

Analiza wybranych właściwości metrologicznych mikrometrów laserowych

Jerzy Mąkowski

Streszczenie: Przedstawiona analiza wybranych parametrów metrologicznych mikrometrów laserowych stanowi wstęp do dalszych artykułów omawiających zasadę optycznych pomiarów bezdotykowych. Na podstawie pomiarów kontrolnych wybranego mikrometru laserowego omówiono możliwości pomiarowe tych urządzeń oraz wskazano na ograniczenia w zakresie zmniejszania niepewności pomiaru. Pokazano występującą często niezgodność między podawanymi przez producentów rozdzielczościami a rzeczywistymi parametrami.

Słowa kluczowe: mikrometr laserowy, rozdzielczość, zasada pomiaru

1. Wstęp

W wielu procesach produkcyjnych stosowane są mikrometry laserowe. Pomiar realizowany jest w sposób ciągły, co pozwala na bieżącą kontrolę wykonywanych detali. Opisy urządzeń pomiarowych podają niejednoznaczne informacje o parametrach metrologicznych. Sytuacja taka wskazuje na celowość dokonania pomiarów kontrolnych i analizę uzyskanych rezultatów. W omawianych badaniach wykorzystano mikrometr laserowy stosowany w produkcyjnym laboratorium metrologicznym. Analizowany problem nie dotyczy konkretnego urządzenia ani konkretnego producenta mikrometrów, lecz stosowanego powszechnie sposobu pomiaru. Zagadnienie sprowadza się do porównania informacji o możliwościach pomiarowych mikrometru z uzyskanymi wynikami. Analizując mikrometry laserowe należy uwzględnić przejście od mechaniki klasycznej do mechaniki kwantowej. Należy uwzględniać wzajemne oddziaływanie przyrządu pomiarowego i badanego obiektu. Mamy tu do czynienia z zaburzeniami układów falowych na powierzchni wałka. W przykładzie podanym w [1] (str. 47) omawiane jest zastosowanie mikroskopu. Logikę zaprezentowanego rozwiązania można porównywać z pomiarami bezdotykowymi. Korzystając z podstaw teoretycznych procesu poznania w metrologii [1] oraz z podstaw fizycznych dotyczących wiązki laserowej, a także teorii zjawisk optycznych, można opracować nowe podejście do pomiarów bezdotykowych.

2. Terminologia metrologicznych właściwości narzędzi pomiarowych

Analizując przyrząd pomiarowy, należy zbadać czy zastosowane rozwiązanie zawiera cechy opisane w [2, 4].

A – **zasada pomiaru** – naukowa podstawa pomiaru.

B – **metoda pomiarowa** – logiczny ciąg wykonywanych podczas pomiaru operacji opisanych w sposób ogólny.

C – **procedura pomiarowa** – zbiór operacji opisanych w sposób szczegółowy i realizowanych podczas wykonywania pomiarów zgodnie z daną metodą.

Prawidłowo opracowana zasada pomiaru powinna umożliwić rezygnację z systematycznego wzorcowania przyrządu. Brak dokładnie opisanej dowolnej cechy stwarza niejasności i powoduje powstawanie niezdefiniowanych błędów przypadkowych. Równie ważnym jest poprawne określenie właściwości narzędzi pomiarowych. Zawierają one podstawowe pojęcia stosowane często w sposób niepoprawny jako synonimy.

Pierwszym z nich jest pojęcie **zdolności rozdzielczej** procesu pomiarowego. W praktyce zdarza się mylnie uznawanie tej wielkości jako powtarzalność lub dokładność. Rozdzielczość wskazań w przyrządach wskazówkowych poprawia się przez stosowanie dodatkowych układów optycznych przy odczycie. Przyrządy elektroniczne mają dodatkowe wzmacniacze sygnału pomiarowego. Stosowanie dużych wzmocnień sygnału bez uwzględniania technologii pomiaru prowadzi w praktyce do uzyskiwania pozornych korzyści. Przyjęta w instrukcji przyrządu pomiarowego rozdzielczość stanowi warunek konieczny, lecz niewystarczający do poprawnego działania. Prawidłowo zaprojektowany przyrząd powinien mieć rozdzielczość odpowiednią do pełnionych zadań. Zgodnie z [3], „Rozdzielczość powinna być taka, aby wskazania uzyskiwane przy pomiarze w stanie ustalonym zmieniały się bardzo niewiele”. W [4] przyjęto – **rozdzielczość** – „najmniejsza różnica wskazania urządzenia wskazującego, która może być zauważona w wyraźny sposób”. W uwagach [4 p.5.12] podano „Dla cyfrowego urządzenia wskazującego jest to różnica wskazań odpowiadająca zmianie o jednostkę najmniej znaczącej cyfry”. Wynika z tego konieczność określenia położenia tej cyfry. Nie można przyjmować pozycji wskazującej nieustaloną wartość, czyli zmiennej w czasie odczytu.

