

Diagnostyka eksploatacyjna uszkodzeń napędów elektrycznych w przemyśle

Sławomir Szymaniec

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 potanienia procesu wytwarzania danego produktu oraz jak najdłuższego utrzymywania maszyn i urządzeń produkcyjnych w stanie zdatności 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 zdatności do wykonywania przewidzianych przez inżynierów zadań. Można powiedzieć, że stawiane jest co chwile 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 resztkowych (np.: drgania, hałas, strumień osiowy, wyładowania niepełne).

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 zawartych w sygnałach towarzyszących normalnej pracy maszyn. Sygnałami tymi są m.in. 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

UTILISATION DIAGNOSTICS OF DAMAGES OF ELECTRICAL DRIVES IN THE INDUSTRY

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.

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 x będzie wektorem w przestrzeni P – wymiarowej i niech odwzorowuje przez swoje składowe stopnie swobody źródła sygnału wibroakustycznego (maszyny elektrycznej) [1, 2, 10].

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

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:

$$x(t_1) - x(t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx}{dt} dt = \left(\int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_1}{dt} dt, \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_2}{dt} dt, \dots, \int_{t_1}^{t_2} \frac{dx_p}{dt} dt \right) \quad (2)$$

gdzie:

$x(t_1), x(t_2)$ – stan źródła wibroakustycznego w chwilach t_1, t_2 ,

$\frac{dx}{dt}$ – prędkość zmiany stanu źródła wibroakustycznego.

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

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

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

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

gdzie:

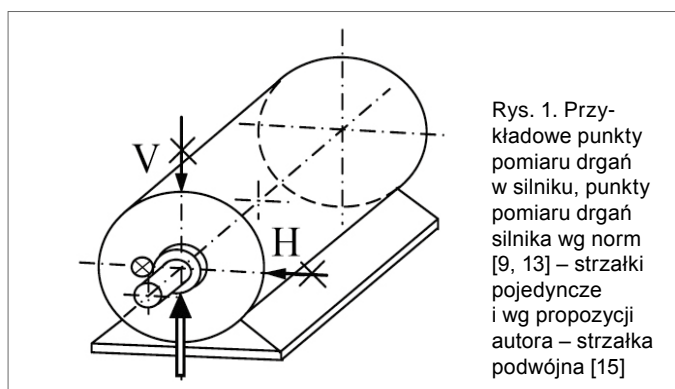
$$u = \text{col}(u_1, u_2, \dots, u_n, \dots, u_N) \quad (5)$$

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 ΔF [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:

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



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]

Dla przykładu rozpatrzmy silnik elektryczny klatkowy będący napędem wentylatora spalin. Założmy, że mamy ocenić stan techniczny łożysk tocznych silnika. Obserwację, pomiar i analizę sygnału drganiowego węzłów łożyskowych, a konkretnie przyspieszenia drgań prowadzimy w paśmie $F = 0-40$ kHz w punktach pomiarowych przedstawionych na rys. 1. Założmy, 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.

