

RYSZARD RUDZIŃSKI, SABINA ŻEBROWSKA-ŁUCYK
WOJCIECH DĄBROWSKI

Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych
Politechnika Warszawska

KOMPUTEROWY SYSTEM ZBIERANIA I PRZETWARZANIA DANYCH POMIAROWYCH Z ANALOGOWYCH PRZYZRZĄDÓW DO POMIARU ODCHYLEK KSZTAŁTU

Omówiono właściwości analogowych urządzeń do pomiaru odchyłek kształtu. Wskazano na możliwości ich udoskonalenia poprzez sprzęgnięcie z komputerem osobistym wyposażonym w specjalistyczne oprogramowanie. Przedstawiono sposób i efekty modernizacji przyrządu typu Talyrond 100 produkcji brytyjskiej firmy Rank Taylor Hobson, przeznaczonego do pomiarów odchyłki okrągłości. Uzyskano system pomiarowy o doskonałych cechach metrologicznych i funkcjonalnych.

1. CHARAKTERYSTYKA ANALOGOWYCH PRZYZRZĄDÓW DO POMIARU ODCHYLEK KSZTAŁTU

Kiedy na początku lat sześćdziesiątych pojawiły się w polskich laboratoriach przemysłowych pierwsze specjalistyczne przyrządy umożliwiające wykonywanie pomiarów odchyłki okrągłości i prostoliniowości, były symbolem najwyższego poziomu techniki. Najczęściej sprowadzano przyrządy wyprodukowane przez — cieszącą się zasłużoną renomą — brytyjską firmę Rank Taylor Hobson oraz dobrze u nas znaną, solidną firmę niemiecką Hommelwerke. Przez około 20 kolejnych lat do laboratoriów polskich wprowadzono wiele typów tych przyrządów. Większość z nich pracuje do dziś, zachowując znakomite parametry mechaniczne. Jednak ich inne cechy użytkowe, jak np. czasochłonność obsługi, mała rozdzielczość czy duży udział czynników subiektywnych, sprawiają, że przyrządy te nie spełniają wymagań obecnych użytkowników. Obserwowane mankamenty wynikają z analogowego sposobu przetwarzania sygnału pomiarowego.

Działanie analogowych przyrządów do pomiaru odchyłek kształtu polega na rejestrowaniu na papierze przebiegu sygnału, jaki powstaje w czujniku stykającym się z badaną powierzchnią podczas jego ruchu względnego w kierunku stycznym do tej powierzchni (przemieszcza się czujnik lub element). W wypadku wyznaczania odchyłki prostoliniowości powstaje wykres sygnału pomiarowego we współrzędnych kartezyjskich, zaś przy pomiarze odchyłki okrągłości tworzony jest wykres

biegunowy, zwany kołogramem. Wykres sygnału pomiarowego, obciążony statycznymi i dynamicznymi błędami rejestracji, staje się obiektem kolejnego pomiaru, którego dokonuje operator, posługując się jedynie przezroczystym wzornikiem lub cyrklem i linijką.

Fakt, że dopiero wykres stanowi podstawę do szacowania odchyłek kształtu sprawia, że obsługa przyrządów analogowych musi być wyjątkowo staranna, a zatem — czasochłonna. Aby osiągnąć powiększenie sygnału wystarczająco duże do wizualnego oszacowania wartości zobrazowanych odchyłek, konieczne jest poprzedzenie pomiaru żmudnym pozycjonowaniem elementu; np. przy pomiarze odchyłek przekrojów poprzecznych należy doprowadzić do tego, by mimośrodowość mierzonego zarysu względem osi obrotu była znacznie mniejsza od występującej odchyłki okrągłości, co zwykle oznacza konieczność centrowania elementu z dokładnością rzędu 1 mikrometra lub jeszcze wyższą.

