Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
POLITECHNIKA OPOLSKA

Wprowadzenie do mechatroniki

Sensoryka - czujniki

dr inż. Roland PAWLICZEK

Czujniki

Elementy przetwarzające nieelektryczny sygnał wejściowy w elektryczny sygnał wyjściowy.

- ***ANALOGOWE** – Podające wartość absolutną: droga, kąt obrotu, prędkość.*
- ***CYFROWE** – zliczają impulsy, które mogą być przeliczone na drogę, kąt obrotu, prędkość.*

Zastosowania czujników w układach pomiarowych:

- *monitorowanie procesów,*
- *sterowanie procesami,*
- *analizie eksperymentalnej.*

Budowa układu pomiarowego

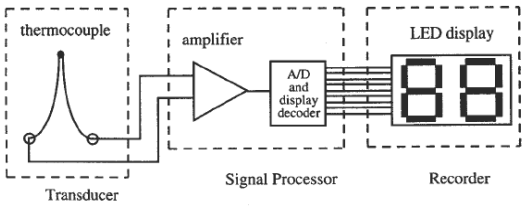
PRZETWORNIK (Transducer) → **PROCESOR (Signal Processor)** → **REJESTRATOR (Recorder)**

Przetwornik: czujnik, którego głównym zadaniem jest zamiana mierzonej wielkości fizycznej na sygnał elektryczny

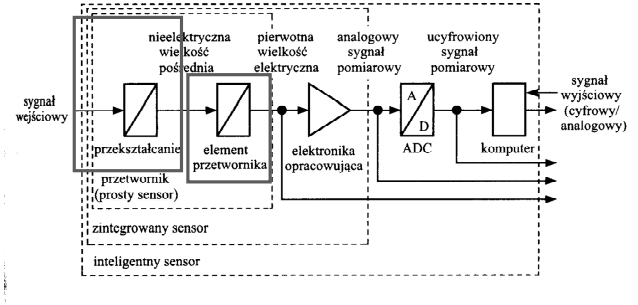
Procesor: układ cyfrowy filtrujący zakłócenia i wzmacniający sygnał

Rejestrator: zapisuje i wyświetla informacje z procesora

TERMOMETR CYFROWY



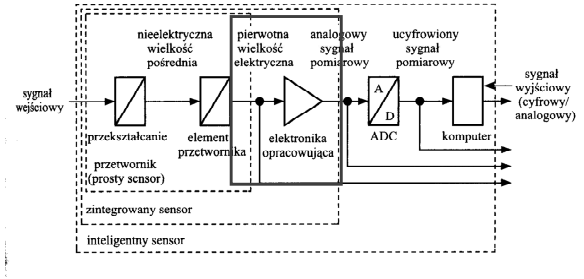
Stopień rozbudowy czujnika



1. Pomiar bezpośredni wielkości mierzonej lub pomiar wielości nieelektrycznej pośredniej pomiar siły → pomiar odkształcenia.

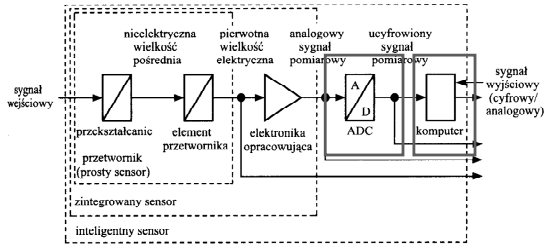
2. Przekształcenie wielkości nieelektrycznej w pierwotną wielkość elektryczną za pomocą elementu przetwornikowego. Tutaj wykorzystuje się różnego rodzaju zjawiska fizyczne
mikroczujnik siły → zjawisko piezoelektryczne.

Stopień rozbudowy czujnika



3. *Obróbka sygnału pierwotnego za pomocą układów* ***elektroniki opracowującej****, której celem jest:*
   wzmocnienie sygnału*, kompensacja wahań punktu zerowego, filtrowanie zakłóceń, linearyzacja sygnału pomiarowego, normowanie sygnału np.. ± 10 [V].*
   Jeżeli elektronika opracowująca jest połączona z czujnikiem to mówimy o SENSORZE ZINTEGROWANYM

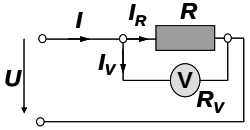
Stopień rozbudowy czujnika



4. *Przetworzenie sygnału analogowego (ciągłego) na dyskretny (cyfrowy) konieczny do dalszej analizy numerycznej*
   ADC – analog-digital converter.
5. *Zastosowanie cyfrowej jednostki opracowującej (komputer), której zadaniem może być kontrolowanie stanów granicznych, komunikacja z nadrzędnym komputerem, obróbka sygnału (różniczkowanie numeryczne), możliwość konfigurowania czujnika z zewnątrz.*
   Połączenie w sensorze elementów komputera tworzy ***sprytne czujniki (smart sensor)*** *: inteligentne czujniki.*

Czujniki – wymagania podstawowe

- *jednoznaczne i odtwarzalne odwzorowanie wielkości wejściowej w wyjściową*
- *wielkość wyjściowa musi zależeć tylko od wielkości wejściowej, np. tensometr nie powinien pracować w zakresie dużych różnic temperatur → wymagane są układy kompensacyjne*
- *pomijalnie małe oddziaływania zwrotne*



$$I_R = \frac{U}{R} \qquad I_V = \frac{U}{R_V}$$

- *możliwość linearyzacji zależności wielkości wyjściowej od wejściowej*
- *nieczułość na zakłócenia elektromagnetyczne (indukowanie się prądu i zakłócanie pomiarów)*
- *normalizacja sygnałów:*
  analogowych: 0...5 [V]; ±5 [V]; 0 – 20 [mA]; 4 – 20 [mA]
  cyfrowych: standard Centronics, RS232 itp..
- *zasilanie napięciem bezpiecznym U = 24 [V]*

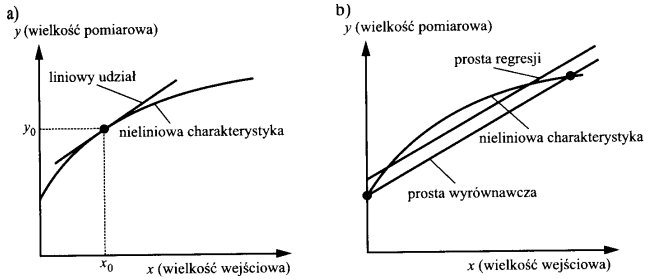
Czujniki – wymagania podstawowe

- *możliwość linearyzacji zależności wielkości wyjściowej od wejściowej*
- *nieczułość na zakłócenia elektromagnetyczne (indukowanie się prądu i zakłócanie pomiarów)*
- *normalizacja sygnałów*
  analogowych: 0...5 [V]; ±5 [V]; 0 – 20 [mA]; 4 – 20 [mA]
  cyfrowych: standard Centronics, RS232, USB, ETHERNET itp..
- *zasilanie napięciem bezpiecznym U = 24 [V]*

Czujniki – linearyzacja charakterystyki

Statyczne zachowanie się systemów pomiarowych *(zależność pomiędzy wielkością mierzoną i wielkością wyjściową – charakterystyki liniowe i nieliniowe)***.**

Linearyzacja charakterystyki nieliniowej



a) w punkcie

b) w zakresie (dla systemów z pomijalną nieliniowością)

Czujniki – wymagania podstawowe

- ***Zakres pomiarowy:*** *zakres wartości wejściowych, które mogą być odwzorowane zakresem wartości wyjściowych.*

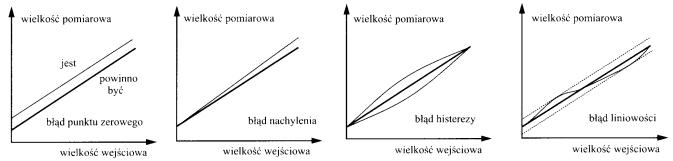
ZAKRES POMIAROWY
ZAKRES REJESTRACJI

zakres pomiarowy > zakresu rejestracji*, aby można było wykryć przekroczenia zakresu pomiarowego i chronić sensor przed przeciążeniami.*

