

Outsourcing in estimating the uncertainty of coordinate measurements

Outsourcing w szacowaniu niepewności pomiarów współrzędnościowych

WOJCIECH PŁOWUCHA
PAWEŁ ROSNER
MIROSLAW WOJTYŁA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.10.82>

The current situation in the estimation of uncertainty of coordinate measurements and the proposal to perform the uncertainty estimation service by an external institution are presented. This possibility arose thanks to the development of a method that uses the current calibration results as input information about the accuracy of the measuring machine, and as the information about the dimensions of the object – the coordinates of a small number of so-called characteristic points. **KEYWORDS:** coordinate measuring technique, measurement uncertainty

Przedstawiono aktualną sytuację w zakresie szacowania niepewności pomiarów współrzędnościowych oraz propozycję wykonania usługi szacowania niepewności przez instytucję zewnętrzną. Ta możliwość pojawiła się dzięki opracowaniu metody, która jako informacji wejściowej o dokładności maszyny pomiarowej używa aktualnych wyników wzorcowania, a jako informacji o wymiarach przedmiotu – współrzędnych niewielkiej liczby tzw. punktów charakterystycznych.

SŁOWA KLUCZOWE: współrzędnościowa technika pomiarowa, niepewność pomiaru

Wprowadzenie

Znajomość niepewności wykonywanych pomiarów jest obecnie wymagana nie tylko od laboratoriów wzorcujących i badawczych [1], lecz także od wykonujących pomiary w warunkach przemysłowych [2]. Z drugiej strony powszechnie wiadomo, że szacowanie niepewności pomiaru jest dość złożonym zadaniem, co zostało wyraźnie potwierdzone w kilku dokumentach. Przykładowo w publikacji [3] znalazło się stwierdzenie: *W zasadzie nie można oczekiwać, że laboratoria podejmą prace naukowe w celu oceny niepewności związanych z ich pomiarami i badaniami*. W publikacji [4] można z kolei przeczytać, że szacowanie niepewności pomiaru *nie należy do zadań łatwych – wymaga wsparcia przez specjalistów*.

Szczególnie złożonym zagadnieniem jest szacowanie niepewności pomiarów współrzędnościowych [5–7], a właśnie ta technika pomiarowa jest szeroko stosowana w przemyśle maszynowym. Mimo że wykonuje się wiele badań w zakresie niepewności pomiarów współrzędnościowych, na rynku nie ma względnie taniego i łatwego w obsłudze oprogramowania.

Laboratoria badawcze, a zwłaszcza te działające w przemyśle, wykorzystujące współrzędnościowe systemy pomiarowe, nie mogą poświęcać zbyt dużo czasu problematyce niepewności pomiarów. W artykule przed-

stawiono propozycję outsourcingu – świadczenia usługi szacowania niepewności pomiarów współrzędnościowych na odległość.

Aktualna sytuacja

Prace normalizacyjne w zakresie niepewności pomiarów współrzędnościowych trwają od dawna, lecz skupiają się głównie na potrzebach narodowych instytutów metrologicznych (NMI) i laboratoriów wzorcujących.

W specyfikacji technicznej ISO/TS 15530-1 [8] wyróżnia się trzy metody szacowania niepewności:

- metodę analizy wrażliwości,
- metodę z użyciem przedmiotów wzorcowych lub wzorców,
- metodę z użyciem symulacji komputerowej.

Dla dwóch spośród wymienionych opracowano dokumenty normalizacyjne. Metoda z użyciem przedmiotów wzorcowych lub wzorców doczekała się normy [9]. Metodzie z użyciem symulacji komputerowej, a także innym metodom, w których stosuje się obliczenia komputerowe – UES (*uncertainty evaluating software*), poświęcono specyfikację techniczną [10].

