

Zastosowanie analizy MSA do oceny przyrządów do pomiaru struktury geometrycznej powierzchni

Application of MSA analysis for the evaluation of instruments for measuring the surface texture

STANISŁAW ADAMCZAK
JACEK ŚWIDERSKI
TOMASZ DOBROWOLSKI
NUMAN DURAKBASA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.5-6.54>

Prezentowano zastosowanie elementów analizy MSA (*measurement system analysis*) do oceny przyrządów do pomiaru struktury geometrycznej powierzchni, wykorzystujących metody stykowe i optyczne. Skupiono się na procedurze odchylenia eksperymentalnych (*bias*).

SŁOWA KLUCZOWE: struktura geometryczna powierzchni, analiza MSA

Presented is the application of MSA elements (measurement system analysis) for the assessment of measuring instruments that use contact and optical methods to measure surface texture. The main field of the study was the procedure of experimental deviations (bias).

KEYWORDS: surface texture, measurement system analysis

Podstawą funkcjonowania nowoczesnego przedsiębiorstwa produkcyjnego jest stosowanie systemów statystycznego sterowania procesem (SPC). Zapewniają one ciągły nadzór nad przebiegiem produkcji i umożliwiają szybkie reagowanie na nieprawidłowości.

System nadzoru pozwala na gromadzenie informacji i analizowanie przebiegów procesu, a co za tym idzie – zapobieganie występowaniu niezgodności (takich jak wyprodukowanie wyrobu niezgodnego ze specyfikacją) i unikanie związanych z tym strat. Podstawowe zadania SPC to: identyfikowanie sygnału świadczącego o rozregulowaniu procesu, wykrywanie przyczyn zaobserwowanego rozregulowania i wykorzystywanie uzyskanych informacji do udoskonalania procesu.

Sterowanie jakością wyrobów i procesów wytwarzania jest prowadzone w oparciu o dane pomiarowe zbierane w trakcie wytwarzania lub odbioru gotowych wyrobów.

Analiza MSA (*measurement systems analysis*) umożliwia praktyczne wyznaczenie liczbowych wartości parametrów systemu pomiarowego, decydujących o wiarygodności zbieranych za jego pomocą danych.

Dane pomiarowe pozyskuje się z wykorzystaniem przyrządów lub systemów pomiarowych, które – podobnie jak inne produkty wytwarzane przez człowieka – nie są perfekcyjne. W rzeczywistości każdy wynik pomiaru X_{pi} , uzyskany za pomocą przyrządu pomiarowego, w sposób mniej lub bardziej dokładny odwzorowuje w postaci liczby prawdziwą wartość X_o wielkości mierzonej. Im mniejsza jest różnica $\Delta = X_{pi} - X_o$, tym bardziej dokładny jest wynik pomiaru. Aby określić poziom dokładności wyniku pomiaru, należy wyznaczyć wartość różnicy Δ pomiędzy wynikiem pomiaru a wartością odniesienia, która jest estymatą wartości prawdziwej wielkości.

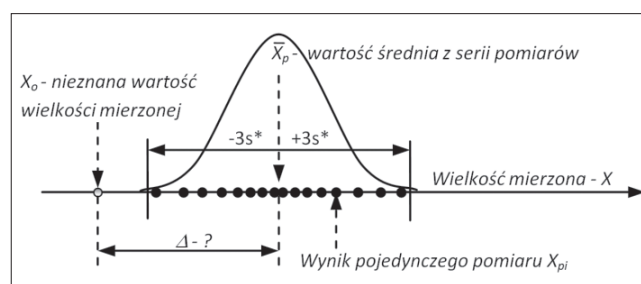
W praktyce przemysłowej i badaniach naukowych mierzy się wielkości, nie znając ich prawdziwej wartości, co wiąże się z brakiem możliwości wyznaczenia bezwzględnego błędu pomiaru Δ .

Na proces pomiaru wpływa wiele czynników, do których należą: metoda i procedura pomiarowa, procedura wzorcowania, przyrząd pomiarowy, warunki środowiskowe oraz metrolog [1–3]. Czynniki te ulegają zmianom w czasie i powodują zmienność wyników pomiarów, która ma charakter losowy.

