

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Liniały pomiarowe stosowane w przemyśle maszynowym

Kazimierz Dzierżek

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, KATEDRA AUTOMATYKI I ROBOTYKI

STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono krótką informację o rozwoju czujników pomiarowych położenia jakimi są liniały. Omówiono zasadę działania oraz budowę najczęściej stosowanych rodzajów liniałów w przemyśle maszynowym. Na podsumowanie podano podstawowe parametry eksploatacyjne liniałów oraz zalecenia ich montażu.

Applied linear encoders in the engineering industry

ABSTRACT

The paper presents brief information about the development of position sensors such as linear encoders. Discusses the principles of operation and construction of the most commonly used types linear encoders in the engineering industry. At the summary provides basic operational performance linear encoders and recommendations of their assembly.

1. WPROWADZENIE

W przemyśle maszynowym do pomiaru położenia stosowane są liniały pomiarowe. Jako datę narodzin pierwszych liniałów przyjmuje się koniec lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku, kiedy to w Wielkiej Brytanii dwa zespoły badawcze z National Physical Laboratory oraz firma Ferranti z Edinburga, złożona z inżynierów mechaników i elektroników, podjęły prace nad budową głowic pomiarowych wyposażonych we wzorcowe siatki dyfrakcyjne. Miały one posłużyć do budowy aparatury, przeznaczonej do pomiaru długości w dużych zakresach. Pierwsze wzorce wykonywane w National Physical Laboratory były siatkami fazowymi w postaci naciętych rys na plastrowych i szklanych liniałach, ale niestety ich dokładność nie była zadowalająca. W firmie Ferranti natomiast wykorzystano technikę mory (moiré). Dzięki pracy J.Guilda, A.McIlraihy i J.Burcha udało się stworzyć głowice pomiarowe mierzące z błędem mniejszym, niż błędy wykonania nacięć pojedynczych rowków siatek. Udało się to dzięki uśrednieniu błędów pomiarowych z dużej liczbie pojedynczych nacięć na wzorcu. Zjawisko mory można uzyskać na przykład poprzez nałożenie na siebie dwóch identycznych siatek dyfrakcyjnych wzajemnie skręconych o niewielki kąt. Powstaje wówczas nowa rodzina struktur periodycznych – prążki mory. Są one miejscami geometrycznymi punktów przecięć dwóch rodzin linii lub rys powstałych z nakładających się na siebie siatek. Dzięki doświadczeniom firmy Ferranti, zaczęto tworzyć nowocześniejsze odmiany siatek dyfrakcyjnych, które były wykorzystywane w budowie coraz to dokładniejszych głowic pomiarowych. Każda następna generacja głowic odznaczała się wyższą rozdzielczością i dokładnością pomiaru. Zaczęto również tworzyć nowe siatki amplitudowe (na liniałach szklanych) i siatki odbiciowe (na taśmach stalowych).

Lata siedemdziesiąte przyniosły dalszy rozwój w budowie głowic pomiarowych. Przewodnictwo w zakresie wykorzystania optoelektronicznych układów pomiarowych przejęły trzy firmy zachodniemieckie (Dr. J.Heidenhain, Leitz i Zeiss-Opton). Firma Dr. Heidenhaina, do budowy skal pomiarowych, zastosowała siatki dyfrakcyjne wykonane na liniowej skali wzorcowej w systemie Diadur (skala pomiarowa z chromu naniesiona z dużą dokładnością na szkło lub inny materiał), dzięki czemu uzyskała dokładność o rząd wyższą niż wcześniej stosowane metody.

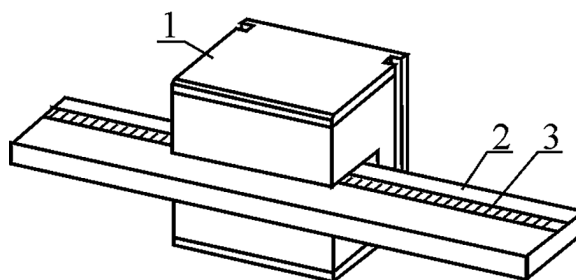
Firmy Leitz i Zeiss-Opton poszły w zupełnie innym kierunku, dzięki posiadanej już wiedzy i praktyce w produkcji precyzyjnych aparatów pomiarowych, swoje głowice pomiarowe oparły na znanych i dokładnych

długościomierzach Abbe'go. W liniałach pomiarowych zastosowano bardziej rozbudowany układ optyczny, który pozwolił, dzięki systemowi kompensacji błędów systematycznych wzorców, osiągnąć błąd wskazania $es = \pm 0,25 \mu\text{m}$ na długości 200 mm. Mimo tak znakomitych parametrów, produkty tych firm nie osiągnęły aż tak dobrych wyników sprzedaży jak firma Heidenhain. Powodem takiego stanu były wysokie koszty produkcji, co odbiło się na cenie ich produktów (były kilkunastokrotnie wyższe).