Norma [9] opisuje podejście eksperymentalne, które formalnie pozwala na szacowanie niepewności pomiarów różnych charakterystyk geometrycznych (wymiarów, odchyłek geometrycznych). Istotnym ograniczeniem szerszego stosowania tej normy jest to, że do przeprowadzenia procedury szacowania niepewności pomiaru potrzebny jest przedmiot wzorcowy o podobnej (a najlepiej identycznej) postaci co przedmiot, dla którego ma być szacowana niepewność pomiaru. Wynika to z przyjętego w normie założenia dotyczącego prowadzenia eksperymentu w taki sposób, że co jakiś czas zamiast mierzonego przedmiotu zostanie zmierzony przedmiot wzorcowy. Biorąc pod uwagę fakt, że w warunkach produkcyjnych mierzony przedmiot jest mocowany w specjalnym uchwycie, a pomiar przebiega w cyklu automatycznym i przy optymalnym (z punktu widzenia czasu pomiaru) ruchu zespołów współrzędnościowej maszyny pomiarowej (CMM – *coordinate measuring machine*), nawet nieznaczne różnice postaci i wymiarów przedmiotu wzorcowego uniemożliwiają takie jego zastosowanie. Praktyczne wykorzystanie tej metody w warunkach przemysłowych jest ograniczone do jednego przypadku: gdy przedmiotem wzorcowym jest jeden z produkowanych przedmiotów, wywzorcowany wcześniej na dokładniejszej CMM.

* Dr inż. Wojciech Płowucha, wplowucha@ath.bielsko.pl, <https://orcid.org/0000-0003-0446-9052> – Laboratorium Metrologii, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, Polska
Mgr inż. Paweł Rosner, prosner@ath.bielsko.pl, <https://orcid.org/0000-0003-4367-1384> – Laboratorium Metrologii, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, Polska
Dr inż. Mirosław Wojtyła, mwojtyla@ath.bielsko.pl, <https://orcid.org/0000-0002-6046-3870> – Laboratorium Metrologii, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, Polska

Podejście zbliżone do opisanego jest dość często stosowane przez operatorów w celu upewnienia się, czy CMM nie uległa rozregulowaniu. Operatorzy zachowują na tę okoliczność jeden ze zmierzonych wcześniej przedmiotów wraz z protokołem pomiarowym i – w razie wątpliwości co do stanu maszyny – powtarzają pomiary tego przedmiotu oraz porównują otrzymane wyniki z pierwotnym protokołem.

Wbrew swojej nazwie specyfikacja techniczna [10] nie podaje żadnych wskazówek odnośnie do projektowania eksperymentu symulacyjnego. W jej treści są zawarte wymagania stawiane dostawcom dowolnego (nie tylko symulacyjnego) oprogramowania do szacowania niepewności pomiarów współrzędnościowych. Obecnie na rynku europejskim jest oferowane oprogramowanie znane pod nazwą wirtualnej maszyny pomiarowej (VCMM) [11], opracowane w PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), a na rynku amerykańskim – oprogramowanie PUNDIT [12].

Metoda analizy wrażliwości

W Laboratorium Metrologii ATH opracowano oryginalną metodę szacowania niepewności pomiarów współrzędnościowych, która według klasyfikacji podanej w dokumencie [8] jest metodą analizy wrażliwości, aczkolwiek ze względu na fakt, że do metody jest dostępne oprogramowanie, dotyczy jej również dokument [10].

Poszczególne charakterystyki (wymiary i odchyłki geometryczne) są modelowane za pomocą wzoru, który wyraża ich wartość jako funkcję różnic współrzędnych tzw. punktów charakterystycznych. Te punkty mogą być w uproszczeniu interpretowane jako punkty próbkowania z zastosowaniem ich minimalnej liczby. W przypadku każdej charakterystyki, dla której ma być oszacowana niepewność pomiaru, trzeba podać współrzędne punktów charakterystycznych mierzonego przedmiotu, przy czym mogą to być punkty w dowolnym układzie współrzędnych, np. pobrane z modelu CAD. Informację o dokładności współrzędnościowego systemu pomiarowego stanowi niepewność standardowa pomiaru długości, obliczona na podstawie wyników ostatniego wzorcowania CMM. Wszystkie obliczenia są zestawiane w postaci budżetu niepewności. Szczegółowo dotyczące algorytmu opracowanej metody przedstawiono w publikacjach [5, 6]. Oszacowane wartości niepewności pomiaru zachowują ważność do następnego wzorcowania CMM.

Opracowanie wyników wzorcowania

W pierwszej wersji opracowanej metody wykorzystano informację o dokładności CMM zawartą we wzorze na największy dopuszczalny błąd pomiaru długości MPE . Z doświadczenia autorów w zakresie wzorcowania CMM wynika, że maszyny o identycznej postaci wzoru na MPE mogą się znacząco różnić. Bywa, że diagram błędów pomiaru długości maszyn nowych zajmuje mniej niż 1/3 obszaru wyznaczonego przez MPE , lecz spotyka się również maszyny, gdzie ten obszar jest szczelnie wypełniony (rys. 1a). Niekiedy zdarza się asymetryczne wypełnienie tego obszaru (rys. 1b). Z tego powodu najnowsza wersja oprogramowania korzysta dodatkowo z informacji o stanie technicznym CMM, zawartej w wynikach aktualnego wzorcowania.

