

Badania porównawcze wybranych systemów pomiarowych drgań łożysk tocznych

Comparative study of selected bearing vibration measuring systems

STANISŁAW ADAMCZAK
MATEUSZ WRZOCHAL*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.64>

Producenci łożysk tocznych mają własne systemy kontroli drgań łożysk, składające się z kilku kluczowych podzespołów. Chociaż zasada działania tych systemów jest taka sama, różnią się one od siebie niektórymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi, z kolei rodzaj zastosowanej konstrukcji ma wpływ na dokładność pomiaru drgań łożyska tocznego.

SŁOWA KLUCZOWE: pomiary, drgania, łożyska toczne

Roller bearing manufacturers have individual bearing vibration monitoring systems, consisting of several key components. Despite the fact that the principle of operation of these systems is the same, they differ from each other with some constructional solutions, whereas the type of construction used has an impact on the accuracy of measuring vibrations of a rolling bearing.

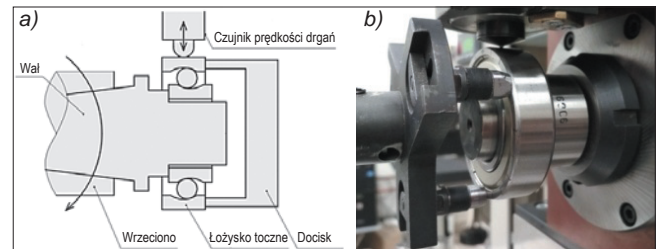
KEYWORDS: measurements, vibrations, rolling bearings

Pomiar drgań generowanych przez łożysko toczne jest jednym z najważniejszych elementów kontroli jego jakości [1, 2]. Wiodący producenci łożysk korzystają ze sprzętu pomiarowego własnej produkcji lub od konkretnego dostawcy.

Na rys. 1 znajduje się schemat obrazujący zasadę przemysłowego pomiaru drgań łożysk tocznych [3]. Pomiar polega na rejestrowaniu prędkości drgań promieniowych łożyska nałożonego na wał obracający się z określoną prędkością. Przeważnie do tego celu stosowany jest elektrodynamiczny czujnik generujący sygnał proporcjonalny do prędkości drgań. Łożysko toczne podczas pomiaru jest obciążane osiowo poprzez docisk z siłą odpowiadającą typowi i rozmiarowi łożyska. Aby otrzymać dokładną informację na temat stanu badanego obiektu, sygnał pomiarowy jest filtrowany na trzy pasma częstotliwości. W każdym z pasm liczona jest wartość skuteczna drgań, informująca, czy badane łożysko ma istotne wady [2, 4, 5].

Poziom drgań generowanych przez łożysko powinien spełniać oczekiwania klienta. Normy dotyczące pomiaru drgań łożysk tocznych określają jedynie ogólne warunki pomiaru, takie jak: prędkość obrotowa pierścienia wewnętrznego łożyska, siła docisku pierścienia zewnętrznego czy sposób filtrowania uzyskanego sygnału [6, 7]. Nie ma standardów określających limity, jakich nie powinien przekroczyć poziom drgań. Przeważnie jest to kwestia wewnętrznych norm zakładowych lub uzgodnienia pomiędzy producentem a odbiorcą. Normy nie determinują również, w jaki sposób technicznie zapewnić warunki pomiarowe.

Istniejące systemy różnią się zatem niektórymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi swoich podzespołów. Każdy z tych podzespołów ma większy lub mniejszy wpływ na dokładność pomiaru.



Rys. 1. Schemat zasady działania systemu pomiaru drgań łożysk tocznych [3] (a); głowica przemysłowego systemu do pomiaru drgań łożysk tocznych (b)

Badane systemy pomiarowe drgań łożysk tocznych

Stosuje się różne rozwiązania wymienionych podzespołów. Na podstawie analizy tylko niektórych z dostępnych urządzeń [3, 8–10] można zauważyć, że różnią się one od siebie: typem wrzeciona (hydrodynamiczne bądź całkowicie łożyskowane powietrznie), typem docisku (pneumatyczny, sprężynowy – realizowany wspólnie w zwartej konstrukcji lub uchylony, np. na czas wymiany łożyska), rodzajem kontaktu docisku z pierścieniem zewnętrznym łożyska (styk trójpunktowy lub na całym obwodzie), usytuowaniem silnika (bezpośrednio za wrzecionem lub odseparowany od reszty systemu), mocowaniem czujnika (czujnik nieruchomy bądź dostawiany na czas pomiaru) czy sposobem przetwarzania sygnału uzyskanego z pomiaru (analogowe lub analogowo-cyfrowe).

