ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1989
Seria : AUTOMATYKA z.98 Nr kol.1042

Paweł FOTOWICZ
Ryszard JABŁOŃSKI

PRZYRZĄDY DO POMIARU ŚREDNICY CIENKICH ELEMENTÓW

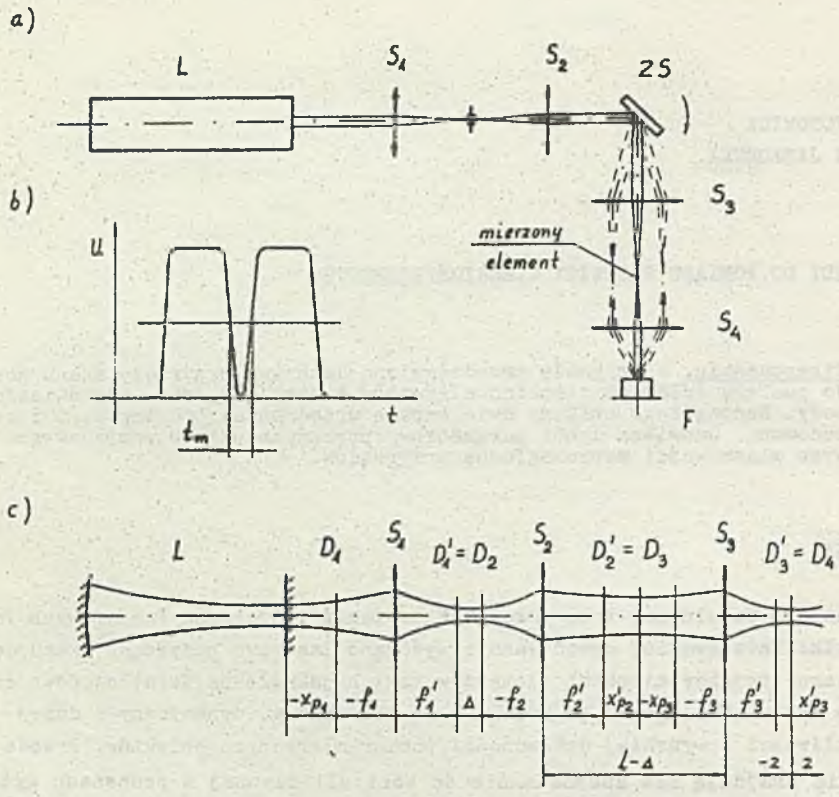
Streszczenie. W artykule przedstawiono laserowe przyrządy skanujące do pomiaru średnicy cienkich elementów takich jak druty czy światłowody. Szczegółowo opisano dwie wersje urządzenia: podstawową i rozbudowaną. Omówiono dobór parametrów optycznych układu pomiarowego oraz właściwości metrologiczne przyrządów.

1. WSTĘP

W Centrum Uczelniano-Przemysłowym Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej opracowano i wykonano laserowe przyrządy skanujące do pomiaru średnicy cienkich elementów, takich jak: włókna światłowodowe czy cienkie druty. Urządzenia te umożliwiają bezstykowy, dynamiczny o dużej częstotliwości i wysokiej dokładności pomiar mierzonych obiektów. Przede wszystkim znajdują one zastosowanie do kontroli czynnej w procesach wytwarzania tych elementów, gdyż mierzony obiekt nie ma stałej pozycji pomiarowej i może przemieszczać się w trakcie badań w pewnym dopuszczalnym obszarze pomiarowym.

2. ZASADA POMIARU

Zasada pomiaru średnicy polega na mierzeniu czasu przesłonięcia skanowanej wiązki światła laserowego przez badany element [1]. Strumień światła emitowany przez laser He-Ne przechodzi przez układ formujący zbudowany z soczewek S_1 i S_2 (rys. 1a). Układ ten tłumi mody rzędów wyższych od podstawowego i umożliwia dopasowanie kształtu wiązki laserowej w przestrzeni pomiarowej do zakresu mierzonych elementów. Światło laserowe skanowane jest przez zwierciadło ZS. Soczewka pomiarowa S_3 zamienia ruch kątowy wiązki na przesunięcie poprzeczne oraz ogniskuje ją w obszarze pomiarowym mierzonego elementu. Badany obiekt znajduje się w pobliżu przewężenia wiązki i osi optycznej układu pomiarowego. Przesłaniane przez mierzony element światło laserowe skupiane jest przez soczewkę S_4 w płaszczyźnie fotodetektora F. Układ elektroniczny mierzy czas przesłonięcia wiązki (t_m) w połowie wysokości impulsu przesłonięcia. Jest on proporcjonalny do średnicy mierzonego elementu.



