

Model matematyczny oceny wpływu odchyłki okrągłości i falistości powierzchni bieżni łożysk tocznych na poziom generowanych drgań

Mathematical model of the impact assessment
of roughness and waviness deviations of races surfaces of rolling bearings
on the level of generated vibration

PAWEŁ ZMARZŁY*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.1.5>

W artykule zaprezentowano modele matematyczne, opisujące poziom drgań generowanych przez kulkowe łożyska toczne typu 6304-2z w zależności od wartości odchyłki okrągłości i falistości bieżni wewnętrznej oraz zewnętrznej. Modele pozwalają na ustalenie, który typ odchyłek kształtu ma dominujący wpływ na poziom drgań generowanych w określonych zakresach częstotliwości.

SŁOWA KLUCZOWE: kulkowe łożyska toczne, anderson, drgania, okrągłość, falistość

The article presents mathematical models allowing to describe the level of vibration generated by ball bearings 6304-2z type depending on the value of roughness and waviness deviations of inner and outer bearings races. This models will allow to estimate what type of shape deviations have dominant influence on the vibration level generated in specific frequency ranges.
KEYWORDS: ball rolling bearings, anderson, vibration, roundness, waviness

Oprócz trwałości i momentu oporowego jednym z ważniejszych parametrów eksploatacyjnych łożysk jest poziom generowanych drgań. Nadmierne drgania łożyska toczne mogą świadczyć o jego fabrycznej wadzie lub o propagacji uszkodzeń. Wraz ze wzrostem poziomu drgań zwiększa się hałas mechanizmów i obniża trwałość łożyska, co może skutkować awarią. W związku z tym analiza drgań łożysk tocznych stanowi potężne narzędzie, umożliwiające ocenę stanu nowych oraz pracujących węzłów łożyskowych [1].

Na wartość drgań generowanych przez łożyska toczne wpływa wiele czynników. Wśród nich można wyróżnić: luz promieniowy [2], niewyważenie koszyka, mikrouszkodzenia bieżni lub elementów tocznych [3], zanieczyszczenia [4], wartość odchyłki okrągłości i falistość bieżni [5].

Badania symulacyjne przedstawione w pracy [6] wykazały, że dominujący wpływ na poziom drgań generowanych przez łożyska toczne ma falistość bieżni zewnętrznej. Nadmierna falistość może istotnie wpływać na charakterystykę pracy łożyska. Jest to widoczne zwłaszcza w łożyskach aerostatycznych, gdzie wzrost falistości osiowej powoduje spadek nośności i sztywności łożyska oraz wzrost współczynnika tarcia [7]. Falistość bieżni powinna być również analizowana pod kątem możliwości przenoszenia filmu olejowego przez łożyska toczne [8].

Procedura pomiarowa parametrów struktury geometrycznej powierzchni (SGP) bieżni oraz elementów tocznych jest zazwyczaj zabiegiem niszczącym, ponieważ wymaga demontażu elementów łożyska w celu uzyskania dostępu do powierzchni bieżni oraz kulek. Ponowny montaż elementów łożyska tocznego jest utrudniony lub wręcz niemożliwy i wiąże się z ryzykiem popełnienia błędów montażowych bądź zanieczyszczenia środka smarnego, co może skutkować nadmiernym szumem łożyska podczas jego pracy. Właśnie dlatego należy unikać podobnych zabiegów.

Pomiar poziomu generowanych drgań jest z kolei zabiegiem nieniszczącym i nieinwazyjnym, a przez to powszechnie stosowanym w przemyśle łożyskowym.

Mimo że jest wiele prac badawczych dotyczących analizy drgań łożysk tocznych oraz poszukania czynników wpływających na poziom tych drgań [6,7], to jednak nieliczne z tych publikacji pozwalają na ilościowe określenie wpływu odchyłek okrągłości i falistości na drgania generowane przez łożyska.

