

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Ocena możliwości zastosowania pneumatycznego przetwornika długości do pomiarów odchyłki okrągłości

MICHAŁ JAKUBOWICZ

POLITECHNIKA POZNAŃSKA, WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I ZARZĄDZANIA, INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ, ZAKŁAD METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Słowa kluczowe: pneumatyczny przetwornik długości, odchyłka okrągłości, pomiary bezstykowe

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów odchyłki okrągłości uzyskanych bezstykową metodą pneumatyczną. Rezultaty przeprowadzonych badań porównano z metodą stykową, gdzie odchyłki okrągłości wyznaczano za pomocą urządzenia PIK-2. Charakterystyki statyczne wyznaczone dla różnych zestawów dysz wlotowych i pomiarowych wykazały, że wraz ze wzrostem średnicy dyszy wlotowej d_w wzrasta zakres pomiarowy, natomiast czułość ulega zmniejszeniu. Istotne znaczenie przy doborze zestawu dysz do danego zadania pomiarowego ma odpowiednie skonfigurowanie średnic: dyszy wlotowej i dyszy pomiarowej. W przypadku zestawu dysz $d_p = 1,012$ mm, $d_w = 0,710$ mm odchyłka okrągłości była najbardziej zbliżona do wartości uzyskanej dla metody stykowej.

Assessment of the possibility of applications of air gauge in measurement of roundness

Keywords: air gauge, roundness measurement, non-contact measurement

ABSTRACT

This paper presents results of roundness measurements obtained using non-contact pneumatic method. The results of experimental investigations was compared with those from contact method, where the roundness was determined using the form tester PIK-2. The static characteristics was determined for different sets of inlet nozzles and measurement nozzles. On the basic of those research, the increase in diameter of inlet nozzle d_w with the increase of measuring range was determined. Nevertheless the sensitivity of the gauge was decreased. Proper choice of nozzles set, especially, configuration of inlet and measuring nozzles diameter, for particular measuring task has significant meaning. In the case of a set of nozzles $d_p = 1.012$ mm, $d_w = 0.710$ mm roundness was the most similar to the roundness obtained for the contact method.

1. WPROWADZENIE

Rozwój nauki i techniki uwarunkowany jest dostarczaniem rzetelnych informacji o otaczającym nas świecie. Podstawą jego poznania są badania, a więc również szeroko rozumiany pomiar [1]. Rozwój mechanizacji i automatyzacji procesów produkcji związany jest bezpośrednio z doskonaleniem metod kontroli wytwarzanych części maszyn. Duża konkurencja oraz wysokie wymagania ze strony odbiorców wymuszają nieustanny wzrost jakości wyrobów. Wytwórcy zmuszeni są do inwestowania w nowoczesne maszyny technologiczne. Pociąga to za sobą równoczesny rozwój działów kontroli jakości oraz stosowanie coraz dokładniejszych i bardziej zaawansowanych przyrządów pomiarowych [2]. Wymagania jakościowe stawiane wyrobom wymuszają na producentach ciągłe zwiększanie dokładności pomiarów, w związku z tym rozwój technik pomiarowych ukierunkowany jest na precyzyjne pomiary odchyłek wymiarowych, kształtu i położenia [3, 4]. Z tego względu istotnym zagadnieniem jest pomiar błędów kształtu ze szczególnym uwzględnieniem odchyłki okrągłości. Pomiar odchyłki okrągłości to zagadnienie o dużym znaczeniu praktycznym, zwłaszcza w przemyśle łóżykowym, precyzyjnym i silnikowym (branża maszynowa, motoryzacyjna, lotnicza, itp.). Obecnie stosowane w przemyśle metody pomiaru odchyłki okrągłości są w większości metodami stykowymi. Często pomiar odchyłki okrągłości wykonywany jest za pomocą uniwersalnych urządzeń np. współrzędnościowych maszyn pomiarowych [2]. Jednak w wielu przypadkach wymagane jest użycie urządzeń realizujących pomiar metodą bezstykową. Dotyczy to zwłaszcza kontroli czynnej i pomiarów wykonywanych bezpośrednio podczas obróbki [3, 5, 6]. Czujniki pneumatyczne, w których zmiana wymiaru części powoduje zmianę parametrów powietrza przepływającego przez przetwornik (ciśnienia, prędkości i ilości) [1], zapewniają pomiar bezstykowy i obecnie znajdują coraz większe zastosowanie w pomiarach precyzyjnych, szczególnie w układach kontroli czynnej [3, 5, 6]. W zależności od tego, który z wymienionych parametrów zostanie wykorzystany w pomiarach wielkości geometrycznych, rozróżnia się czujniki ciśnieniowe, prędkościowe i przepływowe [1, 5, 7]. Największe zastosowanie znalazły czujniki ciśnieniowe, w których do pomiarów długości wykorzystywana jest zależność ciśnienia od szerokości szczeliny.