W Polsce pierwsze prace nad układami pomiarowymi podjęto w końcu lat siedemdziesiątych w Centrum Uczelniano-Przemysłowym Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Warszawskiej. Między innymi wykonano optoelektroniczny długościomierz cyfrowy OPT-30-1. Wyprodukowane tam urządzenia były badane w Polskim Komitecie Normalizacji Miar i Jakości na komparatorze firmy Lentz, wyposażonym w optyczny mikroskop pozycjonujący. W wyniku tych badań stwierdzono, że urządzenia te są wykonane poprawnie, na dobrym poziomie technicznym, a co jest ważne, naniesiona podziałka nie pogarsza dokładności pomiaru (wprowadzony błąd jest dużo mniejszy niż suma błędów od innych elementów urządzenia).

2. RODZAJE LINIAŁÓW

Najpopularniejszym urządzeniem służącym do pomiaru położenia stosowanym w obrabiarkach są liniały pomiarowe. Zbudowane są one z listwy wzorcowej (2) oraz głowicy odczytowej (1) (Rys. 1). Listwy wzorcowe mogą być wykonane ze szkła, materiałów ceramicznych, stali lub laminatu epoksydowego. Na listwie naniesiona jest podziałka (3) z elementarną działką, która może być równa $4 \mu\text{m}$ aż do 12.7 mm (0.5 cala). Głowica zbudowana jest z czujnika i przetwornika. Budowa czujnika zależy od rodzaju materiału, z jakiego wykonana jest listwa wzorcowa oraz od zastosowanej metody odczytu przemieszczenia głowicy względem listwy. Budowa



Rysunek 1. Budowa liniału pomiarowego:
1 – głowica pomiarowa, 2 – listwa wzorcowa,
3 – podziałka wzorca

przetwornika zależy od rodzaju sygnału wyjściowego z czujnika.

Liniały pomiarowe możemy podzielić, przyjmując za kryterium zasadę działania bądź rodzaj wysyłanej informacji. Ze względu na rodzaj wysyłanej informacji rozróżnia się liniały przyrostowe (inkrementalne) i absolutne (kodowe).

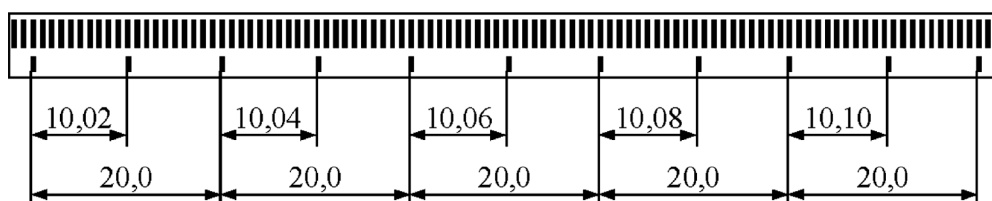
W liniałach przyrostowych określonym zmianom położenia głowicy odpowiada pewna ściśle określona liczba impulsów (zależna od rozdzielczości). Z liniałów przyrostowych nie można bezpośrednio uzyskać informacji o bezwzględnym położeniu głowicy. Na liście wzorcowej (w większości wypadków) naniesione są punkty referencyjne. Podczas przejścia głowicy przez punkt referencyjny z przetwornika wysyłany jest impuls, na podstawie którego uzyskuje się wartość położenia bezwzględnego. Sygnały wyjściowe mogą mieć kształt sinusoidalny lub prostokątny.

W liniałach absolutnych określonemu położeniu głowicy odpowiada ściśle określony kod. Z liniału wysyłana jest informacja do urządzenia odczytowego o bezwzględnym położeniu głowicy. Informacja przesyłana jest przez prądowy sygnał cyfrowy w postaci szeregowej. Zaletą tego typu liniałów jest to, iż w każdej chwili znane jest bezwzględne położenie narzędzia.

Kombinacją dwóch powyższych typów liniałów jest liniał inkrementalny z kodowymi punktami referencyjnymi (Rys. 2). Liniał ten łączy w sobie prostą budowę liniału inkrementalnego z możliwością odczytu położenia bezwzględnego w szerokim zakresie skali. Liniał inkrementalny z kodowymi punktami referencyjnymi ma rozmieszczone cyklicznie, według odpowiedniego klucza, punkty referencyjne. Przejście głowicy przez dwa sąsiednie punkty pozwala na określenie położenia bezwzględnego.

