



LABORATORIUM
POMIARU WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH
METODAMI ELEKTRYCZNYMI

POMIARY TEMPERATURY

POMIARY TEMPERATURY

1 Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie metod pomiaru temperatury za pomocą termometrów rezystancyjnych, termoelektrycznych i diodowych, wyznaczanie charakterystyk temperaturowych czujników temperatury oraz pomiar temperatury w stanach ustalonych i nieustalonych.

2 Podstawy teoretyczne

2.1 Skale termometryczne

Temperatura jest pojęciem termodynamicznym. Przejście od wielkości mechanicznych do wielkości termodynamicznych wymaga wprowadzenia dodatkowej wielkości podstawowej, którą może być temperatura lub entropia.
Podstawową skalą temperatury jest skala temperatury termodynamicznej T, związana z pojęciem entropii S oraz energii wewnętrznej E, za pomocą pochodnej cząstkowej, przy stałej objętości V, według wzoru:

$$T = \left(\frac{\partial E}{\partial S}\right) V \tag{1}$$

Skala termodynamiczna, ze względu na trudności jej odtworzenia, nie ma przy pomiarach temperatury praktycznego znaczenia. Zamiast niej używa się międzynarodowej praktycznej skali temperatury.
Międzynarodowa praktyczna skala temperatury jest zbiorem wartości temperatur odtwarzalnych stanami fizycznymi (definicyjne punkty stałe) i zbiorem przyrządów wzorcowych, w tych temperaturach, a służących do interpolacji temperatury w przedziałach wyznaczonych punktami stałymi.

Wartości definicyjnych punktów stałych podano w tabeli 1.

Tabela 1. Punkty stałe międzynarodowej praktycznej skali temperatury.

Punkt	Temperatura	
	K	°C
Potrójny wodoru	13,810	-259,350
Równowagi fazy ciekłej i pary wodoru przy ciśnieniu 33 330,6Pa	17,042	-256,108
Wrzenia wodoru	20,280	-252,870
Wrzenia neonu	27,102	-246,048
Potrójny tlenu	54,361	-218,789
Wrzenia tlenu	90,188	-182,962
Potrójny wody	273,160	0,010
Wrzenia wody	373,150	100,000
Krzepnięcia cynku	692,730	419,580
Krzepnięcia srebra	1235,080	961,930
Krzepnięcia złota	1337,580	1064,430

Poza punktem potrójnym oraz punktem 17,042 K podane wartości temperatury odpowiadają ciśnieniu P_n= 101325 Pa.

Jednostka temperatury w układzie jednostek SI jest Kelwin, oznaczony przez K. Kelwin jest stosowany również do wyrażania różnicy temperatury. Kelwin jest to 1/273,16 część temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody. Jako jednostkę legalną temperatury uznano również stopień Celsjusza oznaczony °C, przy czym 0°C odpowiada 273,15 K, a dla różnicy temperatury 1°C = 1 K.

Wobec powyższego

$$T_c = T - 273{,}15 \tag{1a}$$

przy czym:

T - wartość temperatury wyrażona w stopniach Celsjusza,
T - wartość temperatury wyrażona w kelwinach.

Dla określenia temperatury w poszczególnych zakresach stosuje się następujące przyrządy:

1- zakres 13,81 - 903,89 K - termometr rezystancyjny platynowy, zależność rezystancji platyny od temperatury jest stabelaryzowana,
2- zakres 903,89K - 1337,58 K - termometr termoelektryczny z termoogniwem Pt-PtRh o złączu odniesienia umieszczonym w temperaturze 0°C,
3- zakres powyżej 1337,58 K - pirometr monochromatyczny, w którym porównuje się emitancję widmową ciała czarnego o temperaturze badanej z emitancją ciała czarnego o temperaturze krzepnięcia złota.

2.2 Czujniki rezystancyjne

Zależność rezystancji metali i półprzewodników od temperatury, wykorzystuje się do przetwarzania temperatury w sygnał elektryczny. Charakter przewodności elektrycznej decyduje o przebiegu funkcji R = f(T). Dla metali o przewodności elektronowej, funkcję tę da się przedstawić w postaci

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3 + \cdots] \tag{2}$$

Przy czym:

R_0 - rezystancja w temperaturze T_0,
α, β, γ - temperaturowe współczynniki rezystancji zależne od T_0,
$|\beta|$ i $|\gamma| << |\alpha|$, $\alpha > 0$, to znaczy rezystancja metali rośnie ze wzrostem temperatury.

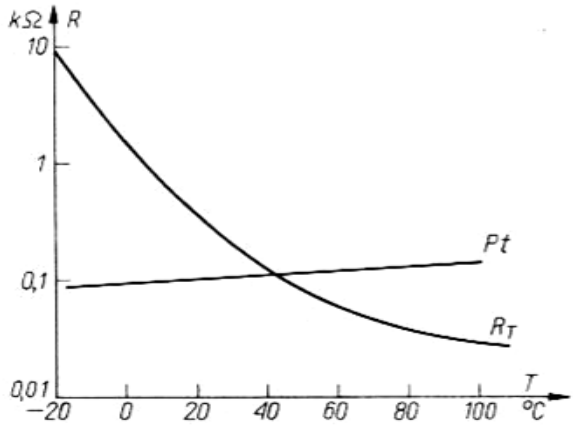
Dla półprzewodników o przewodności dziurowo-elektronowej zależność R = f(T) jest wykładnicza o postaci

$$R(T) = \mathrm{A}\, e^{\frac{B}{T}} \tag{3}$$

w której:

T - temperatura w skali bezwzględnej (Kelwina)

Obie zależności w skali (1) i (3) w porównanej skali przedstawiono na rys. 1.

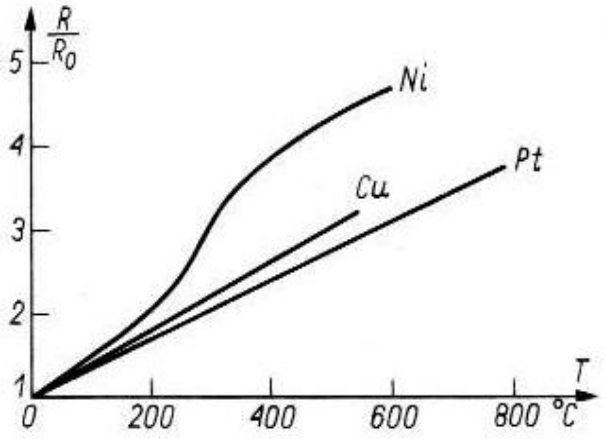


Rys. 1. Charakterystyki temperaturowe czujnika platynowego - P_t i termistora - R_T.

Czujniki rezystancyjne metalowe odznaczają się dużą stałością i w przybliżeniu liniowością, półprzewodnikowe nazywane termistorami dużą czułością, nieliniowością oraz gorszą stałością.
Czujniki rezystancyjne metalowe wykonuje się najczęściej z platyny, niklu i miedzi. Właściwości tych metali podano w tabeli 2, a ich charakterystyki temperaturowe na rys. 2.

Tabela 2. Właściwości materiałów termorezystancyjnych.

Materiał	Zakres zastosowania [°C]	Rezystywność [Ω/m]	$R_{100°C}/R_{0°C}$	Średnie [%/1°C]
Platyna	-200 ÷ +850	$0{,}10 \cdot 10^{-6}$	1,385	0,39
Nikiel	-60 ÷ +200	$0{,}09 \cdot 10^{-6}$	1,617	0,64
Miedź	-50 ÷ +150	$0{,}017 \cdot 10^{-6}$	1,425	0,42



Rys. 2. Charakterystyka przetwarzania termorezystorów: platynowego-Pt, miedziowego-Cu, niklowego-Ni.