Zjawisko to można zaobserwować w trakcie pomiarów tej samej wielkości, wykonywanych w warunkach powtarzalności z wykorzystaniem przyrządu pomiarowego o odpowiedniej rozdzielczości. Przy tak zdefiniowanym procesie pomiarowym wyniki pomiarów można traktować jak zmienną losową, analizować statystycznie i przedstawiać, podając ich miary położenia i rozproszenia.

Jeżeli na proces pomiarowy ma wpływ wiele czynników, z których żaden nie ma decydującego znaczenia, rozkład zmienności wyników pomiarów można opisać normalnym rozkładem prawdopodobieństwa Gaussa. Miara położenia wszystkich możliwych wyników pomiarów jest wartość średnia, a miarą rozproszenia – wartość odchylenia standardowego.

Na rys. 1 przedstawiono graficzną interpretację serii pomiarów. Wartość eksperymentalnego odchylenia standardowego pozwala na oszacowanie maksymalnego rozrzutu wyników pomiaru, a więc przedziału wartości, w którym z prawdopodobieństwem 0,997 powinny się mieścić wyniki kolejno powtarzanych pomiarów.

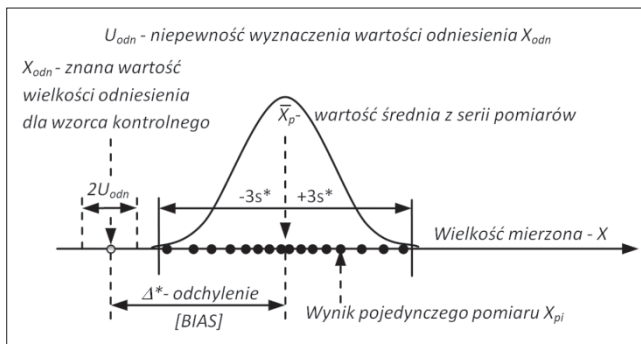


Rys. 1. Graficzna interpretacja serii pomiarów wykonanych w warunkach powtarzalności

Jeśli nie jest znana wartość błędu bezwzględnego Δ , ocena wiarygodności danych pomiarowych nie jest w pełni możliwa. W przypadku przyjęcia założenia, że objęcie nadzorem metrologicznym wyposażenia pomiarowego jest warunkiem wystarczającym, a decydująca o wiarygodności pomiarów wartość błędu bezwzględnego jest równa lub bliska 0 i można go zaniedbać, uzasadnione jest stosowanie jedynie procedury R&R (powtarzalność i odtwarzalność).

* Prof. dr hab. inż. Stanisław Adamczak (adamczak@tu.kielce.pl), mgr inż. Jacek Świdorski (swiderski@tu.kielce.pl), mgr inż. Tomasz Dobrowolski (t.dobrowolski@tu.kielce.pl) – Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej; prof. dr hab. inż. Numan Durakbasa (numandurakbasa@tuwien.ac.at) – Technische Universität Wien

Przy założeniu, że wartości błędu bezwzględnego nie można zaniedbać, wykonanie samej analizy R&R jest niewystarczające. Konieczne jest przeprowadzenie pełnej procedury MSA, obejmującej analizę liniowości odchyleń eksperymentalnych. W analizie liniowości wykorzystuje się informacje o przyrządzie pomiarowym, uzyskane podczas eksperymentu polegającego na wielokrotnym wykonywaniu pomiarów kilku wzorców o znanych wartościach odniesienia X_{odn} , z określoną niepewnością, tak dobranych, żeby pokrywały w równomiernych odstępach zakres pomiarowy ocenianego przyrządu [4, 5].



Rys. 2. Graficzna interpretacja serii pomiarów znanej wartości odniesienia X_{odn} wzorca kontrolnego

Z serii pomiarów każdego wzorca kontrolnego otrzymuje się serię wyników pomiarów, która pozwala na obliczenie wartości odchylenia eksperymentalnego Δ^* (bias) ze wzoru:

$$\Delta_i^* = \bar{X}_{pi} - X_{odn}$$

Po zakończeniu eksperymentu otrzymuje się dla każdego wzorca kontrolnego serię wartości Δ_{ik}^* , na podstawie których przeprowadza się analizę regresji i można zbadać liniowość wyznaczonych wartości odchyleń eksperymentalnych w badanym zakresie.

