawia sobą swoiste odwzorowanie stanu technicznego tej maszyny.

## 6. Literatura

- [1]. Basztura Cz.: *Źródła, sygnały i obrazy akustyczne*. WKiŁ, Warszawa 1988.
- [2]. Basztura Cz.: *Komputerowe systemy diagnostyki akustycznej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1996.
- [3]. Bendat J. S., Piersol A. G.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*. PWN, Warszawa, 1976.
- [4]. Broch J.T.: *The application of the Brüel & Kjær measuring systems to mechanical vibration and shock measurements*. Brüel & Kjær 1976.
- [5]. Brüel & Kjær: *Systematic Machine Condition Monitoring*. Application notes BO 0299-11.
- [6]. Cempel Cz. *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1985.
- [7]. Cempel Cz., Tomaszewski F. i inni: *Diagnostyka maszyn. Zasady ogólne. Przykłady zastosowań*. Wyd. MCNEMT, Radom 1992.
- [8]. Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. Wyd. BOBRME, Katowice 1998.
- [9]. ISO 2372. *Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s – Basis for specifying evaluation standards*.
- [10]. Kacprowski J.: *Sygnał akustyczny w procesach sterowania i diagnostyki*. Archiwum Akustyki, tom 9, z. 4, Warszawa 1974, str. 375-388.
- [11]. Łączkowski R.: *Wibroakustyka maszyn i urządzeń*. WNT, Warszawa 1983.
- [12]. Pawłow B.W.: *Badania diagnostyczne w technice*. WNT, Warszawa 1967.
- [13]. PN-88/E-06714. *Maszyny elektryczne wirujące. Drgania. Metody badań i dopuszczalna intensywność*.
- [14]. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
- [15]. 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.

## Autor

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO  
Politechnika Opolska  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki  
i Informatyki  
Instytut Układów Elektromechanicznych  
i Elektroniki Przemysłowej  
45-951 Opole ul. Luboszycka 7  
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.