

Analiza metod pomiaru i oceny odchyłek kulistości

An analysis of methods of measurement and evaluation of sphericity deviations

STANISŁAW ADAMCZAK
KRZYSZTOF STĘPIEŃ*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.2.27>

Zagadnienia związane z pomiarami i oceną odchyłek kulistości nie są uregulowane w aktualnych dokumentach normalizacyjnych. Poza maszynami współrzędnościowymi nie ma również na rynku systemów do pomiaru odchyłek kształtu elementów kulistych. W artykule przedstawiono opisane w literaturze metody pomiaru i oceny odchyłek kulistości oraz perspektywy ich zastosowania w warunkach przemysłowych.

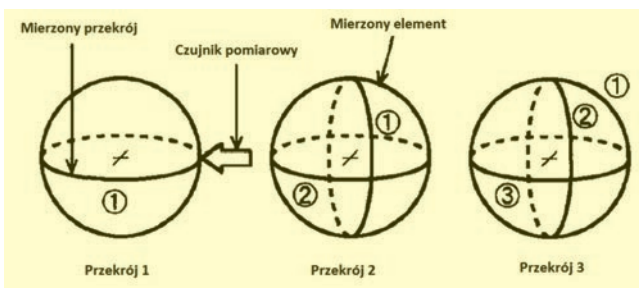
SŁOWA KLUCZOWE: pomiar, odchyłka kształtu, kulistość

Problems relating to measurements and evaluation of sphericity deviations are not described in contemporary standardization documents. Apart from coordinate measuring machines, in global market there are no commercially available systems allowing such measurements. The paper presents methods and systems for measurements of sphericity deviations that are described in the scientific literature as well as a perspective of their application under industrial conditions.

KEYWORDS: measurement, form deviation, sphericity

Normy krajowe i międzynarodowe nie definiują pojęcia odchyłki kulistości, ani nie podają zaleceń dotyczących pomiaru zarysów kulistości. Informacje na ten temat można znaleźć jedynie w dokumentach przemysłowych.

Przemysłowe dokumenty normalizacyjne opisują następującą strategię pomiaru elementów kulistych: mierzone są zarysy okrągłości w trzech wzajemnie prostopadłych przekrojach badanej części (rys. 1). Wyniki pomiarów są nanoszone na wykresy biegunowe, a na ich podstawie określana jest w przybliżeniu wartość odchyłki kulistości. Taka metoda daje oczywiście jedynie przybliżone wyniki, gdyż znaczna część powierzchni elementu nie jest badana. Należy jednak zaznaczyć, że najczęściej pomiar zarysów kształtu elementów kulistych ogranicza się do kontroli wartości odchyłki okrągłości w jednym przekroju.



Rys. 1. Strategia oceny odchyłki kulistości opisana w normach przemysłowych [1]

Normy przemysłowe określają najczęściej, że najlepszym elementem odniesienia w ocenie wartości odchyłek kształtu kulistych części maszyn jest najmniejszy okrąg opisany na mierzonym zarysie.

Metody pomiaru zarysów kulistości

Ocena odchyłek kształtu elementów kulistych na podstawie wyników pomiaru zarysów okrągłości nie wymaga zastosowania specjalistycznych systemów do pomiaru zarysów kulistości – w takich przypadkach wykorzystuje się typowe przyrządy do pomiaru zarysów okrągłości. Są to dobrze znane, zaawansowane technicznie przyrządy oparte na zasadzie pomiaru zmian promienia, używane do kontroli odchyłek kształtu elementów obrotowych (np. w przemyśle łożyskowym).

Z tego powodu na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach opracowano koncepcję wykorzystania przyrządu promieniowego do pomiaru zarysów kulistości. Opiera się ona na użyciu wysoko dokładnego przyrządu promieniowego wyposażonego dodatkowo w układ do pozycjonowania mierzonego elementu [2]. Układ ten umożliwia kontrolowany obrót przedmiotu wokół osi poziomej oraz osi wrzeczona przyrządu. Podczas obracania przedmiotu rejestruje się zarysy okrągłości w wielu przekrojach poprzecznych. Zmierzone zarysy tworzą siatkę punktów pomiarowych, na podstawie których wyznaczana jest powierzchnia odniesienia oraz wyliczane są odchyłki kształtu [3]. Koncepcję tę przedstawiono schematycznie na rys. 2.

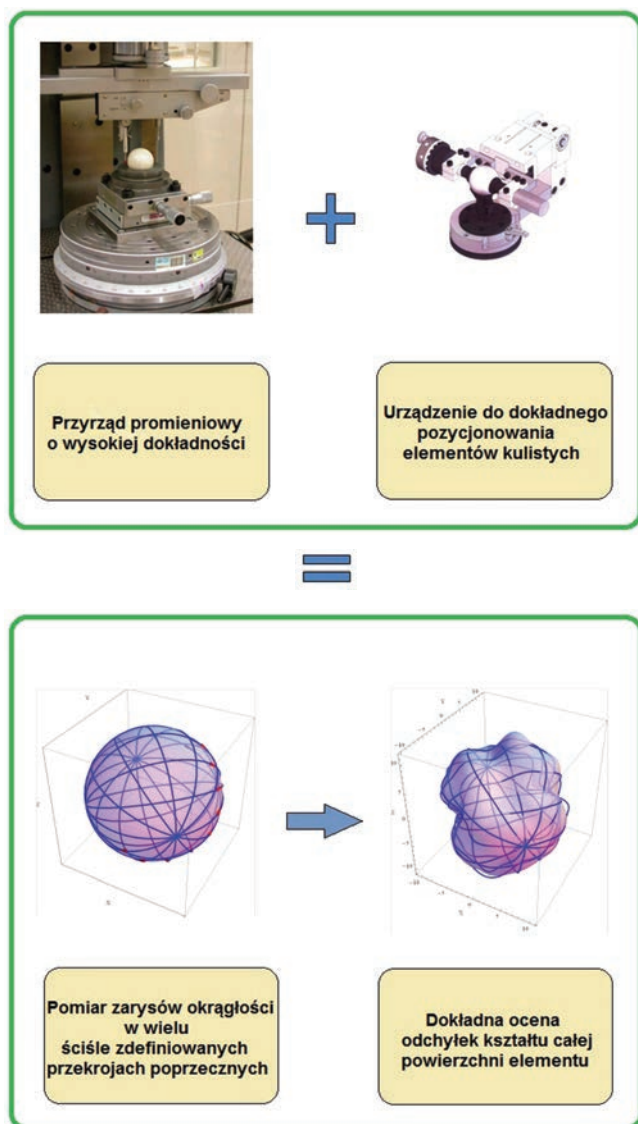
Aby dokładnie ocenić odchyłki kształtu powierzchni na podstawie zmierzonych zarysów okrągłości, konieczne było rozwiązanie szeregu problemów teoretycznych, dotyczących zwłaszcza:

- wyboru strategii pomiarowej,
- opracowania metody złożenia i filtracji zarysów,
- obliczenia parametrów sfery odniesienia,
- zdefiniowania parametrów kulistości,
- aproksymacji zmierzonego zarysu za pomocą powierzchni.

Prace teoretyczne nad opracowaniem metody zakończyły się sukcesem i zaowocowały zbudowaniem stanowiska do pomiaru odchyłek kulistości części maszyn. Wyniki badań oraz eksperymentalnej weryfikacji koncepcji zamieszczono w pracach [2–4].

W literaturze opisane są także próby wykorzystania do oceny odchyłki kulistości metody odniesieniowej trójpunktowej (np. praca [5]). Oczywiście, wykorzystując zasadę pomiaru odniesieniowego należy pamiętać, że pewne składowe harmoniczne mierzonych zarysów nie będą wykrywane przez system pomiarowy.

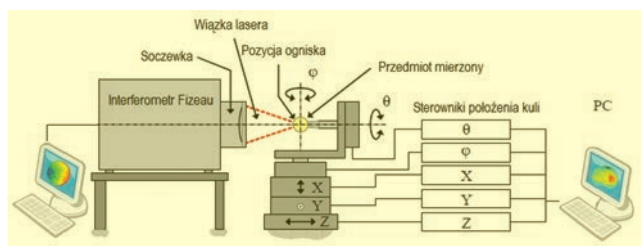
* Prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak dr h.c. (adamczak@tu.kielce.pl), dr inż. Krzysztof Stępień (kstepien@tu.kielce.pl) – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej



Rys. 2. Schemat koncepcji pomiaru zarysów kulistości metodą promieniową [2]

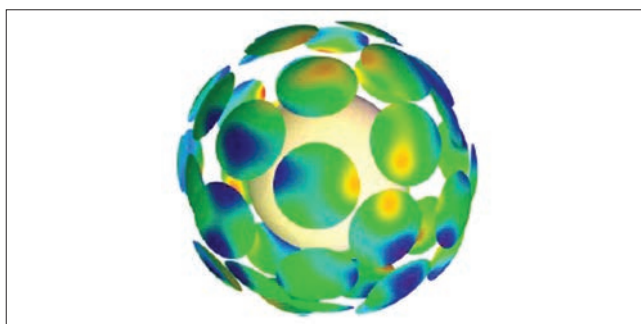
Oprócz metod stykowych obiektem zainteresowania wielu badaczy jest pomiar powierzchni sferycznych metodami optycznymi. Co ciekawe, już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku w byłej Czechosłowacji wyprodukowano automat do kontroli jakości powierzchni kulek łożyskowych działający na zasadzie rejestrowania zmian natężenia światła odbitego od powierzchni kulki. Kulki podczas pomiarów były obracane za pomocą układu stykających się z nimi rolek. Powierzchnia kulek była oświetlana skupionym źródłem światła, a wiązka światła odbita od powierzchni padała na fotodiodę. Gdy padała na uszkodzony fragment powierzchni, zmieniało się natężenie odbitej wiązki [6].

Obecnie trwają prace nad pomiarami topografii powierzchni sferycznych z użyciem interferometrów laserowych, co opisano np. w pracy [7]. W przedstawionej tam metodzie mierzy się małe fragmenty kuli interferometrem Fizeau, a następnie numerycznie skleja się zmierzone obszary, tak aby uzyskać obraz całej powierzchni kuli. Konieczna jest dokładna znajomość położenia kuli podczas kolejnych pomiarów, ponieważ bez tego nie jest możliwe numeryczne sklejenie zmierzonych fragmentów. Dlatego obroty kuli oraz jej przemieszczenia są realizowane przez specjalne sterowniki. Schemat takiego systemu pomiarowego przedstawiono na rys. 3.



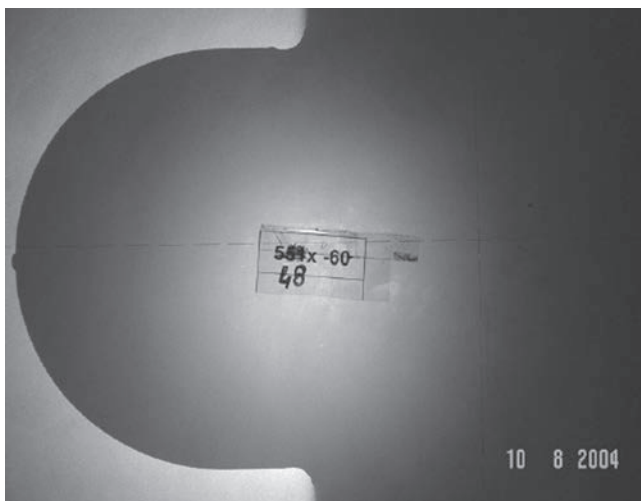
Rys. 3. Schemat pomiaru kuli za pomocą interferometru Fizeau zaproponowany w pracy [7]

Podobny system pomiarowy został opisany w pracy [8]. System ten również wykorzystuje odpowiednio zmodyfikowany interferometr Fizeau i w kolejnych etapach mierzy się niewielkie fragmenty kuli. Podobnie jak w pracy [7] obraz całej powierzchni powstaje przez numeryczne połączenie zmierzonych fragmentów kuli (tzw. *stitching*), a zasadę tę przedstawiono na rys. 4.



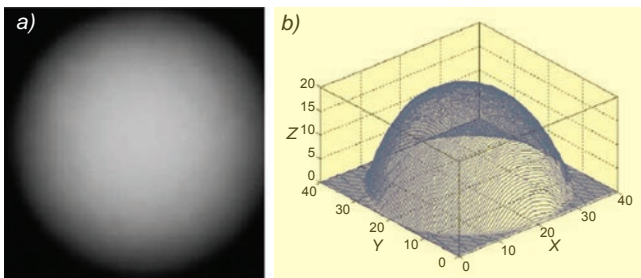
Rys. 4. Rekonstrukcja obrazu powierzchni na podstawie zmierzonych fragmentów (*stitching*) [8]

Z kolei w pracy [9] opisano metodę wyznaczania odchyłek kulistości sferycznej części elektrody, używanej do obróbki elektroiskrowej, za pomocą technik cyfrowego przetwarzania obrazu. Urządzeniem pomiarowym jest tutaj odpowiednio skalibrowana kamera, rejestrująca obraz końcówki elektrody. Z wykorzystaniem oprogramowania wyznacza się współrzędne punktów krawędzi mierzonej powierzchni, widocznej na obrazie. Następnie obraca się przedmiot do kolejnego położenia i powtarza procedurę. W ten sposób uzyskuje się macierz zawierającą współrzędne punktów mierzonej powierzchni. Na podstawie tych wartości wylicza się odpowiednie odchyłki okrągłości i kulistości. Przykładowy obraz końcówki elektrody przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Przykładowy obraz z kamery, na podstawie którego wyznacza się odchyłki kulistości sferycznej końcówki elektrody [9]

Interesujące rozwiązanie dotyczące pomiarów odchyłek kulistości metodą optyczną przedstawiono w pracy [10]. Autorzy zaproponowali zastosowanie cyfrowej techniki przetwarzania umożliwiające wyznaczenie trójwymiarowego obrazu powierzchni na podstawie jej widoku 2D. Oczywiście, z pojedynczego obrazu dwuwymiarowego możliwe jest wygenerowanie widoku półkuli. W opisanym metodzie za pomocą skalibrowanej kamery rejestruje się dwuwymiarowy obraz powierzchni. Odległości odpowiednich punktów powierzchni od kamery są różne, w związku z tym zmienia się natężenie skali szarości w tych punktach. Z analizy zmian natężenia generowany jest trójwymiarowy obraz powierzchni. Przykładowy obraz dwuwymiarowy uzyskany z kamery oraz wygenerowany na jego podstawie widok trójwymiarowy przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Rekonstruowanie trójwymiarowego widoku powierzchni na podstawie analizy zmian natężenia skali szarości obrazu dwuwymiarowego: a) obraz z kamery, b) wygenerowany widok trójwymiarowy [10]

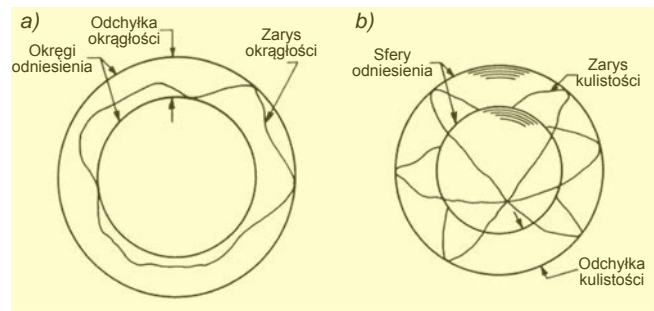
Oprócz intensywnych prac nad zastosowaniem metod optycznych wiele ośrodków naukowych zajmuje się wykorzystaniem techniki współrzędnościowej do pomiarów odchyłek kulistości. Ze względu na dynamiczny rozwój tej dziedziny metrologii można przypuszczać, że pomiar za pomocą współrzędnościowych maszyn pomiarowych będzie w przyszłości jedną z wiodących metod oceny odchyłki kulistości, a także innych odchyłek kształtu. Obecnie współrzędnościowe maszyny pomiarowe nie oferują jednak dokładności pomiaru zadowalającej producentów precyzyjnych części (np. w przemyśle łożyskowym).

Metody oceny odchyłek kształtu elementów kulistych

Oprócz prac nad metodami pomiaru zarysów kulistości w wielu ośrodkach naukowo-badawczych prowadzone są badania nad metodami oceny wartości odchyłek kulistości. Należy zaznaczyć, że termin „metoda oceny” nie jest równoznaczny z terminem „metoda pomiaru”. Metoda pomiaru odnosi się do fizycznej zasady pozyskiwania danych pomiarowych, natomiast metoda oceny opisuje sposób, w jaki dane pomiarowe są przetwarzane w celu obliczenia wartości odchyłki.

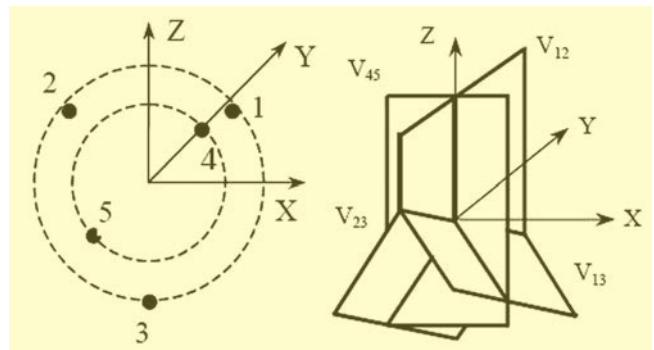
Zazwyczaj w ocenie odchyłek kulistości stosuje się metodologię podobną jak przy pomiarach zarysów okrągłości, przy czym elementy i parametry dwuwymiarowe w przypadku pomiaru okrągłości zastępowane są trójwymiarowymi przy pomiarze kulistości. Przykładowo: jeśli elementem odniesienia w pomiarze odchyłki okrągłości są okręgi minimalnej strefy, to w pomiarze odchyłki kulistości będą to sfery minimalnej strefy, tak jak pokazano na rys. 7.

Badania w zakresie oceny odchyłek kulistości obejmują m.in. obliczanie elementów odniesienia na podstawie danych pomiarowych. Stosowane są przy tym różnorodne podejścia. Dość często sięga się po metody numeryczne,



Rys. 7. Porównanie oceny wartości odchyłki: a) okrągłości, b) kulistości [11]

zwłaszcza w odniesieniu do danych pomiarowych uzyskanych ze współrzędnościowych maszyn pomiarowych [11–13]. Inną metodą obliczania elementów odniesienia w przypadku pomiarów kulistości jest zastosowanie techniki obliczeń zastępczych elementów geometrycznych, najczęściej z wykorzystaniem tzw. diagramów Woronoja (rys. 8), co zostało szczegółowo opisane w pracach [14, 15].



Rys. 8. Wyznaczenie parametrów sfery odniesienia za pomocą diagramów Woronoja [11]

Współrzędne punktów 1–3 (rys. 8) określają sferę opisaną na zarysie, natomiast współrzędne punktów 4 i 5 – sferę wpisaną w zarys. Aby ustalić współrzędne środka zewnętrznej i wewnętrznej sfery minimalnej strefy, wykreśla się diagramy Woronoja. Najpierw zdefiniowano diagramy między parami punktów: 1 i 2, 1 i 3 oraz 2 i 3. Obszary te na rys. 8 oznaczono odpowiednio jako: V_{12} , V_{13} oraz V_{23} . Przecięcie tych obszarów tworzy prostą. Punkt przecięcia tej prostej przez obszar Woronoja, określony dla punktów 4 i 5 (oznaczony jako V_{45} na rys. 8), jest środkiem sfer minimalnej strefy.

Pośród innych opisywanych w literaturze sposobów oceny odchyłek kulistości należy wymienić metodę wykorzystania teorii minimum energii potencjalnej [16] oraz analizę parametrów statystycznych [17].

Podsumowanie

Zagadnienia związane z oceną odchyłek kulistości należą do najbardziej złożonych problemów w obszarze pomiaru odchyłek kształtu części maszyn. Przyrządy do pomiaru zarysów kulistości powinny być wyposażone nie tylko w systemy umożliwiające pozyskiwanie danych pomiarowych ze znaczną dokładnością, ale również w systemy do rejestrowania położenia kuli podczas pomiarów. Co więcej, analiza danych pomiarowych wymaga zastosowania niezwykle skomplikowanego aparatu matematycznego (włączając w to np. funkcje harmoniczne na sferze). Prawdopodobnie dlatego nie ma na rynku systemów

do dokładnego pomiaru i oceny zarysów kulistości. Jednak rozwój obserwowany w obszarze technologii maszyn, automatyce oraz w technikach przetwarzania sygnału pozwala na opracowanie i wyprodukowanie takich systemów, wykorzystujących zarówno metody stykowe, jak i bezstykowe.

Spośród opisanych w tym artykule systemów należy zwrócić uwagę na system pomiaru zarysów kulistości metodą promieniową. Jego niezaprzeczalną zaletą jest to, że bazuje on na przyrządach do pomiaru zarysów okrągłości, które są powszechnie stosowane w przemyśle łożyskowym. Zaproponowana koncepcja wymaga jedynie doposażenia przyrządu w urządzenie do pozycjonowania kul, które jest stosunkowo tanie. Należy jednak zaznaczyć, że aby zastosować zaproponowany układ w warunkach przemysłowych, należałoby rozwiązać następujące problemy: obrót elementu mierzonego powinien zostać zautomatyzowany, natomiast oprogramowanie do oceny odchyłek kulistości trzeba wyposażyć w przyjazny użytkownikowi i czytelny interfejs.

Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego pt. „Teoretyczno-eksperymentalne problemy zintegrowanych przestrzennych pomiarów powierzchni przedmiotów”, nr 2015/19/B/ST8/02643, ID: 317012, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

LITERATURA

1. Kanada T. "Estimation of sphericity by means of statistical processing for roundness of spherical parts". *Precision Engineering*. 20, 2 (1997): s. 117–122.
2. Janecki D., Stępień K., Adamczak S. "Problem of profile matching in sphericity measurements by the radial method". *Metrology and Measurement Systems*. 19, 4 (2012): s. 703–714.
3. Janecki D., Stępień K., Adamczak S. "Sphericity measurements by the radial method: I. Mathematical fundamentals". *Measurement Science Technology*. 27, 1 (2016): s. 015005.
4. Janecki D., Stępień K., Adamczak S. "Sphericity measurements by the radial method: II. Experimental verification". *Measurement Science Technology*. 27, 1 (2016): s. 015006.
5. Gleason E., Schwenke H. "A spindless instrument for the roundness measurement of precision spheres". *Precision Engineering*. 22, 1 (1998): s. 37–42.
6. Ratajczyk E. „Kontrola jakości powierzchni łożysk tocznych automatami AVIKO”. *Mechanik*. 4, 68 (1995): s. 203–207.
7. Hagino T. et al. "Sphericity measurement using stitching interferometry". *Key Engineering Materials*. 523–524 (2012): s. 883–888.
8. Guido Bartl et al. "Interferometric determination of the topographies of absolute sphere radii using the sphere interferometer of PTB". *Meas. Sci. Technol.* 21 (2010): s. 115101 (8pp).
9. Halkaci H.S., Mavi Ö., Yigit O. "Evaluation of form error at semi-spherical tools by use of image processing". *Measurement*. 40, 9–10 (2007): s. 860–867.
10. Song L.M. et al. "Novel 3D sphericity evaluation based on SFS-NDT". *NDT&E International*. 38 (2005): s. 442–447.
11. Samuel G.L., Shunmugam M.S. "Evaluation of circularity and sphericity from coordinate measurement data". *Journal of Materials Processing Technology*. 139, 1–3 (2003): s. 90–95.
12. Poniatowska M., Werner A. "Fitting spatial models of geometric deviations of free-form surfaces determined in coordinate measurements". *Metrology and Measurement Systems*. 12, 4 (2010): s. 599–610.
13. Liang-Chia Chen. "Automatic 3D surface reconstruction and sphericity measurement of micro spherical balls of miniaturized coordinate measuring probes". *Meas. Sci. Technol.* 18 (2007): s. 1748–1755.
14. Samuel G.L., Shunmugam M.S. "Evaluation of sphericity from form data using computational geometric techniques". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 42, 3 (2002): s. 405–416.
15. Huang J. "An exact minimum zone solution for sphericity evaluation". *Computer-Aided Design*. 31, 13 (1999): s. 845–853.
16. Kuang Chao Fan, Ji-Chun Lee. "Analysis of minimum zone sphericity error using minimum potential energy theory". *Precision Engineering*. 43, 2 (1999): s. 65–72.
17. Kanada T. "Evaluation of spherical form errors – Computation of sphericity by means of minimum zone method and some examinations with using simulated data". *Precision Engineering*. 17, 4 (1995): s. 281–289.