Czujniki rezystancyjne platynowe odgrywają w technice pomiarowej szczególną rolę, gdyż umożliwiają dokładne odtworzenie międzynarodowej praktycznej skali temperatur. Przy zastosowaniu odpowiednich metod pomiaru rezystancji, osiąga się błąd pomiaru temperatury, z wykorzystaniem tych czujników, mniejszy niż 0,001°C. Również w zastosowaniach technicznych czujniki platynowe pozwalają na uzyskanie dużych dokładności pomiaru temperatury. Koniecznym warunkiem jest duża czystość platyny. Do wyrobu termorezystorów stosuje się platynę, dla której stosunek rezystancji, przy 100°C i 0°C, nie jest mniejszy od 1,385. Nieliniowość charakterystyk termorezystorów platynowych w zakresie 0 ÷ 100°C nie przekracza 0,36°C.

Termorezystory miedziowe i niklowe są mniej dokładne. Charakterystyka temperaturowa miedzi jest liniowa w szerokim zakresie (od - 40°C do + 200°C nieliniowość jest mniejsza niż 0,1°C), gorsza jednak niż platyny jest jej powtarzalność. Charakterystyka niklu jest wyraźnie nieliniowa w zakresie 0 ÷ 100°C, błąd nieliniowości w tym zakresie wynosi 2,96°C. Zaletą termorezystorów niklowych jest stosunkowo duża rezystywność oraz duży współczynnik temperaturowy rezystancji.

W zależności od przeznaczenia i zakresu mierzonych temperatur stosuje się różne konstrukcje termorezystorów. Dla ochrony przed uszkodzeniami mechanicznymi lub oddziaływaniem chemicznym ośrodka, termorezystory umieszcza się w osłonach ochronnych. Przykłady konstrukcji termorezystorów oraz osłon ochronnych przedstawiono na rys. 3. Standardowa wartość rezystancji, powszechnie stosowanych termorezystorów, w temperaturze 0°C wynosi R_p=100,0Ω. Jedynie niektóre termorezystory miniaturowe mają rezystancje znamionowa R=50Ω. Dopuszczalny prąd pomiarowy powodujący podgrzewanie się rezystora jest rzędu 3 ÷ 15 mA. W przypadku gdy nie znamy wartości dopuszczalnej I_{dop} czujnika możemy ją określić z zależności

$$I_{dop} = \sqrt{\frac{t_{dop} \cdot K}{R_T}} \tag{4}$$

gdzie:

t_{dop} - zależność dopuszczalna wartości przyrostu temperatury czujnika,

K - stała odprowadzania ciepła, która dla danych warunków pracy podaje moc wydzielaną w termorezystorach, przy której w stanie ustalonym przyrost jego temperatury wynosi 1W/K.

Stała K termorezystora można wyznaczyć przyjmując że przyrost temperatury termorezystora jest równy

$$\Delta t = I^2 \cdot R \cdot \frac{1}{K} \tag{5}$$

Zatem dla dwóch różnych prądów będzie

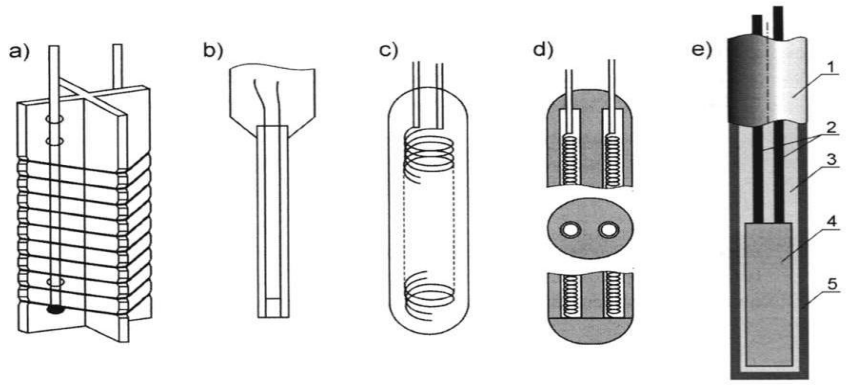
$$t - t_1 = \Delta t_1 = I_1^2 \cdot R_1 \cdot \frac{1}{K}$$

i

$$t - t_1 = \Delta t_2 = I_2^2 \cdot R_2 \cdot \frac{1}{K} \tag{6}$$

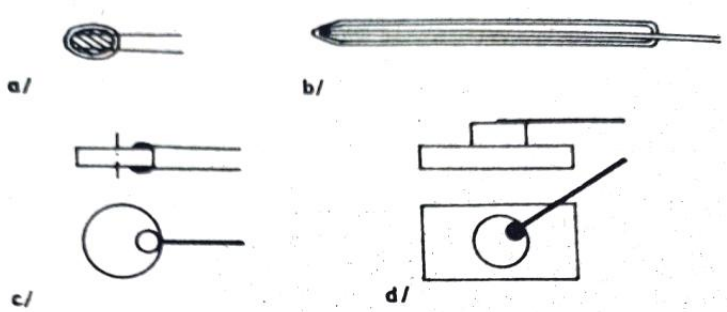
a stąd

$$K = \frac{I_2^2 \cdot R_2 - I_1^2 \cdot R_1}{t_2 - t_1} \tag{7}$$



Rys. 3. Przykład konstrukcji termorezystorów metalowych: a) - wolno uzwojony na rdzeniu krzyżowym, b) - pałeczkowy c), d) - uzwojony na płytce izolacyjnej (mika, masa plastyczna) oraz osłony, d - do pomiarów przemysłowych. Oznaczenia: 1 - rura osłony, 2 - przewody, 3 – wypełnienie, 4 – termorezystor, 5 – osłona.

Charakterystyki przetwarzania termorezystorów są znormalizowane i zawarte w normie PN-83M53852. Wyciąg z normy przedstawiono w tabeli 2.
Termistory (termorezystory półprzewodnikowo) wykonywane są najczęściej z tlenków żelaza, manganu, niklu, litu i tytanu. Odznaczają się one ujemnym współczynnikiem temperaturowym rezystancji, w granicach od około -2 do -6 S/1°C oraz rezystywnością kilka rzędów większą niż rezystywność metali. Te dwie cechy pozwalają na budowę czujników termistorowych o małych wymiarach i dużej czułości. Na rys. 4. przedstawiono kilka termistorów stosowanych do pomiaru temperatury.



Rys. 4. Termistory stosowane do pomiarów temperatury: a) - perełkowy, b) - bagietkowy, c) - pastylkowy, d) – płytkowy.

Jak wspomniano, zależność rezystancji termistorów od temperatury jest wykładnicza. Wyrazić można ją wzorem

$$R_T = Ae^{\frac{B}{T}} \tag{8}$$

gdzie:

A - stała zależna od własności fizycznych, wymiarów geometrycznych, wyrażona w **Ω**,
B - stała materiałowa, wyrażana w stopniach Kelvina.

