

**Stanisław ADAMCZAK**

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA  
SAMODZIELNY ZAKŁAD TECHNOLOGII MASZYN

**Dariusz JANECKI**

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA  
CENTRUM LASEROWYCH TECHNOLOGII METALI

## Skomputeryzowane pomiary zarysów kształtu powierzchni walcowych



**Dr hab. inż. Stanisław ADAMCZAK** – profesor Politechniki Świętokrzyskiej, kierownik Samodzielnego Zakładu Technologii Maszyn Wydziału Mechanicznego Politechniki Świętokrzyskiej. Specjalność naukowa – metrologia techniczna i systemy zarządzania jakością.



**Dr hab. Dariusz JANECKI** – adiunkt w Centrum Laserowych Technologii Metali Politechniki Świętokrzyskiej i PAN. Główne zainteresowania – teoria sterowania, pomiary kształtu części maszyn, informatyka.

Przedstawiono koncepcję skomputeryzowanych pomiarów zarysów kształtu walcowych części maszyn, polegającą na połączeniu przyrządu z komputerowym systemem przetwarzania sygnału. Opracowano program komputerowy ROFORM umożliwiający sterowanie procesem wykonywania pomiaru i kompleksową ocenę zmierzonych zarysów. Istotną zaletą tych pomiarów jest możliwość eliminowania niektórych systematycznych błędów, w tym eliminacji błędów wrzeciona, eliminacji błędów wywołanych peźaniem sygnału pomiarowego oraz błędów wywołanych drganiami napędu wrzeciona.

**ABSTRACT**

The paper is concerned with the concept of computer-aided measurements of form profiles of cylindrical machine parts, which involves connecting an instrument with a computer system of signal processing. The presented computer program, REFORM, is applied to control the process of measurement and complex estimation of the measured profiles. A significant advantage of these measurements is the possibility to eliminate some of the systematic errors, such as spindle errors, errors caused by signal crawling, as well as those resulting from spindle drive vibrations.

**Wprowadzenie**

Istotnym problemem podstawowych badań eksperymentalnych, a następnie praktyki pomiarowej jest stała konieczność pomiaru i oceny struktury geometrycznej powierzchni elementów maszyn ze względu na ich duży wpływ na stan dynamiczny współpracujących ze sobą zespołów gotowych wyrobów. W związku z tym przemysł maszynowy znaczną uwagę przykłada do minimalizacji błędów kształtu powierzchni walcowych. Jest to szczególnie ważne przy przenoszeniu ruchów obrotowych elementów napędowych, np. w przypadku łożysk tocznych i ślizgowych czy wrzecion obrabiarek, jak również elementów nie wykonujących obrotu, a tylko przemieszczenia liniowe (łtok silnikowy). Dotychczas w większości przypadków dokładność powierzchni walcowych oceniano na podstawie odchyłek zarysów okrągłości, odniesionych do jednego przekroju poprzecznego sprawdzanego przedmiotu, lub odchyłek zarysu walcowości w kilku wybranych przekrojach poprzecznych. Jednak coraz częściej współczesny proces technologiczny wymaga stałej kontroli powierzchni walcowych ocenianych za pomocą odpowiednich parametrów, które odnoszą się również do całej powierzchni walcowej. Można to zapewnić tylko poprzez odpowiednie pomiary stosując specjalistyczne systemy pomiarowe, charakteryzujące się wymaganą dokładnością pomiaru i umożliwiające

dotrzymanie narzuconych granicznych odchyłek okrągłości i walcowości.

W praktyce przemysłowej do oceny zarysów kształtu walcowych części maszyn w warunkach laboratoryjnych są obecnie stosowane typowe przyrządy oparte na metodach bezodniesieniowych, umożliwiające pomiar zarysów okrągłości, na podstawie których można było również oceniać zarys walcowości. Powszechnie są znane przyrządy z obrotowym stołem lub wrzecionem. Szczególnie do tego typu oceny były przydatne przyrządy mające 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. W praktyce produkcyjnej natomiast ocena walcowości odbywała się poprzez typowe pomiary przemysłowe trzech szczególnych jej przypadków, tj. baryłkowości, siódłowości i stożkowości [7]. Ocena taka we współczesnym przemyśle w wielu przypadkach jest niewystarczająca.