W celu wyznaczenia wartości odchyłki kształtu operator najpierw — stosując metodę prób i błędów — ustala położenie zarysu nominalnego, reprezentowanego przez tzw. element odniesienia (prostą przylegającą lub okrąg przylegający [4]), a następnie szacuje wartość największej odległości między wykresem odchyłek a zarysem nominalnym. Posługiwanie się wzornikiem wyklucza możliwość wyznaczenia położenia elementu średniego, preferowanego przez międzynarodowe normy [5, 6], jak również wszelkich statystycznych miar niedokładności kształtu, takich jak np. średnie odchylenie arytmetyczne czy średnie odchylenie kwadratowe. Przy opisanym sposobie szacowania wartości odchyłek istnieje ponadto niebezpieczeństwo popełnienia błędów grubych, wywołanych niepoprawnym wyznaczeniem przez operatora wartości uzyskanego powiększenia rysunkowego, które jest funkcją stopnia wzmocnienia elektrycznego i przełożenia mechanicznego, zależnego od długości dźwigni czujnika użytej przy danym pomiarze. Niezapisanie obok wykresu odchyłek wartości zastosowanego powiększenia czyni uzyskany dokument całkowicie bezużytecznym.

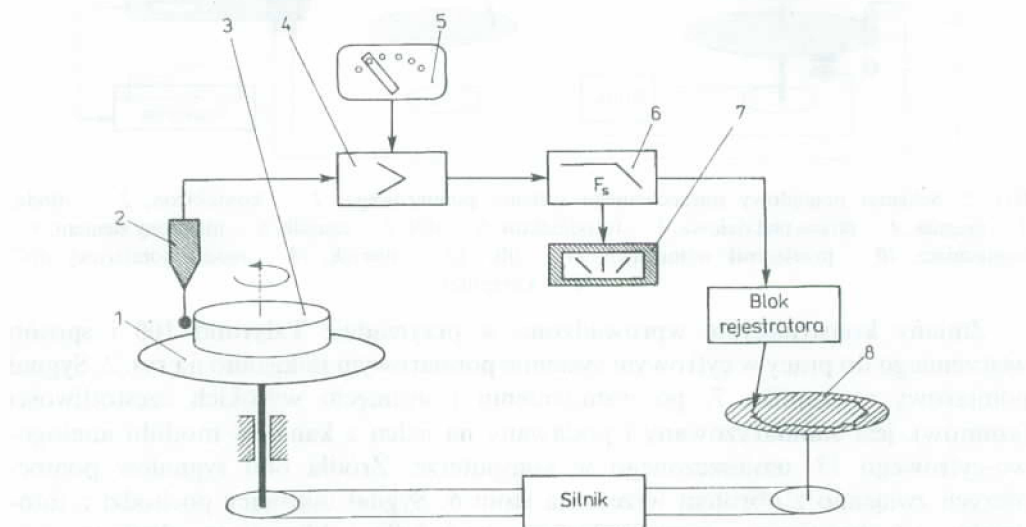
Kolejne niedoskonałości omawianych przyrządów wiążą się ze stosowanymi w nich dolnoprzepustowymi filtrami elektrycznymi. Po pierwsze — nieliniowość ich charakterystyki fazowej jest źródłem deformacji odwzorowywanych nierówności, szczególnie dużych w obszarach przylegających do nierówności zmieniających amplitudę skokowo. Po drugie — ponieważ filtracja następuje w czasie rzeczywistym — dla określenia odchyłki kształtu profilu przy uwzględnieniu różnych zakresów zawartych w nim częstotliwości jest konieczne wielokrotne wykonywanie pomiaru po kolejnych zmianach pozycji przełącznika ustawiającego częstotliwość graniczną.

Stwierdzono, że przy wykorzystaniu powszechnie dziś dostępnych środków informatycznych można — po dokonaniu niezbyt kosztownych modyfikacji — nie tylko usunąć wymienione wady omawianych przyrządów, ale również wyposażać je w dodatkowe możliwości [1, 2], czyniąc je niezwykle użytecznymi, nowoczesnymi urządzeniami badawczymi.

2. BUDOWA I DZIAŁANIE ANALOGOWEGO PRZYRZĄDU TALYROND 100

Tezę o celowości przekształcania analogowych przyrządów do pomiaru odchyłek kształtu w systemy cyfrowe zweryfikowano modernizując przyrząd Talyrond 100 produkcji firmy Rank Taylor Hobson [3]. Przyrząd ten służy do sprawdzania zarysów elementów o przekrojach nominalnie okrągłych, a więc: kulistych, walcowych i stożkowych, zarówno zewnętrznych jak i wewnętrznych. Może być również stosowany do pomiaru odchyłek kształtu powierzchni czołowych, nominalnie płaskich.

