

Bartłomiej Ambrożkiewicz, Krzysztof Przystupa, Sylwester Wnuk

Czynniki wpływające na poziom drgań łożysk

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.397

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule została przedstawiona problematyka czynników wpływających na poziom drgań łożysk, jako wielkości stanowiącej kompleksową ocenę kondycji łożyska. Ponadto, poziom drgań generowanych przez łożysko jest jednym z najważniejszych parametrów świadczących o jego potencjale technicznym. Na podstawie doświadczeń badawczych zostały zdefiniowane czynniki wpływające na poziom drgań łożysk, zarówno pochodzące od błędów kształtu [1, 2], jak także mogących wystąpić przy długotrwałej eksploatacji [3]. Opisano metodykę prowadzenia testów poziomu drgań łożysk zgodnie z normą ISO-15242 [4]. Na przykładzie łożyska kulkowego 6208C3, zostały przeprowadzone testy poziomu drgań dla łożysk poprodukcyjnych oraz tych, które pozytywnie przeszły próbę trwałości. Analiza porównawcza obejmowała zestawienie wartości liczbowych poziomu drgań i znalezienie korelacji pomiędzy stopniem zużycia łożyska a wspomnianą wielkością.

Słowa kluczowe: łożyska toczne, poziom drgań łożysk, badania trwałości

Wstęp

Rozwój diagnostyki drganiowej został zapoczątkowany w latach 60-tych XX wieku. Jest on ściśle związany ze stałym rozwojem techniki pomiarowych oraz technologii informatycznych i elektronicznych.

Wspomniane techniki znalazły również swoje zastosowanie w przemyśle łożyskowym, a zwłaszcza w diagnostyce poziomu drgań generowanych przez łożysko [3, 5]. Drgania są jedną z ważniejszych wielkości eksploatacyjnych, która określa stan węzła łożyskowego i w wielu przypadkach stanowi on podstawę do kwalifikacji przydatności danego elementu.

Na etapie pomiaru drgań można wstępnie stwierdzić, czy badane łożysko posiada wady, wynikające z nieprawidłowo przeprowadzonego procesu technologicznego, zwracając szczególną uwagę na obróbkę szlifierską oraz montaż [1, 6]. Oprócz podwyższonego poziomu drgań, wykorzystując techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów istnieje możliwość jednoznacznego stwierdzenia, w którym elemencie łożyska występuje defekt. Każdy z elementów łożyska generuje sygnał o charakterystycznej częstotliwości. Poprzez analizę harmoniczną, wykorzystując Szybką Transformację Fouriera (FFT) [3, 7, 8], otrzymuje się sygnał pomiarowy drgań nieharmonicznych. Następnie może on zostać rozłożony na składowe Fouriera, a następnie określić, czy dana składowa odnosząca się do danej części łożyska, posiada amplitudę większą od zakładanego limitu. Zwięźle opisana metodyka jest jedynie fragmentem wibroakustycznej diagnostyki łożysk. Warunki badań poziomu drgań z wykorzystaniem profesjonalnych wibrometrów są określone w międzynarodowej normie ISO-15242 [4].

Czynniki wpływające na błędy ruchu łożyska powodują drgania jego elementów. Drgania generowane w łożysku są konsekwencją przemieszczeń wywołanych przez błędy ruchu z uwzględnieniem zależnych od przyspieszenia skutków działania sił bezwładności i charakterystyki sztywności łożyska, które są źródłem działających w łożysku sił wewnętrznych. Wspomniana siła bezwładności generuje również zmienne w czasie deformacje elementów łożyska. Drgania powstają wskutek błędów ruchu w określonych warunkach zależnych

od prędkości obrotu oraz obciążenia działającego na łożysko. Podwyższona wartość drgań łożyska negatywnie wpływa na poprawną pracę układu mechanicznego, w którym są zastosowane, a w konsekwencji przyczynia się do zwiększenia poziomu hałasu emitowanego przez mechanizm.

