POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

LABORATORIUM POMIARÓW WIELKOSCI NIEELEKTRYCZNYCH

Instrukcja do ćwiczenia

Pomiary temperatur metodami stykowymi.

Wrocław 2005

Temat ćwiczenia: Pomiary temperatur czujnikami stykowymi

Program ćwiczenia

1. Zmierzyć charakterystyki statyczne wskazanych termoelementów, rezystorów metalowych, termistorów i czujników półprzewodnikowych. Zapisać wszystkie charakterystyki w postaci analitycznej uwzględniając błędy podstawowe pomiarów,. Sprawdzić poprawność takiego odwzorowania dla kilku temperatur. Określić czułość każdego z czujników w różnych temperaturach.

Wprowadzenie

Mimo dużej różnorodności czujników do pomiaru temperatury wyróżnić można w zasadzie cztery podstawowe grupy czujników elektrycznych do stykowych pomiarów temperatury, które przedstawiono w tab.1 oraz tab.2. W tabeli 1 podano jednocześnie procentowy udział poszczególnych grup czujników w stosunku do wszystkich sprzedawanych czujników temperatury. Podano tez temperaturowy przedział pracy poszczególnych grup czujników.

Tabela 1.

Rodzaj czujnika	Udział w sprzedaży	Zakres temp. pracy °C
Termopary	50%	-273 ÷ 3000
Oporniki termometryczne	27%	-273 ÷ 1000
Termistory	13%	-273 ÷ 250
Złącza p-n	5%	-273 ÷ 150
pirometry	5%	-10 ÷ 3000

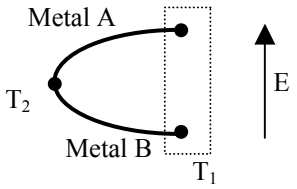
Wybór czujnika do konkretnego zastosowania uwzględnić musi wiele różnych kryteriów takich jak:
- zakres temperatury pracy
- czułość
- stałość charakterystyki - powtarzalność (wymienialność czujników)
- dokładność
- stopień komplikacji układu pomiarowego współpracującego z czujnikiem, w zależności od celu pomiaru
- stała czasowa.

TERMOELEMENTY

Obecnie najbardziej rozpowszechnionym czujnikiem do pomiaru temperatury jest termoelement. Siła elektromotoryczna termoelementu, zwana w tym wypadku siłą termoelektryczną E, mierzona jest na zaciskach termoelementu (termopary) z dwu różnych metali lub stopów, w obwodzie jak na rys.1. Jeśli jedne końce materiałów A i B znajdują się w temperaturze T_1 a drugie w temperaturze T_2, tak jak na rys.1, to zależność siły termoelektrycznej od tych temperatur można przedstawić w postaci:

$$E = k_t \{T_2 - T_1\} \qquad (1)$$

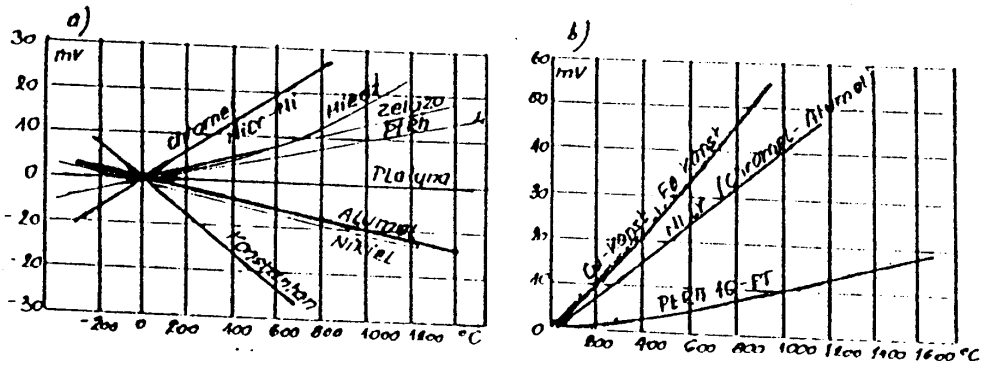
gdzie: k_t czułość termoelektryczna w przedziale $T_2 - T_1$