Rys. 1. a) Zasada pomiaru średnicy, b) Sygnał przesłonięcia wiązki, c) Kształt wiązki w układzie pomiarowym. L - laser, S_1 i S_2 - soczewki układu formującego, ZS - zwierciadło skanujące, S_3 - soczewka pomiarowa, S_4 - soczewka fotodetektora, F - fotodetektor.

Fig. 1. a) Principle of diameter measurement, b) Shape of shading signal, c) Shape of the laser beam in the measuring system. L - laser, S_1 and S_2 - beam forming lenses, ZS - scanning mirror, S_3 - measuring lens, S_4 - photodetector lens, F -photodetector.

3. PARAMETRY OPTYCZNE UKŁADU POMIAROWEGO

Parametry optyczne układu pomiarowego decydują o wartości dolnej granicy zakresu pomiarowego i rozkładzie błędu pomiaru średnicy w obszarze pomiarowym badanego elementu. Mają one wpływ na kształt wiązki w przestrzeni pomiarowej. Wiązka ta powinna charakteryzować się minimalną rozbieżnością oraz mieć średnicę nie większą od najmniejszego mierzonego wymiaru. Średnica jej w odległości z od przewężenia, stanowiącego środek obszaru pomiarowego, opisana jest zależnością :

$$2w_z = 2w_o \sqrt{1 + (2z/D)^2} \qquad (1)$$

gdzie: $2w_o$ - średnica wiązki w przewężeniu,
D - parametr konfokalny wiązki.

Dokładna analiza tej funkcji prowadzi do wniosku, że dla typowej długości obszaru pomiarowego ±1 mm i wartości dolnej granicy zakresu pomiarowego 50 µm optymalny kształt ma wiązka charakteryzująca się parametrem konfokalnym D=5.5 mm [2].

W układzie pomiarowym wiązka laserowa opisana parametrem D_1 transformowana jest w przestrzeni pomiarowej w wiązkę opisaną parametrem D_4. Związek między tymi parametrami określa zależność:

$$D_4 = \frac{f_3^2 D_3}{x_{p3}^2 + (D_3/2)^2} \qquad (2)$$

gdzie:

$$D_3 = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \frac{D_1}{(1 + x_{p1}\Delta/f_1^2)^2 + (D_1\Delta/2f_1^2)^2} \qquad (3)$$

$$x_{p3} = \frac{D_3}{D_1}\left[x_{p1}(1 + x_{p1}\Delta/f_1^2) + \Delta(D_1/2f_1)^2\right] + f_2 + f_3 + \Delta - 1 \qquad (4)$$

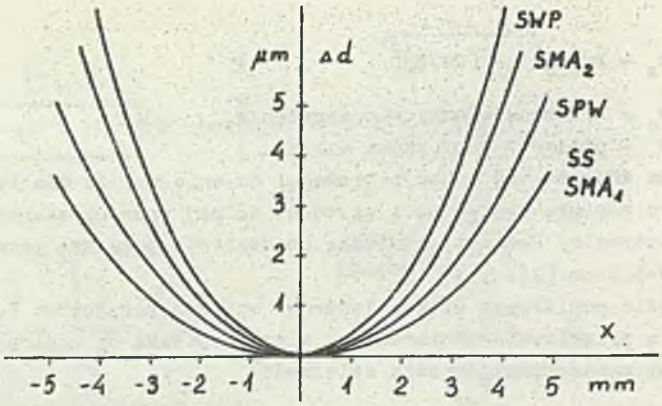
a pozostałe oznaczenia jak na rys. 1c.

Najistotniejszy wpływ na wartość parametru D_4 ma ogniskowa soczewki pomiarowej. Z obliczeń wynika, że otrzymanie wiązki o optymalnej wartości parametru konfokalnego umożliwia zastosowanie soczewki o ogniskowej f_3=50 mm.

