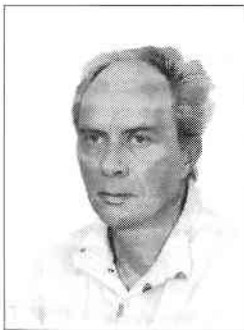


Leszek WRONKOWSKI

INSTYTUT METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Detekcja sygnałów optycznych oraz jej wpływ na błędy fazy sygnałów wyjściowych z optoelektronicznego przetwornika

Leszek WRONKOWSKI – dyplom magistra inżyniera mechaniki precyzyjnej uzyskał 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 publikowanych w zagranicznych i krajowych czasopismach naukowych.



Streszczenie

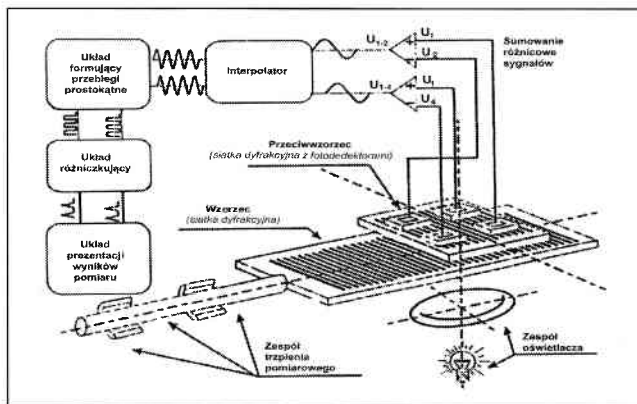
W artykule rozważane są teoretycznie różne układy detekcyjne optoelektronicznych przetworników pod kątem uzyskania maksymalnej rozdzielczości i dokładności wskazań układów pomiarowych z tymi przetwornikami.

Abstract

In the paper various opto-electronic detection converter systems are theoretically analysed. Possibility of obtaining maximum precision and resolution of different measurement systems applying these converters is described and discussed.

Wprowadzenie

W optoelektronicznych przetwornikach przeznaczonych do pomiaru przemieszczeń liniowych lub kątowych wykorzystuje się najczęściej dwa wzorce inkrementalne w postaci liniowych lub radialnych binarnych siatek dyfrakcyjnych. Na rys. 1 przedstawiony jest układ pomiarowy przeznaczony do mierzenia długości. Składa się on z optoelektronicznego przetwornika i zespołów elektronicznych przetwarzających analogowe sygnały wyjściowe z przetwornika na cyfrową informację określającą wartość wzajemnego przemieszczania się inkrementalnych wzorców w trakcie pomiaru. W czasie przemieszczania się wzorców układy detekcyjne przetwornika analizują i przetwarzają na sygnały elektryczne optyczny sygnał obrazu mory, pojawiający się za płaszczyzną przeciwwzorca.



Rys. 1. Uproszczony schemat konstrukcyjny inkrementalnego przetwornika optoelektronicznego

Sygnałami wyjściowymi z przetwornika są najczęściej dwa napięciowe bądź prądowe przebiegi okresowe, które w zależności od wykorzystanej w przetworniku wiązki światła oświetlacza,

częściowo-koherentnej lub niekoherentnej, są bardziej lub mniej zbliżone do przebiegu sinusoidalnego [1, 2]. Przebiegi te są pozbawione składowych stałych i przesunięte względem siebie o 90° (rys. 1). Składową stałą eliminuje się przez zastosowanie par fotodetektorów pracujących w układach różnicowych, natomiast przesunięcie fazowe realizuje się przez odpowiedni przeciwwzorec w postaci optycznego przesuwnika fazy¹ bądź przeciwwzorce w postaci jednolitej siatki dyfrakcyjnej, skręcony o niewielki kąt θ [1]. Wyeliminowanie składowej stałej z sygnałów umożliwia ich multiplikację ilościową lub częstotliwościową w zespole interpolatora, następnie uformowanie ich w przebiegi prostokątne i różniczkowanie. W rezultacie uzyskuje się ciąg impulsów zliczanych rewersyjnym licznikiem prezentującym wynik pomiaru.