Współczynnik temperatury rezystancji termistora określony wzorem

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT} \tag{9}$$

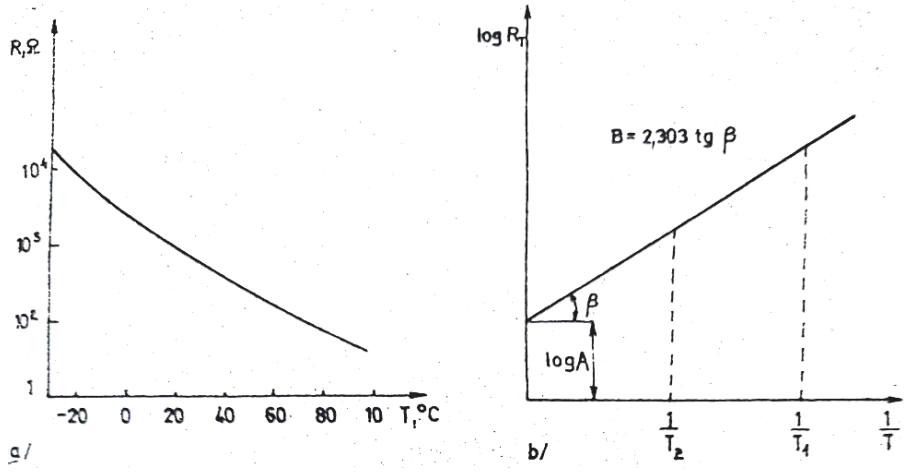
na podstawie (8) wynosi

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{d}{dT}\left(A\, e^{\frac{B}{T}}\right) = -\frac{B}{T^2} \tag{10}$$

Zależność ta wykazuje, że współczynnik α_T, a zarazem czułość termistora maleje ze wzrostem temperatury. Wartość stałych A i B termistora można wyznaczyć dwoma sposobami: wykreślnie z charakterystykę przetwarzania lub analityce wykonując pomiary rezystancji termistora w dwóch temperaturach. Logarytmując wyrażenie (8) otrzymamy

$$\log R_T = \frac{B}{T}\log e + \log A \tag{11}$$

Tak więc zależność logarytmu rezystancji R_T termistora, od odwrotności temperatury jest linią prostą. Sporządzając wykres $R_T = f(\frac{1}{T})$ możemy wyznaczyć stałe A i B, jak to pokazano na rys. 5 b).



Rys. 5. Charakterystyka termometryczna termistora.

Jeżeli znamy rezystancje termistora R_{T1} i R_{T2} w dwóch temperaturach T_1 i T_2 to możemy zapisać

$$\begin{aligned} R_{T1} &= Ae^{\frac{B}{T_1}} \\ R_{T2} &= Ae^{\frac{B}{T_2}} \end{aligned} \tag{12}$$

Dzieląc stronami wyrażenie (12) otrzymamy charakterystykę przetwarzania termistora o równaniu

$$R_{T1} = R_{T2}e^{B\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)} \tag{13}$$

Z zależności tej wyznaczamy wartość stałej B jako

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1}\ln\frac{R_{T1}}{R_{T2}} \tag{14}$$

Wartość stałej A wyznaczamy z zależności (8)

$$A = R_T\, e^{-\frac{B}{T}} = R_T\, e^{\alpha T} \tag{15}$$

Wartości stałych B termistorów zawierają się w granicach 2000 ÷ 6000K.

2.3 Układy pomiarowe termometrów rezystancyjnych

Termorezystor z układem pomiarowym stanowi termometr elektryczny. Układy pomiarowe termometrów rezystancyjnych są typowymi układami pomiaru rezystancji. O wyborze układu pomiarowego decydują następujące czynniki: wymagana dokładność, warunki pomiaru (przemysłowe, laboratoryjne) oraz rodzaj zastosowanego czujnika. Do pomiarów precyzyjnych i kontrolnych stosuje się mostki Wheatstone'a, kompensatory równoważone ręcznie, a także techniczną metodę pomiaru rezystancji z wykorzystaniem precyzyjnych stabilizatorów prądu i woltomierzy cyfrowych.
W pomiarach przemysłowych o wymaganej dokładności 0,1÷1% zakresu pomiarowego, stosowane są mostki prądu stałego lub zmiennego, równoważne automatycznie. W pomiarach o dokładności 1,5% używane są powszechnie, szczególnie w trudnych warunkach przemysłowych, termometry ilorazowe. Różne wartości czułości i rezystancji czujników metalowych i termistorowych stanowią o odmienności układów pomiarowych termistora z tymi czujnikami.
Przy stosunkowo małej wartości rezystancji i małej czułości termorezystorów metalowych, rezystancja przewodów łączących czujnik układem pomiarowym, a szczególnie zmiany rezystancji tych przewodów, powodowane zmianami temperatury otoczenia, mogą stać się przyczyną powstawania błędów o znacznych wartościach. Zagadnienie to nie jest istotne dla termometrów termistorowych, ze względu na dużą wartość rezystancji i dużą wartość czułości termistorów.

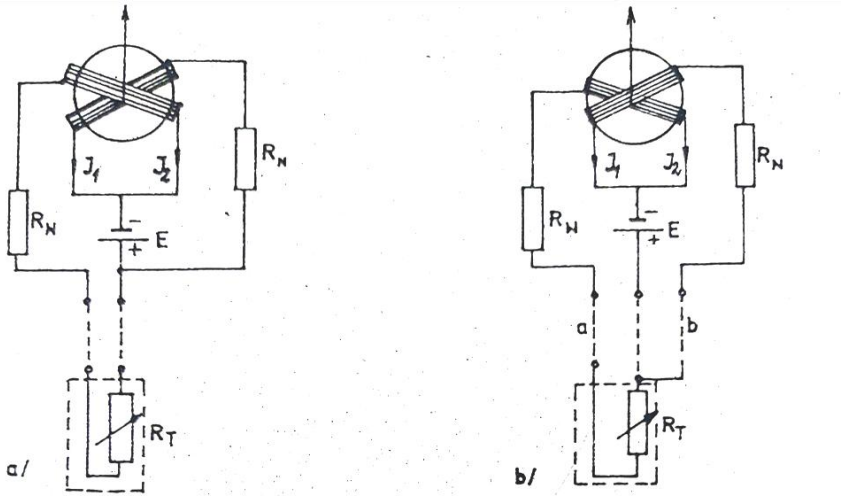
2.3.1 Układu pomiarowe termometrów z termistorami metalowymi

Układ termometru z miernikiem ilorazowym (logometrom) przedstawiony jest na rys. 6. Termorezystor R_T połączony jest jedną z cewek sternika przez rezystor wyrównawczy R_W. Druga cewka miernika połączona jest w szereg z rezystorem manganinowym o stałej rezystancji R_N. W magnetoelektrycznym mierniku ilorazowym odchylenie wskazówki jest funkcją stosunku prądów I_1/I_2. Prądy w cewkach można zapisać wzorami:

$$I_1 = \frac{E}{R_{C1} + R_N} \qquad I_2 = \frac{E}{R_{C1} + R_W + R_T} \tag{16}$$

gdzie:

R_{C1}, R_{C2} - Rezystancje cewek miernika.



Rys. 6. Termometr rezystancyjny w układzie ilorazowym: a) dwuprzewodowym b) trójprzewodowym.

Odchylenie wskazówki miernika ilorazowe można opisać jako

$$\alpha = f_1\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f_1\left(\frac{R_{C1} + R_W + R_T}{R_{C1} + R_N}\right) = f_2(R_T) \tag{17}$$

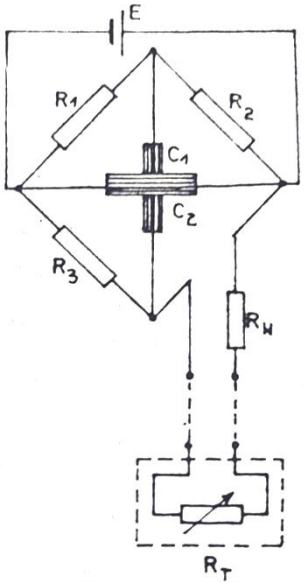
Ponieważ

$$R_T = f_3(T) \tag{18}$$

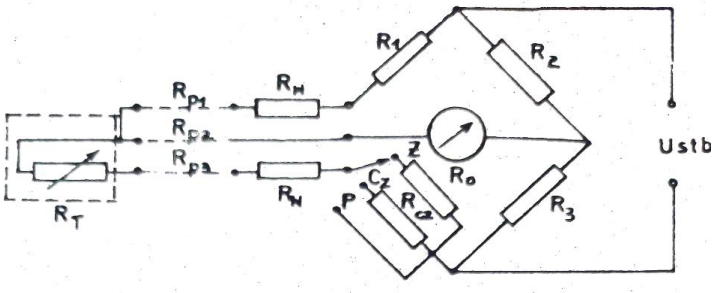
więc

$$\alpha = f(T) \tag{19}$$

Podziałka miernika ilorazowego może być wywzorcowana w jednostkach temperatury. Wskazania mierników ilorazowych nie zależą od wahań napięcia zasilającego E (zależność (17)), nie wymaga się więc stabilizacji tego napięcia. Stosowane są dwu- i trójprzewodowe połączenia czujnika z miernikiem. W układzie trójprzewodowym (rys. 6 b), zmiana rezystancji długich przewodów doprowadzających a i b, pod wpływem temperatury otoczenia, praktycznie nie wpływa na zmianę stosunku I_1/I_2, ponieważ rezystancje te występują w obwodach prądów I_1 i I_2.
Do pomiarów temperatur o małych zakresach pomiarowych, stosuje się również mierniki ilorazowe w niezrównoważonych układach mostkowych (rys. 7). Trzy ramiona mostka tworzą rezystory manganianowe R_1, R_2, R_3, czwarte ramię składa się z termorezystora R_T, rezystora wyrównawczego R_W, rezystancji przewodów doprowadzających. Moment cewki C_1, jest proporcjonalny do napięcia zasilającego E, zaś moment cewki C_2 jest proporcjonalny do napięcia nierównowagi mostka. Oba momenty są skierowane przeciwnie. Rezystorem R dobiera się wartość momentu cewki C_1, i zakres pomiarowy. Można łatwo wykazać, że wychylenie α miernika jest funkcją rezystancji termorezystora i nie zależy od napięcia zasilającego. Rezystor wyrównawczy R_W służy do wyrównywania rezystancji przewodów łączeniowych, do wartości przyjętej przy wzorcowaniu układu pomiarowego (zwykle do wartości 10Ω). Dokładności pomiaru temperatury lepsze niż 1% można uzyskać stosując do pomiaru rezystancji termorezystora mostki nierównoważne. Schemat takiego termometru pokazano na rys. 8. Dla uniknięcia wpływu zmian rezystancji przewodów łączeniowych na dokładność pomiaru podobnie jak w układach ilorazowych, stosuje się najczęściej połączenia trójprzewodowe. Jeżeli przewody łączeniowe są jednakowej długości, to spełniony jest warunek $R_{p1} = R_{p2} = R_{p3} = R_p$.



Rys. 7. Termometr rezystancyjny w układzie mostkowo-ilorazowym.



Rys. 8. Termometr rezystancyjny w układzie mostka niezrównoważonego.

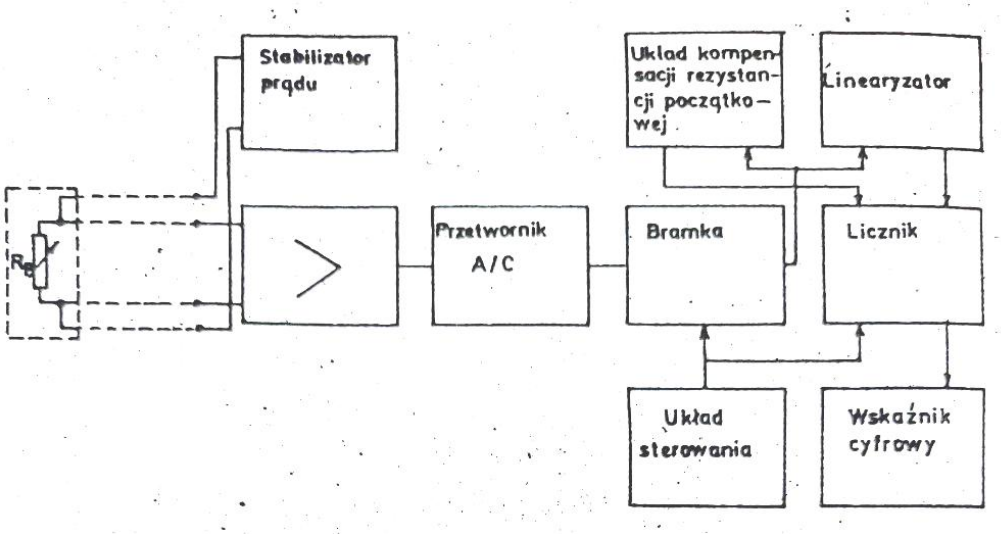
Warunek równowagi układu mostkowego można zapisać

$$(R_T + R_P + R_W)\, R_2 = (R_1 + R_P + R_W)\, R_3 \tag{20}$$

lub

$$R_T\, R_2 = R_1\, R_3 + R_P\,(R_3 - R_2) + R_W\,(R_3 - R_2) \tag{21}$$

Jeżeli tylko rezystancje R_2 i R_3 są równe, to rezystancja przewodów łączeniowych nie wpływa na równowagę mostka. Napięcie nierównowagi mostka jest mierzone miliwoltomierzem wyskalowanym w stopniach temperatury. To napięcie nierównowagi jest proporcjonalne do napięcia zasilającego mostek, dlatego wymaga się stabilizacji napięcia zasilania.
Często stosowane, zarówno w przemyśle, jak i w pomiarach laboratoryjnych są termometry rezystancyjne w układach mostków zrównoważonych, których równoważenie odbywa się samoczynnie. Wyeliminowanie wpływu rezystancji przewodów łączeniowych termorezystor z układem pomiarowy na dokładność pomiaru, realizuje się stosując techniczną metodę pomiaru rezystancji. Wymaga to czteroprzewodowego połączenia termorezystora z układem pomiarowym. Na tej zasadzie działa rezystancyjny termometr cyfrowy, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 9. Jedna para przewodów doprowadza dokładnie stabilizowany prąd, a druga służy do pomiaru spadku napięcia na termorezystorze. Jeżeli pomiar napięcia odbywa się bezprądowo wzmacniacz termometru ma dużą rezystancję wejściową, to zmiany rezystancji przewodów doprowadzających nie wpływają na wynik pomiaru. Cyfrowa metoda pomiaru spadku napięcia pozwala na stosunkowo proste przetworzenie wielkości mierzonej rezystancji, na odpowiadającą jej temperaturę. Należy tylko rozwiązać dwa zadania: skompensować rezystancję początkową termorezystora oraz zlinearyzować charakterystykę termometryczną przetwornika.



Rys. 9. Schemat blokowy cyfrowego termometru rezystancyjnego.

Linearyzację charakterystyk przetworników można zrealizować w układach analogowych lub cyfrowych, przedstawionym układzie termometru cyfrowego rys. 9. zastosowano układ linearyzacji cyfrowej, który generuje odpowiednią do punktu pracy, liczbę impulsów dodawaną lub odejmowaną od stanu licznika.

2.3.2 Układy pomiarowe termometrów termistorowych

Duży współczynnik temperaturowy oraz duża rezystancja termistorów pozwala na budowę termometrów termistorowych, w prostych układach szeregowych lub mostkowych, dwuprzewodowych. Na rys. 10. przedstawiono termometr, w układzie szeregowym, zasilany stałym napięciem. Prąd przepływający przez miernik wynosi

$$I_p = \frac{U_Z}{R_N + R_S + Ae^{B/T}} \tag{22}$$

Wykresem tej zależności jest krzywa przedstawiona na rys. 10 b). Przebieg zależności $I_P = f(T)$ posiada punkt przegięcia w temperaturze T_P, której wartość wyznacza się z równania

$$\frac{\partial^2 I_P}{\partial T^2} = 0$$

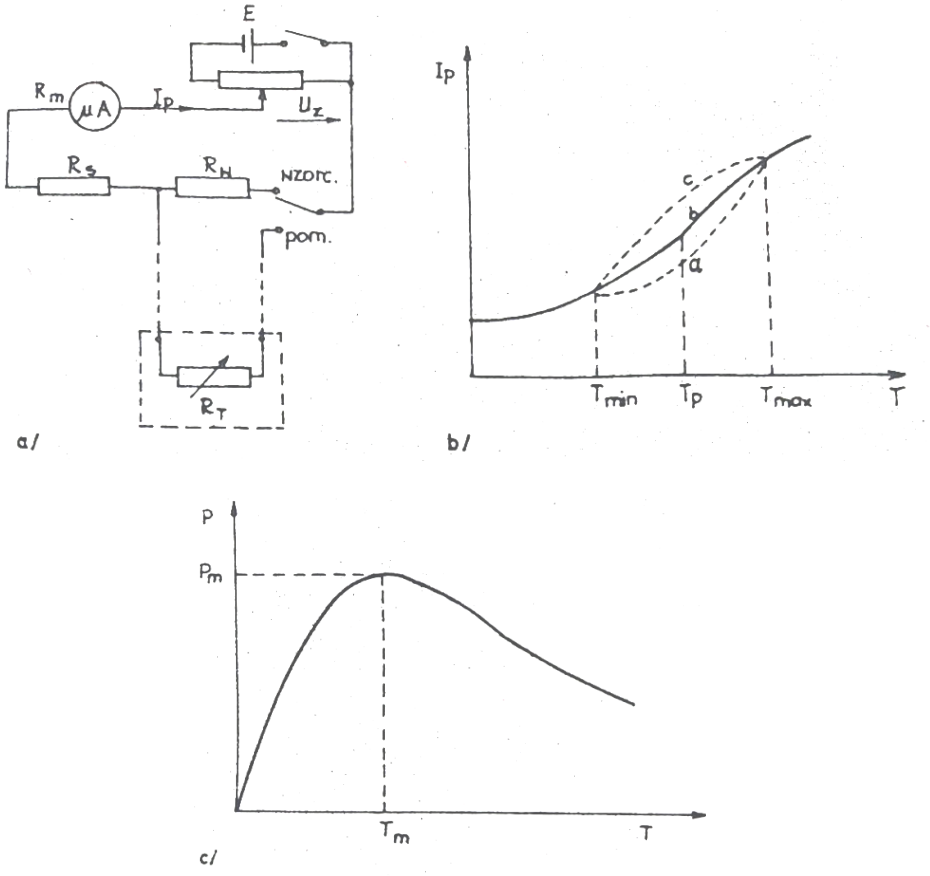
co daje

$$T_P = \frac{B}{2}\frac{R_{Tp}-(R_M+R_S)}{R_{Tp}+(R_M+R_S)} \tag{23}$$

Rezystancja termistora w punkcie przegięcie $R_{Tp} = Ae^{\frac{U}{T_p}}$.

Przez odpowiedni dobór wartości rezystancji miernika R_M i rezystora szeregowego R_S można umieścić punkt przegięcia w dowolnym punkcie T_X, leżącym w zakresie lub poza zakresem mierzonych temperatur. Można otrzymać, w ten sposób, jeden z trzech możliwych do uzyskania kształtów przebiegu $I_p = f(T)$, czyli jedną z trzech skal temperatur: zagęszczoną na początku zakresu (krzywa a na rys. 10 b), zagęszczoną na końcu zakresu (krzywa b), zagęszczoną na początku i na końcu (krzywa c). Krzywa c pozwala na najlepszą linearyzację skali termometru. Ważnym czynnikiem w doborze parametrów termometru, w układzie szeregowy, jest termiczne obciążenie termistora, które wynosi (przy uwzględnieniu (8) i (22))

$$P_m = I_p^2 R_T = U_Z^2 \frac{Ae^{\frac{B}{T}}}{\left[R_M+R_S+Ae^{\frac{B}{T}}\right]^2} \tag{24}$$



Rys. 10. Termometr termistorowy w układzie szeregowym a) układ, b) wykres zależności $I_p = f(T)$, c) wykres zależności $P = f(T)$.

Przebieg zależności mocy wydzielonej w termistorze P od mierzonej temperatury T, przedstawiono na rys. 10 c). Maksymalna wartość mocy występuje dla temperatury T_M, określonej z równania $\frac{\partial P}{\partial T} = 0$

$$T_M = \frac{B}{\ln\frac{R_M+R_S}{A}} \tag{25}$$

i wynosi

$$P_M = \frac{U_Z^2}{4(R_m+R_S)} = \frac{U_Z^2}{4R_{Tm}} \tag{26}$$

Przyrost temperatury termistora w stosunku do otoczenia, można uwzględnić przy wzorcowaniu, jeśli warunki oddawania ciepła są niezmienne. W takim przypadku obciążenie termistora można zwiększać kilkukrotnie. Gdy warunki oddawanie ciepłasą zmienne, na przykład wskutek zmian środowiska lub jego prędkości, moc wydzielana w termistorze należy ograniczyć zgodnie z wymaganą dokładnością pomiaru. Wartość dopuszczalnej mocy P_{dop} wydzielonej w termistorze, określa się zależności

$$P_{dop} \leqslant k\,\Delta T_T \tag{27}$$

gdzie

k - współczynnik strat termistora dla danego termistora i danego ośrodka,
ΔT_T - dopuszczalny przyrost temperatury termistora wynikający z dopuszczalnej niedokładności pomiaru.

Termometry termistorowe w układzie szeregowym stosuję sie do pomiarów o niedużej dokładności 1÷2%. Niepełne wykorzystanie skali termometru (rys. 11 b) oraz jej nieliniowość to główne wady tych przyrządów. Lepsze własności metrologiczne mają termometry termistorowe w układach mostkowych. Budowane są dla małych i dużych zakresów pomiarowych, a szczególnie do pomiaru różnic temperatur. Na rys. 11. przedstawiono termometr termistorowy, w układzie mostka niezrównoważonego. Przebieg zmian prądu miernika I_p od zmian mierzonej temperatury T ma postać

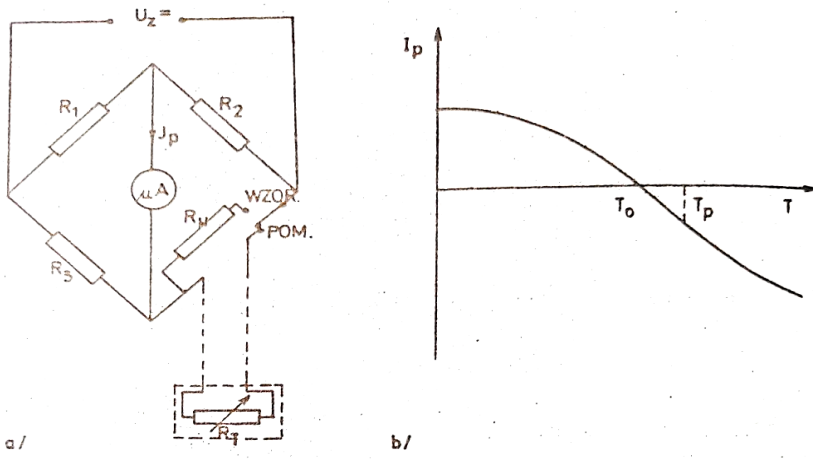
$$I_P = U_z \frac{\exp\frac{B}{T} - \exp\frac{B}{T_0}}{a\exp\frac{B}{T} - b\exp\frac{B}{T_0}} e^{\frac{B}{T}} \tag{28}$$

gdzie:

$$a = R_{T0} + R_2 + R_3 + R_P + R_{T0}\cdot\frac{R_P}{R_3}$$

$$b = R_P + R_{T0}\frac{R_p - R_2}{R_3} + \frac{R_3}{R_{T0}}(R_2 + R_P)$$

R_{T0} - rezystancja termistora w temperaturze T_0 (odpowiadającej równowadze mostka).

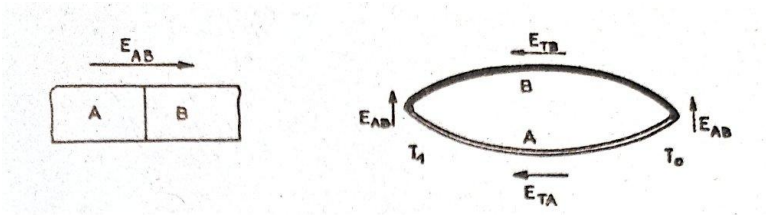


Rys. 11. Termometr termistorowy w układzie mostka nierównoważonego: a) układ, b) przebieg zmienności prądu miernika od mierzonej temperatury, T_0 - temperatura odpowiadająca równowadze mostka, T_p - temperatury przegięcia charakterystyki.

Przebieg zależności (28) przedstawiono na rys. 11 b). Przez odpowiedni dobór stosunku rezystancji w gałęziach mostka, można przesunąć punkt przegięcia przebiegu $I_P = f(T)$, do dowolnego punktu, leżącego w zakresie mierzonych temperatur lub też poza nim. Można w ten sposób, uzyskać jedną z trzech możliwych skal termometru, analogicznie jak w termometrze w układzie szeregowym.

2.4 Czujniki termoelektryczne

Na styku dwu różnych metali A i B (rys. 12 a) powstaje siła termoelektryczna Peltiera. Przyczyną jej powstawania są różnice w koncentracji swobodnych elektronów i w pracach wyjścia elektronów z tych metali.



Rys. 12. Obwody termoelektryczne.

Silę termoelektryczną Peltiera można zapisać wzorem:

$$E_{AB} = \frac{-V_A - V_B}{e} + \frac{k\,T}{e}\ln\frac{N_A}{N_B} \tag{29}$$

gdzie:

V_A, V_B oraz N_A i N_B - prace wyjścia i liczby swobodnych elektronów w jednostce objętości w metalach A i B,
k - stała Boltzmanna,
T - temperatura bezwzględna,
e - ładunek elektronu.

W przewodniku, którego końce znajdują się odpowiednio w temperaturze T_0 i T_1 powstaje siła termoelektryczna Thomsona, będąca wynikiem różnego zagęszczenia elektronów, wzdłuż długości przewodnika.

Wartość siły termoelektrycznej Thomsona określa zależność

$$E_T = \sigma(T_1 - T_0) \tag{30}$$

gdzie:

σ - współczynnik Thomsona dla danego metalu.

W zamkniętym obwodzie złożonym z dwóch metali A i B o rożnych temperaturach styku (rys. 12 b) powstaje siła termoelektryczna jako suma następujących składników

$$E = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_0) + E_{TA} - E_{TB} \tag{31}$$

Podstawiając zależność (29) i (30) do (31) i przekształcając otrzymamy

$$E = \frac{k}{e}\ln\frac{N_A}{N_B}(T_1 - T_0) + (\sigma_B - \sigma_A)(T_1 - T_0) \tag{32}$$

W normalnym obwodzie elektrycznym obydwa rodzaje sił termoelektrycznych Peltiera i Thomsona są nierozdzielne, może więc wyrażenie (32) zapisać w postaci

$$E = \alpha(T_1 - T_0) \tag{33}$$

przy czym:

α jest funkcją temperatury

i zależność (33) jest nieliniowa.

Zależność (33) stanowi podstawy wykorzystania układu dwóch różnych metali, do pomiaru temperatury. Dwa różne metale złączone na jednym końcu, przeznaczone do pomiaru temperatury, stanowią

termoelement (termoogniwo). Miejsce złączenia metali nazywa się spoiną, jeżeli znajduje się ona w temperaturze pomiarowej jest spoiną pomiarową, jeśli znajduje się w temperaturze odniesienia jest spoiną odniesienia.
W obwodzie składającym się z trzech różnych metali A, B i C o spoinach 1, 2 i 3 temperaturach T_1, T_2, T_3 (rys. 13) siła termoelektryczna całego obwodu wynosi

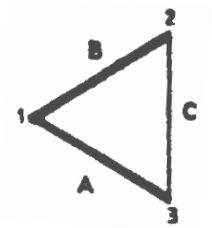
$$E = E_{AB} + E_{BC} + E_{CA} \tag{34}$$

Dla $T_1 = T_2 = T_3 = T_0$ jest E = 0 można więc zapisać

$$-E_{AB\,T_0} = E_{BC\,T_0} + E_{CA\,T_0} \tag{35}$$

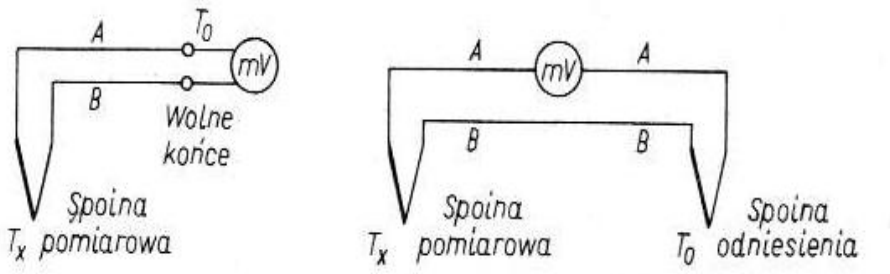
Dla równości dwu temperatur $T_2 = T_3 = T_0$ przy odmiennej T_1 otrzymamy

$$E = E_{AB\,T_1} - E_{AB\,T_0} \tag{36}$$



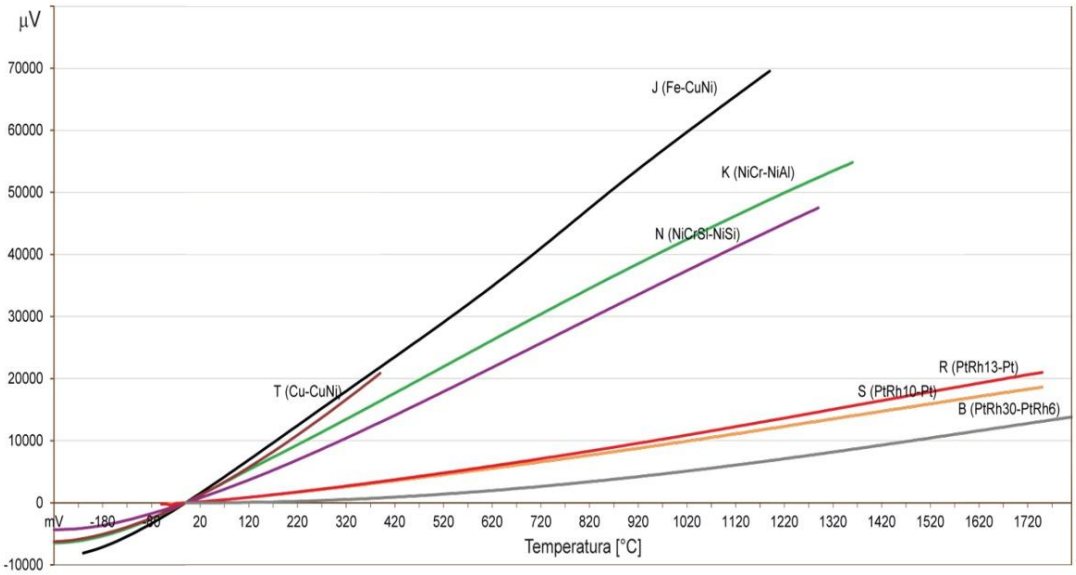
Rys. 13. Obwód termoelektryczny złożony z trzech różnych metali.

Z zależności (36) wynika, że siła termoelektryczna obwodu złożonego z dwu metali A i B nie ulegnie zmianie, po włączeniu metalu trzeciego, pod warunkiem, że powstałe dodatkowe spoiny mają taką sama temperaturę jak spoina BA, do której dołączono trzeci metal. Rozważanie to można uogólnić na większą liczbę metali. Można więc do końca termoelementu o temperaturze odniesienia T_0, dołączyć przewody miedziane, nie powodując powstawanie błędów, byle temperatury powstałych spoin były sobie równo. Na tej podstawie można mierzyć siłę termoelektryczną, wprowadzając miernik do obwodu termoelektrycznego, rozcinając ten obwód w spoinie lub między spoinami. Utrzymuje się w ten sposób jeden z układów pomiarowych przedstawionych na rys. 14.

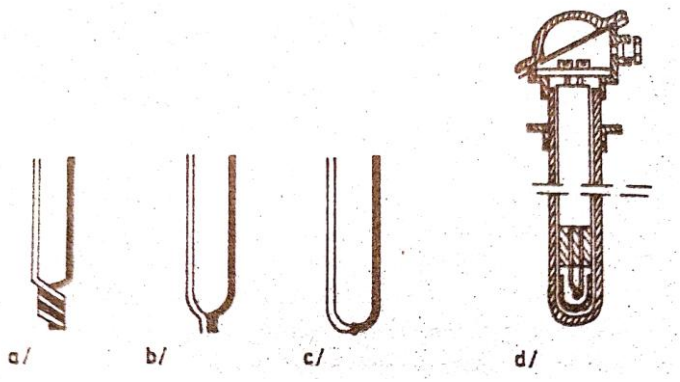


Rys. 14. Układy pomiarowe z termoelementami.

Termoelementy mogą być wykonywane w zasadzie z wykorzystaniem dowolnej kombinacji metali. Powinny jednak spełniać następujące wymogi: zapewnić liniowość, powtarzalność i stałość charakterystyk termoelektrycznych, być odporne na wpływy środowiska przemysłowego, być tanie. Podstawowe materiały do wykonywania termoelementów przedstawiono w tabeli 3, a charakterystyki termoelektryczne wybranych termoelementów na rys. 15. Termoelementy należą do najbardziej rozpowszechnionych czujników temperatury. Przy ich wykorzystaniu można mierzyć temperatury, w zakresie -260 do +3000°C. Spoiny termoelementów można wykonać przez skręcanie, zgrzanie, spawanie lub lutowanie (rys. 16. a), b), c)).



Rys. 15. Charakterystyki termometryczne termoelementów.



Rys. 16. Sposoby wykonania spoin termoelementów oraz szkic konstrukcji czujnika termoelektrycznego.

Tabela 3. Siły termoelektryczne wybranych metali względem platyny w temperaturze 100°C przy temperaturze odniesienia 0°C.

Metal	Siła termoelektryczna mV	Metal	Siła termoelektryczna mV
Kopel	- 4,00	Miedź	+0,76
Konstantan	-3,51	Molibden	+1,45
Nikiel	-1,98	Żelazo	+1,89
Alumel	-1,29	Nikiel-chrom (85% Ni, 12% Cr)	+2,20
Platyna	0		
Platynorod (90%Pt, 10%Rd)	+0,643	Chromel	+2,81

W pomiarach przemysłowych termoelementy umieszcza się w osłonach metalowych lub ceramicznych (rys. 16. d), aby zabezpieczyć je przed mechanicznymi i chemicznymi wpływami środowiska. Dobór osłon, konstrukcji i materiałów na osłony jest trudnym zadaniem, w którym należy uwzględnić wiele sprzecznych wymogów.

2.5. Układy pomiarowe termometrów termoelektrycznych

Termoelement jest przetwornikiem temperatury mierzonej T_1 w napięcie E(T), gdy temperatura spoiny odniesienia lub wolnych końców T_o jest znana. Charakterystyki temperaturowe termoelementów są podawane w postaci tablic lub wykresów, przy znamieniowej temperaturze odniesienia $T_{on} = 0^oC$.

W przypadku, gdy temperatura odniesienia T_o różni się od znamionowej T_{on} do pomierzonej wartości siły termoelektrycznej E' (lub temperatury T) należy wprowadzić poprawkę ΔE (lub ΔT) wynikającą z charakterystyki danego termoelementu. Jeżeli temperatura odniesienia zawiera się w przedziale $0^oC < T_o < 50^oC$, to poprawkę można obliczyć z zależności

$$\Delta E = \propto_t T_o \tag{37}$$

a więc

$$E = E' + \propto_t T_o \tag{38}$$

gdzie:

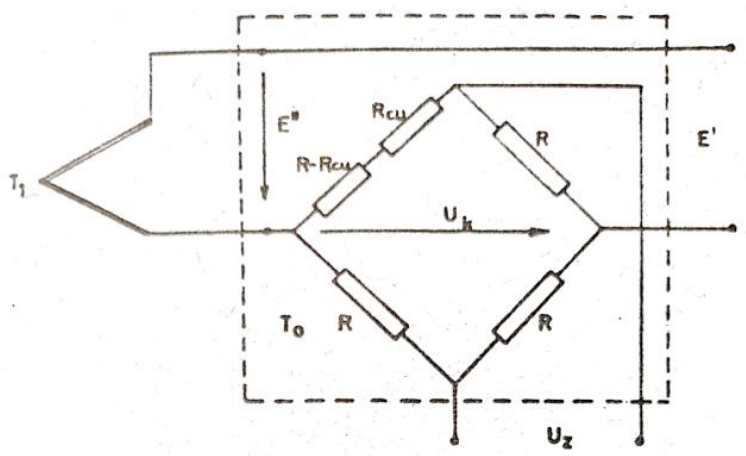
E – siła termoelektryczna dla $T_{o\pi} = 0^oC$,
E'- siła termoelektryczna dla $T_o = T_{on}$,
T_o – rzeczywista temperatura odniesienia,

Wartość współczynnika α_t wynosi dla termoelementu:

PtRh – Pt	→	6μV/K
NiCr – Ni	→	40,4μV/E
Fe-Const	→	53,2μV/K
Cu-Const	→	40,6μV/K

W warunkach przemysłowych, temperatura spoiny odniesienia ulega zazwyczaj znacznym wahaniom, zachodzi więc konieczność kompensacji jej wpływu. Osiąga się to następującymi sposobami:

1. Oddaleniem złącza odniesienia, do obszaru mało zmiennej temperatury. Przeniesienie spoiny odniesienia realizuje się przez zastosowanie przewodów z tych samych materiałów co termoelement, lub przewodów z innych metali nie wnoszących dodatkowych sił termoelektrycznych do obwodu. Przewody odpowiednio dobrane do danego termoelementu, nazywa się często przewodami kompensacyjnymi. Na przykład, dla termoelementu PtRh-Pt przewód kompensacyjny dodatni wykonany jest z miedzi, a ujemny ze stopu miedzi z niklem, dla termoelementu NiCr-Ni, przewód kompensacyjny dodatni wykonywany jest z miedzi, a ujemny z konstantanu.
2. Stabilizując temperaturę spoiny odniesienia; najczęściej przez umieszczenie w termostacie o temperaturze 50^oC, o dokładności stabilizacji w granicach $0{,}1 \div 1^oC$ lub w kąpieli wody z lodem, rzadziej przez (umieszczenie) zakopanie w ziemi na głębokości 1÷2m.
3. Stosując układy kompensacji, zmian siły termoelektrycznej pod wpływem zmian temperatury odniesienia. Na rys. 17. przedstawiono taki układ, z wykorzystaniem niezrównoważonego mostka Wheatstone'a. Mostek składa się z trzech niezależnych od temperatury rezystorów (na przykład wykonanych z manganinu) i rezystora wykonanego z miedzi lub niklu. Przy zmianie temperatury odniesienia powstaje napięcie nierównowagi mostka U_K sumujące się z siłą termoelektryczną E termoelementu, dając w wyniku siłę termoelektryczną E', odpowiadającą temperaturze odniesienia $T_{o\pi}$ (równowadze mostka).



Rys. 17. Układ kompensacji siły termoelektrycznej przy zmianach temperatury odniesienia.