Wcześniej wyprodukowane przyrządy do pomiarów zarysów okrągłości, mimo ciągle bardzo dobrego stanu zespołów mechanicznych, w dużej mierze nie spełniają obecnie wymagań przemysłu maszynowego. Wiąże się to z trudnościami z dokładnym wycentrowaniem detalu na stole pomiarowym, koniecznością wykonywania oddzielnych pomiarów przy stosowaniu różnych filtrów, koniecznością częstej ręcznej zmiany wzmocnienia oraz niewielką dokładnością otrzymywanych wydruków, co sprawia, że proces wykonywania pomiarów jest czynnością mało wydajną i nużącą, zaś ocena parametrów zarysu dokonywana za pomocą specjalnych szablonów jest subiektywna i obciążona dużymi błędami.

Dopiero w ostatnim okresie powszechnie stosowane komputerowe systemy pomiarowe umożliwiają kompleksowy pomiar zarysów kształtu powierzchni walcowych dokonując ich oceny za pomocą dowolnego parametru i graficznego przedstawienia w dowolnym przekroju lub w rzucie płaskim. Z tego względu w kieleckim środowisku naukowym podjęto prace badawcze, projektowe i rozwojowo-techniczne, których celem było przystosowanie tradycyjnych przyrządów do skomputeryzowanych pomiarów zarysów kształtu. Cel ten osiągnięto poprzez sprzęgnięcie przyrządu z komputerowym systemem przetwarzania sygnału pomiarowego. Podobna tematyka jest również rozwijana w innych ośrodkach naukowych [7–12].

Efektem zrealizowanych prac była pełna komputeryzacja pomiarów zarysów kształtu dokonywanych za pomocą przyrządów bezodniesieniowych, np. Talyrond 73, Talycenta (Taylor-Hobson). W artykule tym autorzy przedstawiają niektóre istotne doświadczenia zdobyte w dotychczasowej działalności w tym zakresie, zwłaszcza we współpracy z polskim przemysłem łożyskowym.

### Ogólna koncepcja komputeryzacji pomiarów

Realizacja pełnej komputeryzacji pomiarów zarysów kształtu powierzchni walcowych wymaga sprzężenia przyrządu z komputerowym systemem przetwarzania sygnału pomiarowego. Opracowano dwa warianty komputeryzacji. W wariantcie pierwszym zachowano oryginalne urządzenie elektroniczne współpracujące z indukcyjnym czujnikiem pomiarowym. W tym przypadku sprzężenie przyrządu z komputerem wymaga zainstalowania wewnątrz urządzenia specjalnego modułu sprzęgającego, przekazującego komputerowi informację o wszystkich nastawach przyrządu, w tym o ustawionym wzmocnieniu toru pomiarowego, o rodzaju zastosowanego filtra oraz o położeniu dźwigni zmiany obrotów wrzeciona. Oprócz przefiltrowanego analogowego sygnału pomiarowego z wyjścia urządzenia elektronicznego przyrządu do komputera jest również doprowadzony sygnał niefiltrowany, dzięki czemu możliwa jest rezygnacja z mniej dokładnych filtrów analogowych na korzyść filtrów cyfrowych realizowanych programowo.

W drugim wariantcie zastosowano opracowany przez zespół nowy wzmacniacz pomiarowy mający własności użytkowe nie odbiegające od innych tego typu urządzeń stosowanych obecnie przez czołowych światowych producentów. Wzmocnienie toru pomiarowego, a także odpowiednie przesuwanie sygnału tak, aby mieścił się on w zakresie pomiarowym, jest realizowane z poziomu programu sterującego wykonywaniem pomiarów. Ze względu na brak przełączników i potencjometrów wzmacniacz pomiarowy jest bardziej niezawodny i ma kilkakrotnie mniejszy poziom szumów niż oryginalne urządzenia elektroniczne przyrządu.

Program sterujący przebiegiem pomiarów wymaga komputera klasy PC 386 lub wyższej z kartą VGA oraz drukarki 9-igłowej zgodnej ze standardem Epson lub drukarki atramentowej lub laserowej z językiem opisu strony PCL (3, 4 lub 5). Do sprzężenia komputera z przyrządem zastosowano specjalistyczną kartę z wejściami i wyjściami analogowymi i cyfrowymi firmy „Advantech”.