Rys.1. Termoelement

Warunkiem jednoznaczności pomiaru temperatury T_2 jest znajomość wartości temperatury T_1. Najczęściej temperatura T_1 ma stałą i znaną wartość (temperatura odniesienia).
W praktyce jako temperaturę odniesienia przyjmuje się:
- **temperaturę otoczenia (mniej dokładne pomiary przemysłowe),**
- **temperaturę nasyconego roztworu wody z lodem: dokładność uzyskania tej temperatury wynosi od ± 0,1 °C do ±0,0001 °C,**
- temperaturę termostatu o innej temperaturze niż 0 °C i temperatura otoczenia (np. T = 50 °C),

Spotyka się również rozwiązania przyjmujące za temperaturę odniesienia temperaturę otoczenia, przy jednoczesnym zastosowaniu członu korygującego wskazania do znamionowej temperatury odniesienia, rys.3d

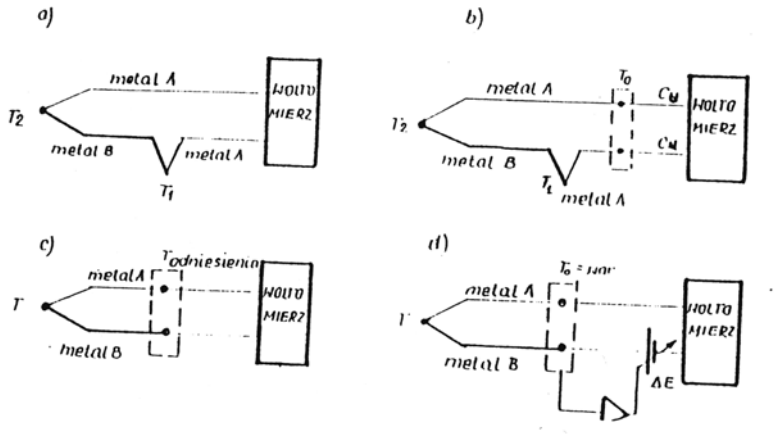


Rys2. Zależność siły termoelektrycznej od temperatury:
a) dla różnych metali
b) dla par materiałów

Powszechnie znane tabele (podane np. przez Polskie Normy) oraz wykresy - rys.2b - odzwierciedlają zależność (1) dla $T_1 = 0\ ^0C$ = const. Jak widać z rys. 2b współczynnik k_t występujący w zależności (1) ma wartość rzędu kilkunastu-kilkudziesięciu $\mu V/\ ^0C$.

Należy podkreślić, że znormalizowanie charakterystyk termometrycznych termoelementów jest możliwe dzięki dużej powtarzalności tych charakterystyk. Stwarza to z kolei możliwość wymiany termoelementów, bez uwzględnienia ich indywidualnych charakterystyk, z zachowaniem dokładności przewidzianych Normami.

Wymienialność termoelementów oraz ich stosunkowo niska cena stanowią poważne zalety decydujące o szerokim zastosowaniu tych czujników temperatury. Poważną wadę termoelementów stanowi mała wartość siły termoelektrycznej (patrz rys.2b), co w połączeniu z wymaganiem stabilizacji lub kompensacji temperatury odniesienia stawia (zależnie od zadanej dokładności pomiaru) określone wymagania układowi pomiarowemu. Idee układów pomiarowych z wykorzystaniem termoelementów przestawiono na rys.3.



Rys3. Układy do pomiaru temperatury z wykorzystaniem termoelementów.

(Tekst podany drukiem pochyłym podaje informacje dodatkowe, wykraczające poza program ćwiczenia).

Idea korekcji, przedstawiona na rys.3d, polega na dodaniu w szereg z termoparą układu dodającego (z uwzględnieniem znaku) wartość $\Delta E(T_{0,zn}-T_{otocz})$, uwzględniającą zmianę wartości E na skutek zmiany temperatury odniesienia z wartości $T_{0,zn}$ do wartości T_{otocz} Sygnał korygujący ΔE może być również przetwarzany na postać cyfrowa i dodany bezpośrednio do cyfrowego wskaźnika temperatury. Metoda ta pozwala ograniczyć wpływ wahań temperatury otoczenia (i odniesienia) do około 0,01 K na 1 K zmian tej temperatury. We współczesnych systemach pomiarowych temperatura T_1 jest mierzona niezależnym czujnikiem półprzewodnikowym, jej wartość przetwarzania ma postać cyfrową a sygnał korygujący ΔE uwzględniany w sposób numeryczny.

TERMOREZYSTORY METALOWE

Rezystancyjne czujniki termoelektryczne w (literaturze anglosaskiej RTD) wykorzystują zależność zmian rezystancji metali w funkcji temperatury.

Metale stosowane jako czujniki rezystancyjne mają dodatni temperaturowy współczynnik rezystancji oraz stałą i powtarzalną zależność rezystancji od temperatury, co umożliwia znormalizowanie ich charakterystyk termometrycznych, podobnie jak w wypadku termoelementów (patrz dodatek).

Znormalizowane w Polsce rezystory termometryczne:

- platynowy Pt100
- niklowy Ni100
- miedziany Cu100

mają rezystancje $R_0 = 100{,}0\ \Omega$ w temp. 0 °C.

Charakterystykę termometryczną termorezystorów można (w zakresie t > 0°C) aproksymować wielomianem drugiego stopnia

$$R = R_0(1+ At+Bt^2) \qquad (2)$$

gdzie: t - temperatura w °C

$A=3.911\ 10^{-3}K^{-1}$ dla platyny

$B= - 0.588\ 10^{-6}K^{-2}$

$A= 5.43\ 10^{-3}\ K^{-1}$ dla niklu

$B = 7.85\ 10^{-6}K^{-2}$

oraz

$A = 4.25\ 10^{-3}\ K^{-1}$ dla miedzi

$B = 0$

Względne zmiany rezystancji R_t / R_0 podano na rys.4.
Jak widać z podanych wartości współczynników A i B w podanym zakresie temperatur (do 150°C) rezystancja miedzi zależy liniowo od temperatury.

Temperaturowy współczynnik rezystancji definiuje się jako:

$$\alpha_t = \frac{1dR_t}{Rdt} \qquad (3)$$

co po uwzględnieniu zależności (4) można zapisać w postaci

$$\alpha_t = \frac{A + Bt}{1 + At + Bt} \qquad (4)$$

a dla miedzi (B = 0)

$$\alpha_t = \frac{1}{\frac{1}{A} + t} = \frac{1}{234 + t} \qquad (5)$$

Dla określenia zmian rezystancji termorezystorów stosuje się cały szereg układów pomiarowych. Powszechnie stosowane są układy mostkowe

- dwuprzewodowe rys.5a
- trzyprzewodowe rys.5b kompensujące przy pewnych założeniach wpływ rezystancji doprowadzeń

Do pomiarów precyzyjnych stosuje się układy czteroprzewodowe rys.5c, pozwalające przy dużej rezystancji wewnętrznej woltomierza praktycznie pominąć wpływ rezystancji przewodów doprowadzających czujnik. Układy z rys. 5 b,c nadają się do stosowania, przy dużych odległościach czujnika od reszty układu pomiarowego.

Ponieważ termorezystory są czujnikami parametrycznymi, to określenie ich rezystancji wymaga pobudzenia prądem elektrycznym, co wiąże się z nieuniknionym samoogrzewaniem się czujników (ciepło Joula). Jednakże dla czujników o rezystancji 100Ω moc wydzielona przy prądzie 1mA wynosi 100μW co w większości wypadków stanowi wartość pomijalnie małą.

Tzw. błąd samoogrzewania określa się z przyrównania mocy wydzielanej w czujniku z mocą oddawana do otoczenia

$$I^2R_t = k\,(t-t_{os}) \qquad (6)$$

gdzie: k - [mW/K] - współczynnik strat
t - temperatura czujnika
t_{os} - temperatura ośrodka

Współczynnik temperaturowy rezystancji termorezystorów α jest rzędu 0,4% / ^{0}C co w przypadku czujnika o rezystancji 100Ω oznacza zmiany tej rezystancji (czułość) 0.4 Ω / ^{0}C. Oznacza to, że napięcie na czujniku zmienia swą wartość o 400 μV/ ^{0}C przy prądzie zasilającym czujnik o wartości 1 mA. **Jest to wartość o rząd większa niż w przypadku termopar**. Stanowi to w połączeniu z dużą stałością charakterystyk termometrycznych oraz wymienialnością tych czujników, dużą zaletę rezystorów termometrycznych.

Wadę termorezystorów stanowi (wynikająca z technologii) stosunkowo wysoka cena oraz stosunkowo duże wymiary czujników drutowych nawijanych. Znaczne zmniejszenie wymiarów czujnika uzyskuje się w technologii cienkowarstwowej.

TERMISTORY

Termistory są półprzewodnikowymi rezystorami o bardzo dużym ujemnym temperaturowym współczynniku rezystancji - rys.5.

Charakterystykę termometryczną termistorów aproksymuje się wyrażeniem:

$$R_T = A \exp [B/T] \qquad (7)$$

gdzie: A - rezystancja termistora w temperaturze T = ∞
B - stała materiałowa, przeciętnie B = 3000 ÷ 4000 **K**
T – temperatura **K**

W praktyce korzysta się z zależności

$$R_T = R_{T0} \exp[B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})] \qquad (8)$$

gdzie: R_{T0} - rezystancja termistora w temperaturze To
(temperatura odniesienia) Jako temperaturę odniesienia dla termistorów,
przyjmuje się To = 298 K (25°C).

Rezystancja R_{T0} produkowanych w kraju termistorów zawiera się w granicach od kilku Ω do kilkuset kΩ.

Współczynnik temperaturowy rezystancji termistora obliczony wg definicji (3) wynosi

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2} \qquad (9)$$

wartość współczynnika jest duża, około -4 %/K w temperaturze To = 25°C co jest największą zaletą termistorów. We współczesnych systemach pomiarowych charakterystykę termistorów opisuje się zależnością

$$1/T = a + b(\ln R) + c(\ln R)^3 \qquad (10)$$

Należy podkreślić, że w zależnościach (7)-(10) temperaturę podaje się w K.

Duża nieliniowość charakterystyki oraz jej niepowtarzalność (poszczególne egzemplarze mają różne charakterystyki, co uniemożliwia ich znormalizowanie) stanowią zasadnicze wady termistora. Praktycznie każdy układ pomiarowy z termistorem musi być indywidualnie wzorcowany. Częściową wymienialność termistorów osiągnęły niektóre firmy sprzedające serie czujników o zbliżonej do siebie charakterystyce, spotyka się również czujniki oparte o termistory, ale o zlinearyzowanej charakterystyce.

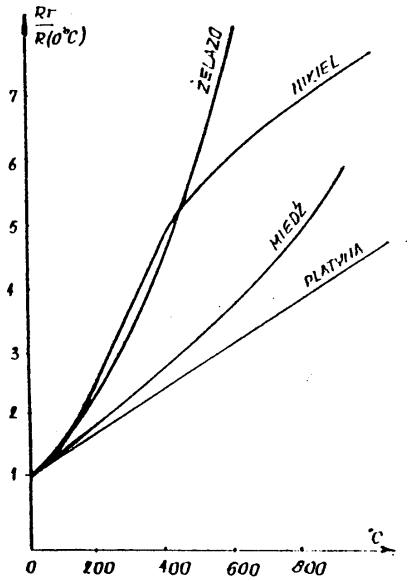
W zasadzie nie ma istotnych różnic w idei układów pomiarowych współpracujących z termistorami i rezystorami metalowymi.

W wypadku termistorów należy zwracać większą uwagę na efekt samoogrzewania się ze względu na mniejsze na ogół wymiary oraz często duża rezystancje czujników.

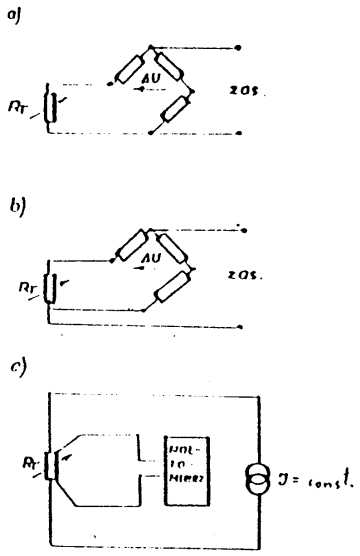
W układach z termistorem nie stosuje się w zasadzie eliminacji rezystancji doprowadzeń, zwłaszcza dla dużych wartości rezystancji termistorów, istnieje natomiast bardzo dużo odmian układów linearyzacji ich charakterystyk termometrycznych.

CZUJNIKI ZE ZŁĄCZEM P-N

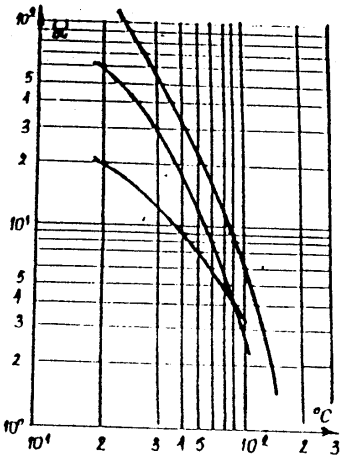
Obecnie obserwuje się rozwój czujników temperatury wykorzystujących zależność napięcia złącza półprzewodnikowego od temperatury. Współczynnik tych zmian wynosi -2 mV/K i w dużym stopniu nie zależy od temperatury - rys.7. Ostatnio obserwuje się wzrost produkcji scalonych czujników temperatury ze złączem p-n np. AD590 firmy Analog Devices. **Czujniki te mają wyjście znormalizowane np. 10 mV/K lub 1μA/K. Zaletą tych czujników jest liniowa charakterystyka.**



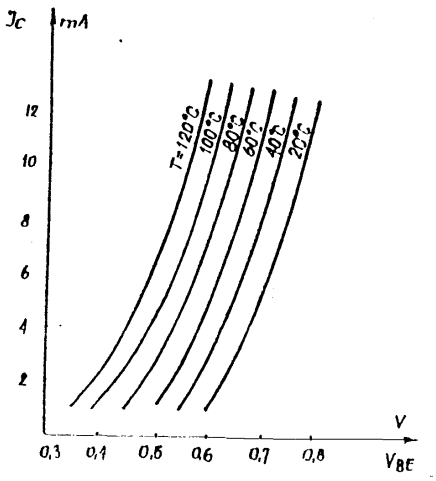
Rys. 4. Względne zmiany rezystancji niektórych metali i funkcji temperatury.



Rys. 5. Układy współpracujące z rezystorami termometrycznymi



Rys. 6. Typowe charakterystyki termometryczne termistorów



Rys.7. Zależność $I_c=f(U_{BE})/V_{CE}$

Tabela 2. Porównanie czujników temperatury.

Rodzaj czujnika	Zakres temperatur pracy	Czułość przy 25 °C	Dokładność określenia ch-ki term.	Liniowość	Normalizacja
Termoelementy	-270°C ÷1800 °C	15÷60μV/K typ. 1%/K	Rzędu poj. K, 0.5K przy wzorcowaniu	Słaba	Pt Rh – Pt Ni Cr –Ni Fe – Ko Cu – Ko
Rezystor platynowy	-250°C ÷900 °C	Ok. +0.5 %K	±0.1K, w wyk. Laboratoryjnym ±0.01K	Około 1% w zakresie do 200°C	Pt Ni Cu
Termistory	-100°C ÷450 °C	-5%K	do ±0.1K	Bardzo nieliniowy	Indywid. kal..
Złącze p-n (diody, tranzystory)	-250°C ÷175 °C	-2mV/K typ. 0.4%/K	ok. 1K	Typ.1%	Indyw. kal.

Zadania kontrolne

1. Porównać właściwości (szczególnie zakres pracy, czułość, dokładność, liniowość) czujników do stykowych pomiarów temperatury.
2. Omówić zagadnienia współpracy czujnik - układ pomiarowy na przykładzie występujących w ćwiczeniu czujników temperatury.
3. Jakie kryteria decydują o wyborze danego czujnika temperatury?
4. Czym uwarunkowana jest czułość napięciowa rezystancyjnych czujników temperatury?