Drugi termin to **powtarzalność**. Pojęcie to odnosi się zarówno do wyników pomiarów, jak i do przyrządu pomiarowego. Często w opisach przyrządów sugeruje się, że rozdzielczość odpowiada powtarzalności, a nawet niepewności pomiaru. Zgodnie z [3] należy przyjąć „Właściwość charakteryzująca zdolność przyrządu pomiarowego do wskazywania tej samej wartości mierzonej bez uwzględniania błędów systematycznych związanych ze „zmiennością wskazań” jest określona w dokumencie OIML [3 str. 73] jako powtarzalność”. Zgodnie z [4] – **powtarzalność** – to „stopień zgodności wyników kolejnych pomiarów tej samej wielkości mierzonej, wykonywanych w tych samych warunkach pomiarowych”. „Powtarzalność można wyrażać ilościowo za pomocą charakterystyk rozrzutu wyników”. Należy zwrócić uwagę na słowo „można”. Omawiane pojęcie nie jest jednoznacznie określone. Podane określenia pozwalają na uznanie za stopień powtarzalności ostatnie miejsce odczy-

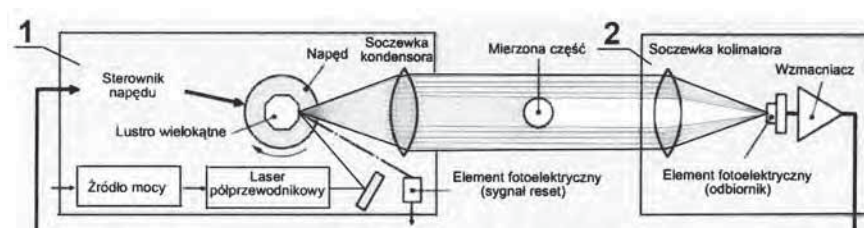
tanych wartości, które jest niezmiennie w zbiorze wyników. Dodatkowym pojęciem jest odtwarzalność, będąca odpowiednikiem powtarzalności, lecz dla zbiorów wykonanych przez różne osoby lub na różnych urządzeniach.

Kolejne pojęcie to **niepewność** pomiarów. Pojęcie to zostało dokładnie omówione w [5].

Obecna analiza mikrometrów laserowych sprowadzi się do badania rozdzielczości i powtarzalności.

3. Zasada działania mikrometrów laserowych

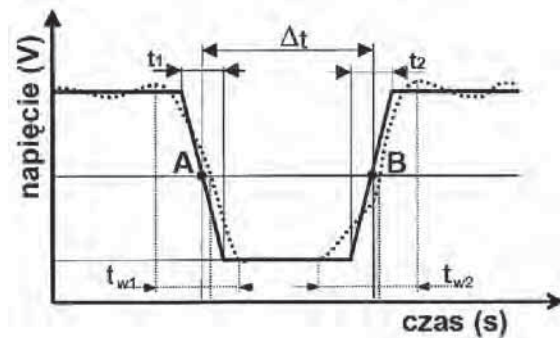
Znane mikrometry laserowe pracują zgodnie ze schematem podanym na rys.1