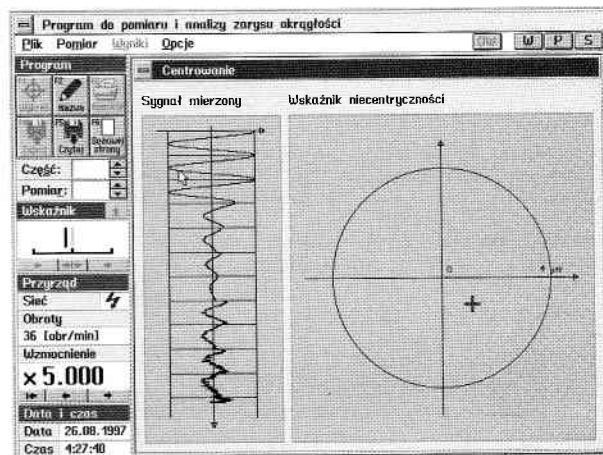
Ponieważ obecnie stosowane normy wymagają oceny zmierzonego zarysu okrągłości w zakresie od 2 do 500 fal na obrót, liczba zebranych próbek  $N$  powinna być nie mniejsza niż 1000. Przyjęto  $N = 1024$ , co pozwoliło na zastosowanie do filtracji zarysów algorytmów szybkiej transformacji Fouriera (FFT). W celu zapewnienia równomiernego próbkowania po obwodzie przedmiotu do pomiaru kąta obrotu wrzeciona można zastosować przetwornik obrotowo-impulsowy. Taka metoda jest stosowana np. w przyrządach do pomiaru walcowości Talycenta (Taylor-Hobson). Zdecydowano się na prostsze rozwiązanie. Wykorzystano fakt, że do napędu wrzeciona zastosowano silniki synchroniczne, w których prędkość obrotowa zależy ściśle od częstotliwości sieci energetycznej. Ponieważ program przygotowano w czasie, gdy częstotliwość sieci nie była stabilizowana, w programie zaimplementowano adaptacyjny algorytm pomiaru prędkości obrotowej wrzeciona. Algorytm ten polega na bieżącym pomiarze czasu pomiędzy kolejnymi impulsami ze znacznika obrotów z dokładnością  $1/2^{13}$  nominalnej wartości okresu obrotu wrzeciona. Do zapewnienia właściwej częstości próbkowania wykorzystano licznik układu scalonego 8253, sterujący zegarem systemowym komputera. Licznik został zaprogramowany tak, aby generował żadaną liczbę przerwań na jeden obrót wrzeciona. Każde przerwanie wyzwała procedurę odczytu wartości napięcia z wejścia przetwornika A/C.

## Program komputerowy ROFORM

### Pomiar zarysów okrągłości

Zgodnie z przyjętą metodyką ocena zmierzonego zarysu okrągłości wymaga zastosowania odpowiedniego elementu przylegającego, którym może być jeden z okręgów: średni (LSC), najmniejszy opisany (MCC), największy wpisany (MIC) lub okręgi najmniejszej strefy (MZC) – [5]. Ze względu na łatwość zdefiniowania i prostotę wyznaczenia powszechnie stosuje się okrąg średni (LSC). Jednak potrzeby przemysłu precyzyjnego, np. łożyskowego, wymagają stosowania również pozostałych okręgów odniesienia. Z tego względu okręgi te zostały zaimplementowane w programie ROFORM.

Jedną z ważnych funkcji programu jest wyeliminowanie niedogodności związanych z dokładnym centrowaniem i osiowaniem mierzonych przedmiotów na stole pomiarowym. Dotychczas ten ważny zabieg wymagał dużych zdolności manualnych operatora i był czasochłonny. W programie proces centrowania ułatwia wskaźnik niecentryczności w postaci „krzyżyka” w układzie osi  $XY$ , pojawiający się na ekranie po włączeniu szybkich obrotów wrzeciona (rys. 1). Krzyżyk wskazuje bieżącą niecentryczność osi przedmiotu i wrzeciona, a zadaniem operatora jest takie przesunięcie osi stołu i wrzeciona, aby wskaźnik niecentryczności znalazł się w początku układu współrzędnych.