Soczewka pomiarowa zamienia ruch kątowy wiązki na przesunięcie poprzeczne w płaszczyźnie pomiarowej. Przekształcenie to ma charakter nieliniowy, ponieważ opisuje je funkcja tangens oraz obciążone jest aberracjami soczewki pomiarowej. Istotny wpływ na stopień tej nieliniowości ma kształt soczewki. Rys. 2 ilustruje związek pomiędzy błędem pomiaru średnicy a rodzajem soczewki pomiarowej. Najmniejszy błąd powstaje przy przejściu promienia laserowego przez soczewkę symetryczną. Soczewka ta w maksymalnym stopniu minimalizuje nieliniowość zamiany ruchu kątowego na przesunięcie poprzeczne wiązki.

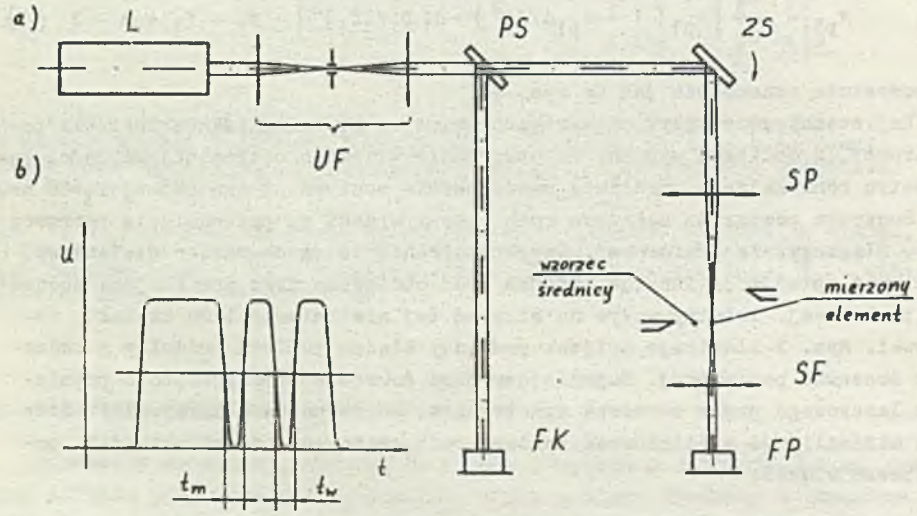
4. WERSJA PODSTAWOWA PRZYRZĄDU

Schemat optyczny wersji podstawowej przyrządu przedstawia rys. 3 [3, 4]. Wiązka światła laserowego za układem formującym UF rozdzielana jest przez płytkę światłodzielącą PS pomiędzy tor kompensacji i tor pomiarowy. Wiązka



Rys. 2. Błąd systematyczny pomiaru średnicy przy przejściu wiązki przez: SWP - soczewkę wypukło-płaską, SPW - soczewkę płasko-wypukłą, SS - soczewkę symetryczną, SMA_1 - soczewkę o minimalnej aberracji sferycznej po stronie mniejszej krzywizny, SMA_2 - soczewkę o minimalnej aberracji sferycznej po stronie większej krzywizny.

Fig. 2. Systematic error in diameter measurement when the beam goes through SPW - plano-convex lens, SWP - convexo-plane lens, SS - symmetrical lens, SMA_1 - lens with minimum spherical aberration on the side of smaller curvature, SMA_2 - lens with minimum spherical aberration on the side of larger curvature.



Rys. 3. a) Schemat optyczny wersji podstawowej przyrządu, b) Sygnał przesłonięcia wiązki. L - laser, UF - układ formujący, PS - płytka światłodzieląca, ZS - zwierciadło skanujące, SP - soczewka pomiarowa, SF - soczewka fotodetektora, FK - fotodetektor kompensacji, FP - fotodetektor pomiarowy.

