

WYŻSZA SZKOŁA INŻYNIERSKA  
W KOSZALINIE  
WYDZIAŁ MECHANICZNY

Mgr inż. Tatiana Łukianowicz

**METODA OCENY WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI  
METROLOGICZNYCH PROFILOMETRÓW STYKOWYCH  
Z WYKORZYSTANIEM INTERFEROMETRII LASEROWEJ**

**P r a c a   d o k t o r s k a**

Promotor:  
**prof. dr inż. Tadeusz Karpiński**

**K o s z a l i n 1992**

## SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	3
Spis tablic.....	5
Spis rysunków.....	6
WSTĘP.....	8
ANALIZA LITERATURY.....	10
1. Ogólna charakterystyka stykowego sposobu odwzorowania i pomiaru mikronierówności powierzchni.....	10
2. Podstawowe czynniki decydujące o dokładności profilometrów stykowych.....	12
2.1. Nacisk ostrza odwzorowującego.....	13
2.2. Prędkość przesuwu ostrza.....	16
2.3. Promień wierzchołka ostrza.....	19
2.4. Właściwości dynamiczne.....	20
2.5. Inne czynniki.....	25
3. Wymagania stawiane profilografom i profilometrom stykowym.....	28
4. Sposoby sprawdzania wybranych właściwości metrologicznych profilografów i profilometrów stykowych.....	29
4.1. Sposoby oceny błędu względnego powiększenia pionowego profilografów.....	30
4.2. Sposoby oceny błędu względnego powiększenia poziomego profilografów.....	33
4.3. Sposoby oceny błędu wskazań profilometrów.....	35
4.4. Sposoby wyznaczania charakterystyki przenoszenia profilometrów.....	38
4.5. Charakterystyka wybranych sposobów oceny właściwości metrologicznych przyrządów stykowych.....	40
5. Wnioski.....	44
6. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY.....	46
1. ANALIZA TEORETYCZNA.....	47
1.1. Interferencja fal świetlnych.....	47
1.2. Analiza zagadnienia pomiaru długości za pomocą interferometru laserowego.....	48

3.	Analiza sygnału interferencyjnego przy okresowym ruchu zwierciadła interferometru.....	52
4.	Modelowanie interferogramów przy okresowym ruchu zwierciadła interferometru.....	57
5.	Analiza błędów pomiaru przemieszczeń okresowych za pomocą interferometru laserowego.....	63
6.	Wnioski.....	74
	METODYKA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH.....	76
i.1.	Cel i zakres badań.....	76
i.2.	Stanowisko badawcze.....	76
i.3.	Oprogramowanie.....	81
i.4.	Badania przemieszczeń w ruchu okresowym za pomocą interferometru laserowego.....	84
i.5.	Badania porównawcze.....	85
i.6.	Badania wybranych właściwości profilometrów stykowych.....	87
3.	WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH I ICH ANALIZA.....	92
3.1.	Wyniki badań przemieszczeń w ruchu okresowym za pomocą interferometru laserowego.....	92
3.2.	Wyniki badań porównawczych.....	99
3.3.	Wyniki badań wybranych właściwości profilometrów stykowych	107
3.3.1.	Wyniki badań profilometru ME10.....	107
3.3.2.	Wyniki badań profilometru T2000.....	113
3.4.	Analiza wyników badań.....	120
3.5.	Wnioski z badań.....	125
7.	WNIOSKI KOŃCOWE.....	128
8.	LITERATURA.....	128
	ZAŁĄCZNIK 1.....	136

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- $A_1, A_2$  - amplitudy drgań wektorów natężenia pola elektrycznego,  
- amplituda drgań zwierciadła interferometru,
- $\alpha_i, \alpha_{sr}, \alpha_w$  - odległości między kreskami kontrolnymi wzorca, zmierzone z profilogramu  $\alpha_i$ , wartość średnia  $\alpha_{sr}$ , wartość rzeczywista  $\alpha_w$ ,
- $\rho$  - amplituda modelowanych drgań piłokształtnych zwierciadła interferometru,
- $s_i$  - przemieszczenie zwierciadła interferometru w elementarnym  $i$ -tym przedziale czasu,  
- zredukowany moduł sprężystości,
- $E_0, E_1$  - moduły sprężystości materiału ostrza odwzorowującego i powierzchni mierzonej,
- $E_1, E_2$  - wektory natężenia pola elektrycznego fal składowych,  
- wektor polaryzacji fali świetlnej,  
- częstotliwość drgań mechanicznych,
- $l_{sr}, H_w$  - głębokość nierówności jednokreskowego wzorca kontrolnego, średnia  $H_{sr}$  i rzeczywista  $H_w$ ,
- $I, I_{max}, I(t)$  - natężenie światła, maksymalne  $I_{max}$ , w chwili  $t$   $I(t)$ ,
- $K, K_{min}, K_{max}$  - współczynnik przenoszenia profilometru, minimalny  $K_{min}$ , maksymalny  $K_{max}$ ,
- $\kappa$  - kontrast obrazu interferencyjnego,
- $c, l_n$  - długość odcinka pomiarowego profilometru,  
- odległość między punktami profilogramu mającymi tę samą fazę,
- $l, N_1$  - całkowita liczba jasnych i ciemnych prążków, które przemieściły się w obrazie interferencyjnym przy ruchu zwierciadła interferometru,  
- siła nacisku ostrza odwzorowującego,
- $d$  - największy dopuszczalny błąd odwzorowania profilu,
- $\chi(\tau)$  - funkcja autokorelacji profilu powierzchni,
- $\bar{a}$  - średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości,
- $a_i$  -  $i$ -te wskazanie profilometru przy pomiarze parametru  $R_a$ ,
- $a_w$  - wartość  $R_a$  uwierzytelnionego wzorca kontrolnego,
- $a_{zm}$  - wartość parametru  $R_a$  wskazana przez profilometr,
- $a_{zad}$  - wartość parametru  $R_a$  zadana ostrzu odwzorowującemu profilometru przez vibrator lub wzorzec,  
- wartość średnia parametru  $R_a$  z dziesięciu wskazań profilometru,
- $a_{max}, R_m$  - maksymalna wysokość chropowatości,

- wysokość chropowatości wg 10 punktów,
- promień wierzchołka ostrza odwzorowującego,
- $r_v$  - promienie krzywizny wzniesienia ( $r_\rho$ ) i wgłębienia ( $r_v$ ) nierówności,
- średni odstęp miejscowych wzniesień profilu,
- średni odstęp chropowatości,
- $n$  - całkowite przemieszczenia zwierciadła interferometru,
- $k$  - przemieszczenie zwierciadła interferometru od położenia odpowiadającego ostatniemu jasnemu lub ciemnemu prążkowi do końcowego położenia zwierciadła,
- $\rho$  - przemieszczenie zwierciadła interferometru od położenia początkowego do położenia odpowiadającego pierwszemu jasnemu lub ciemnemu prążkowi interferencyjnemu,
- okres drgań mechanicznych,
- czas,
- $\rho$  - współczynnik długości nośnej profilu chropowatości,
- $FSR$  - pełny zakres przetwarzania przetwornika A/C,
- $V, V_g$  - prędkość przesuwu głowicy pomiarowej, nominalna  $V$ , wyznaczona na podstawie pomiaru  $V_g$ ,
- $r$  - prędkość przesuwu taśmy rejestratora profilografu,
- $h_{nom}$  - nominalna wartość powiększenia poziomego profilografu,
- $v_{nom}$  - nominalna wartość powiększenia pionowego profilografu,
- $x(t), y(t_i)$  - położenie zwierciadła w odpowiedniej chwili czasu,
- $\alpha_1, \alpha_2$  - fazy interferujących fal,
- $\Delta I$  - błąd wyznaczenia stosunku  $I(t)/I_{max}$ ,
- $\Delta Q$  - błąd kwantowania,
- $\Delta s$  - błąd pomiaru przemieszczenia zwierciadła interferometru laserowego,
- $\Delta s_I$  - błąd pomiaru przemieszczenia spowodowany błędem  $\Delta I$ ,
- $\Delta s_\lambda$  - błąd pomiaru przemieszczenia spowodowany błędem  $\Delta \lambda_l$ ,
- $\Delta \lambda_l$  - błąd odtwarzania długości fali światła laserowego,
- $\delta$  - graniczny błąd adjustacji profilometru,
- $\delta_h, \delta_v$  - błędy względne powiększenia poziomego i pionowego profilografu,
- $\delta_l, \delta_l(t)$  - różnica dróg optycznych interferujących fal,
- $\delta_{syst}$  - błąd systematyczny wskazań profilometru,
- $\epsilon, \epsilon_i$  - ułamkowa część odległości między jasnym i ciemnym prążkiem interferencyjnym,
- $\lambda$  - długość fali nierówności powierzchni,
- $\lambda_B$  - graniczna długość fali filtra profilometru,
- $\lambda_l, \lambda_v$  - długość fali światła laserowego, w powietrzu  $\lambda_l$ , w próżni  $\lambda_v$ ,

- częstość impulsów,
- promień wierzchołka ślizgacza,
- średniokwadratowy błąd względny wskazań profilometru,
- faza początkowa drgań mechanicznych,
- częstotliwość kątowna drgań zwierciadła interferometru,
- częstotliwość kątowna fal świetlnych,
- odkształcenie sprężyste,

### Spis tablic

Tablica 1. Wzory <i>Hertza</i> do obliczania odkształceń sprężystych spowodowanych naciskiem ostrza odwzorowującego.....	14
Tablica 2. Wartości nominalne i odchyłki graniczne wzorców typu A1 i A2 .....	31
Tablica 3. Dane techniczne wibratorów .....	32
Tablica 4. Wartości nominalne i odchyłki graniczne wzorców typu C .....	35
Tablica 5. Wartości bezwzględne błędu pomiaru przemieszczenia zwierciadła interferometru laserowego, spowodowanego niedokładnym wyznaczeniem stosunku $I(t)/I_{max}$ .....	72
Tablica 6. Podstawowe parametry laserów wykorzystywanych do oświetlania interferometru.....	79
Tablica 7. Wyniki pomiarów średniej amplitudy drgań stolika wibracyjnego za pomocą komparatora interferencyjnego Köstera z lampą helową.....	99
Tablica 8. Wyniki pomiarów średniej amplitudy drgań stolika wibracyjnego za pomocą komparatora interferencyjnego Köstera z lampą kryptonową.....	100
Tablica 9. Zestawienie wyników badań porównawczych.....	100
Tablica 10. Wyniki badań błędu względnego powiększenia pionowego profilometru ME10.....	107
Tablica 11. Wyniki sprawdzania błędu wskazań profilometru ME10 za pomocą stanowiska badawczego.....	107
Tablica 12. Wyniki sprawdzania błędu wskazań profilometru ME10 za pomocą wzorców kontrolnych.....	108
Tablica 13. Wyniki badań błędu względnego powiększenia pionowego profilometru T2000.....	113
Tablica 14. Wyniki sprawdzania błędu wskazań profilometru T2000 za pomocą stanowiska badawczego dla zakresu 2 $\mu\text{m}$ ....	113
Tablica 15. Wyniki sprawdzania błędu wskazań profilometru T2000 za pomocą stanowiska badawczego dla zakresu 20 $\mu\text{m}$ ....	114

Spis rysunków

s.1.	Uproszczony schemat funkcjonalny profilometru stykowego	11
s.2.	Przyczyny zmienności odkształceń powierzchni spowodowanych naciskiem ostrza odwzorowującego	13
s.3.	Wykres funkcji autokorelacji danej równaniem (2.1) oraz wykresy jej pochodnych	18
s.4.	Błędy odwzorowania wynikające z geometrii zarysu powierzchni i ostrza odwzorowującego	19
s.5.	Charakterystyki przenoszenia profilometrów stykowych	23
s.6.	Schemat dwuczłonowego filtra CR stosowanego w profilometrach stykowych i jego charakterystyka fazowo-częstotliwościowa	24
s.7.	Odwzorowanie powierzchni o różnych długościach fali za pomocą przyrządu stykowego wyposażonego w ślizgacz	26
s.8.	Wzorzec schodkowy do sprawdzania powiększeń pionowych profilografów stykowych	30
s.9.	Zarysy wzorców do sprawdzania powiększeń pionowych profilografów	31
s.10.	Schemat układu do sprawdzania powiększenia pionowego profilografu za pomocą wibratora	32
s.11.	Schemat układu do wyznaczania prędkości przesuwu głowicy pomiarowej profilografu	34
s.12.	Zarysy wzorców typu C i D	36
s.13.	Schemat układu do sprawdzania charakterystyki przenoszenia profilometru	38
s.14.	Schemat funkcjonalny układu ze stolikiem wibracyjnym do sprawdzania przyrządów stykowych	41
s.15.	Schemat układu do pomiaru parametrów drgań wibratora z wykorzystaniem zjawiska interferencji stroboskopowej	42
s.16.	Schemat jednoczęstotliwościowego interferometru laserowego	49
s.17.	Schematy: a) interferometru laserowego z pryzmatami odbijającymi; b) pryzmatu odbijającego	50
s.18.	Zależność natężenia światła w obrazie interferencyjnym od różnicy faz interferujących fal	51
s.19.	Wykresy równania ruchu harmonicznego zwierciadła interferometru, pochodnej równania ruchu, oraz funkcji znaku pochodnej	57
s.20, 21, 22.	Interferogramy otrzymane w wyniku modelowania równania (4.29)	59-61
s.23.	Interferogramy otrzymane dla różnych amplitud $\alpha_p$ w wyniku modelowania równania (4.9)	62

s.24. Zależność kontrastu $K$ obrazu interferencyjnego od stosunku natężeń światła interferujących fal	67
s.25. Rozkład natężenia światła w obrazie interferencyjnym; zależność mierzonego kontrastu od stosunku $w/b$	68
s.26. Schemat stanowiska badawczego	77
s.27. Wygląd zewnętrzny stanowiska badawczego	77
s.28. Ogólna struktura programu <i>INTER</i>	82
s.29. Ogólny algorytm części programu <i>INTER</i> zawartej w opcji <i>Analiza interferogramu</i>	82
s.30. Menu główne programu <i>INTER</i> i przykładowe wyniki obliczeń na tle menu głównego	83
s.31. Schemat ilustrujący ustawienie wibratora na stoliku przedmiotowym komparatora interferencyjnego <i>Köstersa</i>	86
s.32. Schemat sprawdzania profilometru za pomocą stolika wibracyjnego i interferometru laserowego	89
s.33. Widok profilometru T2000 podczas sprawdzania za pomocą wibratora i interferometru laserowego	89
s.34. Ustawienie stolika wibracyjnego z interferometrem na profilometrze ME10	90
s.35. Zarysy wybranych wzorców kontrolnych stosowanych podczas sprawdzania profilometrów ME10 i T2000	91
s.36. Zakres amplitud i częstotliwości drgań harmoniczných zwierciadła interferometru objętych badaniami	92
s.37, 38, 39, 40. Interferogramy i wykresy równania ruchu wyznaczone za pomocą stanowiska badawczego	93-96
s.41, 42. Interferogramy i wykresy równania ruchu wyznaczone za pomocą stanowiska badawczego w obecności silnych zakłóceń	97-98
s.43, 44, 45, 46, 47, 48. Interferogramy, wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru oraz wyniki analizy otrzymane podczas badań porównawczych	101-106
s.49. Charakterystyka przenoszenia profilometru ME10	108
s.50, 51, 52, 53. Wyniki otrzymane podczas sprawdzania błędu względnego powiększenia pionowego profilometru ME10	109-112
s.54. Charakterystyki przenoszenia profilometru T2000	115
s.55, 56. Wyniki otrzymane podczas sprawdzania błędu powiększenia pionowego profilometru T2000	116-117
s.57, 58. Interferogramy zarejestrowane podczas sprawdzania błędów wskazań profilometru T2000, wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru i wyniki analizy	118-119
s.59. Błąd pomiaru wynikający z niespełnienia postulatu <i>Abbego</i>	123



## WSTĘP

Mikrogeometria powierzchni jest jednym z ważnych czynników decydujących o właściwościach powierzchni części maszyn i wyrobów, a tym samym o ich jakości. Obecnie najczęściej stosowanym sposobem pomiaru mikrogeometrii powierzchni jest sposób polegający na stykowym odwzorowaniu profilu powierzchni i późniejszym przetworzeniu odwzorowanego profilu na odpowiedni sygnał pomiarowy. Pomiaru takie realizowane są za pomocą profilometrów stykowych. W czasie produkcji i eksploatacji profilometrów stykowych zachodzi potrzeba sprawdzania wybranych właściwości metrologicznych tych przyrządów. Między innymi konieczne jest sprawdzanie błędów wskazań oraz charakterystyki przenoszenia profilometrów, a także błędów powiększenia pionowego profilografów. Właściwości te są najczęściej sprawdzane za pomocą odpowiednich wzorców kontrolnych chropowatości lub stolików wibracyjnych.

W celu sprawdzenia przyrządu stykowego, należy użyć kilku lub kilkunastu różnych wzorców kontrolnych. Wzorce kontrolne mogą ulegać w czasie eksploatacji uszkodzeniom lub zużyciu. Stoliki wibracyjne używane do sprawdzania profilometrów stykowych zastępują znaczną liczbę wzorców kontrolnych. Przemieszczenia generowane przez stolik wibracyjny oceniane są na ogół na podstawie parametrów sygnału zasilającego układ napędowy stolika. Może być to przyczyną znacznych błędów przy sprawdzaniu przyrządów stykowych. Dlatego też w niniejszej pracy zaproponowano wykorzystanie takiego, jednoczęstotliwościowego interferometru laserowego, do pomiaru harmonicznych przemieszczeń stolika wibracyjnego w czasie sprawdzania przyrządów stykowych. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że takie rozwiązanie zapewnia odpowiednią dokładność pomiaru przemieszczeń stolika wibracyjnego, a tym samym właściwe sprawdzanie profilometru.

W ramach pracy przeanalizowano literaturę dotyczącą czynników decydujących o dokładności przyrządów stykowych przeznaczonych do pomiaru mikrogeometrii powierzchni, a także rozpatrzono podstawowe właściwości metrologiczne tych przyrządów oraz metody ich sprawdzania. Wyniki analizy zawarto w rozdziale 2. Na tej podstawie sformułowano główną tezę, a także określono cel i zakres pracy. W rozdziale 4 dokonano analizy teoretycznej, dotyczącej możliwości pomiaru przemieszczeń okresowych za pomocą jednoczęstotliwościowego interferometru laserowego. W wyniku tej analizy stwierdzono, że interferometr laserowy umożliwia pomiar

rzemieszczeń okresowych i może być wykorzystany do sprawdzania przyrządów stykowych. W rozdziale czwartym oszacowano także błąd pomiaru przemieszczenia za pomocą interferometru laserowego. Rozdział 5.0 zawiera cel, zakres i metodykę przeprowadzanych badań doświadczalnych. W rozdziale tym opisano stanowisko badawcze wykorzystujące zbudowany interferometr laserowy, skomputeryzowany tor przetwarzania sygnału interferencyjnego, oraz przedstawiono oprogramowanie stanowiska badawczego. Badania doświadczalne dotyczyły określenia zakresu amplitud i częstotliwości drgań harmoniczných, które można zmierzyć za pomocą opracowanego stanowiska badawczego. W rozdziale piątym opisano także badania porównawcze przemieszczeń okresowych z wykorzystaniem komparatora interferencyjnego Köstera. W końcowej części rozdziału przedstawiono badania polegające na sprawdzeniu wybranych właściwości profilometrów stykowych. Wyniki badań doświadczalnych zamieszczono w rozdziale 6. Tam też dokonano ich analizy i dyskusji. W rozdziale 7 sformułowano najważniejsze wnioski wynikające z badań i analiz wykonanych w ramach pracy.

Wyniki uzyskane w przedstawionej pracy pozwalają stwierdzić, że zastosowanie interferometru laserowego do pomiaru przemieszczeń stolików wibracyjnych umożliwia dogodnie i jednocześnie dokładne sprawdzanie wybranych właściwości przyrządów stykowych. Łączy się to możliwe dzięki połączeniu interferencyjnego sposobu pomiaru przemieszczeń z szybkim i dokładnym przetwarzaniem sygnału pomiarowego za pomocą systemu mikrokomputerowego.

## ANALIZA LITERATURY

### . Ogólna charakterystyka stykowego sposobu odwzorowania i pomiaru mikronierówności powierzchni

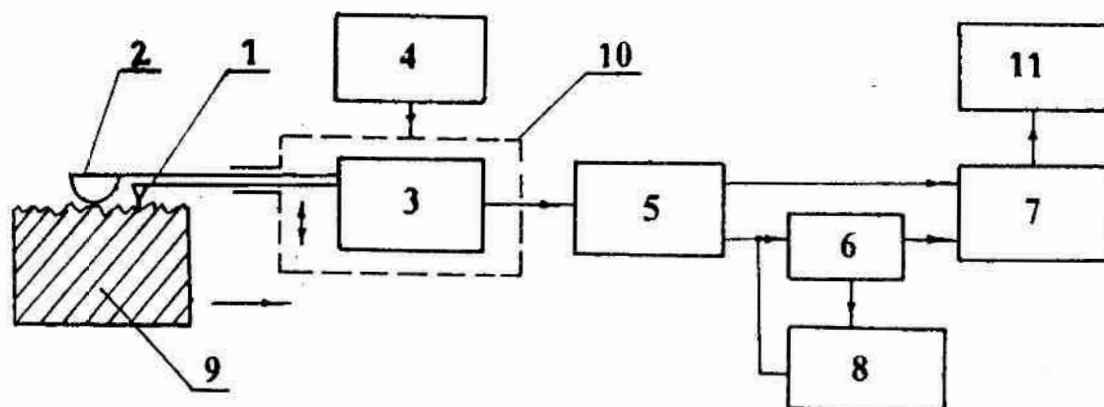
Najczęściej stosowany sposób pomiaru mikronierówności powierzchni polega na stykowym odwzorowaniu profilu powierzchni i późniejszym przetworzeniu sygnału pomiarowego, proporcjonalnego do odwzorowanego profilu. Odwzorowanie profilu powierzchni odbywa się za pomocą ostrza skrajającego się z powierzchnią i przesuwanego się liniowo wzdłuż powierzchni. Ostrze to na ogół wykonane jest z diamentu i ma niewielki promień zaokrąglenia. Oś ostrza jest prostopadła do powierzchni mierzonej. Ostrze odwzorowujące umieszczone jest na końcu dźwigni lub mocowane w innym mechanizmie, zapewniającym możliwość niewielkich zmian położenia ostrza w kierunku osiowym. Liniowy przesuw ostrza wzdłuż powierzchni mierzonej powoduje to, iż ostrze, dociskane do powierzchni niewielką siłą, będzie zmieniać swoje położenie, zagłębiając się lub wznosząc, odpowiednio do napotykaných nierówności powierzchni. Zmienne położenie ostrza w kierunku prostopadłym do powierzchni przetwarzane jest na ogół na sygnał elektryczny za pomocą odpowiedniego przetwornika pomiarowego. Sygnał pomiarowy używany z przetwornika pomiarowego jest wzmacniany. Po wzmacnieniu może być on odfiltrowany, a następnie zarejestrowany lub wykorzystany do wyznaczenia odpowiednich parametrów nierówności powierzchni.

Stykowe pomiary mikronierówności powierzchni są stosowane powszechnie ze względu na swoje zalety. Najważniejsze z tych zalet to: duży zakres pomiarowy oraz wysoka, dostosowana do zakresu pomiarowego, czułość; dzięki temu możliwe są pomiary nierówności powierzchni o wysokościach od kilkuset mikrometrów do kilku nanometrów, możliwość niezależnego wyboru powiększeń poziomych i pionowych przy rejestracji profilu powierzchni, dogodny sposób przetwarzania sygnału pomiarowego, pozwalający wyznaczać wiele różnych parametrów mikronierówności powierzchni, zgodność z istniejącymi normami w zakresie opisu i pomiaru mikronierówności powierzchni.

Do realizacji stykowych pomiarów chropowatości i falistości powierzchni służą przyrządy nazywane, zgodnie z normą [102], profilografami i profilometrami. Profilografy stykowe pozwalają rejestrować profil powierzchni w postaci wykresu zwanego profilogramem, a profilometry pozwalają wyznaczać wartości odpowiednich parametrów mikronierówności powierzchni. Podział przyrządów stykowych, używanych do pomiarów mikrogeometrii powierzchni, na profilografy

profilometry stają się coraz mniej aktualny z uwagi na to, że częściej produkowane są przyrządy spełniające obie funkcje. Niekiedy przyrządy takie nazywane są profilografometrami [78], [80]. Wczesne przyrządy stykowe budowane są z wykorzystaniem najnowszych elementów techniki cyfrowej takich jak mikroprocesory, zintegrowane układy pamięci itp. [83]. Dzięki temu w zależności od potrzeb spełniają one funkcje profilometrów i profilografów stykowych, także umożliwiają współpracę z mikrokomputerem. W niniejszej pracy nazwą *profilometr stykowy* określany jest przyrząd, który może być użyty do pomiaru odpowiednich parametrów nierówności powierzchni na podstawie stykowego odwzorowania zarysu powierzchni jak również do rejestracji tego zarysu. Sformułowanie *profilograf stykowy* używane jest w pracy tylko wtedy gdy zachodzi potrzeba wyraźnego wyróżnienia rejestrującej funkcji przyrządu. Uproszczony schemat profilometru stykowego pokazano na rys.1.

Profilometry stykowe służą przede wszystkim do pomiaru chropowatości powierzchni, lecz niekiedy mogą być także przystosowane do pomiarów falistości powierzchni. Pomiar chropowatości powierzchni mogą być dokonywane za pomocą profilometrów stykowych względem linii przesłania wyznaczonej przez ślizgacz, przemieszczający się wraz z ostrzem odwzorowującym po powierzchni mierzonej, lub względem linii przesłania wyznaczonej przez dodatkową powierzchnię bazową. Zależy to od konstrukcji przyrządu stykowego. W pracy [79] wskazano, że przyrządy stykowe z dodatkową bazą, której rolę spełniają najczęściej płaskie powierzchnie wykonane ze szkła optycznego, pozwalają uzyskać więcej informacji o nierównościach badanej powierzchni, niż przyrządy z bazowaniem ślizgacza na powierzchni mierzonej.



rys.1. Uproszczony schemat funkcjonalny profilometru stykowego; 1 - ostrze odwzorowujące, 2 - ślizgacz, 3 - przetwornik pomiarowy, 4 - układ napędowy, 5 - wzmacniacz, 6 - filtry, 7 - układ wyznaczający wartości parametrów mikronierówności powierzchni, 8 - rejestrator, 9 - przedmiot mierzony, 10 - głowica pomiarowa, 11 - wskaźnik

Na rys.1 pokazano podstawowe zespoły funkcjonalne typowego przyrządu stykowego przeznaczonego do pomiarów mikrogeometrii powierzchni. Ostrze odwzorowujące 1 wraz ze ślizgaczem 2 oraz przetwornikiem pomiarowym 3 może przemieszczać się względem przedmiotu mierzonego 9 dzięki układowi napędowemu 4. Sygnał pomiarowy z przetwornika 3, proporcjonalny do położenia ostrza odwzorowującego 1 względem ślizgacza 2, wzmacniany jest za pomocą wzmacniacza 5. Zmocniony sygnał pomiarowy może zostać poddany filtracji w odpowiednim filtrze 6. Filtracja sygnału pomiarowego ma na celu eliminację nisko- lub wysokoczęstotliwościowych składowych mierzonego zarysu. Odfiltrowany lub nieodfiltrowany sygnał pomiarowy jest rejestrowany za pomocą rejestratora 8 lub przekazywany na wejście układu, wyznaczającego wartości parametrów mikronierówności powierzchni.

Podstawowe, najczęściej stosowane parametry chropowatości powierzchni określono w normach [106], [110]. Inne parametry oraz charakterystyki funkcyjne chropowatości powierzchni, stosowane w produkcji i badaniach naukowych, opisano między innymi w pracach [17], [55], [56], [81], [85].

Niektóre profilometry stykowe pozwalają zmierzyć tylko jeden parametr chropowatości powierzchni, natomiast inne, jak np. Talysurf 6 przedstawiony w pracach [62], [78], mogą zmierzyć ponad 20 różnych parametrów nierówności powierzchni. Zależy to od konstrukcji profilometru. Nowoczesne profilometry wykorzystujące w swojej konstrukcji układy mikroprocesorowe pozwalają zmierzyć wiele parametrów nierówności powierzchni w wyniku jednokrotnego odwzorowania profilu. Osiągają się to dzięki przetworzeniu analogowego sygnału pomiarowego na sygnał cyfrowy, który po zapamiętaniu jest przetwarzany za pomocą mikrokomputera, kolejno według odpowiednich algorytmów. Szczegółowy opis działania profilometrów stykowych różnych konstrukcji zawarto między innymi w pracach [15], [30], [56], [74], [81], [83].

### 3.2. Podstawowe czynniki decydujące o dokładności profilometrów stykowych

Dokładność profilometrów stykowych zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to:

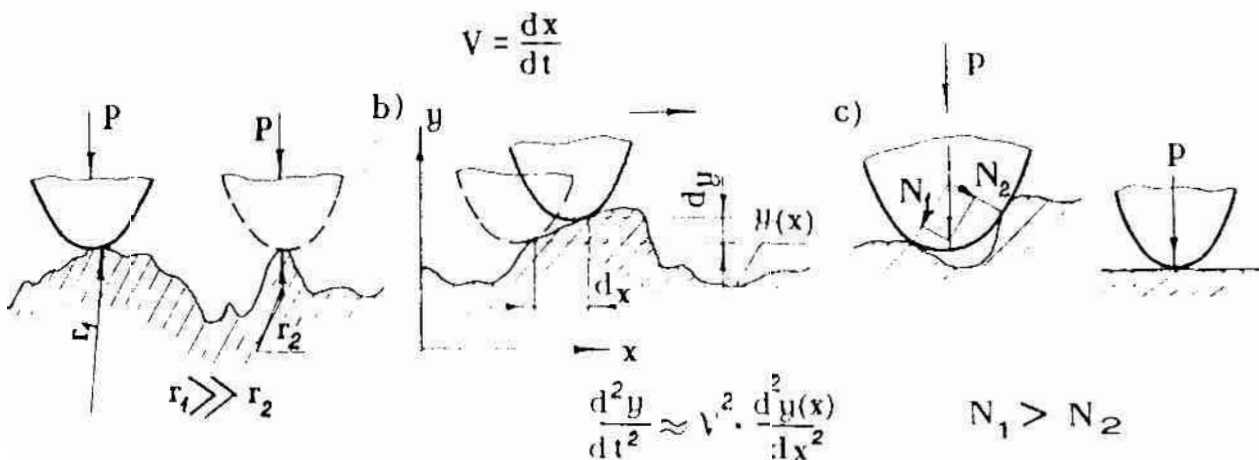
- siła nacisku wierzchołka ostrza na powierzchnię mierzonego obiektu,
- prędkość przesuwu ostrza względem powierzchni,
- promień wierzchołka ostrza odwzorowującego.

Ponadto dokładność tych przyrządów zależy od właściwości dynamicznych przetwornika pomiarowego, wzmacniacza, zastosowanych filtrów oraz od szumów generowanych w układzie elektrycznym przyrządu. Na duże

Szenie wymienionych czynników wskazują liczne prace, prowadzone w  
ju i za granicą [41], [46], [56], [75], [81], [84].

### 1.1. Nacisk ostrza odwzorowującego

Odwzorowanie i pomiar nierówności powierzchni metodą stykową mo-  
mieć miejsce wtedy, gdy nacisk pomiarowy zapewni ciągły styk ost-  
odwzorowującego z powierzchnią mierzoną. Odwzorowanie to będzie  
bardziej dokładne, im mniejszy będzie promień wierzchołka ostrza  
odwzorowującego. Jednakże zmniejszanie promienia ostrza odwzorowują-  
go, przy stałej wartości nacisku pomiarowego, prowadzi do wzrostu  
ciężarów przypadających na jednostkę powierzchni. Może to powodować  
ost odkształceń sprężystych, a także odkształcenia plastyczne po-  
równi badanej. Odkształcenia te mogą być inne w każdym punkcie  
równego zarysu. Wynika to z trzech zasadniczych powodów. Po pier-  
te, naciski przypadające na jednostkę powierzchni przedmiotu mierzo-  
go i ostrza odwzorowującego zależą od lokalnych promieni krzywizny  
równości powierzchni. Po drugie, w czasie ruchu ostrza stykającego  
z powierzchnią chropowatą ostrze to doznaje chwilowych przyspie-  
żeń powodujących zmiany siły nacisku ostrza. Przyspieszenia te, pro-  
stopadłe do kierunku ruchu ostrza, proporcjonalne są do kwadratu  
prędkości ostrza i drugiej pochodnej zarysu powierzchni. Po trzecie,  
wartość siły składowej nacisku ostrza, prostopadłej do powierzchni w  
tym punkcie, zależy od ilości punktów styku ostrza odwzorowującego  
z powierzchnią oraz od lokalnych kątów pochylenia zarysu powierzchni.  
Wszystkie trzy przyczyny zmienności odkształceń powierzchni w proce-  
sie pomiaru nierówności ilustruje rys. 2.



1.2. Przyczyny zmienności odkształceń powierzchni spowodowanych  
naciskiem ostrza odwzorowującego; a) - różnica lokalnych promieni  
krzywizny, b) - chwilowe przyspieszenia ostrza, c) - zmienność  
składowej normalnej siły nacisku ostrza

Korzystając z zasady podobieństwa zjawisk w pracy [15] podano wzory Hertza pozwalające oszacować wartości odkształceń sprężystych ostrza stykającego się z płaszczyzną, z powierzchnią wypukłą i powierzchnią wklęsłą. Wzory te zestawiono w tabelicy 1. W pracy [15] cytowano także wyniki badań doświadczalnych wskazujące, że dla materiału powierzchni mierzonej o mikrotwardości rzędu  $10^{10}$  Pa i nacisku równym  $10^{-3}$  N odkształcenia plastyczne powierzchni są rzędu  $10^{-2}$ .

W pracy [80] przedstawiono wyniki badań wpływu nacisku pomiarowego profilometru na dokładność pomiarów chropowatości powierzchni. stwierdzono tam, że ustalenie dopuszczalnych nacisków ostrza odwzorowującego na powierzchnię mierzoną z wykorzystaniem zasady podobieństwa zjawisk i wzoru Hertza jest niesłuszne. Zbadano 9 głowic profilometrów stykowych *Talysurf 3* i *Talysurf 4* o naciskach pomiarowych

Tabela 1. Wzory Hertza do obliczania odkształceń sprężystych spowodowanych naciskiem ostrza odwzorowującego

Lp.	Kształt powierzchni stykającej się z ostrzem odwzorowującym	Odkształcenie sprężyste $\omega_c$ (zbliżenie ostrza i powierzchni wzdłuż linii nacisku)
1	płaski	$\omega_c = 1,55 \left[ \frac{P^2}{2E^2 r} \right]^{\frac{1}{3}}$
2	wypukły	$\omega_c = 1,55 \left[ \frac{P^2 (r_p + r)}{2E^2 r_p r} \right]^{\frac{1}{3}}$
3	wklęsły	$\omega_c = 1,55 \left[ \frac{P^2 (r_v + r)}{2E^2 r_v r} \right]^{\frac{1}{3}}$

$$E = \frac{2E_0 E_1}{E_0 + E_1}, \quad P - \text{siła nacisku ostrza odwzorowującego,}$$

$E$  - zredukowany moduł sprężystości,  $E_0$  - moduł sprężystości materiału ostrza,  $E_1$  - moduł sprężystości materiału powierzchni mierzonej,  $r$  - promień wierzchołka ostrza,  $r_p$  - promień krzywizny wzniesienia nierówności,  $r_v$  - promień krzywizny wgłębienia

0,64 mN do 2,5 mN. Zauważono, że na powierzchniach o chropowatości w zakresie od  $R_a = 2,5 \mu\text{m}$  do  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$  ostrze odwzorowujące pozwala rysy ciągłe, przy czym nie stwierdzono aby głębokość rys, zależna od  $0,1 \mu\text{m}$  do  $0,3 \mu\text{m}$ , zależała od twardości materiału przedmiotu mierzzonego. Na powierzchniach o chropowatości w zakresie od  $R_a = 0,16 \mu\text{m}$  do  $R_a = 0,032 \mu\text{m}$  obserwowano nieciągłe rysy pozostawione przez ostrze. Nie ustalono jednak przyczyn nieciągłości rys obserwowanych na powierzchniach o mniejszej chropowatości. Wydaje się, że powodem wystawiania nieciągłości rys mogła być zmienność nacisku ostrza w szczególnych punktach mierzonego zarysu.

Nacisk pomiarowy większości profilometrów stykowych zawiera się w zakresie od 0,01 mN do 20 mN. W pracy [74] zamieszczono wykresy pozwalające wyznaczyć najmniejszy dopuszczalny promień ostrza odwzorowującego w zależności od nacisku pomiarowego i twardości materiału przedmiotu mierzonego.

W pracy [55] dokonano analizy odkształceń sprężystych spowodowanych naciskami ostrza równymi 0,1 N i 0,01 N. Zakładano, że ostrze przy promieniu wierzchołka równym  $20 \mu\text{m}$  styka się z płaszczyzną. Różnica odkształceń dla powierzchni stalowej i aluminiowej wynosiła odpowiednio  $0,16 \mu\text{m}$  przy obciążeniu siłą 0,1 N i  $0,036 \mu\text{m}$  przy obciążeniu siłą 0,01 N.

Wpływ kształtu ostrza oraz tarcia między ostrzem odwzorowującym a powierzchnią mierzoną na dokładność pomiaru przeanalizowano w pracy [86]. Zaproponowano w niej zwiększenie sztywności ostrza przez zmianę mu kształtu pryzmatycznego, gdyż w badaniach doświadczalnych stwierdzono zalety takiego rozwiązania. Podczas badań zaobserwowano również wpływ siły tarcia na dokładność pomiarów.

W referacie [26] postulowano konieczność stosowania małych nacisków ostrza odwzorowującego podczas pomiarów replik z odwzorowanymi nierównościami powierzchni. Potwierdzają to także wyniki badań przedstawione w pracy [14]. Stwierdzono tam, że różnica wskazań profilografu stykowego przy pomiarze powierzchni metalowej i wykonanej z tworzywa sztucznego może osiągać 40% dla identycznego zarysu obu powierzchni. W pracy [14] przedstawiono także wyniki badań wpływu nacisku pomiarowego i prędkości przesuwu ostrza na dokładność odwzorowania profilu powierzchni. Nacisk ostrza odwzorowującego zmieniano w zakresie od 0,05 mN do 15 mN, zaś prędkość przesuwu ostrza była ustalana w zakresie od  $83 \mu\text{m/s}$  do  $1666 \mu\text{m/s}$ . Badania pozwoliły stwierdzić, że odwzorowanie profilu powierzchni jest tym wierniejsze im mniejszy jest nacisk ostrza oraz im mniejsza jest prędkość przesuwu ostrza względem powierzchni mierzonej.



W artykule [28] przedstawiono wyniki analizy procesu odwzorowania nierówności powierzchni. Zwrócono uwagę na to, że nacisk ostrza wzorowującego oraz parametry układu mechanicznego, na którym zamocowane jest ostrze, w znacznym stopniu wpływają na dokładność profilometrów stykowych. Wskazano, że błędy pomiarów mikronierówności powierzchni można zmniejszyć stosując odpowiednio niską prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego.

### 3.2. Prędkość przesuwu ostrza

Znaczenie prędkości przemieszczania ostrza odwzorowującego względem powierzchni mierzonej, jako czynnika decydującego o dokładności pomiarów mikronierówności powierzchni, można rozpatrywać w trzech aspektach. Po pierwsze, jak już o tym wspomniano, prędkość przesuwu ostrza ma wpływ na wartości przyspieszeń jakich doznaje ostrze podczas odwzorowywania nierówności powierzchni. Przyspieszenia, proporcjonalne do kwadratu prędkości przesuwu oraz drugiej pochodnej zarysu powierzchni, mogą powodować powstawanie sił odrywających ostrze od powierzchni lub sił wywołujących nadmierny nacisk ostrza na powierzchnię mierzoną. Po drugie znaczącą przyczyną powstawania błędów w pomiarach mikronierówności powierzchni mogą być chwilowe zmiany prędkości przesuwu ostrza. Niestabilność prędkości przesuwu ostrza powoduje zmiany powiększenia poziomego profilografu, a tym samym nieregularnie zarejestrowany wykres profilu powierzchni. W przypadku profilometrów niestabilność prędkości przesuwu ostrza powoduje nieawidłowe przetworzenie profilu powierzchni na napięcie zmienne w czasie. Konsekwencją tego są błędy wyznaczenia parametrów nierówności powierzchni, zwłaszcza parametrów horyzontalnych i parametrów charakteryzujących kąty pochyleń lub pochodną zarysu.

Niestabilność prędkości przesuwu ostrza była jednym z powodów eliminowania generacyjnych przetworników indukcyjnych, stosowanych w niektórych starszych konstrukcjach profilometrów stykowych i zastąpienia ich przetwornikami indukcyjnymi parametrycznymi [74]. W przetwornikach generacyjnych indukowany sygnał elektryczny proporcjonalny był do zmian położenia ostrza, a zatem silnie zależał od niestabilności prędkości jego przesuwu.

Prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego względem powierzchni mierzonej większości seryjnie produkowanych profilografów stykowych obejmuje wartości z przedziału od  $2,5 \mu\text{m/s}$  do  $1000 \mu\text{m/s}$ . W przypadku profilometrów wartości te są większe i zawierają się w przedziale od  $1 \text{ mm/s}$  do  $10 \text{ mm/s}$ .

Stabilność prędkości przesuwu ostrza ma istotne znaczenie przy etwarzaniu profilu na sygnał cyfrowy. Zwrócono na to uwagę między ymi w pracach [33], [34], [58]. W pracy [33] przedstawiono wyniki ań niestabilności prędkości przesuwu ostrza profilometrów typu 10 (prod. NRD) i mod. 201 (prod. ZSRR). W przypadku profilometru 10 maksymalny błąd względny prędkości przesuwu ostrza wynosił %, zaś w przypadku profilometru mod. 201 błąd ten był równy 5 %. W pracy [34] zaproponowano dyskretne przetwarzanie profilu ierzchni w funkcji drogi przebytej przez ostrze odwzorowujące. ym celu zastosowano układ fotoelektryczny przetwarzający drogę ebytą przez ostrze na impulsy sterujące przetwornikiem A/C, bkującym sygnał pomiarowy. W konstrukcji układu fotoelektrycznego orzystano linii kodowy umożliwiający próbkowanie z krokiem rów- i 10  $\mu\text{m}$ . Badania chropowatości powierzchni przedstawione w [58] wy- iano za pomocą profilometru *Talysurf 10* połączonego z układem cy- wej analizy sygnału. Prędkość przesuwu ostrza mierzono interfero- rem laserowym firmy *Hewlett-Packard*. W wyniku przeprowadzonych ań stwierdzono, że nierównomierność prędkości przesuwu ostrza ma czny wpływ na dokładność przetwarzania profilu na sygnał cyfrowy z na dokładność pomiaru parametrów chropowatości powierzchni naczanych za pomocą różniczkowania sygnału.

W pracy [46] przeanalizowano wpływ błędów powiększenia poziome- profilografów na błędy pomiarów niektórych charakterystyk chropo- ości powierzchni. Błąd powiększenia poziomego może być spowodowany anami prędkości przesuwu ostrza odwzorowującego. W wyniku analizy ierdzono, że błąd powiększenia poziomego nie wpływa na wartości ekiwane parametrów  $R_a$  i  $t_p$ . Analizowano także wpływ błędu powię- enia poziomego na wartości funkcji autokorelacji profilu powierz- i. Rozpatrywano funkcję autokorelacji o postaci:

$$R_y(\tau) = \frac{1}{\alpha - 1} (ae^{-\gamma|\tau|} - e^{-\alpha\gamma|\tau|}) \quad , \quad (2.1)$$

$\lambda$  spełniającego warunek:  $0 < \lambda < 0,89$  ,  
ie współczynniki  $\lambda$ ,  $\alpha$  i  $\gamma$  określone są równaniami:

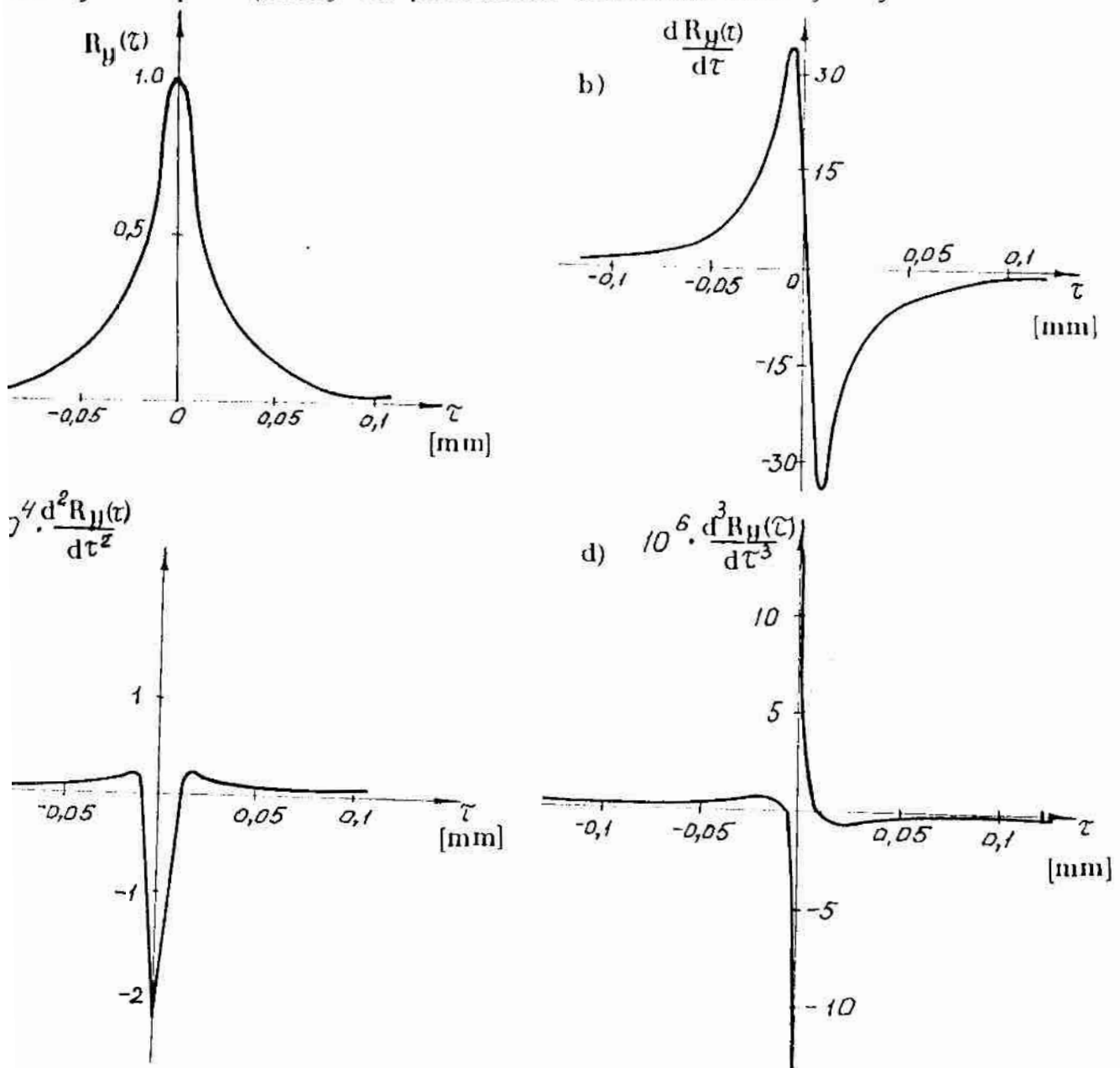
$$\lambda = \frac{n(0)}{m} \quad , \quad (2.2)$$

$$\alpha = \frac{4 - 3\lambda^2 + \sqrt{4 - 3\lambda^2 - 4\lambda^4}}{2\lambda^2} \quad , \quad (2.3)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{\sqrt{\alpha}} n(0) \quad , \quad (2.4)$$

W tym przypadku  $n(0)$  i  $m$  są odpowiednio liczbą przecięć profilu z linią odniesienia oraz liczbą wierzchołków, przypadających na jednostkę długości. Stwierdzono, że wartości funkcji autokorelacji profilu zależą chwilowych wartości powiększenia poziomego.

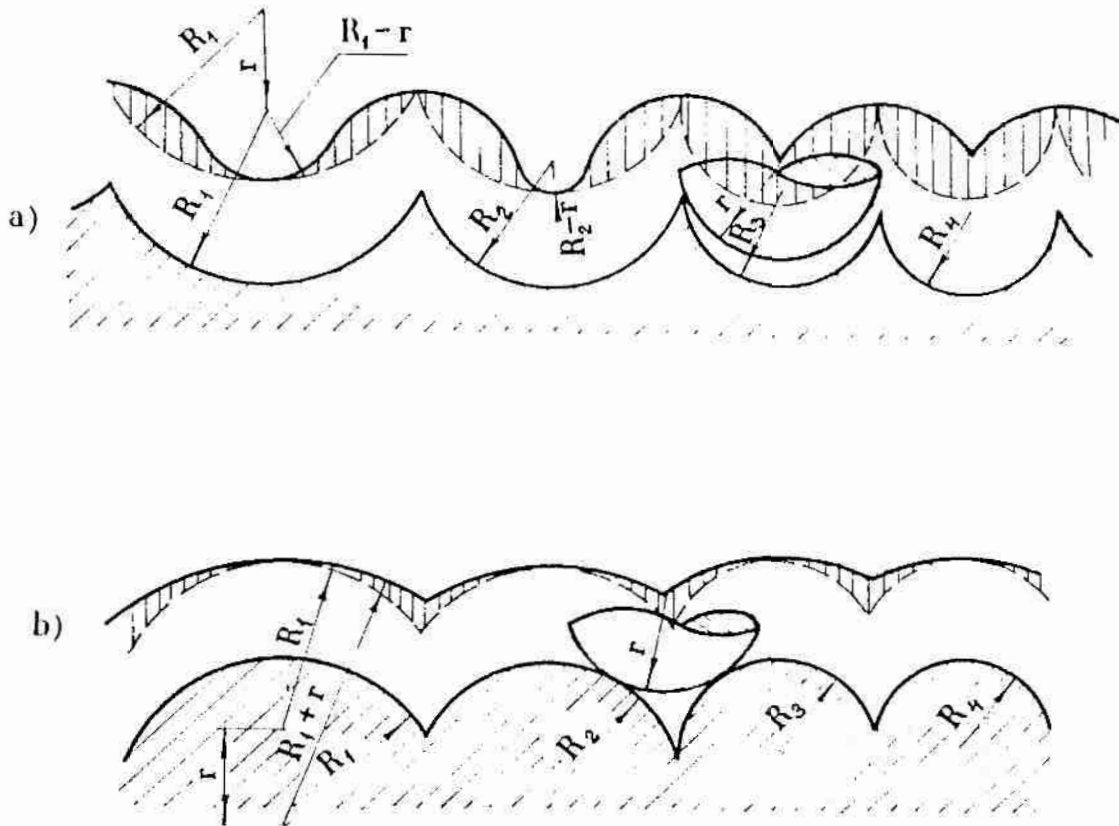
Przedstawiony w pracy [46] sposób analizy wpływu błędów powiększenia poziomego na dokładność pomiarów chropowatości powierzchni daje się poprawny. Rodzą się natomiast wątpliwości co do prawidłowości wyboru postaci funkcji autokorelacji. Zgodnie z [71] funkcja autokorelacji profilu powierzchni oraz jej kolejne pochodne powinny być ciągłe, gdyż w przeciwnym przypadku profil powierzchni jest nie-liczkalny. Funkcja autokorelacji dana równaniem (2.1) nie spełnia tego warunku, gdyż jej trzecia pochodna jest nieciągła. Ilustruje to rys.3 sporządzony na podstawie obliczeń numerycznych.



3. Wykres funkcji autokorelacji danej równaniem (2.1) oraz wykresy jej pochodnych; wykresy wykonano przyjmując  $n(0) = 50$  1/mm i 100 1/mm; a) - funkcja autokorelacji; b) - pierwsza pochodna; c) - druga pochodna; d) - trzecia pochodna

### 2.3. Promień wierzchołka ostrza

Kształt i wymiary wierzchołka ostrza odwzorowującego profilów stykowych mogą wpływać na dokładność odwzorowania zarysu oraz na dokładność pomiaru parametrów nierówności powierzchni. Od kształtu ostrza oraz od jego wymiarów zależą różnice między rzeczywistym i zaobserwowanym profilem powierzchni. Wynika to z geometrycznych zależności występujących przy stykowym odwzorowaniu profilu powierzchni. Na rys. 4 pokazano, przedstawione w pracy [74], przykładowe błędy powstające przy stykowym odwzorowaniu nierówności powierzchni ostrzem o promieniu wierzchołka równym  $r$ . Błędy te będą znaczne w przypadku, gdy odstęp między sąsiednimi wierzchołkami nierówności jest mniejszy od podwójnej wartości promienia wierzchołka ostrza odwzorowującego. Na ogół jednak wartość promienia wierzchołka ostrza jest znacznie mniejsza od wartości podziałki nierówności powierzchni, toteż błędy geometryczne odwzorowania są niewielkie. Mogą one wzrastać w miarę zużywania się wierzchołka ostrza odwzorowującego



rys. 4. Błędy odwzorowania wynikające z geometrii zarysu powierzchni ostrza odwzorowującego; a) - dla zarysu wklęsłego, b) - dla zarysu pukłego; wg [74]

Najczęściej wierzchołek ostrza odwzorowującego ma kształt stoż- lub ostrosłupa o podstawie kwadratu. Kąt wierzchołkowy ostrza wy- i na ogół  $\frac{\pi}{2}$  rad ( $90^\circ$ ) lub  $\frac{\pi}{3}$  rad ( $60^\circ$ ). Promień wierzchołka ostrza zorowującego zależy od przeznaczenia oraz konstrukcji przyrządu kowego i na ogół zawiera się w zakresie od  $0,1 \mu\text{m}$  do  $12,5 \mu\text{m}$ , y czym w większości seryjnie produkowanych przyrządów wynosi on 2  $\mu\text{m}$ .

Wyniki badań teoretycznych nad wpływem promienia zaokrąglenia rzczołka ostrza odwzorowującego na błąd pomiaru parametru  $R_\alpha$  edstawiono w pracy [75]. Stwierdzono, że w przypadku gdy zarys ówności powierzchni jest profilem losowym o normalnym rozkładzie dnych, to błąd pomiaru parametru  $R_\alpha$  zależy od promienia wierzchoł- ostrza oraz od postaci i parametrów funkcji autokorelacji zarysu ierzchni. W pracy [63] przedstawiono także wyniki badań nad wpły- promienia wierzchołka ostrza odwzorowującego na wskazania parame-  $R_\alpha$ . Badania teoretyczne przeprowadzono wykorzystując komputer. elowano proces pomiaru nierówności powierzchni ostrzami odwzorowu- ymi o promieniach od  $2,5 \mu\text{m}$  do  $2000 \mu\text{m}$ . Badania doświadczalne wy- ano na próbkach struganych, przeciąganych, toczonych i obrabia- h elektroerozyjnie. Wyniki badań wskazują, iż 100-krotny wzrost mienia wierzchołka ostrza może powodować wzrost wartości parame-  $R_\alpha$  o około 30%. Zależy to jednak od kształtu nierówności powie- hni wynikającego ze sposobu obróbki.

W pracy [91] przeanalizowano wpływ kształtu i promienia wierz- ła ostrza, oraz kąta wierzchołkowego, na dokładność wyznaczenia ylenia standardowego rzędnych zarysu powierzchni (parametr  $R_q$ ). elu zbadania efektu uśredniania nierówności powierzchni przez rze odwzorowujące dokonano numerycznego modelowania styku ostrza owierzchnią, wykorzystując trzelementowy łańcuch Markowa. W wy- u badań stwierdzono, że typowe ostrze o promieniu wierzchołka m powoduje zmniejszenie wskazań parametru  $R_q$  (i odpowiednio war- ci parametru  $R_\alpha$ ) o około 2 %. Dotyczy to powierzchni po obróbce łańcuchowej np. powierzchni szlifowanych, toczonych diamentem itp. ostrzy o promieniu  $10 \mu\text{m}$  zmniejszenie wskazań może sięgać od % do 15 % wartości rzeczywistej parametru  $R_q$ .

#### 3.4. Właściwości dynamiczne

Proces odwzorowania i pomiaru nierówności powierzchni, za po- ą profilometrów stykowych, polega na przetworzeniu zarysu powie- hni  $y = f(x)$  na analogowy lub cyfrowy sygnał elektryczny  $U(t)$ , enny w czasie. Sygnał  $U(t)$  może być zarejestrowany w postaci

ofilogramu, lub może być wykorzystany do wyznaczenia parametrów krownierówności powierzchni. Ponieważ sygnał ten jest zmienny w czasie, dokładność pomiaru i odwzorowania mikrownierówności powierzchni zależy od właściwości dynamicznych profilometrów stykowych.

Właściwości dynamiczne profilometrów stykowych są najczęściej szpatrywane w ujęciu częstotliwościowym. Ilościowo właściwości te, la narzędzi pomiarowych lub ich zespołów funkcjonalnych, mogą być kreślone za pomocą transmitancji widmowej [18], nazywanej niekiedy charakterystyką częstotliwościową [59]. Ponieważ charakterystyka częstotliwościowa jest funkcją zespoloną, na ogół wyraża się ją za omocą dwóch funkcji rzeczywistych - charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej oraz charakterystyki fazowo-częstotliwościowej. o charakteryzowania właściwości dynamicznych profilometrów stykowych wykorzystuje się najczęściej charakterystyki przenoszenia<sup>1)</sup>. oduł charakterystyki przenoszenia, dla danego parametru nierównoci powierzchni, określony jest stosunkiem wartości tego parametru a wyjściu i wejściu przyrządu w funkcji częstotliwości lub długo-ci fali. Moduł charakterystyki przenoszenia równy jest charakte- ystycie amplitudowo-częstotliwościowej w przypadku, gdy dla sygnału armonicznego wartość parametru nierówności powierzchni można wyra- ic iloczynem amplitudy i stałego współczynnika proporcjonalności.

Właściwości dynamiczne profilometrów stykowych zależą od wła- ciwości dynamicznych zespołów funkcjonalnych tych przyrządów, ta- ich na przykład jak przetwornik pomiarowy, wzmacniacz, filtr ele- tryczny, rejestrator. O właściwościach dynamicznych profilometrów tykowych często decyduje rodzaj i parametry konstrukcyjne prze- wornika pomiarowego. W pracy [42], wykorzystując układ równań óżniczkowych Lagrange'a, przeanalizowano wpływ dynamiki układu echanicznego przetwornika pomiarowego na dokładność pomiaru i od- zorowania nierówności powierzchni za pomocą przyrządów stykowych. nalizowano odkształcenia powierzchni, wywołane dynamiką układu rzetwornika, oraz błędy powstające na skutek braku styku ostrza dwzorowującego z powierzchnią. Również w pracy [89] wskazano na graniczenia stykowych pomiarów chropowatości powierzchni, spowo- owane konstrukcją mechaniczną przetwornika pomiarowego, a także odzajem zastosowanego przetwornika.

---

<sup>1)</sup> W normie [108] charakterystyki przenoszenia profilometrów tykowych wyrażane są w funkcji długości fali nierówności powie- zchni, a nie w funkcji częstotliwości. Sformułowanie "charaktery- tyki przenoszenia" zawarte w normie [108] odpowiada określeniu *transmission characteristics* stosowanemu w międzynarodowej nor- ie [105]. W normach byłego ZSRR, np w normie [98], używano okre- lenia "передаточные характеристики".

