

## Modernizacja zautomatyzowanych przyrządów do pomiaru błędów kształtu

*W artykule wskazano na potrzebę przystosowania niektórych przyrządów pomiarowych działających w oparciu o tradycyjne systemy pomiarowe do komputerowych pomiarów zarysów walcowości. Przedstawiono koncepcję komputeryzacji pomiarów tych zarysów, która obejmowała wyznaczenie walca średniego, graficzne przedstawienie zmierzonej powierzchni walcowej i ocenę jej za pomocą przyjętych parametrów oraz oszacowanie prostoliniowości osi rzeczywistej względem osi walca średniego.*

### Modernization of instruments for form measurements

*The article points out the necessity of adaptation of some measuring machines, which use traditional measuring systems, to computer measurement of cylindrical shapes. It presents the concept of computer measurement of such shapes which includes the calculation of a mean cylinder, graphical presentation of the measured cylindrical surface, its evaluation using specified parameters and estimation of straightness of real axis in relation to the axis of the mean cylinder.*

### 1. WPROWADZENIE

Dotychczas w większości przypadków dokładność powierzchni walcowych oceniano na podstawie odchyłek zarysów okrągłości w kilku wybranych przekrojach poprzecznych badanego przedmiotu. Jednak w praktyce na współpracę poszczególnych elementów maszyn ma wpływ cała powierzchnia. Z tego względu coraz częściej współczesny proces technologiczny wymaga stałej kontroli powierzchni walcowych ocenianych za pomocą odpowiednich parametrów, które odnoszą się do całej powierzchni walcowej. Zapewnić to można tylko poprzez odpowiednie pomiary stosując specjalistyczne systemy pomiarowe, charakteryzujące się wymaganą dokładnością pomiaru i umożliwiające dotrzymanie narzuconych granicznych odchyłek walcowości [1].

W praktyce przemysłowej do oceny zarysów walcowości w warunkach laboratoryjnych stosowane są obecnie typowe przyrządy oparte na metodach odniesieniowych umożliwiające pomiar zarysów okrągłości, na podstawie których można było oceniać zarys walcowości. Szczególnie do tego typu oceny były przydatne przyrządy posiadające możliwość sterowanego pionowego przesuwu czujnika pomiarowego. Pomimo tego taka ocena odchyłki walcowości była kłopotliwa i wymagała skomplikowanych obliczeń porównawczych poszczególnych zarysów okrągłości i nie umożliwiała graficznego przedstawienia zmierzonego zarysu walcowości. Natomiast w praktyce przemysłowej ocena walcowości odbywała się poprzez typowe pomiary przemysłowe trzech szczególnych jej przypadków, tj. barylkowości, siodłowości i stożkowości

[2]. Ocena taka we współczesnym przemyśle w wielu przypadkach jest niewystarczająca. Dopiero w ostatnim okresie powszechnie stosowane komputerowe systemy pomiarowe umożliwiają kompleksowy pomiar zarysów walcowości dokonując ich oceny za pomocą dowolnego parametru i graficznego przedstawienia analizowanej powierzchni w dowolnym rzucie płaskim. Z tego względu w kieleckim środowisku naukowym podjęto prace badawcze, projektowe i rozwojowo-techniczne, których celem było przystosowanie tradycyjnych przyrządów do pomiaru zarysów walcowości. Cel ten osiągnięto poprzez sprzęgnięcie przyrządu z komputerowym systemem przetwarzania sygnału pomiarowego. W pracach tych uwzględniono dostępne informacje podawane przez producentów przyrządów umożliwiających pomiar walcowości (Taylor-Hobson, Perthen, Hommelwerke, itd.), jak również osiągnięcia innych ośrodków naukowych [3,4,5]. Efektem zrealizowanych prac była pełna komputeryzacja przyrządu Talycenta (Taylor-Hobson) uwzględniająca między innymi możliwości pomiaru zarysów walcowości [6]. W artykule tym autorzy przedstawiają niektóre istotne doświadczenia zdobyte w dotychczasowej działalności w tym zakresie.

## 2. ISTOTA POMIARÓW ZARYSÓW WALCOWOŚCI

W pomiarach walcowości można stosować następujące metody:

- pomiar zarysów okrągłości dokonywanych w n-przekrojach poprzecznych do osi mierzzonego przedmiotu,
- pomiar zarysów prostoliniowości dokonywanych w n-przekrojach wzdłużnych do osi mierzzonego przedmiotu,
- pomiar względem linii śrubowej o odpowiednio dobranych jej parametrach,
- pomiar punktowy dokonywanych w n-punktach powierzchni mierzzonego przedmiotu.