Najnowsze metody pomiaru struktury geometrycznej powierzchni – zgodnie z systemem klasyfikacji przedstawionym w PN-EN ISO 25178-6:2011 – dzielą się na trzy klasy [6]:

- metody profilowania liniowego,
- metody topografii przestrzennej,
- metody zintegrowanego obszaru.

Przedstawiona analiza dotyczy dwóch pierwszych klas metod, ponieważ metody należące do pierwszej klasy dostarczają dane w postaci profilu liniowego $z(x)$, a należące do drugiej klasy – dane w postaci topografii przestrzennej $z(x,y)$. W przypadku obu tych klas metod pomiar polega na wyznaczeniu współrzędnych $z(x)$ lub $z(x,y)$ nierówności występujących na powierzchni mierzonego przedmiotu. Dla wiarygodności wyników istotna jest więc liniowość zastosowanego w przyrządzie przetwornika, niezależnie od wykorzystywanej metody [7].

Program badań

Analizę liniowości odchyleń eksperymentalnych przeprowadzono dla trzech następujących przyrządów:

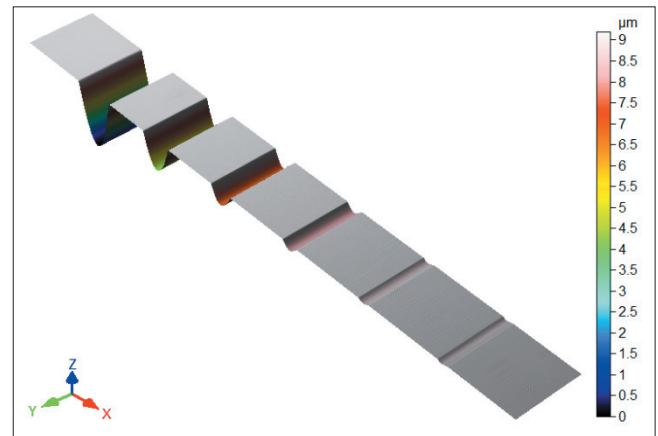
- profilometru stykowego ze stożkowym ostrzem diamentowym odwzorowującym o geometrii: $\alpha = 90^\circ$, $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$; przyrząd jest wyposażony w głowicę interferometryczną o rozdzielczości $0,8 \text{ nm}$ i zakresie pomiarowym w osi OZ wynoszącym $12,5 \text{ mm}$; ma aktywny system wibroizolacji, umożliwiający skuteczne tłumienie drgań; zastosowano krok próbkowania w osi OX wynoszący $0,5 \mu\text{m}$;

- przyrząd optyczny wykorzystujący metodę koherentnej interferometrii korelacyjnej o zakresie pomiarowym $2,2 \text{ mm}$ i rozdzielczości 10 pm z analizą obrazu opartą na matrycy o rozmiarze 1024×1024 pikseli; badania wykonano dla obiektywu o powiększeniu $\times 10$, umożliwiającego pomiar na obszarze $1,67 \times 1,67 \text{ mm}$, z krokiem próbkowania w osiach OX i OY równym $1,67 \times 1,67 \mu\text{m}$;

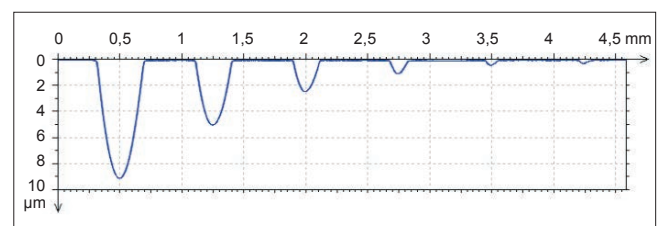
- profilometryczny przyrząd pomiarowy o otwartej architekturze, pozwalający na stosowanie różnych typów zbierania danych; w badaniach wykorzystano przyrząd wyposażony w profilometryczną głowicę konfokalną o zakresie pomiarowym $140 \mu\text{m}$ i rozdzielczości 8 nm ; minimalny krok próbkowania w osiach OX i OY wynosi $0,1 \mu\text{m}$.

Analizę liniowości poszczególnych systemów pomiarowych przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów wzorca typu A2/PGR, składającego się z sześciu rowków o głębokościach $h = 0,24; 0,37; 1,03; 2,41; 5,00; 9,14 \mu\text{m}$, które stanowiły znaną wartość odniesienia. Jednocześnie znana była niepewność wyznaczenia wartości odniesienia.