- ***Rozdzielczość:*** *określa jak blisko obok siebie mogą leżeć wielkości pomiarowe (wejściowe), aby mogły być przedstawione przez dwie różne wartości wielkości wyjściowej (np. działka elementarna czujnika musi być większa niż szumy, luzy w układach mechanicznych).*
- ***Dokładność pomiaru:*** *ujmuje w sobie wszystkie możliwe (statystyczne) błędy, które pochodzą od sensora i fałszują sygnał wyjściowy. Dokładność pomiaru sensora powinna być o jeden rząd większa niż dokładność nastawiania aktora.*

Czujniki – błędy statyczne

Błędy statyczne systemów pomiarowych *- odchylenia pomiarów od charakterystyki.*



Błędy takie powstają na skutek zmian parametrów czujników pod wpływem temperatury, zewnętrznych pól magnetycznych, starzenia się materiału czujnika i jego zużycie (gdy występują elementy trące się o siebie).

Niektóre z nich można kompensować.

Zasady pomiaru wielkości wejściowych

Wielkości kinematyczne:

- *droga s, kąt obrotu φ*
- *prędkość v, prędkość kątowa ω*
- *przyspieszenie a, przyspieszenie kątowe ε*

Wielkości dynamiczne (obciążenie):

- *siła F*
- *moment obrotowy M*
- *ciśnienie (wielkość pochodna od siły p = F/A)*

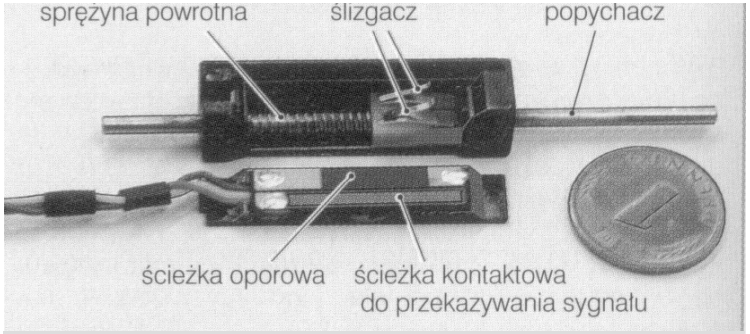
Zasady pomiaru wielkości wejściowych

Zjawiska fizyczne wykorzystywane do pomiaru wielkości kinematycznych i dynamicznych

Zasada działania	*s, φ*	*v, ω*	*a, ε*	***F, M, p***
potencjometryczna (R)	*x*	-	-	*x*
indukcyjna (L)	*x*	-	-	*x*
pojemnościowa (C)	*x*	-	-	*x*
naddźwiękowa (t)	*x*	-	-	
magnetyczna (B)	*x*	*x*	-	*x*
magnetostrykcyjna (B, t)	*x*	-	-	-
optyczna (I)	*x*	*x*	-	-
piezoelektryczna (Q)	-	*x*	*x*	-
piezorezystywna (R)	*x*	-	*x*	*x*

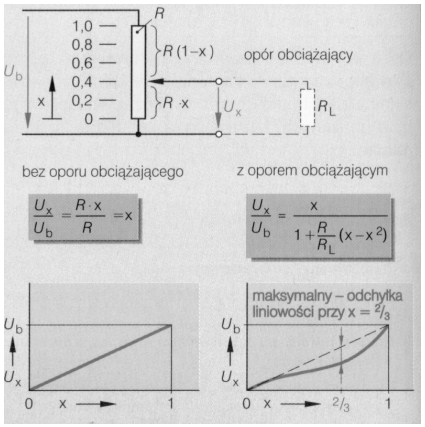
Pomiar drogi i kąta – metody potencjometryczne

W metodach potencjometrycznych wielkość wejściowa jest odwzorowana w zmianę oporności bezpośrednio lub za pomocą przekładni z powierzchnią ślizgową potencjometru.

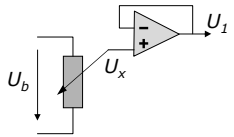


Potencjometr liniowy

Pomiar drogi i kąta – metody potencjometryczne



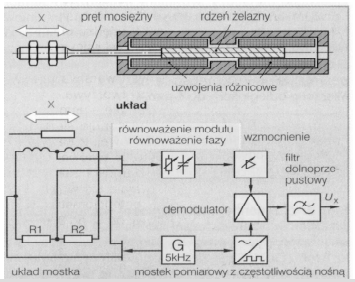
R_L – opór obciążający (wewnętrzny układu pomiarowego) – powinien być jak największy ($R_L \rightarrow \infty$)



W układzie wzmacniacza napięcie wyjściowe U_1 podąża za napięciem wejściowym U_x ($U_1 = U_x$), teoretycznie oporność wejściowa jest nieskończona, a wyjściowa zerowa.