Ze względu na zasadę działania czujników zastosowanych w liniałach (sposób przetwarzania sygnału) rozróżnia się następujące typy liniałów:

- fotoelektryczne,
- indukcyjne,
- magnetyczne,
- magnetyczno-rezystancyjne,
- pojemnościowe,
- rezystancyjne.

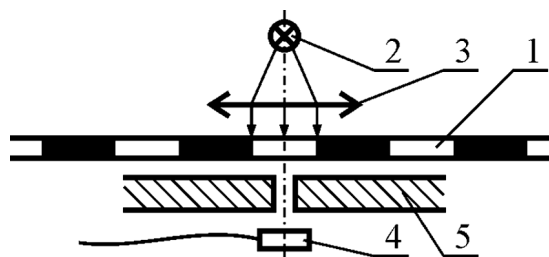


Rysunek 2. Zasada kodowania liniału z kodowymi punktami referencyjnymi

3. ZASADA DZIAŁANIA LINIAŁÓW

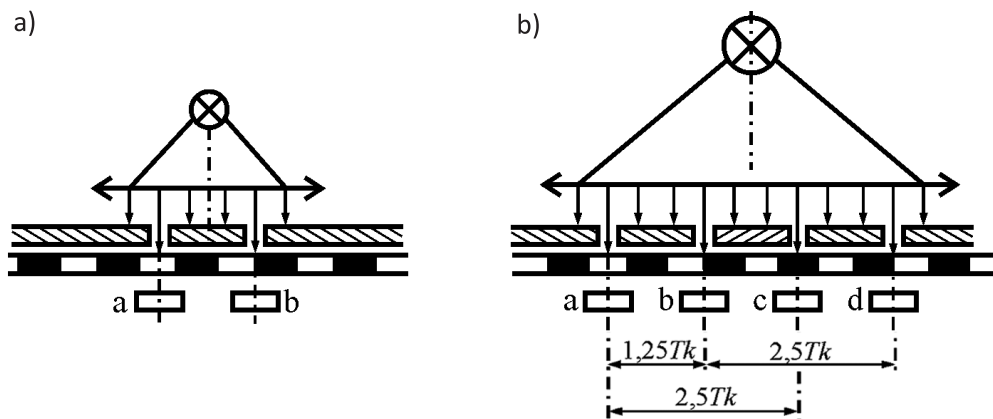
Istotnym elementem przetworników fotoelektrycznych jest podziałka. Na wzorcach szklanych wykonuje się ją poprzez naniesienie stref, które mają części przezroczyste i nieprzezroczyste. Strefy te tworzą podziałkę o okresie Tk .

Na Rysunku 3 przedstawiono schemat układu pomiarowego przetwornika fotoelektrycznego z wzorcem inkrementalnym. Układ ten składa się z następujących elementów: 1 – wzorec, 2 – oświetlacz, 3 – układ optyczny, 4 – fotoelement, 5 – przesłona [4].



Rysunek 3. Schemat układu pomiarowego wzorca inkrementalnego z jedną fotodiodą

W wyniku przesuwania się układu fotoelektrycznego względem wzorca powstaje napięciowy sygnał prostokątny, przy założeniu bardzo małych wymiarów szczeliny i przy pominięciu wpływu rozpraszania światła. Liczba impulsów (przy znajomości okresu podziałki i założeniu, że ruch odbywa się w jednym kierunku) jest miarą przemieszczenia układu. W rzeczywistych układach sygnał wyjściowy z fotodiody ma przebieg sinusoidalny. Układ z jedną fotodiodą nie daje możliwości określenia kierunku przesuwania się głowicy względem wzorca. Rozpoznawanie kierunku zapewni układ z dwiema diodami (Rys. 4a), przesuniętymi w fazie o $\frac{1}{4}$ okresu Tk podziałki wzorca – $(n+\frac{1}{4})Tk$, gdzie n jest dowolną liczbą całkowitą. Dodatkowo układ ten pozwala zwiększyć rozdzielczość czterokrotnie w stosunku do układu z jedną fotodiodą. Dokładność pomiaru zależy od dokładności wykonania wzorca (dokładność i jednoznaczność naniesienia podziałki). Aby zminimalizować wpływ niedokładności wykonania wzorca, stosuje się układ z czterema fotodiodami (Rys. 4b), przesuniętymi względem siebie o $\frac{1}{4}$ okresu Tk . I tak: fotodioda a ma