Symptomy uszkodzeń – zagadnienia ogólne

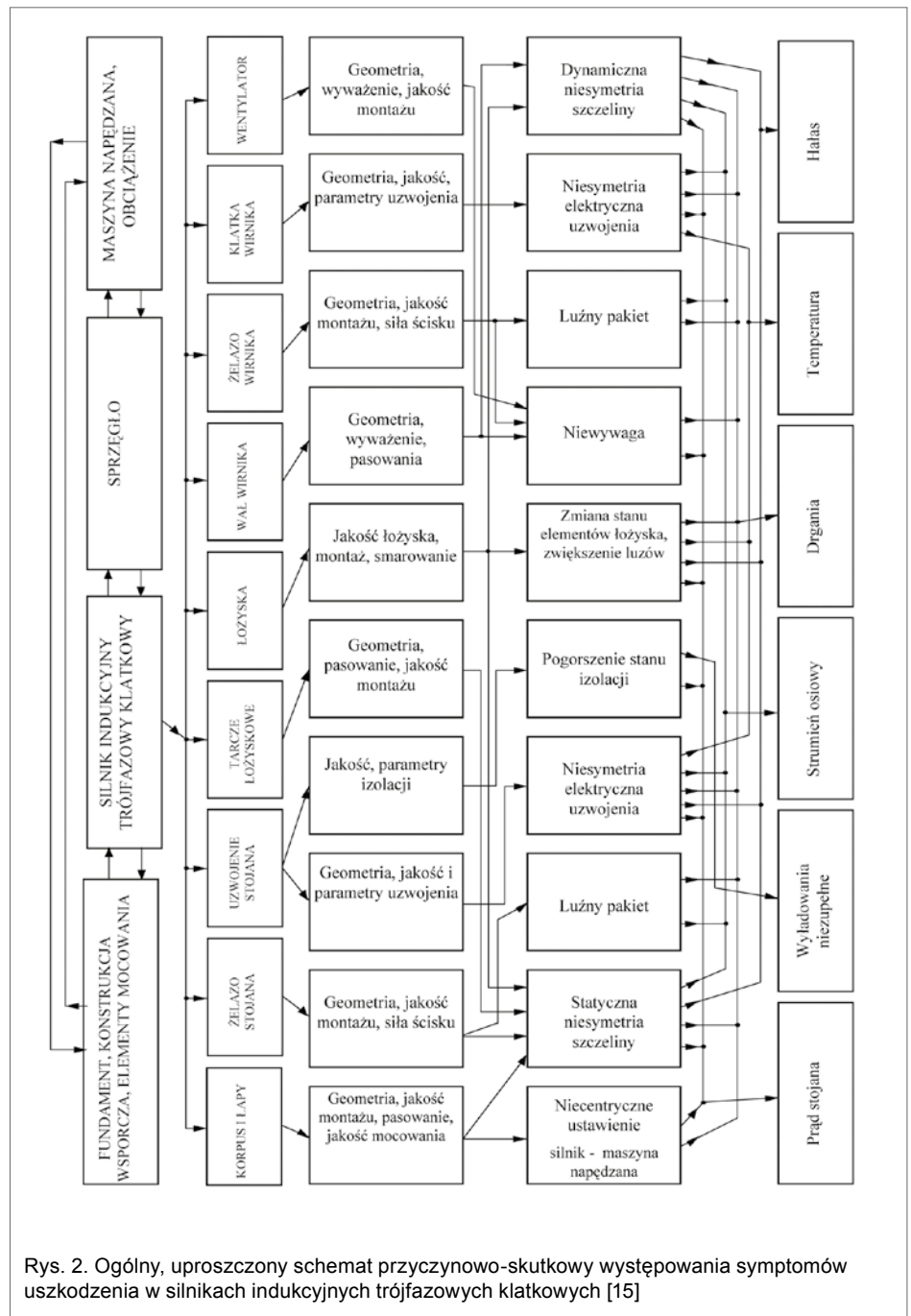
Określenie sposobu diagnozowania eksploatacyjnego silników indukcyjnych klatkowych, podobnie jak i dla innych maszyn musi być poprzedzone analizą mechanizmu powstawania danego uszkodzenia, które prowadzi do awarii lub do zatrzymania napędu i wykonania remontu. Trzeba prześledzić możliwą „drogę” powstawania 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 powstawania 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 oddziaływanie 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 bieżąco uszkadzających się maszyn 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. Pojawiają się natomiast nowe metody, które są rezultatem najnowszych badań, jak np. wykorzystanie wyładowań 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.

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 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, 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, liczby zużytych łożysk, liczby remontów itd. Pewną furtkę dla uzyskania informacji na powyższy temat dają



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

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, 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 tę przedstawiono w tabeli 1.

Statystykę przedstawioną w tabeli 1 autor traktuje jako uogólnioną statystykę uszkodzeń maszyn elektrycznych świata zachodniego. Analizując szczegółowo przyczyny awarii i nieoczekiwanych, nieplanowanych postojów napędów w oparciu o własne doświadczenia i obserwacje, autor ustalił następującą listę przyczyn:

Tabela 1. Statystyka uszkodzeń maszyn elektrycznych [15]

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

- stan łożysk;
- izolacja uzwojeń silników;
- niewyważa, nieosiowość i luzy związane z ruchem wirnika;
- niesymetria szczeliny pomiędzy stojanem a wirnikiem;
- uzwojenie klatkowe wirnika;
- stan fundamentów, konstrukcji wsporczych i mocowania.

Listę podano w kolejności od przyczyn najczęściej występujących do tych, które występują najrzadziej.