Na właściwości dynamiczne profilometrów stykowych, znaczny wpływ ma zastosowany filtr elektryczny. Na rys. 5 pokazano wykresy minimalnych wartości modułu charakterystyk przenoszenia profilometrów stykowych, określone w [105], dla filtrów o różnych wartościach granicznej długości fali  $\lambda_B$  ("cut-off"), zgodnie z równaniem:

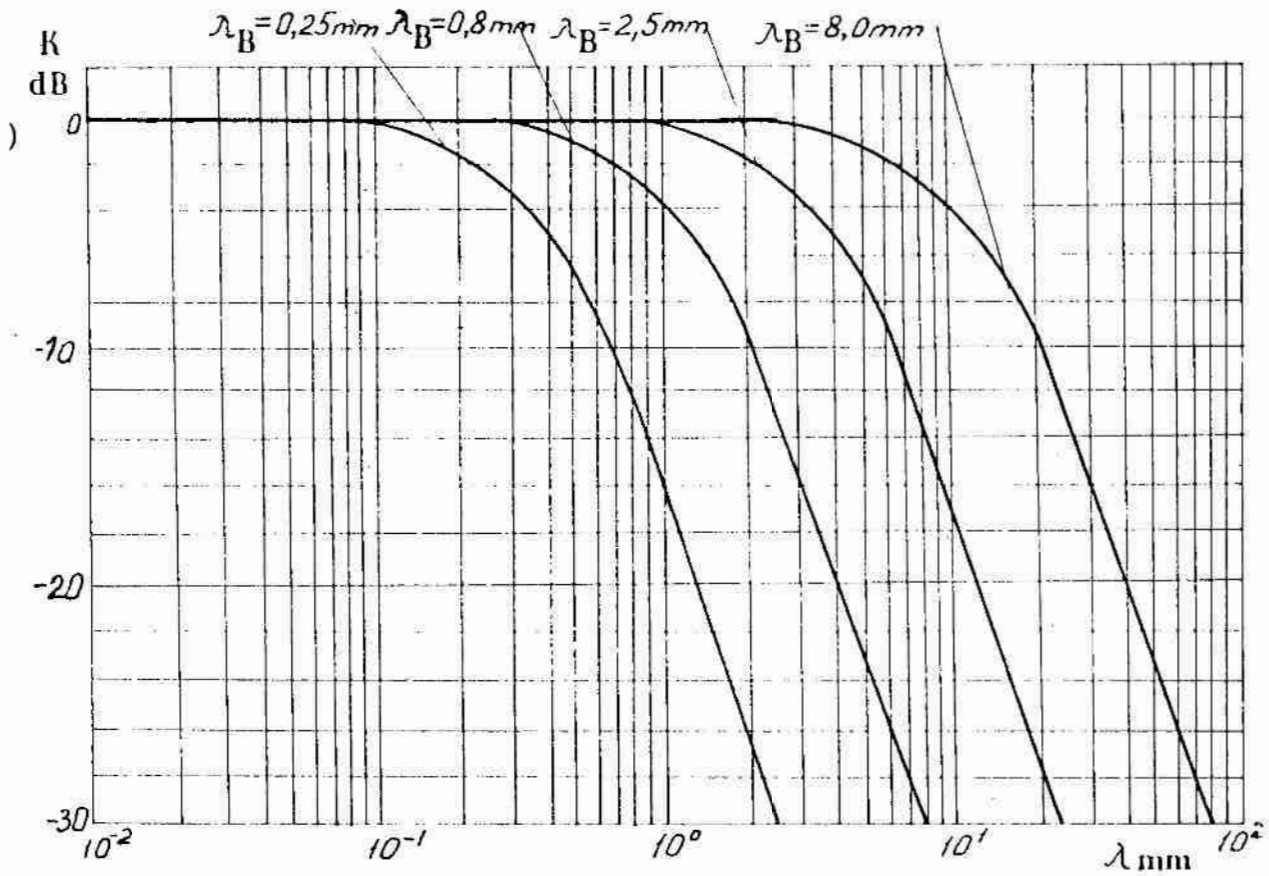
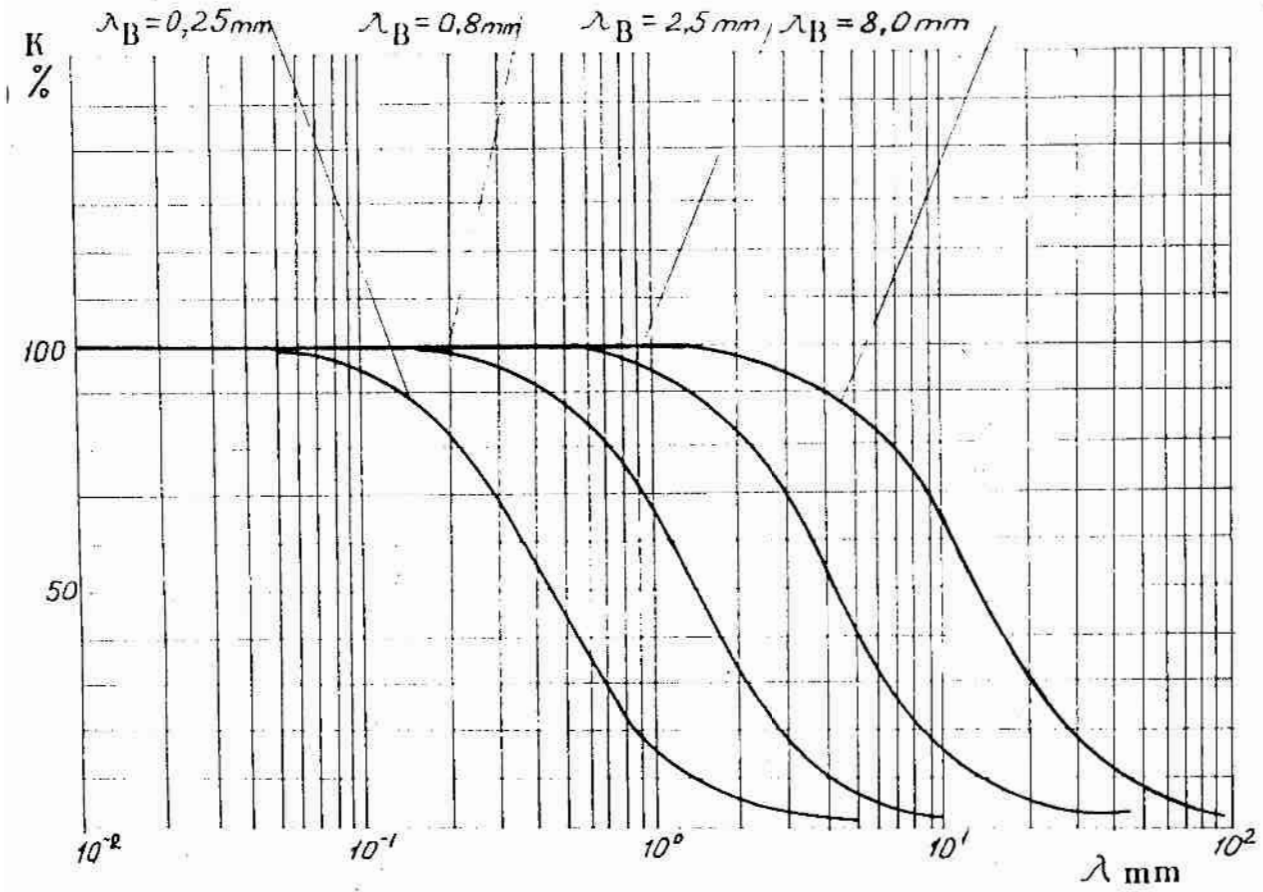
$$K = \left| \frac{1}{\left[ 1 - j 0,577 \frac{\lambda}{\lambda_B} \right]^2} \right|, \quad (2.5)$$

gdzie:  $K$  - współczynnik przenoszenia,  $\lambda$  - długość fali nierówności powierzchni,  $\lambda_B$  - graniczna długość fali,  $j$  - jednostka urojona.

Stosowanie filtrów elektrycznych w profilometrach stykowych, przeznaczonych do pomiarów chropowatości powierzchni, ma na celu tłumienie niskoczęstotliwościowych składowych harmonicznych profilu powierzchni, charakteryzujących falistość i błędy kształtu. Filtry te wykonane są najczęściej w postaci dwóch czwórników pojemnościowo-rezystancyjnych (o równych stałych czasowych), oddzielonych separatorem. Charakteryzują się one stosunkowo małym nachyleniem charakterystyki przenoszenia, wynoszącym maksymalnie 12 dB na oktawę, zaś przesunięcie fazowe, wprowadzone przez te filtry przy granicznej długości fali  $\lambda_B$ , wynosi  $\frac{\pi}{3}$  rad. W pracy [39] przedstawiono odstawowe właściwości takich filtrów, zamieszczono wykres odpowiedzi impulsowej filtru i dokonano analizy procesu filtracji. Na rys. 6 pokazano schemat tego filtru i jego charakterystykę fazowo-częstotliwościową.

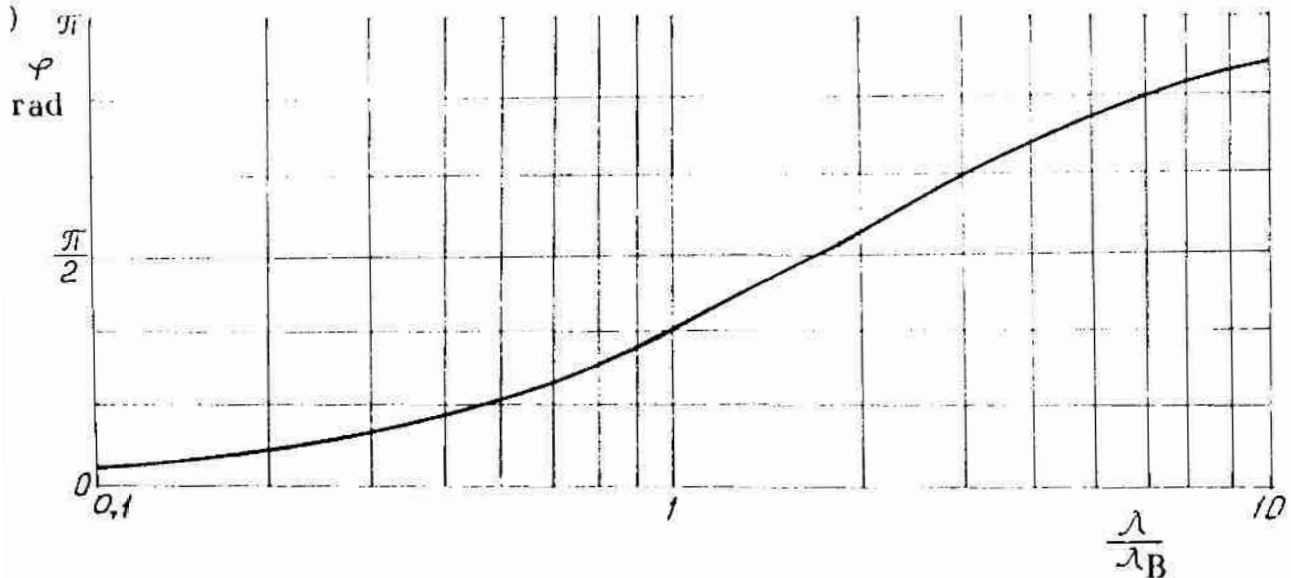
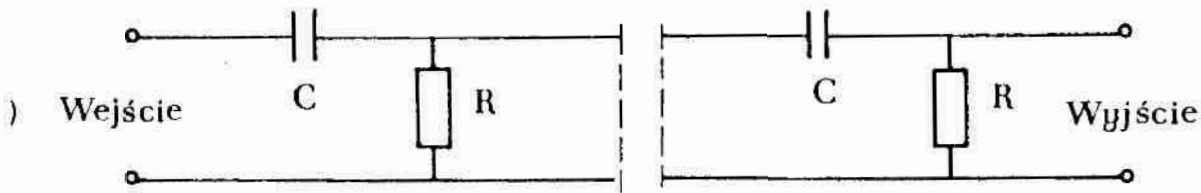
Wpływ filtrów elektrycznych, stosowanych w profilometrach stykowych, na dokładność pomiarów chropowatości powierzchni zbadano łącznie z innymi w pracach [43], [44]. Stwierdzono tam, że przyczyną powstawania błędów pomiarów jest różnica w sposobach wyznaczania linii średniej wg metody najmniejszych kwadratów i za pomocą stosowanych filtrów CR. Autorzy, w celu przeanalizowania tych błędów, pracowali i zbadali modele matematyczne obu sposobów wyznaczania linii średniej. Wyniki uzyskane dla profili okresowych i losowych porównano z wynikami badań doświadczalnych. Różnice między wynikami odwołania i wynikami badań doświadczalnych nie przekraczały 5 %.

Stosując cyfrowe modele matematyczne w pracy [8], przedstawiono wpływ charakterystyki fazowej filtru na dokładność pomiarów chropowatości powierzchni okresowych i losowych. Stwierdzono, że niezerowa charakterystyka fazowa filtru ma znaczny wpływ na te parametry chropowatości powierzchni, które zależą od wysokości wzniesień i głębokości wgłębień profilu powierzchni (np.  $R_z$ ). W pracy [8] wskazano na wady filtrów z korekcją fazy.



ys. 5. Charakterystyki przenoszenia profilometrów stykowych;  
a) - współczynnik przenoszenia wyrażony w %, b) - współczynnik  
przenoszenia wyrażony w decybelach; wg [105]





s. 6. Schemat dwuczłonowego filtra CR stosowanego w profilometrach stykowych i jego charakterystyka fazowo-częstotliwościowa; - schemat filtra, b) - charakterystyka fazowo-częstotliwościowa

Zalety filtrów z korekcją fazy podkreślono już wcześniej [90], co jest stwierdzono, że są one kosztowne, gdyż wymagają stosowania komponentów. Szybki rozwój techniki mikroprocesorowej spowodował jednak wzrost zainteresowania filtrami z korekcją fazy (filtr taki zastosowano w profilometrze *Talysurf 6*), oraz innymi rodzajami filtrów cyfrowych [64]. Zainteresowanie to rośnie zwłaszcza, że nowoczesne profilometry stykowe wyposażone są w przetworniki A/C oraz odpowiednie układy mikroprocesorowe. W profilometrach tych istnieje także możliwość odfiltrowania wysokoczęstotliwościowych składowych sygnału mierzonego, spowodowanych zakłóceniami. Filtrację taką postulowano w wielu pracach (np [9], [67], [90]). Porównania charakterystyk filtrów analogowych i cyfrowych dokonano między innymi w pracach [11] i [56].

Wpływ charakterystyki przenoszenia profilometrów stykowych na dokładność pomiaru parametrów horyzontalnych profilu mikronierówności powierzchni analizowanej w pracach [5], [6]. W wyniku analizy stwierdzono, że jeżeli górna granica długości fal mierzonego profilu powierzchni jest wyższa niż  $0,2 \lambda_B$ , to na błąd pomiaru parametrów  $t_p$ ,  $S$  i  $S_m$  (definiowanych wg [97], [106] i [111]) znaczny wpływ wywiera błąd charakterystyki fazowo-częstotliwościowej profilometru.

## 2.5. Inne czynniki

Oprócz wyżej opisanych czynników, na dokładność profilometrów stykowych wywierają wpływ także inne cechy tych przyrządów. Można z nich przede wszystkim zaliczyć:

kształt, wymiary i stan powierzchni ślizgacza,  
usytuowanie ślizgacza względem ostrza odwzorowującego,  
nieliniowość charakterystyki statycznej przyrządu,  
długość odcinka elementarnego i długość odcinka pomiarowego,  
krok dyskretyzacji (w przyrządach z analogowo-cyfrowym przetwarzaniem sygnału pomiarowego).

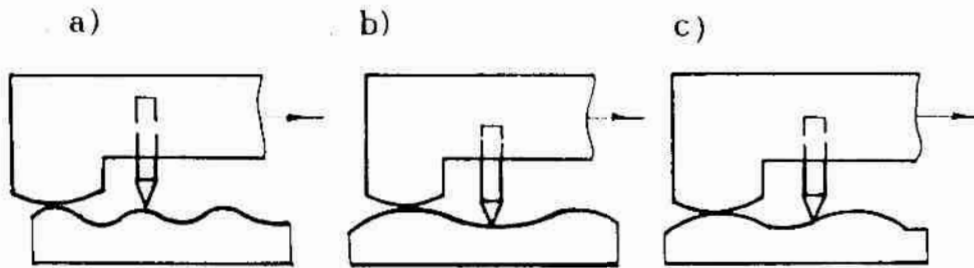
Dokładność pomiarów profilometrami wpływają także warunki pracy.

Ślizgacze stosowane w profilometrach stykowych spełniają rolę mechanicznego filtra, za pomocą którego eliminowane są niskoczęstotliwościowe składowe harmoniczne profilu powierzchni. Od parametrów geometrycznych ślizgacza, zwłaszcza od promienia jego wierzchołka, zależy dokładność odwzorowania i pomiaru chropowatości powierzchni. W pracy [68] podano, że promień wierzchołka ślizgacza powinien spełniać warunek:

$$\rho \geq \frac{100 \lambda^2}{8\rho_d R_{max}} \quad (2.6)$$

gdzie:  $\rho$  - promień wierzchołka ślizgacza,  $\lambda$  - długość fali nierówności powierzchni,  $\rho_d$  - największy dopuszczalny błąd odwzorowania profilu wyrażony w procentach,  $R_{max}$  - największa wysokość chropowatości. Warunek ten dotyczy profilu okresowego o kształcie łuku okręgu, lecz może być także zastosowany do profili sinusoidalnych i płókształtnych. W normach [105] i [108] wymaga się, aby promień wierzchołka ślizgacza był nie mniejszy niż 50-krotna wartość granicznej długości fali  $\lambda_B$ . Aneks B, do normy [107], zawiera charakterystykę błędów pomiarów, spowodowanych stosowaniem ślizgacza, podczas pomiarów przyrządami stykowymi wzorców kontrolnych z zarysami okresowymi.

Z punktu widzenia dokładności pomiaru ważne jest też położenie ślizgacza względem ostrza odwzorowującego. Oprócz promienia wierzchołka ślizgacza, o błędzie odwzorowania profilu wprowadzanym przez ślizgacz decyduje odległość między ślizgaczem i ostrzem odwzorującym oraz długość fali nierówności powierzchni. Ilustruje to rys.7, zaczerpnięty z pracy [68]. W artykule [13] przedstawiono wyniki badań wpływu odległości między ostrzem odwzorującym i ślizgaczem na błąd pomiaru chropowatości powierzchni. Stwierdzono, że maksymalny błąd wystąpi wtedy, gdy odległość ostrza od ślizgacza jest iloczynem promienia wierzchołka ostrza i połowy długości fali nierówności powierzchni.



rys. 7. Odzworowanie profili powierzchni o różnych długościach fali i pomocą przyrządu stykowego wyposażonego w ślizgacz; a) - odległość między ostrzem i ślizgaczem jest równa długości fali (zgodnie z fazą ślizgacza i ostrza) - odzworowanie minimalne, b) - odległość między ostrzem i ślizgaczem jest równa połowie długości fali (przeciwne fazy ślizgacza i ostrza) - odzworowanie maksymalne, c) - odległość między ostrzem i ślizgaczem zawarta jest między połową długości i całkowitą długością fali (pośrednia wartość różnicy faz ślizgacza i ostrza) - odzworowanie prawidłowe; wg [68]

W pracy [24] przedstawiono wyniki badań wpływu ślizgacza na błąd pomiaru wybranych parametrów chropowatości powierzchni o zarysie losowym. Z badań tych wynika, że wzrost promienia ślizgacza powoduje zmniejszenie dokładności pomiaru wysokościowych parametrów profilu powierzchni. Zauważono także, iż wpływ ślizgacza na dokładność pomiaru ujawnia się wyraźniej podczas pomiarów powierzchni o strukturze izotropowej. Nie stwierdzono natomiast wyraźnego wpływu odległości między ostrzem odwzorowującym i ślizgaczem na dokładność pomiaru chropowatości. Ponadto badania te wykazały, że filtr elektryczny stosowany w przyrządach stykowych zmniejsza wpływ ślizgacza na dokładność pomiaru parametrów chropowatości powierzchni.

Wpływ nieliniowości charakterystyki statycznej przyrządów stykowych na dokładność pomiaru funkcji autokorelacji, gęstości widmowej mocy profilu oraz na wartość parametru  $R_\alpha$ , przeanalizowano w artykule [45]. Analiza wykazała, że wartości błędów pomiarów funkcji autokorelacji, gęstości widmowej mocy profilu i parametru  $R_\alpha$ , które spowodowane zostały nieliniowym przetwarzaniem amplitudy profilu powierzchni, są tego samego rzędu co wartości błędów wzmocnienia i powiększenia pionowego.

Wpływ długości odcinka pomiarowego na dokładność pomiarów parametrów  $R_\alpha$ ,  $R_{max}$  i  $t_p$  zbadano w pracach [57] i [70]. Badania przeprowadzono dla zarysów losowych o normalnym rozkładzie rzędnych. W wyniku badań podano rekomendacje dotyczące wyboru długości odcinka pomiarowego, w zależności od klasy chropowatości powierzchni, dopuszczalnej wartości błędu pomiaru, długości odcinka elementarnego i postaci funkcji autokorelacji zarysu.

Dokładność wyznaczania parametru  $R_\alpha$ , w zależności od długości odcinka elementarnego i długości odcinka pomiarowego, przeanalizowano między innymi w pracy [38]. Wskazano na konieczność doboru ostatecznie długich odcinków pomiarowych oraz postulowano ściśle normalizowanie wartości obu odcinków dla ustalonych dopuszczalnych wartości błędów pomiaru.

Przyrządy stykowe, w których profil powierzchni jest przetwarzany na sygnał cyfrowy, mogą powodować błędy pomiaru powstające na skutek niewłaściwego doboru kroku dyskretyzacji. Zagadnienie to omówiono w pracy [40]. Podano tam metodykę doboru kroku dyskretyzacji oraz długości odcinka pomiarowego dla dyskretnych pomiarów parametrów  $R_\alpha$  i  $t_p$ . Problem właściwego doboru kroku dyskretyzacji omówiono także w pracach [7] i [93] stwierdzając, że krok dyskretyzacji, podczas przetwarzania zarysu powierzchni, należy dobrać kierując się wartością częstotliwości granicznej tego zarysu, oraz wartością promienia wierzchołka ostrza odwzorowującego. Wyniki badań doświadczalnych przytoczone w [7] wskazują, że zmiana kroku dyskretyzacji z wartości równej  $1,5 \mu\text{m}$  na  $6 \mu\text{m}$  powoduje nieznaczne zmniejszenie wartości parametru  $R_\alpha$  powierzchni szlifowanej. Natomiast wartość parametru  $\Delta\alpha$ , charakteryzującego średnie arytmetyczne pochylenie profilu chropowatości powierzchni, silnie zależy od kroku dyskretyzacji. Zmiana kroku dyskretyzacji z  $1,5 \mu\text{m}$  na  $6 \mu\text{m}$  powodowała zmniejszenie wartości parametru  $\Delta\alpha$  o około 50 %.

O błędach pomiaru chropowatości powierzchni przyrządami stykowymi decydują także warunki pracy. Przykładowo można tu wymienić warunki zasilania przyrządu oraz warunki otoczenia, takie np. jak: temperatura, wibracje itp. Wskazano na to między innymi w pracach [89], [88], [89]. Wpływ warunków pracy szczególnie silnie przejawia się podczas pomiarów chropowatości przyrządami o dużych wartościach powiększeń pionowych. Wibracje i deformacje cieplne elementów przyrządów stykowych stanowią najważniejsze ograniczenia w uzyskaniu najwyższych dokładności pomiaru, zwłaszcza przy powiększeniach pionowych przekraczających wartość  $10^5$ . Również szумы termiczne, w obwodach rezystywnych przyrządów, są przeszkodą w uzyskaniu wyższych czułości. W pracy [88] oszacowano wartości tych szumów korzystając z równania:

$$\bar{i}^2 = \frac{4k T \Delta f}{R} \quad (2.7)$$

gdzie:  $\bar{i}$  - wartość skuteczna prądu wywołana szumami cieplnymi,  $k$  - stała Boltzmana,  $T$  - temperatura bezwzględna,  $\Delta f$  - pasmo częstotliwości, w którym określany jest szum,  $R$  - rezystancja obwodu.

ła typowego przetwornika indukcyjnego wartość skuteczna prądu, wywołanego szumami cieplnymi, jest rzędu 0,05 nA. Jak wynika z pracy [38], dla przyrządów stykowych o najwyższej czułości próg pobudliwości wynosi 0,5 nm, przy czym szumy termiczne mogą w znaczący sposób wpływać na wynik pomiaru.

W normie [96] ustalono warunki otoczenia, w których powinny być dokonywane pomiary chropowatości przyrządami stykowymi. Temperatura powietrza powinna być zawarta w zakresie od 10°C do 35°C, zaś zmiany temperatury w ciągu godziny nie powinny przekraczać 0,5°C lub 2°C, w zależności od typu przyrządu. Wilgotność względna powietrza powinna zawierać się od 45 % do 80%.

### 3. Wymagania stawiane profilografom i profilometrom stykowym

Normalizacja wymagań stawianych profilografom i profilometrom stykowym, oraz konieczność ich okresowego sprawdzania wynika z dążenia do zapewnienia jednolitości, odtwarzalności i wysokiej dokładności pomiarów chropowatości powierzchni. Podstawowe wymagania stawiane profilografom stykowym dotyczą:

- ) wartości nominalnych oraz odchyłek granicznych promienia wierzchołka ostrza odwzorowującego;
- ) wartości nominalnych i odchyłek granicznych kąta ostrza odwzorowującego;
- ) nacisku wywieranego przez ślizgacz czujnika na powierzchnię mierzoną;
- ) nacisku statycznego ostrza odwzorowującego na powierzchnię mierzoną oraz zmienności tego nacisku;
- ) chropowatości powierzchni ślizgaczy czujnika;
- ) wartości nominalnych i granicznych dopuszczalnych błędów względnych powiększeń pionowych;
- ) wartości nominalnych i granicznych błędów względnych powiększeń poziomych.

Wymagania te określono w normie międzynarodowej [104], oraz w krajowej normie [109]. Opis tych wymagań, dokonany na podstawie normy [109], zamieszczono w pracy [51].

Wymagania stawiane profilometrom stykowym zostały zawarte w międzynarodowej normie [105] oraz w krajowej normie [108]. Przedstawiono je, na podstawie normy [108], również w pracy [51]. Część tych wymagań jest identyczna z wymaganiami stawianymi profilografom stykowym. Odnosi się to do cech technicznych i metrologicznych wymienionych wyżej w punktach od a) do e). Ponadto wymagania te dotyczą:

- wartości promienia wierzchołka ślizgacza  $\rho$ ,
  - charakterystyk przenoszenia w zakresie granicznych długości fal  $\lambda_B$ ,
  - granicznych dopuszczalnych współczynników przenoszenia  $K_{min}$  i  $K_{max}$ ,
  - długości odcinka pomiarowego profilometru  $L_c$ ,
  - granicznego dopuszczalnego błędu adjustacji profilometru  $\delta$ .
- Graniczny dopuszczalny błąd adjustacji obejmuje błędy systematyczne i przypadkowe. Określa on dopuszczalne błędy pomiarów profilometrem.

#### 3.4. Sposoby sprawdzania wybranych właściwości metrologicznych profilografów i profilometrów stykowych

Podczas użytkowania profilografów i profilometrów stykowych mogą one ulegać rozregulowaniu i zużyciu, co powoduje zmiany ich właściwości technicznych i metrologicznych. Dążenie do zapewnienia wysokiej dokładności i odtwarzalności pomiarów chropowatości powierzchni stwarza potrzebę sprawdzania tych właściwości nie tylko w procesie produkcji przyrządów stykowych, ale także okresowo, podczas ich eksploatacji. W tym celu konieczne jest dokonywanie sprawdzeń okresowych, mających na celu stwierdzenie zgodności cech technicznych i metrologicznych przyrządów stykowych z wymaganiami. Wymagania te, dotyczące stanu, wykonania oraz dokładności profilografów i profilometrów stykowych, ustalone są w odpowiednich normach omówionych w poprzednim podrozdziale.

W Polsce przy sprawdzaniu profilografów i profilometrów stykowych obowiązują instrukcje [100], [101] opracowane przez PKNMIJ. W instrukcjach tych wykorzystano wcześniejsze doświadczenia PKNMIJ, zawarte między innymi w pracy [76]. Obejmują one szczegółowy opis sposobu postępowania przy sprawdzaniu profilografów i profilometrów stykowych. Podobne akty normatywne, dotyczące sprawdzania przyrządów stykowych, obowiązują w innych krajach. Przykładem tego są normy [98], [99] opracowane w byłym ZSRR.

Przy sprawdzaniu okresowym przyrządów stykowych duże znaczenie ma ocena następujących właściwości metrologicznych tych przyrządów:

- błąd względny powiększenia pionowego profilografu,
- błąd względny powiększenia poziomego profilografu,
- błąd wskazań profilometru,
- charakterystyka przenoszenia profilometru.

W dalszej części niniejszego podrozdziału zostaną przedstawione sposoby oceny wyżej wymienionych właściwości metrologicznych profilografów i profilometrów stykowych.

#### 4.1. Sposoby oceny błędu względnego powiększenia pionowego profilografów

Zgodnie z instrukcją [100], błąd względny powiększenia pionowego profilografu, wyrażony w procentach, określony jest równaniem:

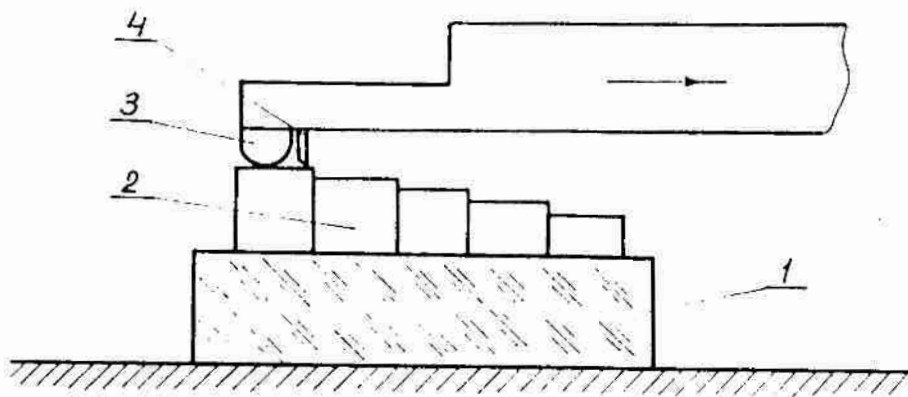
$$\delta_v = \frac{H_{sr} - H_w}{H_w} 100 \% \quad (2.8)$$

czyli

$$H_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^3 H_i \cdot 1000}{3 V_{v \text{ nom}}} \quad (2.9)$$

gdzie:  $\delta_v$  - błąd względny powiększenia pionowego profilografu;  $H_{sr}$  - średnia wartość głębokości nierówności jednokreskowego wzorca kontrolnego, wartość parametru  $R_{max}$  wzorca wielokreskowego lub wysokość schodka zmierzona z profilogramu, wyrażona w  $\mu\text{m}$ ;  $H_w$  - rzeczywista wartość głębokości nierówności jednokreskowego wzorca kontrolnego, wartość parametru  $R_{max}$  wzorca wielokreskowego, lub wysokość schodka wg świadectwa uwierzytelnienia, wyrażona w  $\mu\text{m}$ ;  $H_i$  - różnica w położeniu linii profilogramu, odpowiadająca głębokości nierówności wzorca jednokreskowego, wartości parametru  $R_{max}$  wzorca wielokreskowego, lub wysokości schodka, wyrażona w mm;  $V_{v \text{ nom}}$  - nominalna wartość zastosowanego powiększenia pionowego.

Błąd powiększenia pionowego profilografu może być wyznaczony a pomocą kontrolnych wzorców jednokreskowych, wielokreskowych lub wzorców schodkowych utworzonych z płytek wzorcowych, z usuniętymi krawędziami, przywartych do płaskiej płytki interferencyjnej tak jak okazuje to rys. 8.

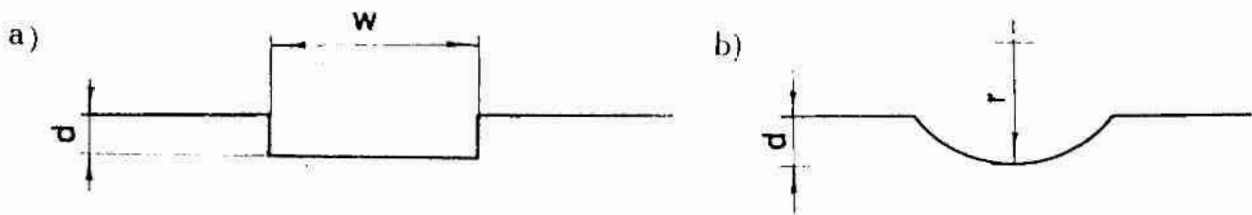


rys. 8. Wzorzec schodkowy do sprawdzania powiększeń pionowych profilografów stykowych; 1 - płaska płytka interferencyjna, 2 - płytki wzorcowe, 3 - ślizgacz, 4 - ostrze odwzorowujące profilografu

Wzorce kontrolne powinny spełniać warunki stawiane etalonom kontrolnym odpowiedniego rzędu, wg układu sprawdzeń narzędzi do pomiaru chropowatości powierzchni [112]. Dla etalonów kontrolnych II rzędu, graniczne błędy dokładności nie powinny przekraczać  $\pm(3 + 5) \%$  w przypadku wzorców jednokreskowych i  $\pm 5 \%$  w przypadku wzorców wielokreskowych. Norma [107] przewiduje dwa rodzaje wzorców jednokreskowych przeznaczonych do sprawdzania powiększeń pionowych profilografów stykowych - wzorce typu A1 i wzorce typu A2. Na rys.9 pokazano zarysy obu rodzajów wzorców, zaś w tabelicy 2 podano nominalne wartości wymiarów, oraz dopuszczalne odchyłki graniczne. Wzorce typu A1 opisano między innymi w pracach [48], [53], natomiast wzorce typu A2, wykonane w Physikalisch-Technische Bundesanstalt, przedstawiono w pracach [11] i [20]. Rolę kontrolnych wzorców wielokreskowych mogą spełniać wzorce typu C określone w normie [107] i opisane szerzej w p.2.4.3 niniejszego rozdziału.

Tablica 2. Wartości nominalne i odchyłki graniczne wzorców typu A1 i A2; wg [107]

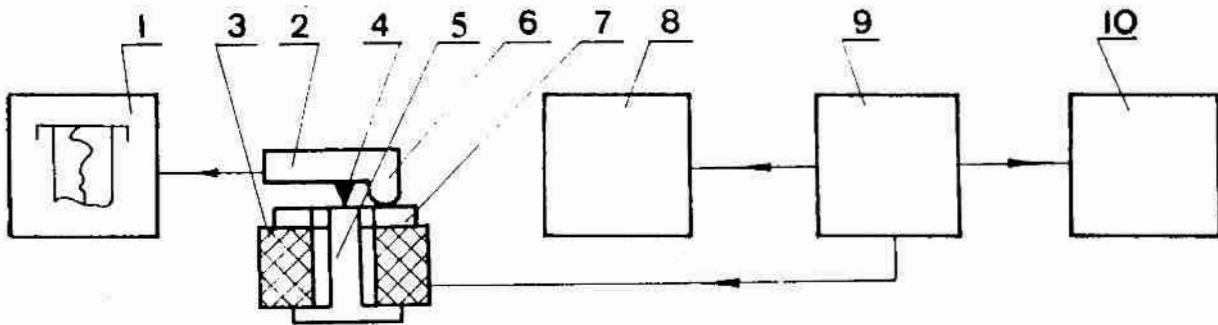
Wartość nominalna głębokości d	Wartość nominalna szerokości w	Odchyłki graniczne od wartości nominalnej	Niepewność pomiaru średniej głębokości wzorca		Odchylenie standardowe wartości średniej wzorca
			%	$\mu\text{m}$	
$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	%	%	$\mu\text{m}$	%
0,3	100	$\pm 20$	$\pm 3$	$\pm 0,01$	3
1,0	100	$\pm 15$	$\pm 2$	$\pm 0,02$	2
3,0	200	$\pm 10$	$\pm 2$	$\pm 0,06$	2
10	200	$\pm 10$	$\pm 2$	$\pm 0,2$	2
30	500	$\pm 10$	$\pm 2$	$\pm 0,6$	2
100	500	$\pm 10$	$\pm 2$	$\pm 2,0$	2



Rys.9. Zarysy wzorców do sprawdzania powiększeń pionowych profilografów; a) - wzorzec typu A1, b) - wzorzec typu A2 ; wg [107]



W normie [99] określono, że powiększenia pionowe profilografów tykowych powinny być sprawdzane za pomocą wibratora pobudzanego sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości z zakresu od 1 Hz do 4 Hz, lub a pomocą wzorców kontrolnych, którymi mogą być wzorce jednokreskowe schodkowe. Schemat ilustrujący zastosowanie wibratora do sprawdzania powiększenia pionowego profilografu pokazano na rys.10.



rys.10. Schemat układu do sprawdzania powiększenia pionowego profilografu za pomocą wibratora ; 1 - profilograf, 2 - przetwornik pomiarowy profilografu, 3 - wibrator, 4 - ostrze odwzorowujące, 5 - ruchomy element wibratora, 6 - ślizgacz, 7 - nieruchomy korpus wibratora, 8 - woltomierz, 9 - generator, 10 - częstotłomierz ; wg [99]

Wibrator 3 pobudzany jest sygnałem z generatora 9. Napięcie i częstotliwość sygnału z generatora są mierzone odpowiednio woltomierzem 8 i częstotłomierzem 10. Ostrze odwzorowujące 4, sprawdzanego profilografu 1, spoczywa na ruchomym elemencie 5 wibratora 3, zaś ślizgacz 6 styka się z nieruchomym korpusem 7. Podwójna amplituda drgań ruchomego elementu 5 określana jest na podstawie wskazań woltomierza 8 i świadectwa uwierzytelnienia wibratora. Przewidziano możliwość stosowania dwóch rodzajów wibratorów - wibratora piezoelektrycznego typu PV-2, oraz wibratora magnetoelektrycznego typu MV-2. Podstawowe dane techniczne wibratorów obu typów zestawiono w tabl.3.

Tablica 3. Dane techniczne wibratorów; wg [99]

Dane techniczne	Wibrator piezoelektryczny typu PV-2	Wibrator magnetoelektryczny typu MV-2
Zakres amplitud, $\mu\text{m}$	0,2 - 5,0	0,2 - 10
Zakres częstotliwości, Hz	0 - 500	0 - 180
Wymiary gabarytowe, mm	75 x 80	75 x 80
Masa, kg	1,0	1,5

Dokładne pomiary parametrów sygnałów sinusoidalnych, zasilających wibrator, za pomocą typowych woltomierzy, są na ogół możliwe jedynie dla sygnałów o częstotliwościach większych niż 20 Hz. Dlatego

eż, w pracy [72] zaproponowano układ przeznaczony do dokładnych pomiarów parametrów sygnałów sinusoidalnych, o częstotliwościach z zakresu od 0,1 Hz do 20 Hz, wykorzystywanych do pobudzania wibratora przy sprawdzaniu przyrządów stykowych.

W pracy [87] zaproponowano układ wzmacniacza przeznaczonego doasilania wibratorów piezoceramicznych. Wzmacniacz ten pozwala używać napięcia o amplitudach do 170 V w zakresie częstotliwości od 0,1 Hz do 1000 Hz. Na wejście wzmacniacza mogą być podawane sygnały typowych generatorów sygnałów elektrycznych. Współczynnik zniekształceń nieliniowych wzmacniacza wynosi 1,5 %, zaś niestabilność napięcia wyjściowego, w czasie 1 godziny, też nie przekracza 1,5 %.

Sprawdzenie błędu względnego powiększenia pionowego za pomocą wzorców, w całym zakresie pomiarowym profilografu, wymaga zastosowania wielu wzorców o wysokiej dokładności wykonania. Stosowanie do tego celu wibratorów piezo- lub magnetoelektrycznych wymaga ich częstego wzorcowania oraz, z uwagi na możliwość wystąpienia zniekształceń sygnału, nie daje pewności co do tego, że sprawdzanie wykonano prawidłowo. Dlatego też można sądzić, że sprawdzanie powiększenia pionowego profilografów stykowych za pomocą wibratorów byłoby korzystniejsze niż za pomocą wzorców kontrolnych, pod warunkiem, że możliwe byłoby dokonywanie dokładnych pomiarów przemieszczeń ruchomego elementu wibratora bezpośrednio podczas sprawdzania profilografu.

#### 2.4.2. Sposoby oceny błędu względnego powiększenia poziomego profilografów

Błąd względny powiększenia poziomego profilografu stykowego, wyrażony w procentach, zgodnie z instrukcją [100] wyznacza się na podstawie równania:

$$\delta_h = \frac{\alpha_{sr} - \alpha_w}{\alpha_w} 100 \% \quad (2.10)$$

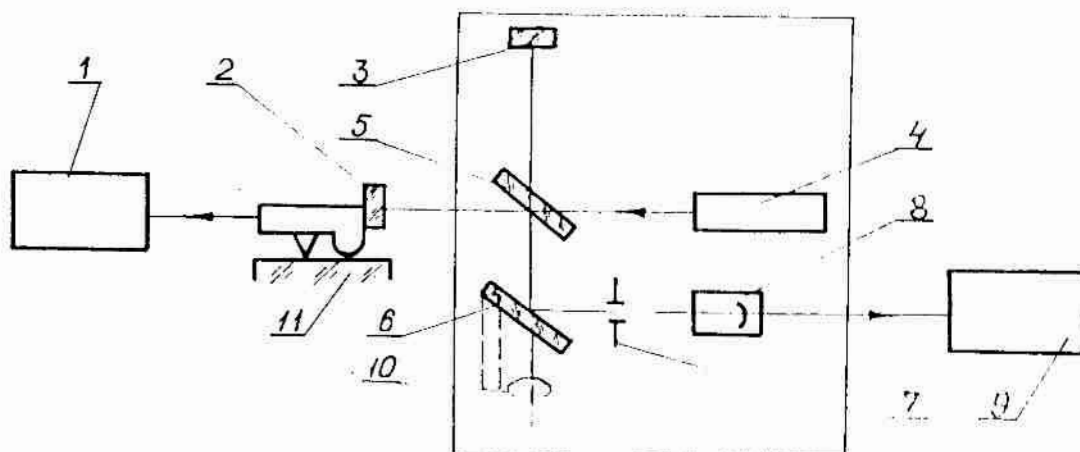
gdzie:  $\delta_h$  - błąd względny powiększenia poziomego profilografu wyrażony w procentach,  $\alpha_{sr}$  - średnia wartość odległości między dwiema rzeskami kontrolnymi wzorca, zmierzona z profilogramu (na podstawie trzech zapisów), wyrażona w mm,  $\alpha_w$  - rzeczywista odległość między rzeskami kontrolnymi wzorca wyrażona w mm. Wartość  $\alpha_{sr}$  można wyznaczyć korzystając z równania:

$$\alpha_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^3 a_i}{3 \sqrt{h \text{ nom}}} \quad (2.11)$$

dzie:  $\alpha_i$  - odległości między kreskami kontrolnymi zmierzone z profilogramu w mm,  $V_{h\ nom}$  - nominalna wartość zastosowanego powiększenia poziomego profilografu. Wartość  $\alpha_w$  ustalana jest na podstawie wiadectwa uwierzytelnienia wzorca kontrolnego.

W celu wyznaczenia błędu względnego powiększenia poziomego profilografu, wykonywane są profilogramy uwierzytelnionego wzorca kreskowego, z działką elementarną o wartości 0,1 mm i zakresie pomiarowym co najmniej 5 mm. Profil kresek wzorca powinien mieć dokładnie kreślone punkty odniesienia. Zamiast wzorca kreskowego instrukcja 100] dopuszcza stosowanie specjalnych wzorców kontrolnych, z dokładnie wyznaczoną odległością między dwiema rysami. W tym celu mogą być też wykorzystane wzorce wielokreskowe, dla których została dokładnie wyznaczona odległość między nierównościami.

Powiększenie poziome profilografów stykowych, według [99], może być wyznaczone dwoma sposobami. Pierwszy sposób polega na wykonaniu profilogramu uwierzytelnionego, jednokreskowego wzorca kontrolnego z dokładnie określoną odległością między rysami. Powiększenie poziome profilografu równe jest w tym przypadku stosunkowi odległości między rysami, zmierzonej na profilogramie, do odległości między rysami na wzorcu. Drugi sposób wyznaczania powiększenia poziomego polega na kreśleniu stosunku prędkości przesuwu taśmy rejestratora do prędkości przesuwu głowicy pomiarowej profilografu. Prędkość przesuwu taśmy rejestratora wyznacza się za pomocą wibratora, pobudzanego sygnałem sinusoidalnym, w układzie pokazanym na rys.10. Prędkość przesuwu głowicy pomiarowej profilografu wyznacza się za pomocą układu interferencyjnego, którego schemat pokazano na rys.11.



rys.11. Schemat układu do wyznaczania prędkości przesuwu głowicy pomiarowej profilografu; 1 - profilograf, 2,3 - zwierciadła płaskie, 4 - laser, 5 - zwierciadło półprzezroczyste, 6 - zwierciadło uchylne, 7 - przysłona, 8 - detektor fotoelektryczny, 9 - częstotściomierz, 10 - wibrator, 11 - płytka interferencyjna; wg [99]

Prędkość przesuwu taśmy rejestratora określona jest równaniem:

$$V_r = l f \quad (2.12)$$

gdzie:  $V_r$  - prędkość przesuwu taśmy rejestratora,  $l$  - odległość między punktami profilogramu mającymi tę samą fazę,  $f$  - częstotliwość rgań wibratora. Prędkość przesuwu głowicy pomiarowej profilografu yznaczana jest z równania:

$$V_g = \frac{1}{2 \cdot 10^3} \lambda_l \nu \quad (2.13)$$

gdzie:  $V_g$  - prędkość przesuwu głowicy wyrażona w mm/s,  $\lambda_l$  - długość ali światła laserowego wyrażona w  $\mu\text{m}$ ,  $\nu$  - częstotliwość impulsów w z, zmierzona częstotłomiernikiem.

Sprawdzanie błędu powiększenia poziomego profilografu za pomocą wibratora i interferometru ma tę zaletę, iż pozwala wyznaczać średnią rędkości przesuwu głowicy profilografu w różnych przedziałach czasu. można zatem ujawnić chwilowe zmiany prędkości przesuwu głowicy pomiarowej, które są źródłem błędów przeanalizowanych w p.2.2.2.

#### 4.3. Sposoby oceny błędu wskazań profilometrów

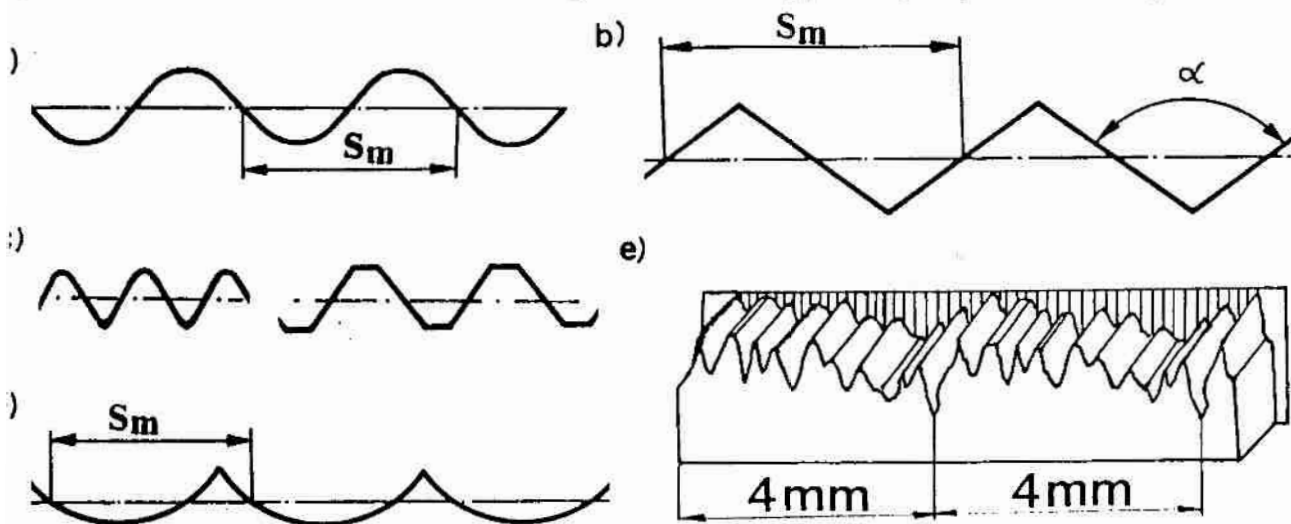
Błąd wskazań profilometru, zgodnie z instrukcją [101], wyznaczany jest za pomocą uwierzytelnionych, kontrolnych wzorców chropowatości powierzchni z profilem okresowym. Wzorce te, nazywane także wzorcami wielokreskowymi, oznaczone są w normie [107] jako wzorce typu C. Wyróżnia się cztery rodzaje wzorców typu C:

- wzorce typu C 1 z profilem sinusoidalnym,
- wzorce typu C 2 z profilem trójkątnym równobocznym,
- wzorce typu C 3 z profilem imitującym sinusoidę,
- wzorce typu C 4 z profilem łukowym.

Tablica 4. Wartości nominalne i odchyłki graniczne wzorców typu C; wg [107]

Nominalna wartość $R_a$	Odchyłki graniczne od wartości nominalnej	Niepewność pomiaru ustalonej wartości średniej $R_a$	Odchylenie standardowe wartości średniej
$\mu\text{m}$	%	%	%
0,1	$\pm 25$	$\pm 3$	3
0,3	$\pm 20$	$\pm 2$	2
1	$\pm 15$	$\pm 2$	2
3	$\pm 10$	$\pm 2$	2
10	$\pm 10$	$\pm 2$	2
30	$\pm 10$	$\pm 2$	2

la rys.12a,b,c,d pokazano zarysy wzorców typu C, zaś w tabl.4 podano wartości nominalne i odchyłki graniczne parametru  $R_\alpha$  tych wzorców. W normie [107] do sprawdzania błędów wskazań profilometrów, oprócz wzorców typu C, przewidziano także wzorce typu D, o nieco niższej dokładności wykonania i powtarzającym się nieregularnym zarysie. Są one przeznaczone do pełnego sprawdzania wskazań profilometrów, w warunkach zbliżonych do warunków pomiaru powierzchni losowych, i mogą służyć do sprawdzania wskazań wielu parametrów takich jak  $R_\alpha$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta q$  itp. Na przykład wzorce typu D, produkowane przez niemiecką firmę *Halle-Präzisions-Kalibriernormale GmbH* z Brunzowu, przeznaczone są do sprawdzania parametrów  $R_\alpha$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ . Jak wspomniano w pracy [51] są one wykonywane w trzech klasach dokładności I, w przypadku wzorców I klasy, uwierzytelniane w *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*. Zarys wzorca typu D pokazano na rys.12e.



Rys.12. Zarysy wzorców typu C i D; a) - zarys wzorca typu C1, b) - zarys wzorca typu C2, c) - zarysy wzorców typu C3, d) - zarys wzorca typu C4, e) - zarys wzorca typu D ; wg [107]

Błąd wskazań profilometru wyznacza się dla danego parametru, wybranej głowicy pomiarowej, określonego zakresu pomiarowego, wybranych długości odcinków: pomiarowego i elementarnego. W tym celu dokonuje się dziesięciu pomiarów sprawdzanego parametru na wzorcu ( $n_p$  parametru  $R_\alpha$ ) i oblicza się wartość średnią ( $\bar{R}_\alpha$ ). Wartość błędu systematycznego profilometru wyznacza się z równania:

$$\delta_{\text{sys}t} R_\alpha = \frac{\bar{R}_\alpha - R_{aw}}{R_{aw}} 100 \% \quad , \quad (2.14)$$

gdzie:  $\delta_{\text{sys}t} R_\alpha$  - systematyczny błąd względny wskazań parametru  $R_\alpha$ ,

w %,  $\bar{R}_\alpha$  - wartość średnia z dziesięciu wskazań parametru  $R_\alpha$ , w  $\mu\text{m}$ ,

$R_{aw}$  - wartość parametru  $R_\alpha$  uwierzytelnionego wzorca kontrolnego, w  $\mu\text{m}$ .

Błąd przypadkowy wskazań profilometru określony jest równaniem:

$$\sigma_{R_{\alpha}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{10} (\bar{R}_{\alpha} - R_{\alpha i})^2}}{3 R_{\alpha w}} 100 \% \quad , \quad (2.15)$$

dzie:  $\sigma_{R_{\alpha}}$  - przypadkowy błąd względny wskazań parametru  $R_{\alpha}$ , wyrażony w procentach,  $R_{\alpha i}$  - kolejne wskazania profilometru wyrażone  $\mu\text{m}$ . Projekt niemieckiej instrukcji [95] zaleca inny sposób wyznaczenia niepewności pomiaru, podczas sprawdzania wskazań profilometru a pomocą wzorców kontrolnych. Sposób ten jest zgodny z wytycznymi [13]. Polega on na sumowaniu niepewności uwierzytelnionego wzorca kontrolnego, określonej na podstawie świadectwa uwierzytelnienia, z niepewnością wyznaczoną podczas sprawdzania przyrządu stykowego. Niepewności sumowane są metodą Gaussa tj. zgodnie z zasadą sumowania kwadratów błędów, przy poziomie ufności równym 95%.

Przy zachowaniu warunków sprawdzania określonych w [101], błąd odstawowy profilometru otrzymuje się z równania:

$$|\delta| = |\delta_{\text{syst}}| + n \sigma \quad , \quad (2.16)$$

dzie  $n$  jest liczbą odpowiednią do wymaganego stopnia ufności.

Również norma [98] przewiduje sprawdzanie błędów wskazań profilometrów stykowych za pomocą wzorców kontrolnych. Dotyczy to jednak tylko sprawdzania błędów wskazań parametru  $R_{\alpha}$ . W celu sprawdzenia błędów wskazań profilometrów dla innych parametrów chropowatości powierzchni, przewidzianych w normach [97] i [106], konieczne jest stosowanie wibratora pobudzanego sygnałem sinusoidalnym, o częstotliwości z zakresu od 50 Hz do 70 Hz. Schemat układu z wibratorem, oraz podstawowe rodzaje i parametry techniczne wibratorów, są podobne do przedstawionych w p.2.4.1. niniejszej pracy.

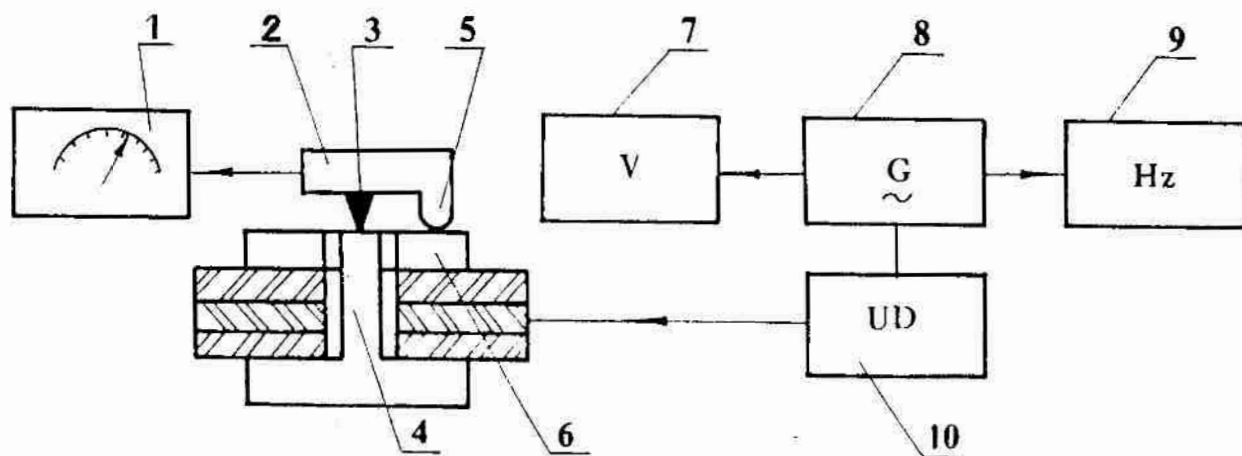
Wzorce kontrolne wymagają wysokiej dokładności wykonania oraz muszą być uwierzytelniane. Wibratory używane do sprawdzania profilometrów również wymagają okresowego wzorcowania, gdyż parametry drgań mechanicznych wibratora oceniane są na podstawie parametrów sygnału elektrycznego pobudzającego wibrator. Wibratory są bardziej uniwersalne niż wzorce, ponieważ można je pobudzać do drgań sygnałami o odpowiednio dobranym kształcie i parametrach. Gdyby został opracowany sposób dokładnego pomiaru położenia ruchomego elementu wibratora, podczas sprawdzania profilometru, to stosowanie wibratorów do sprawdzania profilometrów byłoby korzystniejsze niż stosowanie wzorców kontrolnych. Układy z wibratorami mogłyby znaleźć zastosowanie w PKM i J, w okręgowych urzędach miar oraz u producentów profilometrów.

Stosując wibratory do sprawdzania błędów wskazań profilometrów stykowych trzeba uwzględnić tę okoliczność, że wynik sprawdzania w niewielkim stopniu będzie zależeć od stanu roboczej powierzchni wie-  
-zchołka ostrza odwzorowującego. Dlatego też, wykorzystanie wibratorów do sprawdzania błędów wskazań profilometrów, powinno być poprzedzone dokładną oceną stanu ostrza odwzorowującego.

#### 3.4.4. Sposoby wyznaczania charakterystyki przenoszenia profilometrów

Charakterystykę przenoszenia profilometru określono w normie [108]. Moduł tej charakterystyki jest funkcją, wyrażającą zależność współczynnika przenoszenia  $K$  od stosunku  $\lambda/\lambda_B$ , gdzie  $\lambda$  jest długością fali nierówności powierzchni, zaś  $\lambda_B$  jest graniczną długością fali filtru profilometru, równą długości zastosowanego odcinka elementarnego. Współczynnik przenoszenia jest stosunkiem wartości parametru ( $\text{np } R_a$ ), wskazanej przez przyrząd, do rzeczywistej wartości tego parametru.

Sprawdzenia charakterystyki przenoszenia profilometru można dokonać, wg [101], dwoma sposobami. Pierwszy z nich polega na zastosowaniu wywzorcowanego wibratora, pobudzanego sygnałem sinusoidalnym. Vibrator powinien umożliwiać uzyskiwanie drgań z amplitudami do  $5 \mu\text{m}$ , w zakresie częstotliwości od 0,01 Hz do 500 Hz. Przewidziano możliwość zastosowania wibratora typu PV-4 produkcji radzieckiej lub urządzenia *Perthotest* nr 811401 firmy *Perthen* (RFN) i generatora mod. 4020 amerykańskiej firmy *Krohn-Hite*. Schemat układu z wibratorem pokazano na rys.13. Amplitudę drgań ruchomej części wibratora 4 mierzona się na podstawie wskazań woltomierza 7, co może być źródłem istotnych błędów. Należy sądzić, iż wyposażenie wibratora w układ do



Rys.13. Schemat układu do sprawdzania charakterystyki przenoszenia profilometru ; 1 - profilometr, 2 - głowica pomiarowa profilometru, 3 - ostrze odwzorowujące, 4 - ruchoma część wibratora, 5 - ślizgacz, 6 - nieruchoma część wibratora, 7 - woltomierz, 8 - generator, 9 - częstotściomierz, 10 - układ dopasowujący ; wg [101]

omiaru bieżącego położenia elementu 4, pozwoliłoby zwiększyć dokładność wyznaczania charakterystyki przenoszenia profilometru. Drugi sposób sprawdzania charakterystyki przenoszenia profilometru, przedziany w [101], wymaga zastosowania kontrolnych wzorców chropowości, przeznaczonych do wyznaczania błędów wskazań. Zaleca się stosowanie trzech wzorców z jednakową amplitudą i długościami fal nierówności powierzchni, wynoszącymi odpowiednio  $\frac{1}{3}\lambda_B$ ,  $\lambda_B$  i  $3\lambda_B$ . Większe długości fal można uzyskiwać dzięki ukośnemu ustawieniu wzorca względem kierunku przesuwu głowicy pomiarowej.

Wartości współczynnika przenoszenia  $K$  profilometru, dla parametru  $R_\alpha$ , określa się korzystając z równania:

$$K = \frac{R_{\alpha \text{ zm}}}{R_{\alpha \text{ zad}}} 100 \% \quad , \quad (2.17)$$

gdzie:  $R_{\alpha \text{ zm}}$  - wartość parametru  $R_\alpha$  wskazana przez profilometr w  $\mu\text{m}$ ,  
 $R_{\alpha \text{ zad}}$  - wartość parametru  $R_\alpha$  zadana ostrzu odwzorowującym profilometru przez wibrator lub wzorzec, w  $\mu\text{m}$ . Jeżeli przy sprawdzaniu wykorzystywany jest wibrator, to częstotliwość drgań, dla danej długości fali, określona jest równaniem:

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad , \quad (2.18)$$

gdzie:  $f$  - częstotliwość drgań wibratora wyrażona w hercach,  $V$  - nominalna prędkość przesuwu głowicy pomiarowej profilometru, w  $\text{mm/s}$ ,  
 $\lambda$  - długość fali sinusoidalnej, w  $\text{mm}$ .

Sprawdzanie charakterystyki przenoszenia profilometru, zgodnie z normą [98], dokonywane jest wyłącznie za pomocą wibratora piezoelektrycznego typu PV-2, pobudzanego sygnałem sinusoidalnym, w układzie podobnym do pokazanego na rys.13. Norma ta nie przewiduje sprawdzania charakterystyki przenoszenia za pomocą wzorców kontrolnych.

Inną koncepcję wyznaczania charakterystyki przenoszenia profilometru przedstawiono w pracy [10]. Polega ona na zastosowaniu wibratora, pobudzanego odpowiednim sygnałem elektrycznym, zawierającym wszystkie składowe harmoniczne w rozpatrywanym zakresie częstotliwości. Sygnał wyjściowy z profilometru jest analizowany przez analizator widma. Porównanie sygnału wejściowego i wyjściowego pozwala wyznaczyć charakterystyki: amplitudowo-częstotliwościową i fazowo-częstotliwościową, sprawdzanego profilometru. Na tej podstawie może być wyznaczona charakterystyka przenoszenia przyrządu, dla odpowiedniego parametru nierówności powierzchni.



#### 2.4.5. Charakterystyka wybranych sposobów oceny właściwości metrologicznych przyrządów stykowych

W poprzednich punktach podrozdziału 2.4 przeanalizowano podstawowe sposoby oceny wybranych właściwości metrologicznych przyrządów stykowych. Istnieją dwa sposoby oceny tych właściwości:

- sposób polegający na zastosowaniu odpowiednich wzorców kontrolnych,
- sposób polegający na zastosowaniu wibratora pobudzanego do drgań sygnałem elektrycznym z generatora.

Poniżej scharakteryzowano najważniejsze właściwości metrologiczne określające dokładność wykonania i uwierzytelniania wzorców kontrolnych. Przedstawiono także podstawowe parametry metrologiczne charakteryzujące układy generacji i pomiaru drgań mechanicznych, wibratorów przeznaczonych do sprawdzania profilometrów stykowych. Opiszano również problemy związane z zastosowaniem, do sprawdzania profilometrów stykowych, wzorców kontrolnych i układów wibracyjnych.

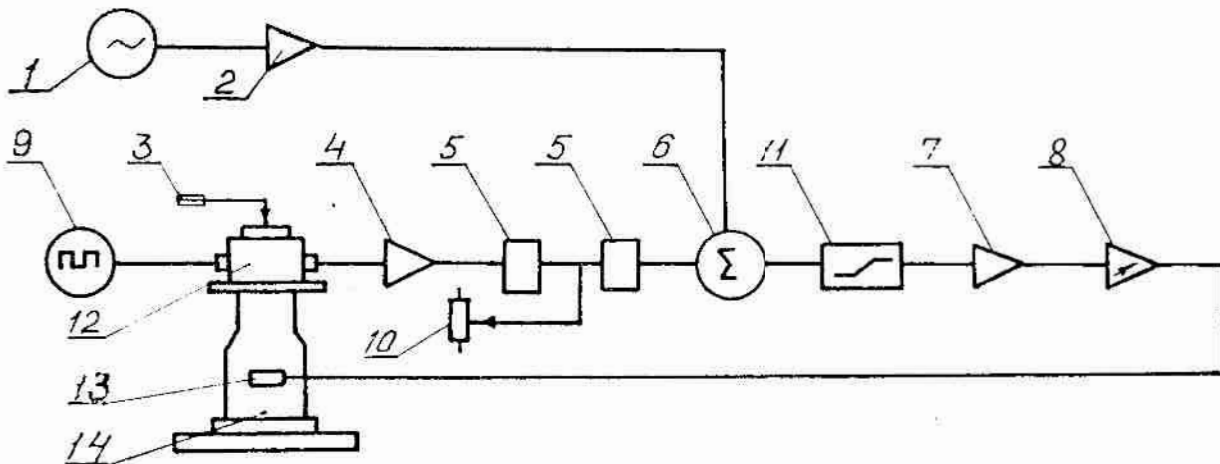
Niepewność pomiaru średniej głębokości nierówności, w przypadku wzorców typu A, oraz wartości średniej parametru  $R_a$ , w przypadku wzorców typu C, nie powinna wg [107] przekraczać  $\pm(2+3)\%$ , zaś wg [111]  $\pm(3+5)\%$ . Wyniki pomiarów wzorców kontrolnych typu A2, badanych metodami mikroskopii interferencyjnej, zamieszczone w pracach [19], [20], wskazują, że niedokładność pomiarów tych wzorców może wynosić nawet  $\pm 7,2\%$ , co przy nominalnej głębokości wzorca równej  $0,25 \mu\text{m}$ , wynosi  $\pm 0,018 \mu\text{m}$ . W pracy [37] przedstawiono wyniki badań wzorców typu C4, które przeprowadzono w *Établissement Central de l'Armement* (Francja). Badania te wskazują, że niedokładność wykonania wzorców wynosi  $\pm 5\%$  wartości nominalnej, zaś niedokładność ich wzorcowania zależy od parametru, i zmienia się od  $\pm 0,5\%$  do  $\pm 3\%$ . Kontrolne wzorce schodkowe, stanowiące wg [111] etalony II rzędu, budowane są z płytek wzorcowych klasy 0 i charakteryzują się niedokładnością  $\pm 0,07 \mu\text{m}$ . Oznacza to, że dla wzorców o nominalnych wysokościach schodka równych  $1 \mu\text{m}$  i  $3 \mu\text{m}$ , niedokładności wyznaczenia wysokości wynoszą odpowiednio  $\pm 7\%$  oraz  $\pm 2,3\%$ . Wynika stąd, że sprawdzanie profilometrów za pomocą wzorców kontrolnych, przy dużych wzmocnieniach i powiększeniach pionowych, nie jest zbyt dokładne.