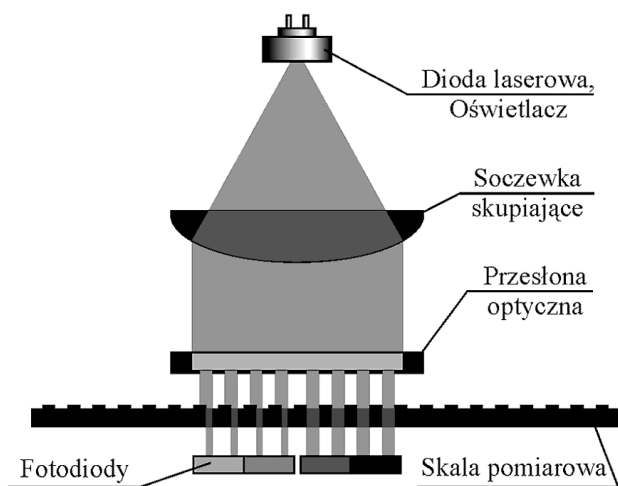
Rysunek 4. Schemat układu pomiarowego wzorca inkrementalnego: a) z dwiema fotodiodami ($n=1$), b) z czterema fotodiodami ($n=1$)

położenie 0, fotodioda *b* położenie $(n+\frac{1}{4})Tk$ względem *a*, fotodioda *c* położenie $(n+\frac{1}{2})Tk$ względem *a*, fotodioda *d* położenie $(n+\frac{3}{4})Tk$ względem *a* (gdzie *n* jest dowolną liczbą całkowitą) [4].

W układzie pomiarowym z 4 fotodiodami (Rys. 4b) sygnałami wyjściowymi są 4 sinusoidy, przesunięte w osi poziomej o $0,25Tk$. Sygnały te są przekształcane w układzie elektronicznym interpolatora, a następnie przekazywane do urządzenia odczytowego w jednej z trzech postaci. W postaci prądowego sygnału prostokątnego TTL ($20 \mu A$), w postaci prądowego sygnału sinusoidalnego ($11 \mu A$) lub w postaci napięciowego sygnału sinusoidalnego (1 V).

Oprócz wzorców szklanych do budowy przetworników fotoelektrycznych stosuje się wzorce ze stali lub materiału ceramicznego. Zasada działania takich liniatów jest podobna jak w przypadku wzorca ze szkła, przy czym w przypadku gdy podziałka wykonana jest z innych materiałów, promień świetlny odbija się od niej i pada na fotoelement [2].

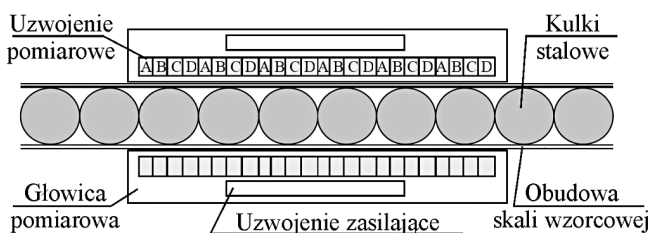
Na Rysunku 5 przedstawiono budowę przetwornika pomiarowego, stosowanego w liniatach fotoelektrycznych, ze skalą szklaną.



Rysunek 5. Budowa fotoelektrycznego przetwornika pomiarowego

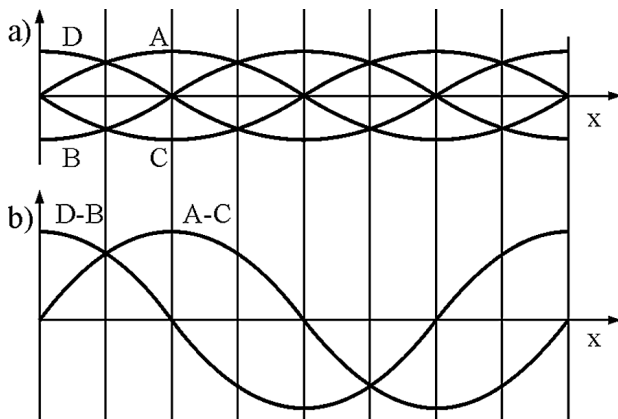
Liniał indukcyjny firmy Newall został zaprojektowany do pracy w szczególnie trudnych warunkach. Zbudowany jest z nierdzewnej rury stalowej, w której na całej długości są umieszczone kulki ze stali chromo-niklowej o bardzo wysokiej dokładności wykonania. Kalibracja liniatu odbywa się poprzez zmianę siły docisku kulek znajdujących się w obudowie. Po rurze przemieszcza się głowica, której obudowa wykonana jest z aluminium. W obudowie umieszczone są uzwojenia zasilające i pomiarowe oraz elektronika.