W zakładach przemysłowych najbardziej rozpowszechniony jest system okresowych pomiarów diagnostycznych łożysk tocznych *offline* i *on-line* prowadzonych cyklicznie wg harmonogramu, który obejmuje:

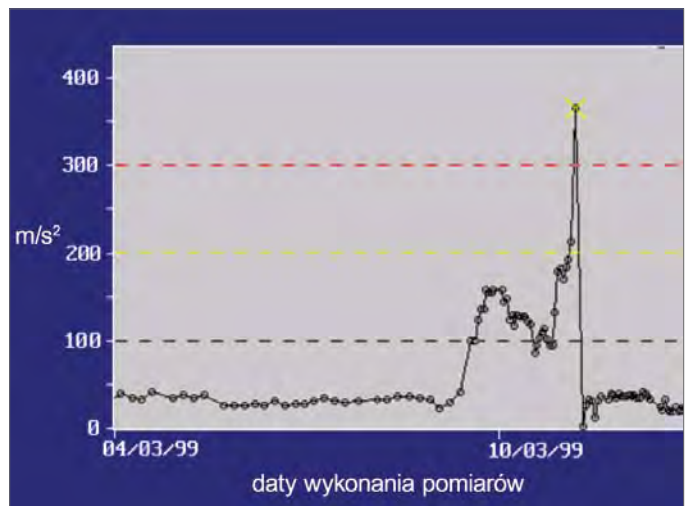
- pomiary drgań węzłów łożyskowych i całego napędu;
- pomiary temperatury w węzłach łożyskowych;
- ocenę stanu smarowania łożysk.

Pomiary wykonują najczęściej specjaliści z wydziałów diagnostyki lub innych wydziałów utrzymania ruchu. W ocenie własnej najlepszymi metodami diagnozowania łożysk tocznych w silnikach elektrycznych w warunkach krajowych są:

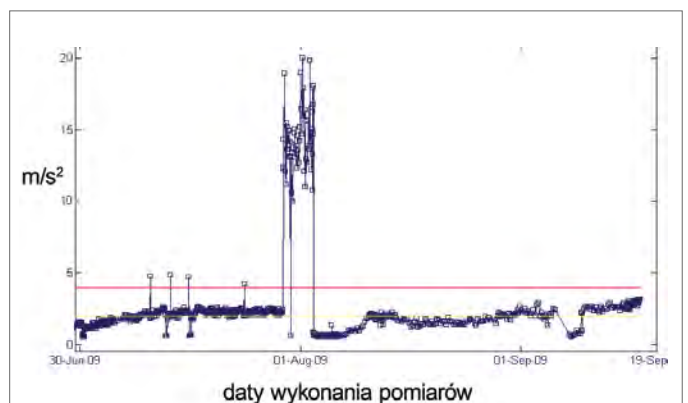
- metoda detekcji obwiedni, w tym metoda zmodyfikowana;
- metoda SPM pod warunkiem specjalnego przygotowania punktu pomiarowego.

W krajach o bardzo wysokiej kulturze technicznej metody wymienione wyżej są uzupełniane metodami wysokoczęstotliwościowymi – SE, SEE, HFD, EA [15]. W urządzeniach przemysłowych wyprodukowanych przez firmy amerykańskie można spotkać wyposażenie węzłów łożyskowych w czujniki drgań do metody REBAM. Wszystkie wymienione metody mogą być z dobrym skutkiem wykorzystane pod warunkiem właściwego przygotowania punktów pomiarowych. Zasady wykonywania pomiarów diagnostycznych oraz stosowne kryteria oceny stanu technicznego łożysk tocznych w oparciu o wymienione metody przedstawiono w monografii [15]. Stosowanie tych metod wymaga posiadania sprzętu pomiarowego typu analizator drgań wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem. Sprawdzenie stanu technicznego łożysk tocznych polega na porównaniu bieżących pomiarów z pewnym poziomem odniesienia oraz poziomem granicznym określanym jako maksymalny dopuszczalny. Niestety w wielu krajowych zakładach przemysłowych, zwłaszcza w tych mniejszych, pomiary diagnostyczne łożysk tocznych w silnikach elektrycznych sprowadzają się do oceny łożysk w oparciu o ogólne wytyczne norm drganiowych dla silników (pomiary prędkości drgań do 1 kHz). Postępowanie takie uniemożliwia racjonalną eksploatację silników, nie daje możliwości wczesnego wykrycia anomalii w pracy łożysk. Na rys. 3 i 4 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów drgań z monitoringu stanu łożysk tocznych metodą detekcji obwiedni.