Zastosowanie wzorców kontrolnych do sprawdzania przyrządów stykowych związane jest z szeregiem trudności. Najważniejsze z nich to:

- trudności z zapewnieniem odpowiednio wysokiej dokładności wzorców kontrolnych, potrzebnych do sprawdzania przyrządów przy dużych wzmocnieniach lub powiększeniach pionowych,
- konieczność stosowania znacznej liczby wzorców, w celu sprawdzenia przyrządu przy wszystkich wzmocnieniach i powiększeniach pionowych,

niebezpieczeństwo stosowania wzorców kontrolnych o jednorodnym profilu różnych, równoległych względem siebie, przekrojach wzorca, trudności z zapewnieniem sinusoidalnego kształtu zarysu wzorców kontrolnych przeznaczonych do sprawdzania charakterystyki przeniesienia profilometrów stykowych.

Zastosowanie wibratorów pozwala uniknąć wymienionych trudności, jednakże wymaga odpowiednio częstego ich wzorcowania, co może wiązać z dużym nakładem pracy i kosztów. Innym rozwiązaniem jest stosowanie wibratorów wyposażonych w układy pomiarowe, które mierzą parametry drgań bezpośrednio podczas sprawdzania przyrządów stykowych. Takie układy opisano np. w pracy [10]. Przedstawiony układ zawiera mierzalny stolik pobudzany wibratorem elektromagnetycznym. Przemieszczenia stolika wibracyjnego mierzone są za pomocą różnicowego przetwornika pojemnościowego. Stolik umożliwia przemieszczenia w zakresie od 10 nm do 4000 nm w paśmie częstotliwości od 0 Hz do 800 Hz, przy tłumieniu nie przekraczającym 3 dB. Czułość przetwornika pojemnościowego wynosi  $0,543 \text{ V}/\mu\text{m}$  i wartość ta nie zmienia się więcej  $\pm 0,5 \%$  w ciągu 6-ciu miesięcy. Próg pobudliwości przetwornika stosowanego do wzorcowania stolika wynosił 2 nm. Schemat układu pokazano na rys.14. W układzie tym wykorzystano obwód sprzężenia zwrotnego sterujący parametrami drgań wibratora.

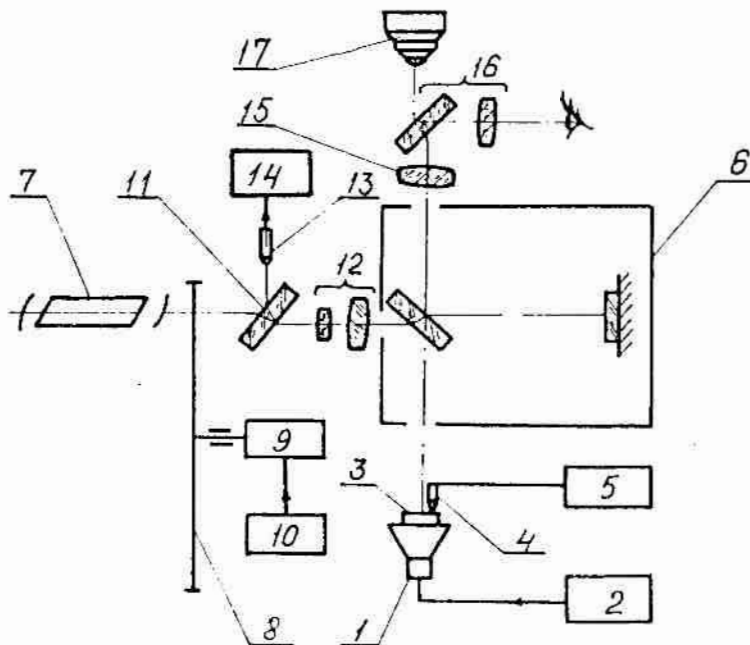


rys.14. Schemat funkcjonalny układu ze stolikiem wibracyjnym do sprawdzania przyrządów stykowych; 1 - generator, 2 - separator, 3 - głowica pomiarowa przyrządu stykowego, 4 - wzmacniacz wstępny, 5 - filtry, 6 - wejście sygnału wzorcowego, 7 - wzmacniacz, 8 - wzmacniacz mocy, 9 - generator wysokiej częstotliwości, 10 - potencjometr, 11 - komparator wyprzedzenia, 12 - przetwornik pojemnościowy, 13 - wejście wzorcowe, 14 - stolik wibracyjny; wg [10]

Do pomiarów parametrów drgań wibratora mogą być także stosowane metody interferencyjne. Należą one do metod najbardziej dokładnych, zwłaszcza wtedy, gdy możliwe jest dokładne przeanalizowanie sygnału interferencyjnego. W pracach [47], [49] pokazano możliwość

miaru parametrów drgań wibratora, z wykorzystaniem zjawiska interferencji stroboskopowej. Schemat układu pomiarowego wykorzystającego tę metodę pokazano na rys.15. Układ umożliwia oszacowanie amplitudy drgań wibratora z niedokładnością rzędu  $\pm 0,1 \lambda_L$ , gdzie  $\lambda_L$  jest długością fali światła użytego do oświetlenia interferometru. Pomiar amplitudy drgań w tym układzie pozwala wyznaczyć średnią wartość amplitudy. Stanowi to istotną wadę tej metody pomiaru. Zastosowanie tego sposobu przy małych częstotliwościach drgań jest ponadto ograniczone ze względu na utrudnioną obserwację obrazu interferencyjnego. Spowodowane jest to dużymi zmianami oświetlenia, wywołanymi modulacją prądu światelnego.

W pracy [1] przedstawiono inny sposób wykorzystania interferometru laserowego do pomiaru amplitudy drgań mechanicznych. Sposób ten zastosowano do wzorcowania czujników drgań, w tym sejsmografów i piezoelektrycznych przesuwników ceramicznych [2], [3]. Opracowany sposób polega na obserwacji, za pomocą oscyloskopu katodowego, sygnału uzyskanego z detektora fotoelektrycznego, umieszczonego w interferometrze. Dzięki temu można określić liczbę prążków interferencyjnych odpowiadających amplitudzie drgań pod warunkiem, że zwierciadło interferometru doznaje drgań okresowych. Również ten sposób pomiaru umożliwia jedynie wyznaczenie wartości średniej amplitudy drgań. Charakteryzuje się on niedokładnością rzędu  $\pm 0,5 \lambda_L$ .



rys.15. Schemat układu do pomiaru parametrów drgań wibratora z wykorzystaniem zjawiska interferencji stroboskopowej; 1 - wibrator, 2 - generator, 3 - zwierciadło płaskie, 4 - ostrze odwzorowujące profilometru, 5 - profilometr, 6 - interferometr, 7 - laser, 8 - modulator prądowy, 9 - silnik, 10 - zasilacz, 11 - płytka półprzezroczysta, 12 - luneta, 13 - fototranzystor, 14 - częstotściomierz, 15 - obiektyw, 16 - luneta obserwacyjna, 17 - aparat fotograficzny; wg [47]

W interferometriach laserowych, przeznaczonych do pomiarów parametrów drgań mechanicznych, wykorzystywane jest niekiedy zjawisko heterodynowania światła laserowego. Zjawisko to, szczegółowo opisano w pracy [65]. W pracy [4] przedstawiono interferometr laserowy, wykorzystujący zjawisko heterodynowania optycznego, przeznaczony do pomiaru amplitudy drgań mechanicznych. Umożliwia on jedynie pomiar wartości średniej amplitudy drgań. Do zalet tego interferometru możnaaliczyć możliwość pomiaru parametrów drgań okresowych i nieokresowych w szerokim zakresie częstotliwości.

Typowe interferometry laserowe stosowane są przede wszystkim do pomiaru dużych długości rzędu kilku, a nawet kilkudziesięciu metrów [32], [35], [94]. Przyrządy te, produkowane seryjnie (np. przez firmę *Hewlett-Packard*) jako w pełni zautomatyzowane systemy pomiarowe, wykorzystywane są między innymi do pomiarów przemieszczeń elementów obrabiarek, współrzędnościowych maszyn pomiarowych, oraz są używane w pomiarach geodezyjnych i innych dziedzinach techniki.

Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje interferometrów laserowych przeznaczonych do pomiaru długości [22], [35], [66]:

- interferometry jednoczęstotliwościowe, nazywane inaczej interferometrami prądu stałego lub interferometrami bez przenoszenia widma sygnału,
- interferometry heterodynowe, nazywane także dwuczęstotliwościowymi interferometrami prądu zmiennego lub interferometrami z przenoszeniem widma sygnału,
- interferometry jednoczęstotliwościowe z wewnętrzną modulacją fazową, nazywane też jednoczęstotliwościowymi interferometrami prądu zmiennego lub AC interferometrami (*alternating current interferometer*).

Opisane wyżej sposoby pomiarów parametrów drgań wibratorów, w tym również sposoby interferencyjne, umożliwiają wyznaczenie jedynie średniej wartości amplitudy drgań okresowych w pewnym przedziale czasu. Nie pozwalają one natomiast, na wyznaczenie położenia ruchomego elementu wibratora, w kolejnych chwilach czasu. Jeżeli drgania mechaniczne wibratora, wykorzystywanego do sprawdzania przyrządów stykowych, nie są dokładnie powtarzalne to pomiary średniej wartości amplitudy mogą prowadzić do uzyskania wyników obarczonych znacznymi błędami. Dlatego też wskazane jest dokonywanie pomiarów pozwalających na wyznaczenie położenia ruchomego elementu wibratora w kolejnych chwilach czasu. Pomiary takie mogą być dokonane w różny sposób. Autorzy patentu [29] zaproponowali sposób polegający na pomiarze przemieszczeń ruchomego elementu wibratora za pomocą przetwornika

indukcyjnego połączonego z oscylografem pętlicowym. Pomiarów takich można też dokonać za pomocą interferometru laserowego połączonego z układem zapewniającym rejestrację sygnału interferencyjnego. System pomiarowy działający w ten sposób opisano w pracy [50]. Dokonuje on analizy interferogramu zarejestrowanego w pamięci mikrokomputera. Zastosowanie tej metody do pomiaru parametrów drgań wibratorów, wykorzystywanych do sprawdzania przyrządów stykowych, powinno pozwolić uniknąć niedogodności związanych ze stosowaniem wzorców kontrolnych i jednocześnie zapewnić wysoką dokładność pomiarów wybranych właściwości metrologicznych sprawdzanych przyrządów [31]. Wymaga to jednak przeprowadzenia odpowiednich badań.

### 3.5. Wnioski

W wyniku dokonanej analizy literatury sformułowano następujące wnioski:

1. Dokładność profilometrów stykowych zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to:
  - nacisk ostrza odwzorowującego,
  - prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego,
  - promień wierzchołka ostrza odwzorowującego,
  - właściwości dynamiczne przyrządu (wynikające z konstrukcji i charakterystyk zespołów funkcjonalnych profilografu takich jak: przetwornik pomiarowy, wzmacniacz, filtry, układy obliczające wartości mierzonych parametrów, rejestrator),
  - wymiary, kształt i stan powierzchni ślizgacza,
  - położenie ślizgacza względem ostrza odwzorowującego.
2. Podczas sprawdzania przyrządów stykowych wymagane jest między innymi sprawdzenie następujących właściwości metrologicznych:
  - błędu względnego powiększenia pionowego profilografu,
  - błędu względnego powiększenia poziomego profilografu,
  - błędów wskazań dla poszczególnych parametrów mierzonych profilometrem (np.  $R_a$ ,  $R_m$ ,  $\lambda_a$ ,  $\lambda_q$ ,  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\varphi$ ,  $t_p$ ),
  - charakterystyki przenoszenia profilometru.

Do sprawdzania tych właściwości metrologicznych stosowane są jednokreskowe i wielokreskowe uwierzytelnione wzorce kontrolne, kontrolne wzorce schodkowe, utworzone z płytek wzorcowych, oraz wibratory pobudzane sygnałem okresowym.

3. Sprawdzanie profilometrów stykowych za pomocą wzorców kontrolnych, zwłaszcza przy dużych wzmocnieniach i powiększeniach pionowych, wymaga stosowania wzorców o wysokiej dokładności wykonania oraz dokładnych metod uwierzytelniania tych wzorców. Niepewność

wyznaczenia średniej głębokości nierówności, w przypadku wzorców kontrolnych jednokreskowych, oraz wartości średniej parametru  $R_a$ , w przypadku wzorców kontrolnych wielokreskowych, nie powinna, wg norm ISO, przekraczać  $\pm(2+3)\%$ , zaś wg przepisów PKNMIJ  $\pm(3+5)\%$ . Warunki te, jak wykazują badania, są trudne do spełnienia dla wzorców kontrolnych, których nominalna wartość głębokości nierówności jest mniejsza niż  $0,5 \mu\text{m}$ .

Zastosowanie wibratora do sprawdzania wybranych właściwości metrologicznych profilografów i profilometrów stykowych pozwala uniknąć wielu niedogodności związanych ze stosowaniem wzorców kontrolnych. Wymaga to jednak opracowania odpowiednio dokładnych sposobów pomiaru parametrów okresowych drgań mechanicznych wibratora.

Pomiary parametrów drgań mechanicznych wibratora mogą być dokonywane okresowo podczas jego wzorcowania, lub też pomiarów takich dokonuje się każdorazowo, bezpośrednio podczas sprawdzania przyrządów stykowych. W pierwszym przypadku parametry drgań wibratora powinny charakteryzować się wysoką powtarzalnością.

Pomiarów parametrów okresowych drgań mechanicznych wibratorów, stosowanych do sprawdzania przyrządów stykowych, dokonuje się za pomocą bezstykowych przetworników pojemnościowych lub indukcyjnych oraz sposobami interferencyjnymi, zwłaszcza za pomocą interferometrów laserowych.

Typowe interferometry laserowe, podobnie jak układy pomiarowe wykorzystujące przetworniki indukcyjne i pojemnościowe, umożliwiają na ogół wyznaczenie jedynie wartości średniej amplitudy okresowych drgań mechanicznych. Zastosowanie takich interferometrów do pomiaru amplitudy drgań mechanicznych wibratora, przeznaczonego do sprawdzania przyrządów stykowych, wymaga wysokiej powtarzalności drgań. W przeciwnym przypadku sprawdzanie tych przyrządów będzie mało dokładne.

Wydaje się, iż celowym będzie zastosowanie do pomiaru parametrów drgań mechanicznych wibratora takiej metody, która pozwala na dokładne wyznaczenie położenia ruchomego elementu wibratora, w poszczególnych chwilach czasu, bezpośrednio podczas sprawdzania profilometru stykowego. Można to osiągnąć stosując interferometr laserowy, połączony z mikroprocesorowym układem rejestrującym i analizującym sygnał pomiarowy uzyskany z interferometru.

## 1. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY

Podstawowym celem pracy było zbadanie możliwości zastosowania metody interferencyjnej do oceny wybranych właściwości metrologicznych profilometrów stykowych. Celem szczegółowym było zbadanie przydatności dwuwiaźkowego interferometru laserowego, z cyfrowym przetwarzaniem sygnału pomiarowego, do pomiaru parametrów drgań harmonicznego wibratora, stosowanego do sprawdzania profilometrów stykowych.

Główna teza pracy została sformułowana następująco:

Zastosowanie zjawiska interferencji światła laserowego do pomiaru parametrów drgań harmonicznego wibratora, przeznaczonego do sprawdzania profilometrów stykowych, umożliwia wyznaczanie przemieszczeń ruchomego elementu wibratora większych niż  $0,3 \mu\text{m}$ , z niedokładnością nie przekraczającą  $\pm 3\%$ , oraz ocenę następujących właściwości metrologicznych tych przyrządów:

błędy powiększenia pionowego profilografów,  
błędy wskazań profilometrów,  
charakterystyki przenoszenia profilometrów.

Praca obejmuje:

- . Analizę teoretyczną zjawiska interferencji światła laserowego, w układzie interferometru laserowego przeznaczonego do pomiaru i analizy okresowych drgań mechanicznych.
- . Analizę błędów pomiaru parametrów okresowych drgań mechanicznych za pomocą interferometru laserowego.
- . Konstrukcję, budowę i badania właściwości interferometru laserowego przeznaczonego do sprawdzania profilografów i profilometrów stykowych.
- . Opracowanie systemu przetwarzania sygnału pomiarowego oraz oprogramowania do analizy numerycznej rejestrowanych interferogramów.
- . Doświadczalne sprawdzenie profilometrów stykowych za pomocą zbudowanego interferometru laserowego.
- . Analizę i opracowanie wyników badań doświadczalnych.
- . Sformułowanie wniosków końcowych i wniosków do dalszych badań.

## ANALIZA TEORETYCZNA

Celem analizy, zamieszczonej w tym rozdziale, było określenie dokładności dokładnego pomiaru, metodą interferencyjną, okresowych rzemieśczeń liniowych wibratorów, stosowanych do sprawdzania wybranych właściwości profilometrów stykowych.

### 1. Interferencja fal świetlnych

Zjawisko interferencji światła stanowi przedmiot zainteresowania i badań od wielu lat. Pierwsze badania tego zjawiska dokonywane były przez *I. Newtona*, a następnie przez *T. Younga*. Badaniom interferencji fal świetlnych oraz zastosowaniu jej w pomiarach różnych wielkości poświęcono wiele prac. Podstawy tego zjawiska oraz jego wykorzystanie szczegółowo opisano między innymi w pracach [12], [16], [23], [25], [54], [60], [82], [92].

Interferencja fal świetlnych to zjawisko superpozycji fal elektromagnetycznych. Opisuje się ją jako superpozycję drgań wektorów natężenia pola elektrycznego  $E$  interferujących fal świetlnych. Ponieważ fale elektromagnetyczne są falami poprzecznymi wynik interferencji zależy od amplitud tych fal, ich częstotliwości, różnicy faz polaryzacji. W przypadku gdy interferują dwie fale świetlne, wypadkowy wektor natężenia pola elektrycznego  $E$  określa równanie:

$$E = E_1 + E_2 \quad , \quad (4.1)$$

gdzie:  $E_1$  i  $E_2$  są wektorami natężenia pola elektrycznego fal składowych. Jeśli interferujące fale są harmoniczne, monochromatyczne, mają jednakową częstotliwość i polaryzację, to ich wektory natężenia pola elektrycznego opisane są równaniami:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \vec{e} A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) \\ E_2 &= \vec{e} A_2 \sin(\omega t + \alpha_2) \end{aligned} \right\} \quad , \quad (4.2)$$

gdzie:  $\vec{e}$  - wektor polaryzacji,  $A_1$  i  $A_2$  - amplitudy drgań wektorów natężenia pola elektrycznego interferujących fal,  $\omega$  - częstotliwośćątowa fal świetlnych,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  - fazy interferujących fal,  $t$  - czas. Fala wypadkowa, w danym punkcie przestrzeni, ma tę samą częstotliwość kątową i polaryzację co fale składowe. Amplituda drgań wektora natężenia pola elektrycznego fali wypadkowej, oznaczona symbolem  $A$ , wyrażona jest równaniem:

$$A = \left[ A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \right]^{\frac{1}{2}} \quad . \quad (4.3)$$

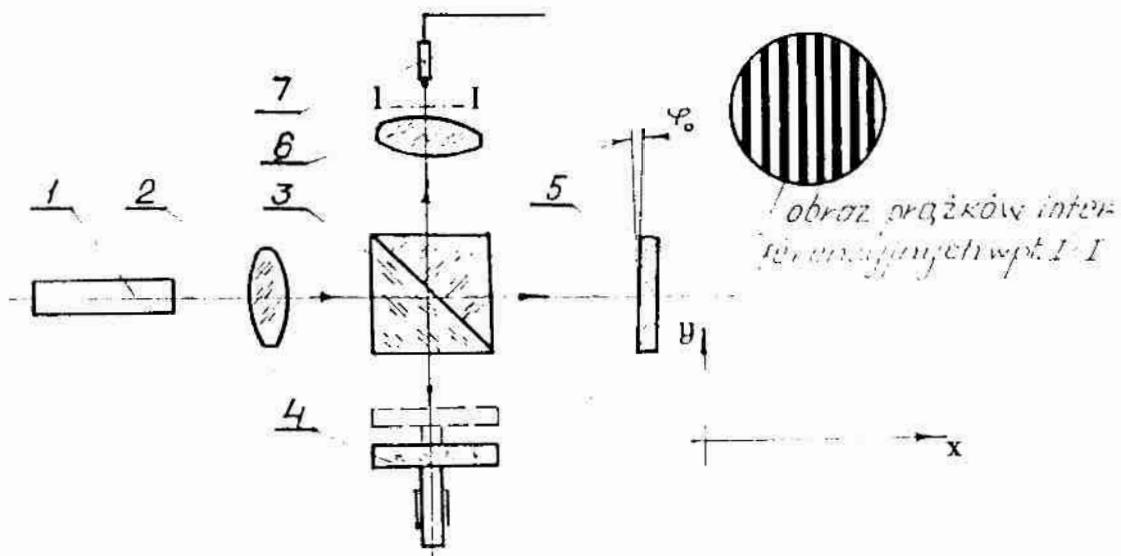


Warunkiem zaobserwowania zjawiska interferencji monochromatycznych fal świetlnych jest ich spójność, czyli stałość różnicy faz interferujących fal w odpowiednich punktach przestrzeni. Zagadnienie spójności fal świetlnych rozpatrzono szczegółowo między innymi w pracach [12], [60]. Szybki wzrost zastosowań metod interferencyjnych, w różnych dziedzinach nauki i techniki, nastąpił od czasu wynalezienia laserów, stanowiących źródła światła o wysokim stopniu spójności. Wynalezienie lasera dało początek interferometrii laserowej, dziedzinie pomiarów interferencyjnych wykorzystującej interferometrię, w których źródłem światła jest laser [35],[73],[94].

#### 4.2. Analiza zagadnienia pomiaru długości za pomocą interferometru laserowego

Interferometry laserowe stosowane są do pomiaru długości metodą porównawczą, polegającą na porównaniu mierzonej długości z długością fali światła laserowego. Pomiar długości interferometrem laserowym dokonywany jest na podstawie wyznaczenia liczby prążków interferencyjnych, odpowiadającej mierzonej długości. Liczbę tę, wyznaczoną w rezultacie pomiarów, mnoży się następnie przez połowę długości fali światła laserowego. Wysoką dokładność pomiarów długości, za pomocą interferometru laserowego, uzyskuje się dzięki dokładnemu wyznaczeniu liczby prążków interferencyjnych oraz dzięki temu, że długość fali światła laserowego określona jest na ogół z dużą dokładnością. Prążki interferencyjne, w interferometrach laserowych, zliczane są w sposób automatyczny podczas przemieszczeń obiektu mierzonego. Układy zliczające prążki, analizują sygnał pomiarowy, uzyskany w wyniku przetworzenia optycznego sygnału interferencyjnego na sygnał elektryczny. Przetwarzanie takie dokonywane jest za pomocą odpowiednich detektorów fotoelektrycznych.

Rozważmy możliwość pomiaru przemieszczeń za pomocą najprostszego jednoczęstotliwościowego interferometru laserowego pracującego w układzie *Twymana-Greena*, którego schemat pokazano na rys.16. Laser 1 emituje quasimonochromatyczną, spolaryzowaną liniowo falę światła, która po przejściu przez kolimator 2 pada na dzielnik wiązki 3 i dzieli się na dwie fale płaskie o równych amplitudach. Jedna z tych fal pada na płaskie zwierciadło ruchome 4, druga zaś na płaskie zwierciadło stałe 5. Fale te po odbiciu od zwierciadeł 4 i 5 powracają do dzielnika wiązki 3. Dzielnik 3 dokonuje podziału każdej z powracających fal na dwie fale. Te fale, które propagują w kierunku okularu 6, interferują ze sobą, dając w rezultacie, widoczny w jego polu widzenia obraz interferencyjny. Dzieje się tak pod warunkiem,



rys.16. Schemat jednoczesnościowego interferometru laserowego;  
 - laser, 2 - kolimator, 3 - dzielnik wiązki, 4 - zwierciadło ru-  
 jące, 5 - zwierciadło stałe, 6 - okular lub projektyw, 7 - dete-  
 ktor fotoelektryczny

Jeżeli różnica dróg optycznych przebytych przez interferujące fale jest większa od długości spójności światła emitowanego przez laser. Jeżeli różnica dróg optycznych przebytych przez obie interferujące fale jest równa zero, zaś powierzchnie odbijające zwierciadeł 4 i 5 tworzą kąt różniący się od  $\frac{\pi}{2}$  radianów o niewielką wartość  $\varphi_0$ , to w okularze 6 można obserwować prążkowy obraz interferencyjny. Natężenie światła, w wybranym punkcie obrazu interferencyjnego, przetwarzane jest na sygnał elektryczny, za pomocą detektora fotoelektrycznego 7.

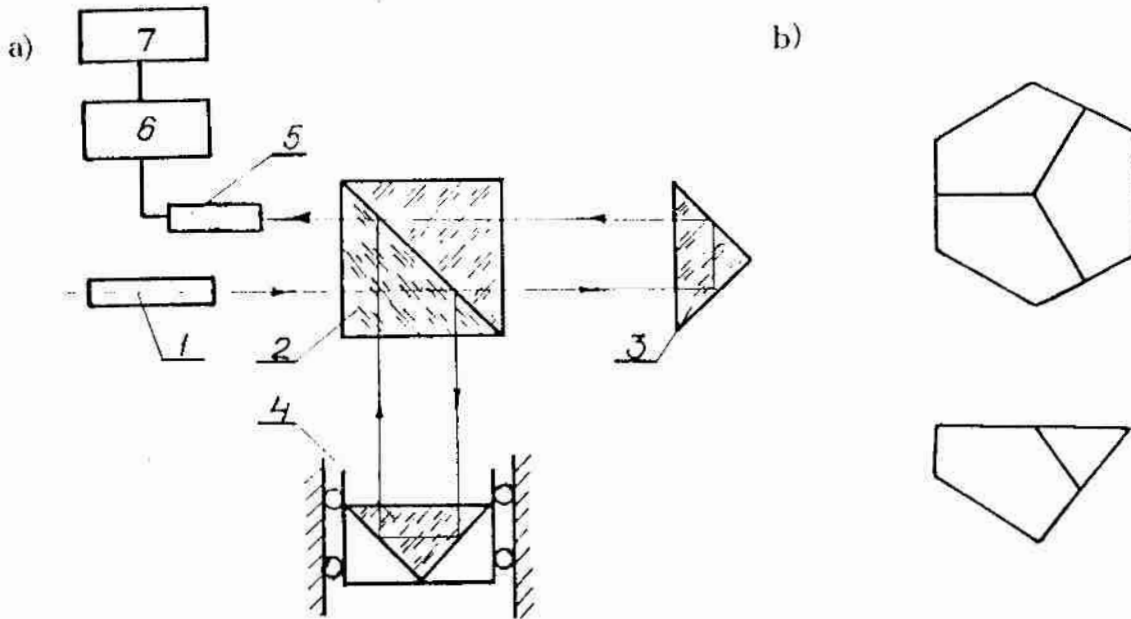
W klasycznych interferometrach, przeznaczonych do pomiaru dużych długości, zwierciadła odbijające zastępuje się specjalnymi przyrządami odbijającymi. Pryzmaty te mają tę właściwość, że wiązka padająca jest dzielona na sześć części, które łączą się w jedną wiązki odbitą, przy czym kierunek wiązki odbitej jest zgodny z kierunkiem wiązki padającej. Schemat interferometru laserowego z pryzmatami odbijającymi oraz schemat pryzmatu pokazano na rys.17.

Natężenie światła  $I$  w obrazie interferencyjnym jest równe kwadratowi amplitudy drgań wektora natężenia pola elektrycznego fali padkowej. Korzystając z równania (4.3) można zapisać:

$$I = A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1) . \quad (4.4)$$

Względniając fakt, iż amplitudy interferujących fal są jednakowe, czyli że  $A_1 = A_2 = A_0$ , otrzymuje się:

$$I = A^2 = 2A_0^2 \left[ 1 + \cos(\alpha_2 - \alpha_1) \right] . \quad (4.5)$$



rys.17. Schematy: a) interferometru laserowego z pryzmatami odbijającymi; b) pryzmatu odbijającego; 1 - laser, 2 - dzielnik wiązki, 3 - pryzmat odbijający stały, 4 - pryzmat odbijający ruchomy, 5 - fotoelektryczny układ detekcyjny, 6 - układ formujący impulsy, 7 - licznik impulsów

Różnica faz interferujących fal jest proporcjonalna do różnicy dróg optycznych przebytych przez te fale i wyraża się równaniem:

$$\alpha_2 - \alpha_1 = \frac{2\pi}{\lambda_v} \delta_l \quad (4.6)$$

gdzie:  $\lambda_v$  - długość fali światła emitowanego przez laser w próżni,  $\delta_l$  - różnica dróg optycznych interferujących fal. Droga optyczna jest iloczynem drogi geometrycznej, przebytej przez falę świetlną, współczynnika załamania światła środowiska, w którym następuje propagacja fali. Równanie (4.5) może być zatem zapisane w postaci:

$$I = A^2 = 2A_0^2 \left( 1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda_v} \delta_l \right) = 4A_0^2 \cos^2 \left[ \frac{\pi \delta_l}{\lambda_v} \right] \quad (4.7)$$

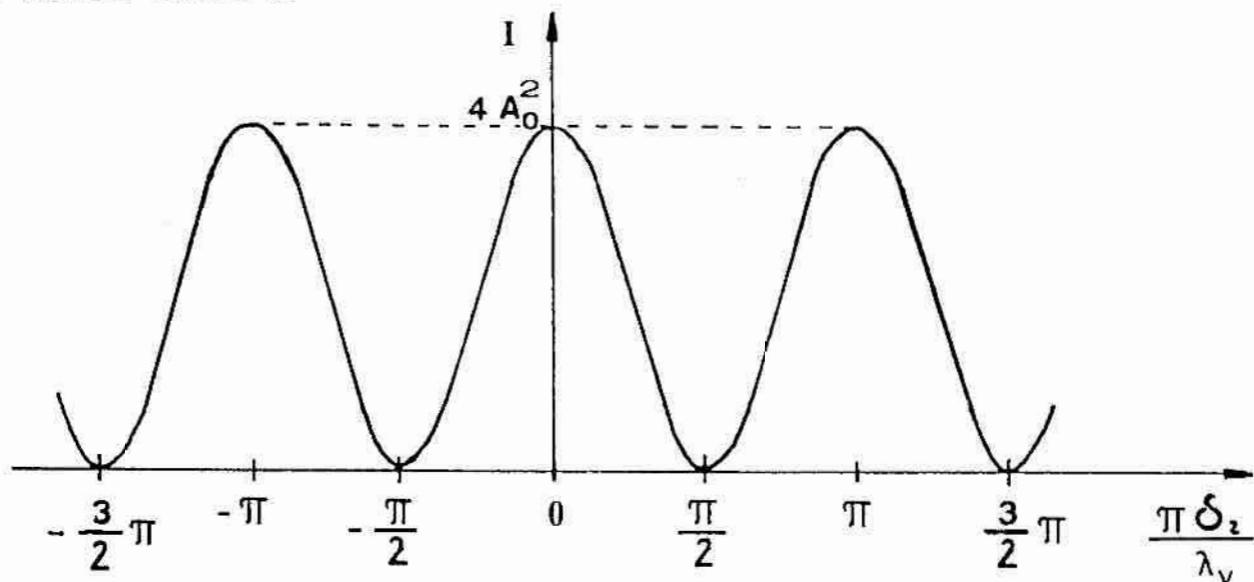
wyraża ono zależność natężenia światła w obrazie interferencyjnym od różnicy faz interferujących fal. Zależność tę w postaci graficznej pokazano na rys.18.

Niech zwierciadło 4, w interferometrze pokazanym na rys.16, przemieszcza się w kierunku zgodnym z kierunkiem propagacji fali świetlnej padającej na to zwierciadło. Wtedy różnica dróg optycznych  $\delta_l$ , w danej chwili czasu  $t$ , będzie zależna od położenia

uchomego zwierciadła interferometru. Równanie (4.7) może być zatem zapisane następująco:

$$I(t) = 4A_0^2 \cos^2 \left[ \frac{\pi \delta_L(t)}{\lambda_V} \right], \quad (4.8)$$

gdzie:  $I(t)$  - natężenie światła w wybranym punkcie obrazu interferencyjnego w danej chwili czasu  $t$ ,  $\delta_L(t)$  - różnica dróg optycznych w chwili czasu  $t$ .



rys.18. Zależność natężenia światła w obrazie interferencyjnym od różnicy faz interferujących fal

Długość fali światła laserowego w powietrzu  $\lambda_L$ , jest określona jako stosunek długości fali światła w próżni do współczynnika załamania światła powietrza. Uwzględniając powyższe, można w równaniu (4.8), zastąpić różnicę dróg optycznych interferujących fal, podwójną różnicą między położeniem ruchomego zwierciadła interferometru w chwili czasu  $t$  i początkowym położeniem tego zwierciadła w chwili czasu  $t_0 = 0$ . Oznaczając położenie zwierciadła w chwili czasu  $t$  symbolem  $y(t)$  i przyjmując układ współrzędnych tak aby początkowemu położeniu zwierciadła  $y(t_0)$  odpowiadała wartość równa zero, równanie (4.8) można zapisać w postaci :

$$I(t) = I_{max} \cos^2 \left[ \frac{2\pi}{\lambda_L} y(t) \right], \quad (4.9)$$

przy czym  $I_{max} = 4A_0^2$ , zaś  $\lambda_L$  jest długością fali światła laserowego w powietrzu.

Założmy, że podczas przemieszczeń zwierciadła interferometru zarejestrowano, po uprzednim przetworzeniu za pomocą detektora fotoelektrycznego, odpowiadający tym przemieszczeniom zmienny sygnał z

interferometru. Będzie on proporcjonalny do natężenia światła w wybranym punkcie obrazu interferencyjnego. Powstaje pytanie: czy na podstawie zarejestrowanego sygnału, zwanego interferogramem, można określić przemieszczenia zwierciadła interferometru? W ogólnym przypadku odpowiedź na to pytanie jest negatywna, gdyż funkcja  $\cos^2$ , stojąca z prawej strony równania (4.9), nie jest, w całej swej dziedzinie, funkcją różnowartościową czyli jednojednoznaczną. Funkcja  $\cos^2$ , występująca w równaniu (4.9), jest różnowartościowa czyli jednojednoznaczna tylko wtedy, gdy przemieszczenia zwierciadła interferometru  $(t) = y(t) - y(t_0)$  spełniają jedną z nierówności:

$$0 \leq s(t) \leq \frac{\lambda_L}{4}, \quad (4.10)$$

$$-\frac{\lambda_L}{4} \leq s(t) \leq 0. \quad (4.11)$$

Powyższe nierówności dotyczyć będą położenia  $y(t)$  zwierciadła interferometru w przypadku, gdy  $y(t_0)$  jest równe zeru. Wtedy  $s(t) = y(t)$ . W dzieleniu, w ogólnym przypadku, pozytywnej odpowiedzi na postawione wcześniej pytanie jest możliwe, jeżeli podczas ruchu zwierciadła interferometru zostaną zarejestrowane dwa interferogramy, przesunięte względem siebie o kąt fazowy równy  $\frac{\pi}{2}$  rad. Tak rozwiązany jest ten problem w większości interferometrów laserowych produkowanych obecnie [22], [35]. W praktyce wymaga to umieszczenia w interferometrze odpowiednio zorientowanych ćwierćfalówek i filtrów polaryzacyjnych oraz rejestracji interferogramów za pomocą dwóch detektorów fotoelektrycznych. W przypadku, gdy ruch zwierciadła interferometru jest okresowy, tak jak jest to pożądane podczas sprawdzania przrządów stykowych za pomocą stolików wibracyjnych, mamy do czynienia z sytuacją szczególną, która zostanie przeanalizowana w następnym punkcie.

### 3. Analiza sygnału interferencyjnego przy okresowym ruchu zwierciadła interferometru

Analizując postać sygnału interferencyjnego, uzyskiwanego podczas okresowego ruchu zwierciadła interferometru, można założyć, że zwierciadło interferometru przemieszcza się w ten sposób, iż funkcja  $(t)$ , występująca z prawej strony równania (4.9), spełnia warunek:

$$y(t) = y(t + T), \quad (4.12)$$

przy czym okres  $T > 0$ . Zauważmy, że funkcja  $I(t)$ , stojąca z lewej

strony równania (4.9), jest również funkcją okresową o okresie równym  $T$ . Wynika to z następującego rozumowania. Jeśli równanie (4.9) zostanie zapisane dla chwili czasu  $t_i = t + T$ , to otrzymamy:

$$I(t + T) = I_{\max} \cos^2 \left[ \frac{2\pi}{\lambda_l} y(t + T) \right]. \quad (4.13)$$

W przypadku, gdy spełniony jest warunek (4.12), równanie (4.13) może być także zapisane w postaci:

$$I(t + T) = I_{\max} \cos^2 \left[ \frac{2\pi}{\lambda_l} y(t) \right]. \quad (4.14)$$

Porównując prawe strony równań (4.14) i (4.9) widać, że:

$$I(t) = I(t + T), \quad (4.15)$$

sygnał interferencyjny jest więc okresowy, a jego okres jest również równy  $T$ . Na ogół przemieszczenia zwierciadła interferometru w czasie jednego okresu drgań odbywają się w ten sposób, że można wyróżnić przedziały czasu, w których przemieszczenia te są ściśle monotoniczne. W danym przedziale czasu, w którym funkcja  $y(t)$  jest ściśle monotoniczna, przemieszczenie zwierciadła interferometru może być wyznaczane jako suma elementarnych przemieszczeń w tym przedziale.

Niech początek przedziału czasu, w którym należy wyznaczyć przemieszczenia zwierciadła oznaczony zostanie symbolem  $t_0$ , zaś koniec tego przedziału czasu symbolem  $t_n$ . Niech ponadto przedział czasu od  $t_0$  do  $t_n$  będzie podzielony na  $n$  elementarnych przedziałów czasu  $dt$ . Wtedy przemieszczenie zwierciadła, które zaszło w czasie od  $t_0$  do  $t_n$  może być wyrażone równaniem:

$$y(t_n) - y(t_0) = \sum_{i=1}^n ds_i, \quad (4.16)$$

gdzie:  $y(t_n)$ ,  $y(t_0)$  - położenia zwierciadła interferometru w chwilach  $t_n$  i  $t_0$ ;  $ds_i$  - przemieszczenie zwierciadła interferometru w elementarnym  $i$ -tym przedziale czasu  $dt$ . Przemieszczenia  $ds_i$  określa równanie:

$$ds_i = y(t_i) - y(t_{i-1}) = y(t_i) - y(t_i - dt), \quad (4.17)$$

gdzie:  $y(t_i)$ ,  $y(t_{i-1})$ ,  $y(t_i - dt)$  - położenia zwierciadła interferometru w odpowiednich chwilach czasu. Położenie zwierciadła interferometru względem wybranego układu odniesienia w dowolnej chwili czasu  $t$  można wyznaczyć z równania:

$$y(t) = (N + \varepsilon) \frac{\lambda_l}{4}, \quad (4.18)$$

zie:  $N$  - całkowita liczba jasnych i ciemnych prążków interferencyjnych, które przemieszczają się w obrazie interferencyjnym przy ruchu zwierciadła interferometru od początku wybranego układu odniesienia do położenia  $y(t)$ ;  $\varepsilon$  - ułamkowa część odległości między jasnym i ciemnym prążkiem interferencyjnym, o którą przemieszcza się obraz interferencyjny przy ruchu zwierciadła interferometru od początku wybranego układu odniesienia do położenia  $y(t)$ ;  $\lambda_l$  - długość fali światła laserowego w powietrzu.

Jeśli elementarne przemieszczenia zwierciadła są niewielkie, tzn. są znacznie mniejsze niż  $\lambda_l/4$ , to równanie (4.17) można pisać w postaci:

$$ds_i = (N + \varepsilon_i) \frac{\lambda_l}{4} - (N + \varepsilon_{i-1}) \frac{\lambda_l}{4} = (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) \frac{\lambda_l}{4}, \quad (4.19)$$

zie:  $\varepsilon_i, \varepsilon_{i-1}$  - ułamkowe części odległości między jasnym i ciemnym prążkiem interferencyjnym, odpowiadające położeniom zwierciadła interferometru w chwilach  $t_i$  i  $t_{i-1}$ . Liczba  $N$  jest jednakowa dla obu położeniach zwierciadła interferometru. Położenia zwierciadła interferometru, odpowiadające ułamkowym częściom odległości między prążkami, można wyznaczyć z przekształconego równania (4.9):

$$\varepsilon \frac{\lambda_l}{4} = \frac{\lambda_l}{2\pi} \arccos \left[ \frac{I(t)}{I_{max}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4.20)$$

zgodnie z równaniami (4.19) i (4.20) otrzymano:

$$|ds_i| = \frac{\lambda_l}{2\pi} \left| \arccos \left[ \frac{I(t_i)}{I_{max}} \right]^{\frac{1}{2}} - \arccos \left[ \frac{I(t_{i-1})}{I_{max}} \right]^{\frac{1}{2}} \right|. \quad (4.21)$$

Wartość bezwzględna różnicy, występująca z prawej strony równania (4.21), pojawia się z uwagi na to, że interferogram nie musi być rozpatrywanym zakresie przemieszczeń funkcją jednojednoznaczna. Wartość bezwzględna, występująca z lewej strony równania (4.21), jest konsekwencją tego, że interferogram pozwala jedynie na wyznaczanie bezwzględnych wartości elementarnych przemieszczeń zwierciadła interferometru. Ponieważ rozpatrywane są przemieszczenia zwierciadła interferometru w przedziale czasu, w którym funkcja  $y(t)$  jest ściśle monotoniczna, to równanie (4.16) może być przedstawione następująco:

$$y(t_n) - y(t_0) = \operatorname{sgn} \left[ \frac{dy(t)}{dt} \right] \frac{\lambda_l}{2\pi} \times$$

$$\times \sum_{i=1}^n \left| \arccos \left[ \frac{I(t_i)}{I_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} - \arccos \left[ \frac{I(t_{i-1})}{I_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} \right|. \quad (4.22)$$

Funkcja  $\operatorname{sgn}$ , występująca w równaniu (4.22), zależy od znaku pochodnej funkcji  $y(t)$  i określa kierunek przemieszczenia zwierciadła interferometru. Jest ona równa:

$$\operatorname{sgn} \left[ \frac{dy(t)}{dt} \right] = \begin{cases} -1, & \text{jeśli } \frac{dy(t)}{dt} < 0, \\ 0, & \text{jeśli } \frac{dy(t)}{dt} = 0, \\ 1, & \text{jeśli } \frac{dy(t)}{dt} > 0. \end{cases} \quad (4.23)$$

Z równania (4.22) wynika, że bezwzględne wartości przemieszczeń, w przedziale monotoniczności funkcji  $y(t)$ , mogą być określone na podstawie interferogramu. Jeżeli znany będzie kierunek przemieszczeń w poszczególnych przedziałach monotoniczności funkcji, to równanie (4.22) będzie można również wykorzystać do wyznaczenia przemieszczeń w dowolnym przedziale czasu.

Można łatwo zauważyć, że dla funkcji okresowych, opisujących ruch zwierciadła interferometru, wystarczy wyróżnić przedziały ścisłej monotoniczności funkcji  $y(t)$  oraz określić znak pochodnej  $y'(t)$  w tych przedziałach. Wtedy można posłużyć się równaniem (4.22) do wyznaczenia przemieszczeń zwierciadła w dowolnym przedziale czasu. Równanie (4.22) pozwala także na wyznaczenie położenia zwierciadła interferometru w chwili czasu  $t_n$ , pod warunkiem, że znane jest położenie zwierciadła w chwili czasu  $t_0$ . Wynika to z równania:

$$y(t_n) = y(t_0) + \operatorname{sgn} \left[ \frac{dy(t)}{dt} \right] \frac{\lambda_l}{2\pi} \times$$

$$\times \sum_{i=1}^n \left| \arccos \left[ \frac{I(t_i)}{I_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} - \arccos \left[ \frac{I(t_{i-1})}{I_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} \right|. \quad (4.24)$$

Jeżeli założyć, tak jak uczyniono to w p.4.2, że  $y(t_0) = 0$ , to równanie (4.24) przyjmie postać:



$$y(t_n) = \operatorname{sgn} \left[ \frac{dy(t)}{dt} \right] \frac{\lambda_l}{2\pi} \times$$

$$\times \sum_{i=1}^n \left| \arccos \left[ \frac{I(t_i)}{I_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} - \arccos \left[ \frac{I(t_{i-1})}{I_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} \right|. \quad (4.25)$$

rownanie (4.25) umożliwia wyznaczenie funkcji  $y(t)$  na podstawie zarejestrowanego interferogramu i jest dogodnie do obliczeń numerycznych. Korzystanie z równania (4.25) wymaga znajomości funkcji  $\operatorname{sgn}[y'(t)]$  określającej znak pochodnej równania ruchu  $y(t)$ . Dla wielu funkcji okresowych, opisujących ruchu zwierciadła interferometru, znak pochodnej może być wyznaczony w prosty sposób.

W przypadku harmonicznego ruchu zwierciadła interferometru równanie ruchu zwierciadła ma postać:

$$y(t) = a \sin(\Omega t + \varphi), \quad (4.26)$$

gdzie  $\Omega = 2\pi f = 2\pi/T$ , gdzie:  $y(t)$  - położenie zwierciadła w chwili czasu  $t$ ,  $a$  - amplituda drgań mechanicznych zwierciadła,  $\Omega$  - częstość kątowa drgań zwierciadła,  $\varphi$  - faza początkowa,  $T$  - okres drgań,  $f$  - częstość drgań. Przypadek ten odpowiada pobudzeniu stolika wibracyjnego sygnałem sinusoidalnym, tak jak ma to miejsce przy sprawdzaniu błędu powiększenia pionowego profilografów oraz błędów wskazań i charakterystyki przenoszenia profilometrów.

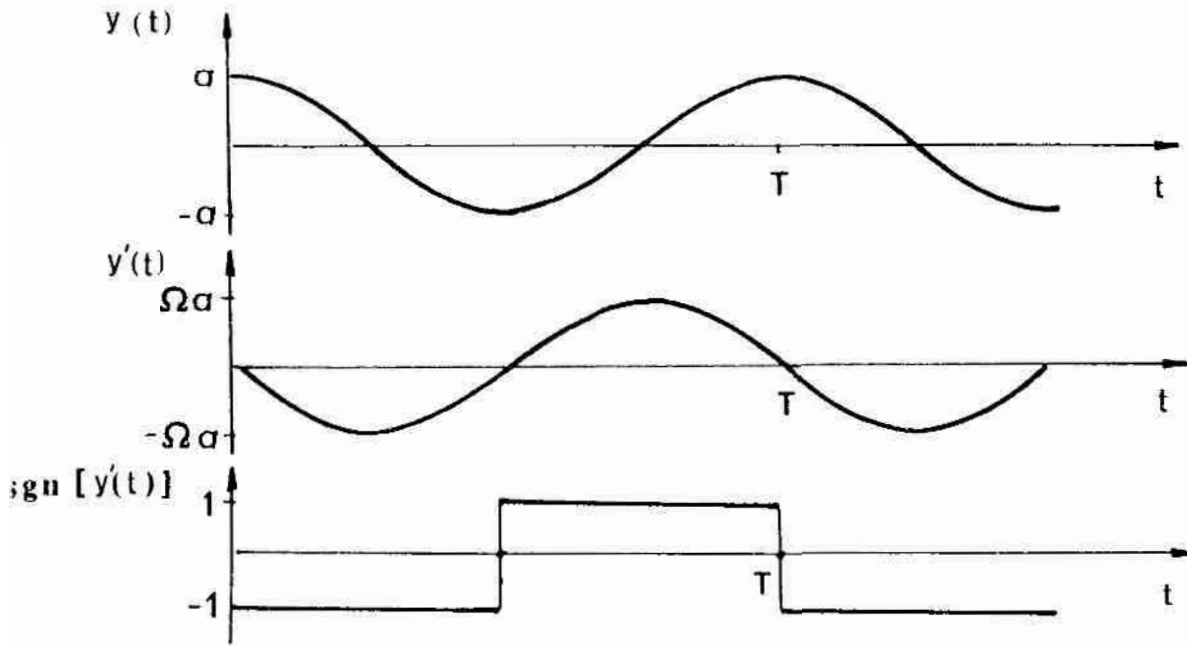
Jeśli w równaniu (4.26) faza początkowa  $\varphi$  będzie równa  $\frac{\pi}{2}$  rad, to równanie ruchu zwierciadła interferometru przyjmuje postać:

$$y(t) = a \cos \Omega t. \quad (4.27)$$

Ponieważ funkcja cosinus, stojąca z prawej strony równania (4.27), jest malejąca w przedziale czasu od 0 do  $\frac{T}{2}$  i rosnąca w przedziale od  $\frac{T}{2}$  do  $T$ , to elementarne przemieszczenia zwierciadła, określone na podstawie interferogramu, w pierwszym z tych przedziałów, będą odejmowane od położenia początkowego. W drugim przedziale monotoniczności funkcji cosinus elementarne przemieszczenia zwierciadła będą dodawane do najniższego położenia zwierciadła. Wynika to stąd, że pochodna  $y'(t)$ , funkcji danej równaniem (4.27), jest równa:

$$y'(t) = \frac{dy(t)}{dt} = -\Omega a \sin \Omega t. \quad (4.28)$$

Funkcja znaku tej pochodnej, zgodnie z równaniem (4.23), jest równa  $-1$ , w przedziale argumentu  $t$  od 0 do  $\frac{T}{2}$ . W przedziale argumentu  $t$  od  $\frac{T}{2}$  do  $T$  funkcja ta ma wartość  $+1$ . Na rys.19 pokazano wykresy równania ruchu (4.27), jego pochodnej (4.28) i funkcji  $\operatorname{sgn}[y'(t)]$ .



rys.19. Wykresy równania ruchu harmonicznego zwierciadła interferometru, pochodnej równania ruchu, oraz funkcji znaku pochodnej

Interferogram otrzymywany przy harmonicznym ruchu zwierciadła interferometru opisany jest równaniem (4.29):

$$I(t) = I_{max} \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda_l} a \cos \Omega t\right] \quad (4.29)$$

W celu przeanalizowania postaci interferogramu w zależności od parametrów okresowych drgań harmonicznycch, w dalszej części pracy, przeprowadzono modelowanie tego sygnału metodami numerycznymi.

#### 4. Modelowanie interferogramów przy okresowym ruchu zwierciadła interferometru

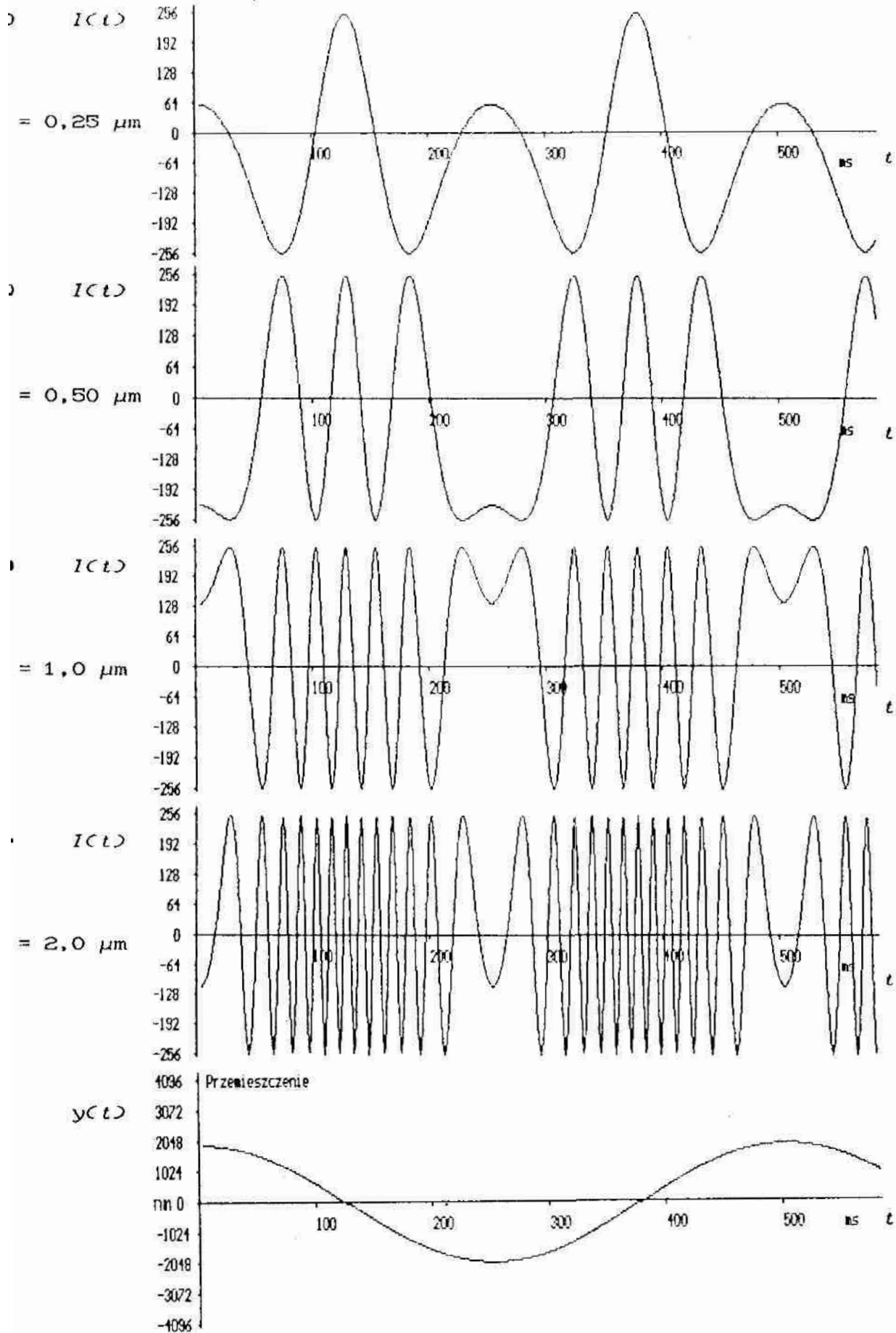
W celu określenia postaci i parametrów interferogramów, otrzymywanych przy okresowym ruchu zwierciadła interferometru laserowego, postanowiono opracować odpowiedni algorytm i program obliczeń numerycznych. Algorytm opracowano tak, aby pozwalał on wyznaczać wartości natężenia światła  $I(t)$  w obrazie interferencyjnym, przy zadanym równaniu ruchu  $y(t)$  zwierciadła interferometru, zgodnie z funkcją (4.29). W szczególności algorytm ten umożliwia wyznaczanie interferogramów  $I(t)$  przy harmonicznym ruchu zwierciadła interferometru, czyli zgodnie z równaniem (4.29). Procedury obliczeń numerycznych wg opracowanego algorytmu napisano w języku *Pascal Turbo v.5.0*. Wybrane przykłady modelowania pokazano na rys.20, 21, 22, 23. Na rys.20a,b,c,d pokazano interferogramy otrzymane w wyniku modelowania, uzyskane dla

ichu harmonicznego zwierciadła interferometru o stałej częstotliwości i różnych amplitudach. Podziałkę na osi natężenia światła zjęto w ten sposób, aby wartość zerowa odpowiadała połowie największego natężenia światła w obrazie interferencyjnym. Na rys.20e pokazano wykres równania ruchu harmonicznego dla amplitudy równej  $\mu\text{m}$ . Rys.21 pokazuje podobne interferogramy jak na rys.20, ale wyznaczone dla innej długości fali światła użytego w interferometrze serowym. Na rys.22 pokazano interferogramy wyznaczone dla ruchu harmonicznego zwierciadła interferometru o stałej amplitudzie i różnych częstotliwościach drgań zwierciadła. Rys.23 pokazuje interferogramy wyznaczone w przypadku, gdy zwierciadło interferometru wykonuje drgania okresowe o przebiegu piłokształtnym, z amplitudą równą  $a_\rho$ . Przemieszczenie zwierciadła modelowano wtedy funkcją o równaniu:

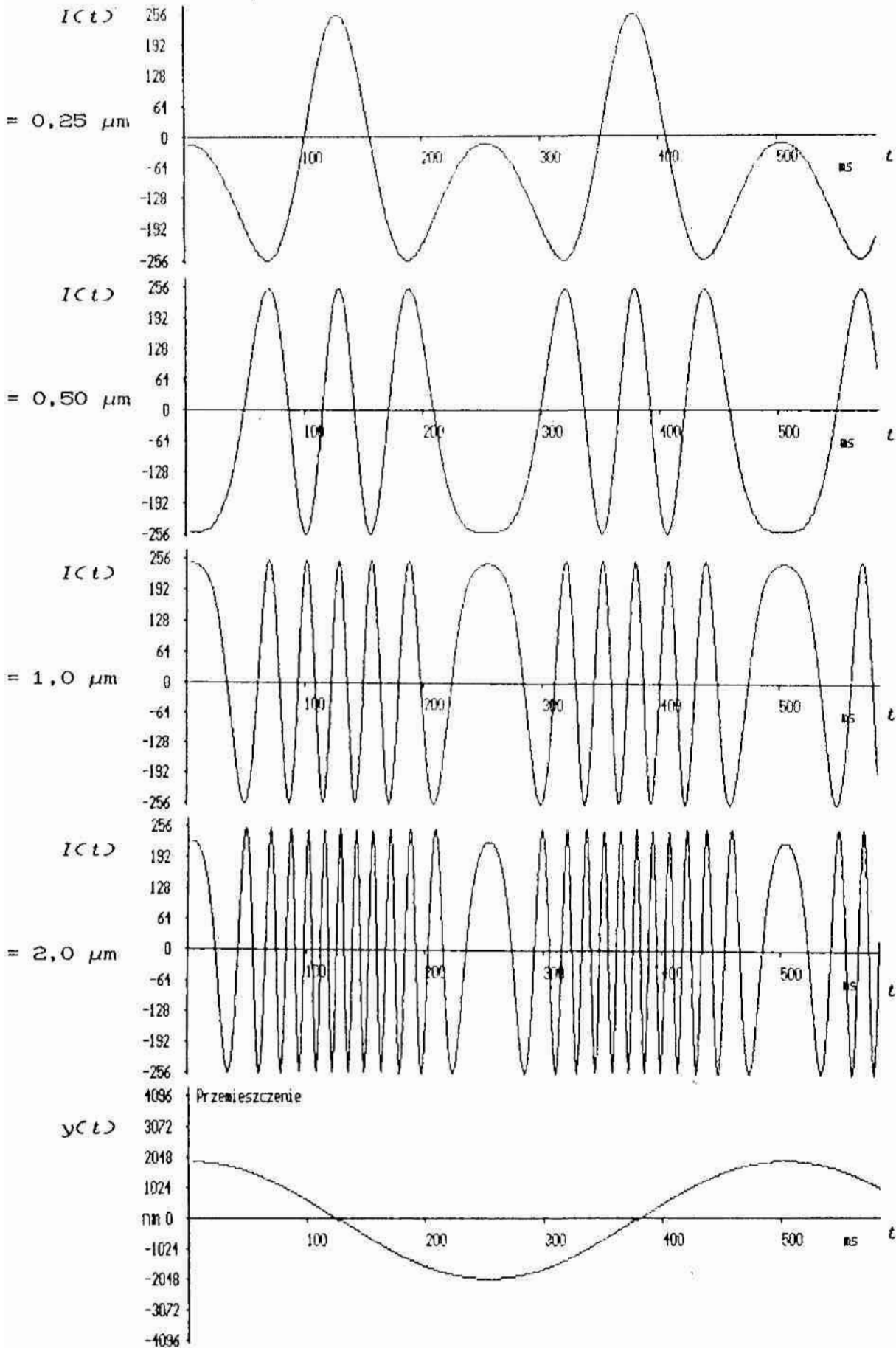
$$y(t) = \begin{cases} \frac{4a_\rho}{T} t & , \text{ dla } 0 \leq t \leq \frac{T}{4} , \\ -\frac{4a_\rho}{T} t + 2a_\rho & , \text{ dla } \frac{T}{4} \leq t \leq \frac{3}{4} T , \\ \frac{4a_\rho}{T} t - 4a_\rho & , \text{ dla } \frac{3}{4} T \leq t \leq T , \end{cases} \quad (4.30)$$

zle:  $a_\rho$  - amplituda drgań piłokształtnych,  $T$  - okres drgań.