Rys. 1. Idea pomiaru mikrometrem laserowym

Fig. 1. Idea of measuring with laser micrometer

System pomiarowy (rys. 1) zbudowany jest z zespołu nadajnika (1), zespołu odbiornika (2) i układu obliczającego wynik (nieuwzględnionego na rysunku). Podstawowe elementy zespołu nadajnika to: laser półprzewodnikowy, obrotowe lustro wielokątne (pryzma wielościenna), soczewka kondensora. Zadaniem tego zespołu jest równoległe przesyłanie wiązki światła laserowego przez obszar mierzonego wałka w kierunku zespołu odbiornika. Podstawowe elementy zespołu odbiornika to: soczewka kolimacyjna, detektor (element fotoelektryczny), wzmacniacz. Zadaniem tego zespołu jest skupienie uzyskanej wiązki światła na detektorze i przesłanie sygnału do układu obliczającego wartość wymiaru. Sposób pomiaru polega na wyznaczeniu czasu przysłonięcia wiązki światła laserowego przez mierzony przedmiot. Rejestrując napięcie uzyskiwane na detektorze pomiarowym, otrzymuje się wykres pokazany na rys. 2. Światło laserowe, padając na krawędź mierzonego wałka, zgodnie z prawami fizyki musi ulegać dyfrakcji. Teoretycznie powinniśmy uzyskać wykres zaznaczony linią kropkową. Dokładne odczytanie zawartych tam informacji jest kłopotliwe. Stosowane są więc zabiegi techniczne (obecnie nie będą omawiane) pozwalające na uzyskanie wykresu narysowanego linią ciągłą. Na podstawie tak przetworzonych informacji określone jest (zgodnie z algorytmem producenta) położenie punktów pomiarowych **A** i **B**. Kolejnym etapem jest wyznaczenie czasu przebiegu światła między tymi punktami. Znając czas przysłonięcia, należy odnieść go do wartości średnicy w milimetrach. Jak widać, w mikrometrach laserowych nie określono **zasady pomiaru**. Nie istnieje opracowanie naukowe przyporządkowujące określone zjawisko fizyczne do zastosowanej metody pomiarowej. Proces przysyłania nie stanowi zjawiska fizycznego. Dokonany pomiar wartości czasu przysłonięcia wiązki światła przez mierzony wałek nie mówi nic o jego średnicy. Podsta-



Rys. 2. Idea metody pomiarowej

Fig. 2. Idea of measuring method

wą pomiaru jest wartość czasu przysłonięcia uzyskana na wałku wzorcowym. Otrzymujemy wówczas możliwość porównania czasu przysłonięcia uzyskanego w procesie wzorcowania przyrządu z czasem przysłonięcia uzyskanym w procesie pomiaru. Rozwiązanie takie wprowadza, poza błędami wynikającymi z konstrukcji urządzenia (geometria zwierciadeł,

położenie i bicie osi obrotu, położenie wałka), dodatkowe błędy związane z wartością wymiaru wzorca i błędami procesu wzorcowania.

Realizacja pomiaru wymaga więc kalibrowania urządzenia. W tym celu stosowane są elementy wzorcowe, najczęściej sprawdzone przez producenta urządzenia. Użytkownicy mikrometru powinni, w określonych przez producenta odstępach czasu, uzyskiwać świadectwa kalibracji dla stosowanych wzorców. Po przeprowadzeniu kalibracji wzorcem (np. wałkiem $\Phi 0,9987$ mm – podana wartość została zaczerpnięta z konkretnego świadectwa wzorcowania) ustalany jest czas przysłonięcia dla tego elementu i następnie zgodnie z algorytmem zakodowanym w systemie pomiarowym następuje porównanie tego czasu z czasami uzyskanymi dla elementów mierzonych.

4. Eksperymenty pomiarowe

Z punktu widzenia metrologii ważna jest rozdzielczość urządzenia. W dostępnych instrukcjach obsługi spotykamy się z określeniem „rozdzielczość (do wyboru) $0,01 \mu\text{m}$ – $100 \mu\text{m}$ ”. Rozwiązanie takie świadczy o braku powiązań rozdzielczości z rzeczywistymi cechami konstrukcyjnymi przyrządu. Dla podanej wyżej wartości średnicy wzorca ostatnią cyfrą znaczącą jest dziesiąta część mikrometra. Zapisy cyfrowe wartości mierzonych wielkości zawierają kilkanaście miejsc znaczących. Odcinanie ich w dowolny sposób nie powinno poprawiać niepewności pomiaru. Poszukując związku pomiędzy ustawioną rozdzielczością i wynikami pomiaru wykonano dwa cykle pomiarowe. Mierzono wałek o średnicy nominalnej $2,5$ mm. Ustawiono (zgodnie z instrukcją) rozdzielczość $0,01 \mu\text{m}$. Dla zastosowanego przyrządu podano w instrukcji „precyzję powtarzalności (2σ) $\pm 0,05 \mu\text{m}$ ”. Wymienione określenie nie ma

uzasadnienia w znanych pojęciach normatywnych. Można przyjąć podaną wartość jako rozrzut wyników na poziomie 2σ . Wszystkie pomiary wykonywano w laboratorium o temperaturze stabilizowanej ($20 \pm 0,5$ °C). Poniżej zestawiono wyniki dwóch serii pomiarowych po 512 odczytów realizowanych w cyklach automatycznych. Między seriami nastąpiła przerwa ok. 10 s. Wałek mierzony zajmował stałą pozycję.