W widmie obwiedni obok wymienionych wyżej składowych mogą wystąpić również składowe: obrotowa f_r i 2. harmoniczna częstotliwości zasilania $2f_1 = 100$ Hz jako efekt modulacji tymi składowymi pozostałymi składowymi sygnału drganiowego węzłów łożyskowych. Przyczyną bezpośrednią występowania



Rys. 3. Wyniki pomiarów przyspieszenia drgań w monitoringu łożyska 6326 w przykładowym silniku



Rys. 4. Trend składowej dla defektu bieżni zewnętrznej dla łożyska 22244 w przykładowym silniku

w widmie obwiedni wymienionych składowych jest niesymetria szczeliny powietrznej silnika spowodowana luzami w tarcach łożyskowych, luzami w zamkach, niecentrycznościami wirnika i stojana, ugięciami wirnika, niewłaściwą centrowką napędu itd. W maszynie elektrycznej możemy wyróżnić dwa rodzaje niesymetrii wewnętrznych:

- niesymetrię elektryczną, która jest spowodowana niesymetrycznym rozłożeniem i połączeniem poszczególnych części uzwojenia na obwodzie maszyny przy zachowaniu stałej szczeliny powietrznej;
- niesymetrię magnetyczną, która jest spowodowana niesymetryczną szczeliną powietrzną pomiędzy stojanem i wirnikiem.

Skutkiem niesymetrii elektrycznej jest pojawienie się szeregu składowych harmonicznych przepływu i odpowiadającego mu szeregu harmonicznego przestrzennego rozkładu indukcji magnetycznej wzdłuż szczeliny. Skutki niesymetrii magnetycznej są bardziej złożone, gdyż każdej składowej harmonicznej przepływu w maszynie odpowiada szereg harmonicznych przestrzennego rozkładu indukcji magnetycznej. Nierównomierna – niesymetryczna szczelina powietrzna pomiędzy stojanem a wirnikiem może powstać ze względów technologicznych lub eksploatacyjnych. Wyróżniamy zasadniczo dwa rodzaje niesymetrii szczeliny: niesymetrię statyczną i niesymetrię dynamiczną. W praktyce występują obydwie jednocześnie i wtedy

mówimy o niesymetrii mieszanej. Istotę niesymetrii szczeliny poglądowo przedstawiono na rys. 5 i 6.

W przypadku niesymetrii statycznej środek geometryczny wirnika nie porusza się względem środka geometrycznego stojana – szerokość szczeliny powietrznej jest funkcją tylko współrzędnych geometrycznych i nie zależy od czasu. Przy wystąpieniu niesymetrii dynamicznej szerokość szczeliny powietrznej jest funkcją zarówno współrzędnych geometrycznych, jak i czasu. Nie wglębiając się w zagadnienia natury teoretycznej, a skupiając się na zagadnieniach praktycznych, można stwierdzić, że wystąpienie w silniku niesymetrii szczeliny prowadzi do powstania lub pogłębienia sił naciągu magnetycznego, które to siły mogą przyjmować wartości rzędu ciężaru wirnika. Działają one bardzo destrukcyjnie na silnik, wywołują wzrost drgań maszyny elektrycznej, przyczyniają się do szybkiego zużycia łożysk, mogą spowodować ugięcie wału. Spotkać można również przypadki przytarcia wirnika o stojan, w szczególności w czasie rozruchu. Od lat prowadzone są badania nad opracowaniem efektywnych metod diagnozowania maszyn elektrycznych pod kątem określenia stopnia niesymetrii szczeliny. Autor artykułu również nad tym pracuje. Metody diagnostyczne niesymetrii szczeliny wykorzystują fakt wystąpienia deformacji pola w szczelinie. Jednym z jego przejawów jest wystąpienie w polu elektromagnetycznym harmonicznych określonych następującymi zależnościami:

$$f_{n1} = f_1 \left[(n_{r1} z_2 + n_d) \frac{1-s}{p} + n_{ws} \right] \quad (8)$$

$$f_{n1} = f_1 \left[(n_{r1} z_2 \pm n_d \pm n_{or} p) \frac{1-s}{p} \pm n_{wr} s \right] \quad (9)$$

gdzie:

f_1 – częstotliwość sieci zasilającej;

n_{r1} – dowolna liczba całkowita;

z_2 – liczba żłobków wirnika;

n_d – rząd niesymetrii – dla statycznej $n_d = 0$, dla dynamicznej $n_d = 1, 2, 3$;

s – poślizg maszyny;