Rys. 1. Widok ekranu w czasie centrowania przedmiotu na stole pomiarowym (wersja programu dla komputeryzacji wg wariantu 2); pod paskiem tytułowym znajduje się pasek menu oraz pola oznaczone literami OW, W, P i S służącymi do szybkiego włączenia opcji programu: „Odchyłka współosiowości”, „Korekcja błędów wrzeciona”, „Korekcja pełzania sygnału” i „Korekcja spektrum”; po lewej stronie ekranu znajduje się pasek zawierający przyciski uruchamiające najczęściej używane opcje programu, wskaźnik sygnału pomiarowego i sygnału przesunięcia, pola, w których jest wyświetlany stan przyrządu oraz data i czas

Po wykonaniu zabiegu centrowania system pomiarowy jest gotowy do wykonania pomiaru zarysu przedmiotu. Zarejestrowany w pamięci komputera zmierzony zarys okrągłości można analizować zgodnie z międzynarodowymi normami ISO [5], a mianowicie:

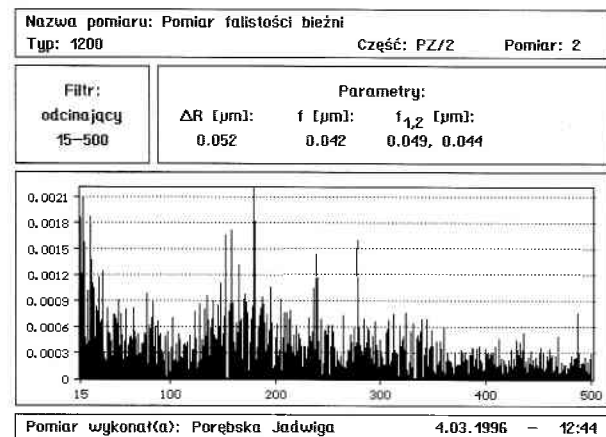
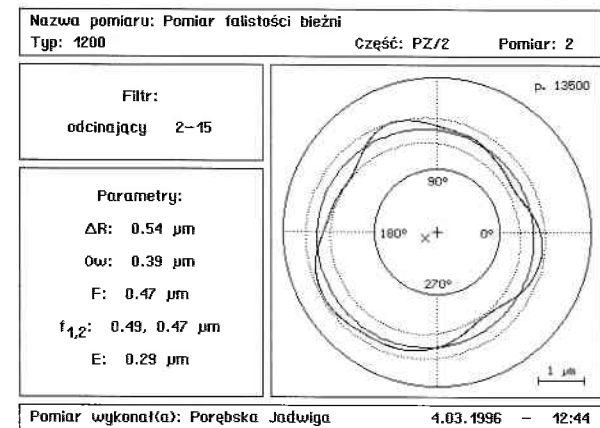
- oceniać zarys okrągłości i falistości powierzchni za pomocą:
  - filtrów analogowych przyrządu,
  - filtrów cyfrowych odcinających,
  - filtrów dwubięgunowych,
  - filtrów dwubięgunowych z korekcją fazy,
  - filtrów Gaussa;
- oceniać mierzony zarys za pomocą podstawowych dla użytkownika parametrów, np. odchyłki okrągłości  $\Delta R$  oraz

makrofalistości i mikrofalistości powierzchni (parametrów używanych w polskim przemyśle łożyskowym);

- oceniać zmierzony zarys za pomocą dowolnych innych parametrów zalecanych przez normy ISO.

Program pozwala:

- przedstawiać zmierzony zarys we współrzędnych prostokątnych i we współrzędnych biegunowych (rys. 2);
- przedstawiać zmierzony zarys w postaci dyskretnego widma amplitudowego (rys. 2);



Rys. 2. Przykładowy wydruk protokołu pomiaru: wykres biegunowy i wybrane parametry oceny zarysu przefiltrowanego przez filtr odcinający 2-15 fal/obrót oraz wykres amplitudowy składowych harmonicznych i parametry oceny zarysu przefiltrowanego przez filtr odcinający 15-500 fal/obrót

- mierzyć niewspółosiowości osi elementu względem osi wrzeciona;

- uzyskiwać wydruk wyników pomiarów na zwykłym papierze za pomocą drukarki igłowej, atramentowej lub laserowej – eliminuje to konieczność zakupu drogiego papieru firmowego;

- przeprowadzanie analizy statystycznej uzyskiwanych wyników pomiarów za pomocą typowych empirycznych parametrów rozkładów zmiennych losowych;

- zapisywać wybrane wyniki pomiarów w pamięci komputera;

- zarządzać bazą danych pomiarów (kopiowanie, usuwanie wyników pomiarów, tworzenie i usuwanie katalogów);

- korygować błędy wrzeciona i drgania pochodzące od przekładni napędu oraz korygować petzanie sygnału;

- dokonywać sprawdzenia systemu pomiarowego za pomocą następujących wzorców:

- szklanego w kształcie półkuli z błędem nie przekraczającym 0,05 μm, który umożliwia ocenę i eliminację błędów wrzeciona,

- walcowego ze ścięciem, który służy do określania okresowego wzorcowania systemu.