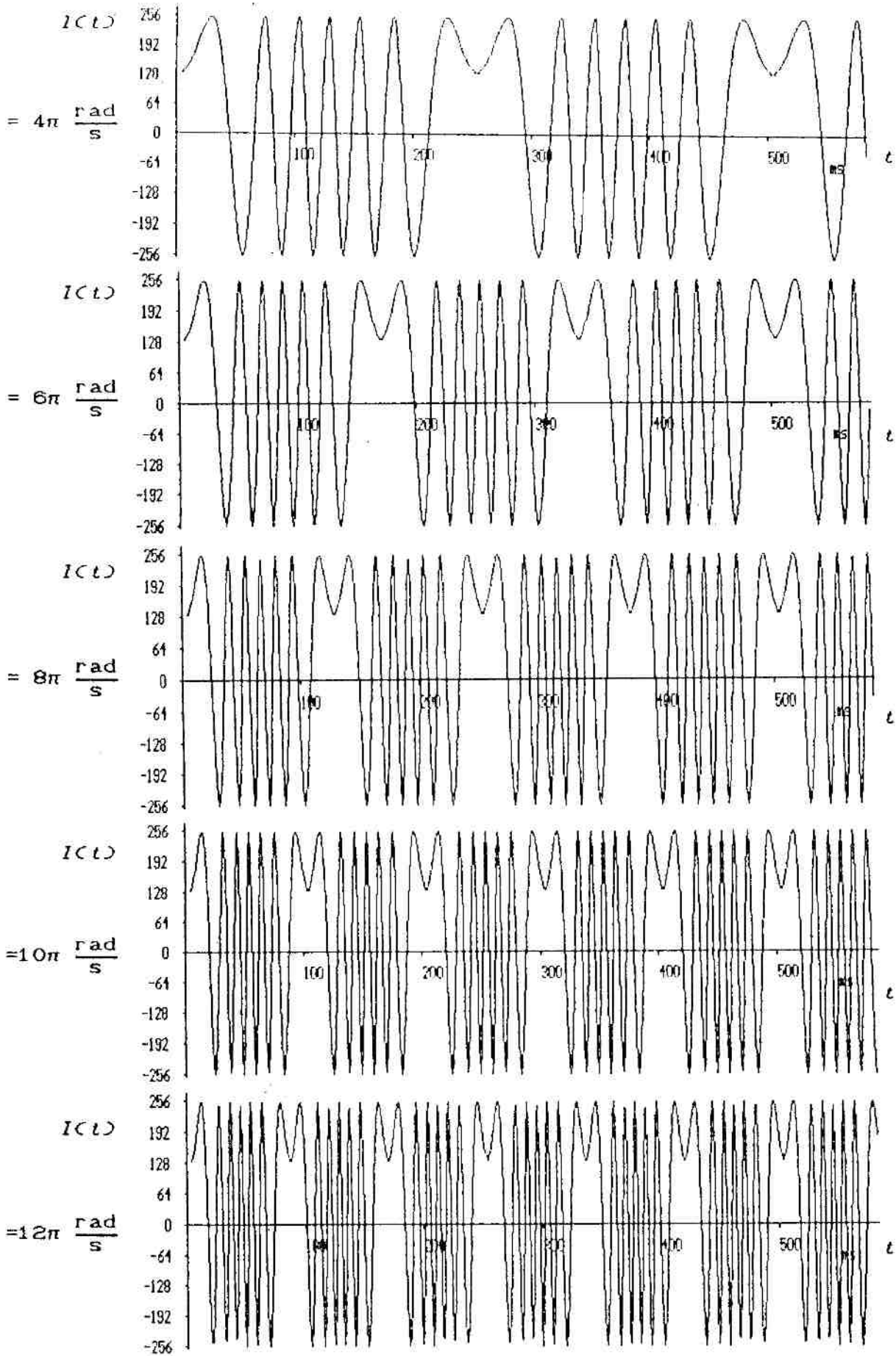
Jak wynika z przedstawionych interferogramów wzrost amplitudy drgań okresowych zwierciadła powoduje zwiększenie częstości sygnału interferencyjnego i zmianę jego postaci. Wzrost częstotliwości drgań także zwiększa częstość sygnału interferencyjnego lecz nie zmienia jego postaci. Inaczej mówiąc, interferogramy wyznaczone dla różnych częstotliwości drgań, przy tej samej amplitudzie różnią się jedynie działką na osi czasu, zaś ich kształt jest identyczny. Jeżeli zmienia się postać równania ruchu, zmienia się też kształt interferogramu. Na wszystkich interferogramach wyraźnie widoczne są punkty, które odpowiadają krańcom przedziałów monotoniczności równania ruchu zwierciadła interferometru. Szczególnie wyraźnie widać to w przykładzie, gdy ruch zwierciadła jest ruchem harmonicznym. Wynika z tego, że interferogramy uzyskane przy okresowym pobudzeniu zwierciadła interferometru mogą być podstawą do wyznaczenia przemieszczeń zwierciadła. Jak już wykazano wcześniej, warunkiem wyznaczenia okresowych przemieszczeń zwierciadła na podstawie interferogramu jest znajomość wyznaczenia punktu pochodnej równania ruchu w każdym z przedziałów jego ściślejszej monotoniczności.



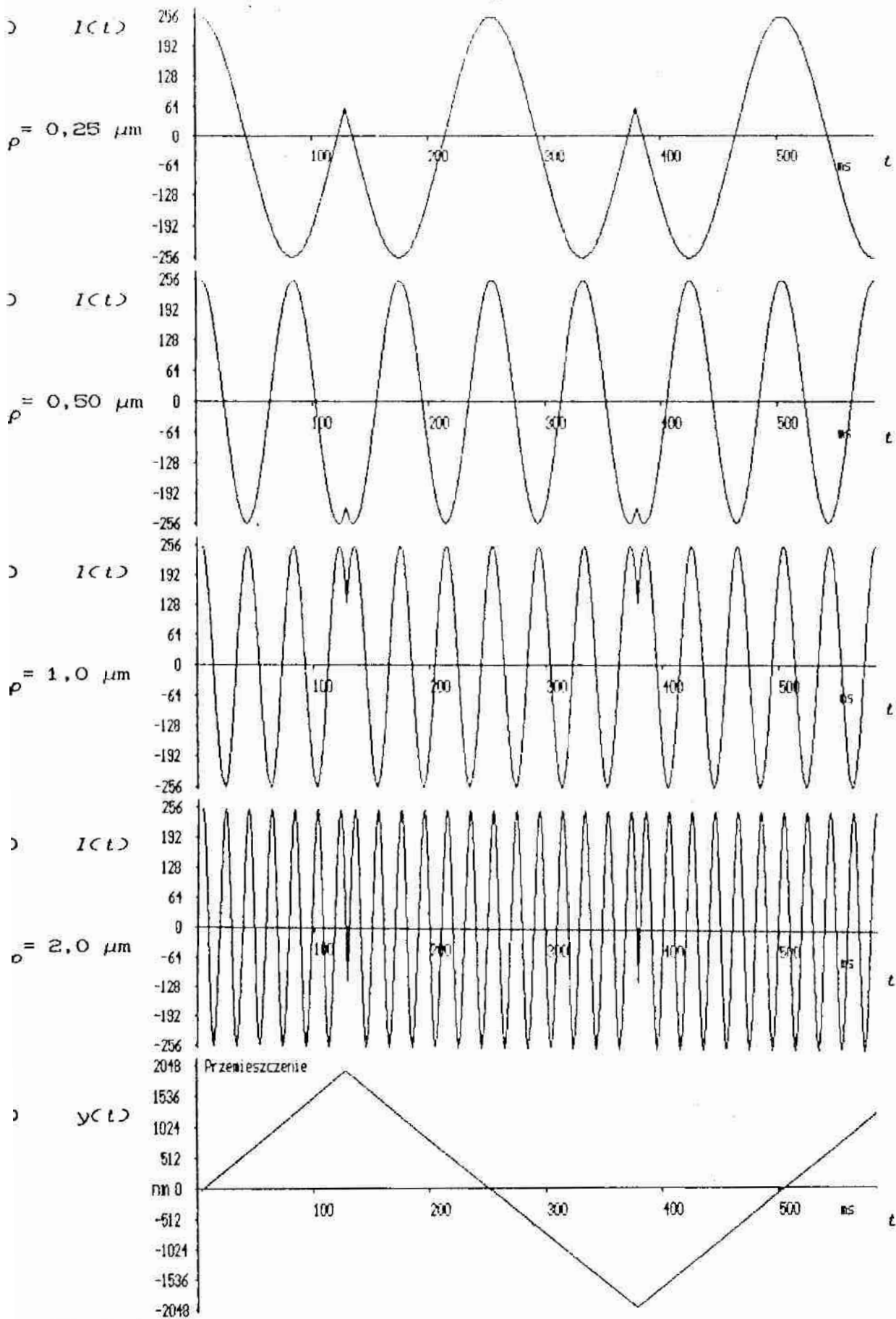
rys. 20. Interferogramy otrzymane w wyniku modelowania równania (4.29), dla  $\Omega = 4\pi \text{ rad/s}$ ,  $\lambda_1 = 0,6328 \mu\text{m}$  i różnych amplitud  $\alpha$ , a), b), c), d); funkcja równania ruchu zwierciadła interferometru określona równaniem (4.27), dla amplitudy  $\alpha = 2,0 \mu\text{m}$ , e)



s. 21. Interferogramy otrzymane w wyniku modelowania równania (2.29), dla  $\Omega = 4\pi \text{ rad/s}$ ,  $\lambda_l = 0,6753 \mu\text{m}$  i różnych amplitud  $\alpha$ , a), b), c), d); funkcja równania ruchu zwierciadła interferometru określona równaniem (4.27), dla amplitudy  $\alpha = 2,0 \mu\text{m}$ , e)



s.22. Interferogramy uzyskane w wyniku modelowania równania (4.29), a  $\lambda_2 = 0,6328 \mu\text{m}$ ,  $\alpha = 1,0 \mu\text{m}$  i różnych częstotliwości kątowych  $\Omega$



rys. 23. Interferogramy otrzymane dla różnych amplitud  $\alpha$  w wyniku obdelowania równania (4.9) przy założeniu, że ruch zwierciadła opisany jest zależnością (4.30) oraz, że  $\lambda_l = 0,6328 \mu\text{m}$  i  $T = 500 \text{ ns}$ , a), b), c), d); równanie ruchu zwierciadła interferometru określone zależnością (4.30) dla  $\alpha = 2 \mu\text{m}$ , e)

5. Analiza błędów pomiaru przemieszczeń okresowych za pomocą interferometru laserowego

W p. 4.3 wykazano, że pomiar przemieszczeń zwierciadła interferometru laserowego w ruchu okresowym może być dokonany na podstawie interferogramu, zgodnie z równaniem (4.22). Podobnie, bo zgodnie z równaniem (4.25), można wyznaczyć na podstawie interferogramu położenie zwierciadła interferometru w danej chwili czasu  $t$ . Ważne jest przy tym oszacowanie błędów pomiaru przemieszczeń i położenia zwierciadła. Poniżej przedstawiono analizę błędów pomiaru przemieszczeń i położenia podczas ruchu okresowego zwierciadła interferometru.

Analiza równań (4.22) i (4.25) oraz sumy algebraicznej elementarnych przemieszczeń zwierciadła, prowadzi do spostrzeżenia, że lewe strony tych równań można przedstawić w postaci:

$$\begin{aligned} & \operatorname{sgn} \left[ \frac{dy(t)}{dt} \right] \frac{\lambda_l}{2\pi} \sum_{i=1}^n \left| \arccos \left[ \frac{I(t_i)}{I_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} - \arccos \left[ \frac{I(t_{i-1})}{I_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} \right| = \\ & = \frac{\lambda_l}{4} N_1 + s_p + s_k \end{aligned} \quad (4.31)$$

gdzie:  $N_1$  - liczba całkowita, wynikająca z podziału odległości między początkowym i końcowym położeniem zwierciadła przez ćwierć długości fali światła laserowego,  $s_p$  - przemieszczenie zwierciadła od położenia początkowego do położenia odpowiadającego pierwszemu, jasnemu lub ciemnemu, zarejestrowanemu prążkowi interferencyjnemu,  $s_k$  - przemieszczenie zwierciadła interferometru od położenia odpowiadającego statniemu, jasnemu lub ciemnemu, zarejestrowanemu prążkowi interferencyjnemu, do końcowego położenia zwierciadła. Wartości  $N_1$ ,  $s_p$  i  $s_k$  określone są równaniami:

$$N_1 = E \left[ \frac{y(t_n) - y(t_0)}{\frac{\lambda_l}{4}} \right], \text{ lub } N_1 = E \left[ \frac{y(t_n) - y(t_0)}{\frac{\lambda_l}{4}} \right] - 1, \quad (4.32)$$

$$s_p = \operatorname{sgn} \left[ \frac{dy(t)}{dt} \right] \frac{\lambda_l}{2\pi} \left| \arccos \left[ \frac{I(t_0)}{I_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} - C \right|, \quad (4.33)$$

$$s_k = \operatorname{sgn} \left[ \frac{dy(t)}{dt} \right] \frac{\lambda_l}{2\pi} \left| \arccos \left[ \frac{I(t_n)}{I_{\max}} \right]^{\frac{1}{2}} - C \right|, \quad (4.34)$$

gdzie:  $E$  - oznacza funkcję entier (część całkowitą liczby rzeczywistej),  $C$  - stała mogąca przyjmować wartości  $\frac{\pi}{2}$  lub 0.



Uwzględniając równania (4.31) i (4.22), przemieszczenie zwierciadła można zapisać następująco:

$$s = y(t_n) - y(t_0) = \frac{\lambda_l}{4} N_1 + s_p + s_k \quad (4.35)$$

Analiza równań (4.35), (4.34) i (4.33) prowadzi do wniosku, że błąd pomiaru przemieszczenia  $s$  zależy od błędu odtwarzania długości fali światła laserowego oraz od błędów pomiaru sygnału interferencyjnego. Wartość bezwzględna błędu pomiaru przemieszczenia za pomocą interferometru laserowego, zgodnie z prawem sumowania się błędów lub liniowej propagacji błędów [21], [52], może być zapisana w postaci:

$$|\Delta s| = |\Delta s_\lambda| + |\Delta s_I| \quad (4.36)$$

czyli czym

$$|\Delta s_\lambda| = \left| \frac{\Delta \lambda_l}{4} N_1 \right| + \left| \frac{\Delta \lambda_l}{2} \right| \quad (4.37)$$

$$|\Delta s_I| = \left| \frac{-\lambda_l \Delta I}{2\pi \left[ 1 - \frac{I(t)}{I_{max}} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{I(t)}{I_{max}} \right]^{\frac{1}{2}}} \right|, \text{ dla } 0 < \frac{I(t)}{I_{max}} < 1 \quad (4.38)$$

przy założeniu, że  $I(t) = I(t_0) = I(t_n)$ ,

gdzie:  $\Delta s_\lambda$  - błąd pomiaru przemieszczenia zwierciadła interferometru spowodowany błędem długości fali światła laserowego,  $\Delta s_I$  - błąd pomiaru przemieszczenia zwierciadła, spowodowany błędem wyznaczenia stosunku sygnału interferencyjnego do jego wartości maksymalnej,  $\Delta \lambda_l$  - błąd odtwarzania długości fali światła,  $\Delta I$  - błąd stosunku sygnału interferencyjnego do jego wartości maksymalnej. Równania (4.36) oraz (4.37) zapisano, stosując zasadę najniekorzystniejszego przypadku.

W celu oszacowania błędu przemieszczenia zwierciadła interferometru, zamiast zasady najniekorzystniejszego przypadku, można stosować zasadę sumowania kwadratów błędów. Wtedy w miejsce zależności (4.36) i (4.37) należy wykorzystać równania (4.39) i (4.40):

$$|\Delta s| = \left[ \Delta s_\lambda^2 + \Delta s_I^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.39)$$

$$|\Delta s_\lambda| = \left[ \left[ \frac{\Delta \lambda_l}{4} N_1 \right]^2 + \left[ \frac{\Delta \lambda_l}{2} \right]^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.40)$$

Lasery gazowe, stosowane w interferometrach laserowych, charakteryzują się wąskimi liniami widmowymi, to znaczy wysoką stabilnością długości fali. Szerokość tych linii zależy od wielu czynników,

akich między innymi jak:

czas życia stanów wzbudzenia atomów lub jonów gazu, emitującego światło (poszerzenie jednorodnej linii widmowej),  
prędkość z jaką poruszają się, emitujące światło, atomy lub jony, (poszerzenie niejednorodnej linii widmowej, wynikające na skutek zjawiska Dopplera),  
zmiany długości rezonatora, wynikające z wpływu temperatury, drgań mechanicznych itp.,

fluktuacje temperatury, ciśnienia i prądu w kapilarze lasera.

Wpływ różnych czynników na szerokość linii widmowych światła emitowanego przez lasery gazowe oraz metody stabilizacji długości fali, przeanalizowano w pracy [27]. Z analizy tej wynika, że dla typowego lasera He-Ne zmiana długości fali  $\Delta\lambda_l$ , spowodowana wyżej wymienionymi czynnikami, nie przekracza  $2 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}$ , zaś dla laserów wyposażonych w układy stabilizujące, zmiana ta może być nawet rzędu  $10^{-9} \mu\text{m}$ . W przypadku zastosowania laserów półprzewodnikowych linie widmowe emitowanego światła są znacznie szersze niż w przypadku laserów gazowych. Szerokość połowkowa pojedynczego prążka  $\Delta\lambda_l$ , w przypadku tych laserów może osiągać wartość  $10^{-4} \mu\text{m}$ .

Długość fali światła rozchodzącego się w powietrzu zależy od współczynnika załamania powietrza  $n_{pow}$ . Współczynnik załamania powietrza zależy z kolei od temperatury i ciśnienia powietrza oraz ciśnienia pary wodnej zawartej w powietrzu. Różnica między współczynnikiem załamania powietrza  $n_{pow}$  w danych warunkach i wartością współczynnika w warunkach odniesienia, może być wyznaczana automatycznie, tak jak ma to miejsce w interferometrach laserowych, przeznaczonych do pomiaru dużych długości. Jak wykazano w pracy [35], zmiana długości fali światła pod wpływem zmian współczynnika załamania powietrza nie przekracza  $3,2 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}$ , jeżeli parametry powietrza są zawarte w granicach:

temperatura:  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ,

ciśnienie:  $1013,25 \pm 26,66 \text{ hPa}$ ,

ciśnienie pary wodnej:  $26,66 \pm 26,66 \text{ hPa}$ .

W powyższych rozważaniach wynika, że sumaryczny błąd długości fali światła laserowego  $\Delta\lambda_l$  będzie zawarty w granicach:

dla laserów gazowych  $\pm 4 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}$ ,

dla laserów półprzewodnikowych  $\pm 1,5 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$ .

Przyjmując, że długość fali światła laserowego  $\lambda_l = 0,6328 \mu\text{m}$  oraz, że błąd długości fali  $\Delta\lambda_l$  równy jest  $\pm 4 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}$ , na podstawie wzoru (4.37) oszacowano błędy pomiaru przemieszczeń  $\Delta s_\lambda$ , spowodowane błędami odtwarzania długości fali światła. Wynoszą one :

dla przemieszczenia $s = 1 \mu\text{m}$	$\Delta s_{\lambda} = \pm 8,0 \cdot 10^{-5} \mu\text{m},$
dla przemieszczenia $s = 5 \mu\text{m}$	$\Delta s_{\lambda} = \pm 3,3 \cdot 10^{-4} \mu\text{m},$
dla przemieszczenia $s = 10 \mu\text{m}$	$\Delta s_{\lambda} = \pm 6,5 \cdot 10^{-4} \mu\text{m},$
dla przemieszczenia $s = 20 \mu\text{m}$	$\Delta s_{\lambda} = \pm 1,3 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}.$

Błąd stosunku sygnału interferencyjnego do jego wartości maksymalnej zależy od jakości obrazu interferencyjnego, dokładności przetwarzania tego obrazu na sygnał elektryczny i dokładności pomiaru sygnału elektrycznego. Jakość obrazu interferencyjnego, uzyskanego w świetle monochromatycznym, najprościej można ocenić za pomocą kontrastu  $K$ , który w pracach [32], [61] jest definiowany następująco :

$$K = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} , \quad (4.41)$$

gdzie:  $I_{max}$  - największe natężenie światła w obrazie interferencyjnym,  $I_{min}$  - najmniejsze natężenie światła w obrazie interferencyjnym. Analizując w p. 4.1 i 4.2 zjawisko interferencji dwóch fal świetlnych w interferometrze laserowym, założono, że interferujące fale mają jednakową amplitudę  $A_0$ , jednakową polaryzację oraz, że są to fale monochromatyczne. Przy takich założeniach maksymalne natężenie światła w obrazie interferencyjnym  $I_{max} = 4A_0^2$ , zaś minimalne natężenie światła w obrazie interferencyjnym równe jest zeru. Kontrast takiego obrazu interferencyjnego jest równy jedności.

W warunkach rzeczywistych kontrast obrazu interferencyjnego jest mniejszy. Do najważniejszych przyczyn, powodujących zmniejszenie kontrastu obrazu interferencyjnego w interferometrach laserowych, należy przede wszystkim zaliczyć:

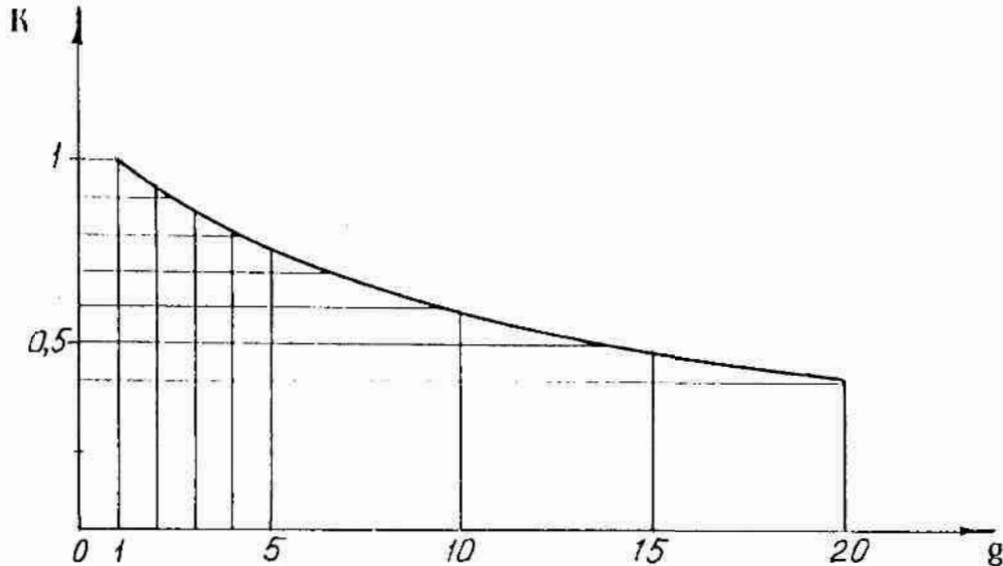
- niejednakowe natężenie światła interferujących fal,
- różnice w stanie polaryzacji interferujących fal,
- niepełną monochromatyczność światła laserowego,
- obecność światła rozproszonego w polu interferencyjnym i szumy koherentne, powstające w wyniku zastosowania światła laserowego.

Wpływ wymienionych czynników na kontrast obrazu interferencyjnego przeanalizowano w pracy [32]. Analiza ta prowadzi do wniosku, że przy oświetleniu interferometru światłem lasera He-Ne uzyskuje się wysoki kontrast  $K$  obrazu interferencyjnego, większy na ogół niż 0,75. Kontrast ten, przy pomiarach dużych przemieszczeń za pomocą interferometrów laserowych, zmienia się podczas pomiaru i może sięgać, w niekorzystnych warunkach, wartości mniejsze niż 0,1.

W pracy [32] wykazano, że niejednakowe natężenie światła interferujących fal ma słaby wpływ na kontrast obrazu interferencyjnego.

Jeżeli stosunek natężeń światła interferujących fal oznaczyć symbolem  $g$ , to zależność kontrastu obrazu interferencyjnego  $K$  od tego stosunku, ilustruje rys. 24 i wyraża równanie (4.42):

$$K = \frac{2\sqrt{g}}{g + 1} \quad (4.42)$$



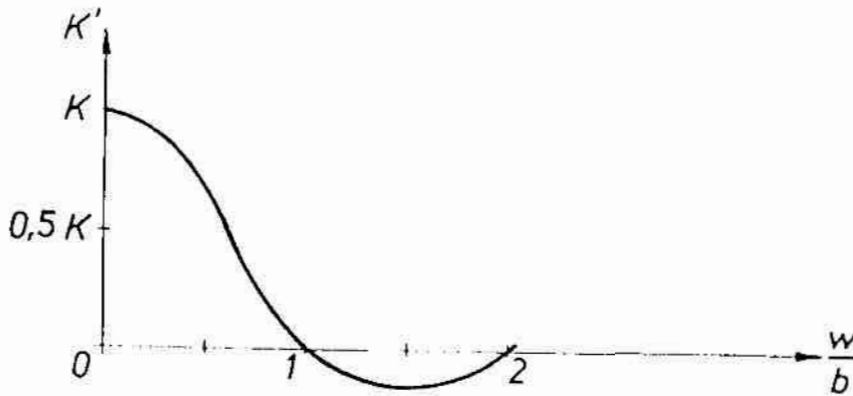
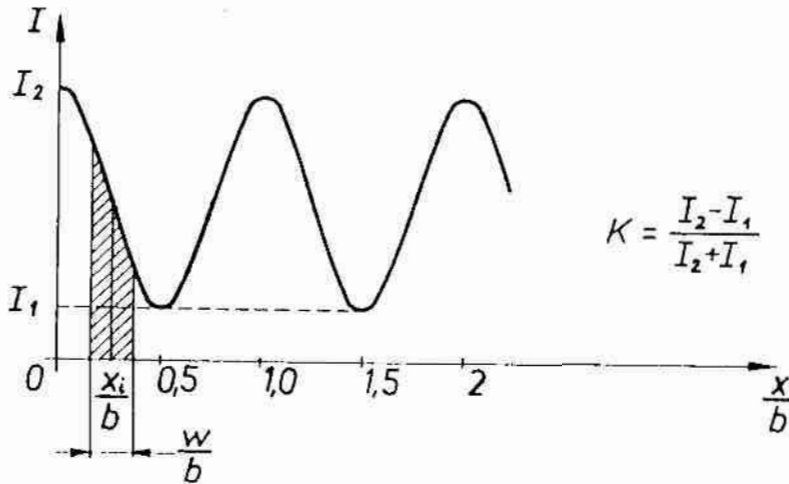
rys. 24. Zależność kontrastu  $K$  obrazu interferencyjnego od stosunku natężeń światła interferujących fal; wg [32]

Podczas przetwarzania obrazu interferencyjnego, charakteryzującego się kontrastem  $K$ , na sygnał elektryczny powstaje problem wpływu szerokości szczeliny, ustawionej przed detektorem fotoelektrycznym, na mierzoną wartość kontrastu  $K'$ . Na rys. 25a pokazano rozkład natężenia światła w obrazie interferencyjnym, w którym odległość między prążkami interferencyjnymi (jasnymi lub ciemnymi) wynosi  $b$ . Energia światła przechodzącego przez szczelinę o szerokości  $w$  jest proporcjonalna do pola o powierzchni  $P_w$ , zakreskowanego na rys. 25a, i wynosi:

$$P_w = \int_{x_i - \frac{w}{2}}^{x_i + \frac{w}{2}} \left[ \frac{I_2 + I_1}{2} + \frac{I_2 - I_1}{2} \cos \frac{2\pi x}{b} \right] dx \quad (4.43)$$

gdzie:  $P_w$  - pole proporcjonalne do energii światła padającego na detektor fotoelektryczny,  $I_2 = I_{max}$ ,  $I_1 = I_{min}$  - natężenie światła w maksimach i minimach obrazu interferencyjnego,  $b$  - odległość między prążkami interferencyjnymi,  $w$  - szerokość szczeliny ustawionej przed detektorem fotoelektrycznym,  $x_i$  - współrzędna środka szczeliny. Po obliczeniu całki w równaniu (4.43) otrzymuje się:

$$P_w = \frac{I_1 + I_2}{2} w + \frac{b}{\pi} \frac{I_2 - I_1}{2} \left[ \sin \frac{\pi w}{b} \right] \cos \frac{2\pi}{b} x_i \quad (4.44)$$



rys. 25. a) Rozkład natężenia światła w obrazie interferencyjnym;  
b) zależność mierzonego kontrastu \$K'\$ od stosunku \$w/b\$

Z równania (4.44) wynika, że energia padająca na detektor fotoelektryczny, proporcjonalna do pola \$P\_w\$, przy przesuwaniu obrazu interferencyjnego względem szczeliny ustawionej przed detektorem, zmienia się proporcjonalnie do natężenia światła w danym punkcie obrazu interferencyjnego. Współczynnik proporcjonalności zależy od stosunku szerokości szczeliny \$w\$ do odległości między prążkami \$b\$. Z równania (4.44) można wyznaczyć największą i najmniejszą wartość \$P\_w\$, a na ich podstawie, zmierzoną przez detektor fotoelektryczny, wartość kontrastu \$K'\$. Można wykazać, że mierzony kontrast \$K'\$ wyraża się równaniem:

$$K' = \frac{(I_2 - I_1) \sin \frac{\pi w}{b}}{(I_2 + I_1) \frac{\pi w}{b}} = K \frac{\sin \frac{\pi w}{b}}{\frac{\pi w}{b}} \quad (4.45)$$

ależność tę, w postaci graficznej, pokazano na rys.25b. Z równania 4.45) i rys.25b wynika, że jeżeli stosunek  $\frac{\omega}{\delta} = 0,25$ , to kontrast mierzony za pomocą detektora fotoelektrycznego zmniejsza się o około 0% w stosunku do wartości obserwowanej w obrazie interferencyjnym. Zmiana znaku kontrastu  $K'$  świadczy o przesunięciu fazowym sygnału o wartość  $\pi$ .

Z powyższych rozważań wynika, że w realnych warunkach pomiarom przemieszczeń za pomocą interferometru laserowego towarzyszą zjawiska, powodujące pewne zmniejszenie kontrastu obrazu interferencyjnego. Również przetwarzanie prążkowego obrazu interferencyjnego prowadzi do niewielkiego obniżenia wartości kontrastu. Jeżeli zmiany kontrastu są nieznaczne, to można je w pewnym stopniu skompensować, stosując odpowiednio większe współczynniki wzmocnienia sygnału w dalszej części toru pomiarowego. Wartość współczynnika wzmocnienia toru pomiarowego powinna być dostatecznie duża. Ważne jest także aby była to wartość niezmienna.

Jeżeli analogowy sygnał elektryczny, proporcjonalny do sygnału interferencyjnego, zostanie przetworzony na postać cyfrową za pomocą przetwornika A/C, to podstawowym składnikiem błędu pomiaru takiego sygnału będzie błąd kwantowania. Błąd kwantowania sygnału analogowego zależy od pełnego zakresu przetwarzania  $U_{FSR}$  (Full Scale Range) rozdzielczości układu kwantującego [36]. Błąd ten można wyznaczyć przystając z równania:

$$\Delta Q = \pm \frac{U_{FSR}}{2^{n+1}} \quad (4.46)$$

gdzie:  $\Delta Q$  - błąd kwantowania,  $U_{FSR}$  - pełny zakres przetwarzania,  $n$  - liczba bitów układu kwantującego. Dla pełnego zakresu przetwarzania, noszącego np. 10V, błąd kwantowania jest równy:

dla przetwornika 8-bitowego:	$\Delta Q = \pm 19,5 \text{ mV}$ ,
dla przetwornika 10-bitowego:	$\Delta Q = \pm 4,88 \text{ mV}$ ,
dla przetwornika 12-bitowego:	$\Delta Q = \pm 1,22 \text{ mV}$ ,
dla przetwornika 16-bitowego:	$\Delta Q = \pm 76,29 \text{ } \mu\text{V}$ .

Wyboru zakresu przetwarzania i zdolności rozdzielczej przetwornika A/C dokonuje się, jak wskazano w pracy [36], z uwzględnieniem zakresu zmienności sygnału analogowego oraz błędów przetwarzania, wystających w analogowej części toru pomiarowego. Można zatem przyjąć, że wybór przetwornika A/C powinien być dokonany tak, aby błąd kwantowania tego przetwornika był nie większy niż suma błędów przetwarzania interferogramu na sygnał elektryczny. Błędy przetwarzania

nterferogramu na sygnał elektryczny mogą być spowodowane nielinio-  
ością charakterystyki przetwarzania i szumami własnymi przetwornika  
stoelektrycznego, niestałością współczynnika wzmocnienia, wpływami  
ermicznymi oraz innymi przyczynami. Zakładając, że wyboru przetwor-  
ika A/C dokonano stosownie do błędów przetwarzania interferogramu w  
rze analogowym, można przyjąć, że całkowity błąd pomiaru sygnału  
nterferencyjnego jest równy  $2\Delta Q$ . Uwzględniając tę wartość błędu,  
arówno dla sygnału interferencyjnego  $I(t)$  oraz dla wartości maksy-  
alnej tego sygnału  $I_{max}$ , można wyznaczyć błąd  $\Delta I$  stosunku  $I(t)/I_{max}$ .  
orzystając z równania na błąd ilorazu, wartość  $\Delta I$  otrzymuje się w  
ostaci:

$$\Delta I = \left| \frac{2\Delta Q}{U(t)} - \frac{2\Delta Q}{U_{max}} \right| \frac{U(t)}{U_{max}} \quad (4.47)$$

rzy czym,

$$\left. \begin{aligned} U(t) &= K_w I(t) \\ U_{max} &= K_w I_{max} \end{aligned} \right\} \quad (4.48)$$

dzie:  $U(t)$ ,  $U_{max}$  - sygnały elektryczne uzyskane w wyniku przetwarza-  
la interferogramu odpowiadające wartościom  $I(t)$  i  $I_{max}$ ,  $K_w$  - czułość  
analogowej części toru pomiarowego, przetwarzającej sygnał interfe-  
encyjny. Rozpatrując równanie (4.47) dla najmniej korzystnego przy-  
adku, największą wartość błędu  $\Delta I$  wyznacza się z równania:

$$\Delta I = \frac{4\Delta Q}{U_{max}} \quad (4.49)$$

Z równania (4.49) wynika, że przy ustalonej liczbie bitów ukła-  
u kwantującego, najmniejszy błąd  $\Delta I$ , otrzymamy wtedy, gdy maksymal-  
a wartość przetwarzanego sygnału interferencyjnego  $U_{max}$  będzie rów-  
a pełnemu zakresowi przetwarzania  $U_{FSR}$ , zastosowanego przetwornika  
/C. Przyjmując, podobnie jak uczyniono to wcześniej, że pełny za-  
res przetwarzania wynosi 10V, wartości błędu  $\Delta I$  są następujące:

dla przetwornika 8-bitowego	$\Delta I = \pm 0,0078$ ,
dla przetwornika 10-bitowego	$\Delta I = \pm 0,00195$ ,
dla przetwornika 12-bitowego	$\Delta I = \pm 0,00049$ ,
dla przetwornika 16-bitowego	$\Delta I = \pm 0,00003$ .

przypadku, gdy stosunek pełnego zakresu przetwarzania przetwornika  
/C do maksymalnej wartości przetwarzanego sygnału interferencyjnego  
nosi  $q$ , wartości błędu  $\Delta I$  rosną  $q$  razy. Np. jeżeli zostanie zasto-  
owany analogowo-cyfrowy przetwornik 12-bitowy, zaś sygnał maksymal-  
r będzie stanowił jedynie połowę pełnego zakresu przetwarzania, to  
artość  $\Delta I$  będzie równa  $\pm 0,00098$ .

Na podstawie przeprowadzonej analizy można przystąpić do oceny błęd pomiaru przemieszczenia zwierciadła interferometru  $\Delta s_I$ , zgodnie z równaniem (4.38). Przyjmując  $\Delta I = \pm 0,001$  i zakładając, że długość fali światła laserowego  $\lambda_l = 0,6328 \mu\text{m}$ , obliczono wartości błęd pomiaru  $\Delta s_I$  w zależności od wartości stosunku  $I(t)/I_{max}$ . Dla stosunku  $I(t)/I_{max}$  spełniającego warunek:

$$0 < \frac{I(t)}{I_{max}} < 1 \quad ,$$

wartości błęd pomiaru  $\Delta s_I$  obliczono z równania (4.38). W przypadku, gdy stosunek  $I(t)/I_{max}$  był równy zero lub jedności, wartość błęd pomiaru  $\Delta s_I$  wyznaczono z równania:

$$\Delta s_I = \frac{\lambda_l}{\pi} \left\{ \arccos \left[ \left| \frac{I(t)}{I_{max}} - \Delta I \right| \right]^{\frac{1}{2}} - \arccos \left[ \frac{I(t)}{I_{max}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (4.50)$$

Wyniki obliczeń zestawiono w tabelicy 5.

Z tabelicy 5 wynika, że błąd pomiaru przemieszczenia  $\Delta s_I$  największe wartości przyjmuje wtedy, gdy stosunek  $I(t)/I_{max}$  osiąga wartości równe zero lub jedności. Zauważmy, że te wartości błęd pomiaru  $\Delta s_I$  obliczono zgodnie z zasadą najniekorzystniejszego przypadku oraz, że obejmują one sumaryczny błąd wynikający z dwukrotnego pomiaru stosunku  $I(t)/I_{max}$ , raz dla położenia początkowego i drugi raz dla położenia końcowego zwierciadła interferometru. Wyniki przykładowych obliczeń błęd pomiaru  $\Delta s_I$  zamieszczone w tabelicy 5 wskazują, że podczas pomiaru przemieszczeń można zmniejszyć wartości błęd pomiaru  $\Delta s_I$ , jeżeli zostaną odpowiednio dobrane położenia początkowe i końcowe zwierciadła interferometru. Np. przy pomiarze amplitudy drgań harmonicznym wibratora błąd  $\Delta s_I$  będzie mały, jeżeli amplituda drgań zostanie dobrana tak, aby skrajnym położeniom stolika vibracyjnego odpowiadał sygnał interferencyjny  $I(t)$  o wartości zbliżonej do połowy zakresu zmienności tego sygnału. W tym przypadku wartość błęd pomiaru  $\Delta s_I$  będzie ponad trzydziestokrotnie mniejsza od wartości maksymalnej.

Jeśli zostały wyznaczone maksymalne wartości błędów przemieszczenia zwierciadła interferometru spowodowane błędem długości fali światła laserowego i błędem pomiaru stosunku  $I(t)/I_{max}$ , to całkowity błąd pomiaru przemieszczenia zwierciadła  $\Delta s$  oblicza się z równania (4.36). W przypadku, gdy błąd  $\Delta s_\lambda = \pm 3,3 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$ , co odpowiada przemieszczeniu  $s = 5 \mu\text{m}$ , oraz gdy  $|\Delta s_I| = 0,006371 \mu\text{m}$ , całkowity błąd pomiaru przemieszczenia zwierciadła interferometru wynosi:

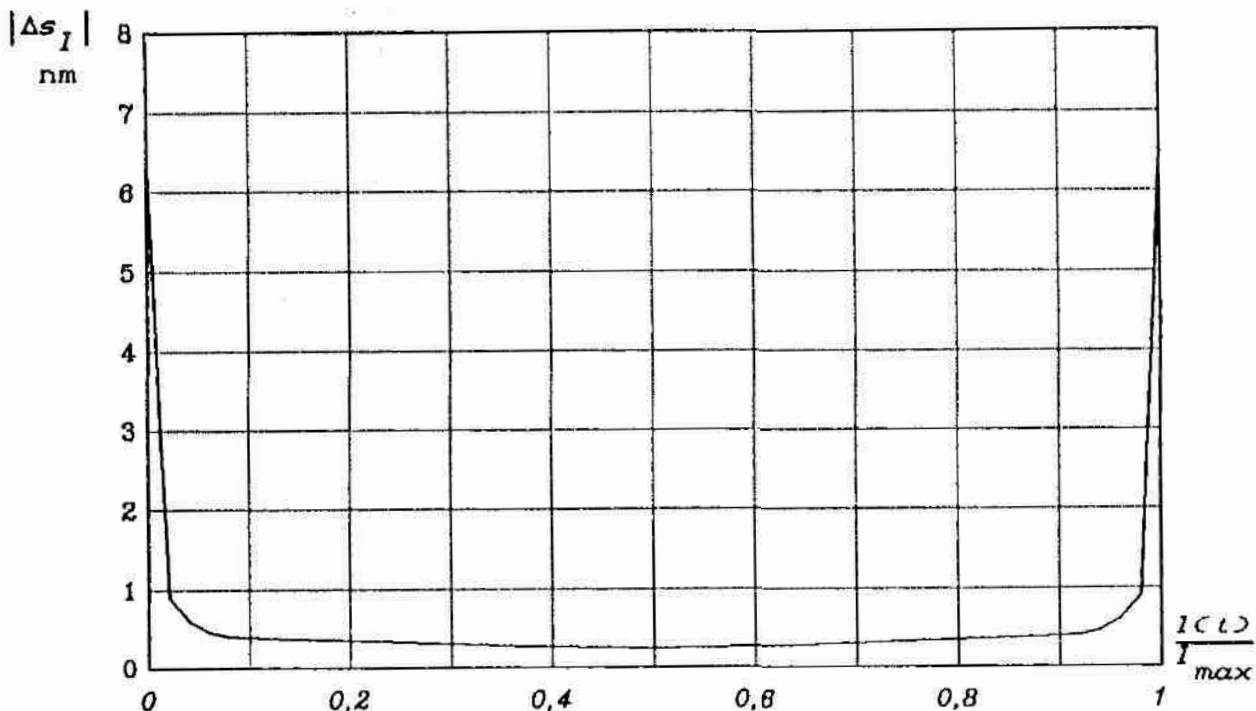
$$\begin{aligned} \Delta s &= (|\Delta s_\lambda| + |\Delta s_I|) = \pm (|\pm 3,3 \cdot 10^{-4}| + 0,006371) = \\ &= \pm 6,71 \cdot 10^{-3} \mu\text{m} = \pm 6,71 \text{ nm} \end{aligned}$$



Tablica 5. Wartości bezwzględne błędu pomiaru przemieszczenia zwierciadła interferometru laserowego, spowodowanego niedokładnym wyznaczeniem stosunku  $I(t)/I_{max}$

Wartość stosunku $I(t)/I_{max}$	Błąd $ \Delta s_I $ nm	Wartość stosunku $I(t)/I_{max}$	Błąd $ \Delta s_I $ nm	Wartość stosunku $I(t)/I_{max}$	Błąd $ \Delta s_I $ nm
0	6,37	0,2	0,25	0,95	0,46
0,00025	6,37	0,3	0,22	0,99	1,01
0,0005	4,50	0,4	0,20	0,995	1,43
0,001	3,18	0,5	0,20	0,999	3,18
0,005	1,43	0,6	0,20	0,9995	4,50
0,01	1,01	0,7	0,22	0,99975	6,37
0,05	0,46	0,8	0,25	1	6,37
0,1	0,33	0,9	0,33	-	-

Wykres bezwzględnej wartości błędu  $\Delta s_I$  w zależności od wartości stosunku  $I(t)/I_{max}$



Wartość ta została oszacowana przy przyjęciu kilku założeń. Zmiana tych założeń spowoduje zmianę oszacowanej wartości błędu. Np. jeżeli założyc, że maksymalna wartość sygnału interferencyjnego równa jest innemu zakresowi przetwarzania, to dla przetwornika 12-bitowego

$\Delta l = 0,00049$  i wartość błędu  $\Delta s$  będzie ponad dwukrotnie mniejsza. Przedstawiony sposób oszacowania błędów, wykorzystujący prawo liniowej propagacji błędów, pozwala na określenie granicznych błędów pomiaru przemieszczeń zgodnie z zasadą najniekorzystniejszego przypadku. Zauważmy, że zarówno błąd  $\Delta s_\lambda$  jak i  $\Delta s_l$  można traktować, jako błędy losowe, w odpowiednich przedziałach zmienności, oraz niezależne od siebie. Można więc, zamiast prawa liniowej propagacji błędów, zastosować prawo propagacji błędów Gaussa [21], zgodne z zasadą sumowania kwadratów błędów. Wtedy, zamiast równania (4.36), trzeba wykorzystać równanie (4.39). Przyjmując, tak jak poprzednio, że  $\Delta s_\lambda = \pm 3,3 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}$  oraz  $|\Delta s_l| = 0,006371 \mu\text{m}$ , z równania (4.39) otrzymuje się:

$$\Delta s = \pm \left[ (3,3 \cdot 10^{-4})^2 + (6,371 \cdot 10^{-3})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \pm 6,38 \cdot 10^{-3} \mu\text{m} .$$

Widać, że wartości  $\Delta s$  oszacowane dwoma sposobami są podobne.

Błąd względny pomiaru przemieszczenia, w rozpatrywanym przypadku, przy  $s = 5 \mu\text{m}$ , jest mniejszy niż  $\pm 0,15 \%$ . Przy tej samej wartości błędu  $\Delta s$  i przemieszczeniu  $s = 0,3 \mu\text{m}$  błąd względny pomiaru przemieszczenia nie przekroczy  $\pm 2,3 \%$ .

Jeśli podczas pomiaru przemieszczeń, początkowe i końcowe położenia zwierciadła interferometru zostaną dobrane w taki sposób, aby odpowiadający tym położeniom sygnał interferencyjny  $I(t)$  spełniał nierówność:

$$0,01 < \frac{I(t)}{I_{max}} < 0,99 \quad ,$$

co jak wynika z tab.5, wartość błędu  $\Delta s_l$  nie przekroczy  $\pm 1$  nm. W tym przypadku wartości błędu bezwzględnego i błędu względnego pomiaru przemieszczenia będą znacznie mniejsze niż oszacowane poprzednio.

W przeprowadzonej analizie rozpatrzono tylko błąd pomiaru przemieszczenia zwierciadła interferometru spowodowany błędem pomiaru stosunku  $I(t)/I_{max}$  oraz błędem odtwarzania długości fali światła laserowego. Nie analizowano natomiast błędów przetwarzania sygnału, w elektronicznej części układu pomiarowego, zakładając, iż w prawidłowo wykonanym torze pomiarowym błędy te nie przekroczą powyższej wartości błędu kwantowania. Inne czynniki, powodujące błędy pomiaru przemieszczeń podczas sprawdzania profilometrów stykowych, związane z metodyką pomiaru długości interferometrem laserowym rozpatrzono w rozdziale 6.

## 6. Wnioski

Przeprowadzona analiza teoretyczna możliwości i dokładności pomiaru przemieszczeń okresowych za pomocą interferometru laserowego pozwala sformułować szereg wniosków, z których najważniejsze to:

- . Interferometr laserowy, wyposażony w jeden detektor sygnału interferencyjnego, umożliwia pomiar przemieszczeń i położenia, podczas okresowego ruchu zwierciadła interferometru. Dokonuje się tego na podstawie zarejestrowanego interferogramu, pod warunkiem, że znany jest znak pochodnej równania ruchu zwierciadła, w poszczególnych przedziałach czasu, w których równanie to jest funkcją ściśle monotoniczną. Przemieszczenia i położenie zwierciadła interferometru określone są równaniami (4.22) i (4.25).
  - . Interferogramy otrzymane podczas pomiarów okresowych przemieszczeń zwierciadła interferometru są funkcjami okresowymi o takim samym okresie jak równanie ruchu zwierciadła.
  - . Analiza interferogramów uzyskanych w wyniku modelowania wskazuje, że w przypadku, gdy zwierciadło interferometru porusza się ruchem harmonicznym, można na podstawie interferogramu zidentyfikować przedziały ścisłej monotoniczności równania ruchu.
  - . Interferogramy wyznaczone w wyniku modelowania pozwalają stwierdzić, że wzrost amplitudy drgań zwierciadła interferometru, przy ustalonej częstotliwości drgań, powoduje zwiększenie częstości sygnału interferencyjnego oraz zmianę jego postaci. Przy stałej amplitudzie, zwiększenie częstotliwości drgań zwierciadła interferometru powoduje wzrost częstości sygnału interferencyjnego lecz nie zmienia jego postaci.
  - . Największy wpływ na błąd pomiaru przemieszczeń, za pomocą interferometru laserowego, mają:
    - niedokładność pomiaru stosunku sygnału interferencyjnego, odpowiadającego początkowi i końcowi mierzonego przemieszczenia, do wartości maksymalnej tego sygnału,
    - niedokładność odtwarzania długości fali światła laserowego.
- Wartość błędu pomiaru przemieszczeń, za pomocą interferometru laserowego, zależy od wartości przemieszczeń, rodzaju zastosowanego lasera, dokładności przetworzenia obrazu interferencyjnego na sygnał elektryczny i rodzaju zastosowanego przetwornika A/C.

5. W celu zmniejszenia błędu pomiaru przemieszczeń okresowych za pomocą interferometru laserowego konieczne jest dokładne przetworzenie sygnału interferencyjnego w analogowej części toru pomiarowego, a następnie przetworzenie sygnału analogowego na sygnał cyfrowy, za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego o dużej rozdzielczości. Ważne jest także dopasowanie pełnego zakresu przetwarzania przetwornika *A/C* do zakresu zmian sygnału pomiarowego.
7. Interferometr laserowy, z analogowo-cyfrowym przetwarzaniem sygnału pomiarowego, można zastosować do pomiaru przemieszczeń okresowych ruchomych elementów stolików wibracyjnych, używanych do sprawdzania profilometrów stykowych, przy czym błąd względny pomiaru przemieszczeń nie przekroczy wartości dopuszczalnych, ustalonych dla odpowiednich wzorców kontrolnych.
3. Błąd pomiaru amplitudy drgań harmonicznycy stolika wibracyjnego, wykorzystywanego do sprawdzania profilometrów stykowych, można zmniejszyć przez odpowiedni dobór amplitudy drgań. Amplituda drgań stolika wibracyjnego powinna być taka, aby skrajnym położeniom stolika wibracyjnego odpowiadał sygnał interferencyjny o wartości zbliżonej do połowy zakresu zmienności tego sygnału.

## 5. METODYKA BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

### 5.1. Cel i zakres badań

Badania doświadczalne przeprowadzono w celu sprawdzenia możliwości pomiaru przemieszczeń w ruchu okresowym za pomocą interferometru laserowego, oraz sprawdzenia przydatności zaproponowanej metody do oceny wybranych właściwości metrologicznych profilometrów stykowych. Badania obejmowały:

1. Opracowanie, wykonanie i uruchomienie stanowiska badawczego w postaci systemu pomiarowego, przeznaczonego do pomiaru przemieszczeń okresowych za pomocą interferometru laserowego.
2. Wyznaczenie podstawowych właściwości metrologicznych wykonanego systemu, a w szczególności określenie zakresu pomiarowego i porównanie wyników pomiarów uzyskanych za pomocą zbudowanego stanowiska z wynikami otrzymanymi inną metodą.
3. Sprawdzenie, za pomocą zbudowanego systemu pomiarowego, wybranych właściwości metrologicznych profilometrów stykowych oraz porównanie uzyskanych wyników z wynikami sprawdzania przyrządów stykowych za pomocą wzorców kontrolnych.

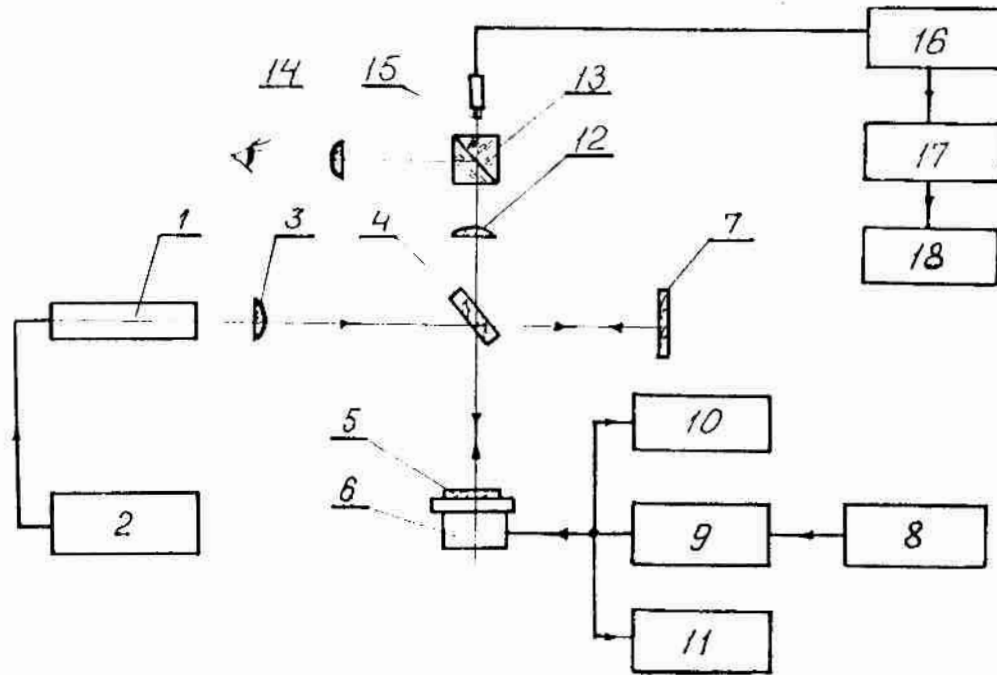
### 5.2. Stanowisko badawcze

W celu przeprowadzenia badań doświadczalnych zaprojektowano, wykonano i uruchomiono stanowisko badawcze. Stanowisko to spełniało rolę systemu pomiarowego, przeznaczonego do pomiaru przemieszczeń w ruchu okresowym metodą interferencyjną. Podstawowe zespoły funkcjonalne, wchodzące w skład stanowiska badawczego to:

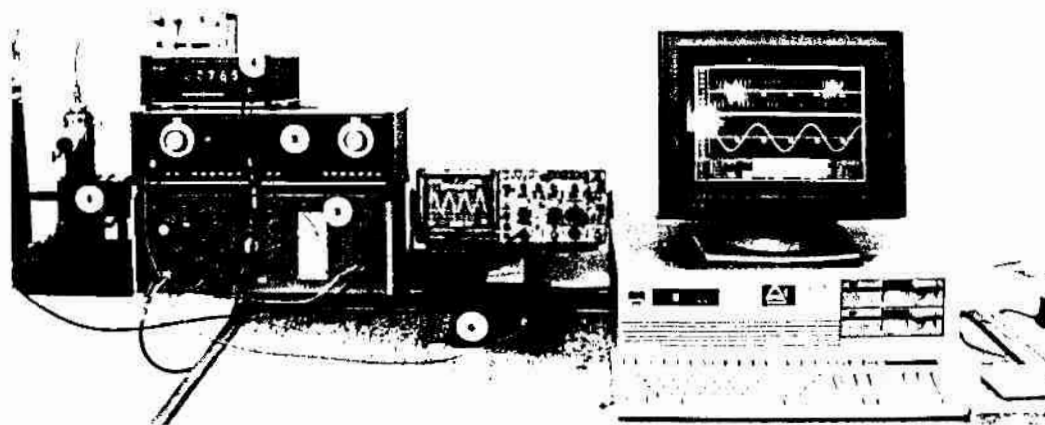
- stolik wibracyjny wraz z układem zasilania,
- interferometr laserowy,
- układ przetwarzania i analizy sygnału pomiarowego.

Schemat stanowiska badawczego pokazano na rys.26., zaś jego wygląd zewnętrzny na rys.27.

Stolik wibracyjny 6 zawierał element ruchomy, do którego przytworzone było zwierciadło płaskie 5. Układ zasilania stolika wibracyjnego składał się z generatora 8 i wzmacniacza 9. Generator 8 generował napięcia sinusoidalne lub piłokształtne, o odpowiednio regulowanej amplitudzie i częstotliwości, które po wzmacnieniu we wzmacniaczu 9 były przekazywane do układu napędowego stolika wibracyjnego, pobudzając do drgań zwierciadło 5. Oscyloskop 10 służył do kontroli amplitudy i kształtu sygnału zasilającego stolik wibracyjny, zaś częstotlicznik 11, do kontroli częstotliwości tego sygnału. Pomiar



Rys.26. Schemat stanowiska badawczego; 1 - laser, 2 - zasilacz lasera, 3 - kolimator, 4 - płytka światłodzieląca, 5 - zwierciadło płaskie ruchome, 6 - stolik wibracyjny, 7 - zwierciadło płaskie stałe, 8 - generator sygnałów okresowych, 9 - wzmacniacz, 10 - oscyloskop, 11 - częstotściomierz, 12 - projektyw, 13 - kostka światłodzieląca, 14 - okular, 15 - detektor fotoelektryczny, 16 - wzmacniacz sygnału pomiarowego, 17 - kontroler z przetwornikiem A/C, 18 - mikrokomputer



Rys.27. Wygląd zewnętrzny stanowiska badawczego; 1 -interferometr ze stolikiem wibracyjnym, 2 - generator, 3 - wzmacniacz, 4 - częstotściomierz, 5 - wzmacniacz sygnału pomiarowego 6 - wejście kontrolera

Przemieszczeń zwierciadła 5 dokonywane były za pomocą interferometru laserowego. Interferometr laserowy składał się z lasera 1, zasilanego z zasilacza 2, kolimatora 3, płytki światłodzielącej 4, zwierciadła płaskiego 7 i projektywu 12. Jeśli amplituda i częstotliwość drgań zwierciadła 5 były niewielkie, to dzięki kostce światłodzielącej 13, obraz interferencyjny mógł być obserwowany w okularze 14. Do przetwarzania, zmiennego w czasie obrazu interferencyjnego na analogowy sygnał elektryczny, służył detektor fotoelektryczny 15. Sygnał ten, po wzmocnieniu we wzmacniaczu 16, był przetwarzany w kontrolerze 17 na postać cyfrową i umieszczany w pamięci mikrokomputera. Przetwarzania sygnału pomiarowego za pomocą kontrolera 17 oraz analizy interferogramu, zarejestrowanego w pamięci mikrokomputera, dokonywano wykorzystując program *INTER*, opisany w p. 5.3. Program ten sterował pracą kontrolera 17 i analizował zarejestrowane dane.

Stanowisko badawcze zaprojektowano w taki sposób, że poszczególne zespoły funkcjonalne miały postać oddzielnych modułów, które następnie łączono w cały system. Pozwoliło to, na przykład, na wykonanie i zbadanie dwóch stolików wibracyjnych, które można było stosować w wykonanym stanowisku wymiennie. Pierwszy stolik wibracyjny zbudowano wykorzystując do napędu zwierciadła układ magnetoelektryczny głośnika typu *GDZ/0.2*. Do pobudzenia stolika stosowano generator wielofunkcyjny typu *KZ 1406* produkcji *KABID-ZOPAN Warszawa*, oraz wzmacniacz typu *P 334* wyprodukowany przez *Zakłady Zespołów Automatyki w Szczecinie*. Drugi stolik wibracyjny zbudowano wykorzystując do napędu zwierciadła przetwornik piezoelektryczny wykonany z piezoceramiki typu *PP 65*, produkcji *COBRABID Zielona Góra*. Przetwornik ten był pobudzany napięciami, o wartości kilkuset woltów, uzyskiwanymi z wyjścia wzmacniacza typu *KB 6108*, stosowanego w interferometrze skanującym *Fabry'ego-Perota* typu *KB 6404*, produkowanym przez *COBRABID Zielona Góra*. Na wejście wzmacniacza podawano sygnał o napięciu od 0 V do 10 V z generatora wielofunkcyjnego typu *KZ 1406* produkcji *KABID-ZOPAN*. Do obserwacji i kontroli sygnałów pobudzających stoliki wibracyjne stosowano oscyloskop typu *2230* firmy *Tektronix (USA)*, oraz częstotściomierz typu *PFL* produkcji *KABID-ZOPAN*.

Korpus interferometru laserowego wykonano w postaci aluminiowego prostopadłościanu z odpowiednimi otworami, przy czym w jednym z nich umieszczono płytkę światłodzielącą produkcji *PZO w Warszawie*. Z korpusem interferometru można było łączyć stolik wibracyjny, układ oświetlacza laserowego oraz układ obserwacji i detekcji obrazu interferencyjnego. Zwierciadło płaskie 7 (rys. 26) zamocowane zostało w układzie, przytwierdzonym do korpusu interferometru, pozwalającym na niewielki obrót zwierciadła względem dwóch wzajemnie prostopadłych

si. Pozycjonowanie zwierciadła odbywało się za pomocą dwóch regulacyjnych śrub mikrometrycznych i pozwalało uzyskać, odpowiednio orientowany, prążkowy obraz interferencyjny.

Przewidziano dwa sposoby oświetlenia interferometru. Pierwszy z nich polegał na ustawieniu w odległości kilkuset milimetrów od orpusu interferometru odpowiedniego uchwyty lasera oraz optyki olimpującej. W tym przypadku wpływ ciepła wydzielanego przez laser a termiczne warunki pracy interferometru był mały. Taki sposób onstrukcji interferometru, rekomendowany w pracy [32], stwarza onieczność regulacji wzajemnego położenia lasera i interferometru rzy każdym zestawieniu stanowiska badawczego. Podczas prowadzenia rac badawczych nie jest to duże utrudnienie. Jednakże w przypadku astosowania opracowanej metody do rutynowego sprawdzania przyrzą- ów stykowych rozwiązanie takie jest niedogodne. Dlatego też prze- idziano drugi sposób oświetlenia interferometru, polegający na ztywnym połączeniu lasera, kolimatora i interferometru. Pierwszy posób stosowano podczas oświetlenia interferometru światłem laserów e-Ne typu LG 600 produkcji PZO Warszawa oraz LG 200 i KB 6202 pro- ukcji COBRABID Zielona Góra. Drugi sposób oświetlenia wykorzystywa- o podczas oświetlania interferometru laserem półprzewodnikowym typu M 03 produkcji firmy Power Technology Inc. (USA). Laser ten chara- teryzuje się niewielkimi gabarytami ( $\phi$  12,7x50,8 mm) oraz małą masą.

ablica 6. Podstawowe parametry laserów wykorzystywanych do oświetla- ia interferometru

Typ lasera	LG 600	LG 200	KB 6202	PM 03
Długość fali światła, nm	632,8	632,8	632,8	675,3
Moc promieniowania, mW	5	5	6	3
Długość rury wyłado- wczej, mm	600	200	640	---
Rodzaj rezonatora	przestra- jalny	stały	przestra- jalny	stały
Wymiary wiązki, mm	$\phi < 2$	$\phi < 2$	$\phi < 2$	5 x 1,5
Rozbieżność wiązki, mrad	< 0,1	< 0,2	< 0,1	0,18x0,045
Napięcie pracy, V	1700	1200	3150	2,8 + 5
Wymiary, mm	820x192x190	$\phi$ 60x270	780x80x145	$\phi$ 12,7x50,8
Masa, kg	10	1	4,5	0,017



podanych gabarytach zawarty był także kolimator oraz zasilacz laserowy. Na wejście zasilacza podawano napięcie stałe z zakresu od 1,8 V do 5 V. Podstawowe parametry laserów stosowanych do oświetlenia interferometru zestawiono w tabelicy 6.

Umieszczenie w korpusie interferometru projektywu 12 (rys. 26) oraz przyłączenie do korpusu interferometru lunety obserwacyjnej, z ostką światłodzielną 13 i okulariem 14, pozwoliło na obserwację i przetwarzanie obrazu interferencyjnego powstającego w interferometrze. Obserwacji obrazu prążkowego, za pomocą lunety, dokonywano przy powolnym ruchu zwierciadła 5, zwłaszcza podczas justowania interferometru. W wykonanym stanowisku badawczym używano projektywów typu K4:1, K6,3:1, K8:1, o powiększeniach odpowiednio od 4x do 8x, oraz lunety obserwacyjnej z nasadki mikrofotograficznej typu MF do mikroskopu NEOPHOT-2, produkcji niemieckiej firmy Carl Zeiss Jena.

Do przetwarzania obrazu interferencyjnego na sygnał elektryczny zastosowano fotodiode typu BPYP-41. Powierzchnia światłoczuła fotodiody nie przekracza  $1 \text{ mm}^2$ . Mała wartość powierzchni światłoczułej detektora fotoelektrycznego pozwoliła zrezygnować z ustawienia przed detektorem fotoelektrycznym diafragmy analizującej obraz interferencyjny. Sygnał pomiarowy, otrzymywany z detektora fotoelektrycznego, wzmacniano za pomocą wzmacniacza prądu stałego. Ze względu na dążenie do maksymalnej eliminacji szumów własnych wzmacniacza, przewidziano możliwość zasilania wzmacniacza ogniwami galwanicznymi. Po wzmacnieniu sygnał pomiarowy podawany był na wejście kontrolera. Rolę kontrolera w zbudowanym stanowisku spełniała karta przetworników A/C i C/A typu TAD-01 produkowana przez firmę CONVERT Wrocław. Karta umieszczona była w mikrokomputerze typu IBM PC/AT i podłączona do szyny magistrali tego mikrokomputera. Umożliwiała ona sterowanie procesem przetwarzania analogowego sygnału pomiarowego na sygnał cyfrowy. Podstawowe dane techniczne karty TAD-01 przedstawiono poniżej:

· liczba kanałów wejściowych	16 ,
· rozdzielczość analogowa	12 bitów (4096 poziomów),
· zakresy analogowe (wybierane zworami)	od 0 V do 10 V, od 0 V do 20 V, $\pm 5 \text{ V}$ , $\pm 10 \text{ V}$ ,
· kod przetwornika	uzupełnieniowy do dwóch z zanegowanym bitem znaku,
· czas konwersji przetwornika	8 $\mu\text{s}$ ,
· prędkość transmisji	111 kHz ,
· błąd względny pomiaru	0,012 % ,
· zabezpieczenie przepięciowe	$\pm 45 \text{ V}$ ,
· impedancja wejściowa	$10^8 \Omega$ ,
· nieliniowość	$\pm 0,5 \text{ LSB}$ .

