

Metody pomiaru drgań łożysk tocznych

Measurement of vibrations occurring in rolling bearings

STANISŁAW ADAMCZAK
MATEUSZ WRZOCHAŁ
PAWEŁ ZMARZŁY*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.8-9.107>

Metody pomiaru drgań, stosowane na każdym etapie żywotności łożysk tocznych, można sklasyfikować według trzech kryteriów. Analiza tych metod pozwala na lepsze zrozumienie nie tylko problematyki łożysk tocznych, lecz także zagadnień związanych z miernictwem dynamicznym.

SŁOWA KLUCZOWE: łożyska toczne, pomiary drgań

There are three criteria the vibration measurement methods as applied at each stage of the rolling-element bearing life period could be classified to. Analysis of these methods is suggested for better understanding of the rolling bearing operating problems and of the issues related to dynamic measurements.

KEYWORDS: rolling bearings, vibration measurements

Łożyska toczne są bardzo ważnymi elementami części maszyn, a ponieważ decydują o trwałości i niezawodności urządzeń mechanicznych, powinny być kontrolowane pod względem generowanych drgań na każdym etapie swojej żywotności. Drgania łożyska tocznego podlegają pomiarom przez firmę produkcyjną – po skompletowaniu wszystkich części łożyska, a następnie przez użytkownika – po nabyciu łożyska (pomiar jeszcze niezamontowanego lub już zabudowanego łożyska) i w trakcie jego eksploatacji (okresowe pomiary do momentu utraty przez łożysko własności użytkowych) [1]. Pomiar drgań może być realizowany różnymi metodami, które można podzielić ze względu na:

- wielkość mierzoną – pomiar przemieszczenia drgań, pomiar prędkości drgań, pomiar przyspieszenia drgań;
- odniesienie: pomiar drgań względnych (relatywnych), pomiar drgań bezwzględnych (absolutnych);
- kontakt: pomiar stykowy, pomiar bezstykowy.

Wpływ wielkości mierzonej drgań na wynik pomiaru

Tak jak w przypadku każdego rodzaju ruchu drgania charakteryzuje się przemieszczeniem, prędkością lub przyspieszeniem – ich przebiegi czasowe można rejestrować za pomocą systemów pomiarowych. Termin „pomiar drgań” należy więc rozumieć jako pomiar jednej z tych wielkości. Teoretycznie wystarczy dokonać pomiaru jednej z nich, a pozostałe dwie można otrzymać na drodze całkowania lub różniczkowania. Operacje te są łatwe do zrealizowania metodą analityczną. Całkowanie czy różniczkowanie najczęściej przeprowadza się bezpośrednio w trakcie pomiarów, wykorzystując do tego elektroniczne układy, co jednak skutkuje błędem amplitudy uzyskanej wielkości (zwłaszcza gdy zabieg całkowania lub różniczkowania przeprowadza się dwukrotnie). Pojawia się także określone przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem mierzonym a uzyskanym na wyjściu z układu pomiarowego [2]. Łożysko toczne jest wzbudnikiem drgań emitującym

bardzo szerokie widmo amplitudowe. Czujniki powinny wykrywać drgania, które mogą powstać w rezultacie pracy łożyska lub jego późniejszego zużycia. Najlepiej wykrywalna dla zakresów niskich częstotliwości jest amplituda przemieszczenia. Metoda oparta na pomiarze przemieszczenia znajduje więc zastosowanie np. w pomiarach okrągłości i falistości elementów łożysk. Impulsy o bardzo wysokich częstotliwościach można łatwo wykryć dzięki metodzie rejestrowania sygnału proporcjonalnego do przyspieszenia drgań w czasie. Podczas pomiarów drgań o wysokich częstotliwościach przyspieszenie ma największą amplitudę mierzalną, podczas gdy amplitudy prędkości, a zwłaszcza przemieszczenia, zanikają ze względu na szумы aparatury. Najlepszym rozwiązaniem w przypadku pośrednich zakresów częstotliwości jest zastosowanie metody opartej na pomiarze prędkości drgań. Oprócz tego, że pomiar prędkości jest swego rodzaju kompromisem, istnieje jeszcze jeden argument przemawiający na korzyść stosowania takich czujników – wywołane u człowieka wrażenie dźwiękowe jest proporcjonalne do prędkości powierzchni drgającej [3].