Głównym zespołem przyrządu (rys. 1) jest wzorcowy stół obrotowy 1 sprzężony mechanicznie z rejestratorem biegunowym 8. Czujnik indukcyjny 2, zaopatrzony w wychylną wymienną dźwignię, styka się z mierzonym elementem 3 obracającym się podczas pomiaru. Promieniowe przemieszczenia końcówki czujnika powodują wahania wskazówki miernika analogowego 7 oraz zmiany chwilowego promienia tworzonego wykresu. Powiększenie wykresu może być zmieniane skokowo; przełącznik 5 pozwala ustawić sześć stopni wzmocnień, którym — przy stosowaniu standardowej długości dźwigni pomiarowej — odpowiadają powiększenia rysunkowe od 100 razy do 5000 razy i zakresy pomiarowe od 200 μm do 4 μm . Pasma nierówności przenoszonych przez filtr 6 obejmuje przedział od jednej do 150 fal na obrót i nie może być przez operatora zmieniane.

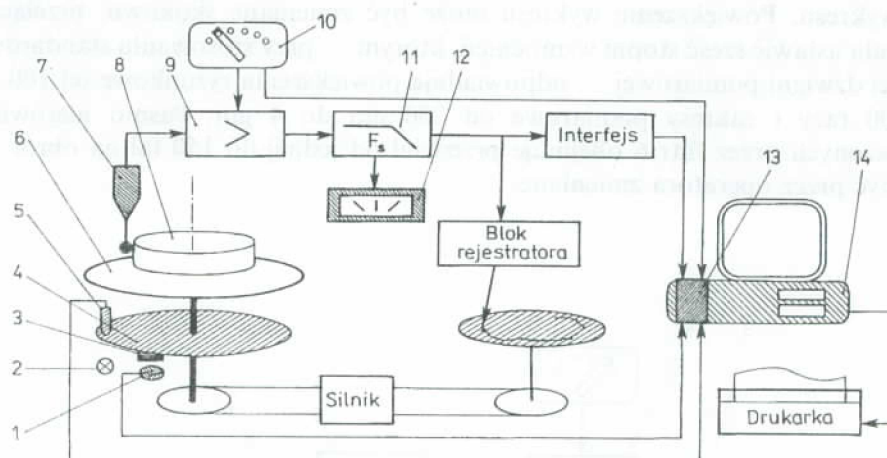


Rys. 1. Schemat poglądowy poddanego przebudowie przyrządu Talyrond 100: 1 — stół, 2 — czujnik, 3 — mierzony element, 4 — wzmacniacz, 5 — przełącznik wzmocnienia, 6 — filtr, 7 — miernik, 8 — rejestrator biegunowy

3. BUDOWA OPRACOWANEGO CYFROWEGO SYSTEMU POMIAROWEGO

Przyjęto wstępnie, że analogowe sygnały z przyrządu Talyrond 100 będą podawane do wielowejściowego modułu analogowo-cyfrowego, zainstalowanego dodatkowo w komputerze ogólnego przeznaczenia. Ponadto założono, że układ sprzęgający powinien realizować następujące funkcje:

- standaryzowanie sygnału elektrycznego z czujnika pomiarowego do zakresu stosowanych przetworników A/C ,
- generowanie sygnału pomocniczego służącego do równomiernego próbkowania sygnału czujnika podczas obrotu stołu,
- generowanie sygnału pomocniczego służącego do orientacji kątowej mierzonego zarysu względem układu współrzędnych stołu,
- przekazywanie informacji o ustawionym przez operatora stopniu wzmocnienia sygnału pomiarowego.