1 Czynniki wpływające na poziom drgań łożysk

1.1 Pomiar drgań łożysk według normy ISO-15242

Procedura pomiaru drgań jest standaryzowana w międzynarodowej normie ISO-15242 dotyczącej pomiaru drgań generowanych przez łożyska toczne [4]. Zgodnie ze wspomnianą normą, pomiar poziomu drgań może być wyrażony w jednostce przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia. Najdokładniejszy pomiar jest osiągany przy pomiarze prędkości drgań, ponieważ ciśnienie akustyczne jest proporcjonalne do sygnału prędkości na powierzchni pomiarowej. Taki pomiar zapewnia najlepszą rozdzielczość sygnału w szerokim paśmie częstotliwości. W sygnale pomiarowym będzie można spodziewać się wielu istotnych harmonicznym z punktu widzenia diagnostyki, szczególnie związanych z częstotliwością charakterystyczną uszkodzonego elementu łożyska. Najważniejsze jest, aby wykorzystany

przetwornik pomiarowy w badaniach zapewniał odpowiednie pasmo przenoszenia przyjęte w pomiarach poziomu drgań 50÷10000Hz. Jest ono podzielone na trzy zakresy pomiarowe: niskie L – 50÷300Hz, średnie M – 300÷1800Hz oraz wysokie H – 1800÷10000Hz.

Większość przetworników pomiarowych wykorzystywanych w badaniach poziomu drgań wykorzystuje zjawisko indukcji elektromagnetycznej lub efekt piezoelektryczny [3, 9]. Sonda pomiarowa w trakcie badań przylega do obciążonego, nieruchomego pierścienia zewnętrznego. Sam pomiar należy przeprowadzić po obu stronach łożyska w tym samym punkcie pomiarowym, aby uzyskać wiarygodne wyniki. Istnieje również możliwość prowadzenia testów w kilku punktach pomiarowych, po wcześniejszym oznakowaniu łożyska, lecz z punktu widzenia produkcji i walidacji produktu, czas odgrywa ważną rolę. Z otrzymanego sygnału pomiarowego przyjmowana do analizy jest wartość skuteczna (RMS) dla danej jednostki pomiarowej. W badaniach poziomu drgań łożysk kulkowych przyjmowana jest stała wartość prędkości obrotowej oraz obciążenie pierścienia zewnętrznego dostosowane do danego typu łożyska.

Prędkość obrotowa

Pomiary poziomu drgań łożysk powinny być prowadzone przy nieobrótującym się pierścieniu zewnętrznym oraz obrótującym się pierścieniu wewnętrznym przy stałej prędkości obrotowej zależnej od wymiarów oraz typu łożyska. W przypadku łożysk kulkowych przyjmowana jest stała wartość prędkości wynosząca 1800obr./min. Wartość ta ma związek z pasmem przenoszenia. Podczas pomiaru dopuszcza się małe przemieszczenia obrotowe obciążonego pierścienia, natomiast odchyłka prędkości obrotowej nie powinna przekroczyć 2% wartości nominalnej.

Obciążenie osiowe

W celu osiągnięcia odpowiedniej kinematyki łożyska podczas testów i ustalonych warunkach pracy, jest ono obciążane siłą osiową

o wartości dostosowanej do jego rozmiarów oraz kąta pracy. Przyłożona siła osiowa ma zapobiec poślizgowi elementów toczonej na bieżni, tak aby nie miał on wpływu na sygnał pomiarowy drgań. Norma ISO-15242 dopuszcza pewne odstępstwa, co do wartości obciążenia, aby osiągnąć warunki testowe zbliżone do warunków eksploatacyjnych w jakich łożysko ma pracować.

Przetworniki pomiarowe drgań wykorzystywane w przemyśle łożyskowym

W aparaturze pomiarowej wykorzystywanej w badaniach poziomu drgań łożysk najczęściej stosowane są przetworniki pomiarowe indukcyjne wykorzystujące zjawisko indukcji elektromagnetycznej oraz przetworniki pomiarowe piezoelektryczne [2, 5].

W pierwszym z nich, przemieszczenia stałego pierścienia zewnętrznego zamieniane są na impuls elektryczny. Drgania powodują ruch cewek w polu magnetycznym, generując w nich siłę elektromotoryczną proporcjonalną do prędkości drgań. Wówczas otrzymujemy informację o tym jakie wartości drgań występują w badanym łożysku.

W przypadku czujników piezoelektrycznych, drgania powodują wprost proporcjonalną do prędkości drgań zmianę wypadkowego momentu elektrycznego w piezoelektryku. Wówczas następuje deformacja powłok elektronowych (względne przemieszczenie atomów i jonów w kryształach). Otrzymany sygnał jest informacją o generowanych drganiach przez łożysko.

1.2 Czynniki wpływające na poziom drgań łożysk

Czynniki wpływające na poziom drgań łożysk posiadają różny charakter. Ich źródło może nie być tylko związane z czynnikami technologicznymi, ale również z wadami konstrukcyjnymi oraz warunkami eksploatacyjnymi. Każde zaburzenie potęguje poziom drgań generowanych przez łożysko i może prowadzić do jego szybszego uszkodzenia lub całkowitego zniszczenia. Przy trudniejszych warunkach eksploatacyjnych, (zwiększonej prędkości obrotowej lub zwiększonym obciążeniu) każdy wpływ defektów występujących w łożysku będzie prowadzić do jego krótszej żywotności.

1.2.1. Czynniki technologiczne

Wśród przyczyn podwyższonego poziomu drgań łożysk należy przede wszystkim wyszczególnić błędy wykonawcze zarysu powierzchni oraz elementów toczonej. W ich skład wchodzi zwłaszcza odchyłki kształtu oraz nierówności powierzchni (faliistość i chropowatość) [1, 2]. Prawidłowe przeprowadzenie procesu technologicznego ma kluczowy wpływ na końcową strukturę geometryczną, a w efekcie na prawidłową pracę gotowego łożyska. Za wpływ jakości powierzchni czynnych oraz elementów toczonej łożyska odpowiada przede wszystkim obróbka szlifierska. Jej efektem ma być przede wszystkim osiągnięcie jak najniższych wartości odchyłek kształtu, a także w ciągłym procesie technologicznym ich powtarzalności. Głównymi czynnikami, które znacznie wpływają na niezgodność wyrobu są m.in. jakość materiału, chłodziwa czy ściernicy, ale również niekorzystne drgania pochodzące od obrotowych elementów szlifierek.

Czynniki konstrukcyjne

Czynniki konstrukcyjne nie mają tak istotnego wpływu na poziom generowanych drgań jak czynniki technologiczne. Z całą pewnością należy wyróżnić następujące cechy łożyska: profil bieżni, podatność na przekoszenia (przemieszczenie pierścieni względem siebie) czy luz kosza łożyska. Również stosowane w łożyskach uszczelnienia powodują wzrost generowanego poziomu drgań. Należy jednak wziąć pod uwagę fakt, że wszystkie wyżej wymienione czynniki konstrukcyjne generują składowe sygnały wyjściowe o małej amplitudzie i nie eliminują łożyska z oddania do eksploatacji.

Czynniki eksploatacyjne

Podczas eksploatacji łożyska dochodzi do naturalnych procesów zużycia powierzchni toczonej [7]. Długotrwałe przetaczanie elementów toczonej po bieżni prowadzi do stopniowych zmian jakościowych w materiale, a w efekcie do wykruszania się fragmentów łożyska i jego całkowitego zniszczenia. Stałe monitorowanie poziomu drgań łożyska w trakcie jego eksploatacji pozwoliłoby na ocenę, kiedy dane łożysko należy wymienić i zastąpić nowym. Nie jest to powszechna praktyka,

ponieważ prowadzona jest diagnostyka poziomu drgań całych mechanizmów na ich obudowie, np. skrzyń biegów. W tej sytuacji nie można jednoznacznie stwierdzić, czy emitowany hałas pochodzi z uszkodzeń łożyska, czy na przykład z ząbienia kół zębatych.

Można wyróżnić kilka czynników eksploatacyjnych, które będą powodowały przyspieszone zużycie łożyska, a w efekcie podwyższenie poziomu drgań. Są to:

- za duże obciążenie działające na łożysko,
- nieodpowiedni dobór środka smarnego,
- nieprawidłowy montaż łożyska,
- przedostawanie się na powierzchnie toczone łożyska, zanieczyszczeń (dostających się wraz z olejem), np. metaliczny pył pochodzący z uszkodzenia kół zębatych.

Czynniki wpływają negatywnie na kondycję łożyska i będą prowadzić do stopniowego zużycia powierzchni toczonej łożyska w efekcie podwyższając poziom generowanych przez nie drgań. Degradacja powierzchni toczonej w końcowym efekcie doprowadzi do jednego z następujących uszkodzeń [10]:

- złuszczeń bieżni (pitting),
- zużycia ścierno-korozyjnego (fretting),
- zatarć,
- wgniecień (przewalcowań) zanieczyszczeń na powierzchni bieżni.

1.3 Metody cyfrowego przetwarzania sygnałów

W algorytmach systemów obliczeniowych wykorzystywanych do pomiaru poziomu drgań łożysk toczonej stosuje się najczęściej Szybką Transformatę Fouriera oraz detekcję obwiedni sygnału [8, 10].

Szybka Transformata FFT

Metoda ta pozwala znaleźć widmo częstotliwościowe próbkowanego sygnału drgań. Surowy sygnał drgań jest silnie nieokresowy i składa się z wielu składowych sinusoidalnych, których dokładne wartości składowych częstotliwościowych. Ich amplitudy można otrzymać przy pomocy FFT. Wówczas można zweryfikować, czy składowe sygnały pochodzą od danego elementu łożyska oraz czy nie przekraczają dopuszczalnego limitu.

Metoda detekcji obwiedni

Metoda ta opiera się na analizie sygnału drgań łożyska. Sygnał należy odfiltrować przy pomocy filtra pasmowo-przepustowego dostosowanego do zakresu częstotliwości opisanego w punkcie 1.1. Otrzymany odfiltrowany sygnał jest następnie demodulowany, celem uzyskania widma obwiedni sygnału, zawierającego niskoczęstotliwościowe modulacje odpowiadające cyklicznie pojawiającym się impulsom pochodzącym od uszkodzeń łożyska. Następnie, wyniki są konfrontowane z częstotliwościami charakterystycznymi dla danego elementu łożyska [11].

2 Opis stanowiska badawczego

Do badań poziomu drgań wykorzystano wibrometr MGG11 (Rys.1) przeznaczony do pomiarów drgań łożysk kulkowych zwykłych oraz skośnych [12].



Rys. 1. Wibrometr MGG11 do badań drgań łożysk; 1 – komputer z oknem pomiarowym, 2 – głośnik, 3 – tachometr, 4 – pneumatyczny układ dociskowy, 5 – gniazdo mocujące trzpienia, 6 – pedał uruchamiający cykl pomiarowy, 7 – manometr, 8 – wyłącznik główny, 9 – reduktor ciśnienia powietrza z filtrem [7]



Rys. 2. Układ dociskowy wibrometru z badanym łożyskiem

Część mechaniczna składa się z układu napędowego, wymiennego trzpienia dedykowanego pod dany wymiar otworu łożyska, układu dociskowego (Rys.2) oraz mechanizmu odpowiadającego za ustawienie przetwornika pomiarowego prędkości drgań we właściwej pozycji na powierzchni pierścienia zewnętrznego.

W stanowiskach pomiaru poziomu drgań łożysk najczęściej stosuje się układy osadzenia trzpienia oparte na stożku Morse'a charakteryzujące się stosunkowo małą odchyłką bicia w kierunku promieniowym oraz łatwym i szybkim przezbrajaniem. Ma to istotne znaczenie w przypadku otrzymania sygnału pochodzącego wyłącznie od obracającego się łożyska. Ponadto, w przypadku badań różnych typów łożysk, ważny jest czas przezbrojenia trzpienia pod średnicę ich otworu. Obciążenie wywierane na łożysko podczas badań realizowane jest przez siłownik pneumatyczny naciskający na czoło łożyska.

3 Eksperyment

W eksperymencie przeprowadzono badania porównawcze poziomu drgań łożysk 6208C3. Do testów wybrano po 10 sztuk łożysk (łącznie 30 łożysk):

- spełniających wymagania dokładności wykonania i cicho bieżności,

- wstępnie zakwalifikowanych jako odrzuty produkcyjne, tzw. braki,
- po pozytywnej próbie trwałości, która wynosi dziesięciokrotność trwałości nominalnej podstawowej ($10 \cdot L_{10h} - 1200$ godzin)

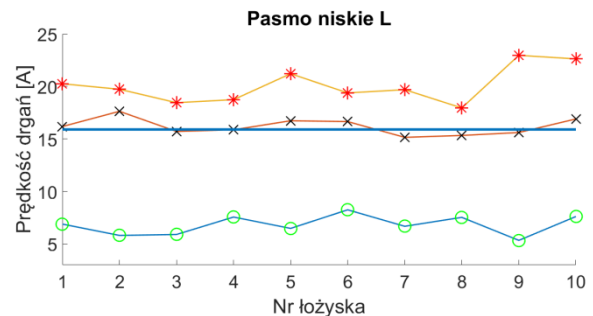
Celem eksperymentu było liczbowe porównanie wartości poziomu drgań i ocena wpływu warunków testowych (odtworzących zbliżone warunki eksploatacyjne) na jego zmianę. Wszystkie próbki przed pomiarem zostały umyte, celem eliminacji wpływu zanieczyszczeń na poziom drgań.

W teście dokonano pomiarów prędkości drgań w Andersonach, jednostce zaproponowanej do pomiarów drgań elementów wirujących w latach 40-tych XX wieku w Stanach Zjednoczonych. Jej stosowanie jest zgodne z warunkami prowadzenia pomiarów opisanych w normie ISO-15242. Należy zaznaczyć, że poziomy dopuszczalnych drgań dla danego typu łożyska, nie są standaryzowane. Są one zwykle specyfikowane przez odbiorców łożysk pod kątem ich zastosowania.

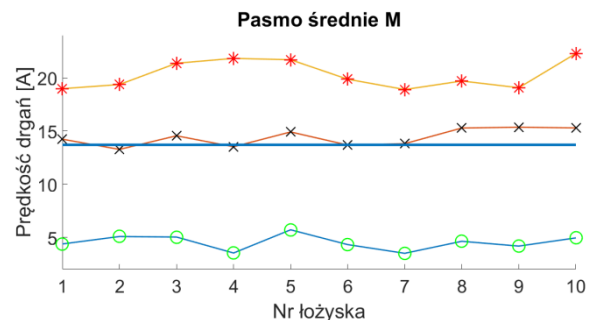
Pomiar prędkości drgań wykonano w trzech pasmach częstotliwości. Dla nieuszczelnionego łożyska 6208C3, smarowanego olejem przyjęte limity prędkości drgań zamieszczono w Tabeli 1.

Tab. 1. Limity prędkości drgań dla łożyska 6208C3

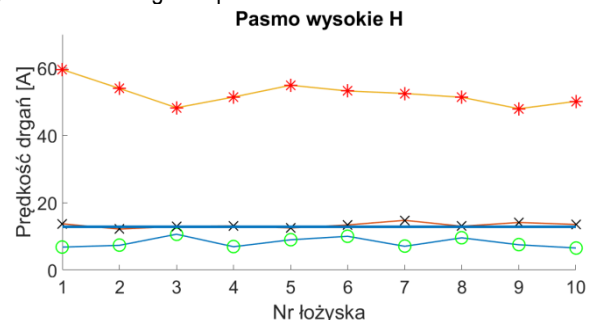
Pasma niskie - L [A]	Pasma średnie - M [A]	Pasma wysokie - H [A]
15,90	13,70	12,83



Rys. 3. Poziom drgań w paśmie niskim L



Rys. 4. Poziom drgań w paśmie średnim M



Rys. 5. Poziom drgań w paśmie wysokim H

Oznaczenia na wykresach:

- - łożyska spełniające wymagania dokładności wykonania,
- ✕ - łożyska niespełniające wymagań dokładności wykonania,
- ☼ - łożyska, które przeszły pozytywną próbę trwałości,
- - oznacza limit poziomu drgań w danym paśmie częstotliwości.

Największe wartości otrzymano w przypadku łożysk po próbie trwałości (Rys.3, Rys.4, Rys.5). Szczególnie można to zaobserwować w przypadku wysokiego pasma H (Rys.5), gdzie średnia prędkość drgań przekracza dopuszczalną wartość 6-7-krotnie. Podobna sytuacja ma również miejsce w przypadku pasma niskiego L (Rys.3) oraz średniego M (Rys.4), ale nie jest to już tak wysoka wartość. Podwyższone wyniki drgań dla wspomnianych łożysk świadczą o spadku jakości i zużyciu powierzchni oraz elementów tocznych. Z całą pewnością wpływ na zużycie miały zanieczyszczenia przedostające się wraz z olejem, po których następnie dochodziło do wielokrotnego przetaczania się elementów tocznych. Rozgniatane zanieczyszczenia przez kulki na bieżni skutkowały powstawaniem licznych wgnieceń oraz rys. Miały one istotny wpływ na poziom generowanych drgań.

W przypadku pozostałych badanych łożysk sporadycznie dochodziło do nieznacznego przekroczenia założonego limitu. Czasami, taki stan nowo wykonanych łożysk, może być spowodowany zanieczyszczeniami powstałymi podczas procesu technologicznego. Stosowane powszechnie w przemyśle łożyskowym myjki ultradźwiękowe nie gwarantują czystości nowych łożysk. Ponadto, wiele zależy od właściwego montażu łożyska na trzpieniu oraz prawidłowego przyłożenia obciążenia.

Podsumowanie

Niniejszy artykuł opisuje czynniki wpływające na poziom drgań łożysk. Ich charakter jest zróżnicowany, począwszy od prawidłowo zrealizowanego procesu technologicznego, kończąc na warunkach eksploatacyjnych. W wykonanej próbie potwierdzono wpływ warunków pracy łożyska na poziom generowanych drgań. Norma ISO-15242 standaryzuje warunki prowadzenia badań poziomu drgań łożysk na specjalistycznych wibrometrach powszechnie stosowanych w przemyśle łożyskowym. Poziom drgań generowanych przez łożysko jest jednym z najważniejszych parametrów świadczących o jego potencjale technicznym i bezpośrednio kwalifikującym łożysko do eksploatacji. Diagnostyka poziomu drgań jest łatwa i krótkotrwała w realizacji, co jest ważnym czynnikiem w przypadku wielkoseryjnej produkcji.

W analizowanym przypadku potwierdzono, że łożyska spełniające wymagania dokładności wymagania powierzchni oraz elementów tocznych generują niższy poziom drgań od łożysk, które były już eksploatowane.

Bibliografia:

1. 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, Vol. 65, No. 4, 2017.

2. 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, Volume 73, May 2014, ss. 1-9.
3. Momono T., Noda B., *Sound and Vibration in Rolling Bearings*, Motion&Control No.6 – 1999.
4. Norma ISO-15242, Rolling Bearings – Measuring methods for vibration.
5. Adamczak S., Wrzochal M., Zmarzły P., *Metody pomiaru drgań łożysk tocznych*, Mechanik 8-9 (2017), ss. 734-736.
6. Adamczak S., *Pomiary geometryczne powierzchni*, WNT 2009.
7. Banach A., Sułowicz M., *Multi-Criterion fault diagnosis of rolling bearings*, Czasopismo Techniczne, Elektrotechnika 2-E/2015.
8. Harlisca C., Szabo L., *Bearing Faults Condition Monitoring – A Literature Survey*, Journal of Computer Science and Control Systems, Volume 5, No.2, October 2012.
9. Munde K.H., Thakre S.B., *A review on bearing fault detection by vibration signature analysis*, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Volume 4, Issue 6, June 2015.
10. Saruhan H., *Vibration analysis of rolling element bearings defects*, Journal of Applied Research and Technology, Volume 12, Issue 3, June 2014, Pages 384-395.
11. Randall R.B., Antoni J., Chobsaard S., *The relationship between spectral correlation and envelope analysis in the diagnostics of bearing faults and other cyclostationary machine signals*, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 15, Issue 5, September 2001, ss. 945-962.
12. Instrukcja – Vibration Tester MGG 11-MC.

Factors influencing bearing vibration level

This article presents the problem of factors influencing bearing vibration level, which is a comprehensive parameter providing information about bearing condition. Basing on technical literature and research experience, factors affecting bearing vibration level will be defined, both originating from shape errors, as well as those that may have occurred during long-term operation. Additionally, the methodology is described in accordance with ISO-15242 standard, concerning bearing vibration level tests performance. Experiment considered bearing vibration level measurements for bearing 6208C3, for post-production parts and those that have passed durability test. Comparative analysis included a compilation of numerical values and finding a correlation between level of bearing wear and mentioned parameter.

Keywords: ball bearings, bearing vibration level, bearing life testing.

Autorzy:

mgr inż. **Bartłomiej Ambroźkiewicz** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatykacji, b.ambrozkiwicz@pollub.pl / Inżynier ds. Testów, FŁT-Kraśnik S.A., bambrozkiwicz1@flt.krasnik.pl.

dr inż. **Krzysztof Przystupa** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatykacji, k.przystupa@pollub.pl.

mgr inż. **Sylwester Wnuk** – Inżynier ds. Badań i Rozwoju, FŁT Kraśnik S.A., swnuk@flt.krasnik.pl.