

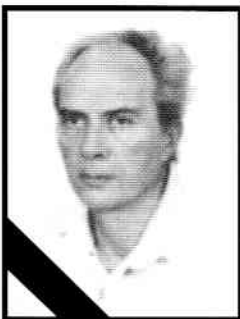
Leszek WRONKOWSKI, Tadeusz KARCZMARCZYK

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Optoelektroniczny długościomierz cyfrowy o podwyższonej rozdzielczości

Dr hab. inż. prof. PW Leszek WRONKOWSKI*

Uzyskał dyplom magistra inżyniera mechaniki precyzyjnej w 1964 r. na Wydziale Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Warszawskiej. Na tym samym wydziale w 1975 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych, a w 1990 r. doktora habilitowanego. Od 1996 roku jest profesorem nadzwyczajnym Politechniki Warszawskiej. Prace naukowe i dydaktyczne prowadzi z zakresu optoelektronicznych układów pomiarowych i technik multimedialnych. Jest autorem monografii i około sześćdziesięciu artykułów naukowych przedstawionych w zagranicznych i krajowych czasopismach naukowych. W 1996 roku był członkiem Senatu Politechniki Warszawskiej.



Mgr inż. Tadeusz KARCZMARCZYK

Ukończył w 1976 r. studia na wydziale Mechaniki Precyzyjnej i uzyskał dyplom magistra inżyniera mechaniki precyzyjnej. Przez krótki okres pracował w Dziale Nowych Opracowań Konstrukcyjnych Fabryki Wyrobów Precyzyjnych, po czym przeniósł się służbowo do Centrum Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej przemianowanego później na Instytut Metrologii i Systemów Pomiarowych. W Instytucie na stanowisku głównego specjalisty zajmował się teorią i konstrukcją optoelektronicznych układów pomiarowych. Jest autorem konstrukcji większości optoelektronicznych długościomierzy cyfrowych opracowanych w Instytucie i autorem kilkunastu prac teoretycznych związanych z wyżej wymienioną tematyką.

* autor zmarł w marcu 2001 roku, po zakwalifikowaniu artykułu do druku

Streszczenie

W pierwszej części artykułu omówiono ogólne zasady optoelektronicznych układów pomiarowych, w których wykorzystuje się zjawisko moiré oraz metody zwiększania ich rozdzielczości pomiarowej. W drugiej części przedstawiono najnowszą konstrukcję optoelektronicznego długościomierza cyfrowego opracowanego i wykonanego w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych.

Abstract

In the first part of the paper general principles of opto-electronic moiré measurement systems are described. Moreover methods of obtaining their resolution increase are discussed there. In the second part the newest construction of opto-electronic length-meter, designed in Institute of Metrology and Measurement Systems is presented.

Wprowadzenie

Współczesne konstrukcje i technologie wyrobów przemysłu elektromaszynowego narzucają coraz węższe granice tolerancji wykonanych wymiarów liniowych lub kątowych elementów maszyn. Powoduje to stale zwiększające się zapotrzebowanie na przyrządy pomiarowe, których rozdzielczość powinna kształtować się na poziomie dziesiątych części mikrometra. Rozdzielczość taką, a nawet znacznie wyższą można uzyskiwać za pomocą systemów interferencyjnych, w których wykorzystuje się wzorce falowe najczęściej w postaci promienia światła generowanego przez laser. Szczególna wrażliwość tych systemów na warunki otoczenia: zmiana temperatury, ciśnienia atmosferycznego, wilgotności, drgania oraz bardzo wysokie koszty uniemożliwiają ich wykorzystanie bezpośrednio w produkcji. Wad tych nie posiadają optoelektroniczne przyrządy, w których wykorzystywane są wzorce inkrementalne w postaci refleksyjnych lub transmisyjnych, najczęściej amplitudowych siatek dyfrakcyjnych.

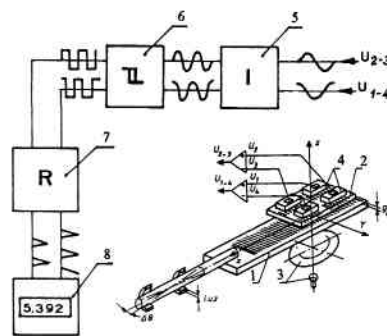
W przyrządach tych wykorzystuje się dwa typu przetworników. Pierwszy z nich zbudowany jest w postaci interferometru siatkowego, w którym pojedynczy wzorec inkrementalny współpracuje z diodą laserową. Konstrukcje układów optycznych tych przetworników są bardzo skomplikowane a zatem i bardzo kosztowne.