Jednym ze sposobów takiej oceny jest opracowanie ogólnych modeli liniowych, bazujących na równaniach regresji. Dzięki tym modelom badacz może w przybliżeniu oszacować wartość drgań w interesującym go zakresie częstotliwości, a także ustalić, który typ odchyłki kształtu bieżni zewnętrznej i wewnętrznej ma dominujący wpływ na poziom drgań. Należy dodać, że w wielu opracowaniach autorzy skupiają się jedynie na analizie odchyłek okrągłości, natomiast pomijają falistość, tymczasem strukturę geometryczną powierzchni bieżni łożyska należy badać całościowo.

Procedura badawcza

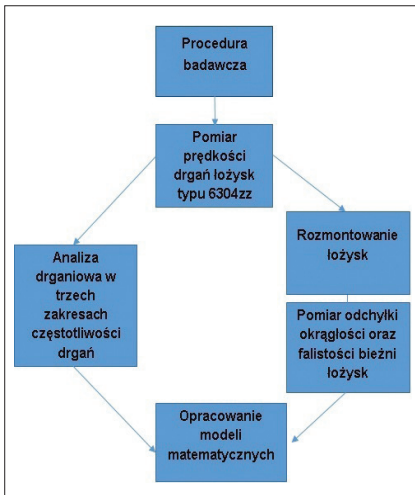
W celu opracowania modeli matematycznych przeprowadzono badania eksperymentalne łożysk tocznych, powszechnie dostępnych na rynku. Zbadano grupę 30 łożysk tocznych typu 6304-2z – ich podstawowe właściwości przedstawiono w tablicy.

Badania wykonano na Politechnice Świętokrzyskiej w ramach projektu „Miniatura 1”, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

TABLICA. Podstawowe właściwości badanych łożysk

Znamionowa nośność dynamiczna C , kN	16,8
Znamionowa nośność statyczna C_0 , kN	7,8
Graniczne obciążenie zmęczeniowe P_0 , kN	0,335
Prędkość graniczna, min^{-1}	15 000

* Dr inż. Paweł Zmarzły (pzmarzly@tu.kielce.pl) – Politechnika Świętokrzyska



Schemat procedury badawczej

Poszczególne kroki procedury badawczej, mającej na celu wyznaczenie modeli matematycznych do oceny wpływu odchyłek okrągłości i falistości bieżni na poziom generowanych drgań, zaprezentowano na schemacie blokowym powyżej.

Pierwszym etapem tej procedury był pomiar prędkości drgań grupy łożysk tocznych za pomocą systemu pomiarowego Anderometr STPPD, wyposażonego w czujnik elektrodynamiczny SG 4.3 firmy FAG [9].

Zgodnie z wymaganiami norm związanych z pomiarem drgań łożysk tocznych badane łożysko jest rozpędzane do prędkości obrotowej 1800 min^{-1} . Pomiar prędkości drgań przeprowadza się pod obciążeniem osiowym w celu wykasowania luzu. Odpowiednie obciążenie osiowe jest zapewnione przez dociśk pneumatyczny. Następnie sygnał pomiarowy jest wzmacniany, filtrowany oraz dzielony na trzy pasma częstotliwości drgań, tj.:

- niskie LB (*low band*) – od 50 do 300 Hz,
- średnie MB (*medium band*) – od 300 do 1800 Hz,
- wysokie HB (*high band*) – od 1800 do 10 000 Hz.

Poziom generowanych drgań został wyrażony za pomocą jednostki anderson (And) [5].

Po pomiarze drgań łożyska rozmontowano, aby uzyskać dostęp do powierzchni bieżni. Następnie przystąpiono do pomiaru profilu okrągłości oraz falistości bieżni wewnętrznej i zewnętrznej łożysk. W tym celu wykorzystano system Talyrond 365 firmy Taylor Hobson.

Zmierzone profile odpowiednio filtrowano w celu uzyskania odchyłki okrągłości oraz falistości – $RONt$. Okrągłość analizowano w zakresie $2 \div 15 \text{ fal/obr}$, a odchyłkę falistości – w zakresie $16 \div 50 \text{ fal/obr}$.

Na podstawie wyników badań wyznaczono – dla każdego zakresu częstotliwości drgań (LB, MB i HB) – modele matematyczne, uwzględniające wartości zmierzonych odchyłek.