Pomiar drogi i kąta – metody magnetyczne

*W metodach indukcyjnych wykorzystuje się zmiany indukcji magnetycznej **L** w cewce na skutek ruchu ciała ferromagnetycznego w jej polu magnetycznym.*



Sensor indukcyjny z rdzeniem ferrytowym

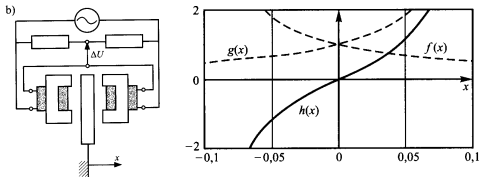
Zmiana położenia wywołuje zmianę indukcyjności a w rezultacie impedancji w uzwojeniach. pomiar zmiany impedancji odbywa się za pomocą pomiarowego mostka prądu przemiennego.

Pomiar drogi i kąta – metody potencjometryczne

Układy różnicowe - z*astosowanie układu różnicowego pozwala zlinearyzować sygnał wyjściowy w pewnym zakresie wokół punktu „0”*

$$f(x) = L_0 \frac{1}{1+\mu_r \frac{x}{x_m}}$$

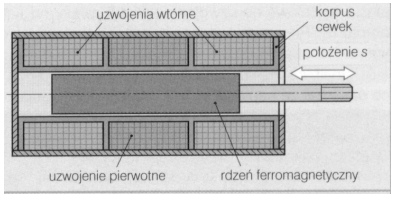
$$g(x) = L_0 \frac{1}{1-\mu_r \frac{x}{x_m}}$$

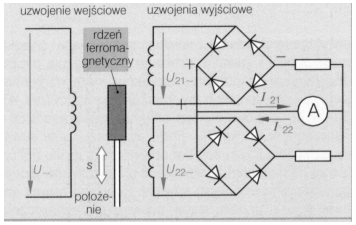


$$L(x) = g(x) - f(x) = L_0 \mu_r \frac{2\frac{x}{x_m}}{1+\left(\mu_r \frac{x}{x_m}\right)^2}$$

Pomiar drogi i kąta – metody potencjometryczne

*Czujnik transformatorowy o zmiennej indukcyjności wzajemnej cewek (**LVDT**) – różnicowy. Na skutek przemieszczenia rdzenia następuje zmiana sprzężenia magnetycznego pomiędzy uzwojeniem pierwotnym i wtórnym.*

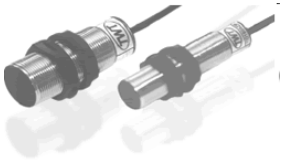


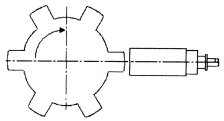


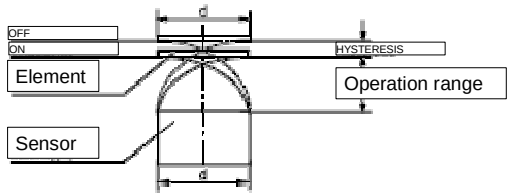
zakres pomiarowy : 0,1 ... 100 mm
liniowość : 0,15 ... 0,5 %

Displacement measurement

Proximity sensors – magnetic fields of sensor induces eddu current in metal component, which is coming up to sensor.

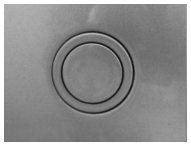






Displacement measurement

Parking sensors are proximity sensors for road vehicles which can alert the driver to unseen obstacles during parking manoeuvres.