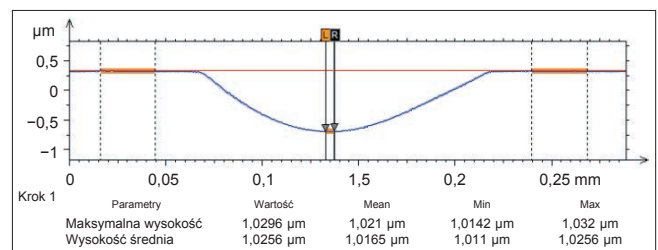
Na rys. 3 przedstawiono obraz izometryczny wyzystanego do badań wzorca, na rys. 4 – wybrany profil zmierzony wzorca, natomiast na rys. 5 – sposób wyznaczenia głębokości rowka.



Rys. 3. Obraz izometryczny wzorca typu A2/PGR



Rys. 4. Wybrany profil wzorca typu A2/PGR



Rys. 5. Przykładowa analiza głębokości rowka $h = 1,03 \text{ mm}$

Wyniki trzech serii pomiarów wzorca typu A2/PGR wykonanych poszczególnymi przyrządami przedstawiono w tabl. I.

W tabl. II zestawiono równania regresji liniowej i współczynniki determinacji dla poszczególnych przyrządów.

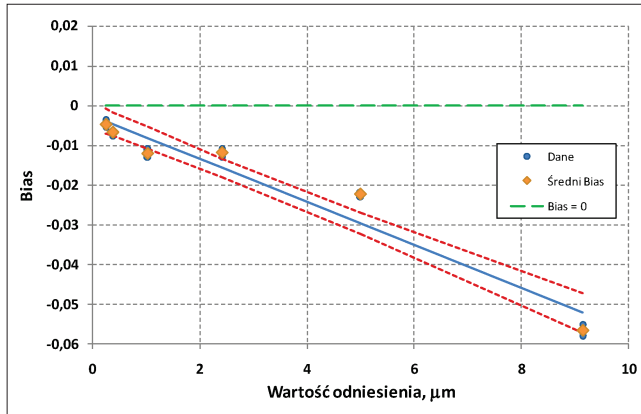
TABLICA I. Wyniki pomiarów wzorca typu A2/PGR wykonane poszczególnymi przyrządami

Typ przyrządu	Głębokość rowka, nm					
	9140	5000	2410	1030	370	240
Profilometr stykowy	9082	4977	2397	1017	363	235
	9083	4978	2399	1018	364	235
	9085	4978	2399	1019	364	236
Interferometryczny	9062	4964	2388	1013	358	234
	9061	4964	2389	1013	358	234
	9062	4963	2389	1016	358	233
Konfokalny	9121	4963	2371	991	367	238
	9120	4967	2374	1007	372	227
	9126	4972	2382	1020	363	237

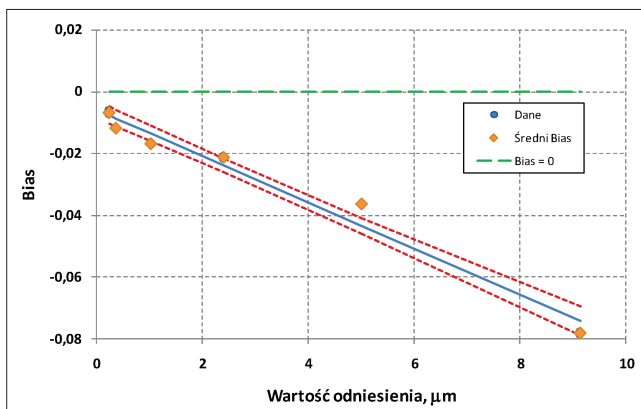
TABLICA II. Równania regresji i współczynniki determinacji dla analizowanych przyrządów

Typ przyrządu	Równanie regresji	R^2
Profilometr stykowy	$\text{bias} = -0,00542 \cdot X - 0,0026$	0,94
Interferometryczny	$\text{bias} = -0,00747 \cdot X - 0,0059$	0,97
Konfokalny	$\text{bias} = -0,00131 \cdot X - 0,0016$	0,09