TABLICA I. Charakterystyka najważniejszych podzespołów badanych systemów

System	System 1	System 2	System 3	
Wrzeciono	łożyskowanie hydrodynamiczne	łożyskowanie powietrzne	łożyskowanie hydrodynamiczne	
Docisk	Typ	pneumatyczny, na uchylnym ramieniu	pneumatyczny, stale współosiowy	pneumatyczny, stale współosiowy
	Styk z łożyskiem	trójpunktowy	trójpunktowy	obwodowy
Czujnik	nie ruchomy	nie ruchomy	dostawiany podczas pomiaru	
Przetwarzanie sygnału	analogowo-cyfrowe	analogowe	analogowo-cyfrowe	

Celem badań jest wyłonienie systemu, który w dalszych testach będzie mógł być uznawany za wzorcowy.

Porównanie wyników pomiaru jest podwójnie problematyczne. Po pierwsze wynik pomiaru drgań jest wartością nieznaną i bardzo trudną do dokładnego określenia. Nie istnieją łożyska wzorcowe, w których wielkość generowanych drgań byłaby dokładnie znana. Można wzorcować tor pomiarowy czujnika, zmierzyć mimośród docisku czy bicie wrzeciona, ale nie będzie to odwzorowywać poprawnej wartości poziomu drgań badanego łożyska. Po drugie

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

wynik jednego pomiaru to trzy liczby związane z różnymi pasmami częstotliwości drgań. W przypadku rozbieżności pojawia się więc problem wyboru właściwego przedziału częstotliwości.

Badaniom porównawczym zostały poddane trzy przemyślowe systemy pomiarowe drgań łożysk tocznych. Ich charakterystyka została przedstawiona w tabl. I.

Metodyka pomiarów oraz wyniki

Badania zostały przeprowadzone na jednym łożysku typu 62062Z. Pomiedzy kolejnymi pomiarami dociski pneumatyczne były zwalniane, a następnie ponownie włączane. Prędkość obrotowa, zgodnie z przyjętymi normami, wynosiła każdorazowo 1800 obr/min, natomiast siła docisku – 60 N. Uzyskany sygnał pomiarowy był filtrowany na trzy pasma częstotliwości: niskie 50÷300 Hz (LB), średnie 300÷1800 Hz (MB) oraz wysokie 1800÷10 000 Hz (HB). W każdym paśmie częstotliwości została obliczona wartość skuteczna drgań wyrażona w specjalnych jednostkach – andersonach – stosowanych przede wszystkim w przemyśle łożyskowym. Wielkość ta jest ściśle związana z przyjętą prędkością obrotową.

Zależność pomiędzy wyjściową jednostką prędkości drgań ($\mu\text{m/s}$) a andersonem (And) [2, 5] opisuje wzór:

$$1 \text{ And} = 2\pi \cdot 30 \sqrt{\log_2 \frac{f_h}{f_l}} \mu\text{m/s}$$

gdzie: f_h – górna granica pasma częstotliwości, Hz;
 f_l – dolna granica pasma częstotliwości, Hz.

Pomiary drgań łożyska w jednym punkcie

Na pierścieniu zewnętrznym łożyska zaznaczono punkt pomiarowy będący miejscem styku czujnika z łożyskiem. Następnie na każdym systemie zmierzono 40 razy poziom drgań badanego łożyska w zaznaczonym punkcie. Obliczono średnie arytmetyczne z pomiaru, błędy średnie kwadratowe oraz rozstęp wyników dla każdego pasma. Wyniki znajdują się w tabl. II.

