

Wibroakustyczna diagnostyka łożysk tocznych

Tomasz Zając

Łożyska toczne występują obecnie w wielu maszynach obrotowych w różnych gałęziach przemysłu. Diagnostowanie ich stanu, jakości wykonania i montażu, wielkości zużycia eksploatacyjnego czy też poziomu degradacji własności materiałowych elementów na podstawie analizy sygnałów wibroakustycznych stało się już ogólnie przyjętym standardem.

Na skrócenie okresu użytkowania łożyska tocznego mogą mieć wpływ zbyt ubogie smarowania, zanieczyszczenia, błędy montażowe i eksploatacyjne, w tym niewspółosiowość, erozja elektryczna, niewłaściwy montaż oraz drgania występujące w czasie postoju, wywołane przez sąsiadujące urządzenia lub maszyny. Powszechnie stosowaną metodą zapobiegania tego typu awariom jest planowa wymiana łożysk, które przepracowały założoną liczbę cykli. Praktyka pokazuje jednak, że większość łożysk może pracować jeszcze od 2 do 5 razy dłużej.

Duża liczba łożysk tocznych demontowana jest zbyt wczesnie wskutek braku oceny rzeczywistego stanu technicznego. Dlatego też w ostatnich czasach przyjmuje się eksploatację łożysk tocznych na podstawie ich stanu technicznego, do określenia którego stosuje się modele diagnostyczne. Podczas budowy diagnostycznego modelu maszyn wykorzystywanych w różnych gałęziach przemysłu często powstają problemy związane z przyjęciem ogólnego modelu diagnostycznego dla grupy tych samych maszyn.

Najbardziej ogólnym podejściem do tego zagadnienia jest budowa modeli dla węzłów mających jednakowy fizyczny układ sił wymuszających. Takimi węzłami są na przykład łożyska toczne czy ślizgowe, gdzie większość defektów powstaje na powierzchniach trących i dla tych węzłów można posłużyć się tym samym modelem diagnostycznym.

Niniejsza praca podaje algorytm diagnostowania stanu technicznego łożyska tocznego na podstawie analizy widma i obwiedni drgań mierzonych na obudowie maszyny. Opisany algorytm ma charakter uniwersalny i może być stosowany praktycznie we wszystkich gałęziach przemysłu.

Podstawowe rodzaje uszkodzeń łożysk tocznych

Podstawowymi formami zużycia łożysk tocznych według [4, 7] są:

- zużycie spowodowane cząstkami ściernymi, polegające na słabych wgnieceniach na bieżniach i elementach tocznych;
- zużycie spowodowane niedostatecznym smarowaniem, objawiające się wypolerowanymi na wysoki połysk bieżniami, a po pewnym czasie niebieskobrazowym odbarwieniem;
- zużycie spowodowane drganiami, objawiające się podłużnymi wgnieceniami w łożyskach walcowych, okrągłymi wgłębieniami w łożyskach kulkowych (wgłębienia w łożyskach są na dnie świeżące, błyszczące lub rdzawe), wgnieceniami na obu pierścieniach odpowiednio do rozstawu elementów tocznych spowodowanymi wadliwą zabudową i przeciążeniem;

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodologię diagnozowania stanu technicznego łożysk tocznych na podstawie analizy widma sygnałów wibroakustycznych mierzonych na obudowie łożyska. Przedstawiono rodzaje uszkodzeń łożysk tocznych wraz z krótkim ich opisem oraz pokazano tablicę diagnostycznych kryteriów, na podstawie których można określać miejsca występowania tych uszkodzeń. Opisana metoda ma charakter uniwersalny i może być stosowana do diagnozowania stanu technicznego łożysk w dowolnych maszynach obrotowych pracujących w różnych gałęziach przemysłu.

🇬🇧 VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS OF ROLLING BEARINGS

Abstract: The article presents methodology of diagnosis the rolling bearings technical condition on the basis of analysis the vibroacoustic spectrum measured on bearings casing. Presented types of rolling bearings damages with a short description of their and showing signs of diagnostic criteria on from which to define the incidence of such damage. The method described is a universal and can be used to diagnose condition of any machinery bearings revolving working in different branches industry.