### 3. Oprogramowanie

Sterowanie pracą przetworników A/C oraz analiza interferogramów, zarejestrowanych w pamięci mikrokomputera, były możliwe dzięki opracowanemu programowi o nazwie *INTER*. Program ten umożliwiał operatorowi wybór szeregu opcji, z których najważniejsze to:

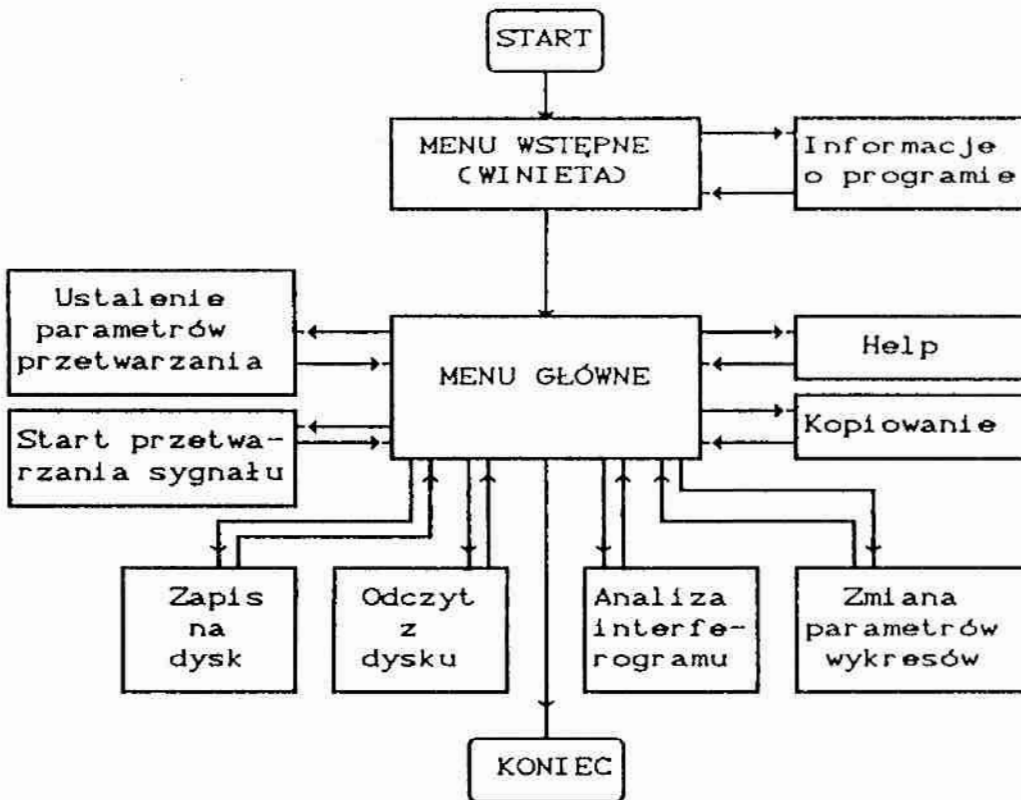
- ustalenie podstawowych parametrów przetwarzania analogowego sygnału pomiarowego na sygnał cyfrowy,
- uruchomienie systemu przetwarzania i rejestracji sygnału,
- zapis zarejestrowanego interferogramu na dysk lub odczyt danych z dysku,
- analiza interferogramu, pozwalająca wyznaczyć parametry drgań okresowych oraz wykres równania ruchu zwierciadła interferometru,
- skopiowanie na drukarce wykresu interferogramu i wyników jego analizy.

Operator ma możliwość ustalenia dwóch parametrów charakteryzujących przetwarzanie sygnału: częstotliwości próbkowania oraz ilości rejestrowanych próbek. Opcja *Analiza interferogramu* przewidziana w programie *INTER* pozwala wyznaczyć:

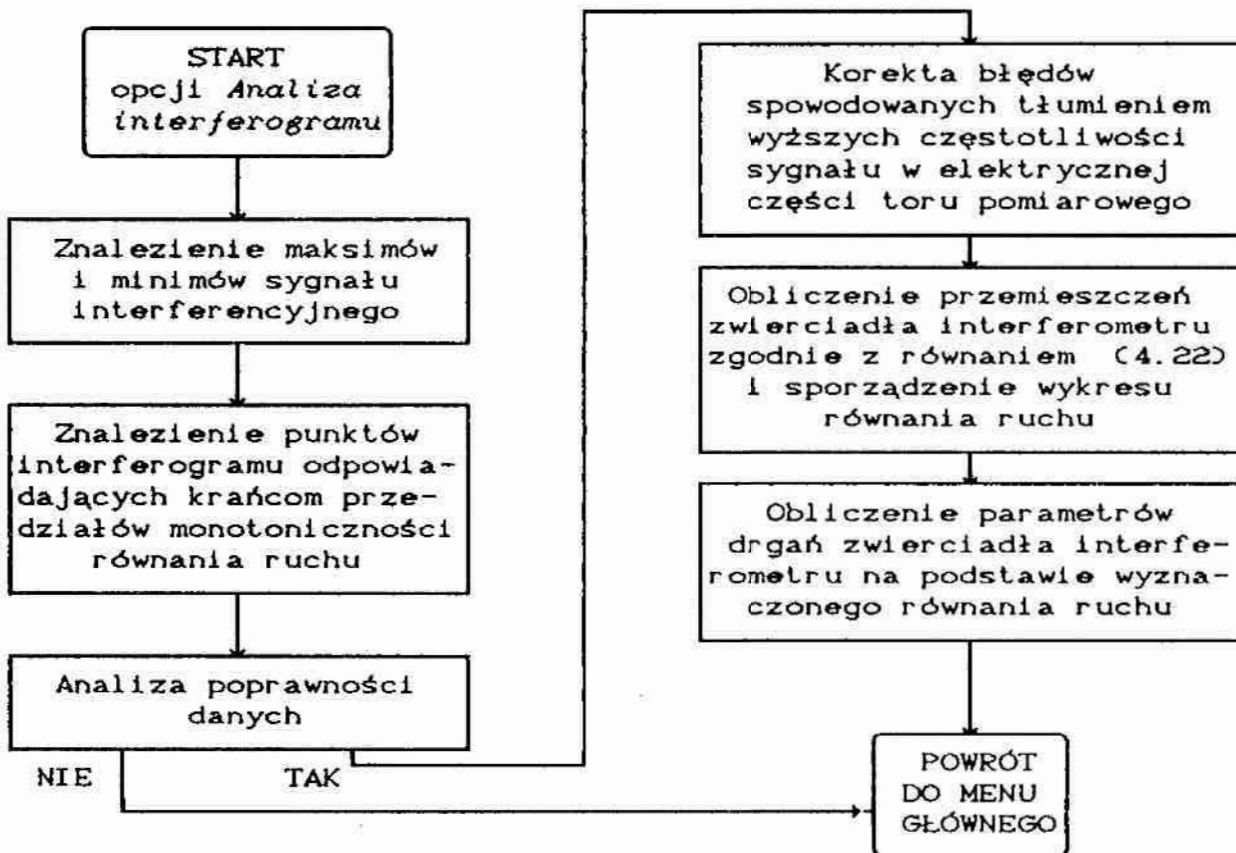
- wartości przemieszczeń w okresowym ruchu zwierciadła interferometru względem położenia początkowego, oraz sporządzić wykres położenia zwierciadła w funkcji czasu (wykres równania ruchu),
- wartość średnią amplitudy drgań zwierciadła interferometru, maksymalną i minimalną wartość amplitudy drgań zwierciadła, średni okres drgań zwierciadła i średnią częstotliwość drgań,
- wartości graniczne odchyłeń okresu i częstotliwości od wartości średnich,
- całkowity czas pomiaru,
- wartości parametrów  $R_a$ ,  $R_c$ ,  $R_m$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $\Delta_a$ ,  $\Delta_q$ ,  $\lambda_a$ ,  $\lambda_q$ , obliczone na podstawie kolejnych położenia zwierciadła interferometru.

Część graficzna programu *INTER* umożliwia uzyskanie na ekranie monitora wykresu interferogramu oraz, po przeprowadzeniu analizy, wykresu równania ruchu zwierciadła interferometru. Program pozwala obrać odpowiednio powiększenie wykresów oraz dokonać ich przeglądu w zakresie wszystkich zarejestrowanych wartości. Ogólną strukturę programu *INTER* pokazano na rys. 28. Na rys. 29 pokazano ogólny algorytm części obliczeniowej programu *INTER*, zawartej w opcji *Analiza interferogramu*.

Program *INTER* napisano w języku *TURBO PASCAL* v.5.0. Wersja źródłowa programu składa się z programu głównego, o nazwie *INTER.PAS*, oraz sześciu modułów o nazwach: *ADP.PAS*, *DEMO\_INP.PAS*, *DEMO\_DRV.PAS*, *DEMO\_VAR.PAS*, *HELP\_INT.PAS*, *KOPIA.PAS*. Moduły te po przeprowadzeniu



Rys.28. Ogólna struktura programu *INTER*



Rys.29. Ogólny algorytm części programu *INTER* zawartej w opcji *Analiza interferogramu*

ompilacji mają rozszerzenie TPU, zaś program główny ma rozszerzenie XE. Poszczególne moduły programu, oraz program główny zawierają zereg procedur realizujących odpowiednie funkcje spełniane przez program. Podstawowym modułem obok programu głównego jest moduł DP.PAS, w którym część procedur napisana jest w języku assemblera mikroprocesora 80286. Moduł ten steruje pracą przetworników A/C. Program INTER wykorzystuje także moduły standardowe dostępne w wersji 5.0 języka TURBO PASCAL. Tabulogram podstawowej procedury *inimaks*, programu głównego INTER, w wersji źródłowej oraz tabulogram modułu ADP.PAS zawarto w załączniku do niniejszej pracy.

Uruchomienie programu INTER.EXE powoduje ukazanie się wstępnego menu. Operator może uzyskać informacje o programie lub przejść do głównego menu. Fragment obrazu pojawiającego się na ekranie monitora po wywołaniu menu głównego pokazano na rys.30a. Następnie operator może wywołać poszczególne opcje przewidziane w programie i pokazane na rys.28. Po zakończeniu realizacji każdej z nich program powraca do głównego menu. Poprawność działania poszczególnych procedur obliczeniowych programu INTER sprawdzono za pomocą interferogramów otrzymanych w wyniku modelowania. Na rys.30b,c,d pokazano przykładowe wyniki obliczeń, odpowiednich parametrów drgań zwierciadła, wyznaczone na podstawie analizy interferogramu, pojawiające się na tle głównego menu po zakończeniu obliczeń. Pracę programu kończy naciśnięcie klawisza *k*, po czym następuje powrót do systemu operacyjnego.

F8 - okno; przesuw	++↑		S - próbkowanie
F6 - skala ↑			Z - zapis
F5 - skala ↓			O - odczyt
F3 - częstotliwość	10000		A - analiza
F4 - liczba próbek	10000		K - koniec
		H - help	D - druk

F8 - okno; przesuw	++↑	WYNIKI ANALIZY		S - próbkowanie
F6 - skala ↑		Ra = 0.706 um	A = 1108 ± 0 nm	Z - zapis
F5 - skala ↓		Rm = 2.216 um	T = 25.0 ± 0.0 ms	O - odczyt
F3 - częstotliwość	10000	L = 999.9 ms	f = 40.0 ± 0.0 Hz	A - analiza
F4 - liczba próbek	10000			K - koniec
		H - help	D - druk	

F8 - okno; przesuw	++↑	WYNIKI DODATKOWE		S - próbkowanie
F6 - skala ↑		da = 0.1773	La = 25.0221 um	Z - zapis
F5 - skala ↓		dq = 0.1996	Lq = 24.6669 um	O - odczyt
F3 - częstotliwość	10000	Rq = 0.784 um	Rp = 1.108 um	A - analiza
F4 - liczba próbek	10000			K - koniec
		H - help	D - druk	

F8 - okno; przesuw	++↑	WYNIKI DODATKOWE 2		S - próbkowanie
F6 - skala ↑		Rc = 2.216 um		Z - zapis
F5 - skala ↓				O - odczyt
F3 - częstotliwość	10000			A - analiza
F4 - liczba próbek	10000			K - koniec
		H - help	D - druk	

rys.30. Menu główne programu INTER a); przykładowe wyniki obliczeń na tle menu głównego b), c), d)

#### 4. Badania przemieszczeń w ruchu okresowym za pomocą interferometru laserowego

Za pomocą zbudowanego stanowiska badawczego, korzystając z programu *INTER*, postanowiono zbadać możliwości pomiaru przemieszczeń, w ruchu okresowym, zaproponowaną metodą interferencyjną. W szczególności dążono do określenia, w wyniku badań, zakresu amplitud i częstotliwości drgań mechanicznych o przebiegu harmonicznym, które mogą być zmierzone za pomocą tego stanowiska.

Badania zakresu amplitud i częstotliwości drgań, które mogą być zmierzone za pomocą opracowanego stanowiska, przeprowadzono po dokonaniu następującego przygotowania:

- Zmontowano interferometr ze stolikiem wibracyjnym o napędzie magnetoelektrycznym i ustawiono na płycie żeliwnej, spoczywającej na odizolowanym od podłoża fundamencie.
- Oświetlono interferometr światłem lasera.
- Wyjustowano interferometr oraz połączono odpowiednie zespoły w układzie przetwarzania sygnału pomiarowego i wywołano z klawiatury mikrokomputera program *INTER*.
- Włączono urządzenia w układzie zasilania stolika wibracyjnego.

Następnie za pomocą przełączników i pokręteł generatora, zasilającego stolik wibracyjny, wybierano kształt sygnału okresowego oraz ustawiano odpowiednią amplitudę i częstotliwość sygnału, kontrolując ich wartości za pomocą oscyloskopu i częstotliciomierza. Podczas badań pobudzano stolik wibracyjny sygnałami o przebiegu sinusoidalnym i piłokształtnym. Częstotliwości sygnałów, zasilających stolik wibracyjny, wybierano z zakresu od 0,1 Hz do 500 Hz, zaś amplitudy sygnału z zakresu od 0 ÷ 20 V.

Po ustawieniu parametrów sygnału, zasilającego stolik wibracyjny, uruchomiono tor przetwarzania i rejestracji sygnału pomiarowego. Zarejestrowany interferogram był następnie zapisywany na dysk mikrokomputera. W przypadku, gdy zarejestrowany interferogram był mało czytelny, dobierano, korzystając z odpowiedniej opcji w programie *INTER*, właściwą częstotliwość próbkowania przetworników A/C. Częstotliwość tę dobierano tak, aby na ekranie monitora można było zaobserwować interferogram, odpowiadający co najwyżej kilku okresom drgań wliczając. Badania powtarzano dla oświetlenia interferometru kolejnym laserem. Łącznie dla przemieszczeń generowanych przez stolik wibracyjny z napędem magnetoelektrycznym, wykonano po trzy serie pomiarów dla każdego z czterech stosowanych laserów. Analiza zarejestrowanych interferogramów była dokonywana po zakończeniu każdej

erii pomiarów. Czas analizy jednego interferogramu, zawierającego 2000 danych, nie przekraczał 100 sekund. Otrzymane wyniki badań oraz ich omówienie zawarto w szóstym rozdziale pracy.

Podobnie próbowano przeprowadzić badania dla stolika wibracyjnego z napędem piezoelektrycznym. W tym przypadku inny był zakres napięć pobudzających stolik wibracyjny. Amplitudy tych napięć zawierały się w zakresie od 300 V do 500 V. W wyniku przeprowadzonych badań okazało się jednak, że amplitudy drgań, wzbudzonych za pomocą stolika wibracyjnego pobudzanego za pomocą piezoceramiki, są zbyt małe. Dlatego też w dalszych badaniach ograniczono się do stosowania stolika z napędem magnetoelektrycznym.

## 5. Badania porównawcze

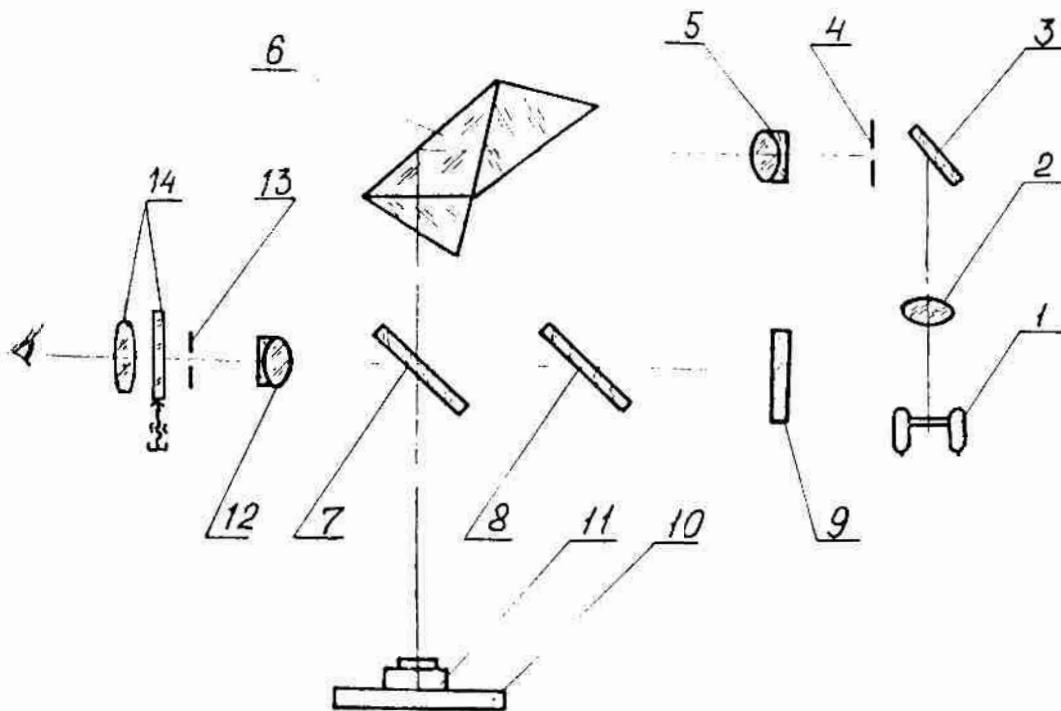
W celu oceny dokładności stanowiska badawczego postanowiono przeprowadzić badania porównawcze. Polegały one na weryfikacji wyników pomiarów średniej amplitudy drgań, uzyskanych za pomocą opracowanego stanowiska, inną metodą. Badania porównawcze najlepiej byłoby przeprowadzić, stosując do oceny dokładności stanowiska, interferometr laserowy ze stabilizowaną częstotliwością, o odpowiednio wysokiej dokładności. Z uwagi na to, że nie dysponowano takim interferometrem postanowiono wykorzystać do badań porównawczych komparator interferencyjny Köstersa [52], [114].

Komparator interferencyjny Köstersa wyposażony jest w lampy spektralne: helową i kryptonową. Lampy te emitują światło, którego widmo zawiera charakterystyczne, bardzo wąskie linie, o długości fali znanej z wysoką dokładnością (błąd długości fali nie przekracza  $\pm 0,001$  nm). Komparator interferencyjny Köstersa pozwala dokonywać pomiaru długości na podstawie wizualnej oceny obrazu interferencyjnego. Ogranicza to jego zastosowanie do pomiaru wolnozmiennych przemieszczeń i jest przyczyną zmniejszenia dokładności pomiaru, w porównaniu z interferometrem laserowym, wyposażonym w układ automatycznego zliczania prążków interferencyjnych.

Zastosowanie w badaniach porównawczych interferometru Köstersa, spowodowało konieczność ograniczenia się, podczas badań, do pomiarów interferometrów drgań mechanicznych o małej częstotliwości i amplitudzie. Wobec tych ograniczeń zdecydowano się na przeprowadzenie badań porównawczych z wykorzystaniem komparatora interferencyjnego Köstersa, gdyż tylko ta metoda (spośród dostępnych metod), dawała szansę weryfikacji wyników uzyskanych za pomocą opracowanego stanowiska.

Do badań wykorzystano trzy linie widmowe, emitowane przez każdą lampę spektralnych. W celu zwiększenia dokładności odczytu, lunetę

Obsługiwany komparator interferencyjny Köstera wyposażono w okular mikrometryczny. W czasie badań porównawczych umieszczono stolik wibracyjny na stoliku przedmiotowym komparatora interferencyjnego Köstera tak, jak schematycznie pokazano to na rys. 31. Komparator znajdował się w pomieszczeniu klimatyzowanym, w którym temperatura wynosiła  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Najpierw dokonano regulacji komparatora interferencyjnego Köstera tak, aby uzyskać obraz prążków interferencyjnych w luncle komparatora dla wybranej długości fali. Oczekano około dwóch godzin, aż do ustabilizowania temperatury komparatora. Temperatura była mierzona za pomocą dwóch termometrów. Do pomiarów przystąpiono wtedy, gdy różnica wskazań termometrów nie przekraczała  $0,03^{\circ}\text{C}$ . Dokonano także pomiarów wilgotności i ciśnienia atmosferycznego. Następnie włączono i wyregulowano układ zasilania stolika wibracyjnego. Częstotliwość sygnału sinusoidalnego, pobudzającego stolik wibracyjny, wynosiła 0,5 Hz, zaś amplituda mieściła się w zakresie od 0,5 V do 3 V. Początkowo pomiarów amplitudy drgań zwierciadła dokonywano korzystając z okularu mikrometrycznego.



rys. 31. Schemat ilustrujący ustawienie wibratora na stoliku przedmiotowym komparatora interferencyjnego Köstera; 1 - lampa spektralna, 2 - kondensator, 3 - zwierciadło, 4 - przysłona aperturowa, 5 - obiektyw, 6 - pryzmat monochromatora, 7 - płytka światłodzielcza, 8 - płytka kompensacyjna, 9 - zwierciadło wzorcowe, 10 - stolik przedmiotowy, 11 - stolik wibracyjny, 12 - okular, 13 - przysłona, 14 - okular mikrometryczny

W wyniku badań wstępnych stwierdzono, że pomiar amplitudy drgań wierzniadła za pomocą okularu mikrometrycznego jest mało dokładny. Dlatego też przyjęto inny sposób postępowania. Polegał on na tym, że amplitudę drgań dobierano tak, iż dla danej długości fali podwójna amplituda drgań była równa całkowitej wielokrotności połowy długości fali. Regulacja sygnału, zasilającego stolik wibracyjny, była dokonywana za pomocą dwóch pokręteł generatora. Jedno z pokręteł pozwalało ustalić wartość amplitudy sygnału sinusoidalnego, drugie zaś zmieniało jego poziom. Dzięki temu łatwo można było wyregulować odpowiednią amplitudę drgań stolika wibracyjnego dla każdej długości fali. Badania porównawcze przeprowadzono jedynie dla drgań o małej częstotliwości i amplitudzie, gdyż zwiększanie tych parametrów uniemożliwiało pomiar amplitudy za pomocą komparatora interferencyjnego.

Po ustawieniu odpowiedniej amplitudy drgań stolika wibracyjnego opisanym sposobem, dokonywano jej pomiaru interferometrem laserowym. Do tego celu łączono interferometr ze stolikiem wibracyjnym, oświetlano interferometr laserem i rejestrowano interferogram. Na podstawie analizy interferogramu wyznaczano wartość średniej amplitudy drgań stolika. Zmierzoną wartość średniej amplitudy drgań stolika porównywano z wartością, określoną za pomocą komparatora interferencyjnego Köstera. Wyznaczając amplitudę drgań, za pomocą komparatora interferencyjnego, uwzględniono szereg poprawek przewidzianych w instrukcji [114].

Wyniki pomiarów porównawczych średniej amplitudy drgań zamieszczono w rozdziale 6. Dokonano ich dla trzech długości fal światła lampy kryptonowej z uwagi na to, że dla czwartej długości fali (barwa fioletowa) widoczność prążków w interferometrze Köstera była niedostateczna. Z tych samych powodów ograniczono się do wykorzystania w badaniach porównawczych trzech linii widmowych spektralnej lampy helowej.

## 6. Badania wybranych właściwości profilometrów stykowych

Praktyczną przydatność opracowanej metody postanowiono zbadać, sprawdzając za pomocą zbudowanego stanowiska, następujące właściwości przyrządów stykowych:

- błąd względny powiększenia pionowego profilografu,
- błąd wskazań profilometru,
- charakterystykę przenoszenia profilometru.



o badań wybrano dwa przyrządy stykowe:

profilometr typu *ME10*, produkcji firmy *Carl Zeiss Jena*, o numerze fabrycznym 510, wyposażony w czujnik typu 8 z przetwornikiem indukcyjnościowym,

profilometr *Hommel Tester* typu T2000, firmy *Hommelwerke*, o numerze fabrycznym 30442/869, wyposażony w liniowy przyrząd posuwowy typu LV-50E i czujnik typu TKL 100 z przetwornikiem indukcyjnościowym.

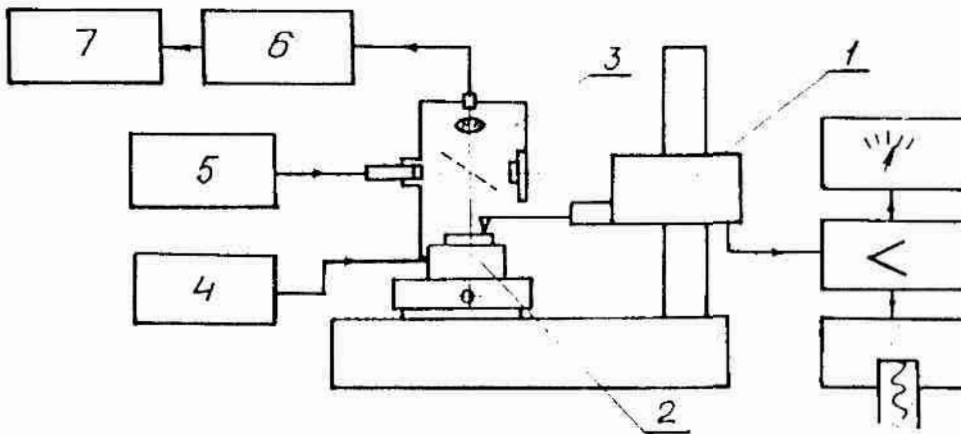
Profilometr T2000 podczas badań połączony był, za pomocą sprzęgu typu RS 232 C, z mikrokomputerem typu *IBM PC*, wykorzystującym do analizy sygnału pomiarowego oprogramowanie *Hommel Turbo Software*, dostarczone przez producenta profilometru.

Błąd względny powiększenia pionowego sprawdzono, ustawiając stolik wibracyjny połączony z interferometrem laserowym na stole przedmiotowym profilometru. Interferometr oświetlono laserem półprzewodnikowym typu *PH 03*, zaś detektor fotoelektryczny połączono systemem rejestracji sygnału pomiarowego. Stolik wibracyjny zasilano sygnałem sinusoidalnym, o częstotliwości 4 Hz i amplitudzie obranej stosownie do nominalnego powiększenia pionowego przyrządu, uzyskiwanym za pośrednictwem wzmacniacza z generatora sygnałów cresowych. Dokonywano przy tym jednoczesnej rejestracji sygnału interferencyjnego, zapisywanego w pamięci mikrokomputera, oraz sygnału przetworzonego przez sprawdzany profilometr. Uproszczony schemat zamieszczony na rys.32 pokazuje wzajemne usytuowanie stanowiska badawczego i sprawdzanego przyrządu stykowego. Widok sprawdzanego profilometru T2000 wraz z wibratorem i interferometrem laserowym, ustawionymi na stoliku przedmiotowym, pokazano na rys.33. Na rys.34 pokazano ustawienie wibratora z interferometrem na stole przedmiotowym profilometru *ME10*.

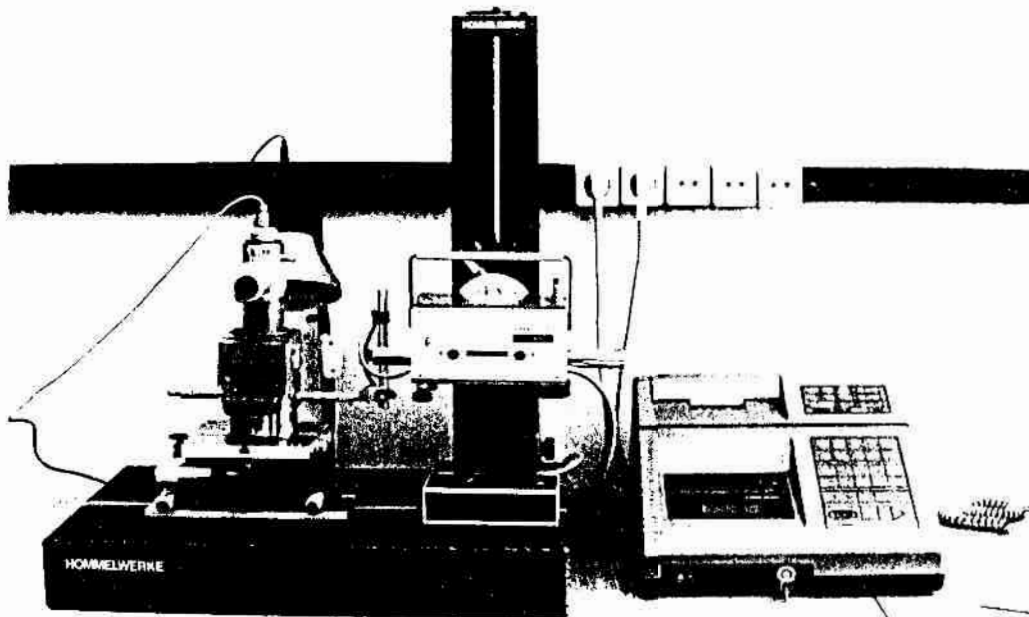
Sprawdzenia błędu względnego powiększenia pionowego profilografu *ME10* dokonano dla następujących powiększeń pionowych: 5000x, 10000x, 25000x i 50000x. W przyrządzie T2000 błąd względny powiększenia pionowego sprawdzono dla powiększeń 5000x i 20000x. Błąd względny powiększenia pionowego obu profilografów, w celach porównawczych, sprawdzono także za pomocą wzorców kontrolnych. Wykorzystano w tym celu wzorce kontrolne typu A1. Były to wzorce firmy *Carl Zeiss Jena* oraz wzorce wykonane w WSiInż. Koszalin [48] i sprawdzone w PKNMIJ. Zarysy wybranych wzorców pokazano na rys.35a,b.

W podobny sposób, wykorzystując układ pokazany na rys.32, sprawdzono błędy wskazań obu profilometrów. W przypadku profilometru *ME10* sprawdzono błąd wskazań parametru  $R_a$ . Stolik wibracyjny pobudzano do drgań sygnałem o częstotliwości 80 Hz i amplitudzie dobranej do stopnia wzmocnienia profilometru. Podobnie jak poprzednio,

rejestrowano sygnał interferencyjny i odczytywano wskazania przyrządu. Prędkość przesuwu ostrza profilometru wynosiła 1 mm/s, długość dcinka elementarnego 0,8 mm, zaś długość odcinka pomiarowego 2,5 mm. Sprawdzenia błędów wskazań dokonano dla dwóch wzmocnień profilometru: 0000x i 50000x. Pomiarów dokonywano dziesięciokrotnie, po czym, zgodnie ze wskazówkami zawartymi w p. 2.4.3, wyznaczano błąd wskazań. Błąd wskazań profilometru ME10 sprawdzono także za pomocą wzorców kontrolnych wyprodukowanych przez firmę Kalibr z Moskwy. Były to wa wzorce typu C3 o nominalnych wartościach parametru  $R_a$  wynoszących odpowiednio 0,064  $\mu\text{m}$  i 0,64  $\mu\text{m}$ . Ich zarysy pokazano na rys. 35c.

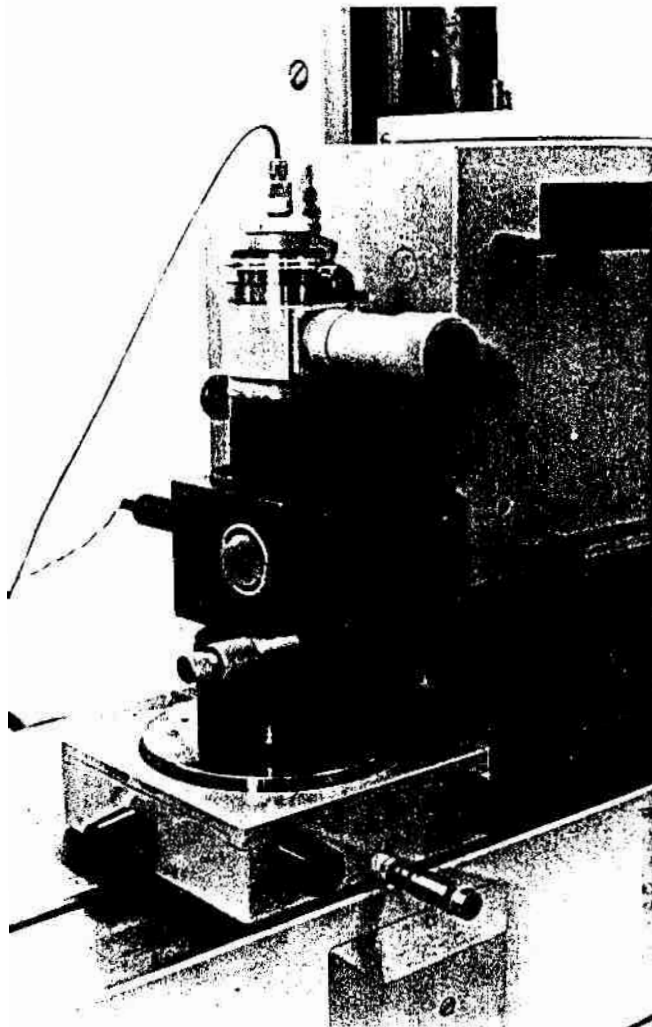


rys. 32. Schemat sprawdzania profilometru za pomocą stolika wibracyjnego i interferometru laserowego; 1 - przyrząd stykowy, 2 - stolik wibracyjny, 3 - interferometr laserowy, 4 - układ zasilania stolika wibracyjnego, 5 - zasilacz lasera, 6 - układ przetwarzania sygnału interferencyjnego, 7 - mikrokomputer



rys. 33. Widok profilometru T2000 podczas sprawdzania za pomocą wibratora i interferometru laserowego

Dla profilometru T2000 wyznaczono błędy wskazań następujących parametrów:  $R_a$ ,  $R_m$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ . Stolik wibracyjny pobudzano sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz. Amplitudę drgań dobierano stosownie do stopnia wzmocnienia profilometru. Prędkość przesuwu ostrza profilometru wynosiła 0,5 mm/s, długość odcinka elementarnego 0,8 mm, zaś długość odcinka pomiarowego 4,8 mm. Sprawdzenia błędów wskazań przyrządu dokonano dla dwóch zakresów pomiarowych:  $\mu\text{m}$  i 20  $\mu\text{m}$ . Polegało ono na rejestracji dziesięciu interferogramów oraz wskazań poszczególnych parametrów chropowatości powierzchni, wyznaczonych za pomocą profilometru. Ponadto dodatkowo rejestrowano sygnały z profilometru w pamięci mikrokomputera połączonego z profilometrem. Nie dokonano sprawdzenia błędów wskazań profilometru T2000 za pomocą wzorców, ze względu na brak odpowiednich wzorców kontrolnych chropowatości powierzchni.

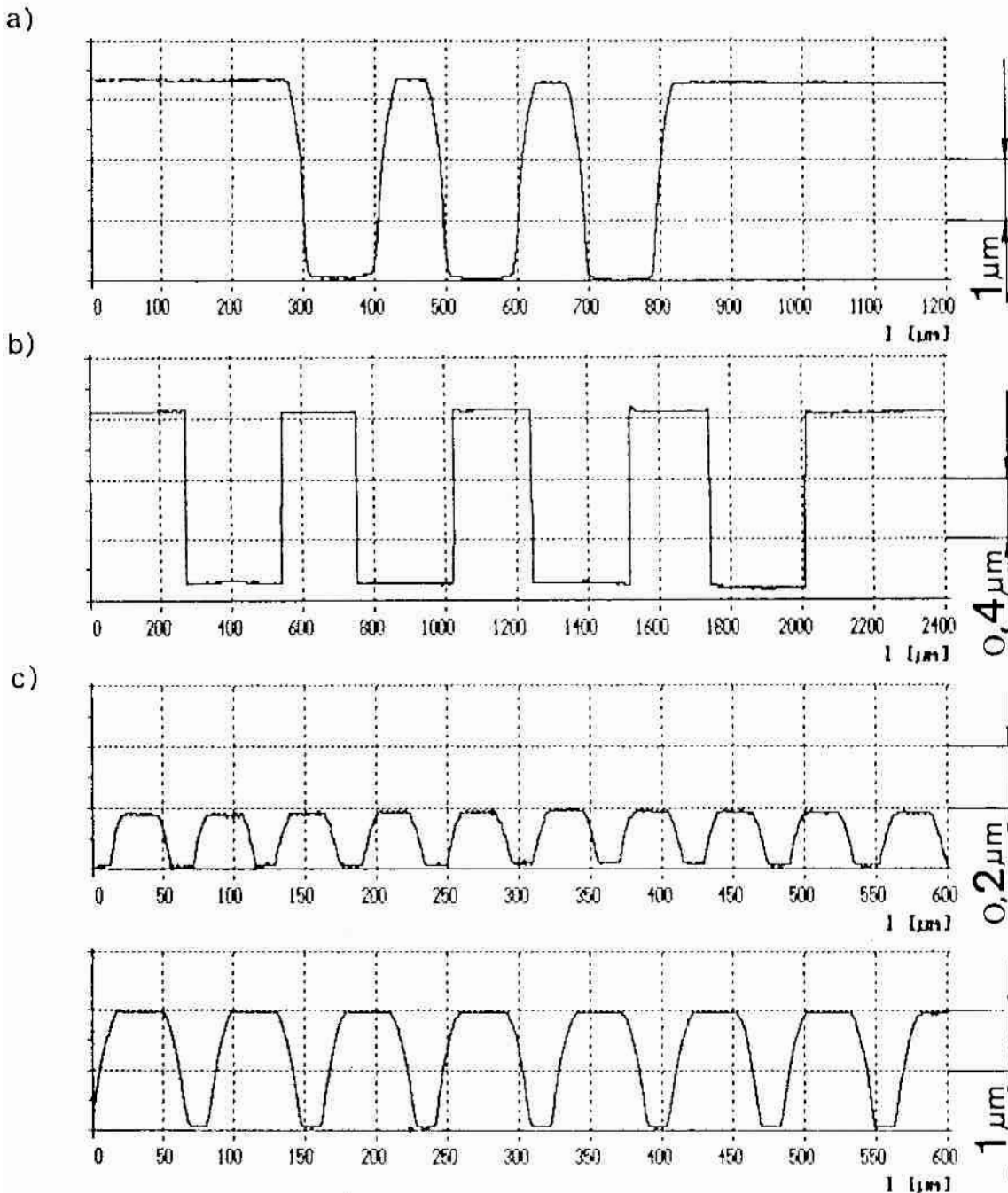


rys. 34. Ustawienie stolika wibracyjnego z interferometrem na profilometrze ME10

Następnie sprawdzono charakterystyki przenoszenia obu profilometrów. W układzie pokazanym na rys. 32 pobudzano do drgań harmonicznymi ostrze odwzorowujące profilometru. Jednocześnie rejestrowano interferogram w pamięci komputera i odczytywano wskazanie profilometru. Częstotliwości drgań wynosiły od 0,06 Hz do 125 Hz. Charakterystykę przenoszenia przyrządu ME10 sprawdzono dla parametru  $R_a$ . Odcinek elementarny wynosił 0,8 mm, odcinek pomiarowy 2,5 mm, prędkość przesuwu ostrza odwzorowującego 1 mm/s, a wzmocnienie 10000x. Charakterystyki przenoszenia obu profilometrów wyznaczane były metodą punktową, w sposób opisany w p. 2.4.4. Charakterystykę przenoszenia profilometru T2000 sprawdzono przyjmując odcinek elementarny 0,8 mm, odcinek pomiarowy 4,8 mm i prędkość przesuwu ostrza 0,5 mm/s. Podobnie

ak błąd wskazań, charakterystykę przenoszenia profilometru T2000 :  
yznaczono dla zakresu pomiarowego  $2 \mu\text{m}$  i następujących parametrów:  
 $\alpha$ ,  $R_m$ ,  $R_\rho$ ,  $R_q$ . Niestety nie dokonano sprawdzenia charakterystyki  
rzenoszenia za pomocą wzorców kontrolnych, gdyż nie dysponowano  
dpowiednimi wzorcami.

Wyniki sprawdzania błędu powiększenia pionowego, błędu wskazań  
charakterystyki przenoszenia obu sprawdzanych profilometrów zamie-  
zczono w rozdziale 6.

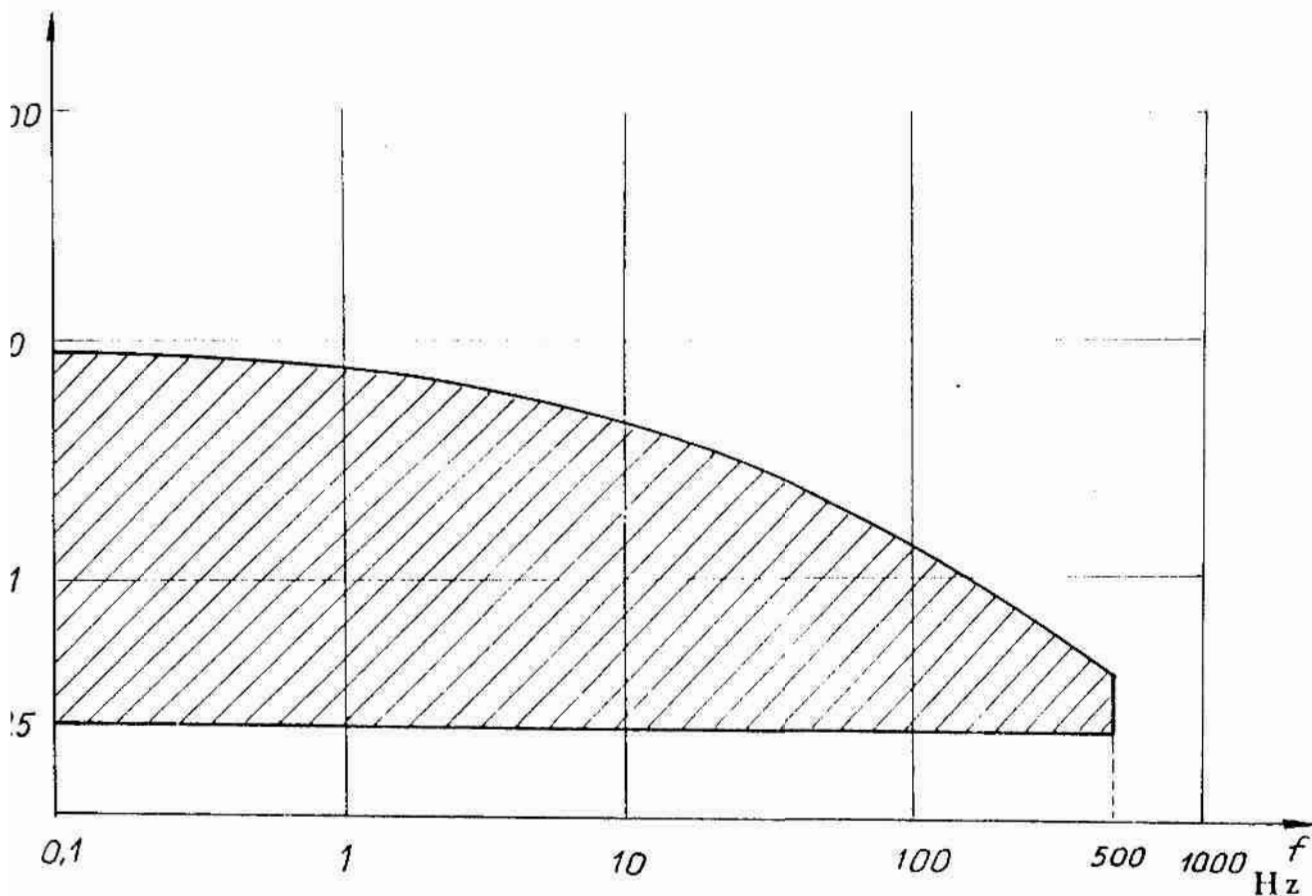


rys. 35. Zarysy wybranych wzorców kontrolnych stosowanych podczas spr-  
żania profilometrów ME10 i T2000; a) zarys wzorca firmy Carl Zeiss  
na , b) zarys wzorca wykonanego w WSInż Koszalin, c) zarysy wzor-  
ów firmy Kalibr

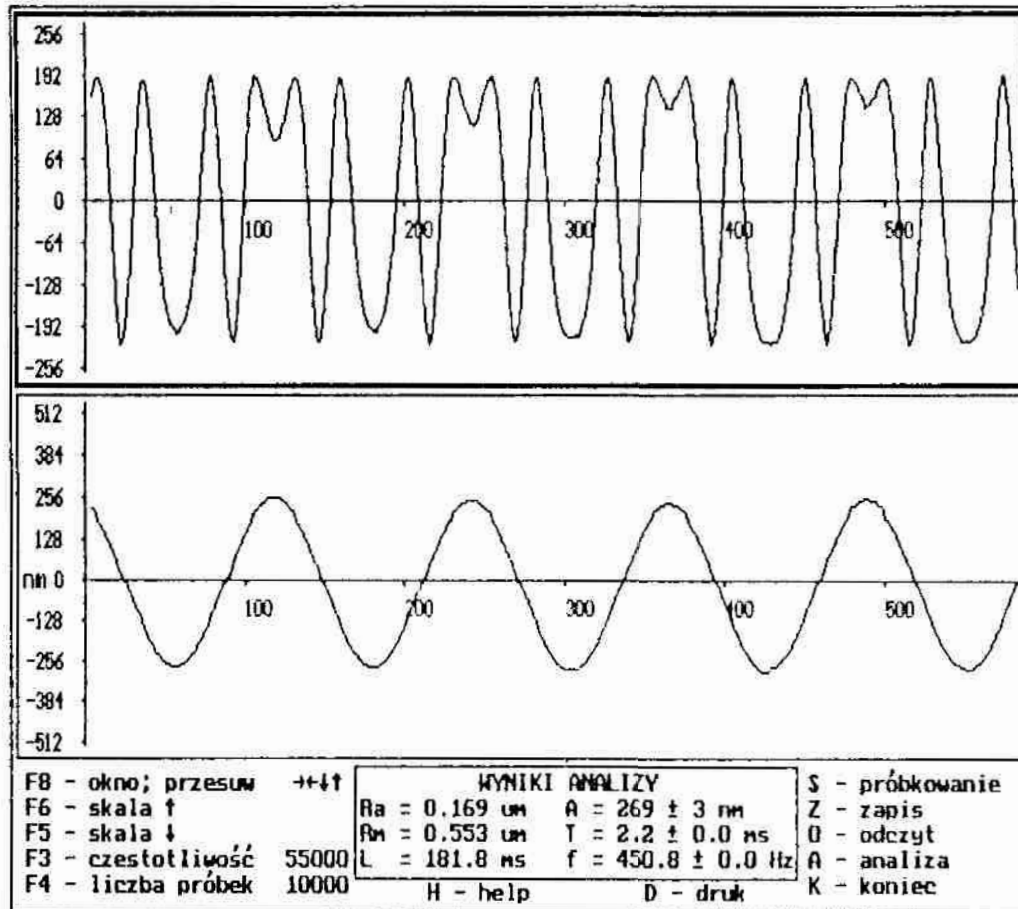
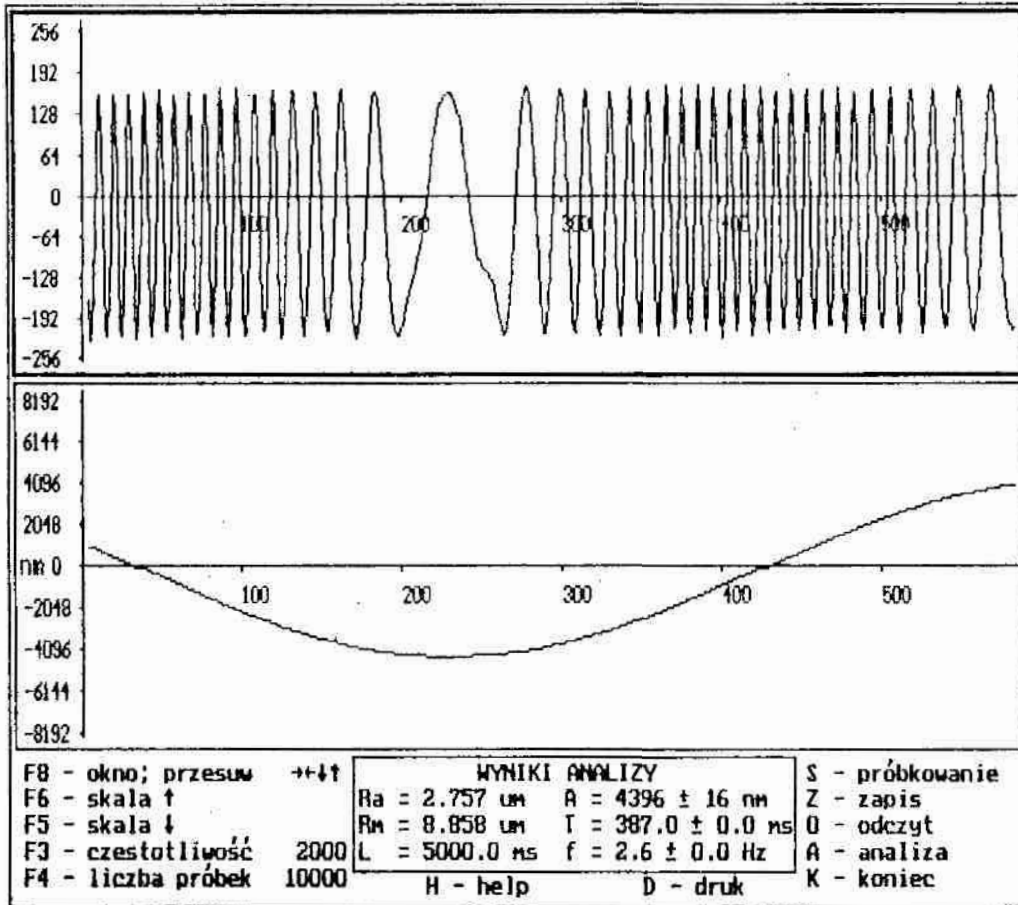
## WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH I ICH ANALIZA

### 1. Wyniki badań przemieszczeń w ruchu okresowym za pomocą interferometru laserowego

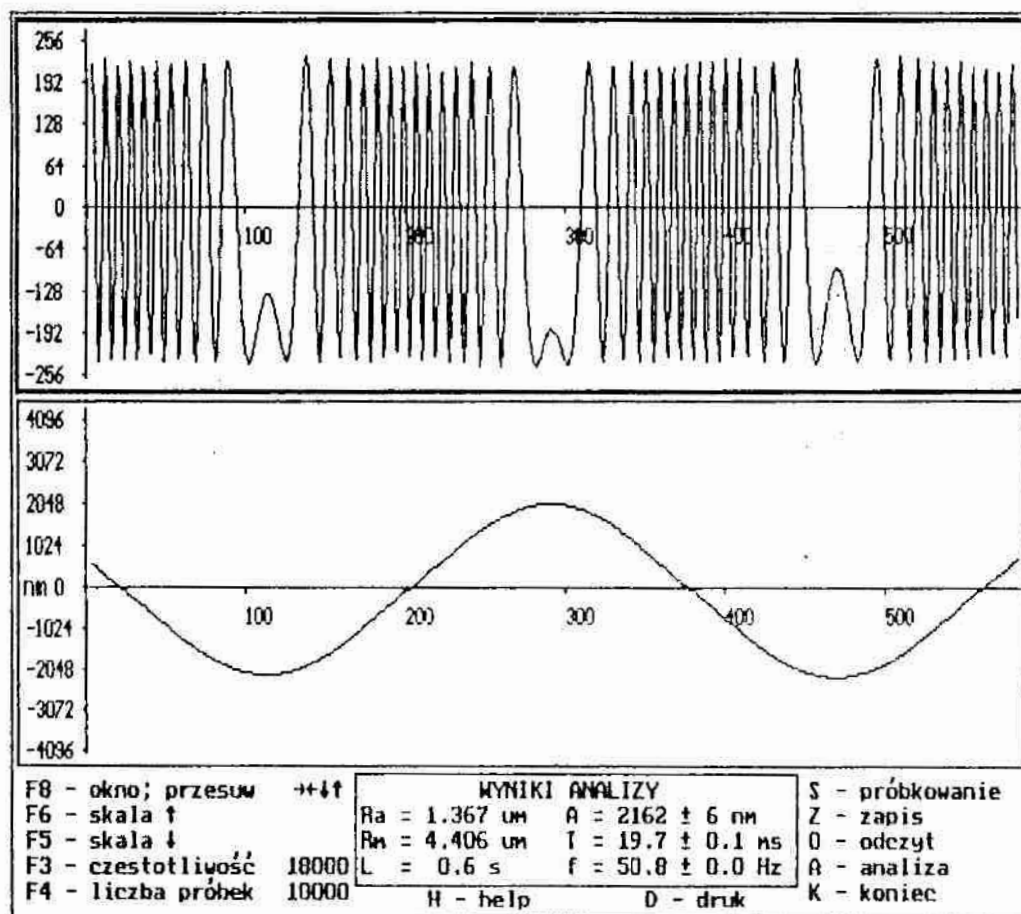
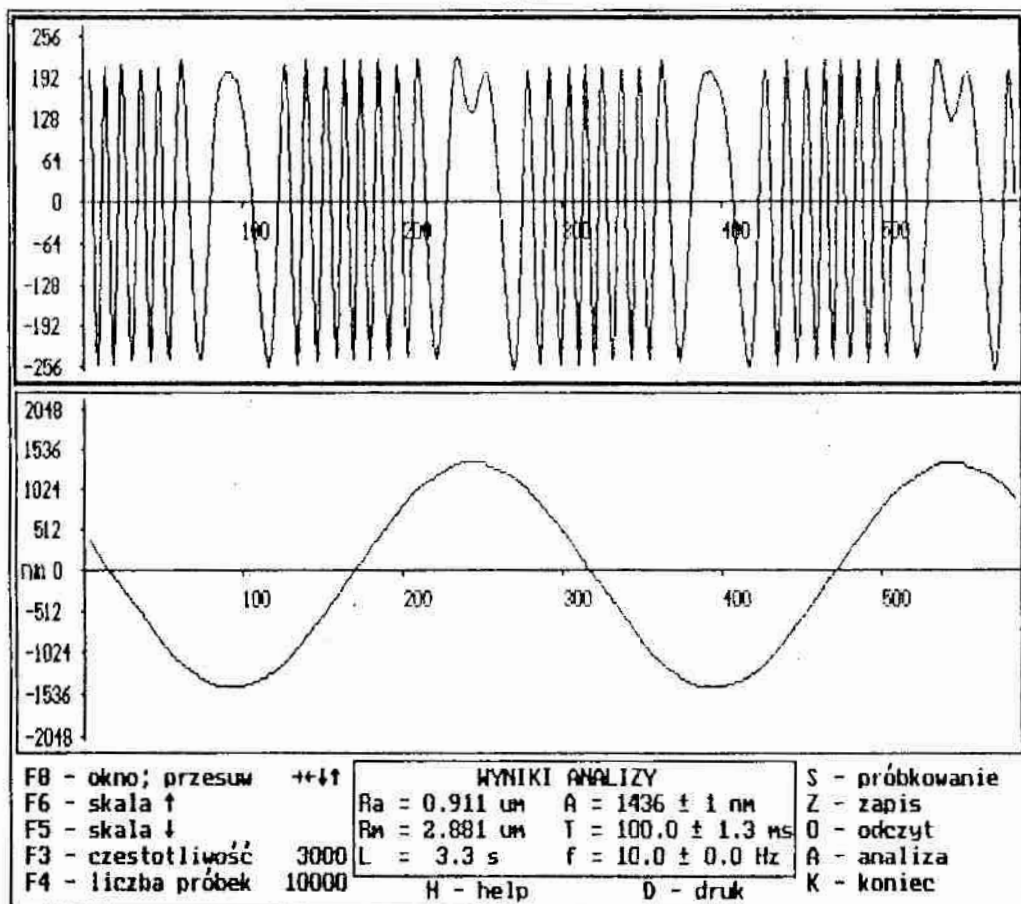
Podczas badań, przeprowadzonych zgodnie z metodyką opisaną w 5.4, przy pobudzeniu stolika wibracyjnego sygnałem sinusoidalnym, zarejestrowano 180 interferogramów. Ich analiza, za pomocą programu NTER, pozwoliła określić zakres amplitud i częstotliwości drgań harmoniczných, które mogą być zmierzone na opracowanym stanowisku. Przykładowe wykresy interferogramów oraz wyznaczone na ich podstawie wykresy przemieszczeń zwierciadła interferometru pokazano na rys. 37 i 38. Na rys. 36 przedstawiono wykres, z zaznaczonym zakresem amplitud i częstotliwości drgań zwierciadła interferometru, objętych badaniami. Ograniczenie tego zakresu wynikało głównie z możliwości zastosowanego stolika wibracyjnego, a nie z możliwości pomiarów interferencyjnych. Jedyne w przypadku wyższych częstotliwości, ograniczeniem było zbyt wąskie pasmo przenoszenia sygnału w torze pomiarowym stanowiska badawczego.



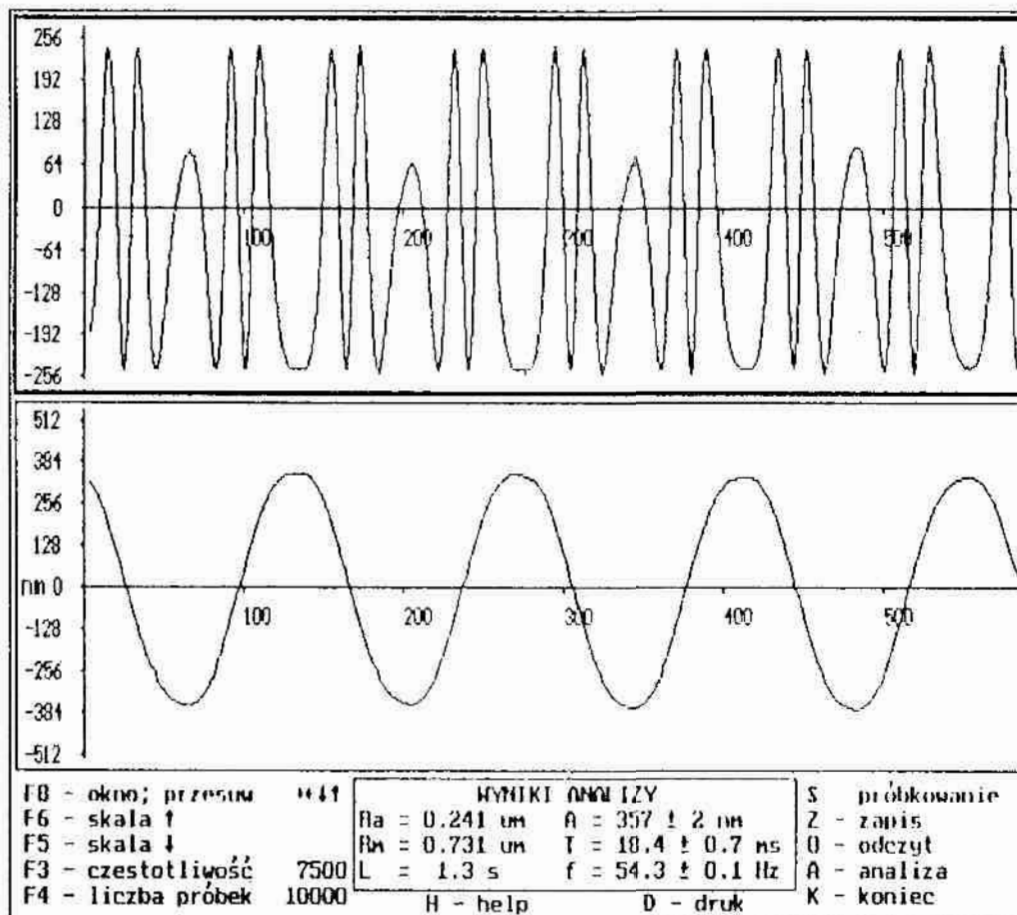
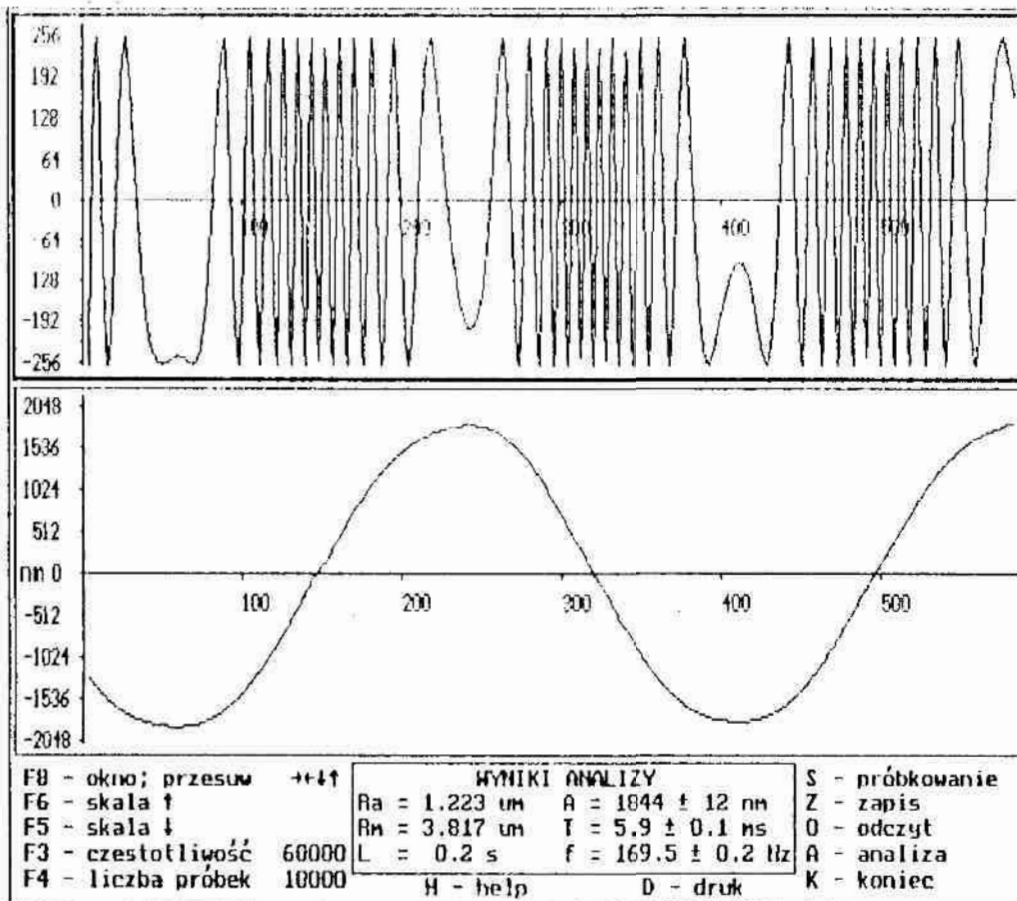
rys. 36. Zakres amplitud i częstotliwości drgań harmoniczných zwierciadła interferometru objętych badaniami;  $a$  - amplituda drgań,  $f$  - częstotliwość drgań,  $\lambda_1$  - długość fali światła laserowego



rys. 37. Interferogramy i wykresy równania ruchu wyznaczone za pomocą stanowiska badawczego; interferometr oświetlony laserem półprzewodnikowym typu PM 03,  $\lambda_l = 0,6753 \mu\text{m}$ ; stolik wibracyjny z napędem magnetycznym; pobudzenie sygnałem sinusoidalnym

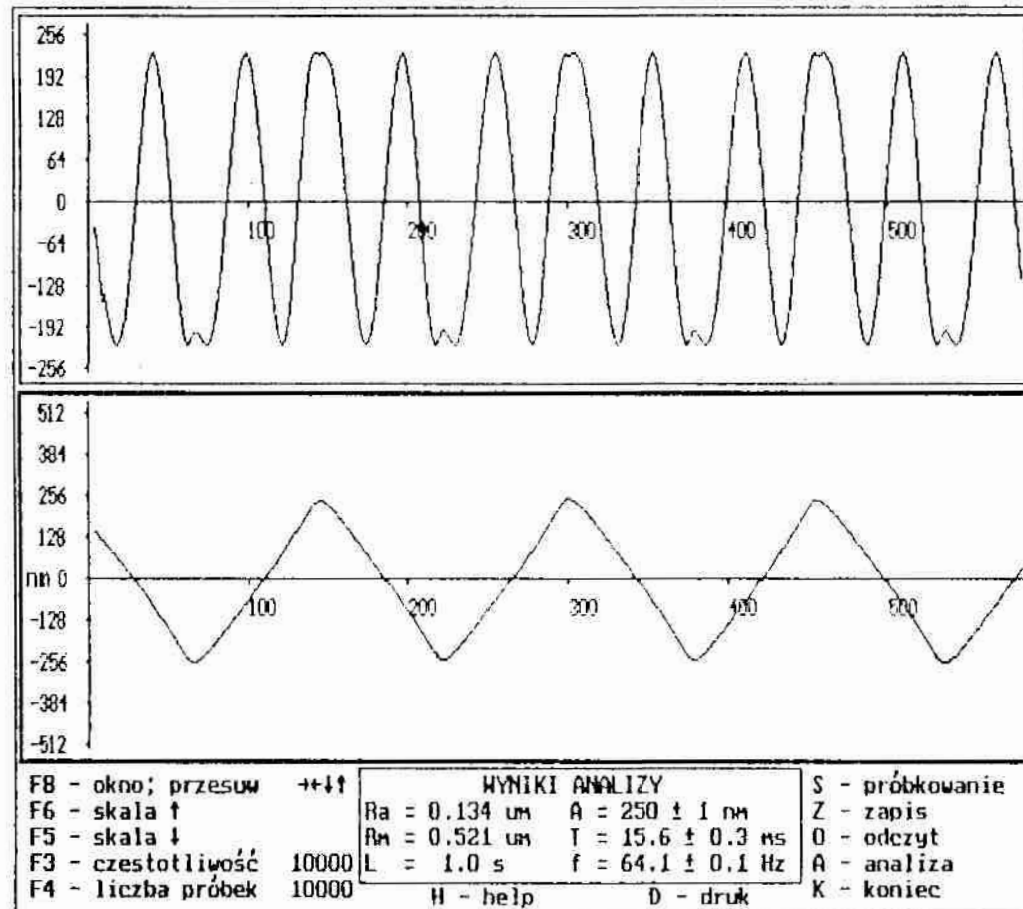
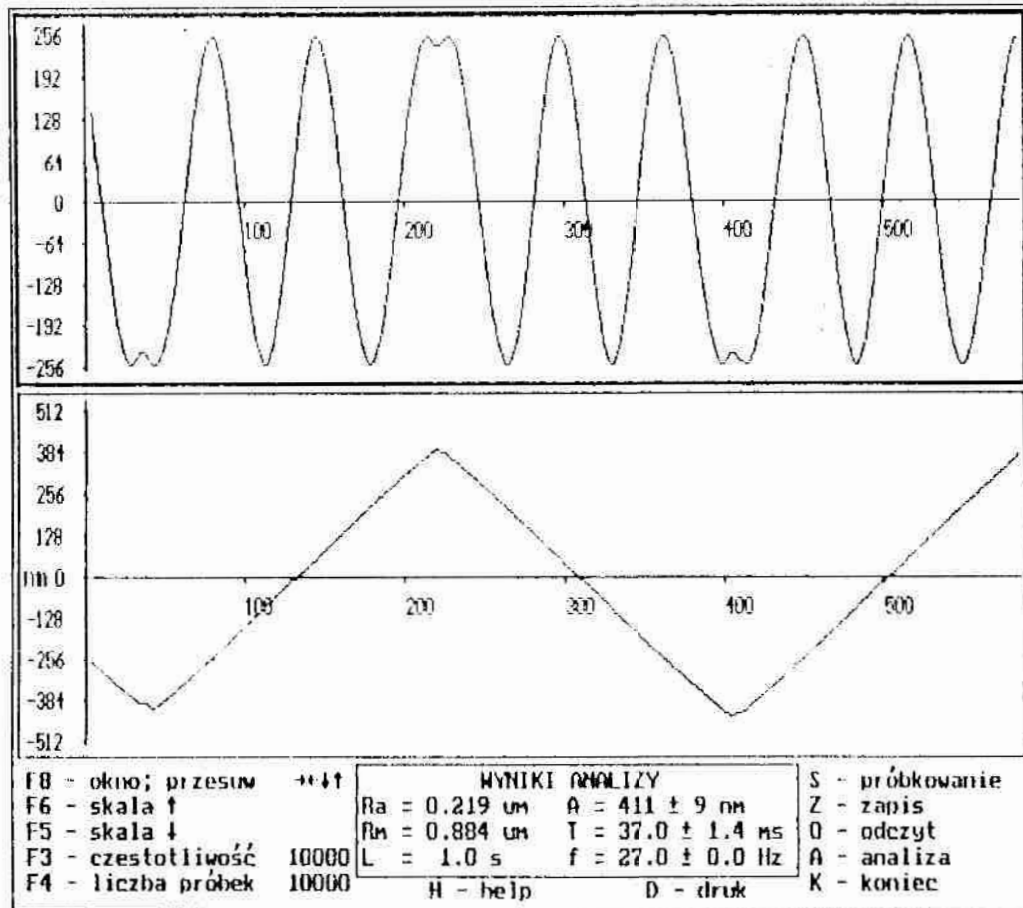


Rys. 38. Interferogramy i wykresy równania ruchu wyznaczone za pomocą stanowiska badawczego; interferometr oświetlony laserem He-Ne typu LG 600,  $\lambda_l = 0,6328 \mu\text{m}$ ; stolik wibracyjny z napędem magnetoelektrycznym; pobudzenie sygnałem sinusoidalnym

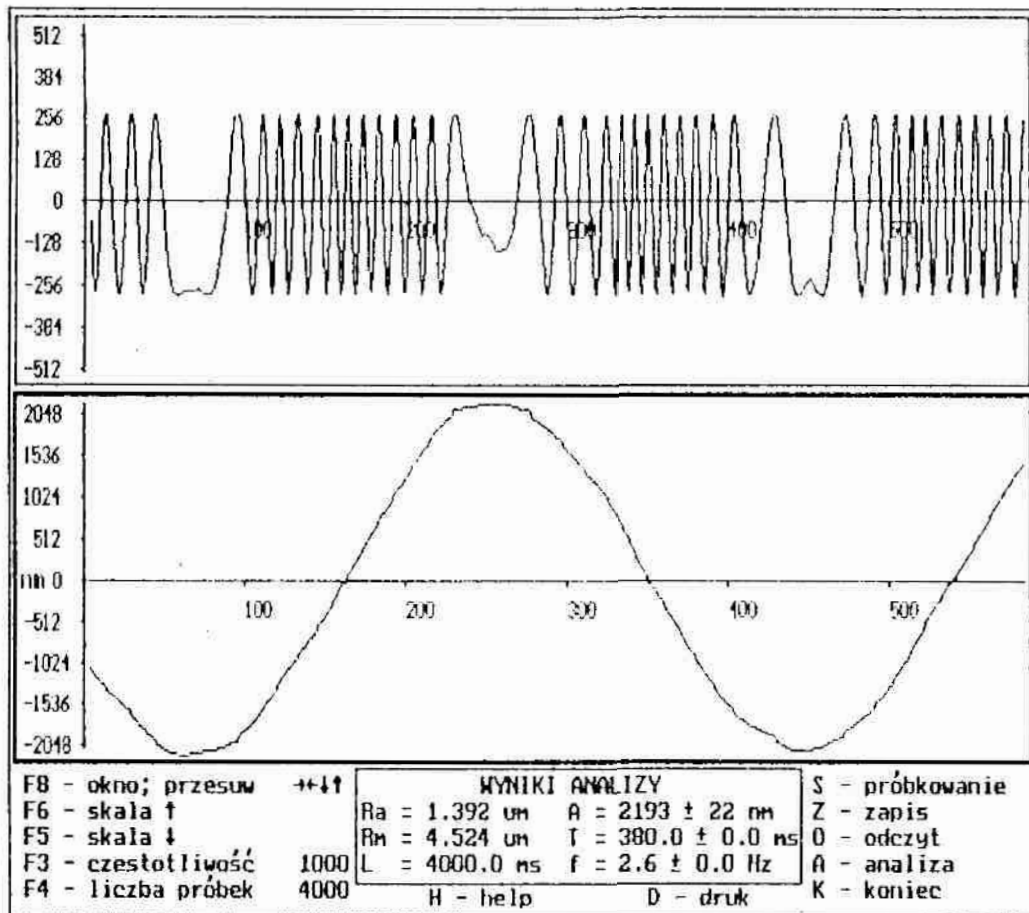
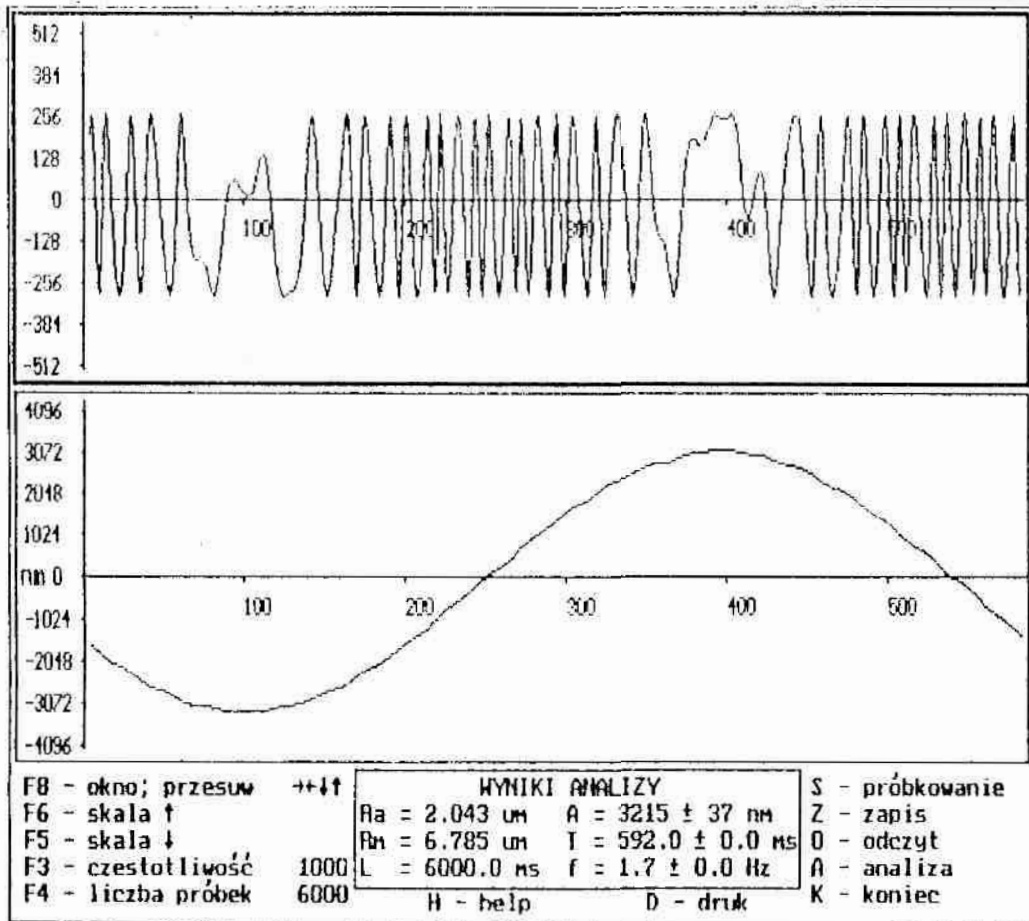


rys. 39. Interferogramy i wykresy równania ruchu wyznaczone za pomocą interferometru badawczego; interferometr oświetlony laserem He-Ne typu 600,  $\lambda_2 = 0,6328 \mu\text{m}$ ; stolik wibracyjny z napędem magnetoelektrycznym; pobudzenie sygnałem płókształtnym

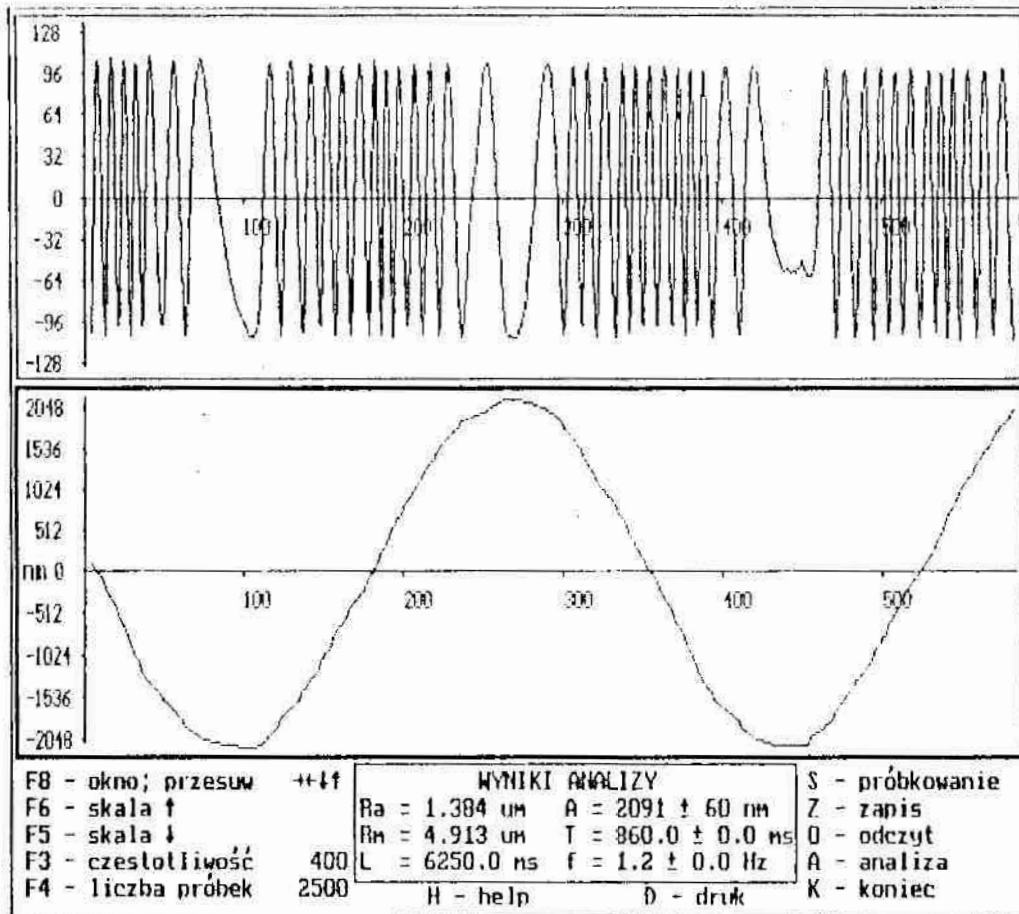




rys. 40. Interferogramy i wykresy równania ruchu wyznaczone za pomocą stanowiska badawczego; interferometr oświetlony laserem He-Ne typu 3 600,  $\lambda_2 = 0,6328 \mu\text{m}$ ; stolik wibracyjny z napędem piezoceramicznym, obudzenie sygnałem płókształtnym



ys. 41. Interferogramy i wykresy równania ruchu wyznaczone za pomocą tanowiska w obecności silnych zakłóceń; interferometr oświetlony laserem półprzewodnikowym typu PH 03,  $\lambda_l = 0,6753 \mu\text{m}$ ; stolik wibracyjny napędem magnetoelektrycznym; pobudzenie sygnałem sinusoidalnym



Rys. 42. Interferogram i wykres równania ruchu wyznaczone za pomocą stanowiska badawczego w obecności silnych zakłóceń; interferometr oświetlony laserem półprzewodnikowym typu PM 03,  $\lambda_1 = 0,6753 \mu\text{m}$ ; stolik wibracyjny z napędem magnetoelektrycznym; pobudzenie sygnałem sinusoidalnym

W wyniku przeprowadzonych badań okazało się, że pobudzenie stolika wibracyjnego z napędem magnetoelektrycznym, sygnałem piłokształtnym, powoduje generowanie drgań mechanicznych o przebiegu zbliżonym do harmonicznego. Przyczyną tego może być silne tłumienie wyższych składowych harmonicznych przez układ mechaniczny stolika wibracyjnego. Generowanie drgań mechanicznych o przebiegu piłokształtnym, w niewielkim zakresie amplitud umożliwił stolik wibracyjny z napędem piezoelektrycznym. Na rys. 39 i 40 pokazano przykładowe interferogramy oraz wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru uzyskane przy pobudzaniu stolików wibracyjnych, z napędem magnetoelektrycznym i piezoelektrycznym, sygnałem piłokształtnym.

Dla drgań o częstotliwości poniżej 3 Hz, generowanych za pomocą stolika wibracyjnego z napędem magnetoelektrycznym, przy pobudzeniu sygnałem sinusoidalnym i piłokształtnym, obserwowano w kilku przypadkach znaczne zakłócenia sygnału interferencyjnego. Na rys. 41 i 42

skazano interferogramy zarejestrowane w obecności zakłóceń oraz wyniki ich analizy. Niekiedy wartość zakłóceń była tak duża, iż uniemożliwiała analizę interferogramu za pomocą programu *INTER*.

## 2. Wyniki badań porównawczych

W wyniku badań porównawczych, przeprowadzonych tak jak opisano w 5.5, otrzymano 12 interferogramów, które poddano analizie za pomocą programu *INTER*. Interferogramy oraz wyniki analizy pokazano na rys. 43, 44, 45, 46, 47 i 48. W tablicach 7 i 8 zestawiono wyniki pomiarów amplitudy drgań zwierciadła za pomocą komparatora interferencyjnego Köstera. W tablicy 9 zestawiono wyniki pomiarów amplitudy, uzyskane za pomocą komparatora interferencyjnego Köstera i interferometru laserowego. Jak wskazują otrzymane wyniki występuje duża zgodność amplitud zmierzonych jednym i drugim sposobem.

Tablica 7. Wyniki pomiarów średniej amplitudy drgań stolika wibracyjnego za pomocą komparatora interferencyjnego Köstera z lampą helową

Barwa widma	czerwona	żółta	zielona
Nominalna długość fali, $\mu\text{m}$	0,6678184	0,5875660	0,5051702
Temperatura, $^{\circ}\text{C}$	19,60	19,60	19,62
Ciśnienie atmosferyczne hPa mmHg	1016,32 762,30	1016,32 762,30	1016,32 762,30
Ciśnienie pary wodnej hPa mmHg	7,73 5,8	7,73 5,8	7,73 5,8
Długość fali po korekcie, $\mu\text{m}$	0,6678174	0,5875651	0,5051695
Rząd interferencji	4	5	6
Średnia amplituda drgań, $\mu\text{m}$	1,3356348	1,48891275	1,5155085

- Uwagi: 1. Nominalna długość fali wyznaczona w normalnych warunkach użytkowania: ciśnienie atmosferyczne  $p = 1013,25$  hPa, temperatura  $t = 20^{\circ}\text{C}$ , ciśnienie pary wodnej  $e = 13,33$  hPa  
 2. Rząd interferencji wyznaczono jako liczbę całkowitą określającą ile razy  $\lambda/2$  mieści się w amplitudzie drgań  
 3. Nie wprowadzano korekty apertury z uwagi na jej małą wartość

Tablica 8. Wyniki pomiarów średniej amplitudy drgań stolika wibracyjnego za pomocą komparatora interferencyjnego *Kostersa* z lampą kryptonową

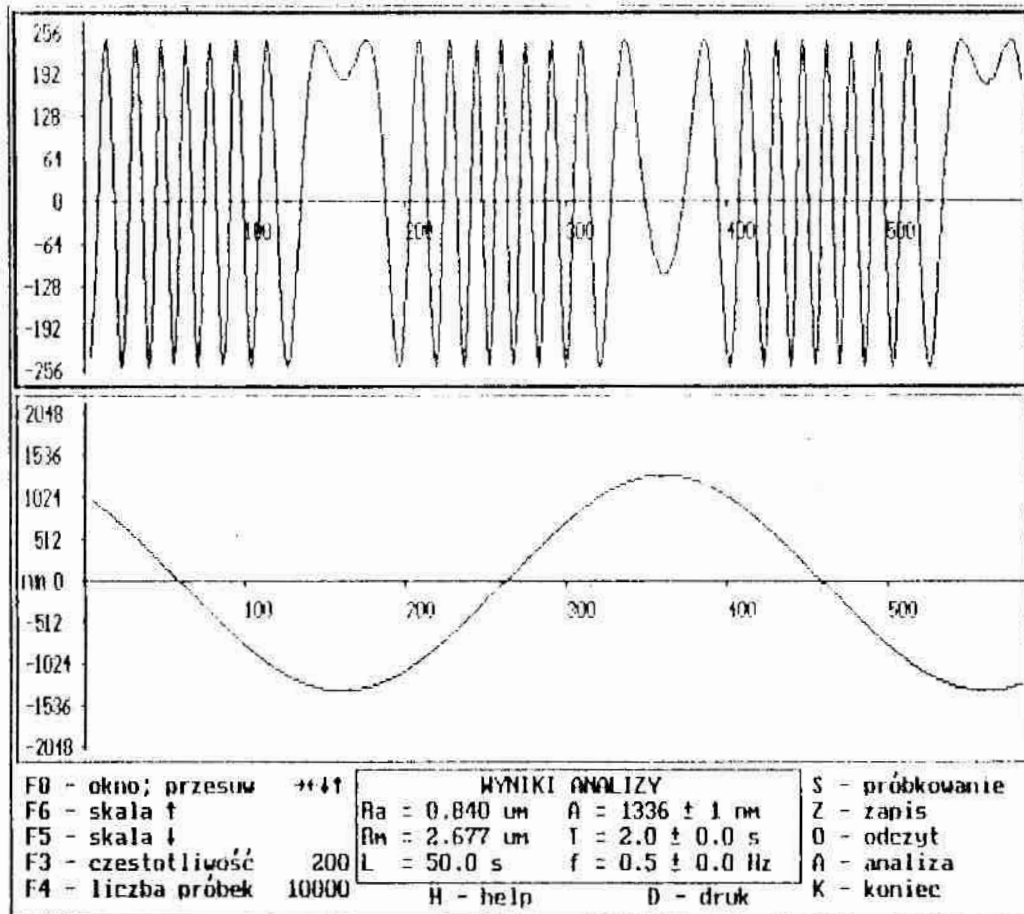
Barwa widma	czerwona	żółta	seledynowa
Nominalna długość fali, $\mu\text{m}$	0,64563241	0,58709463	0,56495924
Temperatura, $^{\circ}\text{C}$	19,86	19,88	19,86
Ciśnienie atmosferyczne hPa mmHg	1021,52 766,20	1021,52 766,20	1021,52 766,20
Ciśnienie pary wodnej hPa mmHg	8,27 6,2	8,27 6,2	8,27 6,2
Długość fali po korekcie, $\mu\text{m}$	0,64563077	0,58709315	0,56495780
Rząd interferencji	6	6	6
Średnia amplituda drgań, $\mu\text{m}$	1,93689231	1,76127945	1,69483734

- Uwagi: 1. Nominalna długość fali wyznaczona w normalnych warunkach użytkowania: ciśnienie atmosferyczne  $p = 1013,25$  hPa, temperatura  $t = 20^{\circ}\text{C}$ , ciśnienie pary wodnej  $e = 13,33$  hPa  
 2. Rząd interferencji wyznaczono jako liczbę całkowitą określającą ile razy  $\lambda/2$  mieści się w amplitudzie drgań  
 3. Nie wprowadzano korekty apertury z uwagi na jej małą wartość

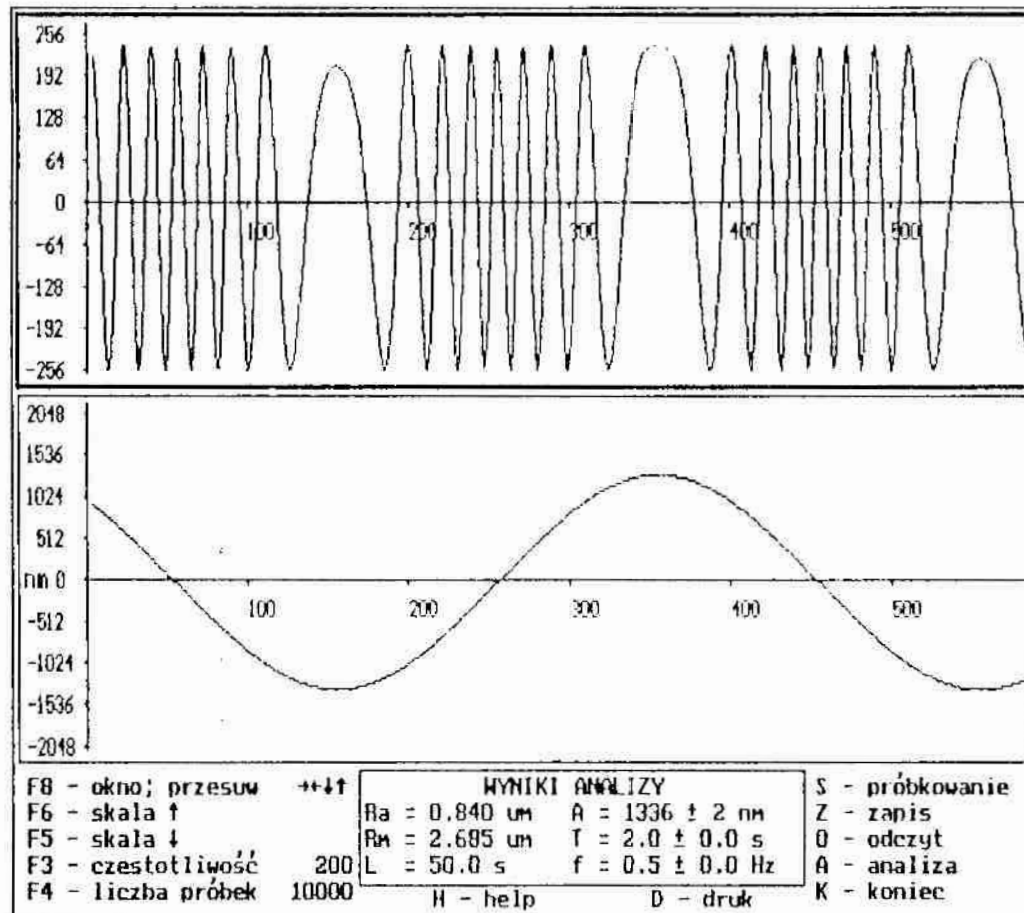
Tablica 9. Zestawienie wyników badań porównawczych

Średnia amplituda drgań w $\mu\text{m}$ zmierzona za pomocą		
komparatora interferencyjnego <i>Kostersa</i>	stanowiska badawczego z laserem LG-200	stanowiska badawczego z laserem PM-03
1,3356348	1,336 $\pm$ 0,001	1,336 $\pm$ 0,002
1,46891275	1,469 $\pm$ 0,001	1,469 $\pm$ 0,001
1,5155085	1,515 $\pm$ 0,001	1,517 $\pm$ 0,005
1,93689231	1,905 $\pm$ 0,012	1,938 $\pm$ 0,011
1,76127945	1,760 $\pm$ 0,001	1,761 $\pm$ 0,001
1,6948734	1,695 $\pm$ 0,002	1,696 $\pm$ 0,002

a)

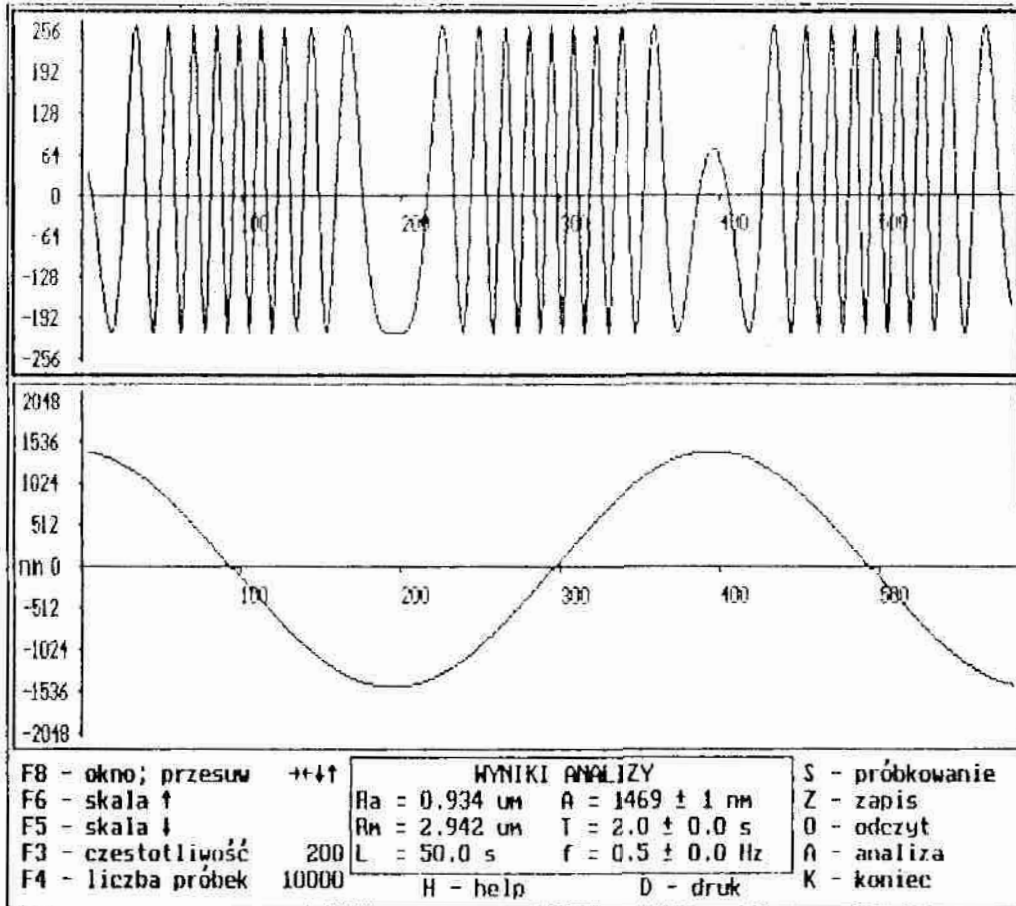


b)

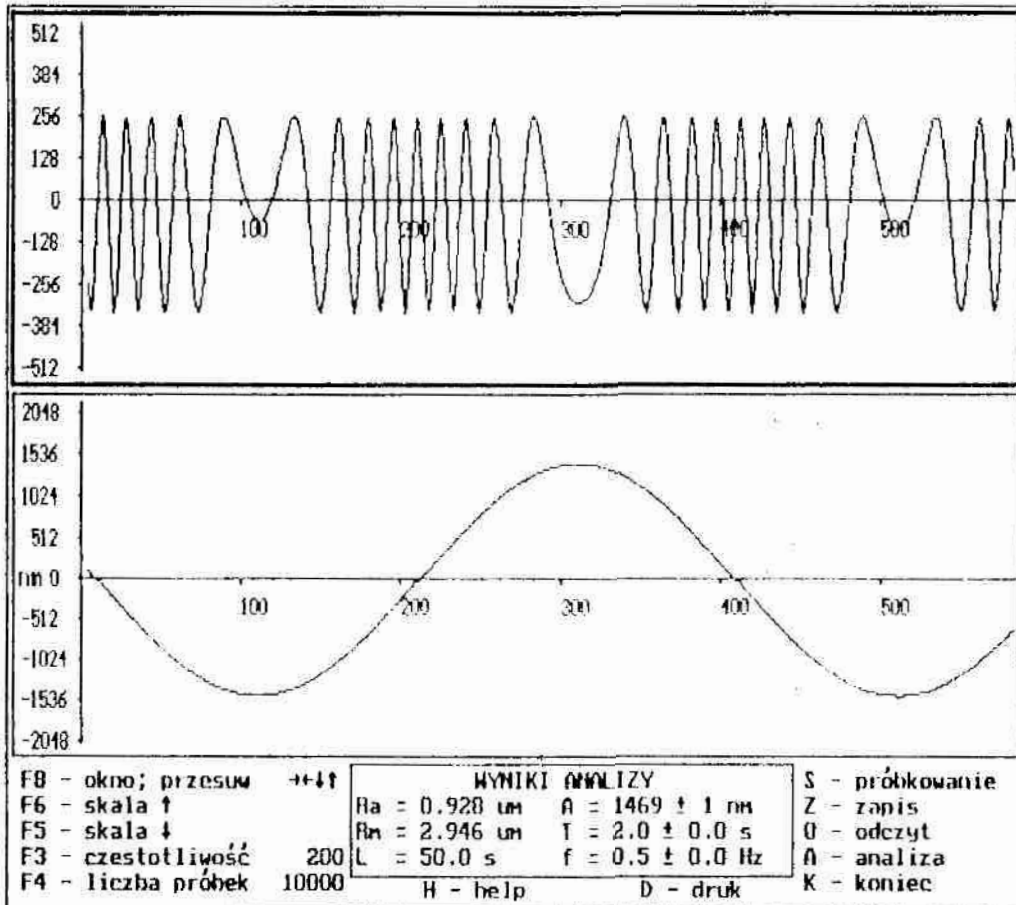


Rys. 43. Interferogramy, wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru oraz wyniki analizy otrzymane podczas badań porównawczych; a) za pomocą interferometru z laserem He-Ne,  $\lambda_l = 0,6328 \mu\text{m}$ ; b) za pomocą interferometru z laserem półprzewodnikowym,  $\lambda_l = 0,6753 \mu\text{m}$

a)

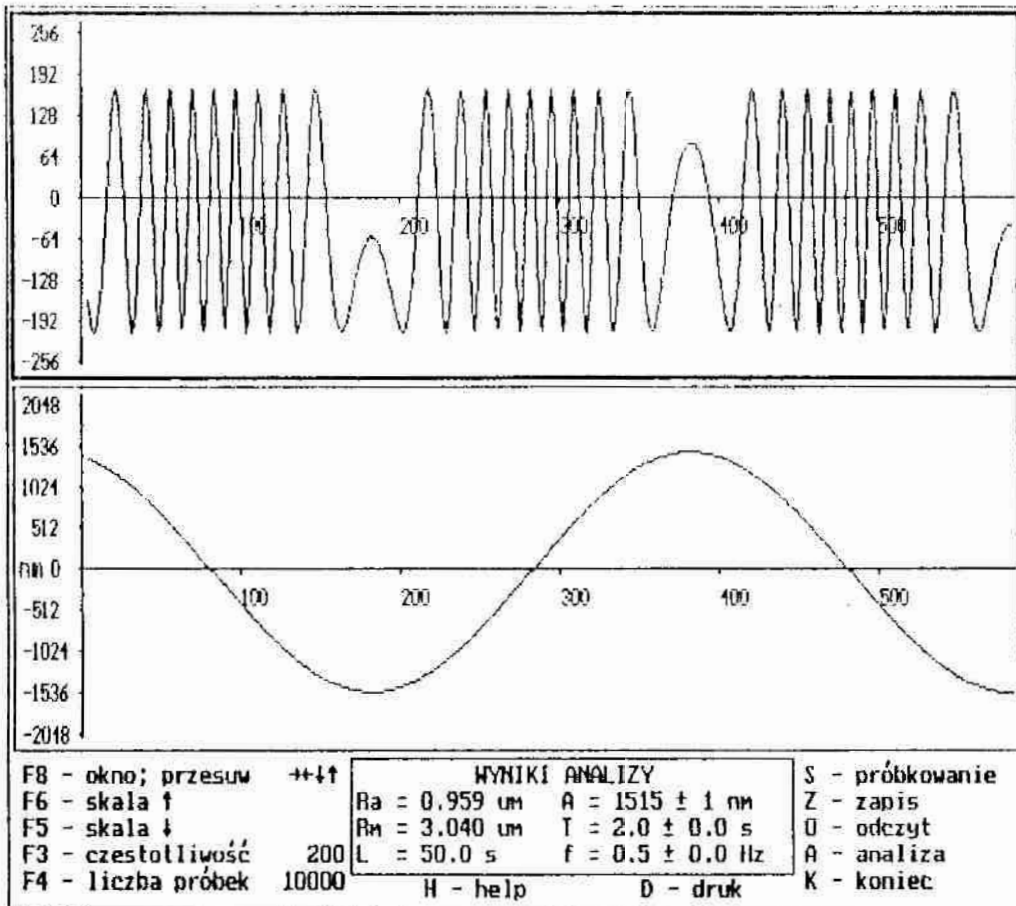


b)

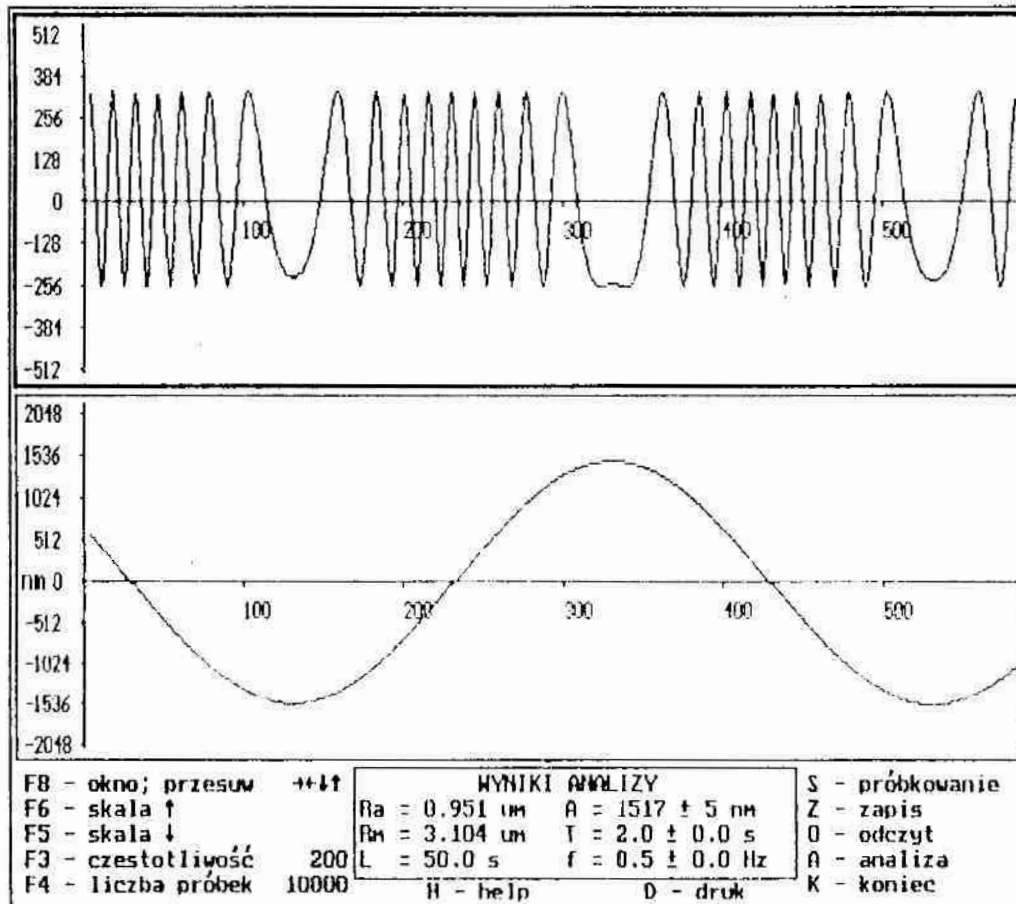


rys. 44. Interferogramy, wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru oraz wyniki analizy otrzymane podczas badań porównawczych; a) za pomocą interferometru z laserem He-Ne,  $\lambda_1 = 0,6328 \mu\text{m}$ ; b) za pomocą interferometru z laserem półprzewodnikowym,  $\lambda_2 = 0,6753 \mu\text{m}$

a)



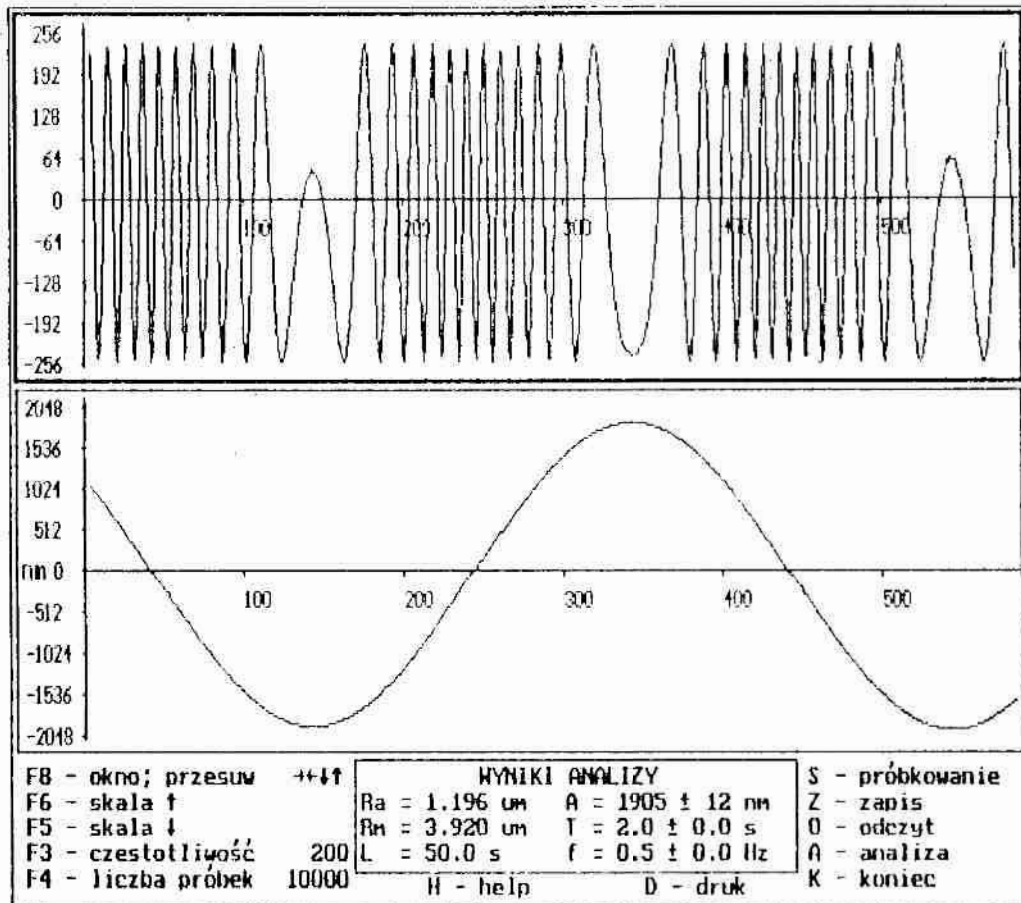
b)



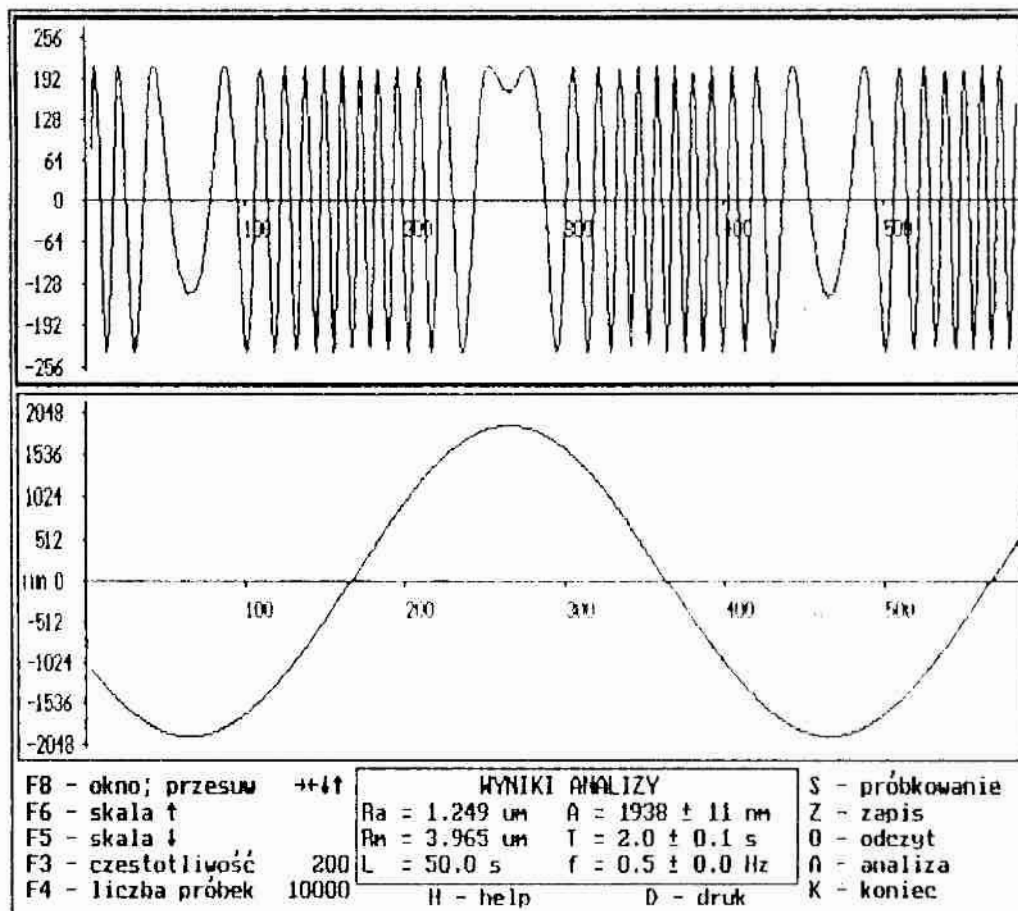
Rys. 45. Interferogramy, wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru oraz wyniki analizy otrzymane podczas badań porównawczych; a) za pomocą interferometru z laserem He-Ne,  $\lambda_l = 0,6328 \mu\text{m}$ ; b) za pomocą interferometru z laserem półprzewodnikowym,  $\lambda_l = 0,6753 \mu\text{m}$



a)

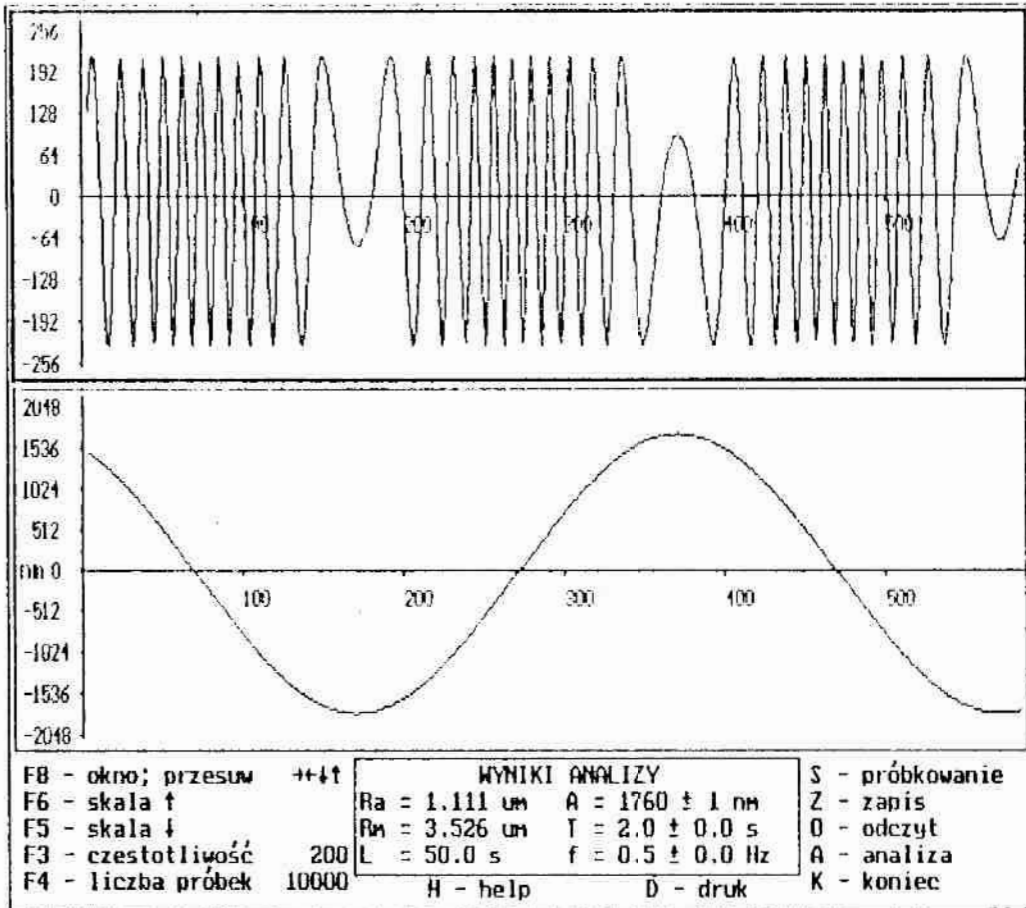


b)

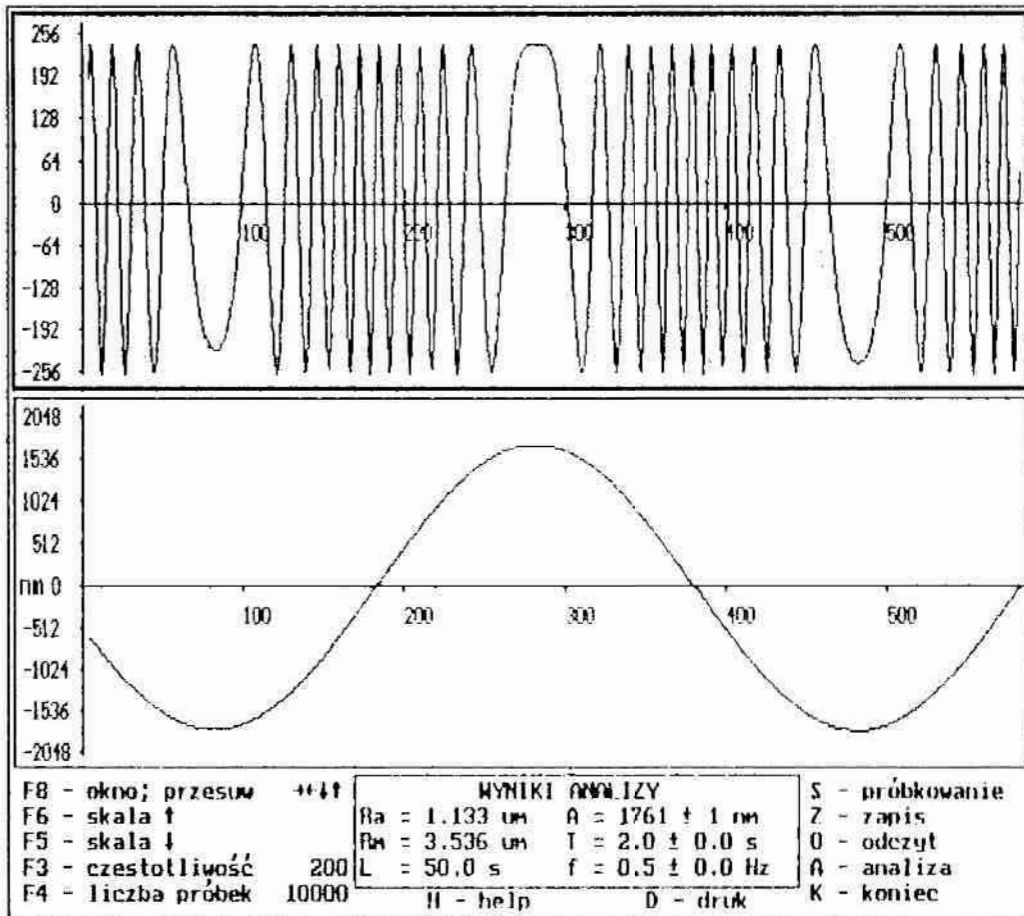


Rys. 46. Interferogramy, wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru oraz wyniki analizy otrzymane podczas badań porównawczych; a) za pomocą interferometru z laserem He-Ne,  $\lambda_1 = 0,6328 \mu\text{m}$ ; b) za pomocą interferometru z laserem półprzewodnikowym,  $\lambda_2 = 0,6753 \mu\text{m}$ .

a)

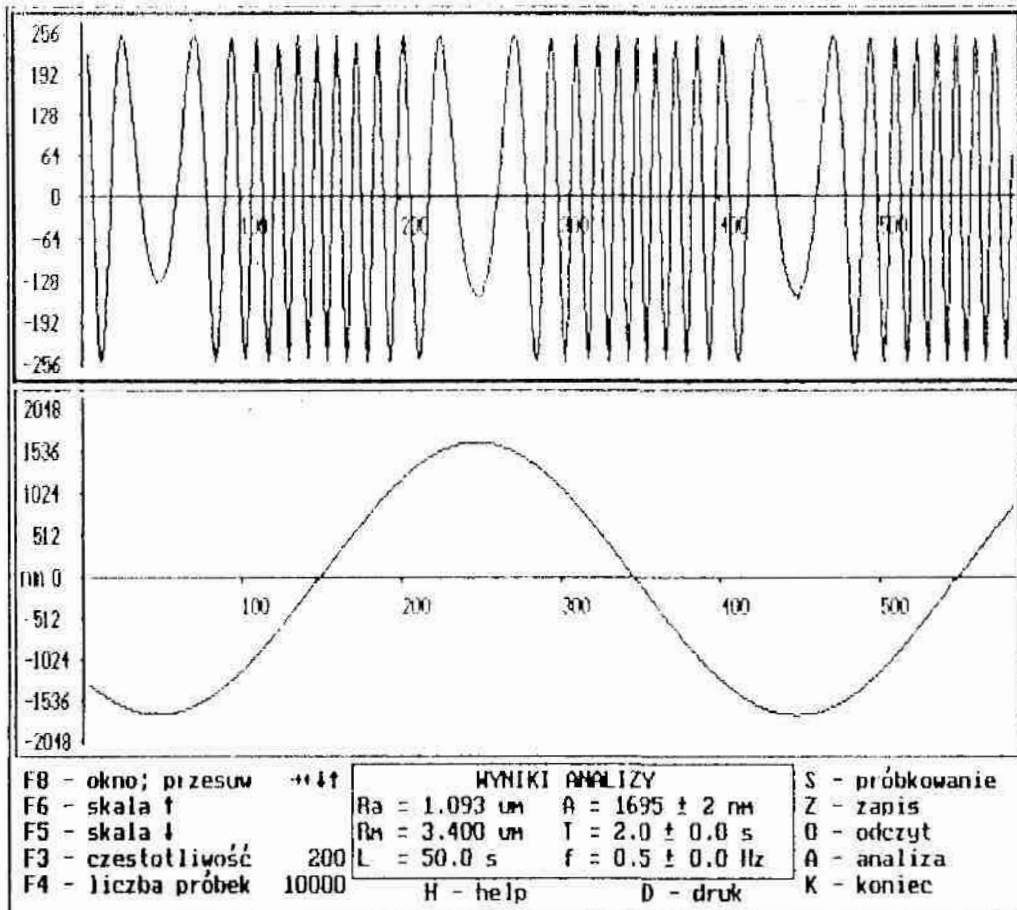


b)

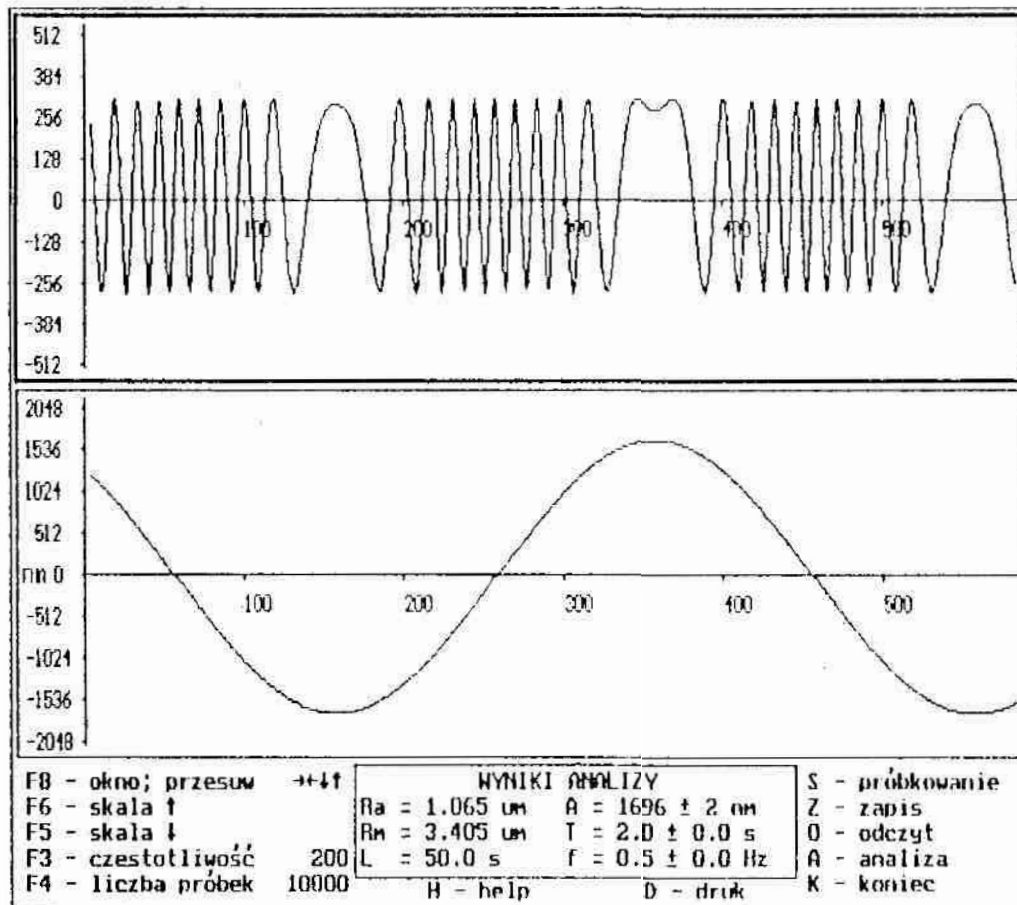


Rys. 47. Interferogramy, wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru oraz wyniki analizy otrzymane podczas badań porównawczych; a) za pomocą interferometru z laserem He-Ne,  $\lambda_2 = 0,6328 \mu\text{m}$ ; b) za pomocą interferometru z laserem półprzewodnikowym,  $\lambda_2 = 0,6753 \mu\text{m}$

a)



b)



rys. 48. Interferogramy, wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru oraz wyniki analizy otrzymane podczas badań porównawczych; a) za pomocą interferometru z laserem He-Ne,  $\lambda_1 = 0,6328 \mu\text{m}$ ; b) za pomocą interferometru z laserem półprzewodnikowym,  $\lambda_2 = 0,6753 \mu\text{m}$

i.3. Wyniki badań wybranych właściwości profilometrów stykowych

i.3.1. Wyniki badań profilometru ME10

Zgodnie z metodyką opisaną w p.5.6 zbadano następujące właściwości metrologiczne profilometru ME10:

- błąd względny powiększenia pionowego,
- błąd wskazań parametru  $R_a$ ,
- charakterystykę przenoszenia.

Wybrane wyniki badań błędu powiększenia pionowego pokazano na rys. 50, 51, 52, 53, i przedstawiono w tab.10. Wyniki otrzymane podczas sprawdzania błędu wskazań profilometru za pomocą stanowiska badawczego z interferometrem laserowym oraz za pomocą wzorców kontrolnych zestawiono w tab.11 i 12. Wartości błędu względnego powiększenia pionowego, zawarte w tabl.10, wyznaczono korzystając z równań (2.8) i (2.9), zamieszczonych w p.2.4.1 na str.30. Wartości błędu wskazań

Tablica 10. Wyniki badań błędu względnego powiększenia pionowego profilometru ME10

Nominalna wartość powiększenia pionowego	Błąd względny powiększenia pionowego w % wyznaczony za pomocą	
	stanowiska badawczego	wzorca kontrolnego
5000x	-1,0	-2,3
10000x	-2,5	+1,5
25000x	-4,4	-3,5
50000x	+0,8	+1,3

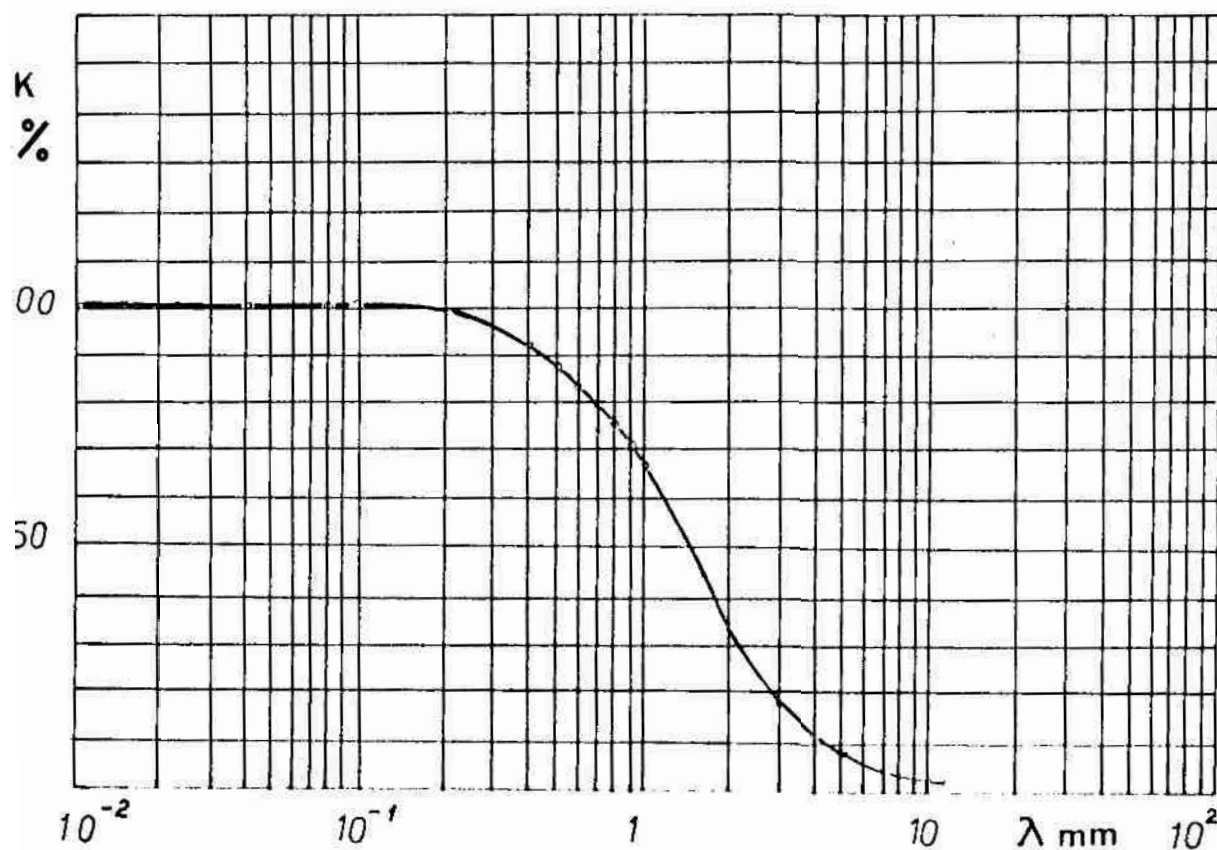
Tablica 11. Wyniki sprawdzania błędu wskazań profilometru ME10 za pomocą stanowiska badawczego

Wzmocnienie profilometru	10000x	50000x
Wartość średnia $\bar{R}_a$ zmierzona profilometrem, $\mu m$	0,432	0,168
Wartość $R_{aw}$ generowana przez wibrator, $\mu m$	0,439	0,173
Systematyczny błąd wskazań profilometru, %	-1,6	-2,9
Przypadkowy błąd wskazań $\sigma$ profilometru, %	0,6	0,5
Bezwzględna wartość błędu wskazań profilometru, %	3,4	4,4

Tablica 12. Wyniki sprawdzania błędów wskazań profilometru ME10 za pomocą wzorców kontrolnych

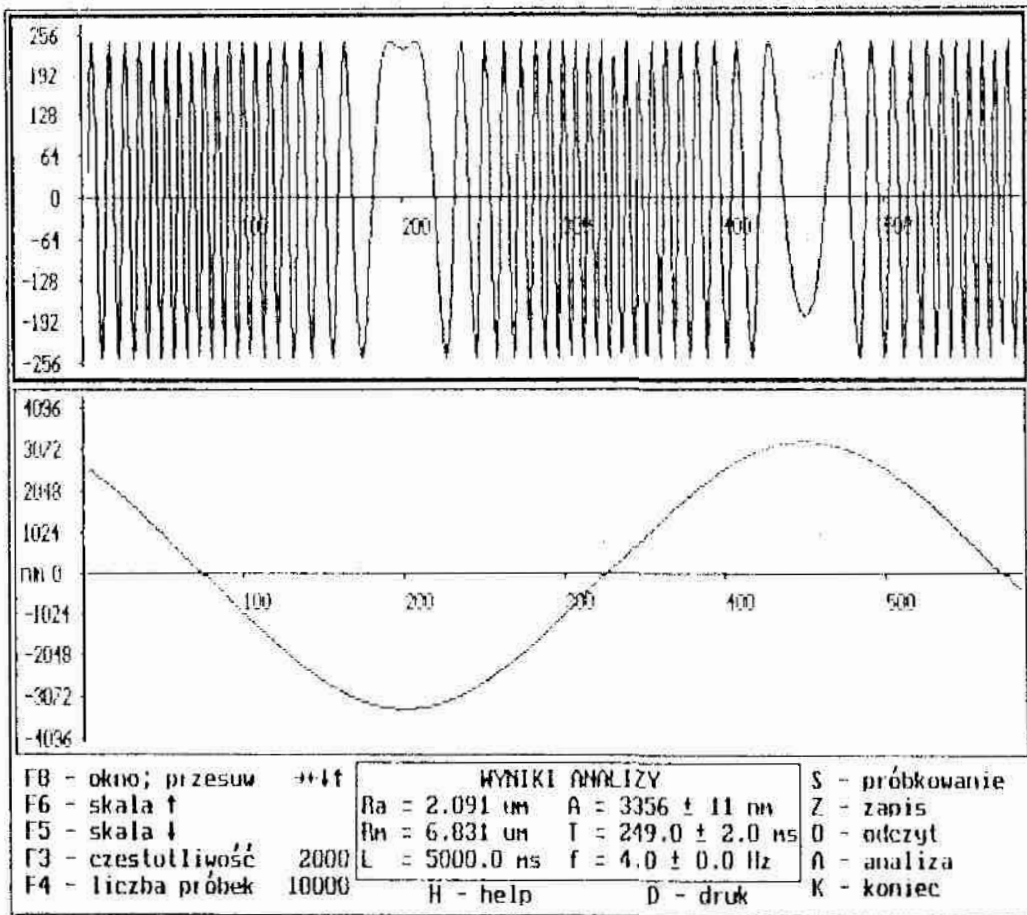
Wzmocnienie profilometru	10000x	50000x
Wartość średnia $\bar{R}_\alpha$ zmierzona profilometrem, $\mu\text{m}$	0,632	0,062
Wartość $R_{\alpha w}$ wzorca, $\mu\text{m}$	0,64	0,064
Systematyczny błąd wskazań profilometru, %	-1,2	-3,1
Przypadkowy błąd wskazań $\sigma$ profilometru, %	1,2	1,5
Bezwzględna wartość błędów wskazań profilometru, %	4,8	7,6

profilometru ME10, zamieszczone w tabl. 11 i 12, wyznaczone z równań (2.14), (2.15) i (2.16), zawartych w p. 2.4.3 na str. 36 i 37. W równaniu (2.16) przyjęto  $n = 3$ , co odpowiada poziomowi ufności 0,9973. Na rys. 49 pokazano wykres charakterystyki przenoszenia profilometru, porządony na podstawie 20 punktów wyznaczonych w wyniku sprawdzenia.

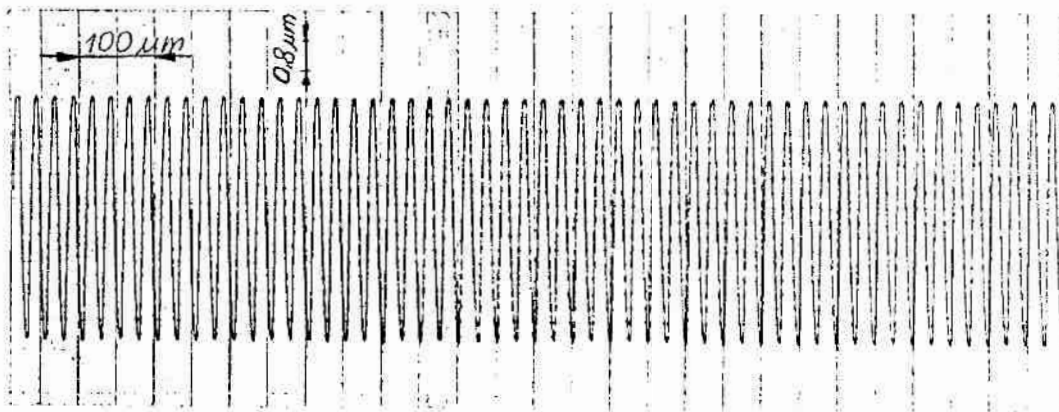


rys. 49. Charakterystyka przenoszenia profilometru ME10, wyznaczona dla parametru  $R_\alpha$  w wyniku sprawdzania metodą interferencyjną; wzmocnienie 10000x, odcinek pomiarowy 2,5 mm, odcinek elementarny 0,8 mm

a)



b)

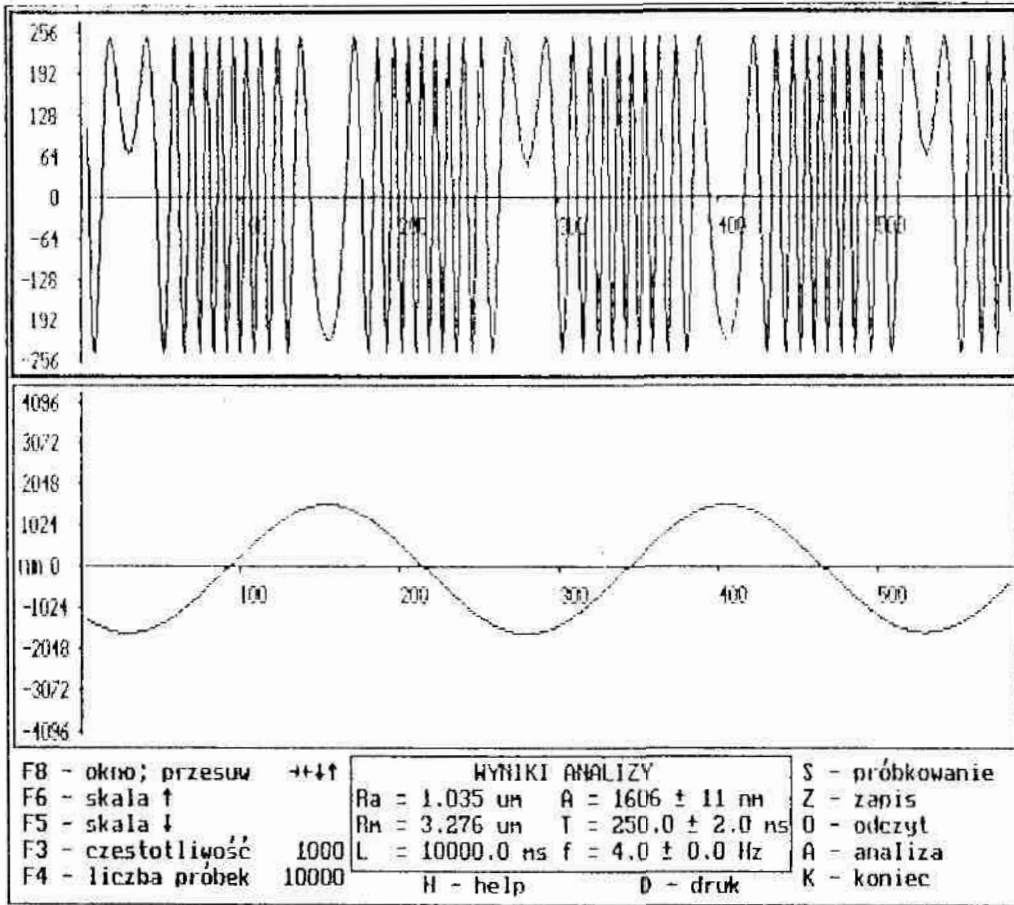


c)

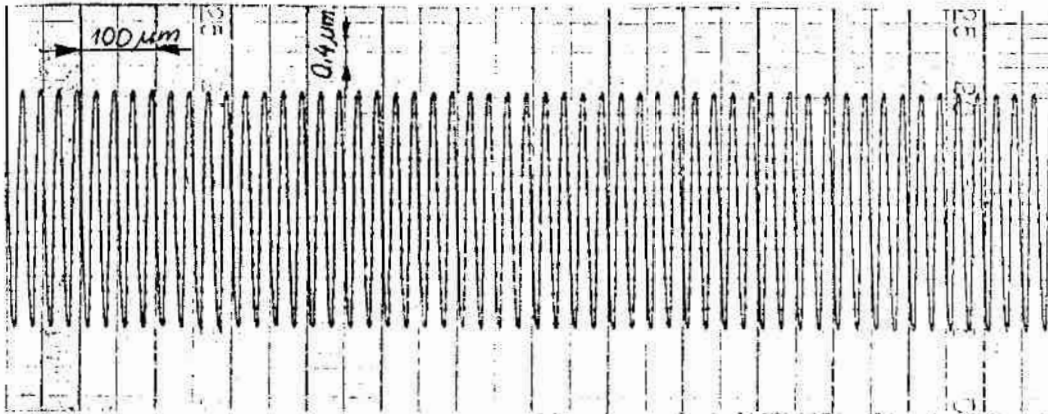


ys. 50. Wyniki otrzymane podczas sprawdzania błędu względnego powiększenia pionowego  $V_v = 5000\times$  profilometru ME10; a) wyniki uzyskane za pomocą stanowiska badawczego, b) profilogram drgań mechanicznych, c) profilogram wzorca kontrolnego, którego  $H_w = 4,25 \mu\text{m}$

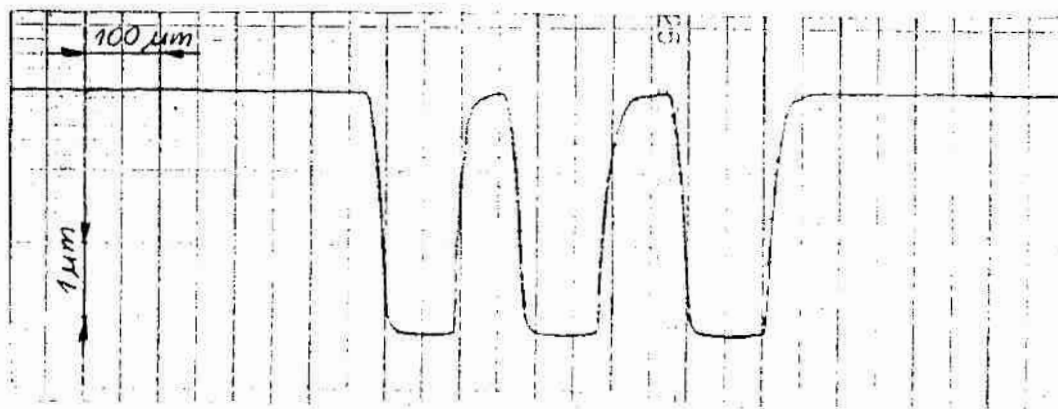
a)



b)

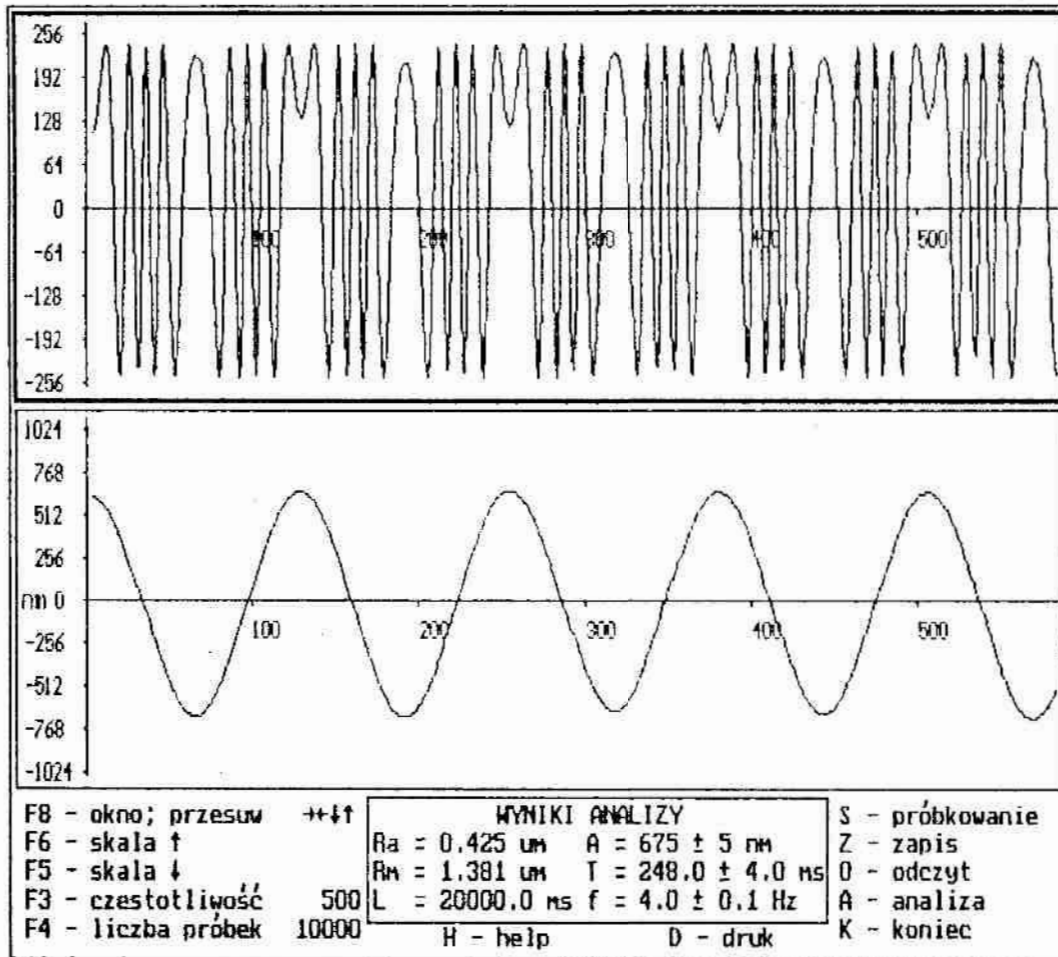


c)



ys. 51. Wyniki otrzymane podczas sprawdzania błędu względnego powiększenia pionowego  $V = 10000\times$  profilometru ME10; a) wyniki uzyskane a pomocą stanowiska  $v$  badawczego, b) profilogram drgań mechanicznych, c) profilogram wzorca kontrolnego, którego  $H_w = 3.25 \mu\text{m}$

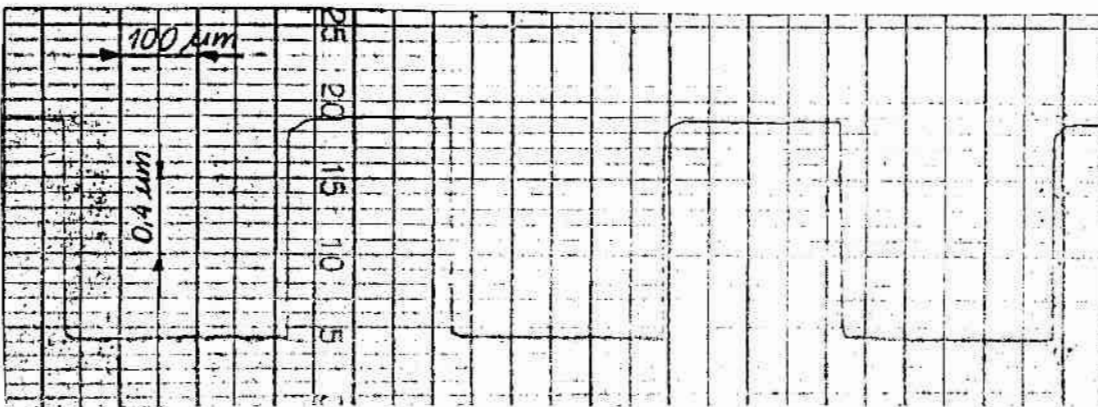
a)



b)

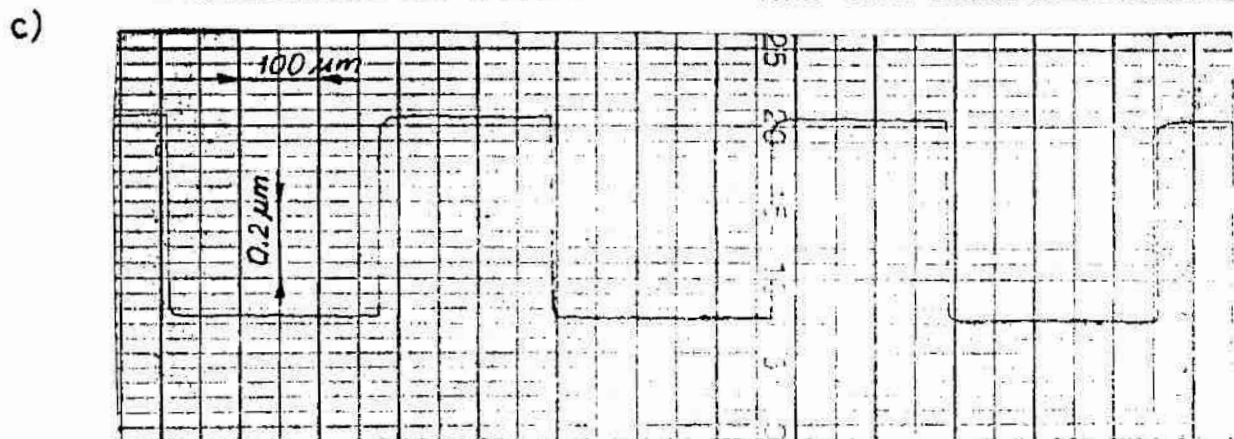
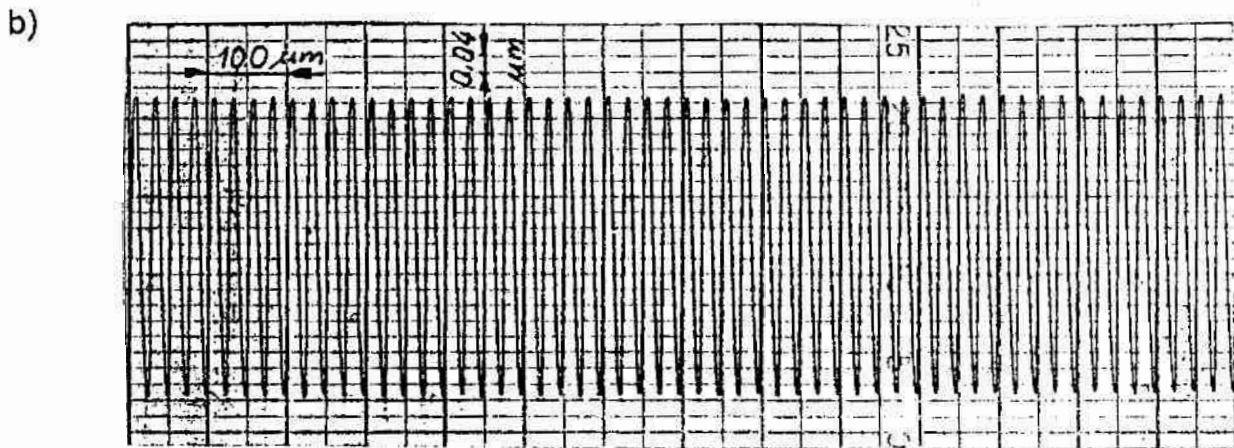
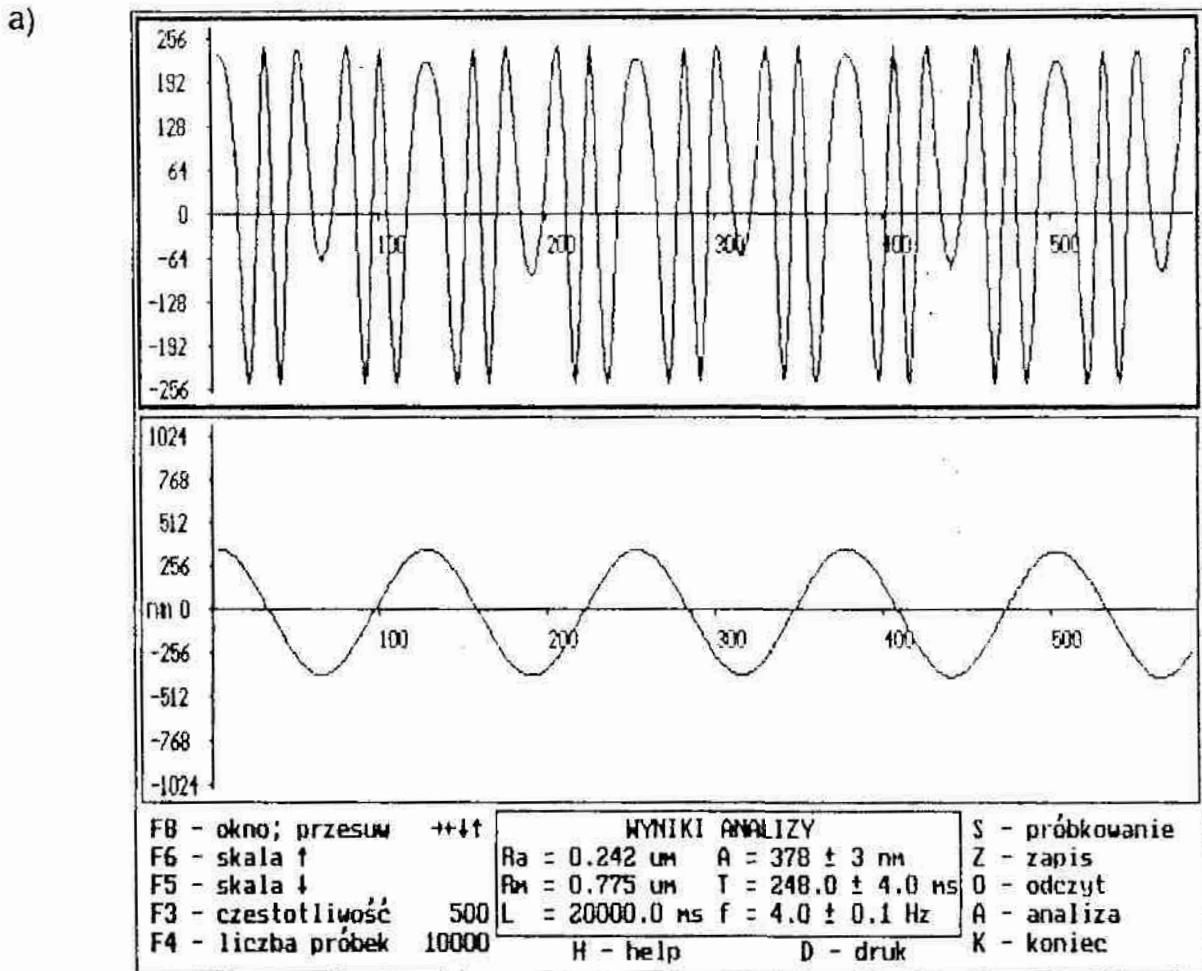


c)



rys.52. Wyniki otrzymane podczas sprawdzania błędu względnego powiększenia pionowego  $V_v = 25000\times$  profilometru ME10; a) wyniki uzyskane za pomocą stanowiska badawczego, b) profilogram drgań mechanicznych, c) profilogram wzorca kontrolnego, którego  $H_w = 1,16 \mu m$





s. 53. Wyniki otrzymane podczas sprawdzania błędu względnego powię-  
 zienia pionowego  $V_v = 50000\times$  profilometru ME10; a) wyniki uzyskane  
 pomocą stanowiska badawczego, b) profilogram drgań mechanicznych,  
 profilogram wzorca kontrolnego, którego  $H_w = 0.51 \mu$ m

### 3.2. Wyniki badań profilometru T2000

Zgodnie z metodyką opisaną w p.5.6 zbadano następujące właściwości metrologiczne profilometru T2000:

błąd względny powiększenia pionowego,

błąd wskazań parametrów  $R_a$ ,  $R_m$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,

charakterystyki przenoszenia parametrów  $R_a$ ,  $R_m$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ .

Wybrane wyniki badań błędu powiększenia pionowego pokazano na rys. 5, 56, a także przedstawiono w tab.13. Na rys.55a i 56a pokazano zarejestrowane interferogramy, a także wyznaczone na ich podstawie wykresy równań ruchu zwierciadła interferometru. Rys.55b,c,d oraz rys.56b,c,d pokazują wyniki otrzymane z profilometru T2000. Są to wykresy przemieszczeń generowanych przez wibrator, symulujących profil powierzchni, oraz wartości parametrów i wykresy udziału nośnego tego profilu. Wyniki otrzymane podczas sprawdzania błędów wskazań profilometru za pomocą stanowiska badawczego z interferometrem laserowym oraz za pomocą wzorców kontrolnych zestawiono w tablicach 4 i 15. Przykładowe interferogramy oraz wyznaczone na ich podstawie

Tablica 13. Wyniki badań błędu względnego powiększenia pionowego profilometru T2000

Nominalna wartość powiększenia pionowego	Błąd względny powiększenia pionowego w % wyznaczony za pomocą	
	stanowiska badawczego	wzorca kontrolnego
5000x	-8,3	-5,4
20000x	+1,1	-2,3

Tablica 14. Wyniki sprawdzania błędów wskazań profilometru T2000 za pomocą stanowiska badawczego dla zakresu pomiarowego 2  $\mu\text{m}$

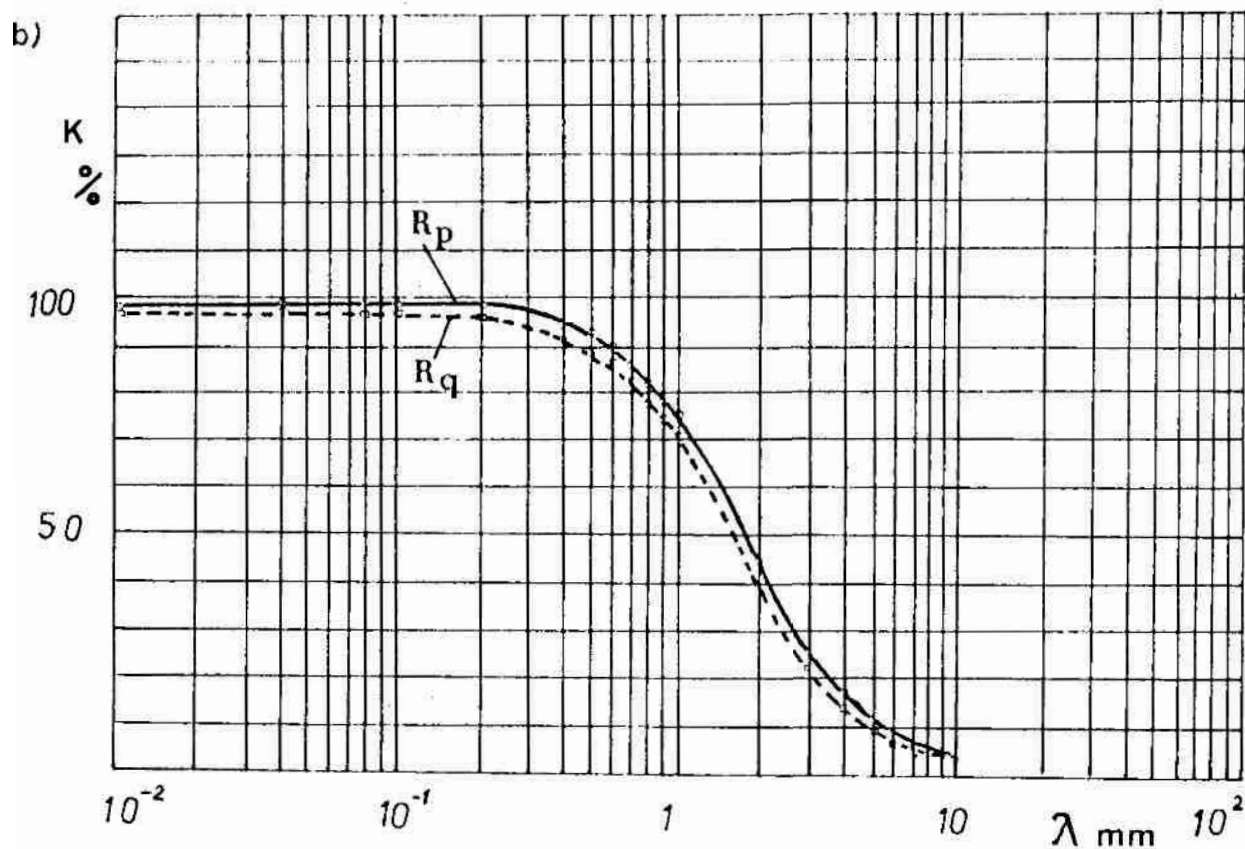
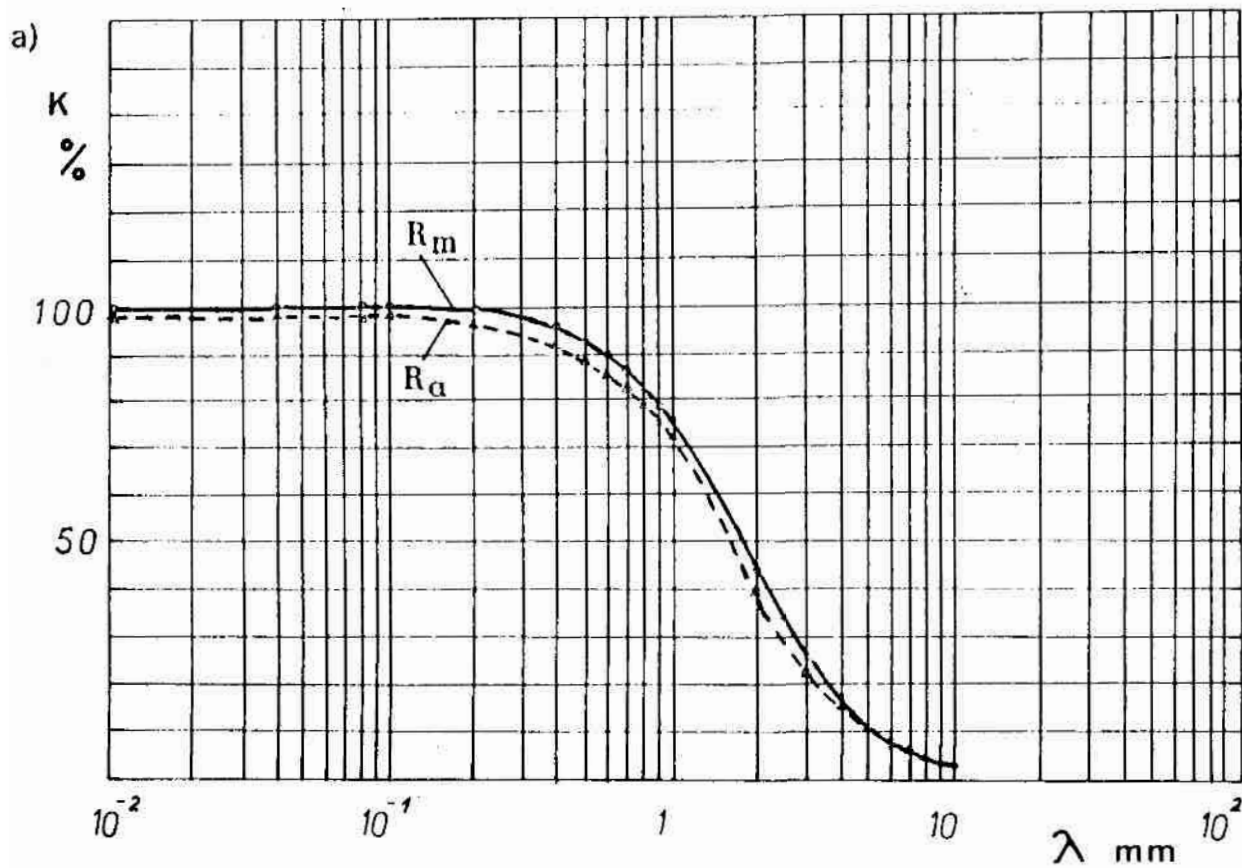
Parametr chropowości	$R_a$	$R_m$	$R_p$	$R_q$
Wartość średnia parametru zmierzona profilometrem, $\mu\text{m}$	0,450	1,578	0,812	0,500
Wartość parametru drgań generowanych przez wibrator, $\mu\text{m}$	0,483	1,646	0,843	0,538
Systematyczny błąd wskazań profilometru, %	-6,83	-4,13	-3,68	-7,06
Przypadkowy błąd wskazań $\sigma$ profilometru, %	0	1,19	1,66	0
Bezwzględna wartość błędów wskazań profilometru, %	6,38	7,70	8,66	7,06

Tablica 15. Wyniki sprawdzania błędów wskazań profilometru T2000 za pomocą stanowiska badawczego dla zakresu pomiarowego 20  $\mu\text{m}$

Parametr chropowatości	$R_a$	$R_m$	$R_p$	$R_q$
Wartość średnia parametru zmierzona profilometrem, $\mu\text{m}$	4,457	14,428	7,228	5,000
Wartość parametru drgań generowanych przez wibrator, $\mu\text{m}$	4,731	15,262	7,592	5,235
Systematyczny błąd wskazań profilometru, %	-5,78	-5,46	-4,79	-4,49
Przypadkowy błąd wskazań $\sigma$ profilometru, %	0,13	0,49	0,68	0
Bezwzględna wartość błędów wskazań profilometru, %	6,17	6,93	6,83	4,49

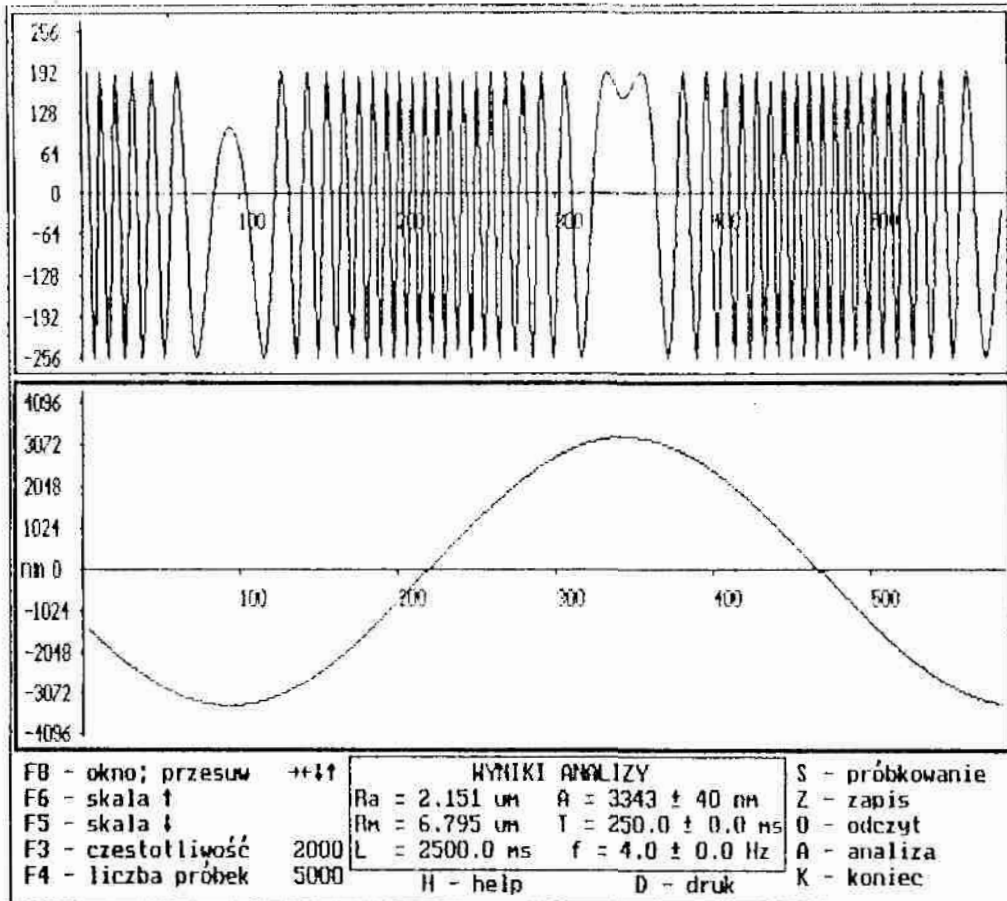
wykresy przemieszczeń zwierciadła interferometru, otrzymane podczas sprawdzania błędów wskazań profilometru T2000, przedstawiono na rys. 57 i 58. Wartości błędów względnego powiększenia pionowego, zawarte w tabl.13, wyznaczono z równań (2.8) i (2.9), zamieszczonych w p.2.4.1 na str.30. W równaniu (2.8) jako  $N_w$  przyjmowano średnią wartość parametru  $R_{max}$ , zarysów generowanych przez wibrator i wyznaczonych na podstawie interferogramów. Wartości błędów wskazań przyrządu T2000, zamieszczone w tabl.14 i 15, wyznaczono z równań (2.14), (2.15) i (2.16), zawartych w p.2.4.3 na str. 36 i 37. W równaniach (2.14) i (2.15) jako wartość parametru uwierzytelnionego wzorca kontrolnego przyjmowano średnią, wyznaczoną dla danego parametru z zarysów generowanych przez wibrator i otrzymanych na podstawie zarejestrowanych interferogramów. W równaniu (2.16) przyjęto  $n = 3$ , co odpowiada poziomowi ufności 0,9973. Przyjęcie mniejszej wartości  $n$  zmniejsza bezwzględną wartość błędów wskazań profilometru powodując jednocześnie zmniejszenie poziomu ufności. Przypadkowy błąd wskazań profilometru  $\sigma$  był równy zeru wtedy, gdy wszystkie dziesięć wskazań mierzonego parametru miały tę samą wartość.

Na rys.54a pokazano wykresy charakterystyk przenoszenia profilometru T2000, wyznaczonych metodą punktową dla parametrów  $R_a$  i  $R_m$ . Wykresy charakterystyk przenoszenia profilometru T2000, wyznaczonych tą samą metodą dla parametrów  $R_p$  i  $R_q$  pokazano na rys.54b. Podobnie jak w przypadku profilometru ME10 wartości współczynników przenoszenia dla danego parametru chropowatości powierzchni wyznaczono w procentach.

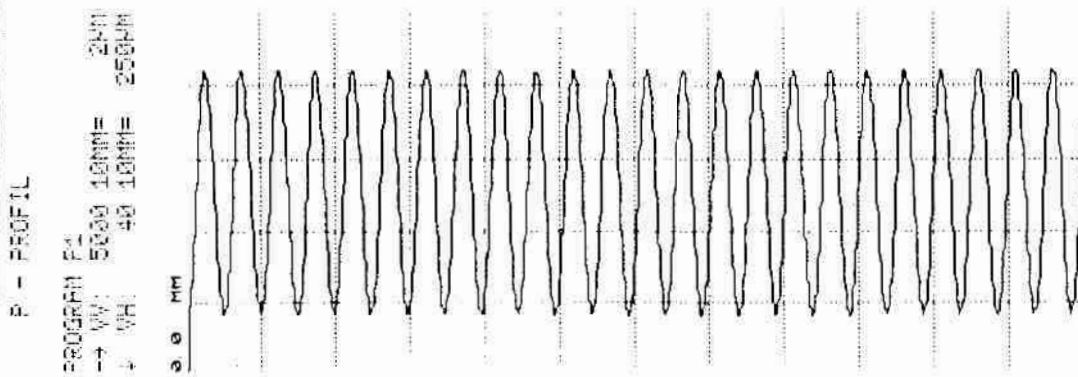


Rys. 54. Charakterystyki przenoszenia profilometru T2000, wyznaczone w wyniku sprawdzania metodą interferencyjną; zakres pomiarowy  $2 \mu\text{m}$ , odcinki: pomiarowy  $4,8 \text{ mm}$ , elementarny  $0,8 \text{ mm}$ ; a) dla parametrów  $R_a$  i  $R_m$ , b) dla parametrów  $R_p$  i  $R_q$

a)



b)

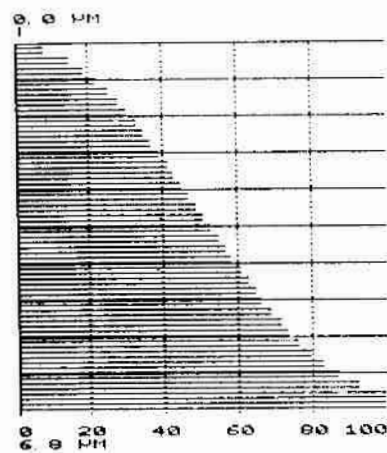


c)

PARAMETRA

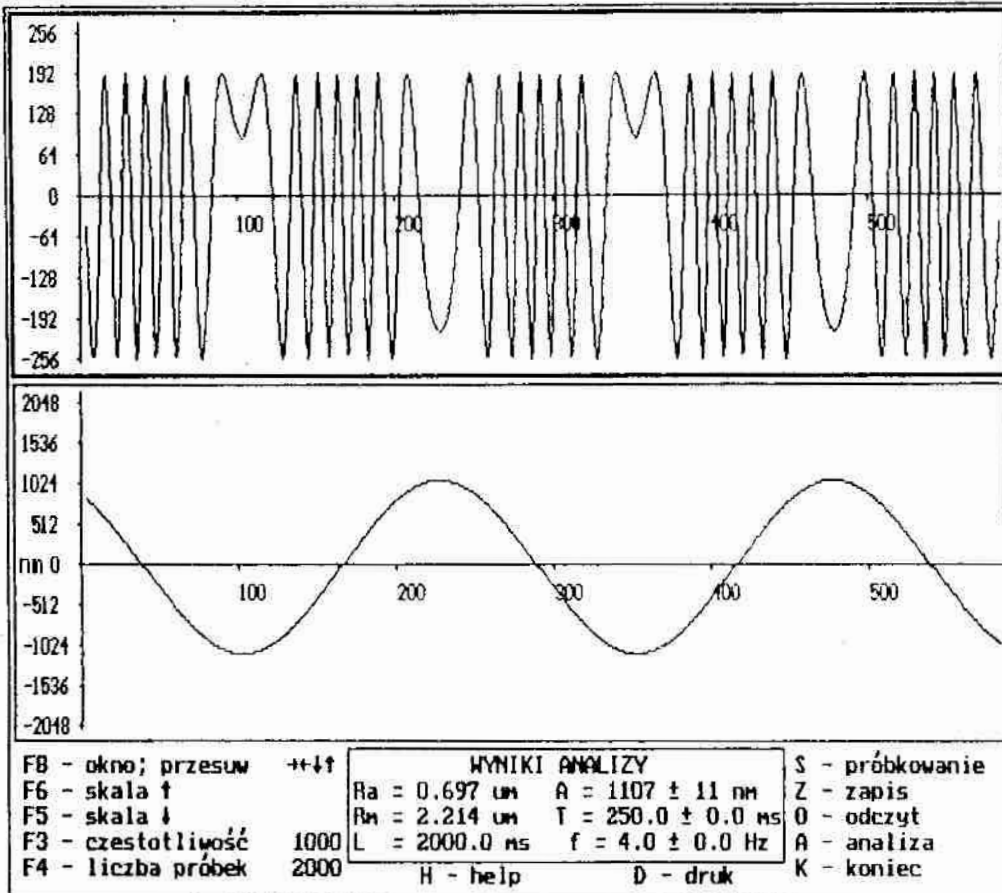
PROGRAM P1		
RT	0.0	μm
RMAX	0.0	μm
RZ-D	0.7	μm
RA	2.1	μm
R3Z	0.7	μm
R3ZM	0.7	μm
RZ-I	0.7	μm
RO	2.0	μm
RP	3.3	μm
RPM	3.3	μm
PT	0.8	μm
WT	0.4	μm
NR		00/CM
C1	+000.00	μm
C2	+000.00	μm

d)

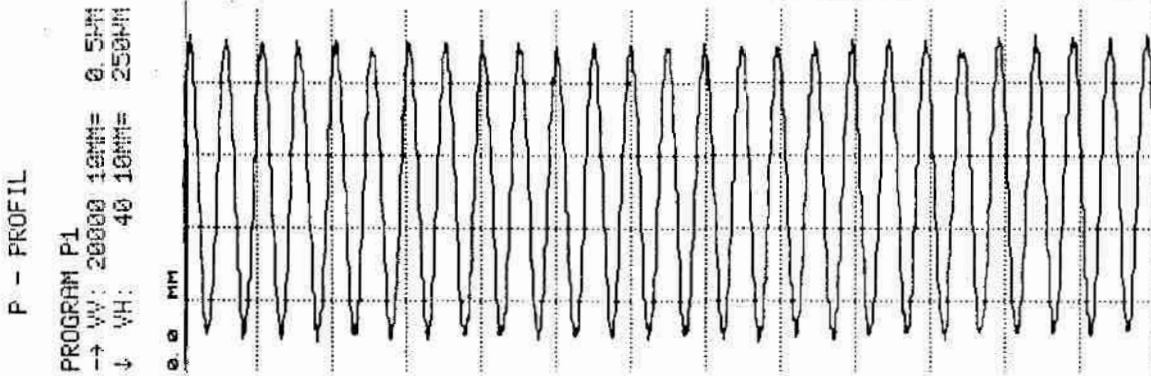


Rys.55. Wyniki otrzymane podczas sprawdzania względnego błędu powiększenia pionowego  $V = 5000\times$  profilometru T2000; a) wyniki uzyskane za pomocą stanowiska badawczego, b) profilogram drgań mechanicznych, c) parametry symulowanego profilu, d) wykres udziału nośnego

a)



b)

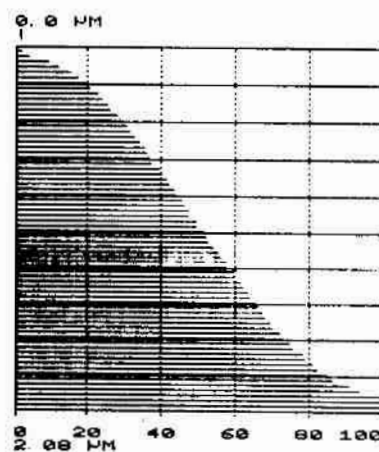


c)

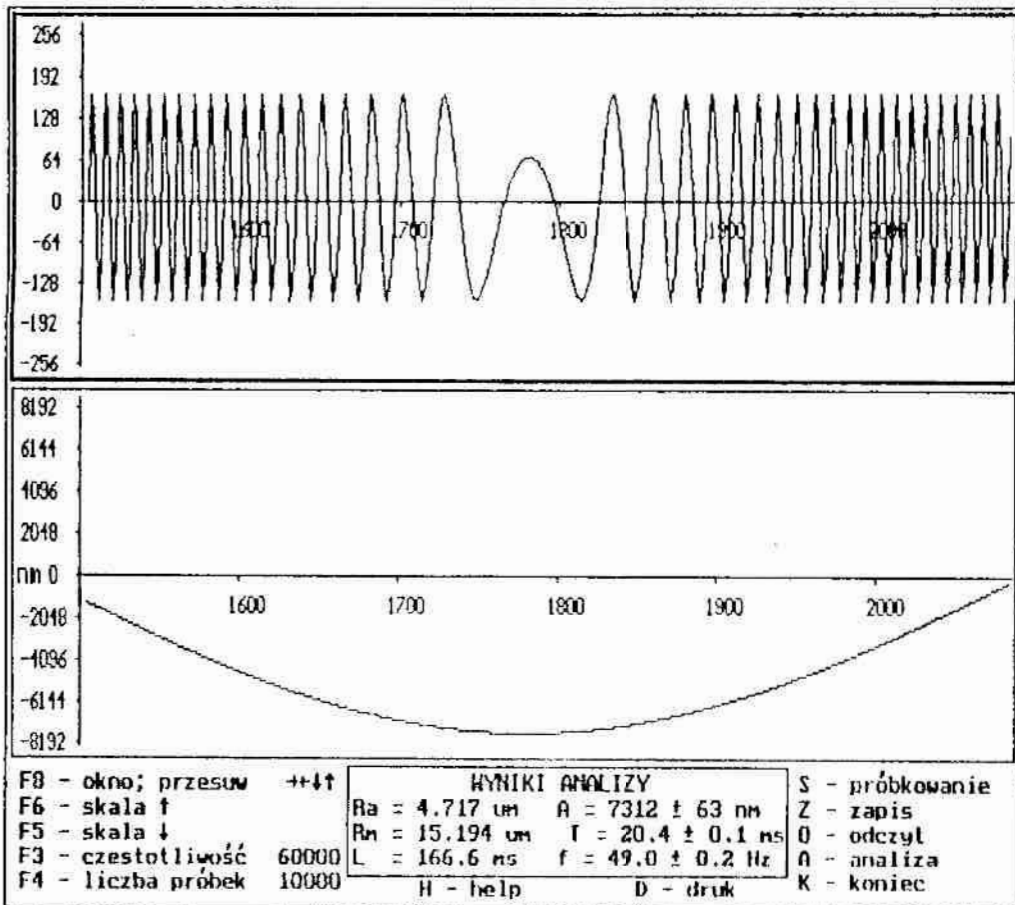
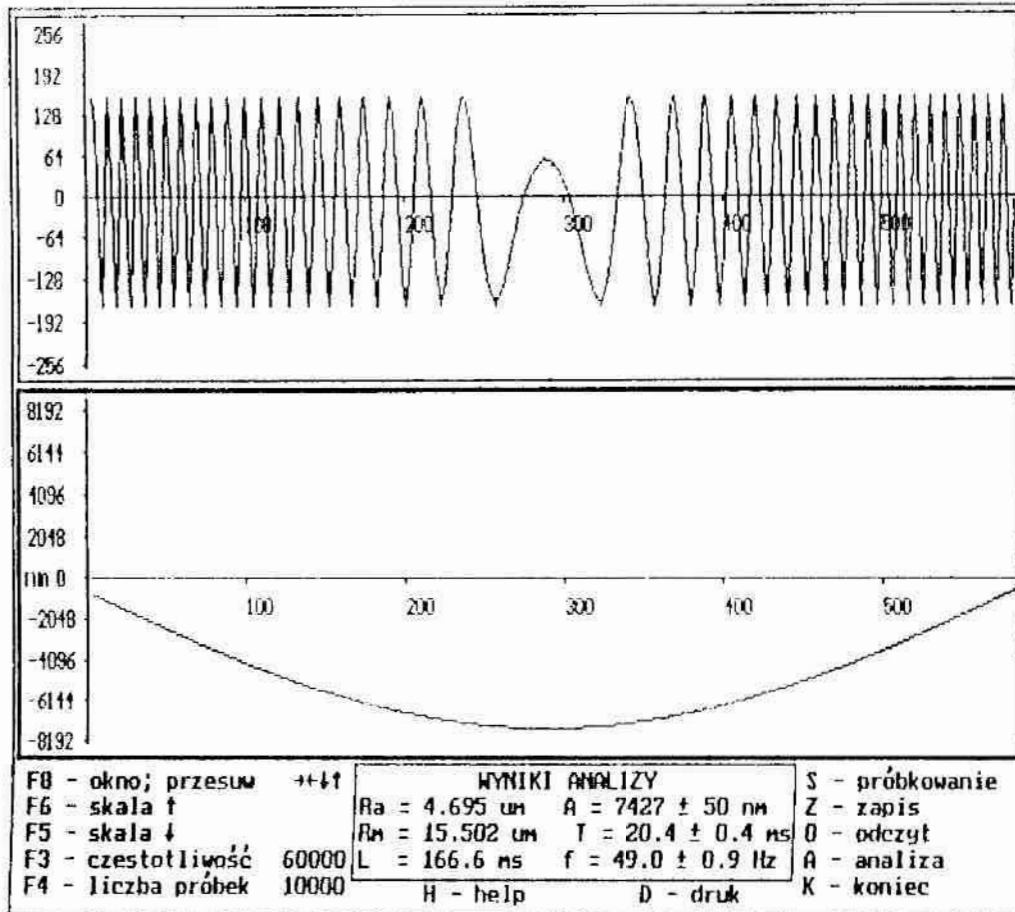
PARAMETR

PARAMETR	WARTOŚĆ
PROGRAM P1	
RT	2.08 PM
RMAX	2.06 PM
RZ-D	2.04 PM
RA	0.62 PM
R3Z	2.00 PM
R3ZM	2.02 PM
RZ-I	2.05 PM
RQ	0.69 PM
RP	1.03 PM
RPM	1.02 PM
PT	2.17 PM
WT	0.19 PM
NR	50/CM
C1	+000.00 PM
C2	+000.00 PM

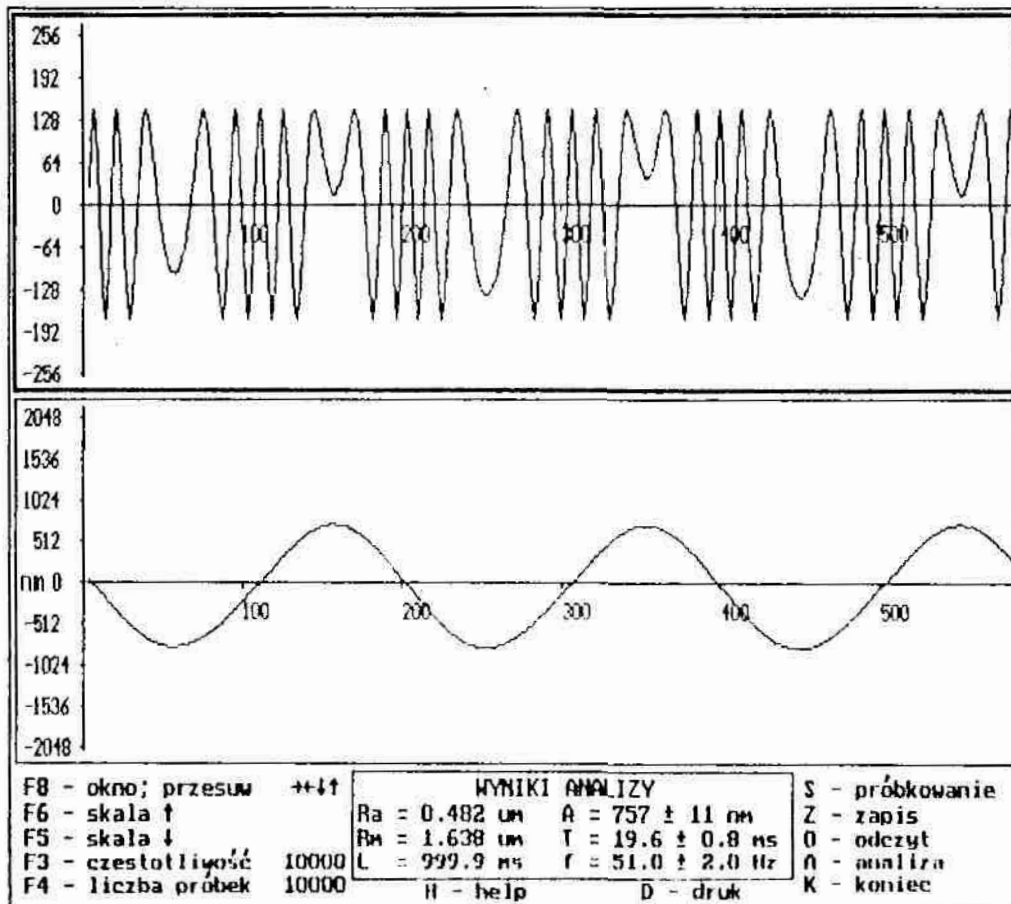
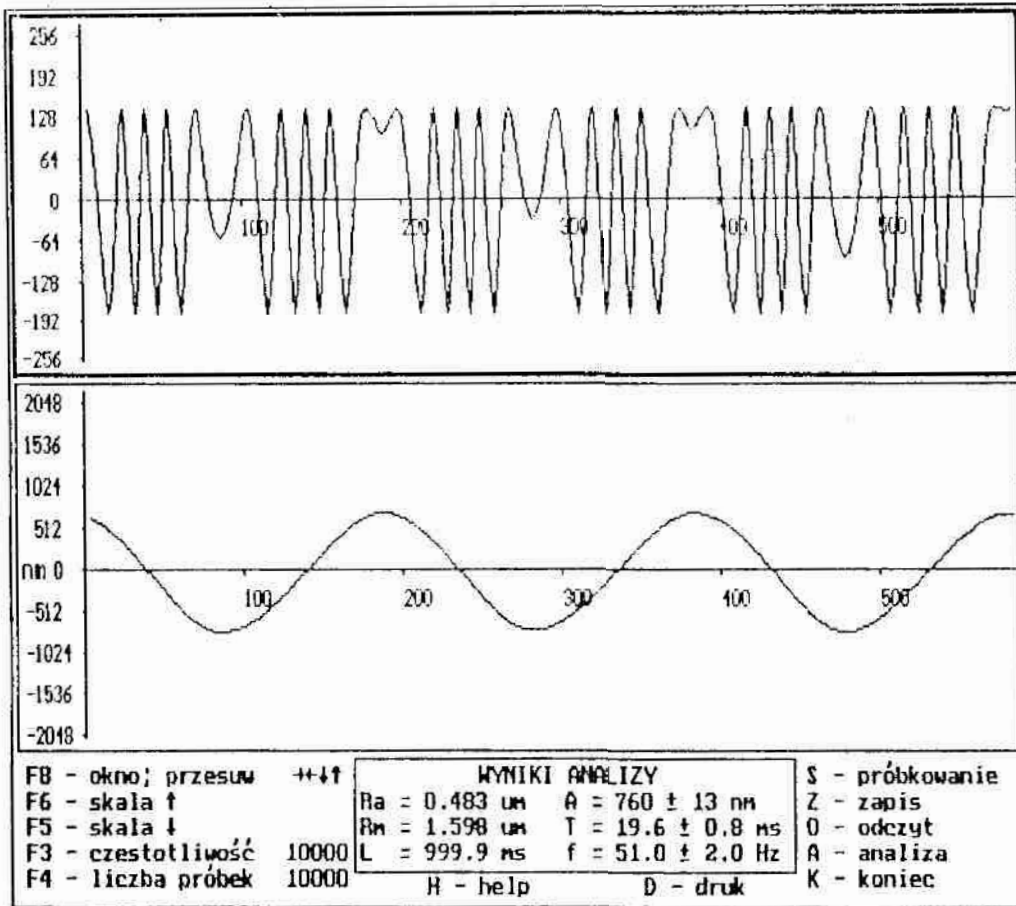
d)



rys. 56. Wyniki otrzymane podczas sprawdzania względnego błędu powiększenia pionowego  $V_v = 20000\times$  profilometru T2000; a) wyniki uzyskane za pomocą stanowiska badawczego, b) profilogram drgań mechanicznych, c) parametry symulowanego profilu, d) wykres udziału nośnego



rys. 57. Interferogramy zarejestrowane podczas sprawdzania błędów wskaźników profilometru 72000, wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru i wyniki obliczeń otrzymane w wyniku analizy interferogramów



rys. 58. Interferogramy zarejestrowane podczas sprawdzania błędów wskazań profilometru T2000, wykresy równania ruchu zwierciadła interferometru i wyniki obliczeń otrzymane w wyniku analizy interferogramów



### 5.4. Analiza wyników badań

Interferogramy wyznaczone w wyniku badań doświadczalnych są bardzo podobne do interferogramów wyznaczonych w wyniku modelowania i potwierdzają wcześniejsze przewidywania dotyczące postaci sygnału pomiarowego. Świadczy to o prawidłowym wykonaniu stanowiska badawczego w stosunku do założeń teoretycznych. Badania wykazały, że wyniki pomiarów parametrów drgań okresowych praktycznie nie zależą od rodzaju zastosowanego lasera. Wpływ rodzaju lasera na wyniki pomiarów mogłyby się ewentualnie ujawnić przy znacznie większych amplitudach drgań. W praktyce można zatem zdecydować się na stosowanie w tego typu interferometrach, laserów półprzewodnikowych, które z uwagi na małą masę i wymiary są znacznie wygodniejsze w użyciu. Bardzo dobrą okazała się zastosowana karta przetworników A/C, która w czasie wielu godzin pracy była niezawodna.

Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników można stwierdzić, że najmniej udanym rozwiązaniem w zbudowanym stanowisku badawczym był stolik wibracyjny. Do jego wad można zaliczyć wrażliwość na zakłócenia, nieliniowość charakterystyki przenoszenia, mały zakres amplitud i ograniczone pasmo przenoszenia sygnału. Zalety zastosowanego wibratora to prostota konstrukcji, stosunkowo wysoka powtarzalność przemieszczeń, o czym świadczą niewielkie zakresy zmian amplitudy drgań, wyznaczone w wyniku analizy interferogramów, oraz mały zakres przemieszczeń kątowych ruchomego elementu wibratora.

Wyniki badań potwierdziły także przydatność opracowanego oprogramowania. Pozwala ono, przy pewnej wprawie, na dogodne prowadzenie badań i analizę interferogramów. Przewiduje się rozszerzenie i modyfikację oprogramowania w celu ograniczenia wpływu szumów na wyniki analizy interferogramów. Ponadto wydaje się, że korzystne byłoby zastosowanie, w mikrokomputerze analizującym sygnał interferencyjny, coprocesora arytmetycznego, co skróciłoby czas analizy.

Przeprowadzone badania profilometrów stykowych pozwoliły stwierdzić, że zakres pomiaru amplitud drgań harmonicznycch za pomocą opracowanego systemu jest szerszy niż zakres określony w pierwszej fazie badań i pokazany na rys. 36. Rozszerzenie zakresu badań w kierunku wyższych amplitud drgań, początkowo nie było konieczne. Dopiero podczas sprawdzania profilometrów stykowych pojawiła się potrzeba stosowania większych amplitud drgań. Przeszkodą w dalszym rozszerzeniu zakresu badanych amplitud były ograniczone możliwości zastosowanego stolika wibracyjnego.

Wyniki badań porównawczych, polegających na pomiarze średniej amplitudy drgań harmonicznycch za pomocą interferometru laserowego

i komparatora interferencyjnego Köstersa, wykazują wysoką zgodność. Pozwala to sądzić, że dokładność pomiaru przemieszczeń za pomocą opracowanego stanowiska badawczego jest duża. Korzystne byłoby, jak stwierdzono to w p.5.5, przeprowadzenie badań porównawczych dla wyższych częstotliwości drgań, za pomocą odpowiednio dokładnego interferometru laserowego ze stabilizacją długości fali światła.

Porównanie wyników, otrzymanych za pomocą opracowanego stanowiska, podczas sprawdzania błędu względnego powiększenia pionowego profilometrów ME10 i T2000, z wynikami uzyskanymi za pomocą odpowiednich wzorców kontrolnych (tabl.10 i 13), wskazuje na pewne rozbieżności. Mogą one wynikać z niedokładności uwierzytelnienia wzorców kontrolnych i błędów pomiarów interferencyjnych. Wyniki badań profilometru ME10, zawarte w tab.11, świadczą o tym, że wartości błędu systematycznego wskazań profilometru ME10 oraz wartości błędu przypadkowego ( $3\sigma$ ) są tego samego rzędu. Odnosi się to również do błędów wskazań profilometru T2000 dla parametrów  $R_m$  i  $R_\rho$ , zestawionych w tabl.14 i 15. Natomiast przypadkowe błędy wskazań profilometru T2000 dla parametrów  $R_a$  i  $R_q$ , zestawione w tabl.14 i 15, są bliskie lub równe zeru. Przyczyną tego może być mniejsza wrażliwość parametrów  $R_a$  i  $R_q$  na zakłócenia losowe występujące podczas sprawdzania profilometrów. W czasie sprawdzania profilometrów, zwłaszcza przy dużych zmocnieniach i powiększeniach pionowych, zauważono, że konieczne jest dobre wytłumienie wibracji. W szczególności dotyczyło to profilometru ME10, dla którego źródłem zakłóceń mogą być drgania mechaniczne sprężarki powietrza, stanowiącej wyposażenie profilometru.

Systematyczne błędy wskazań obu sprawdzanych profilometrów są jenne. Bardzo wyraźnie widać to w przypadku profilometru T2000. Może to świadczyć o zbyt małej wartości wzmocnienia tego profilometru i potrzebie jego regulacji. Nieco większe wartości systematycznych błędów wskazań zaobserwowano, w przypadku profilometru T2000, dla parametrów  $R_a$  i  $R_q$  niż dla parametrów  $R_m$  i  $R_\rho$ .

Porównanie charakterystyk przenoszenia, wyznaczonych opracowaną metodą i pokazanych na rys.49 i 54, z wymaganiami określonymi w normie [108] pozwala stwierdzić, że charakterystyka przenoszenia profilometru ME10, wyznaczona dla parametru  $R_a$ , oraz charakterystyki przenoszenia profilometru T2000, wyznaczone dla parametrów  $R_m$  i  $R_\rho$ , są zawarte w dopuszczalnych granicach. Granice te określone są w normach [108], [105] oraz instrukcji [101] za pomocą równań:

$$K_{max} = \frac{1,03}{1 + 0,29 \left[ \frac{\lambda}{\lambda_B} \right]^2}, \quad (6.1)$$

$$K_{min} = \frac{0,97}{1 + 0,39 \left[ \frac{\lambda}{\lambda_B} \right]^2} \quad (6.2)$$

gdzie:  $K_{max}$  i  $K_{min}$  - graniczne dopuszczalne współczynniki przenoszenia profilometru,  $\lambda$  - długość fali nierówności powierzchni,  $\lambda_B$  - graniczna długość fali filtru profilometru. Natomiast charakterystyki przenoszenia profilometru T2000, wyznaczone dla parametrów  $R_\alpha$  i  $R_q$ , nieznacznie przekraczają, dla nierówności powierzchni o długościach  $\lambda$  mniejszych od 0,1 mm, dolną dopuszczalną granicę, określoną równaniem (6.2).

Błędy pomiaru przemieszczeń, mierzonych podczas badań, można oszacować korzystając z analizy przedstawionej w p.4.5. Wynika z niej, że błędy pomiaru przemieszczeń zwierciadła interferometru, spowodowane niedokładnym odtworzeniem długości fali światła laserowego oraz niedokładnym wyznaczeniem stosunku sygnału interferencyjnego do jego wartości maksymalnej  $I(t)/I_{max}$ , nie przekraczają 0,71 nm dla amplitudy drgań równej 5  $\mu\text{m}$ . Jak wykazano w p.4.5 (str. 72 i 73) mogą być one znacznie zmniejszone jeżeli amplituda drgań mechanicznych zostanie dobrana tak, aby stosunek  $I(t)/I_{max}$  przyjmował wartości z zakresu od 0,01 do 0,99, w chwilach czasu odpowiadających początkowi i końcowi mierzonego przemieszczenia zwierciadła interferometru. W tym przypadku błąd pomiaru przemieszczeń zwierciadła nieznacznie przekracza wartości  $\pm 1$  nm. Poniżej dokonano analizy innych przyczyn błędów pomiaru przemieszczeń, występujących podczas sprawdzania profilometrów stykowych opracowaną metodą.

Oprócz czynników, wpływających na błąd pomiaru przemieszczeń interferometrem laserowym, przeanalizowanych w p.4.5, należy rozważyć główne przyczyny błędów wynikających z przyjętej metodyki sprawdzania profilometru. Zaliczono do nich:

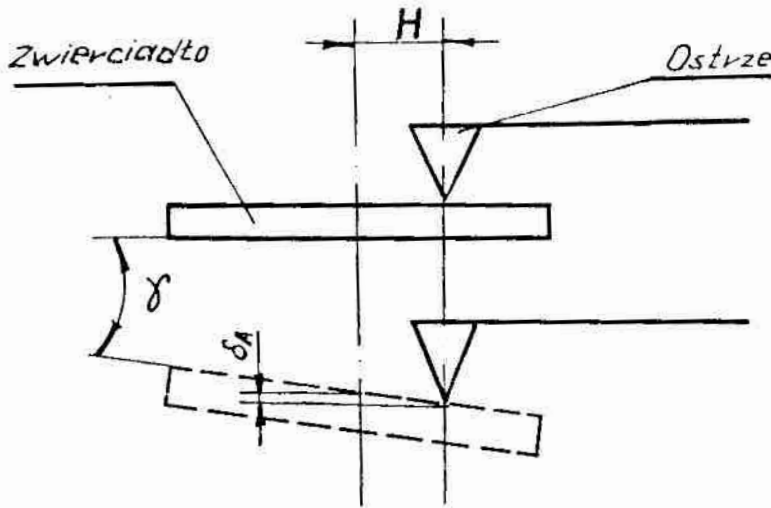
- błąd wynikający z przesunięcia zera interferometru,
- błąd wynikający z niespełnienia postulatu Abbego.

Obserwacje wykonane podczas badań wskazują, że przesunięcie zera, w pracowanym stanowisku pomiarowym w czasie 20 minut, nie przekraczało 0,08  $\mu\text{m}$ . W okresie 60 sekund przesunięcie zera systemu pomiarowego nie zostało zaobserwowane. Z uwagi na to, że pomiary przemieszczeń trwają na ogół kilka sekund, a często kilkaset milisekund, wpływ błędu przesunięcia zera na wynik pomiaru można pominąć.

Nieco inaczej przedstawia się problem błędu wynikającego z niespełnienia postulatu *Abbego*. Schemat ilustrujący powstawanie tego błędu pokazano na rys. 59. Wartość błędu spowodowanego niespełnieniem postulatu *Abbego* może być oszacowana na podstawie równania:

$$\delta_A = H \sin \gamma \quad (6.3)$$

gdzie:  $\delta_A$  - błąd pomiaru przemieszczenia spowodowany tym, że linia pomiaru przemieszczenia zwierciadła interferometru i oś symetrii ostrza odwzorowującego sprawdzanego profilometru nie pokrywają się;  $H$  - odległość między linią pomiaru przemieszczenia zwierciadła interferometru i osią symetrii ostrza odwzorowującego;  $\gamma$  - zmiana położenia kąтового ruchomego zwierciadła interferometru. Ponieważ odległość  $H$  zmienia się w czasie sprawdzania, wartość błędu wynikająca



rys. 59. Błąd pomiaru wynikający z niespełnienia postulatu *Abbego*

równania (6.3) będzie największa dla maksymalnej wartości  $H$ . Podczas badań odległość ta nie przekraczała wartości 5 mm. Zmiany kąтового położenia zwierciadła, obserwowane podczas badań za pomocą komparatora interferencyjnego *Köstersa*, nie przekraczały  $\pm 0,3''$ , dla amplitudy drgań  $2 \mu\text{m}$ . Pozwala to oszacować wartość błędu  $\delta_A$  jako nie przekraczającą  $\pm 8 \text{ nm}$  dla drgań o amplitudzie  $2 \mu\text{m}$ . Dla amplitudy drgań wynoszącej  $0,2 \mu\text{m}$  wartość błędu  $\delta_A$  nie przekroczy  $\pm 0,8 \text{ nm}$ , a dla amplitudy drgań równej  $5 \mu\text{m}$  błąd ten będzie zawarty w granicach  $\pm 20 \text{ nm}$ . Jest to  $\pm 0,2 \%$  podwójnej amplitudy drgań. Błąd  $\delta_A$  można zmniejszyć skracając odległość  $H$  i ograniczając amplitudę drgań zwierciadła interferometru.

Jedną z przyczyn powstawania błędów pomiarów, podczas sprawdzania profilometrów opracowaną metodą, mogą być także mikronierówności powierzchni ruchomego zwierciadła interferometru. W czasie

drgań zwierciadła interferometru, ostrze odwzorowujące profilometru, przesuujące się po powierzchni zwierciadła, doznaje zmian położenia będących sumą przemieszczeń zwierciadła i wysokości mikronierówności powierzchni. Ponieważ wysokość mikronierówności precyzyjnie obrabianych powierzchni części optycznych na ogół nie przekracza kilku nanometrów, to błąd pomiaru przemieszczenia, spowodowany mikronierównościami powierzchni zwierciadła interferometru, może być w wielu przypadkach pominięty. Podczas dokładnych pomiarów małych przemieszczeń, gdy zachodzi potrzeba ograniczenia wpływu mikronierówności powierzchni zwierciadła interferometru na wyniki sprawdzania profilometru, można dokonywać sprawdzania profilometru przy wyłączonym przesuwie głowicy pomiarowej, tak jak przewidziano to w instrukcji 101).

Z powyższych rozważań wynika, że błąd pomiaru przemieszczenia, spowodowany przyjętą metodyką sprawdzania profilometru, będzie zależał przede wszystkim od błędu wynikającego z niespełnienia postulatów *Abbego*. Uwzględniając, że najwyższa wartość błędu pomiaru przemieszczeń oszacowana w p. 4.5 (str. 73) jest mniejsza niż  $\pm 2,3\%$ , można stwierdzić, że całkowity błąd pomiaru przemieszczeń opracowaną metodą nie przekroczy  $\pm 3\%$ .

Z przeprowadzonych badań wynika, że opracowane stanowisko badawcze pozwala wyznaczyć przemieszczenia zwierciadła interferometru ruchu okresowym oraz zmierzyć parametry drgań harmonicznycch o amplitudach większych niż  $0,15\ \mu\text{m}$ , w zakresie częstotliwości od  $0,1\ \text{Hz}$  do  $500\ \text{Hz}$ . Górna granica zakresu pomiarowego amplitud, zbudowanego stanowiska, zależy od częstotliwości drgań i jest nie mniejsza niż  $0,5\ \mu\text{m}$ , dla drgań o częstotliwości nie przekraczających  $50\ \text{Hz}$ . Wartości parametrów  $R_a$  i  $R_m$  odpowiadające podanym wyżej wartościom amplitud drgań harmonicznycch wynoszą odpowiednio:

dla amplitudy  $0,15\ \mu\text{m}$   $R_a = 0,095\ \mu\text{m}$ , zaś  $R_m = 0,3\ \mu\text{m}$ ,

dla amplitudy  $7,5\ \mu\text{m}$   $R_a = 4,775\ \mu\text{m}$ , zaś  $R_m = 15\ \mu\text{m}$ .

Niedokładność pomiaru przemieszczeń za pomocą opracowanego stanowiska jest zależna od wielu czynników przeanalizowanych w p. 4.5 oraz rozpatrzonych powyżej. Korzystając z wyników przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że wartość błędu względnego pomiaru przemieszczeń w zakresie od  $0,3\ \mu\text{m}$  do  $15\ \mu\text{m}$ , w najbardziej korzystnym przypadku, nie przekroczy  $\pm 3\%$ . Błąd ten jest znacznie mniejszy przy prawidłowym wykorzystaniu stanowiska, polegającym między innymi na odpowiednim doborze amplitudy drgań. Maleje także wraz ze wzrostem amplitudy drgań.

## 6.5. Wnioski z badań

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych i analizy uzyskanych wyników sformułowano następujące główne wnioski:

1. Badania doświadczalne potwierdziły wyniki uzyskane z analizy teoretycznej, dotyczące możliwości pomiarów przemieszczeń w ruchu harmonicznym, na podstawie analizy sygnału interferencyjnego, otrzymywanego z interferometru laserowego. Zbudowane stanowisko pozwala na pomiar przemieszczeń dla drgań o częstotliwościach od 0,1 Hz do 500 Hz. Zakres amplitud drgań, które mogą być zmierzone za pomocą stanowiska wynosi od  $0,15 \mu\text{m}$  do  $7,5 \mu\text{m}$ , dla częstotliwości drgań nie przekraczających 50 Hz. Dla drgań o częstotliwościach wyższych niż 50 Hz, dolna granica zakresu mierzonych amplitud wynosi  $0,15 \mu\text{m}$ , zaś górna granica tego zakresu maleje wraz ze wzrostem częstotliwości drgań.

2. W rezultacie badań porównawczych stwierdzono dużą zgodność wyników pomiarów przemieszczeń uzyskanych za pomocą opracowanego stanowiska badawczego oraz za pomocą komparatora interferencyjnego Köstersa.

3. W wyniku badań stwierdzono praktyczną przydatność opracowanej metody i zbudowanego stanowiska badawczego do sprawdzania:

- błędu względnego powiększenia pionowego profilografów,
- błędu wskazań profilometrów,
- charakterystyki przenoszenia profilometrów.

Przydatność zbudowanego stanowiska do sprawdzania profilometrów stykowych wynika między innymi stąd, że w interferometrze zastosowano miniaturowy laser półprzewodnikowy, oraz odpowiednio oprogramowany system przetwarzania sygnału pomiarowego. Modyfikacji wymaga natomiast konstrukcja stolika wibracyjnego.

4. Na wynik sprawdzania przyrządów stykowych za pomocą opracowanego stanowiska pewien wpływ może wywierać błąd wynikający z niespełnienia postulatu *Abbego*. W przeprowadzonych badaniach błąd względny pomiaru przemieszczeń, spowodowany niespełnieniem postulatu *Abbego* nie przekraczał  $\pm 0,2 \%$ . Natomiast błąd przesunięcia zera interferometru praktycznie nie wpływał na wynik sprawdzania.

5. Błąd względny pomiaru przemieszczeń za pomocą opracowanego stanowiska nie przekracza  $\pm 3 \%$  i może być znacznie mniejszy przy odpowiednim doborze amplitudy drgań. Wartość tego błędu maleje ponadto wraz ze wzrostem amplitudy drgań.

## 7. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone w ramach pracy badania i analizy doprowadziły do szeregu spostrzeżeń i wniosków szczegółowych zawartych w p.2.5, 4.6 i 6.5. Są one podstawą do sformułowania, wynikających z pracy, następujących wniosków końcowych:

1. Opracowana metoda interferencyjnego pomiaru przemieszczeń, polegająca na zastosowaniu interferometru laserowego, połączonego z cyfrowym systemem przetwarzania i analizy sygnału pomiarowego, umożliwia pomiary parametrów drgań harmoniczných stolików wibracyjnych, stosowanych do sprawdzania profilometrów stykowych, bezpośrednio w czasie sprawdzania przyrządu stykowego. Dzięki temu możliwe jest sprawdzenie następujących właściwości metrologicznych:
  - błędu względnego powiększenia pionowego profilografu,
  - błędu wskazań profilometru,
  - charakterystyki przenoszenia profilometru.
2. Opracowane i wykonane w ramach pracy stanowisko badawcze umożliwia pomiar przemieszczeń ruchomego elementu stolika wibracyjnego, wykonującego drgania harmoniczne o częstotliwościach z zakresu od 0,1 Hz do 500 Hz. Zakres amplitud drgań harmoniczných, które mogą być zmierzone za pomocą stanowiska wynosi od 0,15  $\mu\text{m}$  do 7,5  $\mu\text{m}$ , dla częstotliwości drgań nie przekraczających 50 Hz. Dla drgań o częstotliwościach wyższych niż 50 Hz, dolna granica zakresu mierzonych amplitud wynosi 0,15  $\mu\text{m}$ , zaś górna granica tego zakresu maleje wraz ze wzrostem częstotliwości drgań.
3. Błąd pomiaru przemieszczeń w ruchu harmonicznym, za pomocą opracowanego stanowiska, zależy przede wszystkim od błędu odtwarzania długości fali światła laserowego oraz od błędów pomiaru sygnału interferencyjnego. Podczas stosowania opracowanej metody pomiaru przemieszczeń do sprawdzania profilometrów stykowych dodatkowo pojawia się błąd pomiaru wynikający z niespełnienia postulatu *Abbego*. Wartość względnego błędu pomiaru przemieszczenia opracowaną metodą nie przekracza  $\pm 3\%$  i zmniejsza się wraz ze wzrostem amplitudy drgań. Wartość tego błędu można ponadto zmniejszyć dobierając odpowiednio amplitudę drgań stolika wibracyjnego.
4. Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały, że celowe było zastosowanie w opracowanym stanowisku badawczym lasera półprzewodnikowego typu PM 03 oraz karty przetworników A/C typu TAD 01. Natomiast konstrukcja stolika wibracyjnego wymaga odpowiedniej modyfikacji. W systemie przetwarzania sygnału pomiarowego pożądane

jest zastosowanie koprocatora arytmetycznego. Pozwoli to skrócić czas analizy interferogramów.

5. Porównawcze pomiary przemieszczeń, wykonane z wykorzystaniem komparatora interferencyjnego Köstersa, wskazują na dużą dokładność opracowanej metody i stanowiska badawczego. Z względu na to, iż badania porównawcze przeprowadzono jedynie dla małej częstotliwości drgań, wskazane jest wykonanie w przyszłości pełnych badań stanowiska, z zastosowaniem odpowiednio dokładnego sposobu pomiaru przemieszczeń w szerokim zakresie częstotliwości.

W dalszych badaniach, których celem będzie opracowanie systemu kontrolno-pomiarowego, przeznaczonego do sprawdzania okresowego wybranych właściwości profilometrów stykowych, można będzie zastosować lepsze rozwiązanie stolika wibracyjnego oraz zmodyfikowane oprogramowanie. Wydaje się celowym zbadanie możliwości pobudzania stolika wibracyjnego sygnałami generowanymi przez mikrokomputer i przetworzonymi na postać analogową, za pomocą przetworników C/A. Pozwoliłoby to na programowanie parametrów drgań stolika wibracyjnego i pełną integrację systemu kontrolno-pomiarowego.



## 8. LITERATURA

- 1 .Abramski K., Godziński Z., Jankowska E.: Laserowy interferometr do pomiaru małych drgań periodycznych. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, r. 28, z. 8-9, 1982, 239-241.
- 2 .Abramski K., Godziński Z., Matras E.: Przesuwniki piezocerami-  
czne dla celów technik laserowych i interferometrii. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, r. 27, z. 5, 1981, 153-155.
- 3 .Abramski K., Godziński Z.: Krajowa ceramika piezoelektryczna-  
-właściwości, parametry i zastosowanie w technice laserowej. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, r. 23, z. 12, 1977, 452-454.
- 4 .Baraš V. Ju., Fedotova G. V.: Geterodinnij interferometr dlja izmerenija parametrov vibracii. *Izmeritel'naja tehnika*, nr 1, 1984, 40.
- 5 .Baraš V. Ju.: Ocenivanije pogrešnosti profilometrov pri izmere-  
nii parametrov šerochovatosti poverchnosti. *Izmeritel'naja tehnika*, nr 2, 1987, 16-18.
- 6 .Baraš V. Ju.: K voprosu ocenki pogrešnosti kontaktnych profilo-  
grafov i profilometrov. *Issledovanija v oblasti izmerenij geometričeskich parametrov poverchnosti*. Moskva, 1985, 48-56.
- 7 .Beliczyńska-Wróbel M.: Wpływ doboru kroku dyskretyzacji na war-  
tości parametrów wysokości i pochylenia nierówności powierzchni. *Materiały Sympozjum Metrologia'80*, Politechnika Warszawska, Warszawa, 1981, 111-116.
- 8 .Beliczyńska-Wróbel M., Żebrowska-Łucyk S.: Badania procesu fil-  
tracji w pomiarach profilometrycznych. *Materiały Sympozjum Me-  
trologia'83*. Politechnika Warszawska, Warszawa, 1983, 245-251.
- 9 .Beliczyńska-Wróbel M., Żebrowska-Łucyk S.: Wpływ filtracji nis-  
kich i wysokich częstotliwości na wartość parametru  $\Delta q$  profilu chro-  
powatości. *Materiały Sympozjum Metrologia'86*, t. 1. Polite-  
chnika Warszawska, Warszawa, 1986, 141-151.
10. Bendeli A., Druz J., Thwaite E. G.: A surface simulation for the  
precise calibration of surface roughness measuring equipment. *Metrologia*, v. 10, nr 4, 1974, 137-143.
11. Bodschwina H., Hillmann W.: Tutorial Surface Characterization. *6th International Precision Engineering Seminar /12nd Interna-  
tional Conference Ultra-Precision in Manufacturing Engineering*, 27 - 31. 05. 1991, PTB Braunschweig.
12. Born M., Wolf E.: Principles of optics. Pergamon Press, Oxford-  
-London, 1968.

13. Ciesielski Z., Papiór R.: Wpływ odległości ślizgacz-penetrator na wartość parametru chropowatości przy określonej falistości powierzchni. *Mechanik*, r. 49, nr 8, 1976, 416-418.
14. Crawford R. J., Hinds B. K., O'Donnell C. P., Slew K.: Some experiments on measuring the surface finish of plastic machined surfaces. *Journal of Materials Science Letters*, v. 1, nr 12, 1982, 525-528.
15. Dunin-Barkovskij I. V., Kartašova A. N.: Izmerenija i analiz šerohovatości, volnistosti i nekruglosti poverchnosti. *Masino-stroenie*, Moskva, 1978.
16. Fulińska K.: Interferencja wielopromieniowa równej grubości w świetle odbitym i jej zastosowania. PWN, Wrocław 1968.
17. Górecka R., Polański Z.: Metrologia warstwy wierzchniej. WNT, Warszawa, 1983.
18. Hagel R., Zakrzewski J.: Miernictwo dynamiczne. WNT, Warszawa, 1984.
19. Hillmann W., Eckolt K.: Meßunsicherheit bei der Tiefenbestimmung von Einstellrillen mit einem Interferenzmikroskop. *Annals of the CIRP*, v. 22/1, 1973.
20. Hillmann W., Voigtländer H.: PTB - Einstellnormal zum Kalibrieren der Vertikalvergrößerung von Oberflächenmeßgeräten. *Messtechnik*, v. 81, nr 1, 1973, 7-11.
21. Hoffmann D.: Błędy pomiaru, prawdopodobieństwo i teoria informacji. Rozdział 6 w pracy zbiorowej pod red. P.H. Sydenhama p. t.: *Podręcznik metrologii*, t. I, WKiŁ, Warszawa, 1988.
22. Holejko K.: Precyzyjne elektroniczne pomiary odległości i kątów. WNT, Warszawa, 1981.
23. Holografia optyczna. Praca zbiorowa pod red. M. Pluty. PWN, Warszawa 1980.
24. Ishigaki H., Kawaguchi I.: Effect of a skid on the accuracy of measuring surface roughness. *Wear*, v. 68, nr 2, 1981, 203-211.
25. Jabłoński R.: Laserowe pomiary długości i kąta. Interferencja. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1983.
26. Jerzmański D.: Wpływ nacisku ostrza i ślizgacza na dokładność pomiaru chropowatości metodą stykową. VI Krajowa Konferencja Metrologii i Aparatury Pomiarowej. Wrocław, 19-21 września 1979 r. Streszczenie w: *Prace Naukowe Politechniki Wrocławskiej*, nr 19, seria: Konferencje, nr 7, 218-219.
27. Józwicki R.: Optyka laserów. WNT, Warszawa, 1981.

28. Jung A.: Zusammenhänge zwischen Tastergeometrie, Profilgeometrie und Berührungskraft bei Oberflächenmeßgeräten. *Feinwerktechnik und Messtechnik* v. 94, nr 6, 1986, 383-385.
29. Kapusta B., Benko J., Szczakiel P.: Wzbudnik elektromechaniczny do regulacji, badań i skalowania profilografometrów. Patent PRL, nr 91548.
30. Kapusta B., Szczakiel P.: Przyrządy do pomiaru i oceny topografii powierzchni. *Mechanik*, r. 57, nr 3, 1984, 159-162.
31. Karpiński T., Łukianowicz T.: Sprawdzanie wybranych właściwości metrologicznych profilografów i profilometrów stykowych metodą interferencyjną. *Materiały Sympozjum Makro- i mikrogeometria powierzchni*, 25 - 26. 09. 1990, Gdańsk.
32. Kolomijcev Ju. V.: Interferometry. Osnovy inżenernej teorii. Pri-  
menenie. *Masinstroenie*, Leningrad, 1976.
33. Konczakowski A.: Zagadnienie błędu próbkowania przy analogowo-  
-cyfrowym przetwarzaniu profilu powierzchni w celu cyfrowego  
wyznaczenia jego parametrów. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, r.  
25, z. 5, 1979, 175-177.
34. Konczakowski A., Zieliński M.: Elektroniczny układ do przygoto-  
wania danych cyfrowych z analogowych sygnałów pomiarowych.  
*Pomiary, Automatyka, Kontrola*, r. 25, z. 4, 1979, 142-144.
35. Koronkevič V. P., Chanov V. A.: *Sovremennye lasernye interfero-  
metry*. Nauka, Novosibirsk, 1985.
36. Kulka Z., Libura A., Nadachowski M.: *Przetworniki analogowo-  
-cyfrowe i cyfrowo-analogowe*. WKiŁ, Warszawa, 1987.
37. Lebegue J. M., Leclerc J.: *Mesure des états géométriques de sur-  
face. Etalons de rugosité. Méthode de mesure de référence.*  
*Bulletin d'information du Bureau National Métrologie*, v. 7,  
nr 26, 1976, 9-17.
38. Leśniak J., Pieczarka M.: O pewnej zależności parametru  $R_\alpha$  od  
długości odcinków elementarnego i mierniczego. *Czasopismo te-  
chniczne*, r. 78, nr 6, 1974, 11-15.
39. Lopovok T. S.: *Volnistost' poverchnosti i ee izmerenije*. Izda-  
telstvo Standartov, Moskva, 1973.
40. Luk'janov V. S., Egorov I. V.: *Vybor režimov diskretnogo izmere-  
nija parametrov  $R_\alpha$  i  $t_\rho$  s zadannoju dopustimoju pogrešnost'ju.*  
*Mikrogeometrija i ékspluatacionnye svojstva mašin*. Zinatne,  
Riga, 1974, 82-89.

11. Luk'janov V.S., Komarovskij O.K.: Issledovanie dinamičeskich pogrešnostej pervičnyh izmeritelnyh preobrazovatelej kontaktnykh priborov, izmerjajuščich šerochovatost' poverchnosti. Trudy metrologičeskich institutov SSSR, VNII metrologičeskoj služby, nr 218/278, 1977, 14-27.
12. Luk'janov V.S., Komarovskij O.K.: Vlijanie dinamiki oščupyvajuščej sistemy na pogrešnost' izmerenij ščupovykh priborov. Izmeritel'naja tehnika, nr 6, 1977, 27-29.
13. Luk'janov V.S., Samburskaja G.N.: Metodičeskaja pogresnost' pri izmerenii šerochovatosti poverchnosti s periodičeskim profilem. Mikrogeometria i ekspluatacionnye svojstva mašin. Riga, 1974, 12-24.
14. Luk'janov V.S., Samburskaja G.N.: O svojstvach filtra tekučego srednego pri izmerenii šerochovatosti poverchnosti. Issledovanija v oblasti metrologii kačestva poverchnostej. Moskva, 1985, 4-13.
15. Luk'janov V.S., Samburskaja G.N.: Pogrešnost' izmerenija charakteristik šerochovatosti poverchnosti, vyzvannaja nelinejnymi amplitudnymi iskaženijami profilja. Mikrogeometrija i ekspluatacionnye svojstva mašin. Zinatne, Riga, 1974, 74-81.
16. Luk'janov V.S., Samburskaja G.N.: Pogrešnost' izmerenija charakteristik šerochovatosti vyzvannaja izmeneniem gorizontalnogo uveličenija pribora. Metrologičeskie i technologičeskie issledovanija kačestva poverchnosti. Zinatne. Riga, 1976, 26-36.
17. Łukianowicz Cz.: Wyznaczanie charakterystyki przenoszenia profilometru za pomocą interferometru Michelsona. Pomiar, Automatyka, Kontrola, r. 29, z. 4, 1983, 121-123.
18. Łukianowicz Cz.: Wzorce kontrolne do sprawdzania profilografów stykowych. VII Krajowa Konferencja Metrologii i Budowy Aparatury Pomiarowej. Wrocław, wrzesień 1986. Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej, nr 28. Konferencje nr 12, 1986, 286-289.
19. Łukianowicz Cz.: Zastosowanie interferencji stroboskopowej do sprawdzania własności dynamicznych profilografometru. Materiały Sympozjum Metrologia' 83. Politechnika Warszawska, Warszawa, 1983, 252-257.
20. Łukianowicz T.: Interferometr laserowy do pomiaru i analizy drgań mechanicznych. XIX Międzyuczelniana Konferencja Metrologów. Rzeszów, wrzesień 1987. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 37, Elektrotechnika z. 6, 1987, 223-227.

51. Łukianowicz T.: Metody sprawdzania profilografów i profilometrów stykowych. *Mechanik*, r.65, nr 8-9, 1992, 265-269.
52. Mała encyklopedia metrologii. Praca zbiorowa, WNT, Warszawa, 1989.
53. Mates P., Skákala L., Krenn J.: Normale für die Prüfung der Vertikalvergrößerung von Tastschnittgeräten. V Oberflächenkolloquium, 3 bis 7 März 1980, Dresden, Komplex C, C 9/1 - C 9/8.
54. Meyer - Arendt J.R.: Wstęp do optyki. PWN, Warszawa, 1977.
55. Nowicki B.: Badania mikrostruktury geometrycznej powierzchni obrobionych i metod jej oceny. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika*, z. 70, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1980.
56. Nowicki B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni. WNT, Warszawa, 1991.
57. Oditis I.A.: Issledovanie pogrešnosti opredelenija srednego arifmetičeskogo otklonenija  $R_{\alpha}$  v zavisimosti ot dliny trassy izmerenija. *Mikrogeometrija i ékspluatacionnye svojstva mašin*. Zinatne, Riga, 1972, 109-118.
58. Peters J., Vanherk P., Sastrodinoto M.: Bewertung von Parametern zur Beschreibung der Oberflächengeometrie. V Oberflächenkolloquium, Dresden, 3-7 März 1980, Komplex C, C 10/1-C 10/20.
59. Piotrowski J.: Podstawy metrologii. WNT, Warszawa, 1977.
60. Piekara A.H.: Nowe oblicze optyki. PWN, Warszawa, 1976.
61. Pluta M.: Mikroskopia optyczna. PWN, Warszawa, 1982.
62. Puttkamer V.H.: Rauheitsmessung mit elektrischen tastschnittgeräten. Teil 2. Neue Ansätze und Entwicklungstendenzen. *Technisches Messen*. v. 50, nr 6, 219-224.
63. Radhakrishnan V., Raja J.: Effect of minor variation in stylus radius on CLA value. *Mécanique, Matériaux, Elektricité*, v. 60, nr 338, 1978, 59-61.
64. Raja J., Radhakrishnan V.: Digital filtering of surface profiles. *Wear*, v. 57, nr 1, 1979, 147-155.
65. Ratajczyk E., Dobosz M.: Laserowa interferometria heterodynowa w metrologii wielkości geometrycznych. *Mechanik*, r. 54, nr 1, 1981, 39-41.
66. Ratajczyk E., Dobosz M.: Optyczne metody pomiaru chropowatości - mikroskopia interferencyjna. *Mechanik*, r. 56, nr 7, 1983.
67. Ratajczyk E., Tomasiak J.: Analiza mikrogeometrii powierzchni przy wykorzystaniu techniki cyfrowej. *Prace CUPMiSP Politechniki Warszawskiej*, nr 28, 1980, 13-24.

68. Reason R.E.: Progress in the appraisal of surface topography during the first half-century of instrument development. *Wear*, v. 57, nr 1, 1979, 1-16.
69. Riendeau J., Gross M., Schneider J.: Surface measurement - gauging workpiece texture. *Tool and Production*, v. 44, nr 3, 1978, 81-84.
70. Rudzīt Ja. A.: Issledovanie točnosti opredelenija nekotorych charakteristik šerochovatosti v zavisimosti ot dliny trassy izmerenija. *Mikrogeometrija i ékspluatacionnye svojstva mašin*. Zinatne, Riga, 1972, 99-108.
71. Rudzīt Ja. A.: Mikrogeometrija i kontaktnoe vzaimodejstvie poverchnostej. *Zinatne*, Riga, 1975.
72. Ryspaev M.T.: Izmerenie parametrov naprjaženij infranizkich častot pri proverke profilometrov i profilografov. *Izmeritel'naja tehnika*, nr 10, 1984, 20.
73. Sadowski A., Krehlik R.: Laser w obróbce materiałów i metrologii. *WNT*, 1973.
74. Sadowski A.: Przemysłowe pomiary i sprawdzanie chropowatości powierzchni. *WNT*, Warszawa, 1966.
75. Samburskaja G.N.: Vlijanie radiusa zakruglenija ščupa na pogrešnost' izmerenija parametra  $R_a$ . Issledovanija v oblasti metrologii kačestva obrabotannyh poverchnostej. Moskva, 1985, 41-48.
76. Smereczyńska B.: Metody sprawdzania narzędzi do pomiaru chropowatości powierzchni. Część II, rozdział V w pracy zbiorowej pod red. J. Gliwińskiego p.t.: *Metody sprawdzania narzędzi do pomiaru długości i kąta*. Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa, 1979.
77. Smereczyńska B., Sokołowska K., Stalmierska Z.: Zastosowanie profilografometru Talysurf 6 do uwierzytelnienia wzorców kontrolnych chropowatości. *Materiały Sympozjum Metrologia '86*, t.1. Politechnika Warszawska, Warszawa, 1986, 121-131.
78. Sokołowska K.: Skomputeryzowany profilometr Talysurf 6 do dokładnych pomiarów mikrogeometrii powierzchni. *Mechanik*, r. 57, nr.12, 1984, 647-650.
79. Stout K.J.: Surface Roughness - Measurement, interpretation and significance of data. *Material Engineering*, v. 2, nr 6, 1991, 278-295.
80. Szczakiel P.: Wpływ nacisku pomiarowego profilografometru na dokładność pomiarów chropowatości. *Mechanik*, r. 45, nr 3, 1972.
81. Thomas T.R.: *Rough Surfaces*. Longmans, London, 1982.
82. Tolansky S.: *Surface Mikrotopography*. John Wiley and Sons Inc., New York, 1962.

83. Tomasik J.: Aktualne kierunki w budowie przyrządów profilometrycznych. *Mechanik*, r. 52, nr 9, 1989.
84. Tomasik J.: Charakterystyka podstawowych źródeł błędów przyrządów profilometrycznych. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, r. 33, nr 3, 1987, 57 - 66.
85. Tomasik J.: Parametry chropowatości powierzchni i ich interpretacja. *Mechanik*, r. 54, nr 2, 1981, 95-98.
86. Verkerk J.M.B., Orello J.M.B., Willemse H.R.: De ontwikkeling van een kwaliteitsparametr voor een tastapparaat voor het aftasten van mikroprofielen. *Metaalbewerking*, v. 44, nr 16, 1978, 398-403.
87. Vorob'ev V.A., Magadaev V.S.: Usilitel' dlja pitanija prezoivbratorov. *Izmeritel'naja tehnika*, nr 7, 1983, 34.
88. Whitehouse D.J.: Some ultimate limits on the measurement of surfaces using stylus techniques. *Measurement and Control*, v. 8, nr 4, 1975, 147-151.
89. Whitehouse D.J.: Some ultimate limits on the measurement of surface using stylus techniques. *Proceeding International Conference Production Engineering, Tokyo, 1974, Part 2. Tokyo, 1974, 39-44.*
90. Whitehouse D.J.: Stylus techniques. *Characterization of Solid Surfaces*. New York-London, 1974, 49-74.
91. Whitehouse D.J.: Theoretical Analysis of Stylus Integration. *Annals of the CIRP*, v. 23, nr 1, 1974, 181-182.
92. Wolniewicz E.: *Pomiary interferencyjne. Systemy wzorców długości*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1978.
93. Woschni E.-G., Nitzsche G.: Probleme der Digitalisierung und Filterung von Oberflächenprofilen. *Feingerätetechnik*, 1984, v. 33, nr 1, 30-32.
94. Zemskov G.G., Savel'ev V.A.: *Sredstva izmerenija linejnych razmerov s ispolzovaniem optičeskich kvantovyh generatorov. Mašinstroenie*, Moskva, 1977.
95. Deutscher Kalibrierdienst (DKD): *Guidelines for the Calibration of Stylus Instruments. Draft 1991.*
96. GOST 19300-86. *Sredstva izmerenij šerochovatosti poverchnosti profilnym metodom. Profilografy - profilometry kontaktnye. Typy i osnovnye parametry.*
97. GOST 2789-73. *Šerochovatost' poverchnosti. Parametry i charakteristiki.*
98. GOST 8.241-77. *Profilometry kontaktnye sistemy M. Metody i sredstva proverki.*
99. GOST 8.242-77. *Profilografy. Metody i sredstva proverki.*

100. Instrukcja nr 5 Prezesa PKNMiJ z dnia 21 kwietnia 1982 r. o sprawdzaniu profilografów stykowych. Załącznik nr 3 do Dziennika Normalizacji i Miar nr 8 z dnia 27 maja 1982 r., poz. 17, nr kl. metr. 5, 1410/1.
101. Instrukcja nr 5 Prezesa PKNMiJ z dnia 30 czerwca 1983 r. o sprawdzaniu profilometrów stykowych. Załącznik nr 5 do Dziennika Normalizacji i Miar nr 10 z dnia 15. sierpnia 1983 r., poz. 19, nr kl. metr. 5, 1411/1.
102. ISO 1878-1983(F). Classification des appareils et dispositifs servant à mesurer et à évaluer les paramètres géométriques des états de surface.
103. ISO 1879-1981 (E/F). Instruments for the measurement of surface roughness by the profile method - Vocabulary.
104. ISO 1880-1979 (E). Instruments for the measurement of surface roughness by the profile method - Contact (stylus) instruments of progressive profile transformation - Profile recording instruments.
105. ISO 3274-1975 (E). Instruments for the measurement of the surface roughness by the profile method-Contact (stylus) instruments of consecutive profile transformation-Contact profile meters, system M.
106. ISO 468-1982(E). Surface roughness - Parameters, their values and general rules specifying requirements.
107. ISO 5436-1985 (E). Calibration specimens - Stylus instruments - Types, calibration and use of specimens.
108. PN - 78/M - 53451. Przyrządy do pomiaru chropowatości powierzchni. Profilometry stykowe.
109. PN - 78/M - 53452. Przyrządy do pomiaru chropowatości powierzchni. Profilografy stykowe.
110. PN - 87/M - 04251. Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Wartości liczbowe parametrów.
111. PN - 87/M - 04256/02. Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość powierzchni. Terminologia ogólna.
112. Układ sprawdzeń narzędzi do pomiarów chropowatości powierzchni. Postępowanie przy czynnościach metrologicznych. Załącznik nr 1 do Dziennika Normalizacji i Miar nr 13 z dnia 13 sierpnia 1982 r., poz. 26, nr kl. metr. 5,03/1. Arkusz 7.
113. Western European Calibration Cooperation (WECC) Doc.19-1990 : Guidelines for the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations.
114. Instrukcja obsługi komparatora interferencyjnego Köstersa. Carl Zeiss Jena.



Z A Ł A C Z N I K 1

Tabulogram procedury <i>MINIMAKS</i> programu <i>INTER</i> .....	137
Tabulogram modułu <i>ADP.PAS</i> .....	145

```
{-----}
{          PROCEDURA   MINIMAKS          }
{-----}
procedure demos;forward;
procedure PRq;forward;
procedure LAMBDAA;forward;
procedure Rc;forward;
procedure Minimaks;

var
  i,j,k,u,p,l      : integer;
  amax,amin,IRa    : integer;
  lmax,ig,id,z     : integer;
  dymax,dymax1,dymax2 : integer;
  dymin,dymin1,dymin2 : integer;
  punkt,poziom,czest : integer;
  amplituda,Rm,Rp  : Longint;
  wokres,delok    : real;
  Ra,delRa,delRm  : real;
  delamp,okres,nopoz : integer;
  ilcyn,dlugel,posap : integer;
  maxi : datm_ptr;
  mini : datm_ptr;
  PktG : datp_ptr;
  PktD : datp_ptr;
  lmaxj : string;
  lmink : string;
  limax : integer;
  lambda ,RRm, RRp : real;
  rat,srt,rat1,srt1 : real;
  arco,ks,ks1,arcol : real;
  delz,nz1,nz,czasm : real;
  czesto,delcze : real;
  nstr,fstra,stid : string;
  stig : string;
  nit1,nit,It,It1 : longint;
  znak,grant : integer;
  startan,koniec : integer;
  sczg,sczd,odlpz : integer;

const
  tetragon : array[1..5] of PointType = ((x:216;y:292),
    (x:492;y:292),(x:492;y:336),(x:216;y:336),(x:216;y:292));

unction LongAddr      : longint;
ar
  _seg, _ofs : longint;
egin
  _seg := Seg(allc^);
  _ofs := Ofs(allc^);

  LongAddr:= (_seg shl 4) + _ofs;
nd;

begin
  j := 0;
  l:=1;
  k:=1;
```

```
Freemem(k2, 20004);
GetMem(maxi, 1400);
FillChar(maxi^, 1400, 0);
GetMem(mini, 1400);
FillChar(mini^, 1400, 0);
Settextstyle(0, 0, 1);
SetColor(Yellow);
grant:=Round(80.1);
outtextxy(270, 310, 'UWAGA: TRWA ANALIZA');
for i := 3 to 9996 do
begin
  if (j=0) then
begin
  if (window_1.t^[i+1]< window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-1]<= window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i+2]< window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-3]<= window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i+3]< window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-2]<= window_1.t^[i]) and
(k - j = 1) then
begin
  maxi^[j]:=i;
  k:=k+1;
end;

  if (window_1.t^[i+1]> window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-1]>= window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-2]>= window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i+2]> window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-3]>= window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i+3]> window_1.t^[i]) and
(l-j=1) then
begin
  mini^[j]:=i;
  l:=l+1;
end;
  if(k-j=2) and(l-j=2) then
  j:=j+1;
end
else
begin
  if (window_1.t^[i+1]< window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-1]<= window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i+2]< window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-3]<= window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i+3]< window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-2]<= window_1.t^[i]) and
(i-maxi^[j-1]>8) and (k - j = 1) then
begin
  maxi^[j]:=i;
  k:=k+1;
end;
  if (window_1.t^[i+1]> window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-1]>= window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-2]>= window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i+2]> window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i-3]>= window_1.t^[i]) and
(window_1.t^[i+3]> window_1.t^[i]) and
(i-mini^[j-1]>8) and (l-j=1) then
```

```
begin
  mini^[j]:=i;
  l:=l+1;
  end;
  if(k-j=2) and(l-j=2) then
    j:=j+1;
  end;
end;

if (k>1) then limax:=k
else  limax:=1;
id:= window_1.t^[mini^[i]];
ig:= window_1.t^[maxi^[i]];
for i:=1 to j-2 do
begin
  if (ig < window_1.t^[maxi^[i+1]]) then
  ig := window_1.t^[maxi^[i+1]];
  if (id > window_1.t^[mini^[i+1]]) then
  id := window_1.t^[mini^[i+1]];
  end;
  lmax := ig-id;
  if (lmax=0) then
begin
  SetColor(0);
  outtextxy(270,310,'UWAGA: TRWA ANALIZA');
  SetColor(Yellow);
  outtextxy(270,310,'UWAGA: BRAK DANYCH');

  Sound(100);
  Delay(500);
  Nosound;
  Delay(2000);
  Freemem(maxi,1400);
  Freemem(mini,1400);
  demos;
  end;

  GetMem(PktG,400);
  FillChar(PktG^,400,0);

  GetMem(PktD,400);
  FillChar(PktD^,400,0);

  GetMem(PktZ,400);
  FillChar(PktZ^,400,0);

  u := 0;
  p := 0;

  for i := 0 to j-2 do
  begin
  dymax:=0;
  dymin:=0;
  dymax1:=0;
  dymin1:=0;
  dymax2:=0;
  dymin2:=0;
```

```
for u := 0 to 6 do
begin
dymax := dymax + abs (window_1.t^[maxi^[i]-3+u+1]
-window_1.t^[maxi^[i]-3+u]);
dymin := dymin + abs (window_1.t^[mini^[i]-3+u+1]
-window_1.t^[mini^[i]-3+u]);
dymax1 := dymax1 + abs (window_1.t^[maxi^[i+1]-3+u+1]
-window_1.t^[maxi^[i+1]-3+u]);
dymin1 := dymin1 + abs (window_1.t^[mini^[i+1]-3+u+1]
-window_1.t^[mini^[i+1]-3+u]);
dymax2 := dymax2 + abs (window_1.t^[maxi^[i+2]-3+u+1]
-window_1.t^[maxi^[i+2]-3+u]);
dymin2 := dymin2 + abs (window_1.t^[mini^[i+2]-3+u+1]
-window_1.t^[mini^[i+2]-3+u]);
end;
if ( (dymax1<dymax) and (dymax1<dymax2) and (dymax1<dymin1)
and(dymax1<dymin2) and (dymax1< grant)) or
( (dymin1< dymin) and (dymin1<dymin2) and (dymin1<dymax1)
and(dymin1<dymax2) and (dymin1<grant))
then
begin
if(dymax1<dymin1)then
begin
punkt := maxi^[i+1];
end
else
begin
punkt := mini^[i+1];
end;
if (p=0) then
begin
PktZ^[p]:= punkt;
p:=p+1;
end;
if (p>=1) and ((punkt-PktZ^[p-1])>30) then
begin
PktZ^[p]:= punkt;
p:=p+1;
end;
end;
end;

i:=0;
if(abs( (PktZ^[i+1] - PktZ^[i]) - (PktZ^[i+2] -PktZ^[i+1])))
<30) then odlpz := ((PktZ^[i+1] - PktZ^[i]) + (PktZ^[i+2]
-PktZ^[i+1])) div 2
else
begin
SetColor(0);
outtextxy(270,310,'UWAGA: TRWA ANALIZA');
SetColor(Yellow);
outtextxy(270,310, ' WADLIWE DANE');
Sound(100);
Delay(500);
Nosound;
Delay(2000);
```

```
Freemem(PktZ,400);
Freemem(PktD,400);
Freemem(PktG,400);
Freemem(maxi,1400);
Freemem(mini,1400);
  demos;
  end;
(Str(limax,stad);
Str(ig,stig);
outtextxy(100,100,stig);
outtextxy(100,120,stad);}

  for i:=0 to limax do
begin
  sczg:=0;
  sczd:=0;
  for k:=0 to p-1 do
begin
  if( maxi^[i]=PktZ^[k]) then
  sczg:=sczg+1;
  if( mini^[i]=PktZ^[k]) then
  sczd:=sczd+1;
end;
  if(sczg=0) and (ig-window_1.t^[maxi^[i]]<100) then
  window_1.t^[maxi^[i]]:=ig;
  if(sczd=0) and (window_1.t^[mini^[i]]-id<100) then
  window_1.t^[mini^[i]]:=id;
end;
  Getmem(cp, 60000);
  allc := addr(cp^[1]);
  i := 1;
  while ((65535 - (LongAddr and 65535)) < 20004) do
begin
  i := i + 1;
  allc := Addr(cp^[i]);
end;
  lambda:= 0.6753;
  ks:= lambda/(2*Pi);
  znak:=1;
  for i:= 0 to 9999 do
  allc^[i]:=0;
  ilcykli := p-1;
  for j:=0 to ilcykli do
begin
  if(j mod 2 = 1) then znak := -1
  else znak:=1;
  if(znak = 1)then
begin
  SetColor(12);
  outtextxy(430,310,'_');
end
  else
begin
  SetColor(Green);
  outtextxy(430,310,'_');
end;
  startan:=PktZ^[j];
  koniecan:=PktZ^[j+1];
  if (j = p-1) then
  koniecan := 9998;
```

```
for i := startan to koniecan do
begin
It := window_1.t^[i] -id;
rat:=It/Imax;
srt:= Sqrt(rat);
if(srt=0)then srt:= 0.00000001;
nz:=(sqrt(1-rat))/srt;
arco:=ArcTan(nz);
nit := Round (ks*arco*1000 );
if( i=PktZ^[0]) then allc^[i]:= nit;
It1 := window_1.t^[i+1] -id;
rat1:=It1/Imax;
srt1:= Sqrt(rat1);
if(srt1=0)then srt1:= 0.00000001;
nz1:=(sqrt(1-rat1))/srt1;
arcol:=ArcTan(nz1);
nit1 := Round (ks*arcol*1000 );
allc^[i+1] := allc^[i] + znak * abs((nit - nit1));
end;
end;
for i := PktZ^[0] downto 1 do
begin
It := window_1.t^[i] -id;
rat:=It/Imax;
srt:= Sqrt(rat);
if(srt=0)then srt:= 0.00000001;
nz:=(sqrt(1-rat))/srt;
arco:=ArcTan(nz);
nit := Round (ks*arco*1000 );
if( i=PktZ^[0]) then allc^[i]:= nit;
It1 := window_1.t^[i-1] -id;
rat1:=It1/Imax;
srt1:= Sqrt(rat1);
if(srt1=0)then srt1:= 0.00000001;
nz1:=(sqrt(1-rat1))/srt1;
arcol:=ArcTan(nz1);
nit1 := Round (ks*arcol*1000 );
allc^[i-1] := allc^[i] + znak*znak* abs((nit - nit1));
end;
poziom := 2048-((allc^[PktZ^[1]] + allc^[PktZ^[0]]) div 2);
linia_srednia := 0;

for i:=0 to 9999 do
linia_srednia := linia_srednia + allc^[i];
linia_srednia := linia_srednia div 10000;
Ra:=0;
for i:=0 to 9999 do
Ra := Ra + abs(allc^[i] - linia_srednia);
Ra := Ra/10000;
IRa:= Round(Ra);
RRa:= IRa/1000;
Str(RRa:2:3,StRa);
amax:= allc^[PktZ^[0]];
amin:= allc^[PktZ^[0]];

for k:=0 to ilcykli-1 do
begin
if (allc^[PktZ^[k+1]]>amax) then
amax := allc^[PktZ^[k+1]];
if (allc^[PktZ^[k+1]]<amin) then
amin :=allc^[ PktZ^[k+1]];
end;
```

```
Rm := amax - amin;
Rp := amax - linia_srednia;
RRm:= Rm/1000;
Str(RRm:2:3,stRm);
Str(0.001*Rp:5:3,sRp);
amplituda := 0;

for k:=0 to ilcykli-1 do
begin
  PktD^[k]:= abs(abs(allc^[PktZ^[k+1]])-abs( allc^[PktZ^[k]]));
  amplituda:= amplituda + PktD^[k];
end;
amplituda:= amplituda div (2* ilcykli);
Str(amplituda,astra);
amax := PktD^[0];
amin := PktD^[0];

for k:=0 to ilcykli-1 do
begin
  if (PktD^[k+1]>amax) then
    amax := PktD^[k+1];
  if (PktD^[k+1]<amin) then
    amin := PktD^[k+1];
end;
if(amin>amax) then amax:=amin;
amax:=amax div 2;
delamp:= ((amax - amplituda) div 2) ;
Str(delamp,stdelamp);
czasm:= 9999*(1000/fp);
Str( czasm:4:1,stczas);
okres:=0;

for k:=0 to ilcykli-1 do
begin
  PktG^[k]:= PktZ^[k+1]-PktZ^[k];
  okres:= okres + PktG^[k];
end;
okres:=okres div ilcykli;
wokres:=-2*(1000 /fp)*okres;
Str(wokres:3:1,ostra);
amax := PktG^[0];
amin := PktG^[0];
for k:=0 to ilcykli-1 do
begin
  if (PktG^[k+1]>amax) then
    amax := PktG^[k+1];
  if (PktG^[k+1]<amin) then
    amin := PktG^[k+1];
end;
if(amin>amax) then amax:=amin;
delok:=(abs (amax - okres) )*(1000 / fp) ;
czesto:= 1000/wokres;
delcze:= czesto - (1000/(wokres+delok));
Str(delok:1:1,stdelok);
Str(czesto:3:1,stcze);
Str(delcze:1:1,stdelcz);
SetColor(0);
  outtextxy(430,310,'_');
  outtextxy(270,310,'UWAGA: TRWA ANALIZA');
  Sound(100);
  Delay(500);
  Nosound;
```



```
PRq;
LAMBDAa;
Rc;

SetColor(White);
Outtextxy(294,295,'WYNIKI ANALIZY');
Outtextxy(220,305,'Ra = '+ stRa + ' um '+
'A = '+ astra + ' '+ #241 + ' '+ stdelamp + ' nm' );
Outtextxy(220,315,'Rm = '+ stRm + ' um '+
+ 'T = '+ostra+' '+ #241+' '+ stdelok+' ms');
Outtextxy(220,325,'L = '+ stczas+' ms '+ 'f = '+ stcze
+ ' '+#241+' '+stdelcz+' Hz');

for i:=0 to 9999 do
allc^[i] := allc^[i] + poziom;
write_wait(true);
i := window_2.kanal - chn_low;
j := 0;
while i < nos do
begin
window_2.t^[j] := allc^[i];
j := j + 1;
i := i + (chn_high - chn_low + 1);
end;

window_2.x_min := 0;
if window_2.maxsamp > (max_x - 60) then
window_2.x_max := (max_x - 60)
else
window_2.x_max := window_2.maxsamp;
window_2.min_100 := 0;
window_2.max_10 := (window_2.x_max div 100) * 10;
write_wait(false);
skala(window_2);
display_x9(window_2, window_2.x_min, window_2.x_max);

Freemem(cp, 60000);
Freemem(PktZ,400);
Freemem(PktD,400);
Freemem(PktG,400);
Freemem(maxi,1400);
Freemem(mini,1400);
end;

{-----}
```

{----- MODUL ADP.PAS -----}

```
unit adp;
{$F+}
{$L adp.obj}
interface
uses Dos;

var
_l0_cnt      : integer;   { licznik L0 układu 8253 }
_l1_cnt      : integer;   { licznik L1 układu 8253 }
_l2_cnt      : integer;   { licznik L2 układu 8253 }
_cr_8253     : integer;   { rejestr sterujący układu 8253 }
_cr_ach      : integer;   { rejestr kanałów analogowych }
_port_o      : integer;   { rejestr portu wyjściowego }
_port_i      : integer;   { rejestr portu wejściowego }
_cr          : integer;   { rejestr sterujący }
_cal_sb1     : integer;   { rejestr LSB C/A nr 1 }
_cam_sb1     : integer;   { rejestr MSB C/A nr 1 }
_cal_sb2     : integer;   { rejestr LSB C/A nr 2 }
_cam_sb2     : integer;   { rejestr MSB C/A nr 2 }
_acl_sb      : integer;   { rejestr LSB A/C }
_acm_sb      : integer;   { rejestr MSB A/C }
_c_start     : integer;   { start konwersji }
_status      : integer;   { rejestr stanu }

{ zmienne wykorzystywane przez przerwanie obsługujące konwersje
  cyfrowo analogowa }

_count       : integer;   { liczba próbek do konwersji }
_kanal       : integer;   { numer kanału wyjściowego }
_ca_dane_o   : integer;   { offset adresu tablicy z danymi }
_ca_dane_s   : integer;   { segment adresu tablicy z danymi }
_o_byte      : byte;      { wartość ostatnio wysłana na port
                           wyjściowy }
_cr_val      : byte;      { wartość ostatnio wysłana do
                           rejestru sterującego }
_mode        : integer;   { tryb pracy DMA }
_base_addr   : integer;   { adres bazowy płyty przetwornika }
_dma_intr    : integer;   { numer przerwania generowanego
                           przez dma }
_ext_intr    : integer;   { numer przerwania generowanego
                           przez urządzenie zewnętrzne }
_cend        : integer;   { zmienna ustawiana poprzez
                           procedure obsługi przerwania }

function check_conv : integer;
procedure set_chn(chn_low, chn_high : integer);
function set_frq(frq : word) : integer;
function read_s : integer;
procedure read_ns_st(var dane; liczba : word);
procedure read_s_net(var dane; liczba : word; bit : word);
procedure read_ns_et(var dane; liczba : word; bit : word);
procedure read_ns_dma(var dane; liczba : word; tryb : word);
procedure set_timer(licznik, wartosc, tryb : word);
function get_timer(licznik : word) : word;
procedure send_byte(dane : byte);
function receive_byte : byte;
procedure write_s(probka : integer; kanal : word);
procedure write_ns_i(var dane; liczba : word; kanal : word);
```

implementation

```
procedure set_chn(chn_low, chn_high : integer);  
  external;
```

```
function set_frq(frq : word) : integer;  
  external;
```

```
function read_s : integer;  
  external;
```

```
procedure read_ns_st(var dane; liczba : word);  
  external;
```

```
procedure read_s_net(var dane; liczba : word; bit : word);  
  external;
```

```
procedure read_ns_et(var dane; liczba : word; bit : word);  
  external;
```

```
procedure read_ns_dma(var dane; liczba : word; tryb : word);  
  external;
```

```
procedure set_timer(licznik, wartosc, tryb : word);  
  external;
```

```
function get_timer(licznik : word) : word;  
  external;
```

```
procedure send_byte(dane : byte);  
  external;
```

```
function receive_byte : byte;  
  external;
```

```
procedure write_s(probka : integer; kanal : word);  
  external;
```

```
procedure write_ns_i(var dane; liczba : word; kanal : word);  
  external;
```

```
function check_conv : integer;
```

```
var
```

```
  ps      : byte;  
  i, mult : integer;  
  code    : integer;  
  adr_str : string;  
  dma_str : string;  
  ext_str : string;
```

```
begin
```

```
  adr_str := getenv('ADC_ADR');  
  dma_str := getenv('ADC_DMA');  
  ext_str := getenv('ADC_INT');
```

```
  if ((length(adr_str) > 0) and (length(dma_str) > 0) and  
      (length(ext_str) > 0)) then
```

```
  begin
```

```
    val(dma_str, _dma_intr, code);  
    if code <> 0 then  
      check_conv := -1;  
    val(ext_str, _ext_intr, code);  
    if code <> 0 then  
      check_conv := -1;
```

```
_base_addr := 0;
mult      := 256;
for i := 1 to length(adr_str) do
begin
  if adr_str[i] <= '9' then
    _base_addr := _base_addr + (integer(adr_str[i]) -
integer('0')) * mult
  else
    _base_addr := _base_addr + (integer(adr_str[i]) -
integer('A') + 10) * mult;
  mult := mult div 16;
end;
if ((_base_addr < 0) or (_base_addr > 1023)) then
  check_conv := -1;
```

```
_calsb1 := _base_addr + 0;
_camsb1 := _base_addr + 1;
_calsb2 := _base_addr + 2;
_camsb2 := _base_addr + 3;
_l0_cnt := _base_addr + 4;
_l1_cnt := _base_addr + 5;
_l2_cnt := _base_addr + 6;
_cr_8253:= _base_addr + 7;
_cr_ach := _base_addr + 8;
_port_o := _base_addr + 9;
_port_i := _base_addr + 10;
_cr      := _base_addr + 11;
_aclsb  := _base_addr + 12;
_acmsb  := _base_addr + 13;
_cstart := _base_addr + 14;
_status := _base_addr + 15;
```

```
Port[_cr] := $90;
ps        := Port[_status];
ps        := ps and $18;
if (ps <> $10) then
  check_conv := -2;
Port[_cr] := $88;
ps        := Port[_status];
ps        := ps and $18;
if (ps <> $08) then
  check_conv := -2;
check_conv := 0;
end
else
begin
  check_conv := -1;
end;
end;
```

```
begin
end.
```