Drugi typ przetworników jest prostszy, a więc i znacznie tańszy. Wykorzystuje się w nich dwa wzorce inkrementalne. W układach detekcyjnych tych przetworników analizuje się obraz moiré powstały z nałożenia obrazów periodycznych struktur obydwu wzorców. Podstawową zaletą tego typu przetworników poza prostotą ich konstrukcji jest fakt uśredniania błędów wykonania współpracujących z sobą wzorców.

Optoelektroniczne przyrządy pomiarowe, w których wykorzystane są dwa wzorce inkrementalne

W optoelektronicznych przyrządach, np. optoelektronicznych długościomierzach cyfrowych, można wyróżnić dwa podstawowe zespoły (rys. 1):

- głowicę pomiarową, którą jest przetwornik przetwarzający przemieszczenie pomiarowe Δx na okresowe sygnały prądowe lub napięciowe,
- blok elektroniczny, który się składa z układu interpolatora, podzespołu formującego sygnały na przebiegi prostokątne, układu różniczkującego i licznika impulsów, na którego wyjściu jest monitor wyświetlający wartość wielkości mierzonej.



Rys. 1. Optoelektroniczny układ pomiarowy wraz z uproszczonym schematem przetwornika: 1, 2, 3, 4 – elementy i podzespoły przetwornika, 5 – układ interpolatora, 6 – układ formujący sygnały sinusoidalne na przebiegi prostokątne, 7 – układ różniczkujący, 8 – licznik impulsów wraz z wyświetlaczem

Układ elektronicznego interpolatora, który nie zawsze jest stosowany umożliwia wygenerowanie nowych sygnałów z dwóch sygnałów podstawowych uzyskanych z głowicy pomiarowej (rys. 1), dzięki czemu można zwiększyć rozdzielczość pomiarową omawianych przyrządów. Dalej zmnożone ilościowo lub częstotliwościowo w interpolatorze sygnały są formowane na przebiegi prostokątne. Następnie przebiegi te są różniczkowane i w postaci impulsów rejestrowane przez rewersyjny licznik (rys. 1).

Dla zapewnienia idealnej współpracy obydwu zespołów używane z głowicy sygnały powinny być sinusoidalne, wzajemnie przesunięte w fazie o 90° (optymalny warunek dla rewersyjnego zliczania impulsów), ich amplitudy powinny być jednakowe, a składowe stałe równe zero. Jeżeli założą się również idealny proces interpo-

lacji sygnałów w układzie elektronicznego interpolatora to wskazanie optoelektronicznego przyrządu będzie obciążone jedynie typowym dla układów cyfrowych błędem dyskretyzacji. Wielkość tego błędu zależy wyłącznie od wartości przyjętej działki elementarnej w_e (ziarn dyskretyzacji) i wynosi on $\pm 0,5 w_e$.

W rzeczywistości powyższe warunki nigdy nie są spełnione i w obydwu zespołach generowane są błędy, których struktura i wartości decydują o wartościach finalnych błędów na wyjściu optoelektronicznego przyrządu [1, 2, 3].

Optoelektroniczny przetwornik

Na rys. 1 przedstawiony jest uproszczony schemat optoelektronicznego przetwornika. Jego układ detekcyjny złożony jest z zespołu oświetlacza (3), oświetlonego fragmentu wzorca podstawowego (1), przeciwwzorca (2) oraz z czterech fotodetektorów (4). Przeciwwzorzec zbudowany jest w postaci czteroelementowego optycznego przesuwnika fazy. Posiada on cztery przesunięte wzajemnie siatki dyfrakcyjne o 0 , $1/4 d$, $1/2 d$ i $3/4 d$ (d – okres siatki dyfrakcyjnej). Umieszczone nad nimi fotodetektory przetwarzają zmienny strumień światła na cztery elektryczne sygnały poprzesuwane w fazie o 0 , $\pi/2$, π i $3/4 \pi$. Następnie sygnały te są parami sumowane różnicowo i na wyjściu przetwornika uzyskuje się dwa sygnały przesunięte w fazie o 90° , podlegają one dalszej obróbce, którą omówiono wyżej. Sumowanie różnicowe sygnałów powoduje wyeliminowanie ich składowych stałych, jest to warunek konieczny dla prowadzenia procesu interpolacji. Wartość działki elementarnej w_e takiego przetwornika wynosi $d/4$. Ogólnie rozdzielczość przetwornika można wyznaczyć zależnością:

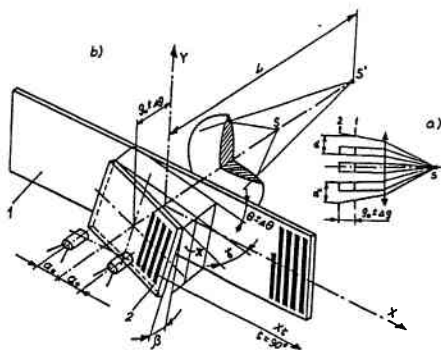
$$w_e = \frac{d}{2n}$$

gdzie: n – liczba par fotodetektorów w układzie detekcyjnym przetwornika.

Tak więc zwiększając liczbę par fotodetektorów można zwiększyć rozdzielczość przetwornika [1,2].

Rozdzielczość omawianego tu przetwornika można by dwukrotnie zwiększyć, rezygnując z sumowania różnicowego sygnałów pochodzących z pojedynczych fotodetektorów. Sygnały te należałoby doprowadzić, z pominięciem interpolatora, do układu formującego przebiegi prostokątne i dalej poprzez układ różniczkujący do łęcznika.

W rzeczywistym układzie przetwornika błędy konstrukcyjne i technologiczne zespołu prowadnic wzorca podstawowego powodują, że w czasie pomiaru zmienia się jego konfiguracja przestrzenna względem przeciwwzorca. Zmienia się odległość pomiędzy wzorcami, przestają być one wzajemnie równoległe. Stosowane w tego typu przetwornikach proste układy oświetlacza – jedna krótkoogniskowa soczewka i źródło światła o stosunkowo dużym wymiarze (włókno miniaturowej żarówki, świecąca struktura diody elektroluminescencyjnej – nie dają się w praktyce dokładnie justować (rys. 2). W efekcie wiązka oświetlacza jest rozbieżna lub zbieżna (dla jednego punktu źródła światła) [1].



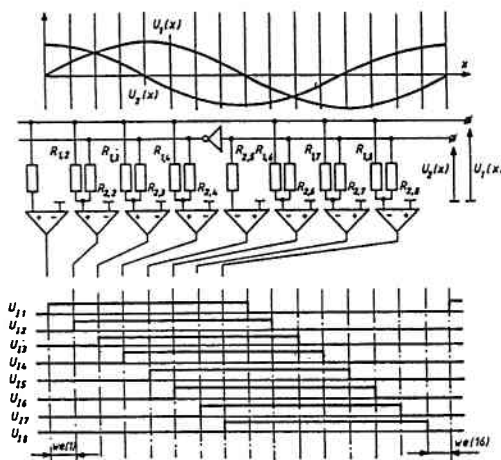
Rys. 2. Uproszczony model przetwornika: a – przestrzenne usytuowanie wzorców, b – ilustracja zjawiska projekcji

Wszystkie wymienione wyżej czynniki, jak też niedokładność wykonania optycznego przesuwnika fazy powodują, że cztery sygnały wyjściowe z przetwornika nie są dokładnie poprzesuwane w fazie o 90° i różnią się amplitudami. Powstają więc błędy fazy i błędy amplitudy sygnałów niosących informację pomiarową, które to błędy w procesie różniczkowania, spowodują, że odległości pomiędzy impulsami będą różne (zmienna wartość działki elementarnej w_e), a zatem powstaną błędy wskazań przyrządu. Błędy fazy i amplitudy sygnałów pomiarowych możemy zmniejszyć nie tylko poprzez dokładniejsze, a więc i kosztowniejsze wykonanie przetwornika. Można to osiągnąć za pomocą wspomnianego wyżej sumowania różnicowego par sygnałów w jego układzie detekcyjnym. Proces sumowania różnicowego oprócz eliminacji składowych stałych zapewnia autokompensację błędów fazy lub amplitud wywołanych luzami prowadnic przetwornika. Stopień autokompensacji tych błędów zależy od konstrukcji optycznego przesuwnika fazy i dokładności wyjustowania układu detekcyjnego przetwornika. Analiza jakościowa i ilościowa powyższych właściwości została przeprowadzona w pracach [1, 2, 3, 4].

Reasumując, dążąc do zwiększania rozdzielczości optoelektronicznych układów pomiarowych należy zrezygnować z podwyższania rozdzielczości przetwornika a wykorzystując właściwości procesu sumowania różnicowego wprowadzić elektroniczną interpolację sygnałów.

Elektroniczne metody interpolacji

Do niedawna znane były dwie metody elektronicznej interpolacji, analogowe i analogowo-cyfrowe. Dla małej liczby krotności interpolacji $N < 40$ stosuje się najczęściej interpolację analogową tworząc pośrednie przebiegi periodyczne z dwóch sygnałów podstawowych poprzez podział fazowy lub amplitudowy tych sygnałów [4, 5, 6, 7].



Rys. 3. Schemat procesu interpolacji – podział amplitudowy.

Proces interpolacji analogowej z podziałem amplitudowym przedstawiony jest na rys. 3. W procesie interpolacji powstaje szereg napięciowych przebiegów prostokątnych $U_{1,1}$, $U_{1,2}$,... uzyskanych przez komparację sygnałów podstawowych $U_1(x)$ i $U_2(x)$ na dzielnikach napięć. Wartości rezystancji dzielników są tak dobrane, aby po wprowadzeniu na wejściu układu interpolującego dwóch identycznych sinusoidalnych sygnałów, bez składowych stałych i przesuniętych w fazie o 90° , powstał ciąg równych działek elementarnych, tworzony przez opadające lub rosnące zbocza sygnałów generowanych przez komparatory [6, 7].

Powyższa metoda interpolacji podobnie zresztą jak metoda podziału fazowego ma ograniczoną liczbę krotności interpolacji.

Z analizy mechanizmów tworzenia nowych sygnałów w procesie tej metody interpolacji wynika, że jeśli chcemy powiększyć rozdzielczość przyrządu poprzez np. dwukrotne zwiększenie krotności

interpolacji, przy zachowaniu tej samej wartości względnego błędu interpolacji $\Delta I/w_c$, konstrukcja głowicy pomiarowej powinna zapewnić w przybliżeniu dwukrotnie niższy poziom błędów jej sygnałów wyjściowych [6]. Tak więc koszty powiększenia rozdzielczości optoelektronicznego przyrządu będą szybko rosły.

Dla większej liczby krotności w procesie interpolacji wykorzystuje się metody analogowo-cyfrowe z wykorzystaniem systemów mikroprocesorowych. Powszechnie stosowany sposób interpolacji polega na tym, że każdorazowo sygnały wyjściowe z przetwornika po przejściu pełnego okresu odpowiadającego stałej wzorca inkrementalnego, są korygowane i normowane amplitudowo i fazowo do założonych sygnałów standardowych. Zastosowany tu proces korekcji uwzględnia wcześniej zapisane w pamięci systemu wartości poprawek kompensujących błędy systematyczne wzorców. Następnie sygnały są interpolowane (podział amplitudowy za pomocą przetwornika A/C. W pierwszej fazie pomiaru zliczane są pełne okresy zmian sygnałów. W fazie końcowej, po ustaleniu pozycji pomiarowej, ostatni niepełny okres sygnałów jest kwantowany z założoną krotnością interpolacji przy czym proces interpolacji odnosi się do skorygowanych już wcześniej sygnałów poprzedniego okresu. W ten sposób uzyskuje się znaczną kompensację błędów systematycznych – błędy wzorców i niedokładności przewodnic [10].

Podstawową jednak wadą tego systemu jest brak możliwości śledzenia bieżącej wartości wielkości mierzonej w czasie wzajemnego przemieszczania się wzorców. Wady tej nie posiada nowa oryginalna cyfrowa metoda interpolacji sygnałów.

Optoelektroniczne długościomierze cyfrowe

Pierwsze optoelektroniczne długościomierze, w których wykorzystuje się dwa wzorce inkrementalne wyprodukowała firma niemiecka. Dr. J. Heidenhain w połowie lat siedemdziesiątych. Były to przyrządy o zakresie pomiarowym 10 i 30 mm i rozdzielczości 1 μ m. Firma ta do dziś jest firmą wiodącą na świecie w zakresie optoelektronicznej aparatury przeznaczonej do pomiaru długości i kąta. W kraju prace teoretyczne jak i konstrukcyjne związane z tego typu aparaturą prowadzone są od początku lat osiemdziesiątych w Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej. Opracowano i wykonano całą rodzinę optoelektronicznych długościomierzy cyfrowych o zakresach 30 i 100 mm i rozdzielczościach 2, 1 i 0,5 μ m. Zastosowano w nich opisaną wcześniej analogową metodę interpolacji. Ostatni długościomierz o zakresie 100 mm i $w_c = 0,5 \mu$ m wyposażony jest w automatyczny przesuw trzpienia pomiarowego [9]. Dwa typy z wymienionych długościomierzy zostały wdrożone do produkcji w OBRN VIS.