Uzyskane wyniki posortowano według wartości i ich fragment zamieszczono w tab. 1.

Tab. 1. Fragment wyników pomiarów wałka $\Phi 2,5$ mm

Tab. 1. Extract of results of measuring cylinder 2.5 mm

L.p.	Średnic (mm)	Liczba wyników seria 1	Liczba wyników seria 2	Suma wyników (seria1+seria2)
001	2,50373	3	1	4
002	2,50374	brak wartości	brak wartości	brak wartości
003	2,50375	brak wartości	brak wartości	brak wartości
004	2,50376	brak wartości	brak wartości	brak wartości
005	2,50377	brak wartości	brak wartości	brak wartości
006	2,50378	brak wartości	brak wartości	brak wartości
007	2,50379	brak wartości	brak wartości	brak wartości
008	2,50380	10	11	21
009	2,50381	brak wartości	brak wartości	brak wartości
010	2,50382	brak wartości	brak wartości	brak wartości
011	2,50383	brak wartości	brak wartości	brak wartości
012	2,50384	brak wartości	brak wartości	brak wartości
013	2,50385	brak wartości	brak wartości	brak wartości
014	2,50386	brak wartości	brak wartości	brak wartości
015	2,50387	15	13	28
016	2,50388	brak wartości	brak wartości	brak wartości
017	2,50389	brak wartości	brak wartości	brak wartości
018	2,50390	brak wartości	brak wartości	brak wartości
019	2,50391	brak wartości	brak wartości	brak wartości
020	2,50392	brak wartości	brak wartości	brak wartości
021	2,50393	brak wartości	brak wartości	brak wartości
022	2,50394	10	16	26
023	2,50395	brak wartości	brak wartości	brak wartości

Tab. 2. Zestawienie wyników pomiarów wałka $\Phi 2,5$ mm

Tab. 2. Comparison of results of cylinder measuring 2.5 mm

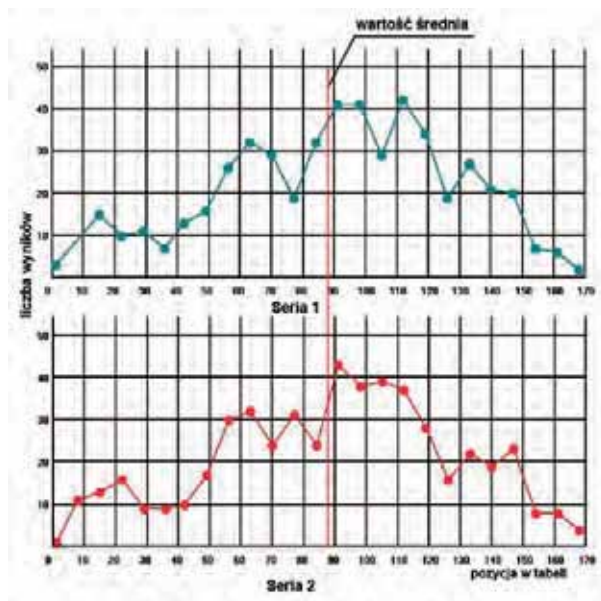
L.p.	Treść	Seria 1 (mm)	Seria 2 (mm)
1	Wartość minimalna	2,50373	2,50373
2	Wartość maksymalna	2,50541	2,50541
3	Różnica	0,00169	0,00169
4	Wartość średnia z serii	2,50462	2,50462
5	Wartość średnia po 50 pomiarach	2,50461	2,50464
	200 pomiarach	2,50462	2,50462
	250 pomiarach	2,50462	2,50462
	300 pomiarach	2,50462	2,50462
	350 pomiarach	2,50462	2,50461
	400 pomiarach	2,50463	2,50461
	450 pomiarach	2,50462	2,50462
500 pomiarach	2,50462	2,50462	
512 pomiarach	2,50462	2,50462	
6	Odchylenie standardowe z próby (niepewność standardowa pojedynczej obserwacji)	$3,8007 \cdot 10^{-4}$	$3,8453 \cdot 10^{-4}$