Rys. 2. Schemat poglądowy opracowanego systemu pomiarowego: 1 — kontaktron, 2 — dioda, 3 — magnes, 4 — tarcza podziałowa, 5 — fotodetektor, 6 — stół, 7 — czujnik, 8 — mierzony element, 9 — wzmacniacz, 10 — przełącznik wzmocnień, 11 — filtr, 12 — miernik, 13 — moduł pomiarowy A/C , 14 — komputer

Zmiany konstrukcyjne wprowadzone w przyrządzie Talyrond 100 i sposób włączenia go do pracy w cyfrowym systemie pomiarowym pokazano na rys. 2. Sygnał pomiarowy z czujnika 7, po wzmocnieniu i usunięciu wysokich częstotliwości (szumów), jest standaryzowany i podawany na jeden z kanałów modułu analogowo-cyfrowego 13, umieszczonego w komputerze. Źródła obu sygnałów pomocniczych związane z obrotem wrzeciona stołu 6. Sygnał taktujący pochodzi z fotodetektora 5 oświetlonego przez diodę 2 wiązką światła, cyklicznie przesłaniana przez obrzeże osadzonej na wrzecionie stołu tarczy 4 o równomiernie naciętych 128 wrębach. Impuls służący do kątowego zorientowania zarysu względem stołu pochodzi z przełącznika kontaktronowego 1, zwieranego przez magnes 3 raz na jeden

obrót tarczy 4. Przekazywanie informacji o nastawionym przez operatora stopniu wzmocnienia odbywa się za pośrednictwem układu kontaktronów, związanych z obrotowym przełącznikiem powiększeń 10.

Zastosowany w torze pomiarowym moduł LC-010-1612 firmy AMBEX, zawiera dwunastobitowy przetwornik analogowo-cyfrowy typu ADC 574A KP firmy Burr Brown, który gwarantuje monotoniczność i nieliniowość całkowitą nie przekraczającą 0,012% zakresu pomiarowego.

4. OPROGRAMOWANIE SYSTEMU POMIAROWEGO

Procedury pomiarowe programu obsługują odczyt wszystkich sygnałów podawanych na wejście modułu pomiarowego komputera. Wywołanie operacji „pomiar” wyzwala odczytanie stopnia nastawionego wzmocnienia sygnału pomiarowego i uruchamia równoczesne czytanie sygnału pomiarowego, sygnału taktującego oraz sprawdzenie stanu sygnału w obwodzie kontaktronu stołu. Gdy pojawia się impuls wywołany zwarciem kontaktronu przez obracający się magnes, następuje kątowne zorientowanie mierzonego zarysu względem stołu, a więc i względem ustawionego na nim elementu. Takie rozwiązanie daje możliwość jednoznacznego przypisania punktów wykresu punktom badanej powierzchni przy najkrótszym czasie pomiaru. Podczas jednego pełnego obrotu stołu program odczytuje od kilku do kilkunastu tysięcy wartości sygnału czujnika, zależnie od częstotliwości zegarowej komputera

The screenshot displays a DOS-based software interface for harmonic analysis of profiles. At the top, a title bar reads "POMIAR I ANALIZA HARMONICZNA ZARYSÓW ZAMKNIĘTYCH" with a window icon on the left and "ITM PW" on the right. Below the title bar is a menu bar with "Pomiary" highlighted. A dropdown menu is open under "Pomiary", listing options: "Wykonanie pomiaru", "Odtworzenie wykresu", "Filtr", "Długość dźwigni", "Zero czujnika", and "Dysk" (with a right arrow). To the right of the menu is a status bar showing "= Dysk =". Below the menu is a file selection area showing the current directory "C:\POMIARY\T100\" and a list of files: "SWORZEN5.DAT", "TLOK3.DAT", "TULEJA2.DAT", "WALEK114.DAT", "WIRNIK4.DAT", and "..\". A horizontal separator line follows. Below this is a table of measurement parameters:

ZAKRES POMIAROWY	FILTR	DŻWIGNIA	TRANSMISJA	DRUKARKA
3. 100 µm	bez filtru	45 mm	AD/DA	LPT1 - Epson

Below the table, the catalog path is shown as "KATALOG: C:\POMIARY\T100\" and the sensor value as "CZUJNIK : -0.6 µm". At the bottom, a command bar contains three options: "<Alt>-X>-Koniec", "<F1>-Help", and "<+F4> + ENTER lub litera>-Wybór".