Wszystkie wymienione metody z powszechnie przyjętą metodyką oceny dokładności kształtu wymagają przyjęcia odpowiedniego zarysu przylegającego, którym może być jeden z walców: opisany, wpisany, średni lub minimalnej strefy. Biorąc pod uwagę możliwości jednoznacznego zdefiniowania i prostotę wyznaczenia takiego walca powszechnie do oceny zarysów walcowości przyjmuje się wałek średni. Wałek ten jest elementem odniesienia, względem którego dokonuje się oceny odchyłeń poszczególnych punktów zmierzonej powierzchni walcowej, a te z kolei służą do wyznaczania odpowiedniego parametru i graficznego przedstawienia zmierzonego zarysu okrągłości. Zgodnie z tą metodą ocena walcowości może odbywać się dla całkowitej powierzchni lub w granicach tzw. obszaru cząstkowego. W opracowanej koncepcji pomiarów walcowości wybrano metodę polegającą na pomiarach zarysów okrągłości w przekrojach poprzecznych walca. Ma ona szereg zalet w stosunku do innych metod, a w szczególności umożliwia pełną automatyzację pomiaru, pozwala na powtórzenia pomiaru w danym przekroju, gdy zmierzony zarys wzbudza wątpliwości, umożliwia wyznaczenie osi rzeczywistej walca.

## 3. MODERNIZACJA PRZYRZĄDU TALYCENTA

Talycenta (producent - firma Taylor-Hobson, Wielka Brytania) jest uniwersalnym przyrządem pomiarowym do pomiaru błędów kształtu powierzchni walcowych. Mierzony element umieszczany jest na obrotowym stole pomiarowym napędzanym silnikiem prądu stałego z regulowaną stałą prędkością obrotową. Stół pomiarowy może być dodatkowo przesuwany w płaszczyźnie poziomej i pochylany w zakresie od -10 do +10 minut. Przesuwanie i pochylanie stołu sterowane jest za pomocą czterech silników krokowych. Czujnik pomiarowy może być przesuwany w płaszczyźnie pionowej. Dostępnych jest kilka prędkości przesuwu pionowego. System Talycenta w oryginalnym wykonaniu umożliwia pomiar okrągłości w wybranym przekroju poprzecznym walca, oraz prostoliniowości w dowolnym przekroju wzdłużnym. Poprzez

ocenę zarysów w kilku przekrojach poprzecznych istnieje również w ograniczonym zakresie możliwość oceny odchyłki walcowości. Ocenę błędów kształtu dokonuje się na podstawie obserwacji zarysu zarejestrowanego za pomocą rejestratora na specjalnym papierze firmowym.

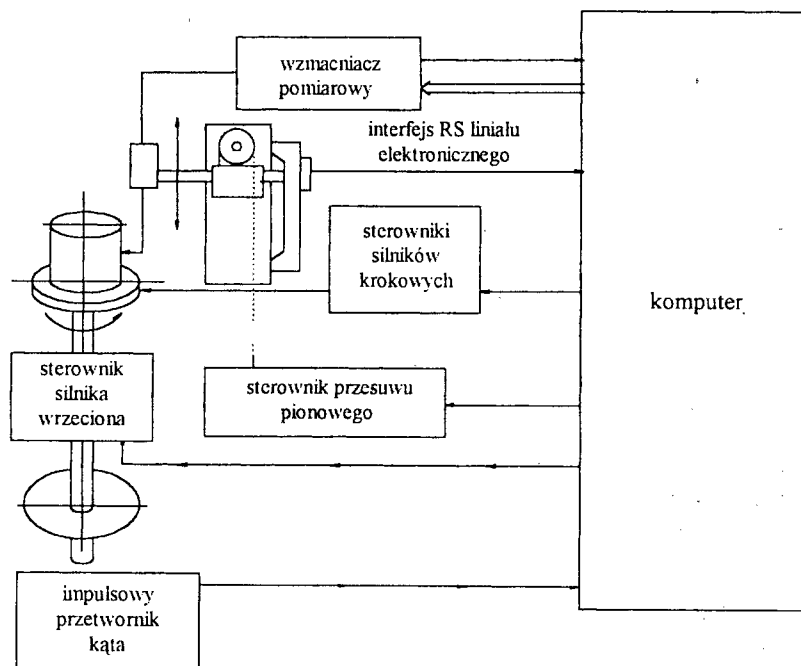
Zasada wykonywania pomiaru okrągłości jest następująca. Indukcyjny czujnik pomiarowy styka się z mierzonym przedmiotem umieszczonym na obracającym się stole pomiarowym. Ruchy poprzeczne czujnika zamienione zostają na sygnał elektryczny proporcjonalny do wychylenia czujnika, wzmocnione za pomocą wzmacniacza pomiarowego i zarejestrowane na papierze. Przy pomiarze prostoliniowości stół jest nieruchomy, natomiast włączony jest pionowy przesuw czujnika. Pomiar poprzedzony powinien zostać procesem centrowania i pionowania przedmiotu, tak aby oś obrotu stołu pokrywała się możliwie dokładnie z osią mierzonego przedmiotu.