Na Rysunku 6 pokazano budowę głowicy oraz ułożenie w niej uzwojeń. Uzwojenie pomiarowe przetwornika stanowią cztery uzwojenia jednostkowe, każde po sześć zwojów. Zwoje jednego uzwojenia są tak ułożone, że każdy z nich jest dokładnie tak samo umieszczany nad identyczną częścią przylegającej kulki. Ponad uzwojeniami pomiarowymi znajduje się uzwojenie zasilone prądem przemiennym o często-



Rysunek 6. Schemat przetwornika indukcyjnego firmy Newall

ści 1kHz. Uzwojenie to wytwarza zmienne pole magnetyczne. Stalowe kulki powodują, że wewnątrz czujnika zmienia się okresowo przewodność magnetyczna. W uzwojeniach pomiarowych indukuje się napięcie o amplitudzie zależnej od wzajemnego położenia kulki i uzwojeń. Przebiegi zmian amplitud tych napięć w funkcji przemieszczenia liniowego zilustrowane są przebiegami A, B, C, D na Rysunku 7a. Gdy w uzwojeniu A indukuje się napięcie o wartości maksymalnej, w uzwojeniu C występuje minimalna wartość napięcia. Pary (A-C, D-B) uzwojeń wytwa-



Rysunek 7. Przebiegi amplitud: a) uzwojeń A, B, C, D; b) par uzwojeń A-C, D-B

rzają sygnały sinusoidalne, których przebiegi ilustruje Rysunek 7b.

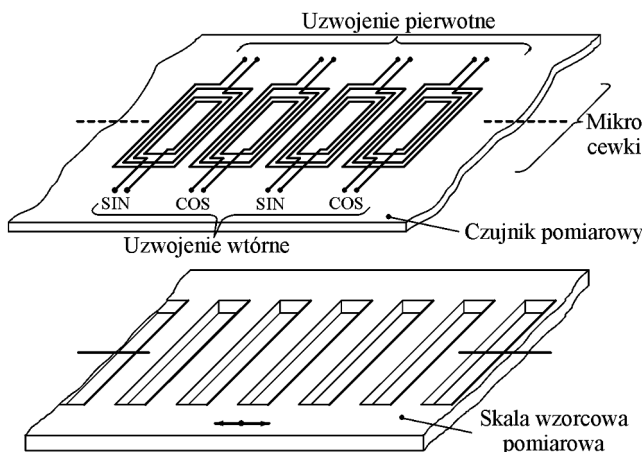
Układ elektroniczny umieszczony w głowicy powoduje przesunięcie fazowe tych sygnałów w czasie. Sygnał A-C zostaje przesunięty o $+45^\circ$, natomiast sygnał D-B o -45° . Oba sygnały są następnie do siebie dodane i filtrowane. W rezultacie otrzymuje się sygnał, którego faza zależy od położenia głowicy względem kulki. Wartość międzyszczytowa tego sygnału jest równa 5V, a jego składowa stała ma wartości 2,5V. W ten sposób mierzona jest pozycja bezwzględna ponad jedną kulką (tj. $1/2''$ ok. 12,7 mm). Pozycja bezwzględna głowicy względem kulki wyznaczana jest z zależności:

$$L = 12,7 \cdot (K/360)$$

gdzie:

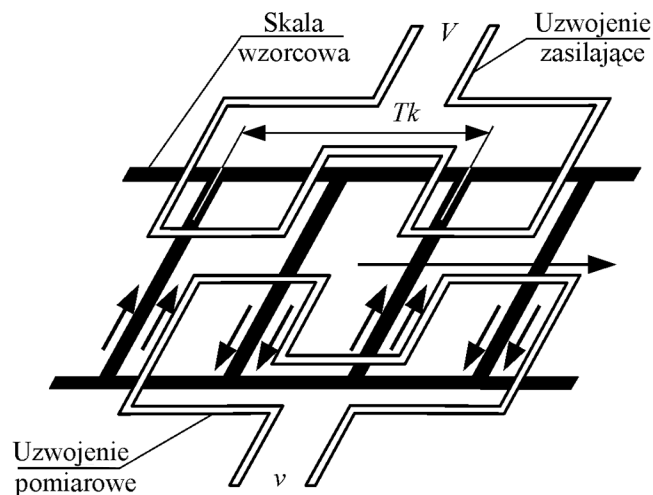
L – położenie bezwzględne głowicy względem kulki,
 K – kąt przesunięcia fazowego w stopniach.