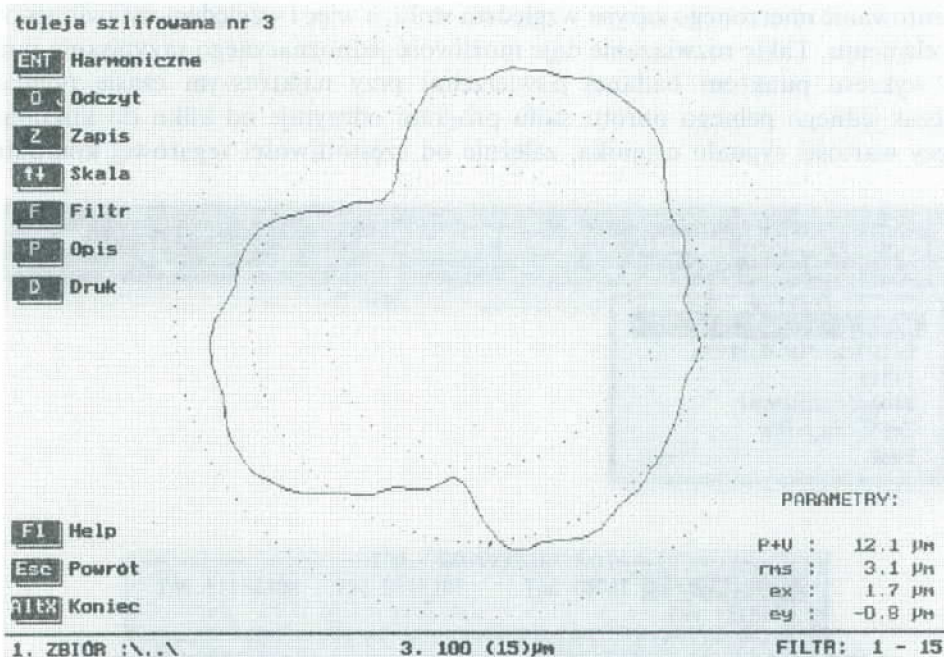
Rys. 3. Kopia ekranu monitora przed rozpoczęciem pomiarów

(odstęp próbkowania, nawet przy stosowaniu najwolniejszych komputerów, jak PC XT, jest krótszy od $100 \mu s$), sukcesywnie uśredniając je w grupach tworzonych na podstawie każdego zbocza prostokątnego sygnału taktującego. Uzyskane 256 wartości reprezentują mierzony zarys i są uwzględniane w dalszej analizie danych.

Główny ekran roboczy programu ma postać pokazaną na rys. 3. Poszczególne pozycje menu są rozwijane. Umożliwiają one m.in. wpisanie długości stosowanej dźwigni pomiarowej czujnika i wybór częstotliwości granicznej realizowanego numerycznie filtra dolnoprzepustowego.

W dolnej części ekranu znajduje się wyświetlacz sygnału czujnika. W czasie obrotu elementu granica między jasnym i ciemnym polem wyświetlacza przemieszcza się podobnie jak położenie wskazówki miernika [2].

Program wyznacza (rys. 4): biegunowy wykres odchyłek, miary liczbowe odchyłki okrągłości (wartość maksymalną — $P+V$, odchylenie średnie kwadratowe — rms) oraz współrzędne środka mierzonego zarysu (e_x i e_y). Bazą do wyznaczania wszystkich parametrów jest okrąg średni, spełniający warunek najmniejszej sumy kwadratów odległości od zarysu rzeczywistego.



Rys.4. Kopia ekranu monitora po wykonaniu pomiaru (przykład)

Wykres odchyłek jest rysowany w powiększeniu zapewniającym optymalną czytelność, dobieranym automatycznie z przyjętego ciągu aż 25 wartości tworzących szereg Renarda o ilorazie $\sqrt[4]{10}$. W razie potrzeby operator może łatwo zmienić powiększenie wykresu, jak również ustawić nową górną częstotliwość graniczną filtra, która może przyjąć wartość z przedziału od 4 do 100 fal na obwodzie. Filtrację

cyfrową realizowaną przez program cechuje brak zniekształceń fazowych, tak charakterystycznych dla filtracji analogowej. Ponieważ do wszystkich obliczeń program wykorzystuje zbiór danych surowych, można wielokrotnie zmieniać wybrane pasmo filtracji, bez powtórnego wykonywania pomiaru.