Rozrzut wyników wyniósł 0,00169 mm (od 2,50373 mm do 2,50541 mm). Wyniki pomiarów rejestrowane z rozdzielczością 0,01 μm powinny dla otrzymanego zakresu rozrzutu wystąpić na ok. 160 pozycjach. System pomiarowy zarejestrował wartości tylko dla 25 pozycji. W tab.1 podano fragment obejmujący obszar od 2,50373 mm do 2,50395 mm. Zastanawiające jest występowanie odczytanych wartości tylko w ściśle określonych miejscach. Odstęp między poszczególne wartości wynosi 0,07 μm . Uzyskany rezultat nie ma związku z przyjętą rozdzielczością. Zgodnie z [5] „metodę typu A obliczania niepewności standardowej stosuje się wtedy, gdy istnieje możliwość przeprowadzenia w identycznych warunkach pomiarowych wielu niezależnych obserwacji jednej z wielkości wejściowych. Jeżeli rozdzielczość procesu pomiarowego jest wystarczająca, otrzymane wyniki charakteryzuje zauważalny rozrzut”. Uwaga dotycząca punktu 3.2.2. [5] za małą liczbę obserwacji przyjmuje się $n < 10$. Każdą większą liczbę obserwacji należy więc uznać za wystarczającą. Pomiary wykonane dla 512 obserwacji należy więc uznać za wiarygodne dla obliczania niepewności metodą A. Obliczono wartości średnie z pomiarów uzyskiwane dla różnej liczby obserwacji, co pokazano w tab. 2.

W opracowaniu [6] podano „Wydaje się, że duże serie pomiarów ($n > 30$), można zalecać głównie wtedy, gdy celem badania jest wyznaczenia tzw. połączonego odchylenia

nia standardowego $s_p(X)$ (w oryginale przewodnika ISO: *pooled experimental standard deviation*), które będzie potem uznawane za znaną niepewność pojedynczej obserwacji przy prowadzeniu podobnych pomiarów w takich samych warunkach.” Korzystając z [6] należy stwierdzić „Wykonywanie serii pomiarów ma sens jedynie wtedy, gdy błędy przypadkowe są istotnie większe od rozdzielczości przyrządu pomiarowego i rzeczywiście podczas pomiarów obserwuje się zmienność wyników”. Dodatkowo opracowano wykresy rozkładu wyników pomiarów dla obu serii, co przedstawiono na rys. 3

Linia czerwona (rys. 3) wyznacza położenie wartości średniej, natomiast kropki oznaczają odczytane wartości.



Rys. 3. Rozkłady wyników pomiarów z poszczególnych serii
Fig. 3. Schedule of measuring results of individual series

5. Parametry mikrometrów laserowych

Parametry mikrometrów laserowych są podawane w sposób niejednoznaczny. Producenci nie stosują jednolitego słownictwa np. wg [4]. W tab. 3 podano wybrane parametry mikrometrów laserowych kilku producentów. Niektórzy stosują określenie „dokładność”. Nie wiadomo, czy traktować to jako niepewność czy jako powtarzalność. Oba te określenia podano w kolumnie „powtarzalność”.

We wszystkich znanych mikrometrach laserowych stosowane są te same sposoby pomiaru. Podane parametry wskazują na różne traktowanie rzeczywistych możliwości metody pomiaru.

6. Wnioski z przeprowadzonych eksperymentów

Na podstawie podanych założeń teoretycznych oraz tab. 2. i rys. 3. można określić następujące wnioski:

- stosowane mikrometry laserowe nie mają określonej zasady pomiaru tzn. nie jest określona naukowa podsta-

Tab. 3. Wybrane parametry mikrometrów laserowych
Tab. 3. Selected parameters of laser micrometers

L.p.	Typ mikrometru	Kraj	Rozdzielczość (μm)	Powtarzalność (μm)
1	LBM-40	Niemcy	0,25	1,0
2	LSM-902	Japonia	0,01	±0,05
3	LDM-302H	Japonia	0,1	±1,0
4	XLS40	Włochy	0,01	±0,1
5	LDM-D10T	Chiny	Brak danych	±1,0
6	Seria 1200	Niemcy	Brak danych	±0,1
7	TLaser 122	USA	0,125	±2,5
8	MMS34E	USA	Brak danych	3,0
9	ODC 2500-35	USA	< 1,0	< 3,0

wa pomiaru (zjawisko fizyczne i jego zastosowanie praktyczne),

- wyniki dla serii 512 pomiarów nie mają charakteru rozkładu normalnego,
- uzyskana w wyniku obliczeń wartość średnia nie została zarejestrowana w serii pomiarów,
- uzyskane w obu seriach wartości średnie dla różnej liczby pomiarów (tab. 2) są identyczne na poziomie dziesiątych części mikrometra,
- uzyskano niepewność standardową pojedynczej obserwacji $\pm 0,4 \mu\text{m}$,
- wzorce do kalibrowania urządzeń pomiarowych posiadają wymiary określone na poziomie dziesiątych części mikrometra (np. $0,9987 \text{ mm}$),
- określanie wartości średnicy na poziomie setnych części mikrometra nie można uznać za poprawne, na podstawie przeprowadzonych pomiarów można przyjąć rozdzielczość zastosowanego przyrządu na poziomie 20 % uzyskanego rozrzutu wyników, czyli $0,34 \mu\text{m}$.

Przedstawiona analiza pomiarów wskazuje na potrzebę poszukiwania przyczyn uniemożliwiających uzyskiwanie dowolnych wartości w obszarze rozrzutu wyników oraz nieuzyskiwanie rozkładu normalnego. Podstawowym błędem stosowanym przy tych systemach pomiarowych jest brak określenia zasady pomiaru. Mamy wówczas do czynienia z eksperymentalnym formułowaniem systemu pomiarowego bez możliwości teoretycznego sprawdzenia jego słuszności. W pracy [3] czytamy „Statystyczne modele błędów należy przyjąć jako podstawę rozważań wtedy, gdy ma być badany skomplikowany obiekt, podlegający oddziaływaniu wielu wielkości wpływających, i gdy – z powodów technicznych, fizycznych, ekonomicznych lub czasowych – nie ma możliwości określenia deterministycznych właściwości obiektu oraz wielkości wpływających. Niekompletny obiekt jest więc opisywany przez pewien niekompletny model”. Przedstawione wyniki oraz wnioski wskazują na brak możliwości zmniejszenia niepewności pomiarów mikrometrami laserowymi. Powiększanie liczby odczy-

tów prowadzi do rozwiązań teoretycznych, czyli nieskończonej ilości pomiarów. Zastosowania praktyczne nie pozwalają na takie postępowanie. Mimo setek pomiarów, nie uzyskuje się rozkładów normalnych. Równocześnie nie istnieje możliwość korzystania z tych przyrządów bez obliczania wartości średniej z minimum 200 pomiarów. Mikrometry laserowe są doskonałymi przyrządami gdy korzystamy z nich przy niepewności ok. $\pm 0,5 \mu\text{m}$. Rozwój bezdotykowych pomiarów optycznych wymaga dokładnego opracowania zasady pomiaru. Problem ten zostanie omówiony w następnym artykule.

Bibliografia

1. Borzykowski J. (red.), *Współczesna metrologia Zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
2. Dusza J., Gortat G., Leśniewski A., *Podstawy miernictwa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
3. Sydenham P.H., *Podręcznik metrologii podstawy teoretyczne*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1988.
4. *Międzynarodowy Słownik Podstawowych i Ogólnych Terminów Metrologii* (wyd. polskie), GUM 1996.
5. Dokument EA-4/02, *Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu*, GUM 2001.
6. Arendarski J., *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006. ■

Analysis of selected properties of metrological laser micrometers

Abstract: This analysis of selected properties of metrological laser micrometers is an introduction to further articles in which principles of optical touchless measuring would be discussed. Basing on control measuring of a selected laser micrometer, measuring possibilities of these units have been discussed, also some restrictions concerning limitation of uncertainty of measuring have been indicated. Frequently appearing discrepancy between resolutions, presented by the producers, and real capabilities have been shown.

Keywords: laser micrometer, resolution, principle of measurement

mgr inż. Jerzy Mąkowski

Absolwent Politechniki Warszawskiej Wydziału Mechaniki Precyzyjnej (obecnie Mechatroniki), projektant systemów zarządzania w przemyśle. Obecnie bada bezdotykowe optyczne metody pomiarowe w Instytucie Metrologii i Systemów Biomedycznych Politechniki Warszawskiej.

e-mail: jurek.mako@wp.pl