TABLICA II. Wyniki pomiarów łożyska w jednym punkcie

	Pasma	Średnia arytmetyczna, And	Błąd średni kwadratowy, And	Rozstęp, And
System 1	LB	5,74	0,44	1,7
	MB	7,40	0,25	1,1
	HB	5,22	0,34	1,7
System 2	LB	5,45	0,21	0,77
	MB	7,13	0,19	1
System 3	LB	4,37	0,19	0,7
	MB	6,86	0,25	1,15
	HB	6,58	0,40	1,75

Trudno sugerować się w tym przypadku różnicami średnich arytmetycznych, gdyż nie jest znany poprawny poziom drgań badanego łożyska tocznego. Teoretycznie mierzy się tę samą wielkość (zakładając, że z każdym obrotem kulki koszyk i pierścień wewnętrzny podczas przemieszczania się powodują te same drgania). Można więc założyć, że im mniejszy rozrzut i rozstęp wyników, tym większa wierność systemu.

Na podstawie analizy wyników można zauważyć brak konsekwencji i w każdym paśmie częstotliwości wierniejsze jest inne stanowisko. Należałoby zatem wybrać jedno

pasmo i na tej podstawie wyznaczyć system wzorcowy. Jedyną sugestią może być tutaj wielkość fizyczna mierzona bezpośrednio.

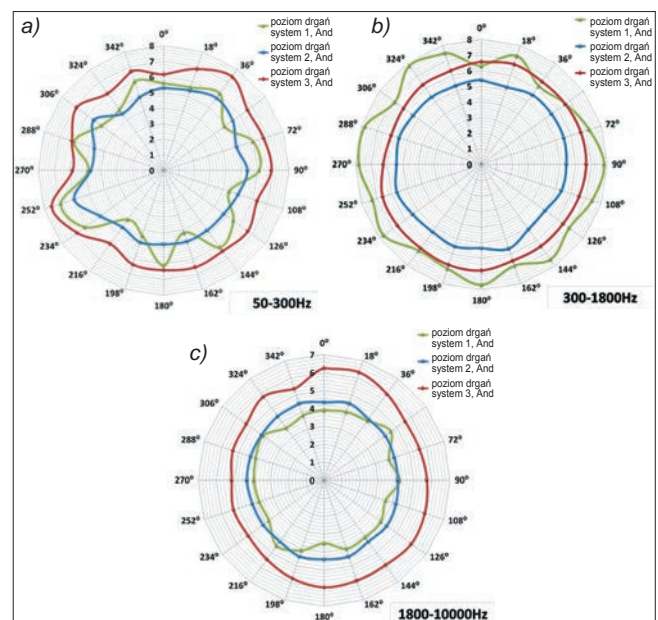
Analiza zależności amplitudowych pomiędzy przemieszczeniem, prędkością a przyspieszeniem w przypadku ruchu sinusoidalnego wskazuje, że w paśmie niskich częstotliwości najlepiej wykrywalną amplitudę ma przemieszczenie, natomiast w paśmie bardzo wysokich częstotliwości największe amplitudy osiąga przyspieszenie. Prędkość drgań najlepiej więc mierzyć w średnim paśmie częstotliwości.

Systemy pomiarowe wykorzystują czujniki elektrodynamiczne, dzięki którym można uzyskać sygnał proporcjonalny do prędkości drgań. Zatem wybrany sygnał drgań można uważać za najbardziej odwzorowujący rzeczywiste wibracje łożyska w paśmie średnim. Zarówno błąd średni kwadratowy, jak i rozstęp wskazują na najworniejszy wynik w paśmie średnim dla systemu 2.

Pomiary drgań łożyska w wielu punktach

Aby określić charakter zależności pomiędzy wynikami uzyskanymi z badanych systemów, na pierścieniu zewnętrznym badanego łożyska naniesiono 20 punktów pomiarowych w jednakowych odstępach. W każdym punkcie wykonano po trzy pomiary, a średnie arytmetyczne wyników posłużyły do zbudowania wykresów (rys. 2).