Modele matematyczne

Jednym ze sposobów ilościowej oceny związków pomiędzy wieloma zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną jest analiza ogólnych modeli liniowych, bazujących na równaniu regresji [10]. Tego rodzaju model może być opisany ogólną zależnością:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (1)$$

gdzie: y – zmienna zależna (objaśniana); b_0 – wyraz wolny; b_1, b_2, b_k – współczynniki regresji; x_1, x_2, x_k – zmienne niezależne (objaśniające); k – liczba predyktorów.

Autor niniejszego artykułu badał wpływ parametrów SGP bieżni łożysk na poziom generowanych drgań, który był analizowany w określonych zakresach częstotliwości (LB, MB i HB). W tym przypadku predyktorami (zmiennymi niezależnymi) były odchyłka okrągłości oraz odchyłka falistości bieżni wewnętrznej i zewnętrznej łożysk tocznych. W sumie badano cztery zmienne niezależne. Zmienną zależną była natomiast wartość drgań, analizowana w trzech zakresach częstotliwości. Wstępna analiza wyników pomiarowych wykazała, że rozpatrywane parametry wejściowe (predyktory) nie są ze sobą skorelowane. W związku z tym można było przystąpić do opracowania modeli matematycznych w oprogramowaniu Statistica. Estymację współczynników regresji przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów (NK).

Bazując na badaniach eksperymentalnych, zależność (1) przekształcono tak, aby otrzymać ogólny model liniowy, służący do oceny wpływu wartości odchyłki okrągłości oraz falistości bieżni łożysk tocznych na poziom generowanych drgań:

$$LB, MB, HB = b_0 + b_1RONt_{2-15}(PW) + b_2RONt_{16-50}(PW) + b_3RONt_{2-15}(PZ) + b_4RONt_{16-50}(PZ) \quad (2)$$

gdzie: LB, MB, HB – wartości drgań w określonych zakresach częstotliwości; b_0 – wyraz wolny; b_1, b_2, b_3, b_4 – współczynniki regresji; $RONt_{2-15}(PW)$ – odchyłka okrągłości bieżni wewnętrznej, analizowana w zakresie $2 \div 15 \text{ fal/obr}$; $RONt_{16-50}(PW)$ – odchyłka falistości bieżni wewnętrznej, analizowana w zakresie $16 \div 50 \text{ fal/obr}$; $RONt_{2-15}(PZ)$ – odchyłka okrągłości bieżni zewnętrznej, analizowana w zakresie $2 \div 15 \text{ fal/obr}$; $RONt_{16-50}(PZ)$ – odchyłka falistości bieżni zewnętrznej, analizowana w zakresie $16 \div 50 \text{ fal/obr}$.

Na podstawie wyników pomiarów opracowano ogólny model liniowy dla niskiego zakresu częstotliwości drgań (LB), opisany za pomocą zależności:

$$LB = 2,99 + 4,095 \cdot RONt_{2-15}(PW) + 8,465 \cdot RONt_{16-50}(PW) + 2,136 \cdot RONt_{2-15}(PZ) + 7,268 \cdot RONt_{16-50}(PZ) \quad (3)$$

Dla modelu opisanego równaniem (3) uzyskano współczynnik determinacji $R^2 = 0,7$. To oznacza, że wyjaśniono 70% zmiennych zależnych. Poziom istotności badanego modelu jest równy $p = 0,00003$. W związku z tym można uznać, że model matematyczny oceny wpływu parametrów SGP bieżni na poziom drgań, analizowany w niskim zakresie częstotliwości, jest statystycznie istotny. Z zależności (3) wynika, że wzrost odchyłki okrągłości oraz falistości – zarówno bieżni wewnętrznej, jak i zewnętrznej – powoduje wzrost wartości drgań w zakresie częstotliwości od 50 do 300 Hz. Dominujący wpływ mają w tym przypadku odchyłka okrągłości bieżni zewnętrznej oraz odchyłka falistości bieżni wewnętrznej, co potwierdzają uzyskane wysokie wartości standaryzowanych współczynników regresji (dla okrągłości $\beta = 0,69$, dla falistości $\beta = 0,27$).

Ogólny model liniowy dla średniego zakresu częstotliwości drgań (MB) ma postać:

$$MB = 8,39 + 5,272 \cdot RONt_{2-15}(PW) + 1,537 \cdot RONt_{16-50}(PW) + 5,407 \cdot RONt_{2-15}(PZ) + 23,946 \cdot RONt_{16-50}(PZ) \quad (4)$$

Dla modelu opisanego równaniem (4) uzyskano współczynnik determinacji $R^2=0,58$ oraz poziom istotności $p=0,00016$, co również świadczy o tym, że model jest istotny statystycznie. Analizując równanie (4), można zauważyć, że wzrost odchyłki falistości bieżni wewnętrznej oraz odchyłki okrągłości bieżni zewnętrznej powoduje spadek wartości drgań rejestrowanych w zakresie częstotliwości 300÷1800 Hz. Wzrost odchyłki falistości bieżni wewnętrznej oraz odchyłki okrągłości bieżni zewnętrznej powoduje natomiast wzrost wartości generowanych drgań. Dominujący wpływ ma tutaj odchyłka okrągłości bieżni zewnętrznej – standaryzowany współczynnik regresji jest równy $\beta=0,85$.

Równanie regresji otrzymane dla wartości drgań rejestrowanych w wysokim zakresie częstotliwości (HB), tj. 1800÷10 000 Hz, jest następujące:

$$HB = 3,92 + 1,025 \cdot RONT_{2-15}(PW) + 1,537 \cdot RONT_{16-50}(PW) + 0,143 \cdot RONT_{2-15}(PZ) + 0,423 \cdot RONT_{16-50}(PZ) \quad (5)$$

Dla równania (5) współczynnik determinacji jest równy $R^2=0,17$, a poziom istotności – $p=0,289$. To oznacza, że opracowany model matematyczny (5) nie jest istotny statystycznie. Ponadto dla wszystkich zmiennych niezależnych w analizowanym modelu (odchyłki okrągłości oraz falistości bieżni) uzyskano poziom istotności $p > 0,05$, co potwierdza brak istotności statystycznej. W tym modelu wyjaśniono jedynie 17% wszystkich zmiennych zależnych. Można więc stwierdzić, że wartości odchyłek okrągłości oraz falistości bieżni badanych łożysk nie wpływają w znaczący sposób na wartości drgań analizowanych w wysokim zakresie częstotliwości.

Podsumowanie

Na wartości drgań generowanych przez łożyska toczne wpływają rozmaite czynniki. Ze względu na ich mnogość zachodzi potrzeba ilościowej oceny istotności wpływu poszczególnych czynników na drgania rejestrowane w określonym zakresie częstotliwości. Jednym ze sposobów jest opracowanie i analiza modeli liniowych, bazujących na równaniach regresji. Na podstawie tych modeli można oszacować wartości drgań, rejestrowane w wybranym paśmie częstotliwości. Ponadto analiza równań regresji pozwala na wytypowanie czynników mających dominujący wpływ na badany parametr.

Głównym celem badań przedstawionych w niniejszym artykule była ocena wpływu wartości odchyłki okrągłości oraz falistości na poziom drgań łożysk tocznych. Drgania analizowano w trzech zakresach częstotliwości: niskim (od 50 do 300 Hz), średnim (od 300 do 1800 Hz) oraz wysokim (od 1800 do 10 000 Hz). W ramach analizy wyników pomiarowych opracowano trzy modele matematyczne (dla każdego pasma częstotliwości drgań).

Bazując na wynikach badań, można stwierdzić, że jedynie modele opracowane dla niskiego i średniego zakresu częstotliwości drgań są istotne statystycznie, co świadczy o tym, że odchyłki okrągłości oraz falistości bieżni wpływają na wartości drgań rejestrowane w danych zakresach częstotliwości.

Analiza modelu opracowanego dla niskiego zakresu częstotliwości drgań wskazuje (co było do przewidzenia), że wzrost wartości wszystkich zmierzonych odchyłek powoduje wzrost wartości generowanych drgań.

Z kolei w przypadku modelu opracowanego dla średniego zakresu częstotliwości wartości drgań maleją wraz

ze wzrostem odchyłki falistości bieżni wewnętrznej oraz odchyłki okrągłości bieżni zewnętrznej. Może to być efektem wpływu innych czynników, których nie uwzględniono w modelu, takich jak różnice średnic kulek czy występowanie zanieczyszczeń.

Równanie regresji opracowane dla wysokiego pasma częstotliwości drgań okazało się nieistotne statystycznie. W związku z tym należy je pominąć w analizie wpływu odchyłek na poziom generowanych drgań.

Podsumowując analizę wszystkich modeli, można stwierdzić, że najbardziej adekwatne są modele opracowane dla niskiego i średniego zakresu częstotliwości drgań. W przypadku tych modeli największy wpływ na wartości generowanych drgań miała odchyłka okrągłości bieżni wewnętrznej. Biorąc to pod uwagę, należy szczegółowo przeanalizować geometrię pierścienia wewnętrznego. Ponadto na podstawie wyznaczonych modeli oraz zmierzonych wartości odchyłek kształtu możliwe jest oszacowanie przybliżonej wartości drgań dla określonego zakresu częstotliwości.

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki stanowią wstęp do szerszych badań, mających na celu analizę czynników wpływających na poziom drgań generowanych przez łożyska. Autorzy planują rozszerzenie modeli oraz przebadanie innych typów łożysk.

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach działania nr 2017/01/X/ST2/00155 pt. „Modele matematyczne oceny wpływu wybranych parametrów struktury geometrycznej czynnych powierzchni łożysk tocznych na poziom generowanych drgań”.

Artykuł został sfinansowany ze środków na prace badawczo-rozwojową, realizowaną przez Fabrykę Łożysk Toczone Kraśnik S.A. wspólnie z Politechniką Świętokrzyską (projekt pt. „Utworzenie Centrum B+R w FŁT Kraśnik S.A.” w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020) i współfinansowaną ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego nr CBR/1/50-52/2017 z 07.04.2017 r., w której wykorzystano wyniki ww. badań.

LITERATURA

- El-Thalji I., Jantunen E. "Fault analysis of the wear fault development in rolling bearings". *Engineering Failure Analysis*. 57 (2015): s. 470–482.
- Kaczor J. „Wpływ luzu w łożyskach kulkowych na nieprawidłową pracę wału trzypodporowego”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*. 83 (2014): s. 117–126.
- Kiral Z., Karagülle H. "Vibration analysis of rolling element bearings with various defects under the action of an unbalanced force". *Mechanical Systems and Signal Processing*. 20 (2006): s. 1967–1991.
- Mitrovica R.M., Miskovica Z.Z., Djukica M.B., Bakica G.M. "Statistical correlation between vibration characteristics, surface temperatures and service life of rolling bearings – artificially contaminated by open pit coal mine debris particles". *Procedia Structural Integrity*. 2 (2016): s. 2338–2346.
- Adamczak S., Zmarzły P. "Influence of raceway waviness on the level of vibration in rolling-element bearings". *Bull. Pol. Ac.: Tech.* 65, 4 (2017): s. 541–551.
- Liu W., Zhang Y., Feng Z.-J., Zhao J.-S., Wang D. "A study on waviness induced vibration of ball bearings based on signal coherence theory". *Journal of Sound and Vibration*. 333 (2014): s. 6107–6120.
- Wang X., Xu Q., Wang B., Zhang L., Yang H., Peng Z. "Effect of surface waviness on the static performance of aerostatic journal bearings". *Tribology International*. 103 (2016): s. 394–405.
- Ren Z., Wang J., Guo F., Lubrecht A.A. "Experimental and numerical study of the effect of raceway waviness on the oil film in thrust ball bearings". *Tribology International*. 73 (2014): s. 1–9.
- Adamczak S., Stępień K., Wrzochal M. "Comparative study of measurement systems used to evaluate vibrations of rolling bearings". *Procedia Engineering*. 192 (2017): s. 971–975.
- Muciek A. „Wyznaczanie modeli matematycznych z danych eksperymentalnych”. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2012.