W ten sposób można uzyskać nawet znaczne zwiększenie rozdzielczości układu pomiarowego. Jednak krotność multiplikacji sygnałów jest ograniczona błędami sygnałów wyjściowych z przetwornika: błędami amplitudy ΔA szczytkową wartością składowej stałej ΔC , ale przede wszystkim błędem fazy $\Delta \Phi$ opisanym poniższą zależnością (1)

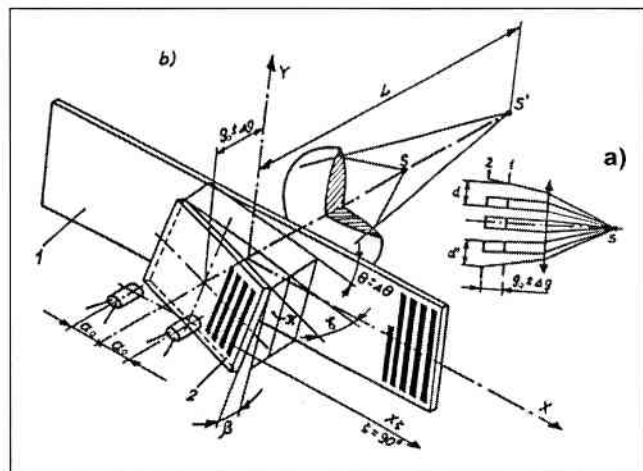
$$\Delta \Phi = \varphi_{1,2} \pm 90^\circ \quad (1)$$

gdzie: $\varphi_{1,2}$ różnica faz sygnałów wyjściowych z przetwornika, która teoretycznie powinna wynosić $\pm 90^\circ$.

Błędy amplitudy i składowej stałej stosunkowo łatwo jest skompensować np. przez specjalną konstrukcję torów optycznych w układzie detekcyjnym przetwornika [1, 2, 3] bądź w procesie elektronicznej interpolacji sygnałów. Natomiast znacznie trudniej jest wyeliminować błędy fazy.

Czynniki błędotwórcze wywołujące błędy fazy

Głównymi czynnikami wywołującymi błędy fazy są luzy i błędy kształtu prowadnic, które w połączeniu z przeogniskowaniem oświetlacza powodują niedoadjustowanie układu detekcyjnego przetwornika.



Rys. 2. Uproszczony schemat układu detekcyjnego optoelektronicznego przetwornika:
a – przestrzenne usytuowanie wzorców,
b – ilustracja zjawiska projekcji

Na przedstawionym uproszczonym modelu przetwornika (rys. 2a) prawidłowe ułożenie płytki przeciwwzorca oddalonej o g_0 względem wzorca podstawowego reprezentuje płaszczyzna π .

¹ Optyczny przesuwnik fazy (OPF) (nazwa zaproponowana przez autora) jest to n -elementowy zespół dyfrakcyjnych siatek naniesionych na jednej płaszczyźnie szklanej płytki w ten sposób, że kolejne segmenty siatek są względnie poprzysuwane w fazie. Na przykład czteroelementowy przesuwnik ma przesunięte względem siebie siatki o 0, $1/4 d$, $1/2 d$ i $3/4 d$, gdzie d jest stałą siatki dyfrakcyjnej.

W rzeczywistości przeciwwzorec może być pochylony względem niej o kąt γ w płaszczyźnie xz i o kąt β w płaszczyźnie yz . Wartości tych kątów, jak też odległość g między wzorcami mogą się zmieniać w czasie przemieszczania wzorca podstawowego.

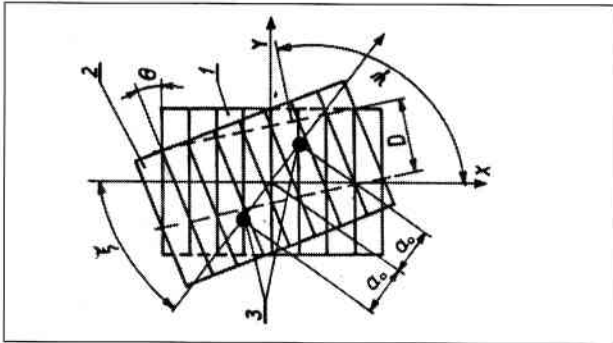
Dalej, jak to zasygnalizowano na rys. 2 ab, wiązka wychodząca z oświetlacza jest najczęściej rozbieżna. Stosowane w tego typu przetwornikach proste układy oświetlaczy – jedna krótkoogniskowa soczewka i źródło światła o stosunkowo dużym wymiarze (włókno żarówki, świecąca struktura diody elektroluminescencyjnej) – nie dają się w praktyce dokładnie justować.

Na rys. 2b przedstawiono efekt jaki powstanie w przypadku oświetlenia wiązką rozbieżną dwóch kolejnych wzorców, których stałe są identyczne ($d_1 = d_2 = d$). Test binarny wzorca podstawowego (1) projektowany na płaszczyznę przeciwwzorca (2) będzie miał stałą d' większą od stałej d . Nietrudno jest zauważyć, że względny przyrost stałej wzorca podstawowego będzie równy

$$\frac{\Delta d'}{d} = \frac{d' - d}{d} = \frac{g_0}{L} \quad (2)$$

gdzie:

L – odległość umownego punkтового źródła światła tak dobrana, aby kąt padania promieni świetlnych z tego źródła był równy średniemu kątowi padania promienia z rzeczywistego oświetlacza z soczewką (rys. 2a). Stosunek g_0/L oznaczono symbolem δ , jest to parametr charakteryzujący własności projekcji w układzie detekcyjnym przetwornika.



Rys. 3. Konfiguracja kątowych zależności w układzie detekcyjnym optoelektronicznego przetwornika

W celu uzyskania zależności wyznaczających fazy i błędy fazy dla przypadku ogólnego modelu przetwornika (rys. 2 i 3), w którym uwzględniony jest kąt ξ , który jest zawarty między osią x (kierunek przesuwu wzorca podstawowego) a linią przechodzącą przez środki optyczne fotodetektorów wyprowadzono wzór na długość rzutu prążka mory D na kierunek ξ (zależność 3)

$$D_{\xi}(\theta, \delta, \gamma) = \frac{d \cos \gamma (1 + \delta)}{\cos(\xi - \theta) - \cos \xi (1 + \delta)} \quad (3)$$

We wzorze (3) uwzględniony jest w postaci utajnionej kąt Ψ , definiowany jako kąt zawarty pomiędzy osią x a prostopadłą do osi prążków mory (rys. 3). Wzór ten wiąże funkcje kinematyki prążków mory i ich detekcji [1, 2].

Dla uzyskania pełnego obrazu wpływu nierównoległego ustawienia wzorców na fazy i błędy fazy analizowanego układu przetwornika wyznaczono parametr δ w funkcji kątów γ i β .

$$\delta = \frac{g_0}{L} - \frac{a_0 \operatorname{tg} \gamma \cos \xi}{L} - \frac{a_0 \operatorname{tg} \beta \sin \xi}{L} \quad (4)$$

Zachodzi tu więc superpozycja składników parametru δ będących funkcją g_0 , kąta γ (δ_{γ}) i kąta β (δ_{β}), udział w nim dwóch ostatnich określa kąt ξ (odpowiednio $a_0 \cos \xi$ i $a_0 \sin \xi$). Składniki te odzwierciedlają zmiany długości promieni wychodzących z płaszczyzny siatki dyfrakcyjnej wzorca (1), tworzących obraz mory w płaszczyźnie siatki (2) – (rys. 2).

Biorąc pod uwagę sposób przetwarzania informacji w układzie detekcyjnym przetwornika – w postaci zmiany przemieszczenia na okresowy sygnał elektryczny – przyrost fazy na elementarnym odcinku Δx może być zdefiniowany następującą formułą

$$d[\varphi(x)] = \frac{2\pi}{D_{\xi}(x)} dx_{\xi}$$

a zmiana fazy w dowolnym przedziale $\langle x_{\xi 1}, x_{\xi 2} \rangle$ wyniesie

$$\varphi(x) = \int_{x_{\xi 1}}^{x_{\xi 2}} \frac{2\pi}{D_{\xi}(x)} dx_{\xi} \quad (5)$$

Podstawiając dalej do zależności (5) wzory na okres prążka $D_{\xi}(\theta, \delta, \gamma)$ i $\delta(g_0, a, \gamma, \beta)$ oraz formułując odpowiednie założenia związane z koniecznością zdefiniowania składników błędów fazy $\Delta \Phi_{\gamma}(x)$ i $\Delta \Phi_{\beta}(x)$, uwzględniając dwustanowe położenie wzorca (równoległe i nierównoległe) [1, 2] uzyskano ostateczną postać wzoru (6)

$$\Delta \Phi(\theta, \delta, \xi, \gamma, \beta, a_0) = \frac{2\pi L \cos(\xi - \theta)}{d \cos \gamma (\operatorname{tg} \gamma \cos \xi + \operatorname{tg} \beta \sin \xi)} \times \ln \left| \frac{L + g_0 + a_0 (\operatorname{tg} \gamma \cos \xi + \operatorname{tg} \beta \sin \xi)}{L + g_0 - a_0 (\operatorname{tg} \gamma \cos \xi + \operatorname{tg} \beta \sin \xi)} \right| + \frac{4\pi a_0 \cos(\xi - \theta)}{d(L + g_0)} \quad (6)$$

gdzie: a_0 – odległość osi fotodetektora od osi optycznej układu detekcyjnego przetwornika.

Przedstawiony wyżej wzór (6) można wykorzystać do obliczeń błędów fazy po wcześniejszym uwzględnieniu związku pomiędzy nominalną wartością kąta skręcenia wzorców θ_0 i kąta ξ , wynikającego z warunku rewersyjnego zliczania impulsów – sygnały na wyjściu przetwornika powinny być przesunięte w fazie o $\pm 90^\circ$.

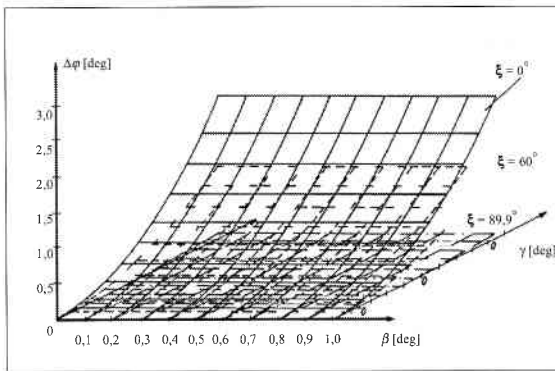
Powyższy warunek spełnia równość $2a_0 = 1/4 D_{\xi}(\theta_0, \delta_0, \gamma = 0)$, na podstawie której po wprowadzeniu wzoru na prążek mory D_{ξ} uzyskano następującą zależność:

$$\theta_0 = \arccos \left[\cos \xi (1 + \delta_0) - \frac{d(1 + \delta_0)}{8a_0} \right] - \xi \quad (7)$$

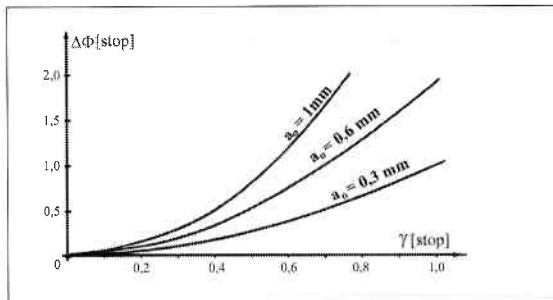
gdzie: $\delta_0 = g_0/L$ jest nominalną wartością tego parametru.

Przedstawiona wyżej zależność (6) umożliwia wszechstronną analizę wpływu poszczególnych parametrów konstrukcyjnych przetwornika ($\theta, \delta, \xi, \gamma, \beta, a_0$) na błędy fazy $\Delta \Phi$ jego sygnałów wyjściowych, a zatem na dokładność jego pracy.

W celu zilustrowania wpływu kątów γ i β na błędy fazy na rys. 4 przedstawiono przestrzenny wykres $\Delta \Phi = f(\gamma, \beta)$ dla różnych kątów ξ ($0^\circ, 60^\circ$ i $89,9^\circ$), wartości $a_0 = 0,6$ mm, $\delta_0 = 10^{-5}$, przy czym kąty γ i β zmieniają się w przedziale $\langle 0^\circ + 1^\circ \rangle$. Przyjęte do obliczeń wartości parametrów konstrukcyjnych odpowiadają realnym ich wartościom, jakie mogą występować w przetwornikach.



Rys. 4. Wykresy ilustrujące zależność błędów $\Delta\Phi = f(\gamma)$ dla trzech wartości kąta ξ



Rys. 5. Wykresy ilustrujące zależność fazy $\Delta\Phi = f(\gamma)$ dla różnych odległości pomiędzy fotodetektorami a_0

Na podstawie uzyskanych wykresów $\Delta\Phi = f(\gamma)\xi$ można sformułować następujące wnioski:

- przy nierównoległym ustawieniu wzorców dominujący wpływ na błędy fazy ma kąt γ , wpływ kąta β w badanym przedziale jego wartości można pominąć,
- zauważa się znaczny wpływ kąta ξ na wartość błędów fazy $\Delta\Phi(\gamma)$, przy jego granicznej wartości ($\xi \rightarrow 90^\circ$) są one praktycznie skompensowane.

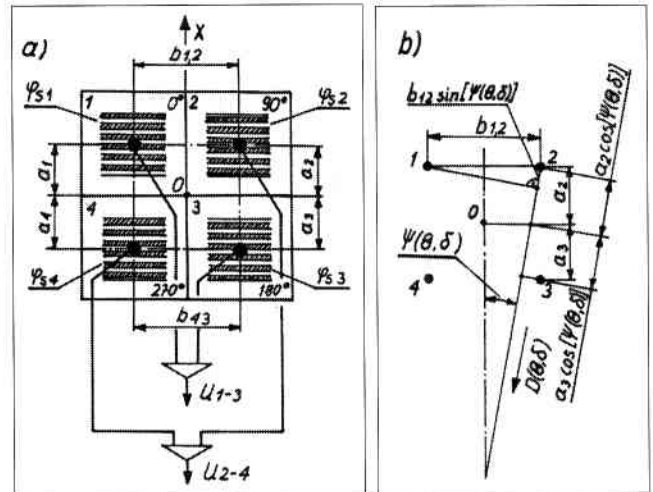
Ostatni z wniosków został wykorzystany do opracowania nowego układu detekcyjnego przetwornika, który zostanie przedstawiony w następnym punkcie.

Istotny wpływ na wartość błędu fazy ma również odległość pomiędzy fotodetektorami. Jak ilustrują wykresy $\Delta\Phi = f(\gamma, a_0)$ na rys. 5, wartość tego składnika błędu fazy w miarę wzrostu odległości a_0 , po przekroczeniu kąta $\gamma > 0,2^\circ$, silnie rośnie. Fakt ten ogranicza wymiary struktur czynnych fotodetektorów, ograniczając w ten sposób proces uśredniania błędów przypadkowych wzorców [2].

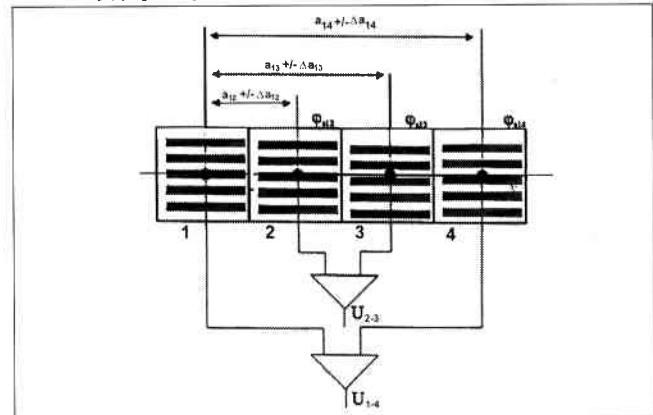
Metody kompensacji błędów fazy

Podstawowa metoda kompensacji błędu fazy wiąże się z wykorzystaniem w przetworniku przeciwzorca w postaci optycznego przesuwnika fazy (rys. 6 a,b). Przesuwnik ten został opracowany i opatentowany przez Mc. Ilraith'a w 1974 roku [4] i powszechnie jest wykorzystywany w optoelektronicznych przetwornikach do dzisiaj. W przypadku jego zastosowania wzorce nie są względem siebie skręcone i teoretycznie okres prążka mory $D \rightarrow \infty$. Wówczas sygnały optyczne obrazu mory odbierane przez fotodetektory są poprzysuwane odpowiednio w fazie zgodnie ze wzajemnymi przemieszczeniami poszczególnych segmentów siatek dyfrakcyjnych przeciwzorca o 0, 1/4, 1/2 i 3/4 d . Teoretycznie ewentualne błędy fazy mogą powstawać tylko w wyniku niedokładności ustawienia segmentów siatek. W rzeczywistości luzy prowadnic wzorca i ich błędy kształtu powodują, że wzorce zmieniają swoje położenie kątowe i pojawia się prążek mory o skończonym okresie $D(\theta, \delta)$, który przemieszcza się pod kątem $\Psi(\theta, \delta)$ (rys. 6b). Wówczas czoło prążka wcześniej dotrze do fotodetektora 2 niż do foto-

detektora 1 (rys. 6a,b). W rezultacie stosunek różnicy drogi przemieszczenia się prążka $b_{1,2}\sin\{\varphi(\theta, \delta)\}$ do jego okresu $D(\theta, \delta)$ pomnożona przez 360° jest wartością pojawiającego się dla tego przypadku błędu fazy. Dodaje się on lub odejmuje od różnicy fazy sygnałów U_1 i U_3 , która powinna wynosić 90° . Aby ten błąd skompensować, sumuje się różnicowo sygnały par fotodetektorów 1 i 3 oraz 2 i 4; ilustruje to schemat połączeń fotodetektorów. Należy zauważyć, że pełną kompensację przedstawionego składnika błędu fazy można uzyskać tylko w przypadku, gdy odległości osi optycznych par fotodetektorów 1 i 3 oraz 2 i 4 będą identyczne. W rzeczywistości osie optyczne fotodetektorów nie pokrywają się z ich osiami geometrycznymi, co powoduje niepełną kompensację omawianego błędu [2].



Rys. 6. Schemat optycznego przesuwnika fazy: a – konstrukcja optycznego przesuwnika fazy wraz z systemem połączeń fotodetektorów, b – schemat ilustrujący sposób powstawania składników błędu fazy



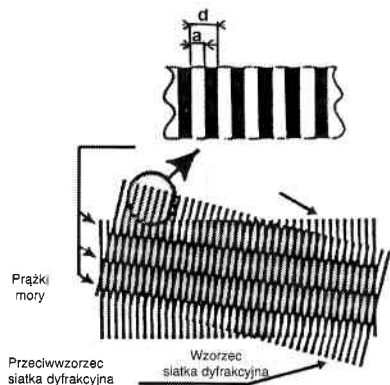
Rys. 7. Schemat liniowego optycznego przesuwnika fazy wraz z systemem połączeń fotodetektorów

W przypadku niezachowania równoległości wzorców w obszarze detekcyjnym przetwornika pojawi się drugi składnik błędu fazy związany z kątem γ , $\Delta\Phi(\gamma, a)$ – patrz poprzedni punkt. Konstrukcja omawianego tu optycznego przesuwnika fazy jest w tym względzie szczególnie niekorzystna, gdyż linia przechodząca przez osie fotodetektorów pokrywa się z kierunkiem osi x ($\xi = 0$). Jak ilustrują to wykresy na rys. 4 i 5, udział tego składnika fazy w tym przypadku może być znaczący.

W celu ominięcia tej niedogodności konstrukcyjnej autor niniejszego artykułu zaproponował nowe rozwiązania liniowego optycznego przesuwnika fazy przedstawionego na rys. 7. Układ detekcyjny z tym przesuwnikiem fazy podobnie jak wcześniejszy kompensuje błędy fazy wywołane nierównoległością linii siatek ($\theta \neq 0$), natomiast jest odczulony na błędy fazy wywołane nierównoległością ustalenia wzorców w przetworniku.

Układ detekcyjny przetwornika bez optycznego przesuwника fazy

Układy detekcyjne, w których wykorzystano optyczne przesuwники fazy, umożliwiają zastosowanie znacznie większej krotności interpolacji sygnałów, pozwalają zatem na konstruowanie optoelektronicznych przyrządów o dużej rozdzielczości i dokładności pomiarowej. Poważnym jednak ograniczeniem w tym zakresie jest technologiczna dokładność wykonania przeciwwzorca (OPF). Niedokładność wzajemnego ustalenia sektorów siatek dyfrakcyjnych na płycie przeciwwzorca odzworowuje się bezpośrednio w wartościach błędów fazy, których nie można skompensować. Np. jeśli niedokładność ta wyniesie $0,1 \mu\text{m}$, to dla siatki o $d = 16 \mu\text{m}$ powstanie błąd $\Delta\Phi = 1,7^\circ$, a dla siatki o $d = 8 \mu\text{m}$ dwa razy większy ($\Delta\Phi = 3,4^\circ$). Powyższa wartość błędu fazy ograniczy krotność procesu interpolującego przy zastosowaniu liniowego PF do poziomu 40 (dla $d = 8 \mu\text{m}$ rozdzielczość wyniesie $0,2 \mu\text{m}$).



Rys. 8. Schemat układu wzorców inkrementalnych w przetworniku – przeciwwzorzec w postaci jednolitej siatki dyfrakcyjnej.

W wyniku poszukiwań omięcia opisaną wyżej bariery technologicznej opracowany został przez autora bardzo prosty układ detekcyjny wykorzystujący zjawisko mory, z prążkami o skończonej długości okresu, z wykorzystaniem dwóch lub trzech fotodetektorów, przy czym przeciwwzorzec jest zbudowany z jednolitej siatki dyfrakcyjnej (rys. 8). Istotą rozwiązania konstrukcyjnego tego układu detekcyjnego jest fakt, że sygnały z fotodetektorów są dwukrotnie sumowane: raz różnicowo za pomocą wzmacniacza różnicowego, zaś drugi za pomocą wzmacniacza sumującego.

Na podstawie uproszczonego schematu, przedstawiającego usytuowanie fotodetektorów względem długości okresu prążka D_{nom} (rys. 9), można zapisać ich sygnały wyjściowe następująco:

$$U_1(x) = \sin x \quad U_2(x) = \sin \left[x + \frac{a}{D} 2\pi + \Delta\varphi \right]$$

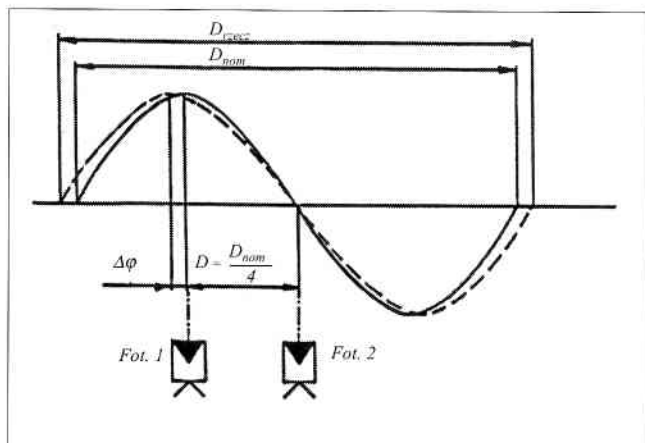
a po zsumowaniu

$$U_1(x) - U_2(x) = \cos \left[x + \frac{a}{D} \pi + \frac{\Delta\varphi}{2} \right] 2 \sin \left[-\frac{a}{D} \pi - \frac{\Delta\varphi}{2} \right]$$

$$U_1(x) + U_2(x) = \sin \left[x + \frac{a}{D} \pi + \frac{\Delta\varphi}{2} \right] 2 \cos \left[-\frac{a}{D} \pi - \frac{\Delta\varphi}{2} \right] + 2\Delta C$$

gdzie: a – odległość pomiędzy osiami fotodetektorów.

Uzyskane w ten sposób dwa nowe sygnały spełniają warunek rewersji oraz, co najważniejsze, są niewrażliwe na czynniki powodujące błędy fazy (pełna autokompensacja błędów fazy). Jedynym mankamentem proponowanego układu jest fakt, że w pierwszym sygnale skompensowana jest składowa stała, natomiast w drugim pojawia się jej podwójna wartość (w stosunku do sygnału pierwotnego). Problem ten można dwójako rozwiązać za pomocą



Rys. 9. Schemat rozmieszczenia fotodetektorów względem okresu prążka mory

wprowadzenia stałego sygnału kompensującego składową stałą, albo korzystniej poprzez wprowadzenie trzeciego fotodetektora. Fotodetektor ten umieszczony w osi optycznej układu detekcyjnego odbierałby jedynie sygnał z wzorca ruchomego. Wówczas, co jest bardzo ważne, poziom tego sygnału (stałego) jest dwukrotnie wyższy od poziomu składowych stałych pozostałych sygnałów. Można więc za jego pomocą kompensować składową stałą sygnału drugiego. Dodatkowy fotodetektor może być również wykorzystany w układzie sprzężenia zwrotnego do kompensacji zmian natężenia oświetlenia źródła światła, spowodowanego np. degradacją czasową diody elektroluminescencyjnej, spełniającej funkcję źródła światła.

Podsumowanie

Przedstawione wyżej nowe propozycje rozwiązań konstrukcyjnych układów detekcyjnych pozwalają na zwiększenie rozdzielczości i dokładności wskazań optoelektronicznych układów pomiarowych; w pierwszym przypadku wykorzystania liniowego optycznego przesuwnika fazy i dodatkowo znaczne uproszczenie konstrukcji przetwornika, w drugim przypadku obydwie omówione wyżej układy detekcyjne zostały opatentowane (numery patentów P 306 260, P 306 270).

Jak zaznaczono wyżej za pomocą układów detekcyjnych nie można kompensować niektórych błędów fazy o charakterze stałym, np. wynikających z niedokładności technologicznych wykonania wzorców, w szczególności przeciwwzorca (OPF). Otóż można kompensować te błędy w odpowiednio zaprojektowanym procesie optoelektronicznej interpolacji. Problem ten został dokładnie omówiony w pracach [5, 6].

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] A. M. Mc ILRAITH: A moiré interpolator of high resolution. *J. of Scientific Instruments* 1974, vol. 41.
- [5] P. SEKUŁA, L. WRONKOWSKI: Digital method of enlargement of resolution and accuracy of the optoelectronic measuring systems. Proceedings of the 11th European Conference on Solid-State Transducers, 1997, vol. 3.
- [6] L. WRONKOWSKI: Rozważania nad możliwością opracowania samowzorcującego optoelektronicznego układu pomiarowego. Mat. Krajowego Kongresu Metrologii. Politechnika Gdańska, Gdańsk 1998.