Poziom drgań w danym punkcie łożyska zależy przede wszystkim od struktury geometrycznej bieżni jego pierścienia zewnętrznego. Wynika to z tego, że jako element styku z czujnikiem jest nieruchomy. Pozostałe komponenty łożyska tocznego (pierścień wewnętrzny, koszyk i kulki) wykonują cykliczne ruchy obrotowe. Jeżeli więc systemy nie powodują swoim działaniem zmian w wyniku, to można się spodziewać korelacji pomiędzy konkretnymi punktami.



Rys. 2. Wyniki pomiarów wartości skutecznej drgań w punktach na obwodzie pierścienia zewnętrznego: a) częstotliwości niskie, b) częstotliwości średnie, c) częstotliwości wysokie

Obliczono współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy systemami, a wyniki zamieszczono w tabl. III. W tym przypadku szczególnie interesujące jest pasmo częstotliwości niskich, gdyż w tym zakresie częstotliwości uwidaczniają się błędy kształtu pierścienia zewnętrznego. Powinny mieć one największy wpływ na różnicę w wynikach w zależności od tego, w jakim punkcie pomiarowym mierzone są drgania.

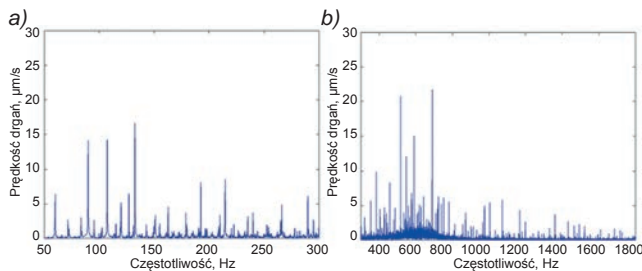
Analiza korelacji pokazuje, że najlepiej skorelowane są systemy 2 i 3. W paśmie niskich i średnich częstotliwości zależność pomiędzy tymi systemami jest silna, a w paśmie wysokich częstotliwości – nawet bardzo silna. System 1 w pierwszych dwóch pasmach słabo koreluje zarówno z systemem 2, jak i systemem 3. Na tym etapie można stwierdzić że system 1 nie będzie brany pod uwagę jako wzorcowy.

Na wykresach na rys. 2 widać, że zmienność wyniku ma inne przyczyny niż w przypadku systemów 2 i 3.

TABLICA III. Współczynnik korelacji Pearsona pomiędzy wynikami uzyskanymi z badanych systemów

Pasma	Korelacja dla kombinacji systemów		
	1↔2	1↔3	2↔3
LB	0,38	0,25	0,83
MB	0,25	0,31	0,85
HB	0,79	0,73	0,93

Pojawiające się na widmie piki w głównej mierze odpowiadają częstotliwościom charakterystycznym dla tego typu łożyska tocznego (przy określonej prędkości obrotowej). Badane łożysko jest fabrycznie nowe i emituje drgania na względnie niskim poziomie.



Rys. 3. Dyskretne widmo amplitudowe sygnału prędkości drgań badanego łożyska: a) pasmo częstotliwości niskich, b) pasmo częstotliwości średnich

Na rys. 3 pokazano częstotliwości niskie oraz średnie. W okolicy pierwszej (108 Hz) i drugiej (216 Hz) harmonicznej częstotliwości pierścienia zewnętrznego widać piki o amplitudzie kolejno: 14,2 µm/s i 214,5 µm/s. Nie są one wyższe od pozostałych, a amplitudą są zbliżone do sąsiadujących pików amplitud pochodzących m.in. od częstotliwości obrotowej (14,9 µm/s) czy kulki (16,7 µm/s). Można zatem przypuszczać, że na pierścieniu zewnętrznym brak jest znaczących defektów, mogących skutkować dużą różnicą w wyniku pomiarów w różnych punktach.

Wiadomo, że punkt może być inny w zależności od tego, w jakim punkcie wykonywany jest pomiar, a korelacja na dwóch systemach wskazuje, że może to być spowodowane strukturą powierzchni geometrycznej pierścienia zewnętrznego. Pozwala to na przyjęcie założenia, że we wzorcowym systemie rozstęp powinien być minimalny. Większe rozstępy wyników na obwodzie mogą świadczyć o niepożądanym poziomie pracy systemu pomiarowego.