- słabe wgniecenia na bieżniach i na elementach tocznych spowodowane obcymi cząsteczkami;
- żłobki i odbarwienia na wałeczkach i bieżniach na wejściu do obciążonej strefy łożyska z powodu ślizgania się wałeczków na bieżniach;
- korozja cierna powstała przy ruchu względnym pomiędzy łożyskiem a wałem lub oprawą;
- ciemnobrazowe lub szaroczarne żłobki, albo kraterki na powierzchniach bieżnych i na elementach tocznych, powstałe w wyniku przepływu prądu;
- łuszczenie w postaci silnie odciśniętego śladu współpracy na powierzchniach bieżnych w wyniku napięcia wstępnego;
- łuszczenie w postaci silnie odciśniętego śladu współpracy na dwóch diametralnie przeciwległych odcinkach bieżni jednego z obu pierścieni z łuszczeniem w tych obszarach z powodu odkształcenia owalnego;
- łuszczenie w wyniku niewspółosiowości łożyska kulkowego z rozpoznawalnymi śladami współpracy na dwóch diagonalnie przeciwległych miejscach;
- łuszczenie w wyniku korozji czarnej;
- łuszczenia w postaci bardzo błyszczących lub skorodowanych marszczeń albo kraterów, spowodowane drganiami w stanie bezruchu, lub ciemne wypalone kraterki powstałe w wyniku przepływu prądu;

- pęknięcia spowodowane korozją cierną na pierścieniu wewnętrznym i podłużne pęknięcia na pierścieniu zewnętrznym wraz z korozją cierną;

- pęknięcia lub wyłamania, z reguły na powierzchniach bocznych, w wyniku niefachowego obchodzenia się z łożyskiem.

Defekty wykonawcze łożysk występują w postaci odstępstw wymiarowych elementów tocznych i trajektorii ich ruchu od teoretycznych, są to owalność i krawędziowanie podczas toczenia, odstępstwa wymiarowe elementów tocznych itp. Wszystko to wpływa na drgania łożyskowanego wału. Ponadto pogorszenie parametrów chropowatości powierzchni zmienia poziom wysokoczęstotliwościowych drgań i hałasu łożyska wywołanych siłami tarcia.

Defekty montażu łożyska i maszyny jako całości spowodowane są niezachowaniem tolerancji wykonawczych powierzchni montażowych łożysk, co często powoduje powstawanie dodatkowych sił promieniowych działających na elementy toczne, wywołane wstępnym radialnym naciąganiem. Może to być spowodowane przekoszeniem wewnętrznego lub zewnętrznego pierścienia, nieosiowością wałów, niesymetrią pierścieni łożysk lub wału.

Defekty eksploatacyjne łożysk pojawiają się w wyniku niedostatecznego smarowania, erozji powierzchni tocznych, rakowin, tarcia, uszkodzenia separatora. W początkowym etapie rozwoju tych uszkodzeń ich wpływ na drgania wału jest niewielki, zmienia jedynie wielkość i własności sił tarcia, co jest powodem zwiększenia amplitud wysokoczęstotliwościowych drgań i szumu, dodatkowo wywołanych mikroudarnymi oddziaływaniami. Zarodkowane defekty eksploatacyjne mogą nie zmienić poziomu drgań, a wywołać jedynie modulacje wysokoczęstotliwościowych składowych lub pojawić się w formie uderowych impulsów w charakterystyce czasowej. Przy znacznych uszkodzeniach zmienia się geometria powierzchni tocznych, co jest powodem wzrostu amplitud średniczotliwościowych drgań łożysk tocznych. Przy dalszym wzroście uszkodzeń wzrasta niskoczęstotliwościowa amplituda drgań wału, co powoduje wzrost nisko- i średniczotliwościowych drgań całej maszyny. W początkowym stadium uszkodzenia łożyska drgania maszyny na niskich częstotliwościach mogą ulec

obniżeniu z powodu zaburzenia nieokresowości drgań. Jednak w pasmach średnio- i wysokoczęstotliwościowych obserwuje się szybki wzrost amplitud drgań.

Najgroźniejszymi uszkodzeniami łożysk są rakowiny powstające jednocześnie w różnych miejscach powierzchni tocznych, wywołujące rozrywające siły separatora, a także wżery i pitting na elementach tocznych, co prowadzi do ściernego uszkodzenia separatora.

Innym rodzajem eksploatacyjnego uszkodzenia łożyska jest zużycie ścierne spowodowane pogorszeniem się jakości środka smarnego z powodu jego zanieczyszczenia czy też starzenia się. Ten etap budowy modelu diagnostycznego polega na analizie składowych drgań i hałasu łożyska, które pojawiają się i rosną w wyniku rozwoju typowych defektów.

Model diagnostyczny uszkodzeń łożysk tocznych

W celu zbudowania modelu diagnostycznego dowolnego węzła maszyny lub urządzenia konieczne jest zrealizowanie następujących czynności:

- określenie typowych defektów, od których zależy ресурс węzła maszyny, na podstawie analizy statystycznej odchyłek;
- przeprowadzenie analizy funkcjonalnościowej maszyny (węzła kinematycznego) z oceną sił wymuszających drgania i hałas;
- ocena wpływu defektów na parametry drgań i wybranie tych, które niosą największą informację o uszkodzeniu;
- ocena wpływu warunków pracy na parametry maszyny i wybór takich, które w znacznym stopniu zależą od powstałych defektów, a słabiej od warunków normalnej eksploatacji;
- wybór optymalnych parametrów diagnostycznych dla kontroli rozwoju wszystkich typowych defektów mających wpływ na ресурс diagnozowanego węzła lub całej maszyny;
- wyznaczenie progowych wielkości parametrów diagnostycznych dla każdego defektu.

Przy budowie modelu diagnostycznego łożyska konieczna jest znajomość korelacji między rodzajem uszkodzenia a wibroakustycznym symptomem, rozumianym tutaj jako objaw, zjawisko, dzięki któremu zaobserwuje się uszkodzenie. →

Tabela 1. Diagnostyczne kryteria identyfikujące uszkodzenia w linii wału

Rodzaj defektu	Diagnostyczne kryteria w widmie drgań		Diagnostyczne kryteria w widmie obwodni wysokoczęstotliwościowych drgań	
	Główne	Uzupełniające	Główne	Uzupełniające
1. Bicie wału	$k \cdot f_w$	brak wzrostu WW	$k \cdot f_w, k < 10$	brak wzrostu WW
2. Niejednorodny promieniowy wcisk	$2 \cdot f_w$	$2 \cdot f_w$ brak wzrostu WW	$2 \cdot f_w$	$2 \cdot k \cdot f_w$ brak wzrostu WW
3. Przekoszenie pierścienia zewnętrznego	$2 \cdot f_{PZ}$	$2 \cdot k \cdot f_{PZ}$ brak wzrostu WW	$2 \cdot f_{PZ}$	$2 \cdot k \cdot f_{PZ}$ brak wzrostu WW
4. Uszkodzenie pierścienia zewnętrznego	f_{PZ}	$k \cdot f_{PZ}, k \leq 3$	f_{PZ}	$k \cdot f_{PZ}, k \leq 3$ wzrost WW
5. Rakowiny, pęknięcia na pierścieniu zewnętrznym	$k \cdot f_{PZ}, k > 3$	wzrost WW	$k \cdot f_{PZ}, k > 3$	wzrost WW
6. Uszkodzenie pierścienia wewnętrznego	$k \cdot f_w$	$f_{PW},$ wzrost WW	$k \cdot f_w$	f_w wzrost WW
7. Rakowiny, pęknięcia na pierścieniu wewnętrznym	$k \cdot f_{PW}$	$k \cdot f_w$ wzrost WW	$k_1 \cdot f_{PW} \pm k_2 \cdot f_w$	$k \cdot f_w$ wzrost WW
8. Uszkodzenie tocznych elementów koszyka	$f_K, (f_w - f_K)$	$k \cdot f_K, k \cdot (f_w - f_K)$ wzrost WW	$f_K, (f_w - f_K)$	$k \cdot f_K, k \cdot (f_w - f_K)$ wzrost WW
9. Rakowiny i odłupania elementów tocznych	$2 \cdot k \cdot f_{ET}$	$k_1 \cdot f_{ET} \pm k_2 \cdot f_K$ wzrost WW	$2 \cdot k_1 \cdot f_{ET} \pm k_2 \cdot f_K$	$k_1 \cdot f_{ET} \pm k_2 \cdot f_K$ wzrost WW
10. Niewyważenie wału	f_w	Brak $k \cdot f_w$ brak wzrostu WW	brak $k \cdot f_w$ $k > 1$	brak wzrostu WW
11. Defekty węzłów mocujących	wzrost WN ($0.5 \cdot f_w$)	są inne defekty	nie określa się	
12. Defekty smarowania	wzrost WW	-	wzrost WW	brak wyraźnych składowych
13. Defekty sprzęgła	$k \cdot f_w, k > 7$	brak wzrostu WW	$k \cdot f_w, k \geq 10$	brak wzrostu WW

Wibroakustyczne symptomy uszkodzenia łożysk tocznych

Opisane wcześniej rodzaje uszkodzeń łożysk tocznych można wykryć przy zastosowaniu analizy spektralnej widma drgań łożyska. Analizę widma drgań przeprowadza się na podstawie zmierzonego sygnału czasowego w paśmie do 20 kHz. Przyjmuje się umownie, że sygnał niskoczęstotliwościowy – WN to sygnał w paśmie poniżej 200–300 Hz, sygnał średniczęstotliwościowy – WS to sygnał w paśmie od 200–300 Hz do 1–3 kHz i wreszcie sygnał wysokoczęstotliwościowy – WW to sygnał powyżej 1–3 kHz.

W celu wyznaczenia charakterystycznych częstotliwości uszkodzenia elementów łożyska konieczna jest znajomość następujących jego parametrów:

- z – liczba elementów tocznych w rzędzie;
- n – względna prędkość obrotowa pierścieni łożyska, obr/min;
- D_o – średnica elementów tocznych, mm;
- d_m – średnica podziałowa, mm;
- α – kąt działania łożyska;

Powyższe dane pozwalają wyznaczyć charakterystyczne częstotliwości uszkodzeń [1, 3]:

a) częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia pierścienia zewnętrznego, Hz:

$$f_{PZ} = \frac{z}{2} \cdot \frac{n}{60} \cdot \left(1 - \frac{D_o}{d_m} \cdot \cos \alpha \right) \quad (1)$$

b) częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia pierścienia wewnętrznego, Hz:

$$f_{PW} = \frac{z}{2} \cdot \frac{n}{60} \cdot \left(1 + \frac{D_o}{d_m} \cdot \cos \alpha \right) \quad (2)$$

c) częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia elementów tocznych, Hz:

$$f_{ET} = 2 \cdot \frac{D_o}{d_m} \cdot \frac{n}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{D_o}{d_m} \cdot \cos \alpha \right)^2 \right) \quad (3)$$

d) częstotliwość charakterystyczna dla uszkodzenia koszyka, Hz:

$$f_K = \frac{1}{2} \cdot \frac{n}{60} \cdot \left(1 - \frac{D_o}{d_m} \cdot \cos \alpha \right) \quad (4)$$

e) częstotliwość pracy łożyskowanego wału:

$$f_w = \frac{n}{60} \quad (5)$$

W praktyce najlepiej korzystać z gotowych programów firm produkujących łożyska toczne. Podają one charakterystyczne częstotliwości uszkodzenia elementów łożyska. Korzystanie z gotowych programów podyktowane jest faktem, że w praktyce trudno jest wyznaczyć kąt działania łożyska, przy wyznaczeniu którego można popełnić dość duży błąd.

Rodzaj defektów łożysk tocznych określa się na podstawie analizy widma drgań obudowy i widma obwodni. Obwodnie wyznacza się w paśmie o częstotliwościach powyżej 10 kHz, w którym nie występują znaczące składowe. Obwodnie wyznacza się, wykorzystując przekształcenie Hilberta, następnie tworzy się sygnał analityczny, którego moduł jest poszukiwaną obwiednią sygnału wyjściowego.

Rodzaje defektów identyfikuje się na podstawie pięciu głównych i kilkunastu pomocniczych grup harmonicznego spektrum widma i obwodni. Główną grupę, w kolejności malejącej

go prawdopodobieństwa ich pojawienia się w widmie obwiedni, stanowią:

- harmoniczne o częstotliwościach będących krotnością częstotliwości pracy łożyskowanego wału – $k \cdot f_W$;
- harmoniczne o częstotliwościach będących krotnością częstotliwości charakterystycznych dla uszkodzenia pierścienia zewnętrznego łożyska – $k \cdot f_{PZ}$;
- harmoniczne o częstotliwościach będących krotnością częstotliwości charakterystycznych dla uszkodzenia pierścienia wewnętrznego łożyska – $k \cdot f_{PW}$;
- harmoniczne o częstotliwościach będących krotnością uszkodzenia koszyka – $k \cdot f_K$;
- harmoniczne będące krotnością uszkodzenia elementu tocznego – $k \cdot f_{ET}$;

gdzie k to krotność harmonik.

Liczba pomocniczych grup harmonik wynosi kilkanaście, jednakże w praktyce występują bardzo rzadko. Najbardziej prawdopodobnymi z nich są harmoniczne o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości pracy wału łożyskowanego $k \cdot f_W^*$, gdzie f_W^* może różnić się od f_W o mniej niż 10%, a także harmoniczne o częstotliwościach $k \cdot (f_W - f_K)$, gdzie $(f_W - f_K)$ – częstotliwość odtaczania koszyka obracającego się pierścienia łożyska.

Tablica zależności pomiędzy symptomem a rodzajem uszkodzenia łożyska

Wiarygodność identyfikacji rodzaju uszkodzenia podczas diagnozowania łożyska w warunkach eksploatacyjnych zależy od spełnienia dwóch warunków. Pierwszy warunek związa-

ny jest z pozyskiwaniem informacji diagnostycznych podczas eksploatacji nowego węzła łożyskowego lub po kapitalnym jego remoncie. Drugi warunek związany jest z rzędem harmonik w widmie obwiedni, przyjmowanym do określania rodzaju i miejsca powstania defektu. Jeśli pominiemy wpływ defektów montażowych w początkowym etapie eksploatacji, to trafność miejsca i rodzaju uszkodzenia w łożysku sięga 100%, pod warunkiem przeprowadzenia identyfikacji uszkodzenia w oparciu o harmoniczne $k \cdot f_{PZ}$, $k \cdot f_{PW}$ lub $k \cdot f_{ET}$. Na podstawie rzędu tych harmonik identyfikuje się rakowiny odpowiednio na zewnętrznym i wewnętrznym pierścieniu oraz na elementach tocznych.

Niższą wiarygodność (rzędu 90–95%) identyfikacji uszkodzeń realizuje się na podstawie rzędu harmonik $k \cdot f_K$, $k \cdot (f_W - f_K)$, $k \cdot f_W^*$, a jeszcze mniejszą wiarygodność prawidłowej identyfikacji uzyskuje się na podstawie rzędu harmonik $k \cdot f_W$. Przy wysokiej efektywności wykrywania i identyfikacji rodzajów oraz wielkości rozwoju słabych i średnich defektów łożysk tocznych czułość metody obwiedni wysokoczęstotliwościowych losowych drgań może ulec obniżeniu podczas wykrywania silnie rozwiniętych defektów. Dlatego dla podwyższenia wiarygodności i prawdopodobieństwa prawidłowego wykrywania silnie rozwiniętych defektów i obniżenia prawdopodobieństwa ich niezidentyfikowania stosuje się spektralną analizę w zakresie niskich i średnich częstotliwości.

Ponieważ zadanie opisanie wszystkich możliwych ogólnych reguł diagnozowania jest bardzo złożone, dlatego też w praktyce rozpatruje się tylko główne grupy symptomów, które z wyso-

reklama

kim stopniem pewności identyfikują typy defektów od 70–80% przypadków. W tabeli 1 zestawiono diagnostyczne kryteria identyfikujące uszkodzenia w linii łożyskowanego wału.

Wnioski końcowe

Praktyka diagnostyki stanu technicznego łożysk tocznych z zastosowaniem analizy sygnałów wibroakustycznych wykazała jej skuteczność w identyfikacji, jak również we wskazywaniu przyczyn niesprawności łożysk.

Analiza widma obwiedni drgań w pasmach wysokich pozwala na wczesne i skuteczne wykrywanie początków uszkodzeń elementów łożysk, takich jak pierścienie czy elementy toczne, wywołanych rakowinami, pęknięciami czy też zużyciem ściernym.

Opracowane kryteria diagnostyczne podane w tabeli 1, są podstawą do opracowania systemu doradczego, wspomagającego niedoświadczonego diagnostę w trafnej interpretacji symptomów świadczących o uszkodzeniu łożysk tocznych.

Literatura

- [1] CEMPEL Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN, Warszawa 1989.
- [2] CEMPEL Cz.: *Wibroakustyka stosowana*. PWN, Warszawa 1989.
- [3] CEMPEL Cz., KOWALAK J.: *Diagnostyka wibroakustyczna łożysk tocznych*. ZNPP Mechanika nr 28, Poznań 1980.
- [4] DWOJAK J., RZEPIELA M.: *Diagnostyka i obsługa techniczna łożysk tocznych*. Biuro Gamma, Warszawa 2003.
- [5] ŁĄCZKOWSKI R.: *Wibroakustyka maszyn i urządzeń*. WNT, Warszawa 1983.
- [6] MOREL J.: *Drgania maszyn i diagnostyka ich stanu technicznego*. PTDT, Warszawa 1994.
- [7] SKF Poradnik Obsługi Technicznej Łożysk. Publikacja 4100 PL, SKF 1994.

dr inż. Tomasz Zajac – Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn,
Politechnika Wrocławska;
e-mail: tomasz.j.zajac@pwr.wroc.pl

artykuł recenzowany