Dla przyrządów mających możliwość sterowanego pionowego przesuwu wrzeciona program umożliwia również:

- pomiar odchyłki walcowości za pomocą poprzecznych przekrojów z graficznym przedstawieniem wyników;

- pomiar odchyłki prostoliniowości tworzącej walca w dowolnym jego przekroju wzdłużnym;

- automatyczne centrowanie i poziomowanie (dla przyrządów wyposażonych w możliwość automatycznej zmiany położenia i nachylenia stołu).

## Pomiar zarysów walcowości

W pomiarach walcowości można stosować następujące metody [4]:

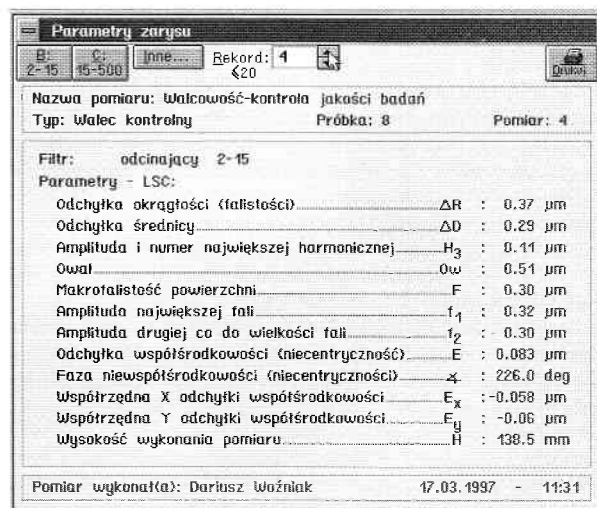
- pomiar zarysów okrągłości w  $n$  przekrojach poprzecznych do osi mierzonego przedmiotu;

- pomiar zarysów prostoliniowości w  $n$  przekrojach wzdłużnych do osi mierzonego przedmiotu;

- pomiar względem linii śrubowej o odpowiednio dobranych jej parametrach;

- pomiar punktowy w  $n$  punktach powierzchni mierzonego przedmiotu.

Wszystkie wymienione metody z powszechnie przyjętą metodą oceny dokładności kształtu wymagają przyjęcia odpowiedniego zarysu przylegającego, którym może być jeden z walców: opisany, wpisany, średni lub minimalnej strefy. Biorąc pod uwagę możliwości jednoznaczności zdefiniowania i prostotę wyznaczenia takiego walca, powszechnie do oceny zarysów walcowości przyjmuje się walec średni. Walec ten jest elementem odniesienia, względem którego dokonuje się oceny odchyłań 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 wiele 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.



Rys. 3. Parametry zarysu okrągłości prezentowane na ekranie monitora przez program komputerowy

Dla dowolnego przekroju poprzecznego mierzonego przedmiotu i przyjętego walca średniego opracowany program komputerowy umożliwia wyznaczenie następujących parametrów (rys. 3).

- $\Delta R$  – odchyłka okrągłości (inaczej  $p + v$ ),
- $\Delta D$  – odchyłka średnicy walca w danym przekroju (odchyłka jest wyznaczana względem średnicy walca w pierwszym przekroju),
- $H_k$  – wartość amplitudy i numer największej składowej harmonicznej zarysu,
- $O_w$  – owal,
- $F$  – makrofalistość (parametr zdefiniowany na potrzeby przemysłu łożyskowego),
- $f$  – mikrofalistość (parametr zdefiniowany na potrzeby przemysłu łożyskowego),
- $f_1, f_2$  – amplitudy dwóch największych fal, dla falistości powierzchni,
- $E$  – odchyłka współśrodkowości (niecentryczności) liczona względem osi walca średniego (pomiar walcowości) lub osi obrotu (pomiar okrągłości),
- $\angle$  – faza niecentryczności,
- $E_x$  – składowa  $x$  niecentryczności,
- $E_y$  – składowa  $y$  niecentryczności,
- $H$  – wysokość pomiaru względem płaszczyzny odniesienia (stołu pomiarowego).

Do oceny zarysu walcowości natomiast przyjęto parametr określony zależnością

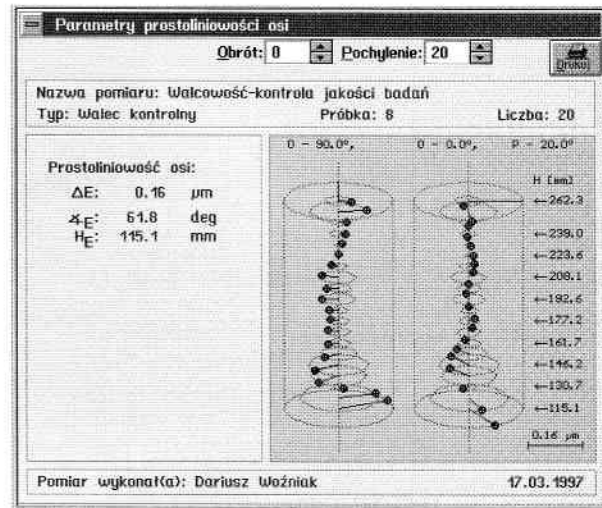
$$\Delta C = P + V$$

gdzie:

$P$  – największe dodatnie odchylenie zarysu walcowości od walca średniego;

$V$  – 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 technologicznych. Opracowany program umożliwił graficzne przedstawienie zmierzzonego zarysu



Rys. 5. Wykres i parametry prostoliniowości osi

walcowości (rys. 4). Możliwość dokonywania obrotu i pochylenia walca pozwala na analizę i obserwację całej zmierzonej powierzchni.

Program komputerowy umożliwia wyznaczenie osi rzeczywistej mierzonego przedmiotu (rys. 5), 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 są wyznaczone 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 wypadku parametry te reprezentują odpowiednio bicie promieniowe oraz współosiowość.

### Metody eliminacji systematycznych błędów pomiaru

Istotną zaletą zastosowania cyfrowego przetwarzania sygnału pomiarowego jest możliwość eliminacji niektórych systematycznych błędów pomiaru. Poniżej opisano stosowane metody eliminacji błędów wrzeciona, błędów wywołanych pełzaniem sygnału oraz błędów wywołanych drganiami napędu wrzeciona [1].

Przy pomiarach części maszyn o małych odchyłkach okrągłości istotne znaczenie odgrywają błędy okrągłości wrzeciona. W systemie ROFORM zaimplementowano tzw. wielostopniową metodę pomiarów błędów wrzeciona [6]. Metoda ta polega na wielokrotnych pomiarach wzorca kuli umieszczonego na stole podziałowym. Po każdym pomiarze zmierzony zarys jest zapisywany w pamięci komputera i wzorec jest obracany o kąt  $2\pi/N$ , gdzie  $N$  jest pewną ustaloną liczbą (norma ISO zaleca  $N = 12$ ). Po wykonaniu  $N$  pomiarów ocenę zarysu próbki  $R_p$  i błędów wrzeciona  $R_w$  wyznacza się tak, aby zminimalizować funkcjonal

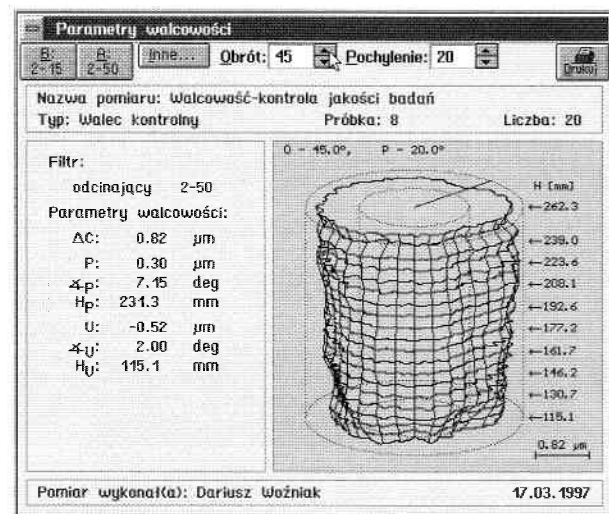
$$J = \frac{1}{2} \sum_{l=0}^{N-1} \int_0^{2\pi} [F_l(\varphi) - R_p(\varphi + 2l\pi/N) - R_w(\varphi)]^2 d\varphi$$

gdzie:

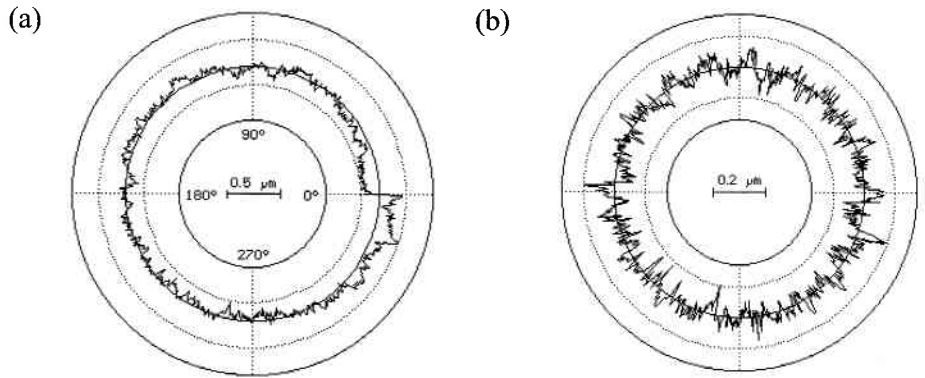
$l$  – numer pomiaru;

$F_l(\varphi)$  – zmierzony zarys w  $l$ -tym pomiarze.

Zadanie minimalizacji funkcjonalu najwygodniej jest rozwiązać w dziedzinie składowych spektralnych zarysów  $k$ .



Rys. 4. Graficzne przedstawienie zmierzzonego zarysu walcowości wraz z parametrami jego oceny



Rys. 6. Wykres biegunowy zarysu w przypadku, kiedy podczas pomiaru wystąpiło zjawisko pełzania sygnału: a) wykres przed zastosowaniem korekcji pełzania; b) wykres po zastosowaniu korekcji

W programie po podaniu ścieżki dostępu do pliku z pomiarami wzorca w kolejnych wykonywanych pomiarach błędy wrzeciona są na bieżąco eliminowane ze zmierzonego zarysu. W modernizowanych przyrządach stosowanie korekcji błędów wrzeciona pozwala je zmniejszyć do poziomu poniżej  $0,02 \mu\text{m}$ .

Program ROFORM ma możliwość wyeliminowania pełzania sygnału wywołanego przemieszczaniem się mierzonego detalu na stole pomiarowym. Pełzanie sygnału w przyrządach do pomiaru okrągłości staje się widoczne przy pomiarze detali o odchyłkach poniżej  $0,1 \mu\text{m}$  (np. kulki łożysk) i jest wywołane niedoskonałością systemu mocowania mierzonej części. Pełzanie sygnału objawia się nieciągłością zarysu zmierzonego w punkcie rozpoczęcia pomiaru – rys. 6a. Korekcja pełzania sygnału jest przeprowadzona przy założeniu, że ma ona charakter liniowy, tzn. że mierzony zarys  $F$  ma postać

$$F(\varphi) = R(\varphi) + a\varphi$$

gdzie  $R(\varphi)$  – zarys rzeczywisty.

Metoda identyfikacji składowej  $a\varphi$  musi uwzględniać fakt, że sygnał mierzony jest zakłócany szumem wzmacniacza pomiarowego oraz mającymi również charakter losowy drganiami napędu wrzeciona. Z tego powodu mało skuteczna jest metoda identyfikacji parametru  $a$  polegająca na porównaniu wartości zarysów w chwili rozpoczęcia i zakończenia pomiaru. Zastosowano inne podejście. Niech  $F_M(\varphi, a)$  oznacza zarys  $F(\varphi) - a\varphi$  przefiltrowany przez filtr górnoprzepustowy o fali odcięcia równej  $M$ . Założono, że parametr  $a$  będzie wyznaczany tak, aby zminimalizować energię sygnału przefiltrowanego  $F_M(\varphi, a)$ . Wykorzystując twierdzenie Parsewala łatwo otrzymujemy wzór na optymalną wartość parametru  $a$ .

Liczba  $M$  została dobrana eksperymentalnie tak, aby parametr  $a$  w niewielkim stopniu zależał od mierzonego zarysu. Opcja korekcji pełzania sygnału jest włączana na życzenie operatora w chwili stwierdzenia niedomykania się wykresu biegunowego zarysu. Pozwala to uniknąć czasochłonnego wielokrotnego powtarzania pomiarów. Na rys. 6b przedstawiono wykres zarysu, w którym wyeliminowano błąd wywołany pełzaniem sygnału.

W przyrządach z obrotowym wrzecionem przy pomiarach przedmiotów o małej odchyłce okrągłości duże znaczenie ma wpływ zakłóceń pochodzących od przekładni zębatej napędu wrzeciona. Wpływ ten jest najbardziej zauważalny na wykresie widma amplitudowego zarysu wykreślanego w zakresie fal powyżej 15. Przykładowo, w niektórych modernizowanych przyrządach dla wartości składowych fal o numerach 80 i ich wielokrotności mogą pojawić się prążki o wyraźnie większej amplitudzie. Są one efektem niewielkich drgań wrzeciona pochodzących od przekładni napędu. W programie ROFORM eliminacja wpływu drgań napędu przy dokładnych pomiarach polega na wyzerowaniu wykonanych składowych zmierzonego zarysu. Analizę napędu dokonuje się mierząc próbkę o małej odchyłce okrągłości, np. wzorec kuli. Po wybraniu odpowiedniej opcji programu możemy zaznaczyć wszystkie składowe, co do których istnieje podejrzenie, że pochodzą od drgań

przekładni. Od tej pory, po wykonaniu pomiaru istnieje możliwość wyeliminowania błędów pochodzących od napędu.

### Podsumowanie

Zaprojektowany system ROFORM został przetestowany w warunkach laboratoryjnych i produkcyjnych. Pozytywne wyniki testów umożliwiły jego szerokie zastosowanie w różnych zakładach przemysłu elektromaszynowego. O programie komputerowym obsługującym system pomiarowy Główny Urząd Miar w Warszawie w swojej ekspertyzie napisał: „Należy podkreślić wyjątkową prostotę i przejrzystość programu ROFORM dla użytkownika. Program opracowany w Pascalu, bazujący na pracy z myszką w graficznym środowisku Windows jest wyjątkowo przyjazny, nawet dla osób pierwszy raz stykających się z nim”.

### LITERATURA

- [1] S. ADAMCZAK, D. JANECKI: Probleme der modernisierung ohne bezugsmeßgeräte für die rundheitsprofilmessungen. 7th International Daaam Symposium, Technical University of Viena, 17–19th October 1996.
- [2] S. ADAMCZAK, D. JANECKI: Komputeryzacja przyrządów do pomiaru zarysów okrągłości i falistości powierzchni. Konferencja ISKRA 100. Kielce, *Zeszyt Naukowy Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika* 1996, nr 60, s. 325–334.
- [3] S. ADAMCZAK, D. JANECKI: Komputeryzacja oceny zarysów walcowości części maszyn. Konferencja „Metrologia w Technikach Wytwarzania”. Kielce, *Zeszyt Naukowy Politechniki Świętokrzyskiej, Mechanika* 1997, nr 63, s. 195–202.
- [4] M. MADUDA: Metrologia odchyłki valcovitosti. Konferencja „Strojarska technologia a valiva loziska '97”. Universtet w Žilinie (SK), Žilina 1997, s. 19–21.
- [5] Norma ISO: Methods for the assessment of departure from roundness measurement of variations in radius. ISO 4291, 1985.
- [6] Norma PL: Tolerancje kształtu i położenia. Nazwy i określenia. PN-78/M-02137.
- [7] R. RUDZIŃSKI, W. DĄBROWSKI, S. ŻEBROWSKA-ŁUCYK: System and software improvements for precision metrology equipment used to measure roundness deviation. *PAK* 1995, nr 2, s. 30–33.
- [8] U. SCHEIDING, H. V. WEINGRABER: Bezugssystem Stützylinder. *wz-Z und Fertig* 66 1976, nr 2, s. 73–76.
- [9] G. STARCEVIC, P. H. OSANNA: Umrüstung eines Rundheitsmeßgeräts. *E&I* 1996, vol. 113, H.4, s. 293–295.
- [10] A. WECKENMANN, H. EITZERT: Ein Gerät für Koordinatenmessung und Formprüfung? 5 Internationales DAAAM Symposium, Maribor, s. 487–488.
- [11] D. J. WHITEHOUSE: Handbook of Surface Metrology. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia 1994.
- [12] S. ŻEBROWSKA-ŁUCYK: Cyfrowe metody pomiaru odchyłki walcowości. Model matematyczny, oprogramowanie, wyniki badań. Konferencja „Metrologia Wspomagana Komputerowo”, Zegrze k. Warszawy 1993, t. 2/B, s. 269–276.

Otrzymano: 21.11.97

Artykuł przygotowany na podstawie referatów wygłoszonych na konferencjach: „Postęp w Rozwoju Łożysk Toczących – ISKRA 100, Kielce 1996” i „Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn – Kielce 1997”.