Problem pomiaru odchyłki kształtu z zastosowaniem pneumatycznych przetworników długości oraz oceny właściwości metrologicznych istniejących rozwiązań konstrukcyjnych przyrządów pomiarowych wyposażonych w te przetworniki nie jest omawiany szczegółowo w literaturze krajowej i zagranicznej. Zalety pneumatycznych przetworników długości takie jak: wysoka niezawodność, duża rozdzielczość, prostota konstrukcji oraz możliwość bezstykowej realizacji pomiaru [1, 3, 5, 7] skłaniają do podjęcia prac nad możliwościami zastosowania pneumatycznych przetworników długości w pomiarach odchyłki okrągłości.

2. METODYKA WYZNACZENIA DOŚWIADCZALNYCH CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH

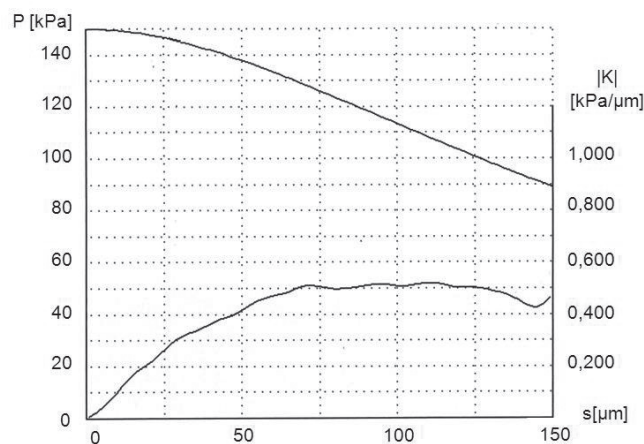
Charakterystyki statyczne przetwornika pneumatycznego zostały wyznaczone na specjalnym stanowisku badawczym składającym się z następujących elementów: pneumatycznego przetwornika długości, skonstruowanego w Zakładzie Metrologii Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej, piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia Kistler 4043A5 współpracującego ze wzmacniaczem Kistler 4801 A i mikroprocesorowym systemem NI cDAQ 9172 z modułem NI 9215 firmy National Instruments do zbierania i akwizycji danych pomiarowych. Zmianę szczeliny umożliwił stół, wyposażony w sterowanie numeryczne za pomocą komputera PC. Ponadto stanowisko wyposażone było w kolumnę pomiarową Tesa T500 współpracującą z przetwornikiem długości GT 21HP do pomiaru przemieszczenia stołu.

Za pomocą sondy termoanemometrycznej zainstalowanej na przewodzie zasilającym przetwornik sprawdzano dokładność przylegania czoła dyszy pomiarowej do powierzchni przestony (powierzchnia mierzonego przedmiotu) dla szczeliny $s = 0 \mu\text{m}$. Charakterystykę statyczną i parametry metrologiczne przetwornika wyznaczono na podstawie zbioru wartości szczeliny s i ciśnienia pomiarowego p_k . W tym celu zastosowano oprogramowanie StanBad opracowane w Zakładzie Metrologii Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej.

Charakterystyki statyczne oraz parametry przetworników tj. czułość i zakres pomiarowy zostały wyznaczone dla różnych zestawów dysz pomiarowych i wlotowych o wymiarach $d_p = 0,800 \text{ mm}$, $1,012 \text{ mm}$ i $1,410 \text{ mm}$ oraz $d_w = 0,570 \text{ mm}$, $0,635 \text{ mm}$ i $0,710 \text{ mm}$.

Unormowana średnica czoła dyszy pomiarowej $D_c = d_c/d_p$, gdzie d_c stanowi średnicę czoła dyszy dla wszystkich przypadków, wynosiła 1,5. Czoło o tej średnicy eliminuje nieciągłość charakterystyki statycznej [3, 5]. W badaniach nie rozpatrywano wpływu D_c na wartości wyznaczonych parametrów charakterystyki statycznej.

Na Rysunku 1 przedstawiono przykładowe przebiegi charakterystyk, statycznej oraz czułości dla wybranego zestawu dysz [8].



Rysunek 1 Przykładowy przebieg charakterystyki statycznej $p_k = f(s)$ oraz czułości $|K| = g(s)$; $d_p = 1,410$ mm, $d_w = 0,710$ mm, $D_c = 1,5$ [8]

Figure 1 Example of static characteristic $p_k = f(s)$ and sensitivity $|K| = g(s)$; $d_p = 1,410$ mm, $d_w = 0,710$ mm, $D_c = 1,5$ [8]

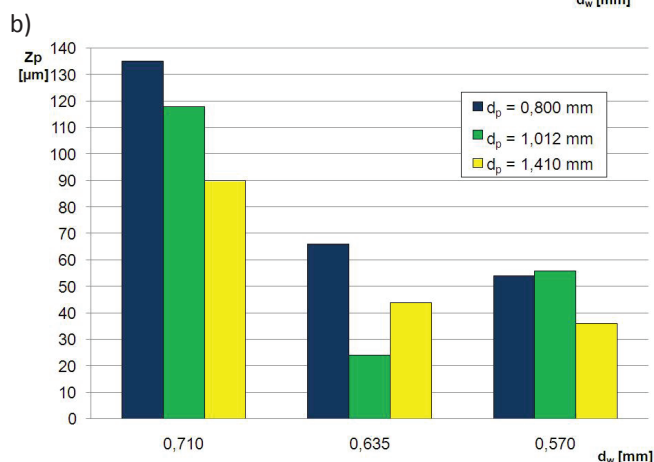
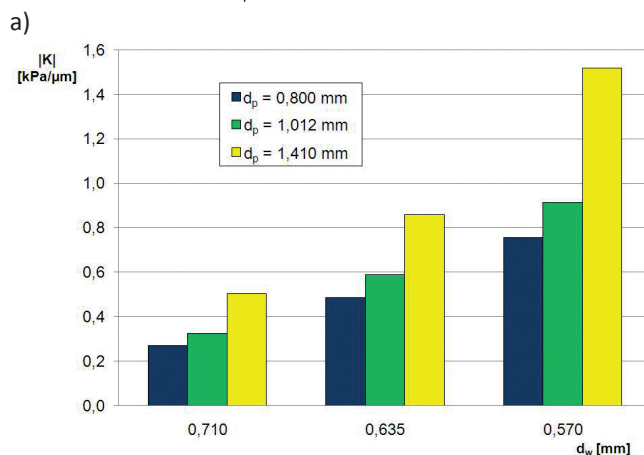
Na Rysunku 2 zaprezentowano przykładowe zestawienie otrzymanych wartości czułości $|K|$ i zakresu pomiarowego Z_p dla wybranych zestawów dysz. Z danych obliczeniowych parametrów przetworników wynika, że przedział czułości zawiera się w zakresie od 0,32 kPa/μm do 1,55 kPa/μm. W typowych przyrządach pomiarowych stosowanych w przemyśle czułość wynosi około 0,6 kPa/μm. Zastosowanie przetworników pracujących w tak szerokim zakresie czułości pozwala ocenić wpływ tego parametru na dokładność odwzorowania zarysu i wartość odchyłki okrągłości. Na podstawie wyznaczonych charakterystyk statycznych wybrano cztery zestawy dysz, które zastosowano do badań odchyłki okrągłości. Dobór odpowiednich kombinacji dysz ustalono tak, aby zapewnić:

- największą wartość czułości pneumatycznego przetwornika długości,
- największy zakres pomiarowy.

W pomiarach odchyłki okrągłości zastosowano następujące zestawy dysz:

- zestaw nr 1 – $d_p = 0,800$ mm; $d_w = 0,570$ mm,
- zestaw nr 2 – $d_p = 1,410$ mm; $d_w = 0,570$ mm,

- zestaw nr 3 – $d_p = 1,012$ mm; $d_w = 0,570$ mm,
- zestaw nr 4 – $d_p = 1,012$ mm; $d_w = 0,710$ mm.



Rysunek 2 Zestawienie porównawcze wartości:

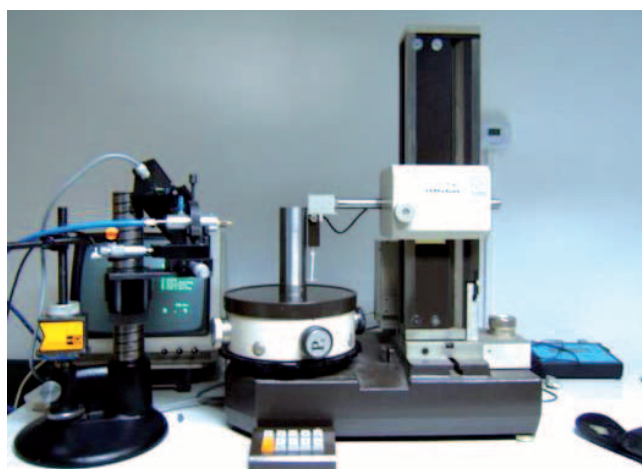
a) czułości $|K|$, b) zakresu pomiarowego Z_p

Figure 2 Comparison of the values: a) sensitivity $|K|$, b) measurement range Z_p

3. METODYKA POMIARÓW ODCHYLKI OKRĄGŁOŚCI

Odchyłka okrągłości mierzona metodą stykową została wyznaczona za pomocą urządzenia PIK-2, skonstruowanego i wyprodukowanego na Politechnice Warszawskiej (Rys. 3).

Obiekt pomiarów stanowiły 3 tuleje o średnicy $\text{Æ}70$ mm, szlifowane, o chropowatości $R_a = 1,25$ μm i o różnej wartości odchyłki okrągłości. Po ustawieniu badanej tulei na stole obrotowym urządzenia PIK-2 przeprowadzono jej centrowanie i pionowanie, a następnie wykonano pomiary odchyłki okrągłości metodą stykową. Rejestrowano wartości odchyłki RONT obliczonej dla średniokwadratowego okręgu odniesienia oraz dokonano analizy widmowej zarysu okrągłości. Otrzymane wartości odchyłek oraz amplitud w rozkładzie widma przyjęto jako odniesienie do wyników pomiarów metodą pneumatyczną.



Rysunek 3 Urządzenie do pomiaru odchyłki okrągłości PIK-2 [8]

Figure 3 Form tester PIK-2 [8]

4. POMIAR ODCHYŁKI OKRĄGŁOŚCI ZA POMOCĄ PRZETWORNIKA PNEUMATYCZNEGO

Stanowisko badawcze składało się z następujących elementów: zespołu przygotowania powietrza (reduktor wstępny, stabilizator ciśnienia), pneumatycznego przetwornika długości oraz piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia, współpracującego z mikroprocesorowym rejestratorem. Rejestrator połączony był z komputerem PC wyposażonym w oprogramowanie MikroBar. Oprogramowanie zapewniało akwizycję danych pomiarowych i ich dalszą obróbkę. W celu zachowania porównywalnych warunków pomiaru, tuleje umieszczono na stoliku obrotowym urządzenia PIK-2, a następnie wycentrowano i wypionowano. Pomiary tulei zostały wykonane w tym samym przekroju i przy analogicznej prędkości obrotowej stołu.

W trakcie pomiaru rejestrowano ciśnienie p_k , które zmieniało się wraz ze zmianą odległości czoła dyszy pomiarowej od powierzchni tulei. Otrzymane wartości ciśnienia p_k przeliczono – po uwzględnieniu czułości – na wartości w mikrometrach. Następnie korzystając z programu SigmaRound firmy Digital Metrology Solutions obliczono odchyłkę okrągłości RONT. W przypadku zmiany zestawu dysz (dyszy wlotowej lub pomiarowej) powtarzano procedurę ustawiania całego układu.