Dane pomiarowe mogą być zapamiętane we wspólnym zbiorze zawierającym: dyskretne wartości sygnału pomiarowego, stopień wzmocnienia, długość dźwigni, pasmo filtru oraz, ewentualnie, wprowadzony przez operatora tekst komentarza. Wydruki wyników pomiaru zawierają wykres odchyłek kształtu, wartości parametrów, datę i stosowny zakres pomiarowy oraz wprowadzone przez operatora opisy. Nie opuszczając programu można kasować zbiory danych i tworzyć nowe katalogi zbiorów.

5. PORÓWNANIE METROLOGICZNYCH I FUNKCJONALNYCH WŁAŚCIWOŚCI PRZYRZĄDU ANALOGOWEGO I UTWORZONEGO SYSTEMU POMIAROWEGO

Po modyfikacjach konstrukcyjnych przyrządu Talyrond 100 i sprzęgnięciu go z oprogramowanym komputerem osobistym uzyskano system pomiarowy charakteryzujący się bardzo dobrymi właściwościami metrologicznymi i ergonomicznymi.

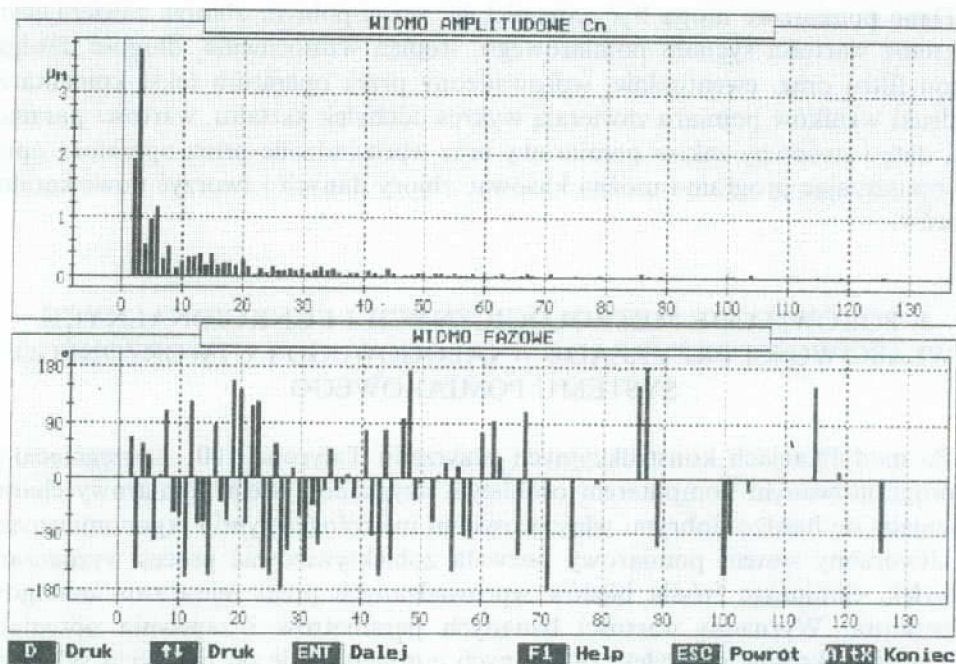
Utworzony system pomiarowy pozwala zobiektywizować proces wyznaczania odchyłek, eliminując źródła błędów wprowadzanych przez rejestrator analogowy i operatora. Wyznacza wartości badanych parametrów i zapewnia optymalną czytelność wykresów odchyłek, tworzonych automatycznie po usunięciu składowej związanej z położeniem elementu względem osi obrotu, która stanowi istotne zakłócenie przy pomiarach analogowych.

Osiągnięto wielokrotne skrócenie czasu pomiaru, m.in. poprzez komputerowe wspomaganie czynności centrowania przekroju względem osi obrotu (pominięte w niniejszym opisie) i równoczesne dopuszczenie, by mimośrodowość pozostała po regulacji była nawet o 2 rzędy większa od mierzonej odchyłki, wobec koniecznego przy pomiarach analogowych warunku, by mimośrodowość była w stosunku do odchyłki pomijalnie mała.

Dwukrotnie zwiększono maksymalny zakres pomiarowy (z 250 μm do 500 μm), równocześnie osiemdziesięciokrotnie poprawiając rozdzielczość na poszczególnych stopniach wzmocnień. Umożliwiło to m.in. pomiar odchyłek kształtu elementów o najwyższej dokładności, nie wykrywalnych dotąd na podstawie zapisu analogowego.

Zbudowany system pomiarowy dostarcza wielu nowych informacji o mierzonym zarysie. Pozwala wyznaczać ekstremalne i chwilowe odchyłki kształtu względem najlepszej statystycznej bazy — zarysu średniego, niedostępnego przy pomiarach analogowych. Daje możliwość stosowania filtrów pasmowych o nastawianej częstotliwości odcięcia, nie wprowadzających zniekształceń fazowych. Pozwala na prowadzenie rozmaitych analiz. Jest np. stosowany do wyznaczania składu harmonicznego

zarysu (rys. 5), który ma istotne znaczenie dla identyfikacji technologicznych źródeł obserwowanych niedokładności kształtu i prognozowania eksploatacyjnych właściwości elementów.



Rys. 5. Wyniki analizy harmoniczej elementu o zarysie przedstawionym na rys. 4

Niektóre nowe możliwości przyrządu wynikają bezpośrednio z zastosowania do przetwarzania danych komputera ogólnego użytku. Są to np.: archiwizacja danych w dowolnym formacie, możliwość wielokrotnej analizy danych przy różnych parametrach przetwarzania i za pomocą różnych programów, możliwość wpływu operatora na formę wydruku.

Warto też dodać, że eliminacja potrzeby stosowania do rejestracji wykresów specjalnego papieru oraz konieczności dokonywania regulacji i okresowych wymian pisaka rejestratora obniża koszty eksploatacji przyrządu.

6. UWAGI KOŃCOWE

Zespoły elektroniczne i mechaniczne, które wybudowano w przyrząd Talyrond 100, nie stanowią żadnej przeszkody w jego dalszym użytkowaniu w sposób przewidziany przez producenta, tzn. z wykorzystaniem analogowego rejestratora odchyłek. Zachowanie starego sposobu rejestracji stwarza użytkownikowi możliwość przekonania się, że przy pomiarze dowolnego elementu system cyfrowy pod każdym względem przewyższa układ z rejestracją analogową.

Powstały system cechują prostota i niezawodność, cenne nie tylko w warunkach przemysłowych ale również w laboratoriach badawczych. Zasady obsługi i możliwości systemu są zgodne z najnowszymi tendencjami w dziedzinie metrologii użytkowej. Oprogramowanie jest przyjazne, odporne na błędy operatora i może być rozwijane stosownie do specyficznych potrzeb użytkowników.

Możliwość zapisywania mierzonych sygnałów w postaci kodów ASCII daje użytkownikowi swobodny dostęp do danych pomiarowych i pozwala na prowadzenie zaawansowanych badań naukowych nad przyczynami i konsekwencjami występowania stwierdzonych odchyłek kształtu.

LITERATURA

1. Jędrzejewski A., Żebrowska-Lucyk S.: *Pomiary cyfrowe — nowa jakość oceny makrogeometrii*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Seria Mechanik. Nr 30/1984; s. 141 — 144.
2. Żebrowska-Lucyk S.: *Zastosowanie metod cyfrowego przetwarzania danych do badania makrogeometrii elementów*, Prace Naukowe PW, seria Konferencje, z. 1, s. 247 — 252, Warszawa 1991.
3. *Talyrond 100*. Operator's Handbook. Rank Taylor Hobson.
4. Norma PN-78/M-02137: *Tolerancja kształtu i położenia. Nazwy i określenia*.
5. Norma ISO 6318-1985(E): *Measurement of roundness. Terms, definitions and parameters of roundness*.
6. Norma ISO 4291-1985(E): *Methods of the assessment of departure from roundness. Measurements of variations in radius*.

COMPUTER-BASED SYSTEM OF ACQUISITION AND PROCESSING THE MEASURING DATA FROM THE FORM DEVIATION MEASURING ANALOGUE INSTRUMENTS

S u m m a r y

Properties of analogue instruments for roundness deviation measurement are described. Possibilities of improvement by mating them with a personal computer provided with a specialised software are pointed. Method and results of updating the Rank Taylor Hobson device Talyrond 100 are presented. The roundness deviation measuring instrument that has obtained in this way reveals very good metrological and operating properties.