Algorytm opracowania wyników wzorcowania jest następujący. Wyniki wzorcowania CMM stanowi 105 błędów wskazań E_i dla kilku różnych długości. Błędy te są normowane do przedziału $(-1, 1)$ za pomocą wzoru:

$$E_{si} = \frac{E_i}{MPE} \quad (1)$$

Współczynnik λ do określenia standardowej niepewności pomiaru długości oblicza się jako moment z próbek rzędu 2 względem zera (patrz [13] p. 1.14) według wzoru:

$$\lambda = \frac{1}{105} \sqrt{\sum_{i=1}^{105} E_{si}^2} \quad (2)$$

Dzięki temu, że moment jest obliczany względem zera (a nie względem wartości średniej, jak w przypadku użycia odchylenia standardowego), osiąga się efekt randomizacji błędów systematycznych.

Przykładowe histogramy dla unormowanych błędów wskazań oraz obliczone współczynniki λ przedstawiono na rys. 2 (mniejsza wartość współczynnika oznacza gorszy stan maszyny względem jej MPE).

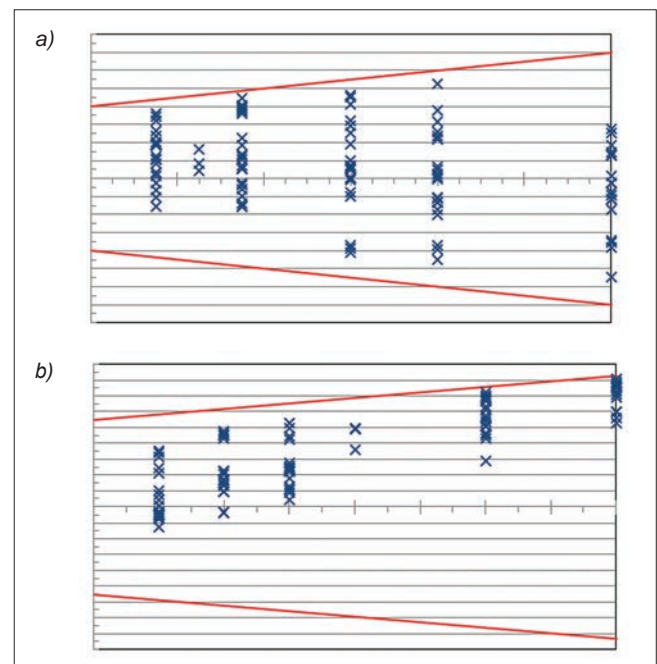


Fig. 1. Examples of CMM error diagrams: a) errors occupy the entire area of permissible errors, b) errors are arranged asymmetrically
Rys. 1. Przykładowe diagramy błędów wskazań CMM: a) błędy zajmują cały obszar błędów dopuszczalnych, b) błędy są rozmieszczone asymetrycznie

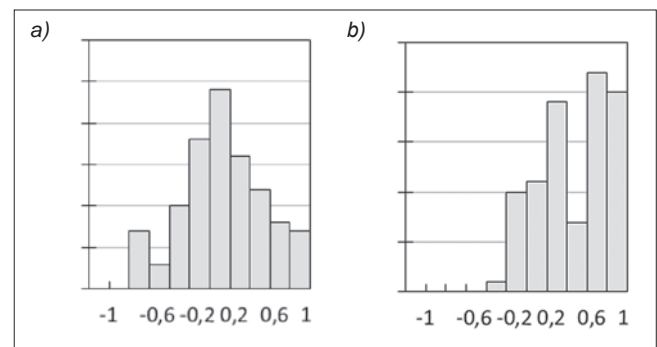


Fig. 2. Sample evaluation of calibration results for the needs of coordinate measurement uncertainty estimation software – histograms of indication errors normalized to $(-1, 1)$; for the example in Fig. 1a the coefficient λ is 2.33, and for the example in Fig. 1b – 1.70

Rys. 2. Przykładowe opracowanie wyników wzorcowania na potrzeby oprogramowania do szacowania niepewności pomiarów współrzędnościowych – histogramy błędów wskazań unormowanych do przedziału $(-1, 1)$; dla przykładu z rys. 1a współczynnik λ wynosi 2,33, a dla przykładu z rys. 1b – 1,70

Niepewność standardową pomiaru długości, potrzebną do obliczenia niepewności pomiaru poszczególnych charakterystyk, określa się według wzoru:

$$u = \frac{MPE}{\lambda} \quad (3)$$

Szacowanie niepewności pomiaru na odległość

Laboratorium Metrologii ATH oferuje usługę polegającą na wykonaniu i udokumentowaniu obliczeń niepewności pomiaru na podstawie dostarczonego świadectwa wzorcowania CMM oraz rysunku konstrukcyjnego lub modelu CAD z zaznaczonymi charakterystykami, dla których należy oszacować niepewność pomiaru.

Dokumentacja obliczeń składa się z dwóch części. Pierwsza obejmuje opracowanie wyników wzorcowania, potrzebne do oceny rozkładu prawdopodobieństwa dla błędu pomiaru długości, czyli obliczenia współczynnika λ . Druga część zawiera budżety niepewności dla wszystkich wskazanych charakterystyk. Usługa jest realizowana z użyciem poczty elektronicznej.

Dalej przytoczono fragmenty dwóch raportów. Pierwszy dotyczy współosiowości (warto zwrócić uwagę, że niepewność pomiaru tej odchyłki istotnie zależy od proporcji odległości elementu tolerowanego od bazy i długości bazy), a drugi – prostopadłości osi względem płaszczyzny. W obu przypadkach posłużono się modelem „odległość punktu od prostej”, jednak występujący w modelu wektor jednostkowy opisujący orientację prostej jest różnie obliczany.

Należy zauważyć, że punkty charakterystyczne to punkty należące do elementów integralnych (powierzchni przedmiotu) lub pochodnych (osi), odpowiadających strategii pomiaru zdefiniowanej za pomocą minimalnej matematycznie liczby punktów.

Przykład 1. Wyniki szacowania niepewności pomiaru odchyłki współosiowości

Na rys. 3 przedstawiono przykładową informację o mierzonych charakterystykach, potrzebną do oszacowania niepewności. Wyniki szacowania niepewności zawierają model pomiaru oraz budżet niepewności pomiaru.

Odchyłka współosiowości Δ jest równa podwójnej wartości odległości l punktu S od prostej AB (rys. 4):

$$\Delta = 2l \quad (4)$$

Odległość punktu S od prostej AB wyraża wzór:

$$l = \left| BS \times \frac{AB}{|AB|} \right| \quad (5)$$

gdzie: $AB = [ab_1, ab_2, ab_3]$, $BS = [bs_1, bs_2, bs_3]$.

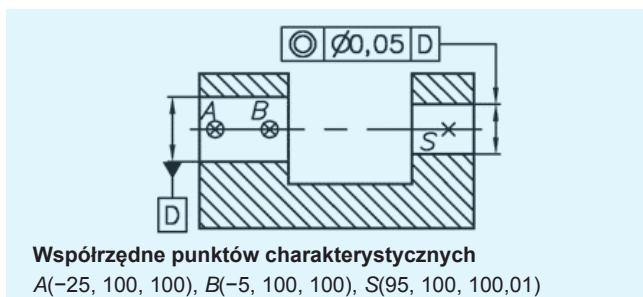


Fig. 3. Information needed to estimate uncertainty of measurement of coaxiality deviation
 Rys. 3. Informacja potrzebna do oszacowania niepewności pomiaru odchyłki współosiowości

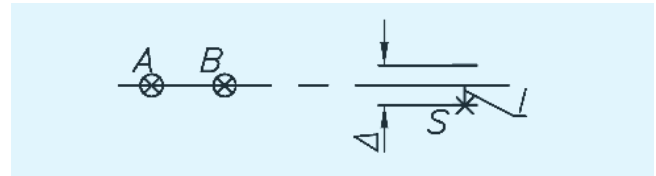


Fig. 4. Measurement model for coaxiality
 Rys. 4. Model pomiaru dla odchyłki współosiowości

TABLE I. Uncertainty budget for coaxiality measurement for CMM for which $MPE = \pm(2 + 4L) \mu\text{m}$ and $\lambda = 2.33$

TABLICA I. Budżet niepewności dla pomiaru odchyłki współosiowości dla CMM, dla której $MPE = \pm(2 + 4L) \mu\text{m}$ and $\lambda = 2,33$

Składnik	x_i [mm]	$\frac{\partial l}{\partial x_i}$	$u_{x_i} = \frac{MPE}{\lambda}$ [μm]	$\frac{\partial l}{\partial x_i} u_{x_i}$ [μm]
bs_1	100	0	1,03	0
bs_2	0	0	0,86	0
bs_3	0,01	1	0,86	0,86
ab_1	20	0	0,89	0
ab_2	0	0	0,86	0
ab_3	0	-5	0,86	4,29
$u_l =$				4,38
$u_\Delta =$				8,8
$U_\Delta =$				17,6

Odpowiedni budżet niepewności podano w tabl. I.

Dla przypadku $\lambda = 1,7$ końcowe wyniki obliczeń są następujące: $u_l = 6 \mu\text{m}$, $u_\Delta = 12 \mu\text{m}$, $U_\Delta = 24 \mu\text{m}$.

W przytoczonym budżecie niepewności tylko dwa spośród potencjalnych składników mają wartości różne od zera. W budżecie niepewności jest zawarta informacja o tym, które składowe odległości między punktami charakterystycznymi mają w istocie wpływ na niepewność pomiaru danej charakterystyki.

Przykład 2. Wyniki szacowania niepewności pomiaru odchyłki prostopadłości

Na rys. 5 przedstawiono przykładową informację o mierzonych charakterystykach, potrzebną do oszacowania niepewności.

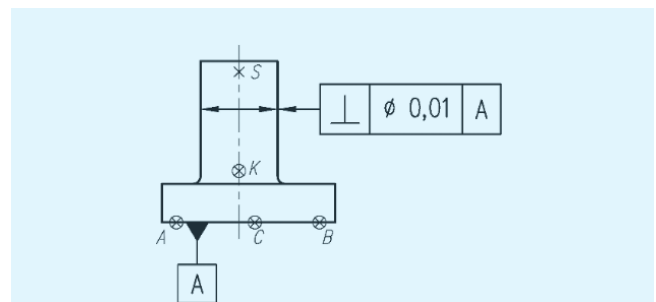


Fig. 5. Information needed to estimate the measurement uncertainty of the perpendicularity of the axis in regard to the plane
 Rys. 5. Informacja potrzebna do oszacowania niepewności pomiaru odchyłki prostopadłości osi względem płaszczyzny

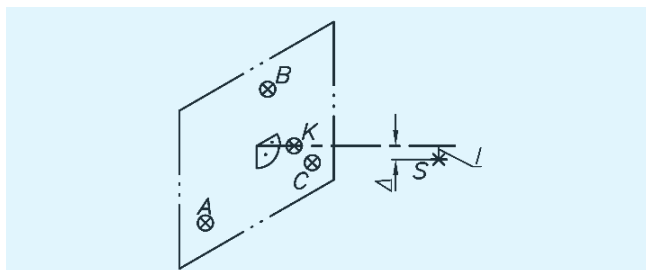


Fig. 6. Measurement model for the perpendicularity of the axis in regard to the plane

Rys. 6. Model pomiaru odchyłki prostokątowości osi do płaszczyzny

Odchyłką prostokątowości Δ jest równa wartości odległości l punktu S od prostej prostopadłej do płaszczyzny ABC i zawierającej punkt K (rys. 6):

$$\Delta = l \quad (6)$$

Odległość punktu S od prostej prostopadłej do płaszczyzny ABC i zawierającej punkt K wyraża wzór:

$$l = \left| KS \times \frac{CA \times CB}{|CA \times CB|} \right| \quad (7)$$

gdzie: $KS = [ks_1, ks_2, ks_3]$, $CA = [ca_1, ca_2, ca_3]$,
 $CB = [cb_1, cb_2, cb_3]$.

Budżet niepewności podano w tabl. II.

TABLE II. Uncertainty budget for measurement of the perpendicularity for CMM for which $MPE = \pm(2 + 4L) \mu\text{m}$ and $\lambda = 2.33$

TABLICA II. Budżet niepewności dla pomiaru odchyłki prostokątowości dla CMM, dla której $MPE = \pm(2 + 4L) \mu\text{m}$ i $\lambda = 2,33$

Składnik	x_i [mm]	$\frac{\partial l}{\partial x_i}$	$u_{xi} = \frac{MPE}{\lambda}$ [μm]	$\frac{\partial l}{\partial x_i} u_{xi}$ [μm]
ks_1	195	0	1,19	0
ks_2	0	0	0,86	0
ks_3	0,01	1	0,86	0,86
ca_1	0	-1,3	0,86	1,12
ca_2	-43,3	0	0,93	0
ca_3	75	0	0,99	0
cb_1	0	-1,3	0,86	1,12
cb_2	43,3	0	0,93	0
cb_3	75	0	0,99	0
			$u_\Delta = u_l =$	1,80
			$U_\Delta =$	3,6

Dla przypadku $\lambda = 1,7$ końcowe wyniki obliczeń są następujące: $u_l = u_\Delta = 2,5 \mu\text{m}$, $U_\Delta = 5 \mu\text{m}$.

W przytoczonym budżecie niepewności tylko dwa spośród potencjalnych składników mają wartości różne od zera. Budżet zawiera informację o tym, które składowe odległości między punktami charakterystycznymi mają w istocie wpływ na niepewność pomiaru danej charakterystyki. Wyniki badań wskazują, że niepewności pomiarów różnych charakterystyk, wykonanych na tej samej CMM, mogą się znacznie różnić. Szczególnie duże wartości niepewności występują wtedy, gdy tolerowany element znajduje się poza bazą.

Przykładowe raporty szacowania niepewności pomiaru współrzędnościowego można pobrać ze strony Laboratorium Metrologii ATH: www.lm.ath.bielsko.pl, zakładka „Do pobrania”.

Walidacja otrzymanych wyników

Autorzy dysponują licznymi badaniami potwierdzającymi poprawne działanie opracowanego oprogramowania. W przypadkach wymagających walidacji proponuje się traktowanie otrzymanych wyników jako pierwszego kroku w kierunku świadomego i odpowiedzialnego szacowania niepewności pomiaru współrzędnościowego. W celu upewnienia się, że otrzymane wyniki są poprawne, autorzy proponują zachowanie jednego z produkowanych przedmiotów i okresowe powtarzanie jego pomiarów. Po zgromadzeniu 20 pomiarów można wykonać obliczenia przybliżonej (ze względu na brak przedmiotu wzorcowego) wartości niepewności pomiaru zgodnie z metodyką podaną w ISO 15530-3.

Podsumowanie

Przedstawiona propozycja zlecenia szacowania niepewności pomiaru (zwłaszcza pomiaru współrzędnościowego) ekspertom zewnętrznym daje możliwość upowszechnienia szacowania niepewności pomiaru w szeroko rozumianym przemyśle maszynowym.

LITERATURA

- [1] PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- [2] PN-EN ISO 10012:2004 Systemy zarządzania pomiarami. Wymagania dotyczące procesów pomiarowych i wyposażenia pomiarowego.
- [3] EA-4/16 Wytyczne EA dotyczące wyrażania niepewności w badaniach ilościowych. European cooperation for Accreditation 2003.
- [4] PKN-ISO/TR 10017:2005 Wytyczne dotyczące technik statystycznych odnoszących się do ISO 9001:2000.
- [5] Płowucha W. „Szacowanie niepewności pomiarów współrzędnościowych metodą analizy wrażliwości – podstawy teoretyczne”. *Mechanik*. 11 (2018): 953–956.
- [6] Płowucha W. „Szacowanie niepewności pomiarów współrzędnościowych odchyłek równoległości osi metodą analizy wrażliwości”. *Mechanik*. 12 (2018): 1136–1139.
- [7] Gąska A. i in. „System prognozowania dokładności pomiaru z wykorzystaniem symulatora współrzędnościowej maszyny pomiarowej oraz jej wirtualnego modelu dokładności”. *Mechanik*. 3 (2016): 220–221.
- [8] ISO/TS 15530-1:2013 Geometrical product specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 1: Overview and metrological characteristics.
- [9] PN-EN ISO 15530-3:2011 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Współrzędnościowe maszyny pomiarowe (CMM): Metoda wyznaczania niepewności pomiaru. Część 3: Zastosowanie przedmiotów wzorcowych i wzorców.
- [10] ISO/TS 15530-4:2008 Geometrical Product Specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation.
- [11] Heisselmann D., Franke M., Rost K., Wendt K., Kistner T., Schwehn C. „Determination of measurement uncertainty by Monte Carlo simulation”. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing*. XI, 2019.
- [12] <https://www.metrosage.com/punditcmm.html>.
- [13] PN-ISO 3534-1:2009 Statystyka. Słownik i symbole. Część 1: Ogólne terminy statystyczne i terminy wykorzystywane w rachunku prawdopodobieństwa.