5. OMÓWIENIE WYNIKÓW POMIARÓW

Tabela 1 zawiera wyniki pomiarów zarysu okrągłości uzyskane metodą stykową przyrządem PIK-2 oraz pneumatyczną dla przyjętych zestawów

dysz. Zestawy uszeregowano w kolejności rosnących wartości odchyłki RONT. Zakres wartości odchyłki okrągłości dostosowano do zakresu pomiarowego przetworników pneumatycznych. Otrzymane wartości odchyłki okrągłości są zróżnicowane i zależne zarówno od odchyłek okrągłości zarysu wyjściowego, jak i zastosowanego zestawu dysz.

Tabela 1 Wartości odchyłki okrągłości RONT [μm], z pomiarów metodą stykową (okrągłościomierz PIK-2) i pneumatyczną (zestawy dysz nr 1-4)

Table 1 Roundness RONT [μm], contact method (form tester PIK-2) and pneumatic method (set of nozzles no. 1-4)

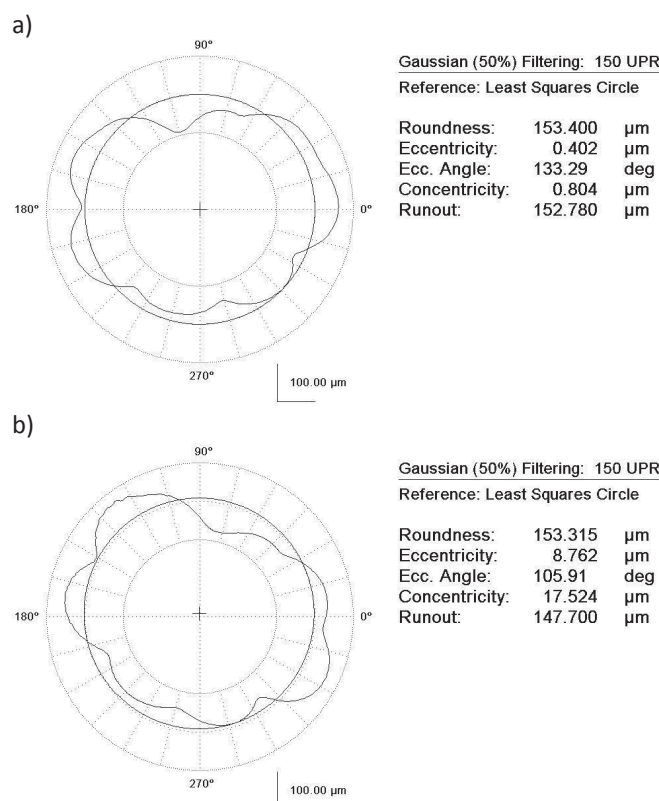
	PIK – 2	Zestaw nr 1	Zestaw nr 2	Zestaw nr 3	Zestaw nr 4
Tuleja nr 1	15,7	5,4	5,6	6,9	21,4
Tuleja nr 2	102,3	31,1	34,7	40,0	105,3
Tuleja nr 3	153,4	18,9	49,9	62,5	153,3

Najkorzystniejsze rezultaty osiągnięto stosując zestaw nr 4, $d_p = 1,012$ mm; $d_w = 0,710$ mm. Przy zastosowaniu tego zestawu wartości błędów względnych dla odchyłek okrągłości poszczególnych tulei wynosiły odpowiednio: 36%, 2,9% i 0,06%. Natomiast najmniej korzystne rezultaty osiągnięto dla przetwornika z zestawem dysz nr 1 – $d_p = 0,800$ mm; $d_w = 0,570$ mm. Różnica w otrzymanych wartościach odchyłek wynosi około 800% na niekorzyść zestawu nr 1. Można przypuszczać, że jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy jest niedostateczna dynamika przetwornika spowodowana przyjętą w badaniach objętością komory pomiarowej – około $5 \cdot 10^{-5}$ m³. Kolejnym czynnikiem mogącym mieć wpływ na pogorszenie właściwości dynamicznych jest średnica dyszy wlotowej. Można zauważyć, że niezależnie od średnicy dyszy pomiarowej przetworniki z dyszą wlotową o średnicy $d_w = 0,570$ mm realizują pomiary z największym odchyleniem od wartości uzyskanych metodą stykową. Widać to wyraźnie porównując wyniki pomiarów przetwornikami z zestawami dysz 3 i 4. Zwiększenie średnicy d_w z 0,570 mm do 0,710 mm pozwoliło na uzyskanie wyników zbliżonych do otrzymanych metodą stykową.