Proces centrowania i poziomowania jest procesem trudnym, wymagającym dużego doświadczenia operatora i długotrwałym. Polega on na takim ustawieniu położenia stołu pomiarowego za pomocą silników krokowych, by w dwóch wybranych przekrojach poprzecznych mierzonego walca amplituda wskazań czujnika była możliwie mała. Pozwala to na zastosowanie odpowiednio dużego wzmocnienia toru pomiarowego, co zapewnia dużą dokładność zmierzonego zarysu.

Przeprowadzona modernizacja przyrządu Talycenta polegała na sprzęgnięciu przyrządu z komputerem wyposażonym w kartę obiektową z wejściami i wyjściami analogowymi. Oryginalny wzmacniacz pomiarowy wymieniony został na nowy, nie posiadający żadnych mechanicznych elementów przełączających i regulacyjnych, które są najbardziej narażone na uszkodzenia. W nowym wzmacniaczu wzmocnienie i przesunięcie sygnału (tzw. shift) sterowane jest wyłącznie z komputera. Dodatkowo zainstalowano linią elektroniczną w wyjściu RS, pozwalającą na automatyczny pomiar wysokości czujnika indukcyjnego z dokładnością do 0,01 mm. Pozostawiono natomiast wszystkie oryginalne sterowniki napędów przyrządu oraz oryginalny panel sterowania, który w zmodernizowanym przyrządzie odgrywa rolę pomocniczą.

Na rys. 1 przedstawiono schemat zmodernizowanego systemu pomiarowego. Sprzęgnięcie przyrządu z komputerem wyposażonym w specjalnie do tego celu przygotowane oprogramowanie umożliwia:

- sterowanie obrotem stołu pomiarowego, w tym włączenie i wyłączenie obrotów, zmianę prędkości obrotowej stołu, włączenie i wyłączenie hamulca,
- sterowanie przesuwem i pochyleniem stołu za pomocą silników krokowych, a także odczyt bezwzględnego położenia silników krokowych poprzez odczyt napięcia z suwaków potencjometrów sprzęgniętych z wirnikami silników,
- sterowanie przesuwem pionowym czujnika, w tym włączenie i wyłączenie przesuwu w górę i w dół, ustawienie prędkości przesuwu, odczyt stanu przełączników krańcowych przesuwu pionowego,
- sterowanie wzmocnieniem wzmacniacza pomiarowego i przesunięciem sygnału pomiarowego oraz odczyt wartości sygnału mierzonego,
- identyfikację bezwzględnego położenia kąowego stołu za pomocą impulsowego czujnika obrotu i sygnału znacznika,
- odczyt względnej wysokości czujnika pomiarowego z elektronicznego linią poprzez złącze RS,
- blokadę panelu sterowania ręcznego na czas sterowania automatycznego.



Rys. 1. Schemat blokowy zmodernizowanego przyrządu pomiarowego

Cele modernizacji były następujące:

- Wyeliminowanie podatnych na uszkodzenia elementów systemu, w tym wymiana wzmacniacza pomiarowego na nowy.
- Zapewnienie możliwości automatycznego centrowania i poziomowania przedmiotu na stole pomiarowym.
- Zautomatyzowanie procesu pomiaru walцовości.
- Obiektywną ocenę zarysów okrągłości, falistości, walцовości i prostoliniowości za pomocą szeregu parametrów zgodnych z normami ISO.
- Umożliwienie wydruku protokołu pomiaru na zwykłym papierze na drukarce.
- Umożliwienie rejestracji wyników pomiarów na dysku komputera, zarządzanie bazą danych pomiarów (kopiowanie, usuwanie, przesuwanie wyników pomiarów),
- Poszerzenie możliwości pomiaru o pomiar prostoliniowości osi mierzonego walca, bicia promieniowego oraz współosiowości jednej powierzchni walcowej przedmiotu względem drugiej.

#### 4. AUTOMATYCZNE CENTROWANIE I POZIOMOWANIE PRZEDMIOTU

Jedną z bardziej interesujących możliwości zmodernizowanego systemu pomiarowego jest funkcja automatycznego poziomowania i pionowania. Na wstępie, przed włączeniem opcji „Centrowanie i poziomowanie” należy z panelu sterowania na ekranie komputera wybrać polecenie „Polożenie środkowe”. Spowoduje to automatyczny przesuw wszystkich silników krokowych sterujących położeniem stołu w środkowe położenie zakresu ich przesuwu. Następnie po wybraniu opcji „Centrowanie i poziomowanie” na ekranie pojawi się okno dialogowe z

dwoma dostępnymi polami tekstowymi do wypełnienia: „Wysokość początkowa” i „Przyrost wysokości”. Wysokość początkowa  $H_1$  odnosi się niższego położenia czujnika. Przyrost wysokości  $\Delta H$  jest dodatni. Wypełnienie obu pól umożliwia wykonanie centrowania i poziomowania w trybie automatycznym. W przypadku niewypełnienia jednego z pól przesunięcie czujnika na odpowiednią wysokość musi wykonać operator.

Jeśli zostanie wybrany tryb automatyczny wykonania procedury, to cały proces wykonany zostanie bez udziału operatora. Komputer przesunie czujnik pomiarowy na wysokość początkową  $H_1$ . Następnie włączone zostaną obroty, wykonany zostanie pomiar zarysu i obliczone zostaną współrzędne niewspółśrodkowości zarysu względem osi obrotu  $E_{x1}, E_{y1}$ . Potem, czujnik pomiarowy przesunięty zostanie na wysokość  $H_2 = H_1 + \Delta H$  i powtórnie po wykonaniu pomiaru wyznaczone zostaną współrzędne niewspółśrodkowości zarysu w drugim przekroju poprzecznym.  $E_{x2}, E_{y2}$ . Współrzędne pochylenia  $S_x, S_y$  i przesunięcia  $E_x, E_y$  osi przedmiotu względem osi obrotu wyznaczamy ze wzorów

$$S_x = \frac{E_{x2} - E_{x1}}{H_{x2} - H_{x1}}, \quad S_y = \frac{E_{y2} - E_{y1}}{H_{y2} - H_{y1}}$$

$$E_x = E_{x1} + (H_o - H_1)S_x, \quad E_y = E_{y1} + (H_o - H_1)S_y$$

gdzie  $H_o$  oznacza wysokość punktu obrotu osi przedmiotu przy pochylaniu stołu (równa 50 mm).

Po wycentrowaniu i wypoziomowaniu cały proces można na życzenie operatora powtórzyć. W czasie centrowania i poziomowania komputer automatycznie dobiera wzmocnienie wzmacniacza i odpowiednie przesunięcie sygnału, tak aby wskazania czujnika mieściły się w zakresie pomiarowym.

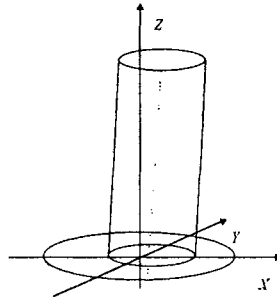
## 5. DEFINICJA OSI WALCA ŚREDNIEGO

Walcem średnim nazywamy walec dla którego całka z kwadratu odległości powierzchni walca rzeczywistego od powierzchni walca średniego jest minimalna. W celu zdefiniowania walca średniego wprowadźmy prostokątny układ współrzędnych XYZ tak, że płaszczyzna XY leży w płaszczyźnie stołu i oś X wskazuje godz. 3<sup>00</sup> oraz oś Z pokrywa się z osią obrotu stołu (rys. 2). Oś walca definiujemy podając współrzędne  $A_x$  i  $A_y$  przecięcia osi z płaszczyzną

$z = H_0 = 50\text{mm}$  (niecentryczność) oraz cotangensy  $L_x$  i  $L_y$  kątów pomiędzy płaszczyzną  $z = 0$ , a rzutami osi na płaszczyznę  $y = 0$  i  $x = 0$  odpowiednio (kąty te określają odchyłkę osi od pionu). Dla zarysu zmierzonego  $R(\varphi, h)$ :  $\varphi \in [0, 2\pi]$ ,  $h \in [H_1, H_2]$  walcem średnim nazywamy powierzchnię walcową o promieniu  $R_s$  i współrzędnych osi  $A_x, A_y, L_x, L_y$ , dla której funkcjonal

$$\int_{H_1}^{H_2} \int_0^{2\pi} \left( R_s + (A_x + L_x(h - H_0)) \cdot \cos(\varphi) + (A_y + L_y(h - H_0)) \cdot \sin(\varphi) - R(\varphi, h) \right)^2 d\varphi dh$$

osiąga minimum ( $H_0$  oznacza wysokość środka obrotu stołu pomiarowego).



Rys. 2. Położenie walca średniego względem stołu pomiarowego

## PARAMETRY ZARYSU WALCOWOŚCI

Dla dowolnego przekroju poprzecznego mierzonego przedmiotu i przyjętego walca średniego opracowany program komputerowy umożliwia wyznaczenie niżej podanych parametrów (rys.2).

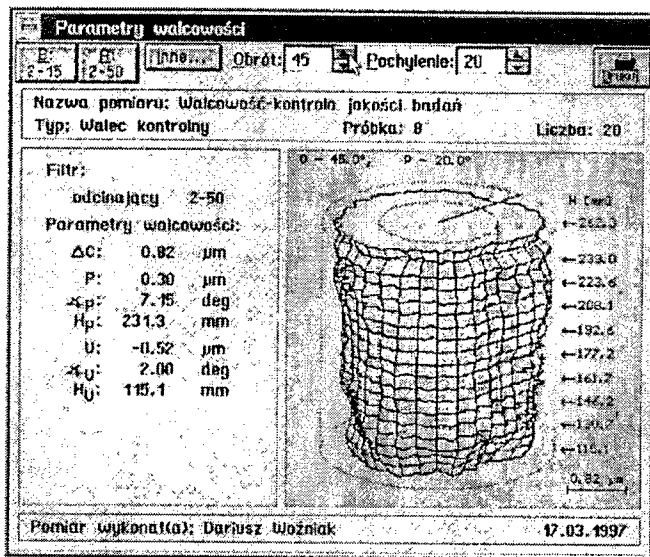
$\Delta R$	odchyłka okrągłości (inaczej $p + v$ ),
$\Delta D$	odchyłka średnicy walca w danym przekroju (odchyłka wyznaczana jest względem średnicy walca w pierwszym przekroju),
$H_k$	wartość amplitudy i numer największej składowej harmonicznej zarysu,
$O_w$	owal,
$F$	makrofalistość (parametr zdefiniowany dla potrzeb przemysłu łożyskowego),
$f$	mikrofalistość (parametr zdefiniowany dla potrzeb przemysłu łożyskowego),
$E$	odchyłka współśrodkowości (niecentryczność) liczona względem osi walca średniego (pomiar walcowości) lub osi obrotu (pomiar okrągłości)
$\angle$	faza niewspółśrodkowości,
$E_x$	składowa $x$ niewspółśrodkowości,
$E_y$	składowa $y$ niewspółśrodkowości,
$H$	wysokość pomiaru względem płaszczyzny odniesienia (stołu pomiarowego).

Natomiast do oceny zarysu walcowości przyjęto parametr określony zależnością:

$$\Delta C = P + V$$

gdzie:  $P$  - największe dodatnie odchylenie zarysu walcowości od walca średniego i  $V$  - największe ujemne odchylenie zarysu walcowości od walca średniego. Położenie każdej składowej odchyłki okrągłości ( $P$  lub  $V$ ) jest określone przez wyznaczenie kąta położenia odpowiednio oznaczonego przez  $\angle_p$  lub  $\angle_v$  oraz wysokości mierzonej względem płaszczyzny odniesienia (stołu pomiarowego) odpowiednio oznaczonej przez  $H_p$  lub  $H_v$ . Uwzględnienie w programie parametrów odnoszących się do wyznaczenia położenia składowych  $P$  i  $V$  wyniknęło z potrzeby jednoznacznego określenia miejsca występowania największych odchyłek powierzchni rzeczywistej, co ma istotne znaczenie w kontroli przebiegu procesów technologicz-

nych. Opracowany program umożliwia graficzne przedstawienie zmierzonego zarysu walcowości (rys.3). Możliwość dokonywania obrotu i pochylania walca pozwala na analizę i obserwację całej zmierzonej powierzchni.