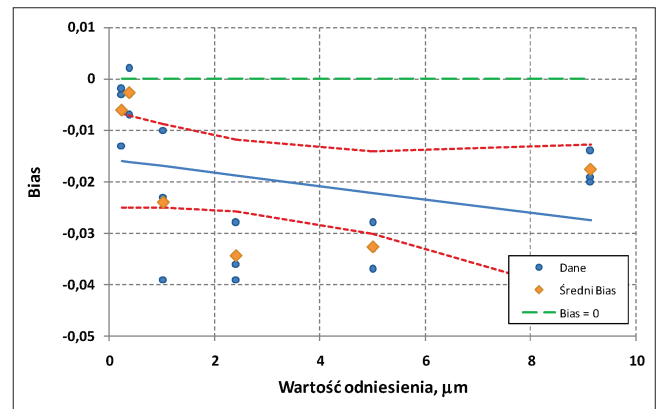
Wyniki analizy liniowości odchyłek eksperymentalnych dla poszczególnych przyrządów przedstawiono na rys. 6–8.



Rys. 6. Analiza liniowości odchyłek eksperymentalnych dla profilometru stykowego z ostrzem odwzorowującym



Rys. 7. Analiza liniowości odchyłek eksperymentalnych dla przyrządu optycznego, wykorzystującego metodę koherentnej interferometrii korelacyjnej



Rys. 8. Analiza liniowości odchyłek eksperymentalnych dla przyrządu profilowania liniowego z sensorem konfokalnym

Podsumowanie

Procedura R&R uwzględnia odchylenia Δ , jakie wprowadzają poszczególne przyrządy, wskazuje kierunek w stosunku do wartości prawdziwej wielkości mierzonej, ale nie pozwala na ustalenie bezwzględnej wartości tego odchylenia. Dopiero przeprowadzenie analizy liniowości umożliwia wyznaczenie prostej regresji odchylenia eksperymentalnego, która może posłużyć do wprowadzenia korekty wyników lub być niezbędną informacją do zbudowania budżetu niepewności pomiaru. Cykliczne powtarzanie analizy liniowości w określonych odstępach czasu daje informację o stabilności systemu pomiarowego.

W przypadku wszystkich analizowanych przyrządów do pomiaru struktury geometrycznej powierzchni otrzymano ujemny współczynnik kierunkowy prostej regresji, co oznacza, że wartości współrzędnych pionowych nierówności będą mniejsze od wartości rzeczywistych.

Moduł współczynnika kierunkowego prostej regresji dla przyrządu z głowicą konfokalną ma najmniejszą wartość, co mogłoby świadczyć o małej wartości odchylenia Δ , ale z drugiej strony mała wartość współczynnika determinacji równania regresji $R^2 = 0,09$ nie pozwala na jednoznaczną ocenę uzyskanych wyników.

Publikacja na podstawie wyników badań w ramach projektu PBS2 finansowanego z NCBR (Nr PBS2/A6/20/2013) „Badania i ocena wiarygodności nowoczesnych metod pomiaru topografii powierzchni w skali mikro i nano”.

LITERATURA

- Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni. Zarys kształtu, falistość i chropowatość”. Warszawa: WNT, 2008.
- Miller T., Adamczak S., Świdorski J., Wieczorowski M., Łętocha A., Gapiński B. “Influence of temperature gradient on surface texture measurements with the use of profilometry”. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*. 65, 1 (2017): s. 53–61 (online: 2.17.2017).
- Pawlus P., Wieczorowski M., Mathia T. “The errors of stylus methods in surface topography measurements”. Szczecin: ZAPOL, 2014.
- Tabisz R. “Creating accuracy of industrial measurement systems for their intended use”. *Joint International IMEKO TC1+ TC7 Symposium*. 21–24.09.2005. Ilmenau, Germany.
- PKN-ISO/IEC Guide 99 – Międzynarodowy słownik metrologii. Pojęcia podstawowe i ogólne terminy z nimi związane (VIM).
- PN-EN ISO 25178-70:2014 – Geometrical product specification (GPS) – Surface texture – Part 70: Material Measures.
- Giusca C., Leach R. “Calibration of the metrological characteristics of areal contact stylus instruments”. *Measurement Good Practice Guide*. No. 129 (2013). National Physical Laboratory. ISSN 1368-6550. ■