Intelligent Parking Assist System (IPAS), also known as the Advanced Parking Guidance System (APGS)

Pomiar drogi i kąta – inne metody

Metody ultradźwiękowe *– pomiar drogi poprzez pomiar czasu pomiędzy ultradźwiękowym impulsem nadanych i odebranym echem. Czujniki takie są wrażliwe na zmianę parametrów ośrodka (zmiana prędkości fali dźwiękowej zależy od temperatury, gęstości itp.) oraz od właściwości odbicia i pochłaniania fali dźwiękowej przez obiekt.*

Sensory pojemnościowe *- jako efekt pomiarowy wykorzystuje się zmianą pojemności kondensatora płytowego:*

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{d}$$

ε_r *– przenikalność elektryczna względna,*
ε_0 *– stała elektryczna,*
A *– powierzchnia skuteczna płyty kondensatora,*
d *– odległość płyty*

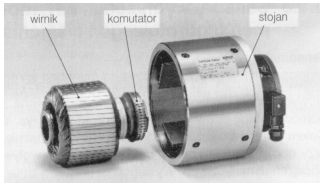
Parametry czujnika pojemnościowego:
zakres pomiarowy 0,1 ... 10 mm
rozdzielczość 0,1 ... 10 nm
liniowość 0,01 %

Pomiar prędkości

Różniczkowanie sygnału drogi lub kąta obrotu *– jeżeli przy pomiarze drogi zarejestrowane zostaną jej zmiany czasowe można wykonać różniczkowanie (metoda numeryczna zastosowana np.. w elementach elektroniki opracowującej)*

Oparte na prawie indukcji *- jako efekt pomiarowy wykorzystuje się zależność fizyczną między elektryczną wielkością wyjściową i pochodną wielkości wejściowej po czasie (np. prawo indukcji)*

$$U_{ind} = \frac{d\Phi}{dt} = nBlv$$



dla prądnicy tachometrycznej:
(prądnica prądu stałego)

Metody optyczne *– za pomocą kamer cyfrowych*

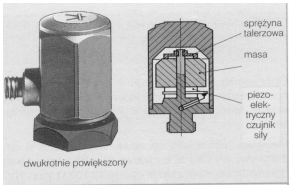
Pomiar przyspieszenia

Metody pośrednie *– poprzez pomiar drogi „masy sejsmicznej":*
Jeżeli pewną masę ***m*** *zawieszoną sprężyście na elemencie o stałej sprężystości* ***c****, to pomiędzy przemieszczeniem* ***w*** *masy, a przyspieszeniem* ***a*** *zachodzi zależność:*

$$w = \frac{m}{c} a$$

Poprzez odpowiednie dostrojenie drgającego układu pomiarowego do ruchu obiektu poprzez pomiar drogi ***w*** *możliwe jest wyznaczenie przyspieszenia* ***a****.*

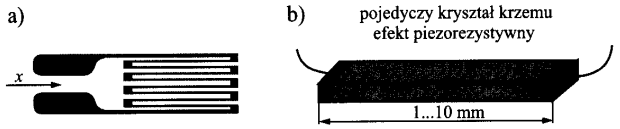
Czujniki piezoelektryczne *– „masą sejsmiczną" może być sam kryształ piezoelektryka. Pomiarowi podlega siła bezwładności drgającej „masy sejsmicznej".*



Pomiar siły i momentu

Metody tensometryczne *– pomiar siły poprzez pomiar odkształcenia. Odkształcenie mierzone jest poprzez zmianę oporu elektrycznego materiału czujnika pod wpływem wydłużania się.*

Metody piezoelektryczne *– zaletą jest duża wartość modułu sprężystości, co pozwala uniknąć błędu dodatkowych odkształceń plastycznych czujnika → czujnik pracuje w zakresie liniowym*

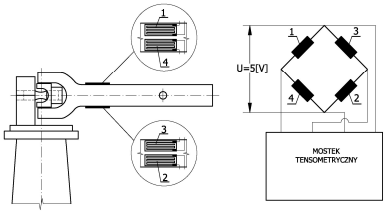


W układach pomiarowych wykorzystywane jest prawo Hooke`a, które na podstawie pomiaru odkształcenia pozwala wyznaczyć działające siły i momenty.