W innym rozwiązaniu czujnika indukcyjnego, skalę stanowi taśma stalowa z wyciętymi kwadratowymi otworami, nad którymi porusza się głowica pomiarowa. Część niewycięta odpowiada środkowi kulki, natomiast część wycięta odpowiada przerwie między



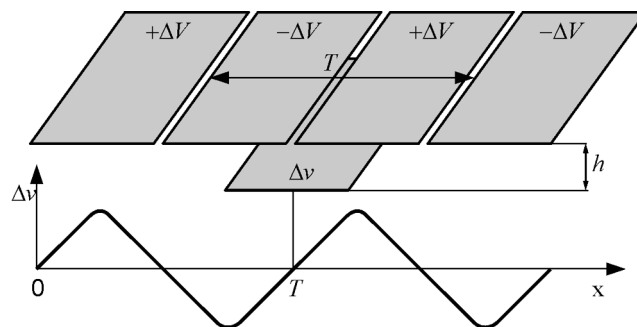
Rysunek 8. Schemat przetwornika indukcyjnego firmy AMO

kulkami. Zasada działania i przetwarzania sygnału jest identyczna jak w opisanym wyżej rozwiązaniu. Innym powszechnie stosowanym czujnikiem indukcyjną, jest czujnik firmy Sylvac. Zasada działania tego czujnika polega na pomiarze wartości napięć indukowanych w dwóch cewkach, których położenie zmienia się względem skali wzorcowej wykonanej z miedzi i naniesionej na laminat epoksydowy. Wartości amplitud napięć zależą od wzajemnego położenia uzwojeń względem siebie. Zasada przetwarzania sygnału jest identyczna z tą, jaka jest w wyżej opisanych liniach. Uzwojenie zasilające i pomiarowe wykonane jest również w postaci laminatu z naniesionymi dwustronnie ścieżkami (Rys. 9). Okres skali wzorca wynosi $T_k=1,524$ mm, okres uzwojenia zasilającego i pomiarowego wynosi natomiast 0,508 mm. Zaletą tego rozwiązania jest bardzo mały pobór prądu, maksymalnie $30 \mu A$, co pozwala to na budowę czujników zasilanych baterią.



Rysunek 9. Schemat przetwornika indukcyjnego firmy SYLVAC

Przetworniki pojemnościowe (Rys. 10) mają budowę zbliżoną do omówianych wcześniej. Różnica polega na zamianie cewek, o zmiennej wartości indukcyjności wzajemnej, na układy płytek, których przesunięcie względem skali powoduje zmianę po-

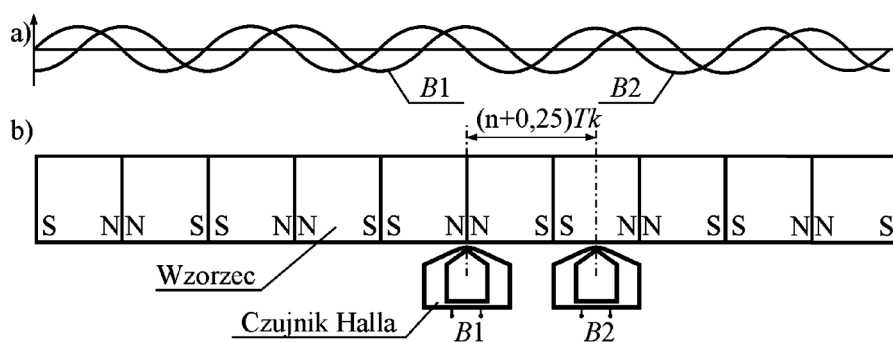


Rysunek 10. Metoda pomiaru z wykorzystaniem przetwornika pojemnościowego

jemności pomiędzy płytkami. Pojemność elektryczna czujników pomiarowych jest pojęciem związanym z magazynowaniem energii pola elektrycznego w przestrzeniach ograniczonych okładkami metalowymi o „wzajemnej” zastępczej powierzchni S oraz odległości pomiędzy okładkami h , wypełnionych materiałem dielektrycznym. Wszystkie trzy wymienione parametry czujników, których wartość zależy od sygnału mierzonego x , mogą być wielkościami wejściowymi. Parametrem wyjściowym jest pojemność lub różnica pojemności czujników [6]. Czujniki pojemnościowe stosowane obecnie są budowane głównie jako konstrukcje mikromechaniczne w krzemie lub w szkle, zintegrowane z układem elektronicznym. W przetwornikach pomiarowych z układem magnetycznym elementem ruchomym jest specjalnie namagnesowany pręt ferromagnetyczny, namagnesowana taśma stalowa lub tarcza z naniesionymi paskami magnetycznymi. Głowica odczytowa zbudowana jest z dwóch lub czterech czujników Halla przesuniętych względem siebie o $0,25 Tk$ (Rys. 11b). Wartość wyjściowa napięcia z czujników Halla zależy od położenia suwaka względem wzorca (Rys. 11a) [3].

sie z kilku uzwojeń nawiniętych na oryginalnym rdzeniu. Jedno uzwojenie zasilone jest prądem zmiennym i wzbudza pole magnetyczne o wartości zależnej od przenikalności wypadkowej rdzenia. Punkt pracy zależy od wartości pola magnetycznego magnesów umieszczonych w skali.

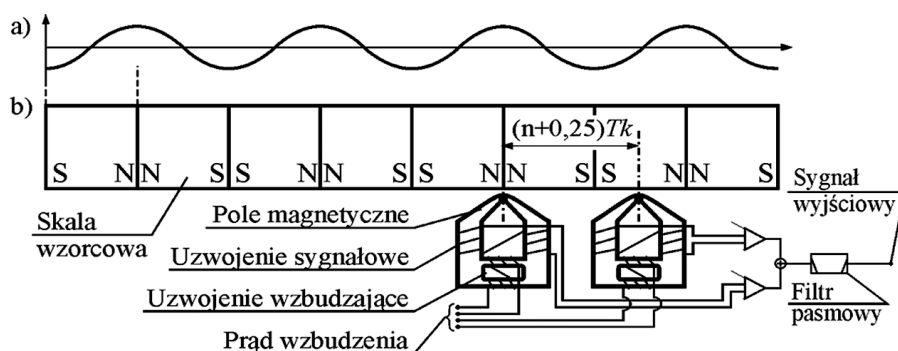
Przetworniki rezystancyjne zbudowane są z bieźni, wykonanej z materiału rezystancyjnego, po którym przesuwają się styki. Rezystancja między jednym końcem bieźni a stykiem jest proporcjonalna do przesunięcia. Jeżeli do bieźni przyłączy się napięcie, to na ruchomym styku napięcie będzie się zmieniać zgodnie z wartością przesunięcia. Napięcie to podane na przetwornik A/D (analogowo/cyfrowy) daje wartość położenia w postaci cyfrowej. Ta metoda pomiaru położenia jest najtańsza ze wszystkich prezentowanych metod, jednak zakres jej zastosowania jest ograniczony, gdyż sumaryczny błąd pomiaru mieści się w granicach 0,5% do 5%. Dodatkową wadą tej metody są zużywające się elementy (styk i bieźnia), co po pewnym czasie powoduje zwiększenie błęd pomiaru. Przetworniki rezystancyjne nie nadają się zatem do zastosowań przemysłowych [1].



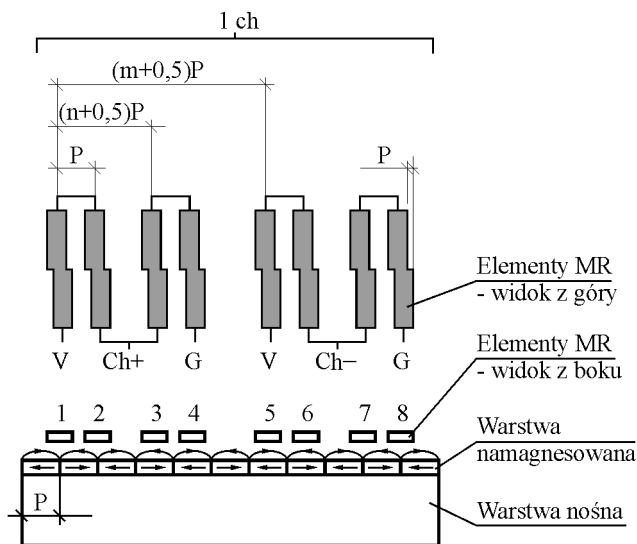
Rysunek 11. Ideowy schemat przetwornika magnetycznego: a) usytuowanie sygnału pomiarowego względem skali wzorcowej, b) skala wzorcową z głowicą pomiarową

Inne rozwiązanie czujnika magnetycznego wykorzystuje firma Sony (Rys. 12). Skala wzorcową jest rozwiązana identycznie jak w poprzednim rozwiązaniu. Różna jest natomiast budowa głowicy pomiarowej i zasada działania czujnika. Głowica pomiarowa składa

Firma Sony do budowy swoich czujników pomiarowych wykorzystuje czujniki magnetyczno-rezystancyjne (Rys. 13). Są to elementy półprzewodnikowe, w których wartość rezystancji zależy od wartości indukcji magnetycznej. W zależności od rozwiązania



Rysunek 12. Schemat przetwornika magnetycznego firmy Sony: a) usytuowanie sygnału pomiarowego względem skali wzorcowej, b) skala wzorcową z głowicą pomiarową



Rysunek 13. Schemat czujnika magnetyczno-rezystancyjnego MR

stosowane są układy scalone, w których wykorzystuje się dwa czujniki MR. W jednym następuje wzrost rezystancji wraz ze wzrostem indukcji, w drugim rezystancja maleje. Są też stosowane rozwiązania mostkowe, przy ustawieniu elementów półprzewodnikowych o różnych kierunkach wrażliwości na wartość indukcji pola magnetycznego.

4. ZASADY MONTAŻU LINIAŁÓW I ICH PARAMETRY EKSPLOATACYJNE

Większość firm produkuje liniały według typoszelegu: 70, 120, 170, ... 470, 520, 620, ..., 1020, 1140, 1240 i dłuższe co 200 mm. Rozdzielczość liniałów stosowanych w przemyśle maszynowym zawiera się w granicach od 10 μm do 1 μm . Dokładność liniałów zawiera się w granicach od $\pm 50 \mu\text{m/m}$ do $\pm 3 \mu\text{m/m}$. Największe zastosowanie znalazły liniały w przemyśle maszynowym. Instalowane są one na obrabiarkach (frezarkach, tokarkach, szlifierkach, elektrodrążarkach,

wiertarkach współrzędnościowych, ...), zarówno eksploatowanych jak i nowo produkowanych. Poprzez zainstalowanie liniałów pomiarowych uzyskuje się następujące korzyści:

- eliminuje się wpływ zużycia mechanicznych układów napędowych na dokładność pozycjonowania obrabiarki,
- zwiększa się dokładność pracy obrabiarki oraz jej możliwości obróbkowe,
- rozszerza się możliwości obrabiarek o dodatkowe funkcje (np. wizualizacja pomiaru),
- zmniejsza się błędy operatorów obrabiarek i podnosi się pewność ich pracy,
- skraca się czas przygotowawczy i czas obróbki,
- eliminuje się trasowanie wymiarów na obrabianych częściach i wykonywanie przeliczeń wymiarów,
- staje się możliwa kontrola dokładności wykonania obróbki bezpośrednio na obrabiarence.

Wszystkie te zalety wyrażają się w konkretnych efektach finansowych, możliwych dzięki skróceniu czasu obróbki przy jednoczesnym zmniejszeniu liczby braków. Zainstalowanie liniałów pomiarowych na konwencjonalnych obrabiarkach podnosi efektywność obrabiarek o 20–35%.

Jak już wspomniałem wcześniej o dokładności pomiaru położenia decyduje także właściwy montaż liniału. Liniały należy montować w miejscach, w których są one najmniej narażone na uszkodzenia mechaniczne. Zaleca się montować je w taki sposób, aby głowica była nieruchoma, a liniał przemieszczał się wraz ze stołem obrabiarki. Zazwyczaj liniał montuje się do stołu obrabiarki, a głowicę do jej korpusu. Wyjątek stanowi montaż jednego liniału na tokarce – wzdłuż łoża. W tym wypadku liniał jest nieruchomy, porusza się zaś głowica. Większość liniałów wyposażona jest w przegub wewnętrzny. Ułatwia to znacznie montaż, gdyż suwak liniału przykręcany jest bezpośrednio do korpusu.

LITERATURA

1. Janiczek R.: Elektryczne miernictwo przemysłowe, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2006.
2. Katalog generalny. Heidenhain, Październik, 2008.
3. Precision Measuring Equipment. Katalog firmy Sony. 2005.
4. United States Patents nr. US4297033, Incremental photoelectric measuring device.
5. United States Patents nr. US4385836, Photoelectric digital position measuring device.
6. United States Patents nr. US4879508, US5023559 Capacitance – type measuring drive for absolute measurement of positions.
7. United States Patents nr. US5747995 Magnetic position measuring device using Hall elements as sensor.
8. United States Patents nr. US5973494, Electronic caliper using a selfcontained.