Fig. 3. a) Optical scheme of the system basic configuration, b) Shape of shading signal. L - laser, UF - beam forming set, PS - beam splitter, ZS - scanning mirror, SP - measuring lens, FK - photodetector of compensation, FP - photodetector of measurement. SF - photodetector lens.

w torze kompensacji pada na fotodetektor FK, którego sygnał wykorzystywany jest w układzie elektronicznym do eliminacji wpływu zmian mocy lasera na wynik pomiaru czasu przesłonięcia. Wiązkę w torze pomiarowym skanuje zwierciadło ZS, którego oś obrotu sprzężona jest z osią silnika prądu stałego stabilizowanego elektronicznie. W obszarze pomiarowym obok mierzonego elementu umieszczony jest wzorzec średnicy. Fotodetektor rejestruje sygnał, w którym występują dwa impulsy przesłonięcia. Układ elektroniczny mierzy czasy przesłonięcia wiązki (t_m i t_w) przez mierzony element i wzorzec. Pomiar czasu przesłonięcia wiązki przez wzorzec umożliwia wzorcowanie przyrządu oraz bieżącą korekcję szybkości skanowania w przypadku zmiany obrotów silnika.

Przyrząd umożliwia pomiar średnic w zakresie od 50 do 150 µm z błędem ±1 µm, częstotliwością 8 Hz w obszarze pomiarowym 2x2 mm.