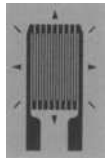
$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \frac{1}{k}\frac{\Delta R}{R} \qquad \text{ale}: \ \sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon \quad \Rightarrow \quad F = EA\varepsilon$$

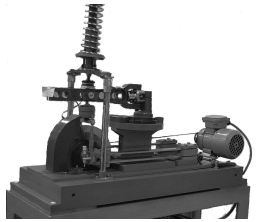
Force measurement

a)



b)





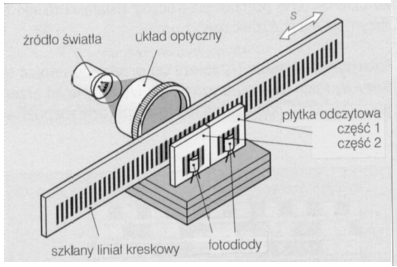
Czujniki cyfrowe - enkodery

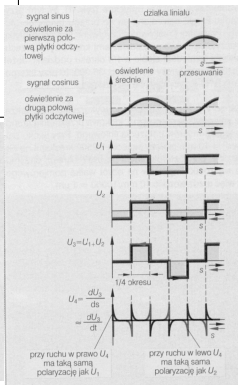
Przetwarzają sygnał analogowy na cyfrowy w postaci impulsów.

Enkoder optyczny liniowy

Każdy okres można podzielić np. na 1024 części - rozdzielczość rzędu nanometrów

Kontrola pochodnej U_4 sygnału kontrolnego U_3 daje sygnał o czterokrotnie większej częstotliwości, co zwiększa 4 – krotnie rozdzielczość.

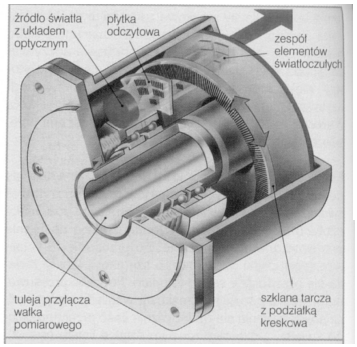


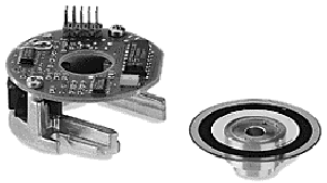


Czujniki cyfrowe - enkodery

Enkoder optyczny kątowy

- *Kreski pomiarowe naniesione na tarczy.*
- *Rozdzielczość – 0,00001º.*
- *W połączeniu z przekładnią śrubową może służyć do pomiaru przemieszczenia z rozdzielczością 1μm.*



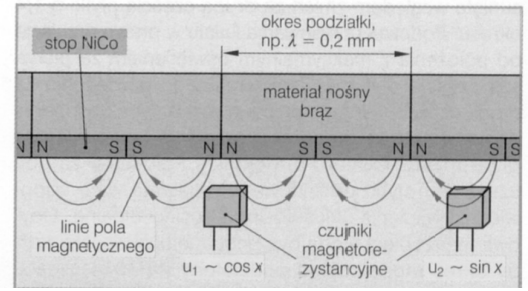


Czujniki cyfrowe - enkodery

Enkoder magnetyczny liniowy

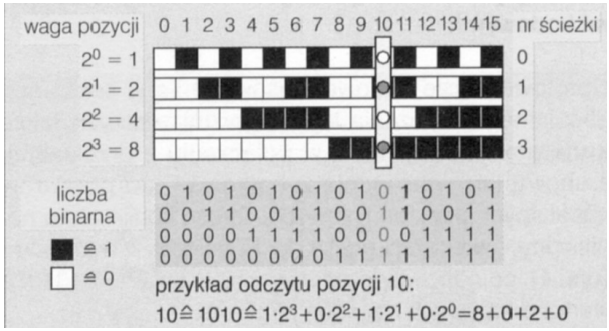
*Na materiale nośnym umieszczone są pola magnetyczne (podobnie jak na taśmie magnetofonowej). Impulsy pola są wykrywane za pomocą **czujników Halla**.*

Działanie enkodera magnetycznego odbywa się na tej samej zasadzie co enkodera optycznego.