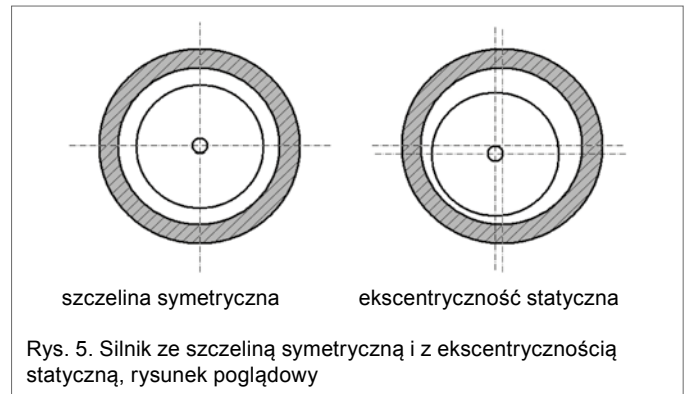
p – liczba par biegunów;

n_{ws} – numer składowej harmonicznej czasowej siły magnetomotorycznej stojana;

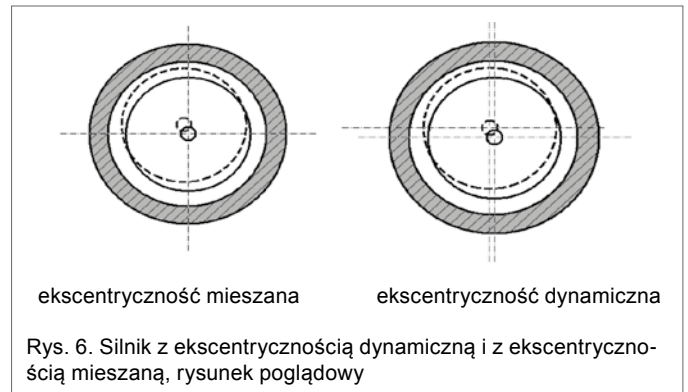
n_{wr} – numer składowej harmonicznej czasowej siły magnetomotorycznej wirnika;

n_{or} – numer składowej harmonicznej przestrzennej wirnika.

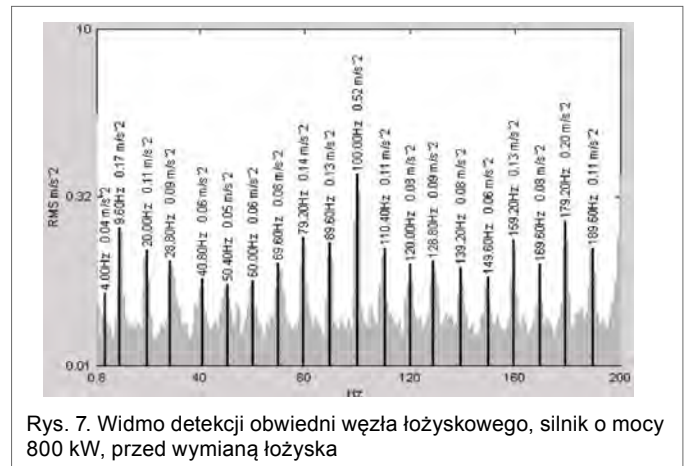
Można prowadzić diagnostykę maszyny elektrycznej mierząc i analizując jej drgania wywołane niesymetrią szczeliny, czyli skutki pojawienia się harmonicznych określonych wzorami 8 i 9. Jest to bardzo uciążliwe postępowanie. Autor artykułu stosuje pewną modyfikację metody drganiowej. Analizie poddawane jest widmo obwiedni sygnału drganiowego węzłów łożyskowych podczas procedury diagnozowania łożysk tocznych. Metoda diagnozowania może polegać również na pomiarze współczynnika głębokości modulacji głównych składowych widma drgań pochodzenia elektromagnetycznego. Inną metodą stosowaną również przez autora jest metoda oparta na analizie prądu silnika. Praktyka dowodzi, że w każdym silniku występuje niesymetria szczeliny z racji niedoskonałości procesu jego wytwarzania, mało precyzyjnego montażu oraz nieidealnych warunków jego eksploatacji. Zadaniem diagnostyki jest przede wszystkim odpowiedź na pytanie, czy wzrost drgań silnika bądź



Rys. 5. Silnik ze szczeliną symetryczną i z ekscentrycznością statyczną, rysunek poglądowy