Interesującym wydaje się być fakt niewielkiego wpływu średnicy dyszy pomiarowej na uzyskane wartości w przypadku pomiarów tulei o naj-

mniejszej wartości odchyłki okrągłości (tuleja nr 1). W pomiarach przedmiotów o znacznej wartości odchyłki (tuleja nr 3) zauważa się wpływ średnicy pomiarowej d_p tzn. jej wzrost wpływa korzystnie na uzyskane wartości. Wynika z tego, że wraz ze zmniejszeniem odchyłki zarysu mierzonego zwiększa się błąd pomiaru.

Wybrane zarysy oraz obliczone parametry okrągłości dla obu metod pokazano na Rysunku 4.

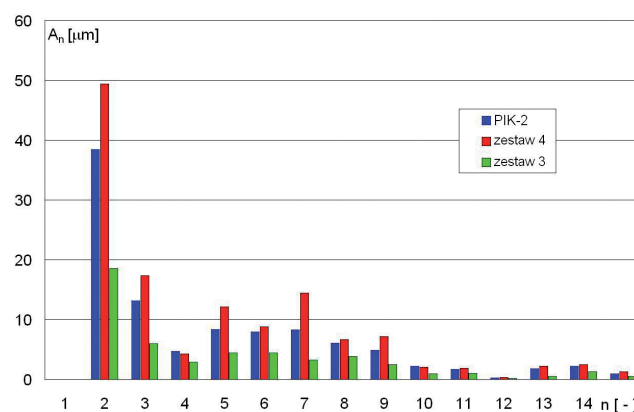


Rysunek 4 Parametry oraz zarysy okrągłości tulei nr 3 zestawienie otrzymanych wyników:

a) metoda stykowa (PIK-2), b) metoda bezstykowa – przetwornik pneumatyczny z zestawem dysz nr 4

Figure 4 Roundness parameters and profiles of a cylinder no. 3: a) contact method (PIK-2), b) non-contact method – air gauge with set of nozzles no. 4

W ocenie odchyłki okrągłości oprócz typowej prezentacji we współrzędnych biegunowych ważną rolę spełnia przedstawienie zarysu w postaci dyskretnego widma amplitudowego. Widmo amplitudowe informuje o postaci geometrycznej zarysu, np. owal czy trójgraniastość, przedstawiając jednocześnie wartości amplitud składowych zarysu. Rozkład widma amplitudowego zarysu tulei nr 3, otrzymanego z pomiarów przyrządem PIK-2 i metodą pneumatyczną (zestaw dysz nr 3 i 4), prezentuje Rysunek 5. Ze względu na małe wartości amplitud zakres widma ograniczono do 15 harmonicznej, natomiast filtracja obejmowała składowe powyżej 150 harmonicznej.



Rysunek 5 Rozkład widma zarysu tulei nr 3 otrzymany za pomocą urządzenia PIK-2 oraz metodą pneumatyczną dla zestawów dysz nr 3 i 4

Figure 5 Profile spectrum distribution of the cylinder no. 3 obtained with form tester PIK-2 and pneumatic method for set of nozzles no. 3 and 4

W rozkładzie widmowym zarysu wyjściowego zauważa się dominujący wpływ 2 harmonicznej, co świadczy o owalności (2 łukowości) odchyłki okrągłości. Wartości amplitud pozostałych składowych aż do 9 są mniejsze, ale powinny być wzięte pod uwagę na etapie analizy zarysu.

Widma amplitudowe otrzymane z metody pneumatycznej różnią się od widm z pomiaru metodą stykową. Przykładowo widmo sygnału z przetwornika z zestawem dysz nr 4 wykazuje znacznie większe wartości amplitud większości składowych w stosunku do metody stykowej oraz szerszy zakres widma konieczny do wiernego odtworzenia zarysu wyjściowego. Wcześniej zauważono, że zmniejszenie średnicy dyszy wlotowej negatywnie wpływa na wartość odchyłki okrągłości. Ten trend znajduje również swoje odbicie w widmie sygnału uzyskanego z przetwornika z zestawem dysz nr 3. Praktycznie wszystkie składowe mają mniejsze wartości od analogicznych w widmie wyjściowym, co może potwierdzać hipotezę o gorszej dynamice przetworników z dyszami wlotowymi o małej średnicy. Prezentowane rozkłady widm amplitudowych otrzymano z wykorzystaniem programu Excel.

6. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy literatury stwierdzono, że istnieje w pewnym zakresie możliwość zastąpienia w pomiarach odchyłki okrągłości metody stykowej, pomiarem przy wykorzystaniu pneumatycznych przetworników długości zapewniającym pomiar bezstykowy.

Należy podkreślić, że w niektórych przypadkach metoda pneumatyczna nie jest możliwa do zastąpienia inną metodą, skąd wynika potrzeba prowadzenia badań nad optymalizacją parametrów przetworników pneumatycznych.

Istotne znaczenie przy doborze zestawu dysz, ma odpowiednie skonfigurowanie średnic: dyszy wlotowej i dyszy pomiarowej. Wyznaczone charakterystyki statyczne dla różnych zestawów dysz wlotowych i pomiarowych wykazały, że wraz ze wzrostem średnicy dyszy wlotowej d_w zwiększa się zakres pomiarowy, natomiast czułość ulega zmniejszeniu.

Możliwy jest taki dobór zestawu dysz w przetworniku, który umożliwi otrzymanie zbliżonych do uzyskanych w metodzie stykowej wyników odchyłki okrągłości. W przypadku zestawu dysz nr

4 wartości odchyłek okrągłości były najbardziej zbliżone do wartości uzyskanych dla metody stykowej. Należy zwrócić uwagę, że średnica dyszy wlotowej miała istotny wpływ na wynik pomiaru. Wraz z jej wzrostem uzyskano lepsze odwzorowanie zarysu. Jest to szczególnie widoczne dla zestawu nr 3 i 4, gdzie średnica dyszy pomiarowej była tak sama i wynosiła $d_p = 1,012$ mm, natomiast średnica dyszy wlotowej dla zestawu nr 3 wynosiła $d_w = 0,570$ mm, a dla zestawu nr 4 $d_w = 0,710$ mm. Należy zauważyć, że wraz ze zmniejszeniem odchyłki zarysu mierzonego zwiększa się błąd pomiaru.

Otrzymane wyniki wskazują konieczność głębszego poznania poruszonych w artykule zjawisk i zależności oraz precyzyjne określenie zakresu stosowania metody pneumatycznej w pomiarach odchyłki okrągłości.

LITERATURA

- [1] Jakubiec W., Malinowski J., Metrologia wielkości geometrycznych, Warszawa, WNT, 2004.
- [2] Gapiński B., Zalecenia dla pomiaru odchyłki okrągłości na współrzędnościowej maszynie pomiarowej (CMM), Wyd. PAK, nr 9, 2007, s. 523-526.
- [3] Rucki M., Właściwości dynamiczne wysokociśnieniowych czujników pneumatycznych o zmniejszonych komorach pomiarowych, Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Rozprawy nr 459, 2011.
- [4] Wieczorowski M., Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni, Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej, 2009.
- [5] Jermak Cz. J., Teoretyczne i praktyczne aspekty kształtowania statycznych właściwości metrologicznych pneumatycznych przetworników długości, Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Rozprawy nr 476, 2012.
- [6] Jermak Cz. J., Theory and Practice of Air Gauging, Monography, Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej, 2011.
- [7] Farago F. T., Curtis M. A., Handbook of Dimensional Measurement, New York, Industrial Press Inc. 2004.
- [8] Senger W., Pomiary odchyłki okrągłości metodą pneumatyczną, Poznań, Praca Dyplomowa Inżynierska, Politechnika Poznańska, 2009.