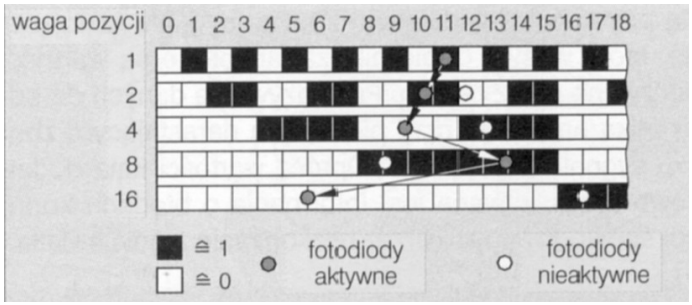
Czujniki cyfrowe – liniały i tarcze kodowe

Naniesienie na nośnik odpowiednio zakodowanych impulsów (w postaci binarnej) pozwala metodami cyfrowymi sterować przemieszczeniem z odpowiednio dużą rozdzielczością.



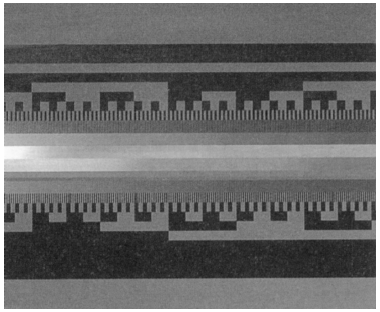
Czujniki cyfrowe – liniały i tarcze kodowe

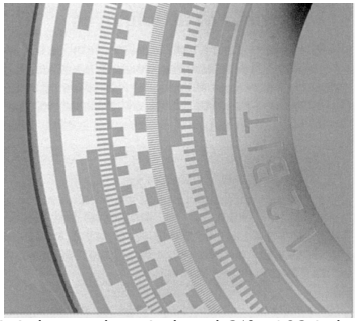
Eliminacja błędów odczytu: diody odczytujące w układzie V.
Błędy wynikają z niedokładności wykonania kresek kodowych liniału i różnych czułości fotoelementów.



Czujniki cyfrowe – liniały i tarcze kodowe

Liniał kodowy 17 bitowy (17 ścieżek kodowych)

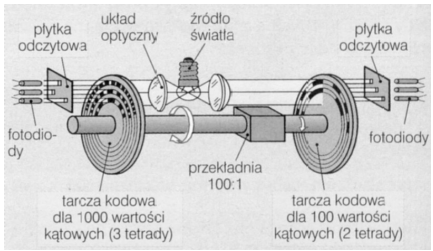




Tarcza kodowa: *zawiera 10 do 17 ścieżek co odpowiada od $2^{10}=1024$ do $2^{17}=131072$ wartości kątowych na jeden obrót.*

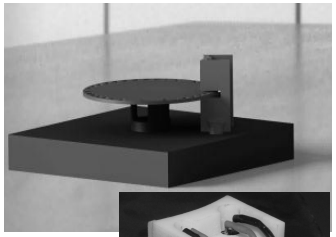
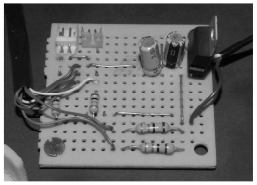
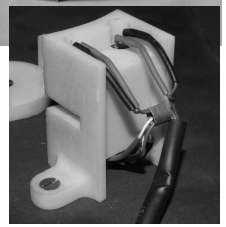
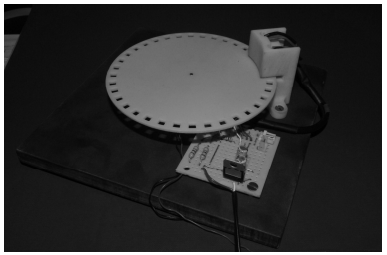
Czujniki cyfrowe – liniały i tarcze kodowe

Koder wielotarczowy:



Pierwsza tarcza zawiera 1000 pozycji kodowych na 1 obrót i jest sprzężona za pomocą przekładni redukcyjnej 1:100 z drugą tarczą, która zawiera 100 pozycji kodowych na 1 obrót. Tak więc na 1 obrót drugiej tarczy może wyróżnić 100x1000 pozycji kodowych pierwszej tarczy. Daje to 100 000 pozycji kodowych.
Jeżeli sensor będzie napędzany przez śrubę o skoku 10 mm, to nakrętka przesunie się o 100x10 mm = 1000 mm = 1 m i przebiegnie w tym czasie 100 000 pozycji:

Rozdzielczość = 1m/100 000 = 0,01 mm

Czujniki cyfrowe – liniały i tarcze kodowe

Enkoder obrotowy: