

Bartłomiej Ambrożkiewicz, Krzysztof Przystupa, Sylwester Wnuk

Wpływ wartości odchyłki okrągłości na poziom drgań łożysk

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.398

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

Niniejszy artykuł rozpatruje wpływ odchyłki okrągłości na poziom drgań generowanych przez łożysko. Jednym z błędów kształtu odgrywającym kluczową rolę w eksploatacji łożysk tocznych jest odchyłka okrągłości. Jej wartość bezpośrednio przyczynia się do miary wielkości drgań węzła łożyskowego. W publikacji opisano dokładnie znaczenie oraz metodykę pomiaru odchyłki okrągłości w odniesieniu do otrzymanego w procesie technologicznym zarysu kształtu powierzchni tocznej łożyska. Eksperyment obejmował dobór pierścieni wewnętrznych łożyska 6009C3 ze zmienną odchyłką okrągłości, a następnie ich montaż z pierścieniami zewnętrznymi charakteryzującymi się małym rozrzutem oraz małą wartością wspomnianej odchyłki. W kolejnym etapie przeprowadzono badania poziomu drgań łożysk. Na koniec, otrzymane rezultaty powiązano z wartością odchyłki okrągłości i na ich podstawie opracowano modele regresji liniowej oraz wyznaczono współczynniki korelacji Pearsona.

Słowa kluczowe: łożyska toczne, błędy kształtu, poziom drgań łożysk

Wstęp

Prawidłowy zarys powierzchni elementów maszyn, osiągnięty zgodnie z założeniami procesu technologicznego odgrywa zasadniczą rolę w przypadku warunków eksploatacyjnych. Dokładność wykonania, zwłaszcza części wykonujących ruch obrotowy przekłada się bezpośrednio na pracę całego mechanizmu, tj. efektywność przenoszenia ruchu oraz osiągnięcie prawidłowego stanu dynamicznego. Dlatego, tak ważna jest precyzja i powtarzalność wykonania powierzchni czynnych elementów obrotowych.

Niestety, poszczególne mechaniczne obróbki wykończeniowe powierzchni są procesami stochastycznymi [1, 2]. Każda z prowadzonych obróbek mechanicznych charakteryzuje się zmiennością w czasie, jak i również wymiary geometryczne obrabianych elementów osiągane w tych procesach mają losowy charakter. Brak kontroli nad procesem technologicznym prowadzi do powstawania błędów kształtów, często przekraczających swoją dopuszczalną wartość. Dlatego tak ważny jest jego stały monitoring, w formie częstych pomiarów oraz zastosowanie precyzyjnego sprzętu pomiarowego. Wówczas można mieć pewność, co do osiągnięcia narzuconych tolerancji zgodnych ze specyfikacją geometrii wyrobów (GPS – Geometrical Product Specification) [3, 4] dla danej serii produkcyjnej.

W przypadku łożysk tocznych, jednym z błędów kształtów wpływających głównie na ich eksploatację jest okrągłość powierzchni tocznych [5, 6]. Wartość przytoczonej odchyłki kształtu będzie odgrywała kluczową rolę w kontekście poziomu drgań generowanych przez łożysko, czyli wielkości stanowiącej kompleksową ocenę kondycji i potencjału technicznego łożyska. Znalezienie korelacji pomiędzy wyżej wymienionymi wielkościami, może stanowić ważny krok w kierunku poprawy powtarzalności i optymalizacji procesu obróbki szlifierskiej, a zwłaszcza w odniesieniu do szlifowania powierzchni tocznych łożyska [7, 8]. Obecnie projektowane konstrukcje łożysk muszą charakteryzować obniżonym poziomem drgań, a określenie jego zależności od wartości odchyłek kształtu jest ważne z punktu widzenia procesu technologicznego.

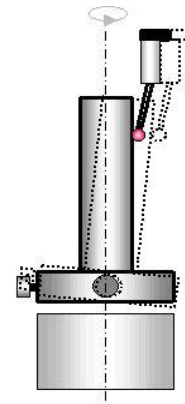
1. Pomiary zarysu okrągłości

Pomiar zarysu okrągłości odbywa się przy pomocy technik obrotowych poprzez pomiar odchyłek promieniowych od obracającej się osi referencyjnej. Wspomniana oś odniesienia jest stała i staje się głównym punktem dla wszystkich pomiarów w danej serii pomiarowej.

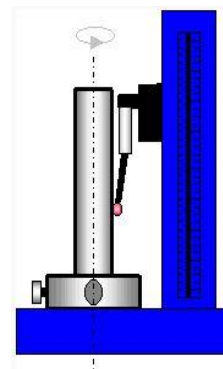
Jedną z metod pomiaru zarysu okrągłości jest metoda pomiaru zmian promienia przy pomocy przyrządów stykowych. Jej zaletą jest precyzja w zakresie otrzymywanych wyników, dlatego stosowana jest powszechnie na produkcyjnych stanowiskach pomiarowych oraz w maszynach produkcyjnych.

W metodzie pomiaru zmian promienia, wyniki otrzymuje się głównie przy pomocy następujących przyrządów pomiarowych:

- z obrotowym wrzecionem, wówczas mierzony detal zamocowany jest współosiowo z wrzecionem. Obracająca się końcówka przetwornika pomiarowego styka się z powierzchnią stałego elementu i mierzona jest zmiana promienia w stosunku do osi wrzeciona (Rys.1).
- z obrotowym stołem, w tym przypadku mierzony element umieszczony jest w zacisku obrotowego stolika. Zmiany wartości promienia odnoszone są względem referencyjnego układu współrzędnych umieszczonego w osi wrzeciona (Rys.2).



Rys.1 Schemat pomiaru zarysu okrągłości z obrotowym wrzecionem [9]



Rys.2 Schemat pomiaru zarysu okrągłości z obrotowym stołem [9]

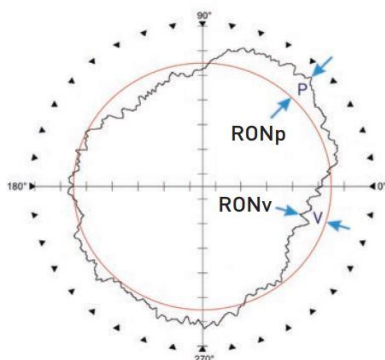
Jedną z wielkości zarysu okrągłości powszechnie wykorzystywaną do oceny jakości wykonania powierzchni czynnych łożysk jest

odchyłka okrągłości, stanowiąca największą odległość punktów zarysu rzeczywistego. Jest to suma największego wzniesienia oraz wgłębienia w zmierzonym profilu [3, 10, 11] (1).

$$RON_t = RON_p + RON_v \quad (1)$$

gdzie: RON_p – największa wartość wzniesienia w zarysie okrągłości,
 RON_v – największa wartość wgłębienia w zarysie okrągłości,
 RON_t – sumaryczna wartość odchyłki okrągłości.

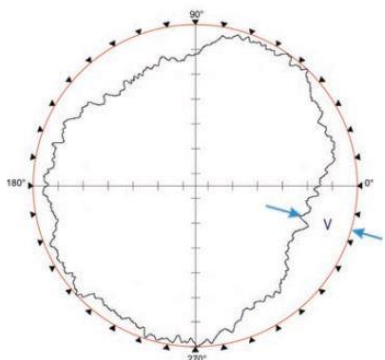
Graficzna reprezentacja zarysu okrągłości wraz z zaznaczoną lokalną maksymalną oraz minimalną odchyłką okrągłości zaprezentowane są na Rys.3.



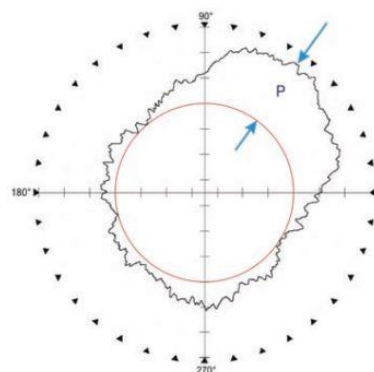
Rys.3 Wartość odchyłki okrągłości ustalonej dla okręgu odniesienia wyznaczonego metodą najmniejszych kwadratów (LSCI – Least Squares Circle) [10]

Oprócz okręgu odniesienia dla wartości odchyłki okrągłości wyznaczonego metodą najmniejszych kwadratów, stosuje się również następujące:

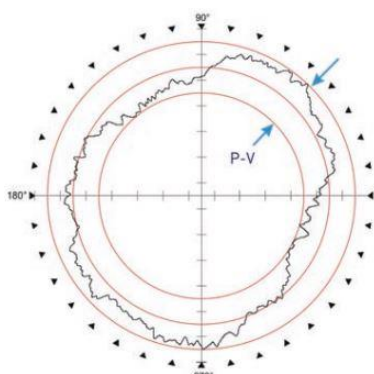
- najmniejszy okrąg opisany (MCCI – Minimum Circumscribed Circle), najmniejszy możliwy okrąg, który może zostać opisany na zmierzonym lub przekształconym zarysie okrągłości (Rys.4),
- największy okrąg wpisany (MICI – Maximum Inscribed Circle), największy możliwy okrąg, który może być wpisany do zmierzonego lub przekształconego zarysu okrągłości (Rys.5),
- okręgi najmniejszej strefy (MZCI – Minimum Zone Reference Circles), dwa współśrodkowe okręgi, obejmujące zmierzony lub przekształcony zarys okrągłości, których różnica promieni jest najmniejsza (Rys.6).



Rys.4 Wartość odchyłki okrągłości zdefiniowana przy pomocy najmniejszego okręgu opisanego (MCCI) [10]



Rys.5 Wartość odchyłki okrągłości zdefiniowana przy pomocy największego okręgu wpisanego (MICI) [10]



Rys.6 Wartość odchyłki okrągłości zdefiniowana przez okręgi najmniejszej strefy (MZCI) [10]

2. Odchyłka okrągłości a poziom drgań łożysk

Wpływ błędów wykonawczych zarysu powierzchni toczonego łożyska na poziom drgań generowanych przez łożysko został zbadany i wykazany w kilku pracach [12, 13, 14]. W poprawnie przeprowadzonym procesie obróbki szlifierskiej dąży się do powtarzalności oraz osiągnięcia możliwie jak najmniejszej wartości odchyłki okrągłości. Każda niedoskonałość uzyskanego zarysu kształtu powierzchni, będzie źródłem dodatkowych składowych wyższych harmonicznych, oprócz charakterystycznych dla poszczególnych elementów łożyska [15]. Na samą jakość wykonania powierzchni będą wpływały czynniki pochodzące od stanu zastosowanych narzędzi oraz od zaburzeń w dynamice prowadzonego procesu technologicznego obróbki szlifierskiej. Elementami, które mają wpływ na jakość wykonania zarysu są następujące:

- zastosowany materiał wsadowy,
- wykorzystane chłodziwo,
- jakość ściernicy.

Oprócz, wyżej wymienionych czynników, na kształt uzyskanego zarysu powierzchni będą wpływały zakłócenia w procesie obróbki szlifierskiej do których należą [16]:

- niewłaściwe osadzenie detalu podczas obróbki,
- niewyważenie ściernicy lub wrzeciona,
- szlifowanie bezkłowe,
- drgania elementów obrabiarek.

Każdy z wyżej wymienionych czynników będzie mieć wpływ na uzyskany zarys powierzchni. W głównej mierze na charakter wykresu okrągłości oraz pojawienie się wyższych harmonicznych będą wpływały niezgodności w procesie technologicznym. W efekcie końcowym, będą one również wpływać na poziom drgań, generowanych przez łożysko.

3. Opis stanowiska badawczego

Powszechnie stosowanym urządzeniem wykorzystywanym do pomiarów zarysów kształtu jest okragłościomierz Talyrond firmy Taylor Hobson. Oprócz wspomnianej odchyłki okragłości istnieje również możliwość wysoce precyzyjnego pomiaru chropowatości oraz konturu powierzchni.

Układ pomiarowy stanowiska został zaprojektowany pod kątem stabilności i dokładności uzyskiwanych wyników. Za taki stan odpowiada zastosowanie w głowicy pomiarowej wrzeciona z łożyskiem powietrznym charakteryzującym się bardzo niskim współczynnikiem tarcia. Wykorzystany w eksperymencie model, to Talyrond 565H (Rys.7). Do szczegółowego zobrazowania kształtu wyprodukowanego detalu, dany model wykorzystuje pomiar geometrii w trzech osiach. Ponadto, możliwe jest przeprowadzenie analizy harmonicznej i uzyskanie informacji o udziale poszczególnych składowych w badanym zarysie kształtu [17].



Rys.7 Okragłościomierz Talyrond 565H [17]

W kolejnej części testów, do badań poziomu drgań łożysk zastosowano wibrometr MGG11 [18], wykorzystywany do pomiarów drgań łożysk kulkowych zwykłych oraz skośnych (Rys.8).

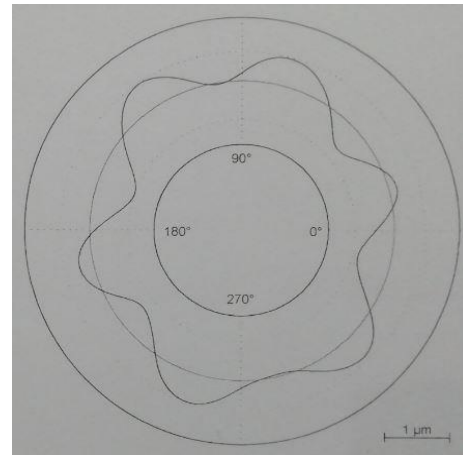


Rys.8 Wibrometr MGG11 przeznaczony do badań drgań łożysk

4. Eksperyment

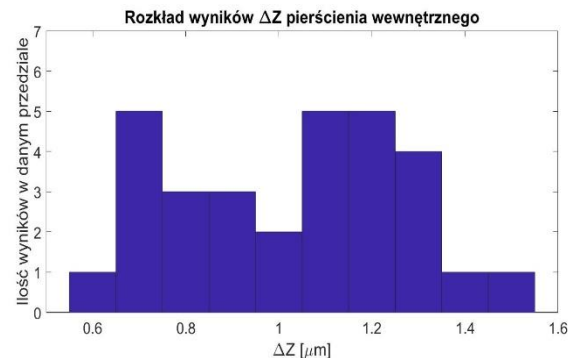
Celem przeprowadzonego eksperymentu było zbadanie wpływu wartości odchyłki okragłości na poziom drgań łożysk. Do jego zbadania wybrano 30 sztuk pierścieni z dużym rozrzutem wartości odchyłki okragłości ΔZ pierścienia wewnętrznego. W celu uwydatnienia wpływu wartości odchyłki okragłości na poziom drgań łożysk, podczas produkcji pierścieni wewnętrznych celowo doprowadzono do niewyważenia ściernicy, aby uzyskać charakterystyczny zarys kształtu występujący

podczas takiego defektu obrabiarki. Uzyskany wykres okragłości wyróżnia się periodycznością oraz występowaniem 6-ciu fal na obwód (Rys.9).



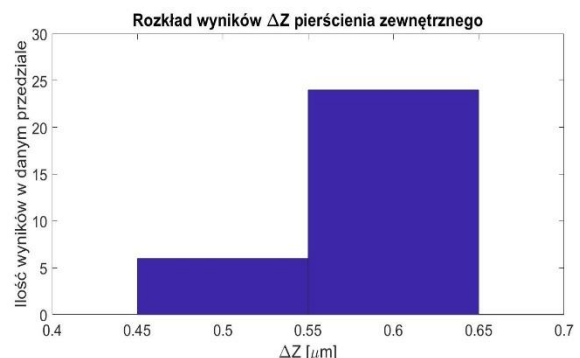
Rys.9 Wykres okragłości uzyskiwany podczas niewyważenia ściernicy szlifierki

W każdym wybranym do badań pierścieniu wykreślono jego wykres okragłości oraz uzyskano wartości odchyłki okragłości ΔZ . Dla próby składającej się z 30-tu elementów populacji uzyskano rozrzut odchyłki okragłości na poziomie 0,873 μm .



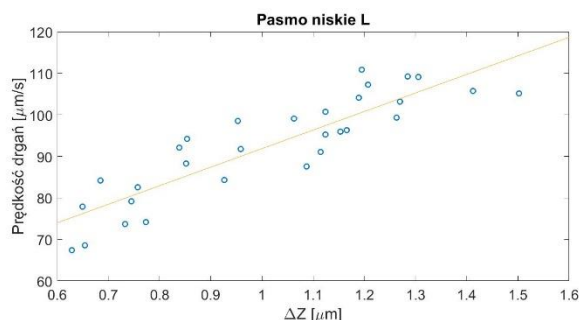
Rys.10 Histogram przedstawiający rozrzut wyników odchyłki okragłości ΔZ pierścienia wewnętrznego

W kolejnym etapie badań z serii produkcyjnej wybrano losowo 30 sztuk pierścieni zewnętrznych łożyska kulkowego 6009C3. Pomiar odchyłki okragłości wykazał jej rozrzut z próby na niskim poziomie wynoszącym 0,129 μm . Tak nieznaczny rozrzut miał za zadanie nie rzutować na wartość poziomu drgań.

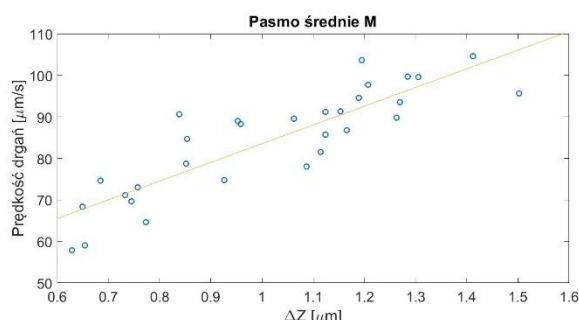


Rys.11 Histogram przedstawiający rozrzut wyników odchyłki okragłości ΔZ pierścienia zewnętrznego

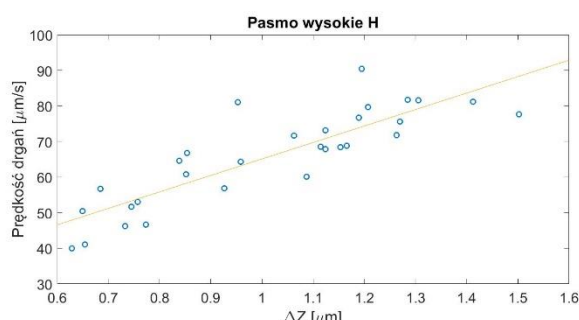
Następnie, tak dobrane pierścienie zostały zmontowane w całość i poddane badaniom drgań. Wyniki przedstawione w formie prędkości drgań łożysk zostały oszacowane w trzech pasmach pomiarowych: L – niskim (Rys. 12), M – średnim (Rys. 13) oraz H – wysokim (Rys. 14).



Rys. 12. Poziom drgań w paśmie niskim L



Rys. 13. Poziom drgań w paśmie średnim M



Rys. 14. Poziom drgań w paśmie wysokim H

Dla otrzymanych rezultatów poziomu drgań w poszczególnych pasmach zostały również wyznaczone równania modeli regresji liniowej oraz określono współczynniki korelacji liniowej Pearsona. Zostały one zamieszczone w Tabeli 1:

Tab. 1. Równania modelu regresji liniowej oraz współczynniki korelacji liniowej Pearsona

Pasma niskie - L	
Równanie modelu regresji liniowej	$y = 90,0267 + 2,4846x$
Współczynnik korelacji liniowej Pearsona R	0,8842
Pasma średnie - M	
Równanie modelu regresji liniowej	$y = 80,4787 + 3,1923x$
Współczynnik korelacji liniowej Pearsona R	0,9129
Pasma wysokie - H	
Równanie modelu regresji liniowej	$y = 60,2273 + 4,1187x$
Współczynnik korelacji liniowej Pearsona R	0,9283

Wyznaczone równania modeli regresji liniowej pokazują silną zależność pomiędzy poziomem drgań generowanym przez łożysko a odchyłką okrągłości. Nie jest to wprawdzie model idealny, gdyż należałoby brać pod uwagę większy zakres wartości odchyłki oraz z określonym gradientem. Tutaj z pomocą przychodzi inne narzędzie statystyczne jakim jest wyznaczony współczynnik korelacji liniowej Pearsona, w każdym z przypadków bliski jedności. Uzyskane wartości potwierdzają silną korelację pomiędzy odchyłką okrągłości a poziomem drgań.

Podsumowanie

W artykule poruszono kwestię interpretacji zarysu okrągłości w odniesieniu do jakości powierzchni uzyskiwanej w procesie technologicznym. Jej stan będzie bezpośrednio wpływać na eksploatację większych zespołów mechanicznych, np. poprzez podwyższony poziom drgań generowany przez łożysko. Jakość powierzchni zależy od wielu czynników, które zostały przedstawione wcześniej w jednym z rozdziałów, lecz w niniejszym artykule zbadano wpływ zmiany wartości odchyłki okrągłości pierścienia wewnętrznego na poziom drgań generowanego przez węzeł łożyskowy. Ze względu na fakt, że każdy proces obróbki mechanicznej jest procesem stochastycznym, pierścienie łożyska 6009C3 zostały dobrane pod kątem wartości odchyłki okrągłości w taki sposób, aby uzyskać jej szeroki zakres.

Wyniki przeprowadzonych badań poziomu drgań wykazały silną korelację pomiędzy poziomem drgań generowanym przez łożysko a wartością odchyłki okrągłości. Na ich podstawie zostały również opracowane modele regresji liniowej oraz zostały wyznaczone współczynniki korelacji Pearsona. Uzyskanie informacji o istnieniu pewnej zależności pomiędzy wartością zarysu kształtu jest cenne z perspektywy poprawy procesu technologicznego, tak aby doprowadzić do jego optymalizacji i uzyskiwać detale o jak najwyższej jakości, tj. o jak najniższej wartości odchyłki kształtu.

Bibliografia:

1. Kacalak W., Kasprzyk M., Krzyżyński T., *On modelling of stochastic processes of abrasive wear and durability of grinding wheel*.
2. Litak G., Rusinek R., *Identification of turning and milling processes by stochastic Langevin equations*, NSC 2012 – 4th IEEE International Conference of Nonlinear Science and Complexity, August 6-11, 2012, Budapest Hungary.
3. Adamczak S., *Pomiary geometryczne powierzchni*, WNT 2009.
4. Białas S., Humienny Z., Kiszka K., *Metrologia z podstawami specyfikacji geometrii wyrobów (GPS)*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2014.
5. Chen G., Wang B., Mao F., *Effects of raceway roundness and roller diameter errors on clearance and runout of a cylindrical roller bearing*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, October 30, 2012.
6. Lancaster A., Dury M., *Measurement of the surface texture of large roller bearings*, The National Physical Laboratory (NPL), 2017.
7. Zhou Y.K., Xue Y.J., Chen Z.Q., Yu Y.J., Li J.S., Ma W., *Effect of geometric error of bearing parts on the radial runout of rolling bearing*, 2nd Annual International Conference on Advanced Material Engineering (AME 2016).
8. Song F, Li J., Liu Y., *Influence of raceway roundness error on running accuracy of cylindrical roller bearings*, Bearing, May 2011, 1-4.
9. *Exploring Roundness – A fundamental guide to the measurement of cylindrical form*, 3rd Edition, Taylor Hobson 2014.

10. *A guide to the Measurement of Roundness*, Taylor Hobson Precision.
11. Whitehouse D.J., *Handbook of Surface and Nanometrology*, Taylor and Francis Book 2014.
12. 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.
13. Kottrich H., Reithuber F., *The magic of roundness*, Evolution 15th May 1998.
14. Harnoy A., *Bearing Design in Machinery*, Marcel Dekker Inc. 2002.
15. Saruhan H., Sandemir S., Cicek A., Uygur I., *Vibration Analysis of Rolling Element Bearings Defects*, Journal of Applied Research and Technology, Vol.12 Issue 3, June 2014, pp. 384-395.
16. *White Paper – Harmonic Analysis*, Taylor Hobson.
17. *Talyrond 565/585H – A revolutionary concept in automated roundness inspection*, Taylor Hobson.
18. Instrukcja – Vibration Tester MGG 11-MC.
19. Zou H.K., Tuncali K., Silverman S., *Correlation and Simple Linear Regression*, Statistical Concepts Series, Radiology 2003.

Influence of roundness deviation value on bearing vibration level

This article investigates the influence of roundness value on vibration level generated by bearing. One of the shape errors playing a key role in bearing's operation is roundness deviation. Its value directly influence on vibration level generated by bearing. In the paper, the significance and methodology of roundness measurements in reference to profile of rolling surface received in technological process. Experiment consisted of inner rings matching of bearing 6009C3 with variable roundness deviation with outer rings characterized with little variability of mentioned deviation. In the next step bearing vibration level was examined. In the end, obtained results were combined with values of roundness deviation and basing on them, models of linear regression were obtained, also Pearson's correlation coefficients were calculated.

Keywords: ball bearings, shape errors, bearing vibration level

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