Obliczono zatem rozstęp, a wyniki znajdują się w tabl. IV.

TABLICA IV. Rozstęp wartości skutecznej drgań na obwodzie pierścienia zewnętrznego

	System pomiarowy	Rozstęp, And		
		LB	MB	HB
Awers łożyska	1	3	1,6	1,1
	2	1,5	0,65	0,4
	3	1,7	0,75	1,17
Rewers łożyska	1	3,6	1,9	2,5
	2	1,35	0,75	0,85
	3	2,3	0,93	0,96

Założenie o najmniejszym rozstępie spełnia system 2 – w każdym paśmie częstotliwości na jednej i drugiej stronie łożyska. Przeprowadzona analiza pozwala na wytypowanie tego systemu jako wzorcowego. Jest to dodatkowo korzystne ze względu na to, że urządzenie to jest analogowym pierwowzorem pozostałych dwóch nowszych systemów.

Podsumowanie

Określenie systemu wzorcowego jest kluczowe dla dalszych badań mających na celu ustalenie właściwości metrologicznych różnych systemów pomiarowych drgań łożysk tocznych. Przedstawiona metoda wykorzystuje najprostsze narzędzia statystyczne i ma charakter poglądowy. Może zatem służyć do szybkiego wyboru systemu wzorcowego.

Badania zostały przeprowadzone na jednym łożysku, dla którego nie stwierdzono znacznych uszkodzeń. W dalszych badaniach należy zatem zarówno rozszerzyć liczbę łożysk, jak i przeprowadzić badania łożysk tocznych różnych typów i o różnych wymiarach.

Badania ukierunkowane na porównywanie systemów mogą zainteresować odbiorców łożysk, którzy z różnych przyczyn (np. zmiany dostawcy) chcieliby zweryfikować parametry użytkowe otrzymywanych produktów.

Na tak prostym przykładzie, jak wielokrotny pomiar jednego łożyska, widać, że pomimo wykorzystania wzorcowanych urządzeń pojawiają się różnice w wynikach pomiarów. Różnice w budowie stanowisk pomiarowych są zbyt duże, żeby można było na tym etapie określić zalecane rozwiązania konstrukcyjne. Poznanie przyczyn różnic w wynikach pomiarów będzie cenną wytyczną przy wyborze rozwiązań konstrukcyjnych zapewniających zbudowanie stanowiska pomiarowego wiernie określającego drgania generowane przez łożysko toczne.

Publikacja powstała w wyniku pracy badawczo-rozwojowej realizowanej przez Fabrykę Łożysk Tocznych Kraśnik S.A. wspólnie z Politechniką Świętokrzyską w projekcie pt. „Utworzenie Centrum B+R w FŁT Kraśnik S.A.” w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020, która jest współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego nr CBR/1/50-52/2017 z 07.04.2017 r.

LITERATURA

- Tallian T.E., Gustafsson O.G. "Progress in rolling bearing vibration research and control". *ASLE Transactions*. 8. 3 (2008): s. 195–207.
- Adamczak S., Zmarzły P. "Influence of Raceway waviness on the level of vibration in rolling-element bearings". *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 64, 4 (2017): s. 541–551.
- SUGAWARA Laboratories Inc. "Bearing inspection systems Andersonmeter, wavimeter, roundness measurement device, bearing life testing machine, pusher-type torque sensor, and calibrator" (materiały firmowe SUGAWARA).
- Lacey S.J. "An overview of bearing vibration analysis". *Maintenance & Asset Management*. 23, 6 (2008): s. 32–42.
- Inoue H. "Anderson vibration". SUGAWARA Laboratories Inc. 2014 (materiały firmowe firmy SUGAWARA).
- ISO 15242-1:2015 Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 1: Fundamentals.
- ISO 15242-2:2015 Rolling bearings – Measuring methods for vibration – Part 2: Radial ball bearings with cylindrical bore and outside surface.
- "Noise and vibration tester MVH 90E, MVH 200E MVH 90EL, MVH 200EL" (materiały firmowe firmy SKF).
- 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.
- www.predev.com/anderometer.php (dostęp: 01.05.2018).