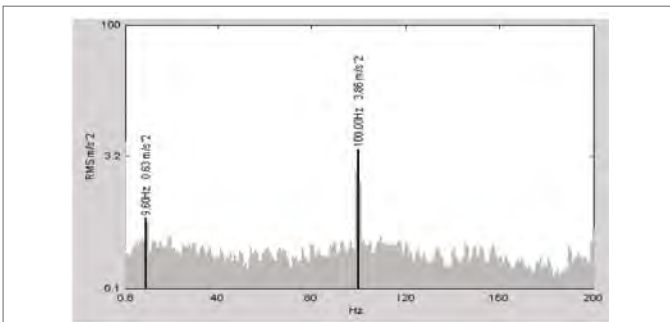


Rys. 6. Silnik z ekscentrycznością dynamiczną i z ekscentrycznością mieszaną, rysunek poglądowy

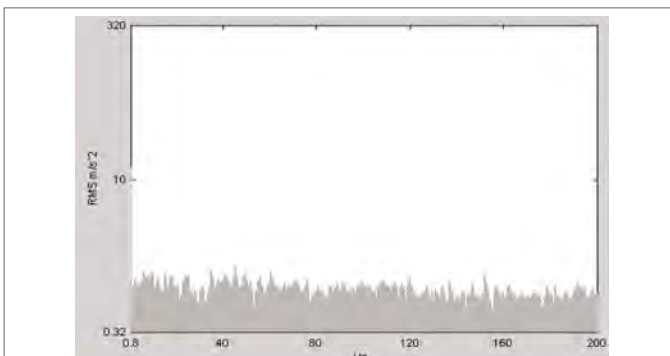


Rys. 7. Widmo detekcji obwiedni węzła łożyskowego, silnik o mocy 800 kW, przed wymianą łożyska

anomalie drganiowe są spowodowane niesymetrią szczeliny silnika. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na bardzo osobliwy aspekt praktyczny zagadnienia niesymetrii szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem a wirnikiem w silniku elektrycznym. Występuje tu pewnego rodzaju „dwoistość”. Niesymetria szczeliny może być zjawiskiem pierwotnym, wtórnym lub zarówno pierwotnym, jak i wtórnym. Zjawiskiem pierwotnym jest wtedy, gdy od początku silnik ma technicznie znaczącą niesymetrię, np. niekołowy kształt otworu stojana bądź przekroju poprzecznego wirnika itp. Wówczas niesymetria wywołuje szybką degradację łożysk, sprzęgła, pogorszenie osiowania całego zespołu maszynowego. Możliwa i równie częsta jest sytuacja odwrotna, a mianowicie: złe wyosiowanie zespołu maszynowego, uszkodzone łożysko itp. powoduje wystąpienie niesymetrii szczeliny w silniku, a w konsekwencji wystąpienie sił naciągu magnetycznego prowadzących do dalszej destrukcji silnika i zespołu maszynowego.



Rys. 8. Widmo detekcji obwiedni wężła łożyskowego, silnik o mocy 800 kW, po wymianie łożysk



Rys. 9. Widmo detekcji obwiedni wężła łożyskowego, silnik o mocy 800 kW, po wymianie łożysk oraz wymianie tarcz łożyskowych

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. 7–9 przedstawiono wyniki pomiarów diagnostycznych wraz z komentarzem.

Widmo detekcji na rys. 7 świadczy o poważnym uszkodzeniu łożyska oraz o niesymetrii szczeliny. Zalecenia: wymiana łożysk, wymiana tarcz łożyskowych, legalizacja tarcz, pomiary luzów.

Widmo detekcji przedstawione na rys. 8 jest niekorzystne dla dalszej eksploatacji silnika, gdyż pomimo zaleceń autora nie wymieniono tarcz łożyskowych, nie wykonano legalizacji 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.**

Widmo detekcji obwiedni wężła łożyskowego na rys. 9 po wymianie łożysk i tarcz łożyskowych nie wykazuje odchyłek od normy.

Wnioski

Eksploatacja silników w napędach przemysłowych jest zależna od ich stanu technicznego. Systematyczna diagnostyka maszyn zapewnia technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą ich eksploatację. 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. Mierząc i analizując sygnał drganiowy, można prowadzić skuteczną diagnostykę eksploata-

cyjną podstawowych i najczęstszych uszkodzeń maszyn elektrycznych. Metoda detekcji obwiedni sygnału przyspieszenia drgań wężła łożyskowego jest skuteczną metodą diagnostyczną wężła łożyskowego.

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, s. 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.

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.

dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO – Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska; e-mail: s.szymaniec@po.opole.pl