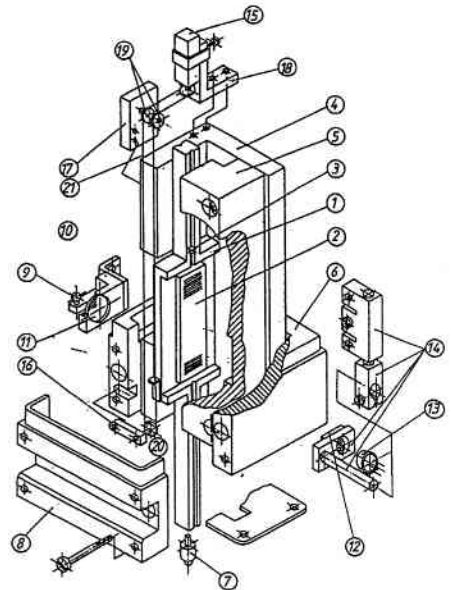
Tematem następnych punktów niniejszego artykułu będzie opis najnowszej konstrukcji głowicy pomiarowej oraz analiza błędów optoelektronicznego długościomierza o podwyższonej rozdzielczości ($w_c = 0,1 \mu$ m) (rys. 4).

Opis konstrukcji głowicy pomiarowej

Podstawowym elementem konstrukcji głowicy (rys. 4) jest główna prowadnica (1), do której wklejony jest inkrementalny wzorzec podstawowy (2). Główna prowadnica łożyskowana jest za pomocą czterech kulek (3) w dwóch prowadnicach w kształcie litery L (4, 5), które wraz z korpusem (6) tworzą sztywny szkielet konstrukcyjny głowicy. Należy podkreślić, że sztywność konstrukcji nie została osiągnięta kosztem niepotrzebnego zwiększania gabarytów głowicy, a tylko wartością konstrukcji przewodnic, przekrój poprzeczny zespołu przewodnic mieści się w wymiarach 40 x 40 mm.

Dodatkowo w celu maksymalnego zabezpieczenia głowicy od wpływu odkształceń zewnętrznych przenoszonych przez podstawę pomiarową lub inny element, na którym zamocowana jest głowica, zespół przewodnic związany jest tylko z tylną ścianką korpusu (6) do której są one mocowane i ustalane za pomocą kołków, co za-

bezpiecza jednocześnie poprawność montażu głowicy w trakcie prac konserwacyjnych.



Rys. 4. Konstrukcja głowicy pomiarowej optoelektronicznego długościomierza

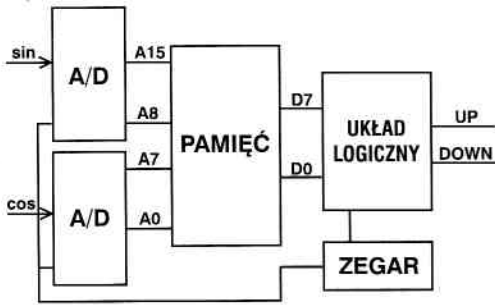
Poza wymienioną wyżej sztywnością konstrukcji zespół (1, 4 i 5) zapewnia realizację tzw. postulatu Abbego – oś wzorca pomiarowego znajduje się w osi układu pomiarowego i w osi symetrycznie rozłożonych przewodnic, wówczas wszelkie błędy kształtu przewodnic minimalizują się.

Do korpusu głowicy (6) dokręcana jest za pomocą śrub, druga część korpusu (8), która zamyka w dolnej części mechanikę głowicy, tworząc jednocześnie kieszeń, w której ułożona jest płytka z analogowymi i cyfrowymi podzespołami elektronicznego interpolatora. Nad zamontowaną częścią korpusu nakładana jest osłona w postaci pudełka. Układ detekcyjny głowicy zmontowany jest z prostych elementów konstrukcyjnych umożliwiających adiustację zarówno oświetlacza jak i przeciwwzorca z układem detekcyjnym. Układ oświetlacza zamocowany jest na elemencie konstrukcyjnym (10), który umożliwi regulację odległości i osi żarówki (9) względem soczewki (11). Element (10) mocowany jest do korpusu głowicy. Przeciwwzorzec (12) oraz zintegrowany fotodetektor umieszczony jest na przegubie adiustacyjnym (14), który umożliwi zmianę odległości oraz kątową regulację przeciwwzorca względem wzorca podstawowego oraz podobną regulację fotoodbiornika.

Przesuw przewodnicy głównej do której przymocowany jest wózek podstawowy i końcówka pomiarowa (7) przesuwana jest w sposób automatyczny, przy czym kierunek jej przesunięcia sterowany jest z pulpitu zespołu mikroprocesorowego. Przesuwanie przewodnicy głównej zapewnia zespół cięgnowy składający się z elementów mocujących (16, 17, 18), bloczków (19, 20) oraz z cięgna (21). Zespołem tym steruje mikrosilnik (15) firmy Escap. Zespołem ten umożliwia automatyczne ustawienie końcówki (7) w dowolnym punkcie zakresu pomiarowego oraz realizuje nacisk pomiarowy, który wynosi 0,07 N. Nacisk ten może być regulowany, za pomocą zmiany napięcia zasilającego silnik.

Elektroniczny interpolator cyfrowy

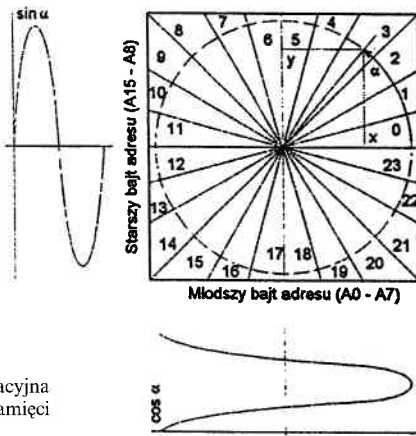
W układzie elektronicznego interpolatora tego długościomierza wykorzystana została nowa oryginalna (Pat. PL 174584) metoda interpolacji cyfrowej [11]. Metoda ta polega na śledzeniu w czasie rzeczywistym chwilowych wartości sygnałów wyjściowych z głowicy pomiarowej i generacji impulsów UP/DONN zliczanych przez licznik w zależności od wykrytych zmian poziomu tych sygnałów (rys. 5).



Rys. 5. Blokowy schemat układu interpolatora cyfrowego

Istotą tej metody jest sposób śledzenia ww. sygnałów, polegający na ich wstępnej digitalizacji i dalszej obróbce na drodze cyfrowej. Sygnały „sin” i „cos” są digitalizowane niezależnie, przez dwa przetworniki (A/D) typu flash, taktowane sygnałem z zegara kwarcowego o częstotliwości 15 MHz. Cyfrowa reprezentacja aktualnych poziomów obu sygnałów jest traktowana jako argument funkcji interpolacyjnej stabilizowanej w komórkach pamięci typu ROM. Pamięć ta ma postać wycinków kwadratu o równej szerokości kątowej (rys. 6), których liczba odpowiada krotności interpolacji. W przypadku przedstawianego przyrządu liczba ta wynosi $N = 80$. Ośmiobitowy chwilowy poziom sygnału „sin” jest podawany do pamięci jako starszy bajt adresu ($A8 \div A15$), natomiast chwilowy poziom sygnału „cos” jako młodszy bajt adresu ($A0 \div A7$). Podczas przemieszczania trzpienia głowicy w czasie pomiaru na magistrali adresowej pamięci pojawiają się więc kolejne adresy, którym przyporządkowane są określone wartości funkcji interpolacyjnej, zapisane w poszczególnych komórkach. Funkcja ta jest tak dobrana aby wspólne zmiany amplitud obu sygnałów nie wpływały na błąd interpolacji.

Układ logiczny interpolatora, połączony z magistralą danych pamięci, odczytuje kolejne wartości funkcji interpolacyjnej, analizuje je i generuje impulsy UP/DOWN, zliczane przez licznik rewersyjny pokazujący wartość wielkości mierzonej. Tak skonstruowany elektroniczny interpolator pozwala na przyjęciu stałej inkrementalnego wzorca $d = 8 \mu\text{m}$, uzyskać rozdzielczość wynoszącą $0,1 \mu\text{m}$.



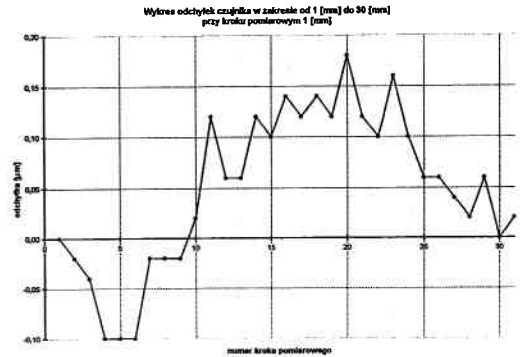
Rys. 6. Funkcja interpolacyjna stabilizowana w pamięci nieulotnej

Badania dokładności wskazań optoelektronicznego długościomierza

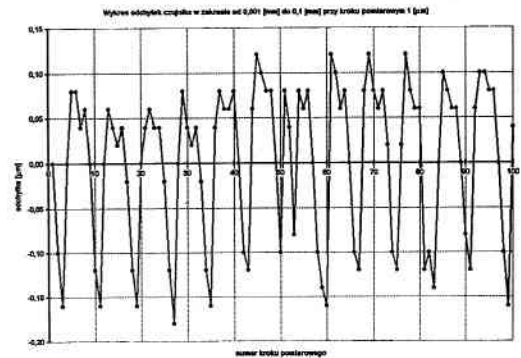
Badania charakterystyki dokładnościowej długościomierza prowadzone były w Głównym Urzędzie Miar na interferometrycznym stanowisku pomiarowym wyposażonym w dwuczęstotliwościowy interferometr firmy Hewlett-Packard typ 5528.

Brak wyposażenia sterująco-pomiarowego w tym stanowisku, które umożliwiałoby wykonywanie dynamicznych pomiarów – rejestrację wskazań interferometru sterowanych zaprogramowanym interwałem zmiany wartości wskazań długościomierza – spowodowało,

że pomiary sprawdzające dokładność wskazań długościomierza odbywały się w sposób statyczny. Polegały one na statycznym przemieszczaniu trzpienia pomiarowego o określoną wartość wskazania: $0,0001$; $0,001$ i $1,000\text{mm}$ i odczytywania wartości wzorcowej odpowiadającej temu wskazaniu zmierzonej na interferometrze. W tej sytuacji pomiary sprawdzające dokładność wskazań długościomierza są obciążone nie tylko błędem interferometru, który wynosi $\pm 0,01 \mu\text{m}$ ale również błędem dyskretyzacji długościomierza, który odpowiada jego wartości działki elementarnej ($0,1 \mu\text{m}$).



Rys. 7. Wykres błędów długookresowych optoelektronicznego długościomierza



Rys. 8. Wykres błędów krótkookresowych optoelektronicznego długościomierza

Wybrane wyniki badań przedstawiono na wykresach: rys. 7 przedstawia wykres błędów długookresowych – badano cały zakres przyrządu z interwałem wskazania 1mm , rys. 8 przedstawia wykres błędów krótkookresowych w zakresie $0,1\text{mm}$ z interwałem $1 \mu\text{m}$.

Analizując uzyskane wyniki badań należy stwierdzić, że błędy wskazań długościomierza zarówno długookresowe jak i krótkookresowe nie przekraczają wartości $\pm 0,25 \mu\text{m}$. Biorąc pod uwagę fakt, że w błędzie tym mieści się również błąd dyskretyzacji długościomierza (patrz wyżej) można uznać otrzymane wyniki dokładnościowe przyrządu za satysfakcjonujące.

Kompensacja niektórych błędów systematycznych długościomierza

W celu skompensowania niektórych błędów systematycznych długościomierza, a także błędów wynikających z niedokładnego ustalenia przyrządu w kolumnie pomiarowej, do układu elektronicznego interpolatora wprowadzono dodatkowy zespół mikroprocesorowy.

Na czołówce układu mikroprocesorowego (rys. 9) znajdują się między innymi przyciski do wprowadzania liniowej korekcji wskazań. Proces korekcji polega na pomiarze płytki wzorcowej klasy 00, a następnie na wprowadzeniu za pomocą klawiatury do układu mikroprocesora, wartości wzorcowej mierzonej płytki.

Rys. 9. Fotografia głowicy optoelektronicznego długościomierza zamocowanej w statywie oraz układu mikroprocesorowego



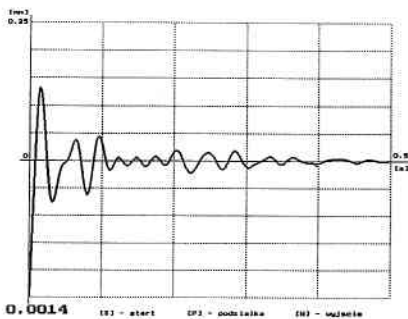
Układ mikroprocesorowy współpracujący z elementem pamięci operacyjnej zapamiętuje różnice wskazania. Następnie dzieli przez ilość działek elementarnych zawartych w wymiarze nominalnym wzorcowej płytki i tablicuje je w postaci poprawek, które są uwzględniane w wynikach wskazań. Dla omawianego w artykule długościomierza optymalna długość płytki wzorcowej powinna wynosić 20 mm (patrz wykres błędów długoookresowych) (rys. 7).

Przy dużych zakresach pomiarowych np. 30 mm i dużej rozdzielczości przyrządu pomiarowego, podstawy pomiarowe, w których są mocowane te przyrządy powinny mieć możliwość dokładnej adiustacji układu mocującego głowicę tak aby oś pomiarowa głowicy była prostopadła do stolika podstawy. Wszelkie niedokładności w ustalaniu położenia głowicy powodują powstawanie błędów liniowych, które są funkcją cos kąta tworzonego pomiędzy prostopadłą do stolika i osią pomiarową głowicy. Tymczasem przyjęty w rozwiązaniu długościomierza mikroprocesorowy system korekcyjny może kompensować te błędy. Dzięki czemu można zrezygnować z kosztownych węzłów adiustacyjnych i mocujących głowicę na stanowisku pomiarowym.

Przedstawiona powyżej metoda korekcji pozwala również częściowo kompensować błędy temperatury o ile temperatura wzorca i elementów mierzonych będzie taka sama.

Uwagi końcowe

Przedstawiona wyżej metoda cyfrowej interpolacji, w przeciwieństwie do znanych dotychczas systemów interpolujących, umożliwia śledzenie bieżącej wielkości mierzonej w czasie rzeczywistym



Rys. 10. Zapis drgań belki plotera kartograficznego – odpowiedź na zakłócenie skokowe

co pozwala na wykorzystanie optoelektronicznych układów do pomiarów dynamicznych. Powyżej przedstawiony jest zapis drgań belki prowadnicy ciągnowej w ploterze kartograficznym wykonany za pomocą przedstawionego tu długościomierza.

Należy jeszcze podkreślić fakt, że metoda ta umożliwia zwiększenie w szerokich granicach rozdzielczości we wszystkich przyrządach, w których przetworniki generują na swoim wyjściu dwa sygnały przesunięte w fazie np. systemy interferencyjne, pojemnościowe, indukcyjne itd.

LITERATURA

- [1] L. WRONKOWSKI: Teoria i zastosowania optoelektronicznych inkrementalnych układów pomiarowych przeznaczonych do pomiaru długości. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, 1990 z. 141
- [2] L. WRONKOWSKI: Signal transducing in optoelectronic measurement systems based on the moiré phenomenon. *Optical Engineering*, 1992, vol. 31, no 3
- [3] A. OLSZAK, L. WRONKOWSKI: Analysis of the Fresnel field of a double diffraction systems in the case of two amplitude diffraction gratings under partially coherent illumination. *Optical Engineering*, 1997, vol. 36, no 3
- [4] L. WRONKOWSKI: Prognozowanie finalnych dokładności optoelektronicznych przetworników pomiaru przemieszczeń. 1993, *Mat. konf.: Metrologia wspomagana komputerami. Zegże klWarszawy*
- [5] L. WRONKOWSKI: Układy detekcyjne w optoelektronicznych przyrządach pomiarowych. 1994, *Mat. konf.: Czujniki optyczne i elektroniczne, Zegże klWarszawy*
- [6] T. KARCZMARCZYK: Proces interpolacji, a rozdzielczość przyrządów do pomiaru długości. *Mat. Sympozjum Metrologia'89, Warszawa 1989*
- [7] L. WRONKOWSKI: Optyczne przesuwniki fazy i ich wpływ na dokładność pracy optoelektronicznych przetworników inkrementalnych. 1988, *Rozprawy Elektrotechniczne, PAN, tom 34, z. 2*
- [8] T. KARCZMARCZYK, L. WRONKOWSKI: Rodzina optoelektronicznych długościomierzy cyfrowych. *Mat. Sympozjum Metrologia'89, Warszawa 1989*
- [9] H. SWATEK: Längenmessung auf 1/100µm – keine Utopie mehr. *Der Wirtschaftsingenieur, Nr 16, 1984*
- [10] P. SEKUŁA, L. WRONKOWSKI: Digital method of enlargement of resolution and accuracy of the optoelectronic measuring systems. 1997, *Proceedings of the 11th European Conference on Solid-State Transducers, vol. 3*