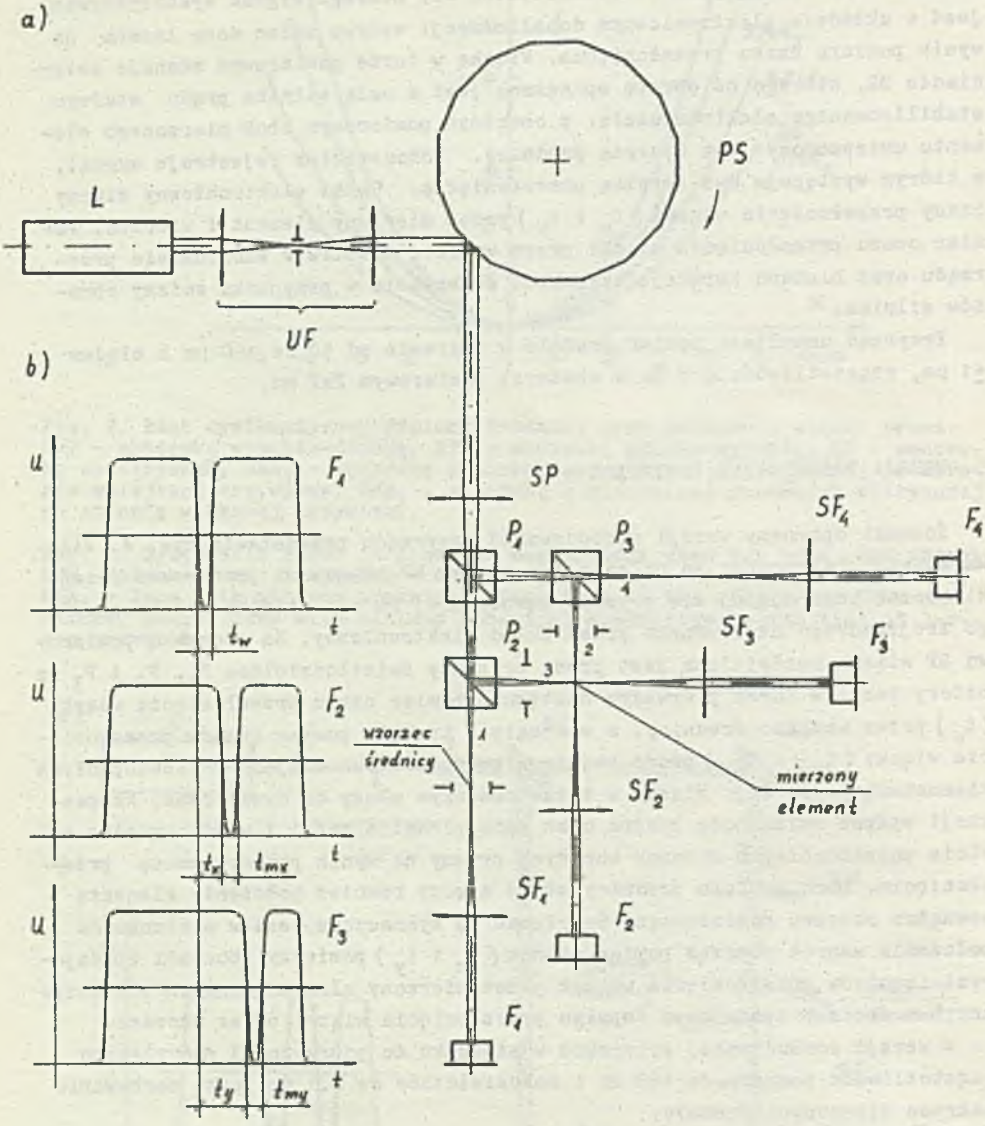
5. WERSJA ROZBUDOWANA PRZYRZĄDU

Schemat optyczny wersji rozbudowanej przyrządu przedstawia rys. 4. Wiązka światła laserowego za układem formującym UF skanowana jest przez ścianki boczne obracającej się pryzmy, zamocowanej na osi silnika synchronicznego trójfazowego sterowanego przez układ elektroniczny. Za soczewką pomiarową SP wiązka rozdzielana jest przez pryzmaty światłodzielące P_1, P_2 i P_3 na cztery tory. W torze pierwszym następuje pomiar czasu przesłonięcia wiązki (t_w) przez wzorzec średnicy, a w drugim i trzecim pomiar czasów przesłonięcia wiązki (t_{mx} i t_{my}) przez badany element w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach (rys. 4b). Wiązka w torze czwartym służy do dynamicznej kompensacji wpływu zmian mocy lasera oraz kąta piramidalności i współczynnika odbicia poszczególnych ścianek bocznych pryzmy na wynik pomiaru czasu przesłonięcia. Obok pomiaru średnicy układ mierzy również położenie elementu wewnątrz obszaru pomiarowego. Położenie to wyznaczone jest w stosunku do położenia wzorca poprzez pomiar czasów (t_x i t_y) pomiędzy zboczami opadającymi impulsów przesłonięcia wiązek przez mierzony element w dwóch płaszczyznach a zboczem opadającym impulsu przesłonięcia wiązki przez wzorzec.

W wersji rozbudowanej przyrządu w stosunku do poprzedniej podwyższono częstotliwość pomiaru do 160 Hz i rozdzielczość do 0.1 µm, przy zachowaniu zakresu mierzonych średnic.

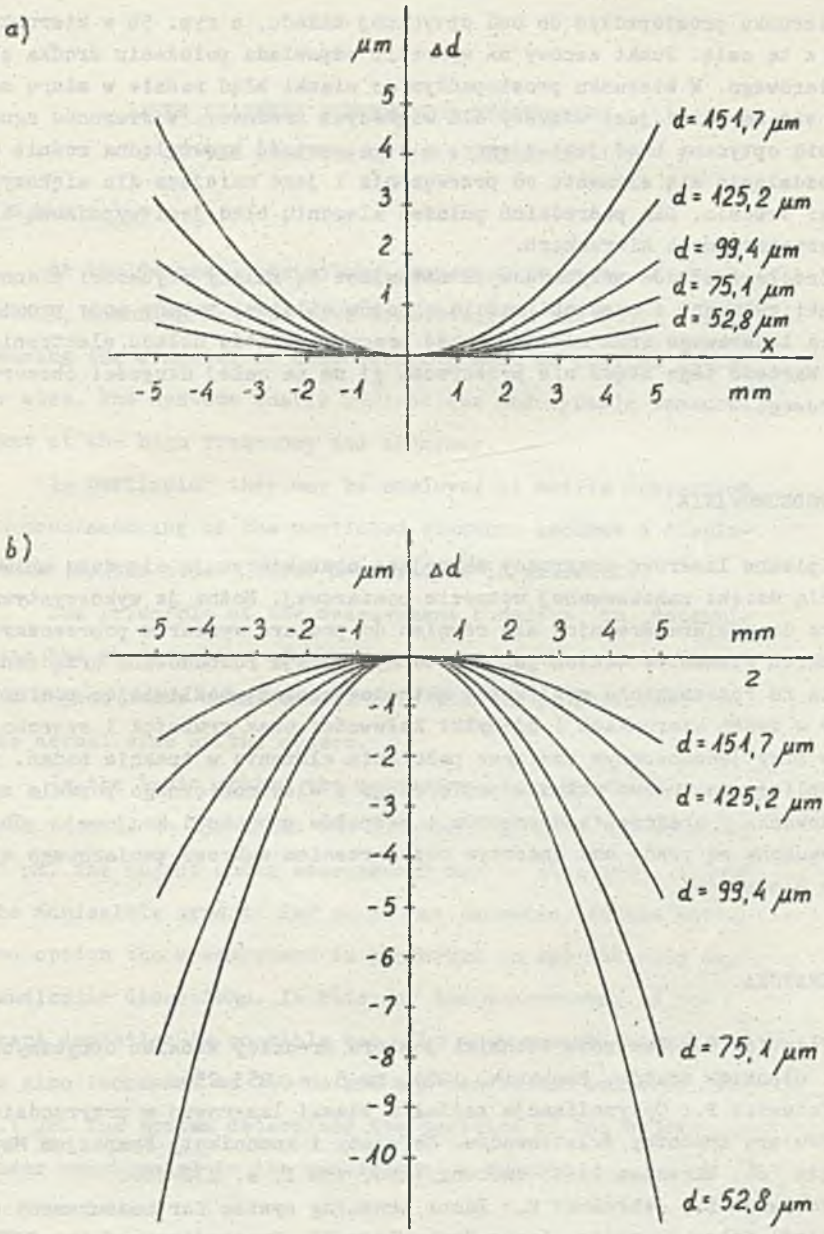
6. WŁAŚCIWOŚCI METROLOGICZNE PRZYRZĄDÓW

W układzie pomiarowym przyrządów występują źródła błędów systematycznych i przypadkowych. Błąd systematyczny spowodowany jest zmianami średnicy wiązki w przestrzeni pomiarowej mierzonego elementu oraz nieliniowością zamiany ruchu kątowego wiązki na przesunięcie poprzeczne w płaszczyźnie pomiarowej. Rozkład tego błędu będącego funkcją średnicy elementu, kierunku oraz zmian jego położenia przedstawia rys. 5. Rys. 5a ilustruje zmianę błędu



Rys. 4. a) Schemat optyczny wersji rozbudowanej przyrządu, b) Sygnały przesłonięcia wiązki rejestrowane przez fotodetektory F_1, F_2 i F_3. L - laser, UF - układ formujący, PS - pryzma skanująca, SP - soczewka pomiarowa, P_1, P_2 i P_3 - pryzmaty światłodzielące, SF_1, SF_2, SF_3 i SF_4 - soczewki fotodetektorów, F_1, F_2, F_3 i F_4 - fotodetektory.

Fig. 4. a) Optical scheme of an extended option of the system, b) Shape of shading signal registered by photodetectors F_1, F_2 and F_3. L - laser, UF - beam forming set, PS - polygonal scan mirror, SP - measuring lens, P_1, P_2 and P_3 - beam splitting prisms, SF_1, SF_2, SF_3 and SF_4 - lenses of photodetectors. F_1, F_2, F_3 and F_4 - photodetectors.



Rys. 5. Rozkład błędu systematycznego pomiaru średnicy: a) w kierunku prostopadłym do osi optycznej układu, b) w kierunku zgodnym z osią optyczną układu.

Fig. 5. Systematic error distribution in diameter measurement: a) along the direction perpendicular to the optical axis system, b) along the direction consistent with the system optical axis.

w kierunku prostopadłym do osi optycznej układu, a rys. 5b w kierunku zgodnym z tą osią. Punkt zerowy na wykresie odpowiada położeniu środka obszaru pomiarowego. W kierunku prostopadłym do wiązki błąd rośnie w miarę oddalania się od osi i jest większy dla większych średnic. W kierunku zgodnym z osią optyczną błąd jest ujemny, a jego wartość bezwzględna rośnie w miarę oddalania się elementu od przewężenia i jest mniejsza dla większych wartości średnic. Dla pośrednich położeń elementu błąd jest wypadkową błędów w rozpatrywanych kierunkach.

Źródłami błędów przypadkowych natomiast są zmiany szybkości skanowania wiązki związane z niestabilnością obrotów silnika, zmiany mocy promieniowania laserowego oraz niestabilność pracy elementów układu elektronicznego. Wartość tego błędu nie przekracza ± 1 µm na całej długości obszaru pomiarowego.

