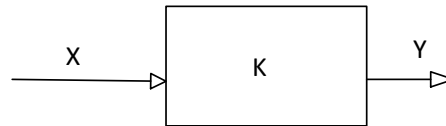


Podstawowe czujniki wielkości fizycznych

Uwagi ogólne

Czujnik (sensory) jest przetwornikiem przetwarzającym jedną wielkość (najczęściej nieelektryczną) na inną wielkość (najczęściej elektryczną)



Czujnik opisany jest więc zależnością $Y = K X$, przy czym K jest stałą czujnika. Stała ta powinna być jak największa (czułość czujnika) oraz niezmienna i niezależna od innych czynników (dokładność).

Ważnym parametrem czujnika jest liniowość. Nieliniowość opisujemy najczęściej w postaci wielomianu:

$$Y = K \cdot X + K_2 X^2 + K_3 X^3 + \dots$$

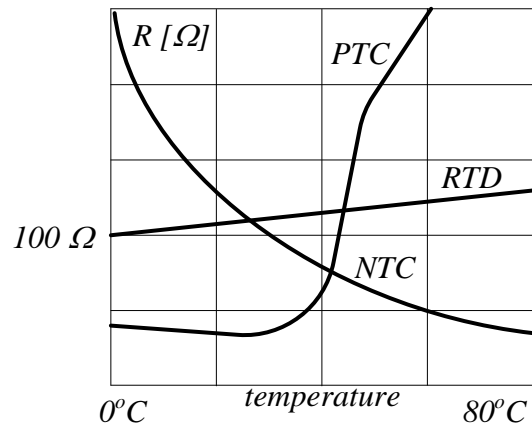
Gdzie część KX jest częścią liniową, pozostałe składniki są błędem nieliniowości.

Odróżniamy czujniki pasywne, gdzie wielkością wyjściową jest zmiana parametru (np. rezystancji) i aktywne gdzie wielkością wyjściową jest napięcie.

Odróżniamy czujniki proste przetwarzające bezpośrednio jedną wielkość w drugą oraz tzw czujniki inteligentne „smart sensors” wyposażone także w odpowiednie układy elektroniczne.

Czujniki temperatury - termorezystory

•Rys. 1. Wyróżniamy dwie grupy termorezystorów – półprzewodnikowe (NTC lub PTC) oraz metalowe RTD. Czujniki półprzewodnikowe charakteryzują się dużą zmianą rezystancji, ale są nieliniowe i mało dokładne.



•Ponieważ prawie wszystkie zjawiska zależą od temperatury można sobie wyobrazić wiele różnych czujników tej wielkości. Szczególną rolę odgrywają jednak dwa czujniki – termorezystor i termoogniwo – głównie ze względu na ich dokładność. Te dwa czujniki mogą być tak dokładne że zostały opisane normami jako czujniki wzorcowe temperatury (wzorce temperatury).

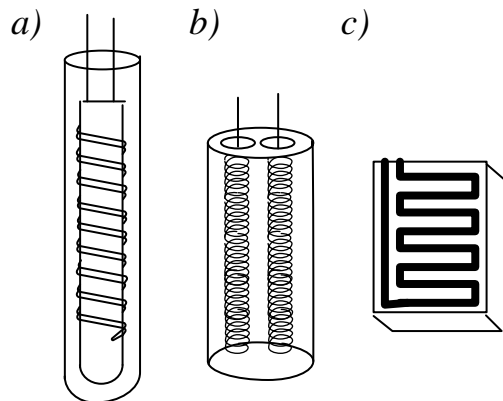
W termorezystorach RTD (resistance temperature detector) wykorzystujemy zmianę rezystancji z temperaturą

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

gdzie R_0 jest rezystancją początkową, a α jest współczynnikiem temperaturowym (dla miedzi α jest równe $45\%/10^{\circ}\text{C}$, a np. dla niklu 6%).

Termorezystor platynowy PT100

Rys. 2. Czujnik platynowy wykonywany jest najczęściej w postaci cienkiej (kilka mm) pałeczki ceramicznej na której nawinięty jest bifilarnie drut platynowy (a) lub w postaci wytrawionej folii platynowej (c). Ponieważ przy dokładnych pomiarach może powstawać błąd spowodowany rozszerzalnością cieplną ceramiki do takich celów stosuje się czujniki z luźno wiszącym drutem (b)



Najczęściej stosowanym czujnikiem metalowym RTD jest czujnik wykonany z platyny PT100 ($R_0 = 100\Omega$ w temperaturze 0°C).

Platyna ma następujące zalety:

- duży zakres mierzonych temperatur $-270 - 850^\circ\text{C}$
- dość duża czułość $\alpha = 3.926 \text{ \%}/^\circ\text{C}$
- odporność na zanieczyszczenia chemiczne
- dobra plastyczność i kowalność
- Ale przede wszystkim bardzo duża dokładność (stałość współczynnika α) – czysta platyna ma błąd nie większy niż 0.05°C na rok.
- Dlatego czujnik platynowy uznany jest za wzorzec temperatury w zakresie do 800°C

- Warto zwrócić uwagę że miedź ma bardzo podobny współczynnik temperaturowy. Można więc bardzo łatwo samemu zrobić podobny czujnik. Niestety miedź łatwo się utlenia i zakres temperaturowy takie czujnika nie przekracza 150°C .

Nieliniowość czujnika platynowego

Przy bardzo dokładnych pomiarach okazuje się że czujnik platynowy nie jest dokładnie liniowy i jego zmiana rezystancji z temperaturą jest opisana wzorem

$$R(T) = R_0 [1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3]$$

dla temperatur T poniżej 0°C lub

$$R(T) = R_0 [1 + AT + BT^2]$$

dla temperatur powyżej 0°C.

Na szczęście współczynniki A,B,C znamy z wielką dokładnością :

$$A = 3.9083 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5.775 \cdot 10^{-7}$$

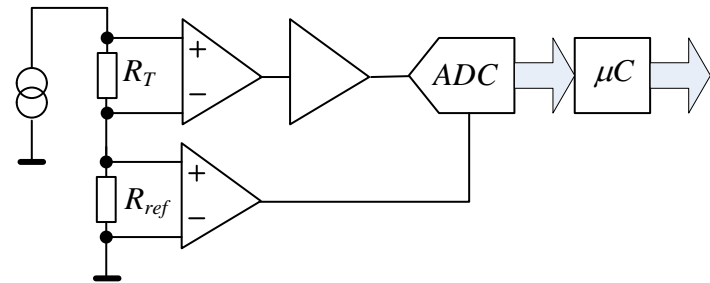
$$C = -4.183 \cdot 10^{-12}$$

Można więc te współczynniki uwzględnić przekształcając powyższy wzór do postaci:

$$T(R_r) = \frac{Z_1 + \sqrt{Z_2 + Z_3 \cdot R_r}}{Z_4}$$

gdzie $Z_1 = -A$, $Z_2 = -A^2 - 4B$, $Z_3 = 4B/R_0$, $Z_4 = 2B$.

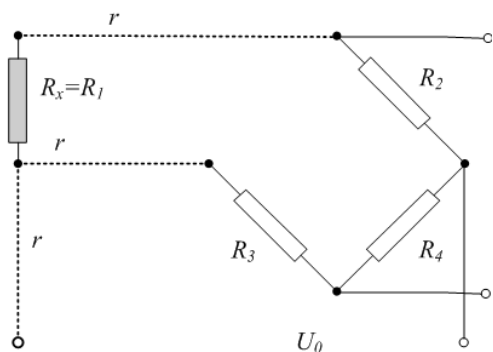
Można więc zastosować mikroprocesor który przeliczy to równanie. Przykład takiego układu przedstawia rys.3.



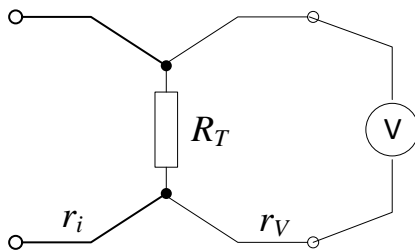
Rys.3. W układzie tym obliczany jest stosunek spadku napięcia na czujniku IR_T i spadku napięcia na oporniku wzorcowym IR_{ref} dzięki czemu uniezależniamy się od zmian prądu I.

Układy pomiarowe z termorezystorem

•o współpracy z termorezystorem można wykorzystać wszystkie klasyczne układy do pomiaru rezystancji, a więc układ mostkowy:



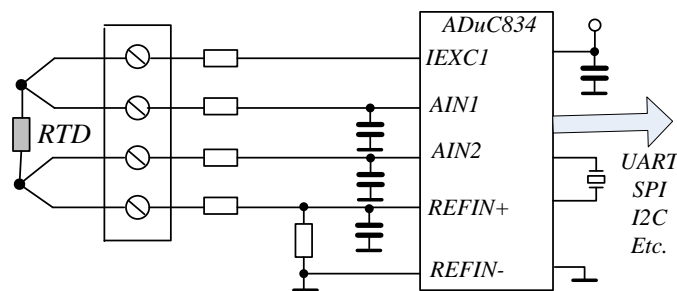
Rys. 4 Układ mostkowy lub częściej stosuje się metodę techniczną:



Rys. 5 Metoda techniczna

•Można też zastosować bardziej wyrafinowaną metodę techniczną ja na rys. 3

Na rynku jest też gotowy specjalistyczny układ scalony ADuC834 w którym wystarczy tylko czteroprzewodowo dołączyć czujnik a na wyjściu możemy mieć sygnał analogowy lub cyfrowy:



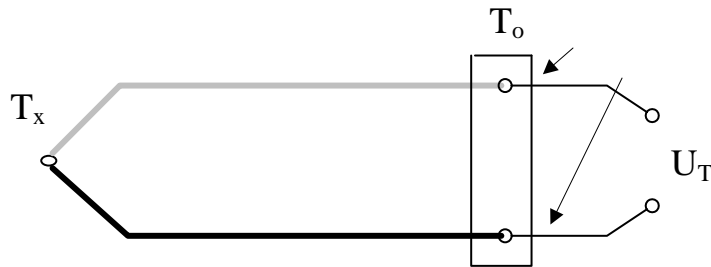
Rys. 6. Specjalizowany układ scalony do współpracy z czujnikiem RTD

Istotnym problemem układów z termorezystorami jest konieczność zasilania czujnika i konieczność ograniczania tego prądu – efekt samonagrzewania.

Termoogniwa

•Termoogniwa (zwane też niepoprawnie termoparami) wykorzystują efekt termoelektryczny odkryty przez Seebecka w 1822 roku. Efekt polega na tym że na złączu dwóch różnych metali powstaje siła termoelektryczna proporcjonalna do różnicy temperatur złącza T_x i otoczenia T_o :

$$U_T = S(T_x - T_o)$$



Rys. 7. Zasada działania termoogniwa

Porównanie termoogniwa i termorezystora.

Termoogniwo ma następujące zalety:

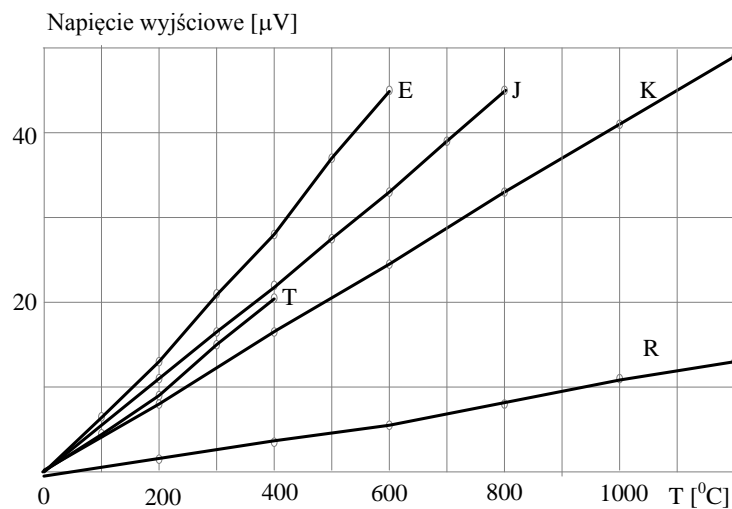
- Szeroki zakres mierzonych temperatur – do 1600°C
- Prosta konstrukcja (wystarczy skręcić lub zlutować dwa różne druty)
- Małe wymiary – czujnik może być mniejszy niż główka od szpilki
- Nie potrzeba zasilać czujnika (brak efektu samonagrzewania)

W porównaniu z termorezystorem termoogniwo ma następujące wady:

- Mniejsza niemal dziesięciokrotnie czułość – w najlepszym przypadku 50 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Czujnik nie mierzy temperatury tylko różnicę temperatur. Wiąże się to z koniecznością kontroli temperatury T_o
- Te dwie wady predestynują termoogniwa do pomiaru wysokich temperatur gdzie sygnał wyjściowy jest dostatecznie duży, a efekt zmian temperatury otoczenia pomijalnie mały.

Rodzaje termoporn

•Na rynku od lat jest zaledwie kilka rodzajów termoporn, przedstawionych na rys.8:



Rys. 8. Podstawowe rodzaje termoporn

Type	Junction	Range °C	S (25 °C) μV/°C
B	PtRh30/PtRh6	100 - 1800	0.3
E	NiCr/CuNi	-270 - 700	61
J	Fe/CuNi	-210 - 750	52
K	NiCr/NiAl	-270 - 1000	41
N	NiCrSi/NiSi	-270 - 1000	27
R	PtyRh13/Pt	-50 - 1600	6
S	PtRh10/Pt	-50 - 1600	6
T	Cu/CuNi	-270 - 350	41

Na szczególną uwagę zasługują następujące ogniwa:
 -Termoporn R, S – termoporn na bazie platyny i rodu – mała czułość ale szeroki zakres temperatur i bardzo duża dokładność. Termoporn te stosowane są jako wzorce temperatury dla temperatur powyżej 800°C.

-- Termoporn K – chromel/alumel – najczęściej stosowane

-- Termoporn E (chromel-konstantan) – największa czułość

-- Termoporn T, T – miedź/konstantan i żelazo/konstantan – łatwe do wykonania we własnym zakresie

Kompensacja zmian temperatury T_o

•Równanie Seebecka można przekształcić do następującej postaci

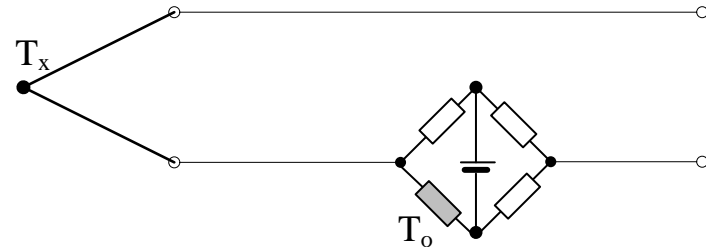
$$U_T = S(T_x - T_o) = ST_x - ST_o$$

Termoogniwo składa się więc niejako z dwóch czujników – czujnika temperatury T_x i temperatury T_o .

Wystarczy więc dodać jeszcze jeden czujnik – temperatury T_o aby wyeliminować wpływ zmian tej temperatury:

$$U_T = S(T_x - T_o) = ST_x - ST_o + ST_o$$

Najbardziej popularne rozwiązanie przedstawia rys.9.



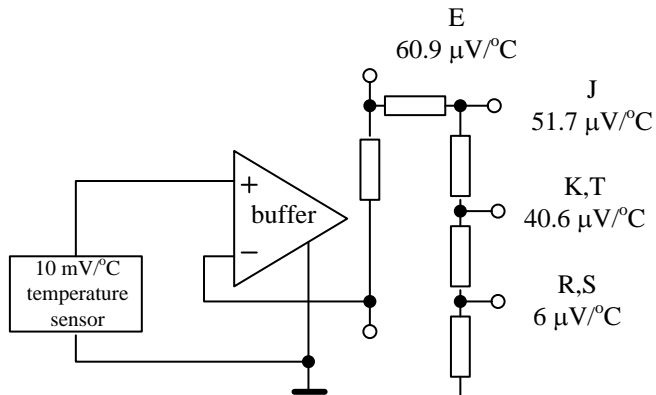
Rys.9. Metoda kompensacji zmian temperatury T_o

Do wyjścia czujnika dołącza się jeszcze jeden czujnik, tym razem termorezystor znajdujący się w temperaturze T_o . Termorezystor dołącza się w układzie mostka niezrównoważonego i tak dobiera się napięcie zasilania żeby napięcie wyjściowe mostka było:

$$U = ST_o$$

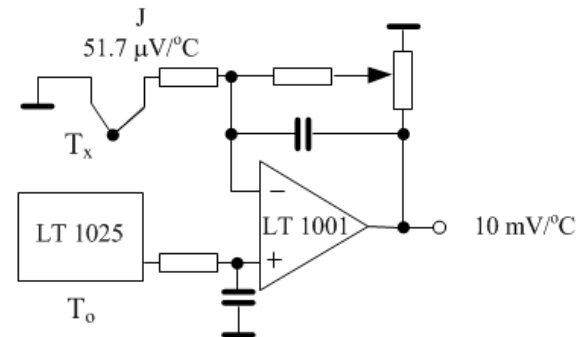
Zalecany układ do współpracy z termoozniwem

Firma Linear Technology wypuściła na rynek gotowy scalony czujnik temperatury otoczenia zastępujący mostek z czujnikiem z rys.9. Czujnik ten ma kilka wyjść przystosowanych do najbardziej popularnych termoozniw:



Rys. 10. Uniwersalny czujnik temperatury otoczenia typu LT025

•Wystarczy teraz dołączyć czujnik 1025 do jednego z wejść wzmacniacza różnicowego a termoozniwo do drugiego wejścia :



•Rys.11. Gotowy miernik temperatury z termoozniwem.

•Przedstawiony układ eliminuje dwie główne wady termoozniwa – mała czułość (uzyskujemy całkiem przyzwoitą czułość 10 mV/°C) oraz niezależność od zmian temperatury otoczenia.

Tensometryr

•Tensometr (ang. Strain gauge) jest najpopularniejszym czujnikiem wielkości mechanicznych odkształcenia i naprężenia. Wykorzystujemy fakt że rezystancja drutu zależy od jego wymiarów długości l i przekroju A

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{\pi r^2}$$

A więc jeśli naklei się drut na odkształcany obiekt to rezystancja czujnika zmieni się:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{2dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} = (1 + 2\nu + \xi)\varepsilon = K\varepsilon$$

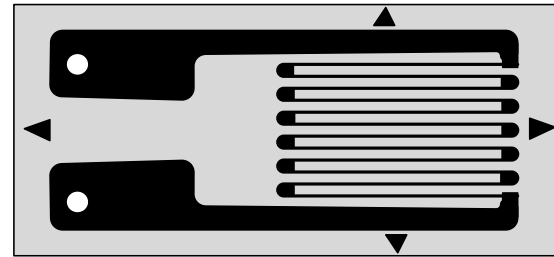
•Gdzie $\varepsilon = dl/l$ jest odkształceniem a współczynnik K jest tzw. Stałą tensometru.

•Ponieważ naprężenie σ jest funkcją odkształcenia

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} = E\varepsilon$$

gdzie E jest modułem Yunga to czujnik może być też stosowany do pomiaru naprężeń.

Zamiast pojedynczego drutu nakleja się wytrawiony w folii meander:



Rys. 12. Typowy kształt tensometru.

Tensometry mogą mieć różne kształty i zazwyczaj wykonywane są z folii konstantanowej. Są to elementy tanie, jednorazowego użytku naklejane na badany obiekt.

Wpływ temperatury otoczenia

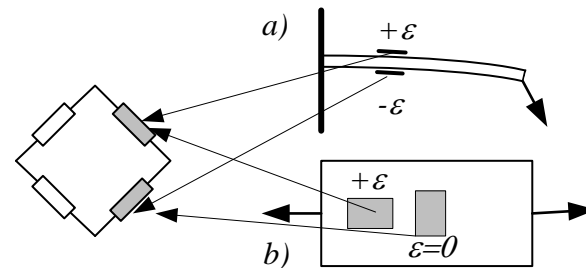
- Wprawdzie konstantan ma niewielką zmianę rezystancji z temperatura ale zmiany rezystancji tensometru są jeszcze mniejsze. Zazwyczaj mierzy się naprężenia rzędu 10^{-6} , tz, mikrostrein.

- Nawet niewielka zmiana temperatury powoduje więc znacznie większą zmianę rezystancji niż zmiana rezystancji spowodowana naprężeniem.

- Dlatego w zasadzie nigdy nie stosuje się pojedynczego tensometru tylko parę tensometrów, jeden aktywny (poddany naprężeniu) drugi pasywny (nie poddany naprężeniu). Oba znajdują się w tej samej temperaturze.

Jeśli podłączyć te czujniki do sąsiednich ramion układu mostkowego to następuje eliminacja wpływu zmian temperatury zgodnie z zależnościami

$$U_{wy} = S \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right)$$

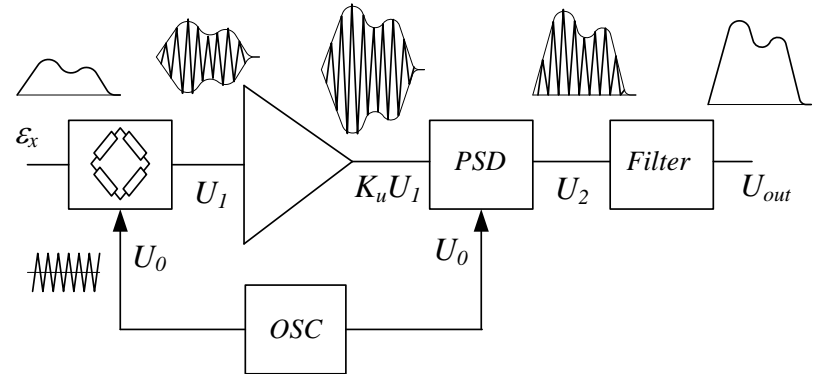


Rys.13. Zasada eliminacji wpływu zmian temperatury przez różnicowe włączenie czujników: pasywnego i aktywnego w układ mostka

Mostki tensometryczne

- Stała tensometru jest równa ok 2 a zmiany odkształcenia są rzędu 10^{-6} . Tak małej zmiany rezystancji tensometru nie da się zmierzyć zwykłym miernikiem rezystancji i trzeba stosować specjalne przyrządy zwane mostkami tensometrycznymi.
- Jeśli przyjąć że napięcie zasilania ostka jest kilka V a mierzone na[prężenia kilka mikrostreinów to napięcie wyjściowe jest na poziomie uV a więc porównywalne z poziomem szumów. Zadaniem mostka tensometrycznego jest więc także usunięcie szumów.

Zadanie to spełnia układ przedstawiony na rys.14 – tzw wzmacniacz z falą nośną. Układ mostkowy zasila się napięciem przemiennym i na wyjściu mostka zachodzi modulacja tzn. sygnał wyjściowy o niskiej częstotliwości nakłada się na sygnał zasilania mostka. Układ PSD jest filtrem selektywnym nastrojonym na falę nośną, a więc eliminującym wszystkie inne sygnały, w tym szumy.

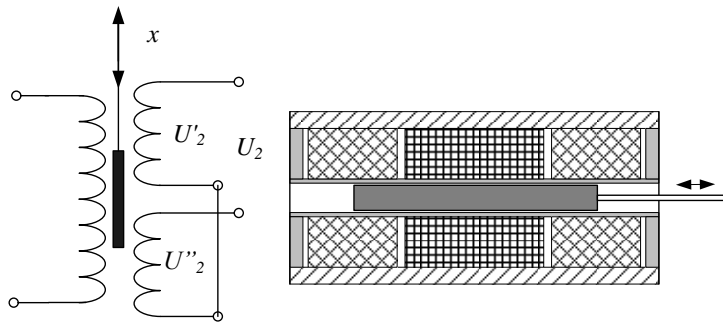


•Rys.14. Mostek tensometryczny z falą nośną

Wadą układu z falą nośną jest koniczność spełnienia warunku że częstotliwość sygnału mierzonego musi być 5 razy mniejsza niż częstotliwość zasilania mostka. Ogranicza to pasmo mierzonych częstotliwości do kilku kHz - tensometr poprawnie mierzy zmiany nawet rzędu 500 KHz. Dlatego coraz częściej stosuje się mostki zasilane napięciem stałym – mają one wprawdzie mniejszą czułość, ale za to większe pasmo.

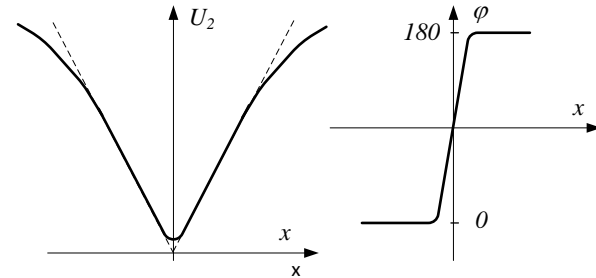
Czujnik transformatorowy różnicowy LVDT

Drugim obok tensometru najczęściej stosowanym czujnikiem wielkości mechanicznych jest czujnik transformatorowy różnicowy LVDT (linear variable differential transformer). Służy on do pomiaru przesunięć.



Rys.15. Czujnik transformatorowy

Zasada działania czujnika jest następująca: Jeśli ruchomy rdzeń znajduje się w środku to napięcie indukowane w obu uzwojeniach wtórnych jest identyczne. Ponieważ sygnały te się odejmują sygnał wyjściowy jest równy zero.



Rys. 16. Charakterystyka czujnika LVDT

Przesunięcie rdzenia spowoduje wzrost napięcia w jednym uzwojeniu a zmniejszenie w drugim a więc pojawienie się sygnału wyjściowego jak na rys. 16. Czujnik może też służyć do pomiaru przesunięcia kąтового:

