

**Paweł ZMARZŁY, Krzysztof STĘPIEŃ**POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, KATEDRA TECHNOLOGII MECHANICZNEJ I METROLOGII  
Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce**Koncepcja zastosowania metody odniesieniowej do pomiaru odchyłki falistości elementów cylindrycznych****Mgr inż. Paweł ZMARZŁY**

Absolwent Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Obecnie doktorant w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii. Tematyka jego pracy doktorskiej związana jest z zastosowaniem metody odniesieniowej do pomiaru falistości powierzchni cylindrycznych. Jego zainteresowania naukowe dotyczą systemów pomiarowych stosowanych w warunkach przemysłowych.



e-mail: pzmarzly@tu.kielce.pl

**Dr inż. Krzysztof STĘPIEŃ**

Dr inż. Krzysztof Stępień jest adiunktem w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. W swoich pracach zajmuje się zagadnieniami pomiarów wielkości geometrycznych, a w szczególności pomiarami zarysów okrągłości i walcowości. Jest autorem lub współautorem ponad 80 prac prezentowanych w czasopiśmie krajowych i zagranicznych oraz na konferencjach międzynarodowych.



e-mail: kstepien@tu.kielce.pl

**Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych mających na celu weryfikację koncepcji zastosowania metody odniesieniowej do pomiaru odchyłek falistości powierzchni cylindrycznych w zakresie 16-50 UPR. Przeprowadzono badania porównawcze, polegające na ocenie odchyłki falistości wzorcowym przyrządem bazującym na metodzie bezodniesieniowej, a następnie za pomocą przyrządu opartego na metodzie odniesieniowej. Wyznaczono eksperymentalną dokładność metody odniesieniowej.

**Słowa kluczowe:** metoda odniesieniowa, odchyłka falistości, dokładność metody.

**A concept of using the V-block method for waviness deviation measurement of cylindrical parts****Abstract**

Measurement of waviness deviation of large size cylindrical parts using a widespread measuring device based on the non-reference method is significantly stymied. For this reason a concept of the V-block method adaptation to waviness measurement of cylindrical parts in industrial conditions was developed. The paper presents the results of experimental research aiming at the verification of the concept of applying the V-block method to waviness deviation measurement of cylindrical surfaces in the range 16-50UPR. Section 5 presents the construction and the principle of operation of the model measuring device ROL-2 (Fig. 4) developed to perform the V-block waviness measurement. This measuring device is based on the three-point reference method. Section 2 describes the main features with advantages and disadvantages of the non-reference method known as the radial method (Fig. 2). Section 3 contains a short characteristic of the V-block method (Fig. 3). In Section 4 there is presented the procedure of experimental research performed to calculate the V-block experimental method accuracy. For this reason comparative investigations were performed. They consisted in evaluation of the waviness deviation using the standard non-reference measuring device Talyrond 365 (Fig. 5), and next using the tested device based on the V-block method. The results of the statistical verification of the V-block waviness measurement show that the experimental method accuracy equals about 28,1% (Table 1) in relation to the non-references method.

**Keywords:** V-block method, coefficient of detectability, waviness deviation

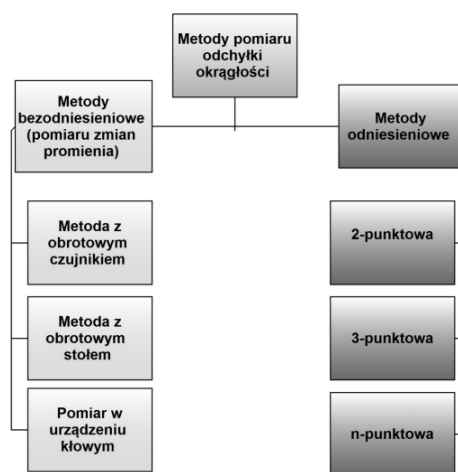
**1. Wprowadzenie**

Gwałtowny rozwój nowoczesnych technologii wytwarzania części maszyn wymaga opracowania coraz bardziej zaawansowanych systemów pomiarowych. Systemy takie oprócz wysokiej dokładności pomiarowej powinny cechować się dużą uniwersalnością, łatwością obsługi oraz możliwością współpracy z komputerem, co znacznie skraca oraz ułatwia pomiar [1, 2]. Zastosowanie odpowiedniego systemu pomiarowego pozwala zwiększyć wydajność produkcyjną, co prowadzi do zmniejszenia kosztów wytwarzanych produktów.

Ma to szczególnie duże znaczenie w przemyśle związanym z produkcją elementów cylindrycznych. Wiadomo, że szeroką grupę produkowanych części mechanicznych stanowią elementy okrągłe lub posiadające oś symetrii, które w trakcie swojego użytkowania wykonują ruch obrotowy lub posuwisto-zwrotny. W przypadku odpowiedzialnych części maszyn konieczny jest pomiar odchyłek okrągłości oraz falistości, ponieważ ich nadmierna wartość może spowodować powstanie niebezpiecznych drgań lub szumów, co w znaczny sposób może zmniejszyć żywotność mechanizmów, a nawet doprowadzić do poważnych oraz kosztownych awarii całego urządzenia.

**2. Metody pomiaru odchyłki okrągłości**

W praktyce przemysłowej oraz laboratoryjnej występują dwie podstawowe grupy metod pomiaru odchyłki okrągłości oraz falistości powierzchni: metody bezodniesieniowe zwana również metodami pomiaru zmian promienia oraz metody odniesieniowe. Szczegółowy podział tych metod przedstawia schemat na rysunku 1.



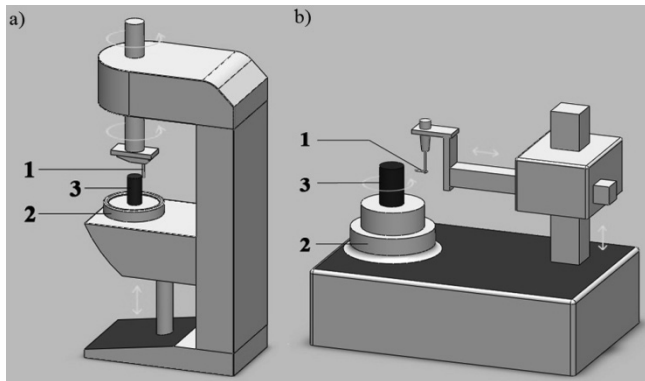
Rys. 1. Metody pomiaru odchyłki okrągłości  
Fig. 1. Roundness measurement methods

Do pomiar odchyłki okrągłości możemy również wykorzystać systemy pomiarowe oparte na współrzędnościowej technice pomiarowej [3], które cechują się dużą uniwersalnością oraz możliwością zastosowania w cyklu produkcyjnym. Wadą takich systemów jest ich wysoki koszt oraz mniejsza dokładność pomiaru niż ta oferowana przez specjalistyczne przyrządy do pomiaru okrągłości i walcowości.

Dodatkową możliwością oceny odchyłki okrągłości jest zastosowanie pneumatycznych przetworników długości [4].

### 3. Metody bezodniesieniowe

Najbardziej rozpowszechnionymi metodami oceny odchyłki okrągłości są metody bezodniesieniowe realizowane za pomocą przyrządów z obrotowym czujnikiem (rys. 2a) lub obrotowym stolikiem (rys. 2b).



Rys. 2. Schemat przyrządów do pomiaru odchyłki okrągłości metodą bezodniesieniową: a) metoda z obrotowym czujnikiem, b) metoda z obrotowym stolikiem

Fig. 2. Non-reference measuring devices used for roundness measurements: a) method with rotary sensor, b) method with rotary table

Jak pokazano na rysunku 2 w przypadku metody z obrotowym czujnikiem, czujnik (1) obraca się wokół przedmiotu mierzonego (2) usytuowanego na nieruchomym stoliku pomiarowym (3), natomiast w przypadku metody z obrotowym stolikiem, nieruchomy czujnik (1) obraca się wokół przedmiotu (2) umieszczonego na obrotowym stoliku pomiarowym (3).

Przyrządy te cechują się bardzo dużą dokładnością pomiarową rzędu kilkudziesięciu nanometrów [5]. Jedną z niedogodności zastosowania tych metod jest konieczność czasochłonnego osiowania oraz centrowania przedmiotu mierzonego. Przyrządy oparte na metodzie bezodniesieniowej są bardzo czułe na drgania oraz zanieczyszczenia i powinny być usytuowane w specjalnie przygotowanych izbach kontrolnych lub laboratoriach pomiarowych. Przyrządy pomiarowe z obrotowym stolikiem lub czujnikiem trudno zastosować do oceny odchyłek kształtu dużych elementów walcowych (walce hutnicze, walce papiernicze, wały korbowe silników okrętowych itp.) ze względu na ograniczoną przestrzeń roboczą stolika pomiarowego. Z tego powodu metody pomiaru zmian promienia pomimo tego, że cechują się największą dokładnością mają zastosowanie głównie laboratoryjne i ich użycie w warunkach przemysłowych jest znacznie utrudnione.

### 4. Metody odniesieniowe

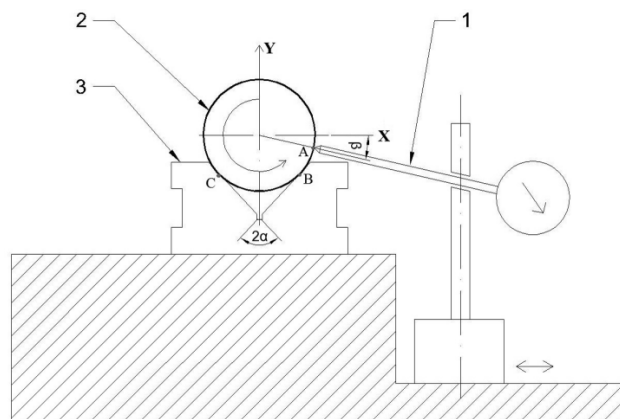
Drugą grupą metod, które służą do oceny odchyłki okrągłości oraz falistości powierzchni cylindrycznej są metody odniesieniowe. Jednym z pierwszych, a zarazem najprostszym sposobem realizacji metody odniesieniowej jest zastosowanie pryzmy pomiarowej oraz czujnika pomiarowego. Pomiary odchyłki okrągłości tradycyjną metodą odniesieniową cechowały się małą dokładnością oraz były głównie stosowane do pomiarów szacunkowych przy znanym dominującym rodzaju błędów kształtu [6]. Dlatego istniała potrzeba opracowania modelu matematycznego, który użyty w procedurach komputerowych w znaczny sposób zwiększa dokładność pomiarową metody odniesieniowej, tak aby mogła ona być zastosowana do realizacji pomiarów w warunkach przemysłowych.

Na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach realizowane były prace badawcze mające na celu dostosowanie metody odniesieniowej do dokładnej oceny odchyłek okrągłości [6] oraz walcowości [1, 7]. Cele te zostały zrealizowane. Opracowane systemy pomiarowe bazujące na metodzie odniesieniowej zostały wdrożone w wielu zakładach przemysłowych w kraju i zagranicą [6].

Przyrządy pomiarowe oparte na metodzie odniesieniowej mogą być użyte do oceny odchyłek kształtu dużych elementów walcowych na stanowisku kontrolnym w warunkach przemysłowych, a niekiedy bezpośrednio na obrabiarce. Co również ważne, przyrządy te są tanie oraz proste w obsłudze.

Ze względu na ograniczoną liczbę badań związanych z oceną przydatności zastosowania metody odniesieniowej do oceny falistości powierzchni cylindrycznej, autorzy tego artykułu podjęli działania mające na celu dostosowanie metody odniesieniowej do oceny falistości powierzchni cylindrycznych w zakresie 16-50 fal/obrót (co odpowiada analizie widma amplitudowego badanego zarysu w zakresie od 16 do 50 składowej harmonicznej).

Na podstawie wyników badań przedstawionych w artykule [8], można stwierdzić, że najodpowiedniejszym typem metody odniesieniowej służącej do oceny falistości powierzchni cylindrycznych jest metoda trójpunktowa, niesymetryczna odwrócona, której schemat przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat pomiaru metodą trójpunktową niesymetryczną odwróconą: 1 - czujnik pomiarowy, 2 - przedmiot mierzony, 3 - pryzma pomiarowa  
Fig. 3. Roundness measurement with three-point reference method (1 - probe, 2 - measuring part, 3 - V-block)

W przypadku pomiaru odchyłek kształtu przy pomocy metody odniesieniowej, wskazania czujnika pomiarowego (1) zależą od odchyłki występującej w punkcie pomiarowym (punkt A na rys. 2) oraz od odchyłek w punktach bazowych (punkty B i C na rys. 2). Położenie tych punktów względem obranego wcześniej układu współrzędnych określone jest za pomocą parametrów metody odniesieniowej, czyli kątów  $\alpha$  oraz  $\beta$ . W celu uwzględnienia tych odchyłek należy wyznaczyć współczynnik wykrywalności  $K_n$  będący funkcją parametrów metody [9]. Następnie wyznaczony współczynnik wykrywalności  $K_n$  użyty został w procedurach komputerowych służących do przeprowadzenia transformacji zarysu zmierzonego na zarys przetworzony, odpowiadający zarysowi rzeczywistemu. Wówczas odchyłkę okrągłości lub falistości  $\Delta Z$  można wyznaczyć za pomocą ogólnej zależności przedstawionej poniżej

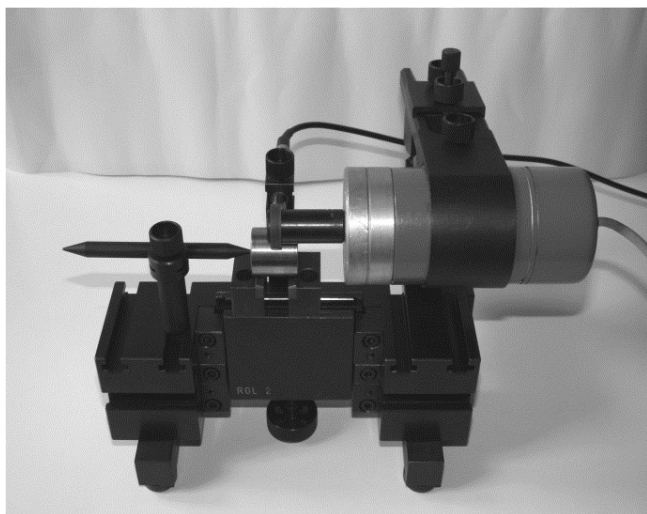
$$\Delta Z = \frac{\Delta F}{K_n} \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta F$  - odchyłka zmierzona czujnikiem pomiarowym,  $K_n$  - współczynnik wykrywalności dla n-tej harmonicznej zarysu.

Zastosowanie powyższej zależności w procedurach komputerowych pozwala w znaczny sposób zwiększyć dokładność odniesieniowych pomiarów odchyłek kształtu [8, 9] w stosunku do metody odniesieniowej w ujęciu tradycyjnym.

### 5. Modelowe stanowisko badawcze ROL-2

W celu przeprowadzenia eksperymentalnej weryfikacji koncepcji zastosowania metody odniesieniowej do pomiaru odchyłki falistości powierzchni opracowano modelowe stanowisko badawcze, przedstawione na rysunku 4.



Rys. 4. Modelowe stanowisko badawcze ROL-2 służące do odniesieniowych pomiarów falistości powierzchni cylindrycznych

Fig. 4. The model measuring device ROL-2 for waviness deviation measurements by the V-block method.

Budowa przyrządu pomiarowego ROL-2 oparta jest na proponowanej w [8, 9] odniesieniowej metodzie trójpunktowej niesymetrycznie odwróconej dla której  $\alpha=60^\circ$ , oraz  $\beta=-30^\circ$  (patrz rys. 3).

Sygnal z czujnika pomiarowego za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego jest zamieniany na postać cyfrową i za pośrednictwem złącza RS-232 przesyłany do komputera. Następnie przy użyciu odpowiednich procedur opracowanych w oprogramowaniu Matlab na podstawie zależności matematycznych przedstawionych w [7, 9] profil zmierzony czujnikiem pomiarowym  $F(\varphi)$  zostaje podany transformacji na profil przetworzony  $R_p(\varphi)$ . Kolejnym krokiem jest odpowiednia filtracja uzyskanego profilu przetworzonego  $R_p(\varphi)$  w celu odseparowania składowych okrągłości i pozostawienia jedynie składowych harmonicznych w zakresie 16-50. Filtracji dokonano używając filtra Gaussa. Posiadając zarys falistości badanego elementu walcowego, w oparciu o okrąg odniesienia LSC (wyznaczone metodą najmniejszych kwadratów) wylicza się całkowitą odchyłkę falistości  $RONt$ , którą definiujemy jako sumę największej wartości odchyłki falistości lokalnej dodatniej i największej wartości bezwzględnej odchyłki falistości lokalnej ujemnej.

## 6. Badania eksperymentalne

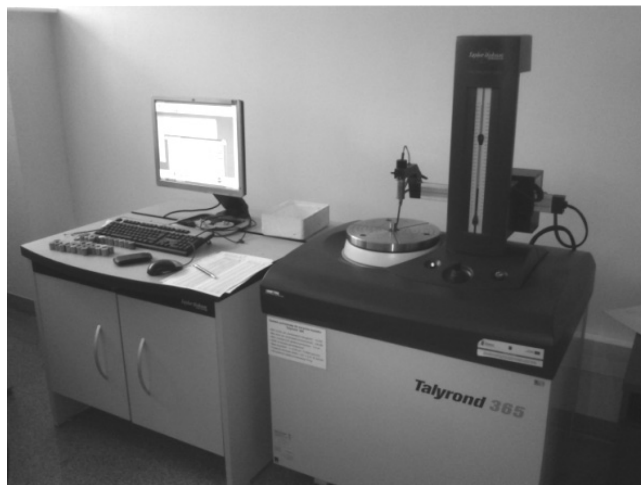
Aby dokonać oceny przydatności proponowanej metody pomiarowej do oceny odchyłki falistości przeprowadzono badania porównawcze. Badania te polegały na uzyskaniu wyników pomiaru falistości elementów walcowych badaną metodą odniesieniową, a następnie porównaniu ich z wynikami pomiaru tych samych elementów cylindrycznych uzyskanymi za pomocą wzorcowej metody bezodniesieniowej. Do badań eksperymentalnych użyto 50 próbek walcowych.

Badanym przyrządem pomiarowym służącym do odniesieniowych pomiarów odchyłki falistości było modelowe stanowisko badawcze ROL-2 (rys. 4). Natomiast przyrządem wzorcowym był Talyrond 365 (rys. 5) firmy Taylor Hobson, znajdujący się w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Jest to skomputeryzowany przyrząd do pomiaru odchyłek okrągłości, walcowości i prostoliniowości wyposażony w stół obrotowy.

Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczono eksperymentalny względny błąd metody [6], zgodnie z zależnością (2):

$$\delta_{RONt} = \frac{RONt_o - RONt_b}{RONt_b} \quad (2)$$

gdzie:  $RONt_o$  – odchyłka falistości wyznaczona przy użyciu badanego przyrządu odniesieniowego (ROL-2),  $RONt_b$  – odchyłka falistości wyznaczona przy użyciu wzorcowego przyrządu bezodniesieniowego (Talyrond 365).



Rys. 5. Przyrząd Talyrond 365 firmy Taylor Hobson

Fig. 5. Talyrond 365 instrument made by Taylor Hobson company

Wyznaczony za pomocą zależności (2) eksperymentalny względny błąd metody stanowi wypadkową wielu cząstkowych błędów zarówno przypadkowych, jak i systematycznych proponowanego systemu pomiarowego.

Następnie przeprowadzono badania statystyczne wyznaczonego eksperymentalnego błędu metody według procedury zaproponowanej w pracach [6, 10] polegającej na: estymacji wartości średniej, estymacji wariacji i odchylenia średniego i oszacowaniu przedziału ufności pojedynczego błędu metody.

W celu ilościowej oceny dokładności pomiarowej analizowanego przyrządu wyznaczono eksperymentalną dokładność metody odniesieniowej przy ocenie odchyłki falistości powierzchni za pomocą poniższej zależności:

$$DM = \left| \bar{\delta}_{RONt} \pm u_p s \right| \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:  $\bar{\delta}_{RONt}$  – wartość średnia błędów metody,  $u_p$  – kwantyl rozkładu normalnego dla  $P=0,95$ ,  $s$  – odchylenie średnie kwadratowe.

Wyniki badań eksperymentalnych wraz z analizą statystyczną względnego eksperymentalnego błędu dla odniesieniowych pomiarów odchyłki falistości przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki statystycznych badań eksperymentalnego błędu pomiaru odchyłki falistości metodą odniesieniową za pomocą przyrządu ROL-2

Tab. 1. The results of statistical analysis of the experimental relative method error of the V-block waviness measurement using ROL-2

Próbki walcowe		
Liczność	$n_p$	50
Względny błąd pomiaru	$\bar{\delta}_{RONtmax}$	-0,049 $\mu\text{m}$
	$\bar{\delta}_{RONtmin}$	-0,315 $\mu\text{m}$
	$\bar{\delta}_{RONt}$	-0,161 $\mu\text{m}$
Odchylenie średnie kwadratowe dla pojedynczego błędu pomiaru	$s$	0,061 $\mu\text{m}$
Wariancja w próbce	$s^2$	0,004 $\mu\text{m}$
Przedział ufności dla pojedynczego błędu pomiaru	$P=0,95$ ( $u_p=1,96$ )	-0,161 $\pm$ 0,120 $\mu\text{m}$
Eksperymentalna dokładność metody odniesieniowej	DM	28,1%

## 7. Podsumowanie

Rozwój technologii wytwarzania części maszyn narzuca potrzebę opracowania metody pomiarowej, która może być zastosowana do pomiaru dużych elementów cylindrycznych bezpośrednio w warunkach przemysłowych. Do tego rodzaju pomiarów może zostać wykorzystana metoda odniesieniowa.

Rosnące wymagania związane z dokładnością wykonania cylindrycznych części maszyn mechanicznych, sprawiają, że ocena jedynie odchyłki okrągłości jest niewystarczająca. Wówczas należy dokonać pomiaru odchyłki badanego zarysu okrągłości w szerszym zakresie pomiarowym tj. 16-50 fal/obrót zawierającym składowe falistości.

Tematyka zawarta w tym artykule dotyczyła eksperymentalnej weryfikacji koncepcji zastosowania metody odniesieniowej do pomiaru falistości powierzchni cylindrycznym.

Analizując wyników badań statystycznych przedstawionych w tabeli 1, możemy stwierdzić, że eksperymentalna dokładność pomiarowa metody odniesieniowej przy ocenie falistości powierzchni określona za pomocą zależności (3) w stosunku do metody wzorcowej wynosi  $DM=28,1\%$ . Biorąc pod uwagę, że pomiar taki jest realizowany w warunkach przemysłowych, można uznać, że jest to wartość satysfakcjonująca.

Należy jednak przeprowadzić działania mające na celu zwiększenie dokładności pomiarowej metody odniesieniowej służącej do tego rodzaju pomiarów. Jak wykazano w [8, 9] na wynik pomiaru odchyłki falistości metodami odniesieniowymi wpływają wartości parametrów kątowych  $\alpha$  oraz  $\beta$ . Dokonując komputerowej transformacji profilu zmierzonego czujnikiem pomiarowym  $F(\varphi)$  na profil przetworzony  $R_p(\varphi)$ , transformację przeprowadzono dla nominalnych wartości kątów  $\alpha=60^\circ$ ,  $\beta=-30^\circ$ , zastosowanych w przyrządzie pomiarowym ROL-2. W praktyce, rzeczywiste wartości kątów  $\alpha$  oraz  $\beta$  różnią się od założonych wartości nominalnych. Dlatego w celu zwiększenia dokładności pomiarowej należy zidentyfikować rzeczywiste wartości parametrów kątowych poprzez ich bezpośredni pomiar. Następnie należy uwzględnić te zmierzone rzeczywiste wartości kąta  $\alpha$  oraz  $\beta$  w procedurach transformacyjnych.

Ocena wpływu różnicy pomiędzy nominalnymi oraz rzeczywistymi wartościami parametrów metody na dokładność odniesie-

niowych pomiarów odchyłki falistości powierzchni cylindrycznych będzie tematyką dalszych badań.

## 8. Literatura

- [1] Adamczak S., Janecki D., Stępień K.: Cylindricity measurement by the V-block method – Theoretical and practical problems. *Measurement*, vol. 44, s. 164-173, 2011.
- [2] Kuosmanen P.: Predictive 3D roll grinding method for reducing paper quality variations in coating machine. *Machine Design*, vol. 2, 2004.
- [3] Gapiński B.: Strategia pomiaru na CMM elementu obarczonego błędem okrągłości. *PAK*, vol. 56, s. 024-025, 2010.
- [4] Cellary A., Jermak Cz. J., Majchrowski R.: Metody symulacyjne wyznaczenia błędów systemu do pomiaru odchyłki okrągłości metodą odniesieniową. *PAK*, vol. 56, s. 008-009, 2010.
- [5] Hajtjema H., Bosse H., Frennberg M., Sacconi A., Thalmann R.: International comparison of roundness profiles with nanometric accuracy, *Metrologia*, vol. 33, s. 067-073, 1996.
- [6] Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2008.
- [7] Adamczak S., Janecki D., Stępień K.: Qualitative and quantitative evaluation of the accuracy of the V-block method of cylindricity measurements. *Precision Engineering*, vol. 34, s. 619-626, 2010.
- [8] Adamczak S., Zmarzły P., Krzysztof S.: Model matematyczny odniesieniowych pomiarów kształtu i falistości elementów okrągłych, *Mechanik*, vol. 7, s. 518-522, 2013.
- [9] Adamczak S., Zmarzły P., Chmielik I. P.: Investigating mathematical models of waviness measurements of cylindrical elements by the V-block method through computer simulations, 11th International Symposium on Measurement and Quality Control 2013, Kraków-Kielce, 11-13 września 2013.
- [10] Adamczak S., Janusiewicz A., Makiela W., Stępień K.: Statistical validation of the method for measuring radius variations of components of machine tool, *Metrology and Measurement System*, vol. 18, s. 035-046, 2011.

otrzymano / received: 16.06.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.08.2014

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

### Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo-technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.