Względne i bezwzględne metody pomiaru drgań łożysk

Metody pomiaru drgań łożysk tocznych można sklasyfikować w zależności od tego, czy mierzone są drgania względne (relatywne) czy bezwzględne (absolutne). Drgania względne to drgania łożyska mierzone względem nieruchomego punktu odniesienia – np. względem zespołu mocowania czujnika elektrodynamicznego stosowanego w kontroli jakości przez zakłady produkujące łożyska toczne.

Innym przykładem punktu odniesienia jest ustawiona nieruchomo na stojaku głowica dopplerowskiego wibrometru laserowego, której wiązka rejestruje drgania łożyska zamontowanego w konstrukcji.

Na rys. 1 (a także na rys. 3 i 5) pokazano głowicę andrometru STPPD [4] opracowanego na Politechnice Świętokrzyskiej. Przedstawione stanowisko badawcze można przystosować do pomiarów drgań łożysk tocznych różnymi metodami, w tym do pomiaru względnej prędkości drgań. Badane łożysko (niezabudowane lub umieszczone w specjalnej obudowie) jest osadzone na obracającym się wale. Na zewnętrzny pierścień łożyska działa obciążenie osiowe, zadawane przez trójpunktowy docisk. Zespół dociskowy obciążenia osiowego łożysk jest chroniony patentem [5]. Powstałe podczas pracy łożyska drgania promieniowe są rejestrowane za pomocą różnych czujników.

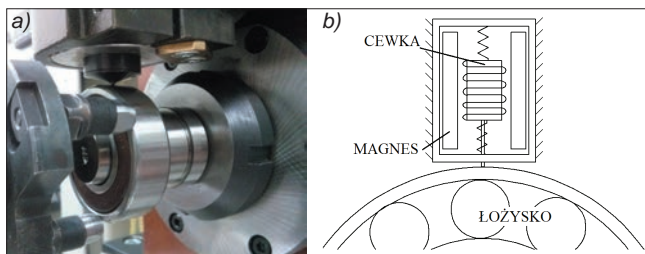
Głowica stanowiska badawczego STPPD jest wyposażona w czujnik elektrodynamiczny, w którym ruchomy trzpień, na który nawinięta jest cewka, styka się z pracującym łożyskiem. Obudowa czujnika jest ulokowana w układzie mocowania (nieruchomym), będącym układem odniesienia. Wewnątrz czujnika znajduje się magnes trwały

* Prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak dr h.c. (adamczak@tu.kielce.pl), mgr inż. Mateusz Wrzochał (mwrzochal@tu.kielce.pl), dr inż. Paweł Zmarzły (pzmarzly@tu.kielce.pl) – Politechnika Świętokrzyska

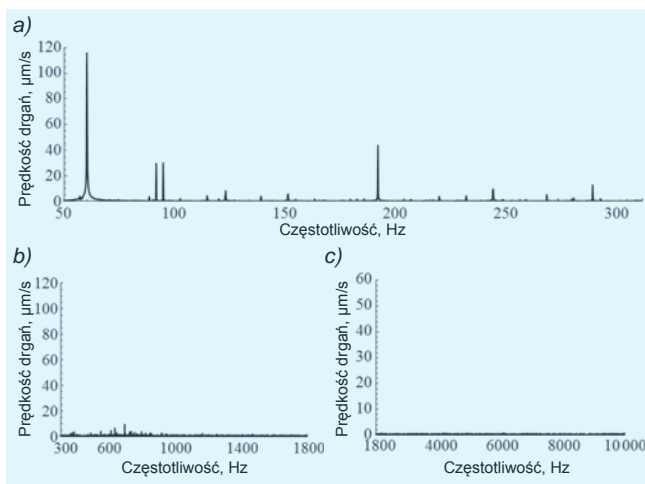
– w jego polu, pod wpływem drgań łożyska, uzwojenie porusza się i powoduje powstanie siły elektromotorycznej. Jeżeli długość cewki i indukcja wytwarzana przez magnes stały pozostają niezmiennie, wówczas powstająca siła jest proporcjonalna wyłącznie do prędkości drgającego obiektu [6].

Na rys. 2 zamieszczono przykładowy wynik pomiaru łożyska 6204 czujnikiem elektrodynamycznym SG 4.3 (prędkość obrotowa pierścienia wewnętrznego wynosiła 1800 obr/min).

Drgania bezwzględne łożyska tocznego można rejestrować bezpośrednio przez czujnik drgań, zamocowany np. na obudowie badanego łożyska. Czujnik drga w ten sam sposób co łożysko i umożliwia pomiar drgań bez żadnego punktu odniesienia. Do czujników realizujących metodę pomiaru drgań bezwzględnych należą czujniki elektrodynamiczne z masą sejsmiczną, rejestrujące sygnał proporcjonalny do prędkości drgań łożyska, a także akcelerometry piezoelektryczne, rejestrujące sygnał proporcjonalny do przyspieszenia drgań. Przykładem czujnika piezoelektrycznego jest czujnik 608A11 firmy PCB Piezotronics, którego wybrane dane techniczne zestawiono w tabl. I.



Rys. 1. Anderometr STPPD wyposażony w czujnik elektrodynamiczny (a) oraz schemat pomiaru względnej prędkości drgań (b)



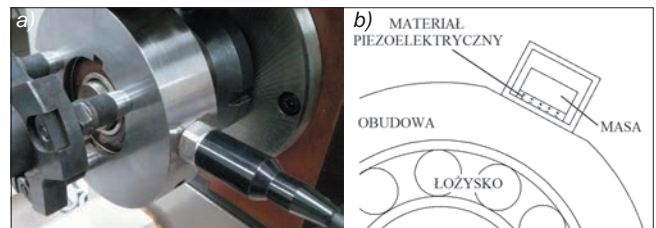
Rys. 2. Widmo prędkości drgań łożyska tocznego typu 6204 – pomiar czujnikiem elektrodynamicznym SG 4.3: a) niskie pasmo częstotliwości, b) średnie pasmo częstotliwości, c) wysokie pasmo częstotliwości

TABLICA I. Wybrane dane techniczne czujnika piezoelektrycznego 608A11 [6]

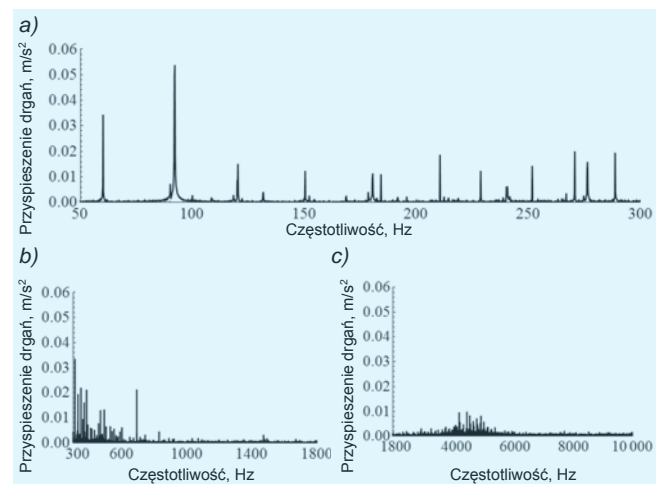
Wielkość mierzona	Przyspieszenie
Czułość, mV/(m/s ²)	10,2
Częstotliwość rezonansowa, Hz	22 000
Zakres mierzonych częstotliwości, Hz	0,5÷100 000
Rozdzielczość, $\mu\text{m/s}^2$	3,434
Maksymalna mierzalna amplituda, m/s ²	490

Na rys. 3 przedstawiono łożysko osadzone na wale, zamontowane w specjalnej obudowie pomiarowej, do której przymocowany jest akcelerometr piezoelektryczny. Czujnik ten pozwala na rejestrację drgań bezwzględnych. Zasada działania akcelerometrów jest następująca: drgania łożyska przenoszone są na obudowę ze sztywno zamocowanym czujnikiem. W akcelerometrze znajdują się płytki piezoelektryczne, na których spoczywa określona masa. Przyspieszenie działające na czujnik jest proporcjonalne do ładunku powstałego w piezoelektrykach na skutek działania siły bezwładności masy [7].

Przykładowy wynik pomiaru łożyska 6204 czujnikiem piezoelektrycznym 608A11 (prędkość obrotowa pierścienia wewnętrznego wynosiła 1800 obr/min) pokazano na rys. 4.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe STPPD wyposażone w akcelerometr piezoelektryczny (a) oraz schemat pomiaru bezwzględnego przyspieszenia drgań (b)



Rys. 4. Widmo przyspieszenia drgań łożyska tocznego typu 6204 zamontowanego w obudowie – pomiar czujnikiem piezoelektrycznym 608A11: a) niskie pasmo częstotliwości, b) średnie pasmo częstotliwości, c) wysokie pasmo częstotliwości

Największą zaletą czujników do pomiaru metodą absolutną jest to, że mierzone przez nie drgania są identyczne jak drgania łożyska. Wadę stanowi zaś sposób montażu czujników, wpływający w znacznym stopniu na wynik pomiaru. Czujniki służące do pomiaru metodą względną są znacznie prostsze w montażu, jednak mogą wykrywać nie tylko sygnały generowane przez łożysko, lecz także pochodzące z układu, w jakim to łożysko pracuje.

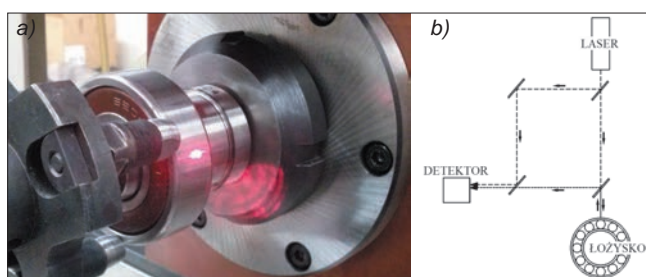
Charakterystyka metod stykowych i bezstykowych

Metody stykowe pomiaru drgań łożysk tocznych polegają na tym, że czujnik drgań ma bezpośredni kontakt z pierścieniem zewnętrznym niezabudowanego łożyska lub z oprawą łożyska zabudowanego. Do czujników realizujących pomiar metodą stykową można zaliczyć np. omówione już czujniki elektrodynamiczne i akcelerometry piezoelektryczne, a ponadto czujniki transformatorowe

różnicowe, mierzące względne przemieszczenia. Jak wspomniano, pomiary przemieszczeń drgań są bardzo rzadko stosowane do pomiarów drgań łożysk.

Do metod bezstykowych pomiaru drgań łożysk tocznych zalicza się takie metody, w których urządzenie rejestrujące sygnał drgań nie ma fizycznego kontaktu ani z żadnym elementem łożyska tocznego, ani z jego obudową. Pomiar metodą bezkontaktową można przeprowadzić np. za pomocą wibrometru laserowego, który stanowi konkurencję dla typowych czujników elektrodynamicznych.

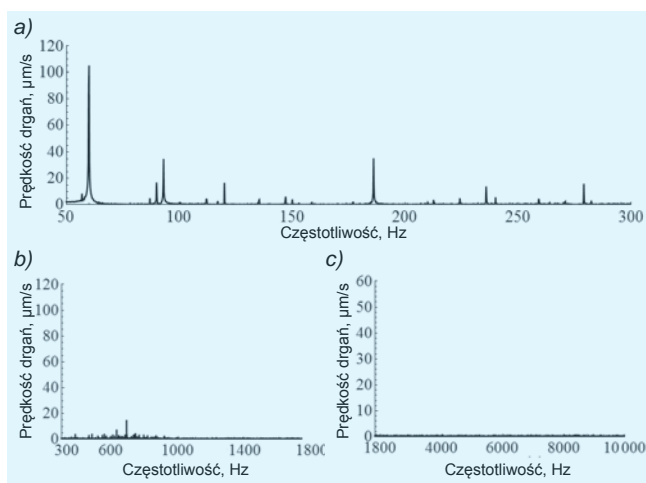
Na rys. 5 przedstawiono łożysko zamontowane na anderometrze. Prędkość drgań łożyska jest rejestrowana przez ustawiony obok wibrometr laserowy. Pomiar wibrometrem laserowym polega na porównaniu – przez precyzyjny interferometr – wiązki lasera generowanej przez urządzenie z wiązką odbitą od obiektu drgającego. W przypadku gdy badany przedmiot się porusza, częstotliwość światła odbitego od powierzchni przedmiotu ulega zmianie wskutek efektu Dopplera. Częstotliwość fali różnie, gdy badany obiekt zbliża się do źródła, a maleje wraz z oddalaniem się obiektu. Gdy znana jest różnica częstotliwości, można bezpośrednio określić prędkość drgań obiektu [8]. W tabl. II przedstawiono wybrane dane techniczne wibrometru laserowego PSV-500, a na rys. 6



Rys. 5. Bezstykowy pomiar prędkości drgań wibrometrem laserowym, którego wiązka widoczna jest na pierścieniu zewnętrznym badanego łożyska tocznego (a), oraz schemat zasady pomiaru (b)

TABLICA II. Wybrane dane techniczne wibrometru laserowego PSV-500 [9]

Wielkość mierzona	Prędkość
Typ lasera	He-Ne (633 nm)
Odległość pomiaru, m	0,125÷100
Zakres mierzonych częstotliwości, Hz	0÷50 000
Rozdzielczość, $\mu\text{m/s}$	0,02
Maksymalna mierzalna amplituda, m/s	10



Rys. 6. Widmo prędkości drgań łożyska tocznego typu 6204 – pomiar wibrometrem laserowym PSV-500: a) niskie pasmo częstotliwości, b) średnie pasmo częstotliwości, c) wysokie pasmo częstotliwości

– przykładowy wynik pomiaru tym urządzeniem łożyska 6204 (prędkość obrotowa pierścienia wewnętrznego wynosiła 1800 obr/min).

Interesującą alternatywą dla pomiaru przemieszczeń drgań przez czujniki transformatorowe różnicowe mogłoby być zastosowanie bezstykowych czujników przemieszczenia konfokalno-chromatycznych, które są przydatne np. w pomiarach cech geometrycznych warstwy wierzchniej [10]. Jak pokazuje praktyka przemysłowa, pomiary stykowe szeroko wykorzystuje się zarówno do kontroli, jak i diagnostyki łożysk tocznych. Metody stykowe umożliwiają zmierzenie wszystkich wielkości określających ruch drgający, a także pomiary drgań względnych i bezwzględnych.

Użycie czujników realizujących pomiar kontaktowy często wymaga dobrego dostępu do łożyska i zastosowania dokładnego układu mocującego. Wszystkie czujniki kontaktowe są narażone na zużycie.

Bezstykowe metody pomiaru drgań łożysk tocznych rzadko są stosowane w kontroli łożysk tocznych, za to częściej w ich diagnostyce. Zaletą tych metod jest to, że układ pomiarowy nie wpływa na badane łożysko (brak obciążenia masą czujnika), a procedura pomiarowa nie wymaga precyzyjnego i pracochłonnego instalowania czujnika. Coraz większa popularność nowoczesnych metod pomiarów drgań może w przyszłości spowodować zastąpienie metod stykowych metodami bezkontaktowymi.

Podsumowanie

Wynik pomiaru jest silnie uzależniony od zastosowanej metody. Przedstawiona klasyfikacja pokazuje, jak bardzo ogólny jest termin „pomiar drgań”. Za każdym razem, gdy wybiera się określoną metodę, trzeba uwzględnić związane z nią ograniczenia. Badania w kierunku metod i parametrów określających wielkość drgań łożysk są bardzo ważne. Wynik pomiaru drgań zawiera kluczowe informacje na temat innych cech łożyska, takich jak jego trwałość czy moment oporowy. Warto również podkreślić, że wibracje łożysk tocznych są nieuniknione i nie są spowodowane wyłącznie błędami wykonania czy uszkodzeniami. Obok wytwórczych i eksploatacyjnych źródeł drgań wyróżnia się jeszcze drgania konstrukcyjne, których przyczyną tkwią w samej budowie łożyska tocznego.

LITERATURA

- Cempel C., Tomaszewski F. „*Diagnostyka maszyn: zasady ogólne, przykłady zastosowań*”. Radom: Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, 1992, s. 146–147.
- Szumilewicz B., Słomski B., Styburski W. „*Pomiary elektroniczne w technice*”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1982, s. 98–105.
- „*SPECTRUM: Displacement, Velocity Acceleration. Vibration Principles*” (materiały firmy SKF). Austria, 1992.
- Adamczak S., Domagalski R., Sender E., Zmarzły P., Gorycki Ł. „Research methods and testing stand developed to examine vibrations generated by rolling bearing”. *Diagnostyka*. 17, 1 (2016): s. 41–49.
- Adamczak S., Galant M., Kolczyński H., Domagalski R. Patent polski PL 221 624 B1, 31 maja 2016 r.
- Marynowski K. (red.). „*Laboratorium drgań mechanicznych*”. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2002, s. 3–13.
- „608A11 Submersible ICP Accelerometer Data Sheet” (materiały firmy PCB Piezotronics).
- Dwojak J., Rzeplia M., Struzik I. „Wykorzystanie wibrometru laserowego do diagnostyki eksploatacyjnej silników elektrycznych na podstawie własnych doświadczeń”. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*. 89, 201 (2011): s. 57–63.
- „PSV-500 Scanning Vibrometer Full-Field Vibration Measurement at Low and Mid Frequencies. Datasheet” (materiały firmy Polytec).
- Wieczorowski M., Majchrowski R., Jakubowicz M. „Pomiary cech geometrycznych warstwy wierzchniej za pomocą laserowego czujnika konfokalnego”. *Mechanik*. 11 (2016): s. 1650–1651. ■