7. PODSUMOWANIE

Opisane laserowe przyrządy skanujące charakteryzują się dużą uniwersalnością dzięki zastosowanej metodzie pomiarowej. Można je wykorzystywać nie tylko do pomiaru średnicy ale również do pomiaru wymiarów poprzecznych cienkich elementów takich jak np. taśmy. Wersja rozbudowana urządzenia pozwala na rozszerzenie możliwości metrologicznych umożliwiając pomiar średnicy w dwóch kierunkach i odchyłki kołowości oraz grubości i szerokości taśm przy jednoczesnym pomiarze położenia elementu w trakcie badań. Nieskomplikowana budowa układów pomiarowego i elektronicznego pozwala na zastosowanie w urządzeniu elementów i zespołów produkcji krajowej. Obecnie prowadzone są prace nad znacznym rozszerzeniem zakresu pomiarowego mierzonych elementów.

LITERATURA

1. Fotowicz P.: Laserowe techniki pomiaru średnicy włókien optycznych i cienkich drutów. Mechanik, 1984, nr 5, s. 253-256.
2. Fotowicz P.: Optymalizacja kształtu wiązki laserowej w przyrządzie do pomiaru średnicy światłowodów. Referaty i komunikaty Sympozjum Metrologia '86, Warszawa 11-13 czerwca 1986, tom I, s. 278-286.
3. Fotowicz P., Jabłoński R.: Laser scanning system for measurement of optical fibre diameter. Laser Technology II, Proceedings of the SPIE, vol. 859, 1987, s. 245-248.
4. Fotowicz P., Jabłoński R., Dźwiarek M.: Przyrząd do pomiaru średnicy włókien światłowodowych. Mechanik, 1988, nr 7, s. 337-339.

LASER SCANNING SYSTEMS FOR MEASUREMENT OF THE DIAMETER OF THIN ELEMENTS

S u m m a r y

At the Centre of Metrology, Warsaw University of Technology, scanning systems have been designed and built for measuring the diameter of thin elements such as optical fibres or wire. The systems enable contactless and dynamic measurement at the high frequency and accuracy.

In particular they may be employed at active inspection in manufacturing of the mentioned elements because a displacement of the object under measurement is allowable.

The principle of the measurement consists in determining the shading time of the laser beam scanned crosswise the object under measurement. This time is proportional to the actual size of the object.

In the basic option the measuring range covers the values from 50 to 150 µm at the frequency of 8 Hz and accuracy ±1 µm. The object under measurement may be displaced unless the admissible area of 2x2 mm is not exceeded. In the extended option the measurement is performed in two mutually perpendicular directions. In this way the measurement of the shape deviation is possible too. The measurement frequency is also increased to 160 Hz and the resolution achieved is 0.1 µm. The system determines the position of the object under measurement in the manufacturing process.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ТОНКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Резюме

В метрологическом центре Варшавского Политехнического института были разработаны и выполнены лазерные сканирующие приборы для измерения диаметров тонких элементов, таких как, например, светопроводящие волокна и тонкие провода. Эти приборы дают возможность выполнять бесконтактные, динамические замеры, отличающиеся большой частотой и точностью результатов. Это находит особенно применение для активного контроля в процессе производства этих элементов, так как измеряющийся объект может передвигаться в некотором допускаемом измерительном пространстве. Использованный в приборах метод опирается на определение времени перекрытия сканируемого впоперек измеряемого элемента лазерного пучка проверяемым объектом. Это время пропорционально поперечному сечению измеряемого элемента.

В основном исполнении прибор дает возможность мерить диаметр элементов в пределах от 50 до 150 дм с частотой 8 Гц и точностью ±1 дм, которые во время измерения могут передвигаться в пространстве 2x2мм.

В расширенном исполнении прибор замеряет диаметр в двух перпендикулярных плоскостях, создавая таким образом возможность мерить отклонения контуров исследуемых элементов. В этом исполнении повышена частота измерения до 160 Гц и распределяемость измерения до 0.1 дм. Прибор измеряет также положение проверяемого объекта во время производственного процесса.