Rys. 3. Graficzne przedstawienie zmierzonego zarysu walcowości wraz z parametrami jego oceny.

## PARAMETRY PROSTOLINIOWOŚCI OSI

Program komputerowy umożliwia wyznaczenie osi rzeczywistej mierzonego przedmiotu (rys.4), której odstępstwa od osi walca przylegającego (średniego) mogą być ocenione za pomocą następujących parametrów:

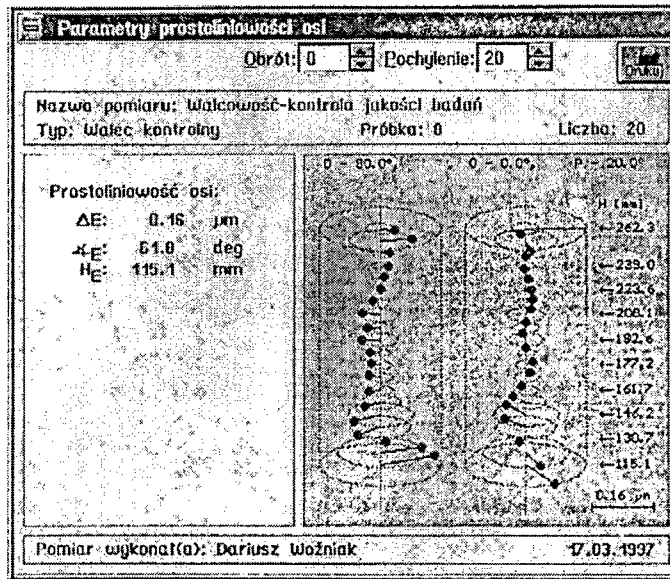
- $\Delta E$  odchyłka prostoliniowości osi, tj. największe odchylenie osi wyznaczonej dla mierzonego przedmiotu od osi walca średniego,
- $\angle E$  kąt położenia odchyłki  $\Delta E$ ,
- $H_E$  wysokość położenia odchyłki  $\Delta E$ .

Parametry walcowości i prostoliniowości wyznaczane są względem osi walca średniego. W programie przewidziano również możliwość oceny parametrów  $\Delta C$  i  $\Delta E$  względem osi walca średniego wcześniej wykonanego pomiaru. W tym przypadku parametry te reprezentują odpowiednio bicie promieniowe oraz współosiowość.

## PODSUMOWANIE

Przyjęta koncepcja komputeryzacji oceny zarysów walcowości została przetestowana w warunkach laboratoryjnych i produkcyjnych i znalazła zastosowanie w modernizacji przyrządów pomiarowych do oceny zarysów kształtu, a w szczególności w przyrządach typu „Talycenta”. Zastosowany w tym przyrządzie zautomatyzowany system pomiarowo-sterujący umożliwia,

dzięki sprzęgnięciu z komputerem wyposażonym w odpowiedni program, pełną jakościową i ilościową ocenę mierzonych zarysów okrągłości oraz pełną automatyzację pomiarów. To pozwala na modernizację przyrządów, które ze względu na zastosowane dziś już przestarzałe systemy przetwarzania sygnałów pomiarowych nie mogły być wykorzystane do pomiarów powierzchni walcowych zgodnie z współczesnymi tendencjami światowej metrologii stosowanej w budowie maszyn.



Rys. 4. Wykres i parametry prostoliniowości osi.

## LITERATURA

- [1] Scheiding U., Weingraber H. V.: *Bezugssystem Stützzylinder. wt-Z. und. Fertig 66*, 1976, nr 2, s.73-76
- [2] Polska Norma: *Tolerancje kształtu i położenia. Nazwy i określenia. PN-78/M-02137.*
- [3] Whitehouse D.J.: *Handbook of Surface Metrology*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1994.
- [4] Żebrowska-Lucyk S.: *Cyfrowe metody pomiaru odchyłki walcowości. Model matematyczny, oprogramowanie, wyniki badań.* Konferencja „Metrologia Wspomagana Komputerowo”, Zegrze k/Warszawy, 1993, t.2/B, s.269-276.
- [5] Maduda M.: *Metrologia odchyłki walcovitosti.* Konferencja „Strojarska technologia a valiva loziska '97. Uniwersytet w Žilinie (SK), Žilina 1997, s.19-21.
- [6] Adamczak S., Janecki D.: *Skomputeryzowane pomiary zarysów kształtu powierzchni walcowych*, PAK Warszawa, 1/1998, s. 8-12.