Załóżmy, że mostek jest zrównoważony w temperaturze T_{on}, że dla $T_o \neq T_{on}$ napięcie nierównowagi mostka zapiszemy

$$U_K = \frac{1}{4} U_Z \frac{\Delta R_{CU}}{R} \tag{39}$$

gdzie

$\Delta R_{CU} = R_{Cu} \cdot \alpha_{Cu} \cdot \Delta T_o = R_{Cu}\alpha_{Cu}(T_o - T_{on})$,
R_{Cu} – rezystancja rezystora miedzianego w temperaturze T_{on},
R – rezystancja rezystora manganinowego,
α_{Cu} – współczynnik temperaturowy rezystancji miedzi.

Dla małych zmian temperatury odniesienia T_{on}, zmiany siły termoelektrycznej, przy niezmiennej temperaturze spoiny pomiarowej T_1, można z dostateczną dokładnością zapiać jako

$$\Delta E = \propto_t \ (T_o - T_{on}) \tag{40}$$

Warunek kompensacji ma postać

$$\Delta E = U_K \tag{41}$$

a uwzględniając zależności (39) i (40) zapiszemy

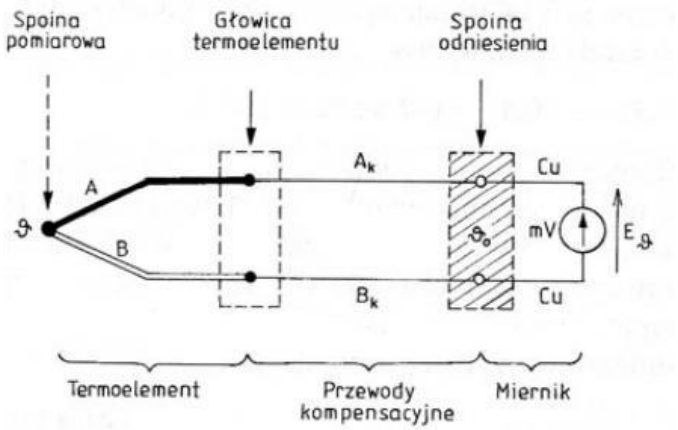
$$U_Z \frac{R_{Cu}}{R} = \frac{4 \propto_t}{\propto_{Cu}} \tag{42}$$

Z zależności (42), dla danego termoelementu (znane α_t), możemy przy zadanych wartościach napięcia zasilania U_Z i R_1 obliczyć wartość rezystora miedzianego (lub niklowego), spełniającego warunek kompensacji. Na przykład dla termoelementu miedź-konstantan

$$\frac{R_{Cu}}{R} = \frac{4{,}25 \cdot 10^{-3}}{U_Z} \tag{43}$$

przy $U_Z = 1$ V, $R = 100\Omega$ otrzymamy $R_{Cu} = 0{,}425\ \Omega$.

Układy pomiarowe termometrów termoelektrycznych realizowane są z wykorzystaniem miliwoltomierzy magnetoelektrycznych, elektronicznych, kompensatorów napięciowych i prądowych oraz woltomierzy cyfrowych.



Rys. 18. Układ termometru termoelektrycznego z miliwoltomierzem magnetoelektrycznym.

Najprostszy i często jeszcze stosowany w przemyśle, układ termometru termoelektrycznego z miliwoltomierzem, przedstawiono na rys. 18. Miliwoltomierz ma podziałkę opisaną w stopniach temperatury, wzorcowany jest przy założeniu określonej wartości rezystancji zewnętrznej R_Z. Na wartość rezystancji zewnętrznej składają się: rezystancja termoelementu R_t, rezystancja przewodów kompensacyjnych R_{pk}, rezystancja przewodów łączeniowych R_{pl} i rezystancja rezystora wyrównawczego R_w. Spełnienie warunku stałości rezystancji zewnętrznej nie jest możliwe, gdyż rezystancja termoelementu zmienia się wraz ze zmianą temperatury mierzonej, zaś wartości rezystancji przewodów kompensacyjnych i łączeniowych zmieniają się wraz ze zmianą temperatury otoczenia. Powstałe, w ten sposób, zmiany rezystancji zewnętrznej ΔR_Z są przyczyną powstawania błędu pomiarowego, o wartości

$$\Delta T = \frac{\Delta R_Z}{R_m + R_Z}(T_u - T_o) \tag{44}$$

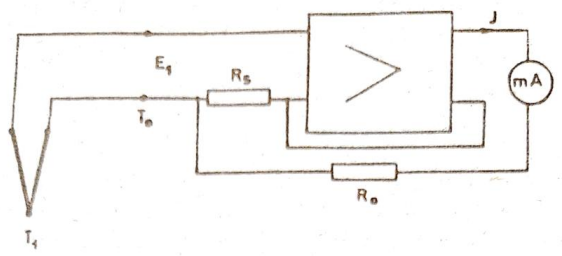
gdzie:

T_w – temperatura wskazana,
R_m – rezystencja miernika.

Aby więc utrzymać pomiar w żądanej klasie dokładności, przy oczekiwanej zmianie ΔR_Z, należy dobrać odpowiednio dużą wartość rezystancji miernika.

Zastosowanie miliwoltomierzy elektronicznych, do pomiaru napięć z termoelementów, pozwala na eliminację wpływu zmian rezystencji zewnętrznej ΔR_Z na wynik pomiaru. Przy bardzo dużej rezystancji wejściowej miliwoltomierzy, pomiar odbywa się w zasadzie bez poboru prądu. Niedogodnością termometrów z miliwoltomierzami elektronicznymi jest konieczność wprowadzenia dodatkowego źródła zasilania.

Bardzo często termometry termoelektryczne pracują w układach z kompensatorami: w pomiarach laboratoryjnych z kompensatorami o równoważeniu ręcznym, w pomiarach przemysłowych z autokompensatorami.



Rys. 19. Układy termoelementów termoelektrycznych z autokompensatorem statycznym.

Termometr termoelektryczny, w układzie autokompensatora statycznego, przedstawiono na rys. 19. Przy dużym wzmocnieniu wzmacniacza, napięcie na jego wejściu jest dużo mniejsze niż E_1 i napięcie sprzężenia zwrotnego $I \cdot R_a$, można więc zapisać

$$E_1 \approx R_s \cdot I \tag{45}$$

$$I \approx \frac{1}{R_s} \cdot E_1 = \frac{\propto_T}{R_a} T_1 \tag{46}$$

Prąd wyjściowy jest miarą mierzonej siły termoelektrycznej termoelementu, a więc i temperatury spoiny pomiarowej. W autokompensatorze tego typu, przy stałej wartości napięcia mierzonego, występuje napięcie nie kompensacji, na wejściu wzmacniacza

$$U_{wo} = E_1 - R_s I \tag{47}$$

Prąd wyjściowy może być mierzony analogowo lub cyfrowo.

2.6. Termometry cyfrowe z przetwornikami o wyjściu częstotliwościowym

Sygnały częstotliwościowe, których nośnikiem jest najczęściej napięcie sinusoidalne lub okresowo impulsowe o stałej amplitudzie zawierają informację pomiarową w częstotliwości nośnika. Sygnały te charakteryzują się łatwością wzmacniania i przesyłania na odległość, dużą odpornością na zakłócenia i są bardzo dogodne do pomiaru cyfrowego. Te korzystne własności sygnałów częstotliwościowych są przyczyną ciągłego poszukiwania nowych czujników pomiarowych, których wielkości wyjściowe są sygnałem częstotliwościowym. W pomiarach temperatury takim czynnikiem jest rezonator kwarcowy. Częstotliwość drgań własnych rezonatora kwarcowego zależy od jego grubości i stałych materiałowych i określona jest zależnością

$$f = \frac{B}{d} \cdot \sqrt{\frac{E}{\delta}} \tag{48}$$

gdzie:

d – grubość płytki,
E – moduł sprężystości,
δ - gęstość materiału,
B - współczynnik zależny od cięcia i sposobu pobudzenia.

Każdy z tych parametrów zależy od temperatury, a więc i częstotliwość drgań własnych zależy od temperatury. Można tę zależność opisać, z dobrym przybliżeniem, za pomocą wzoru

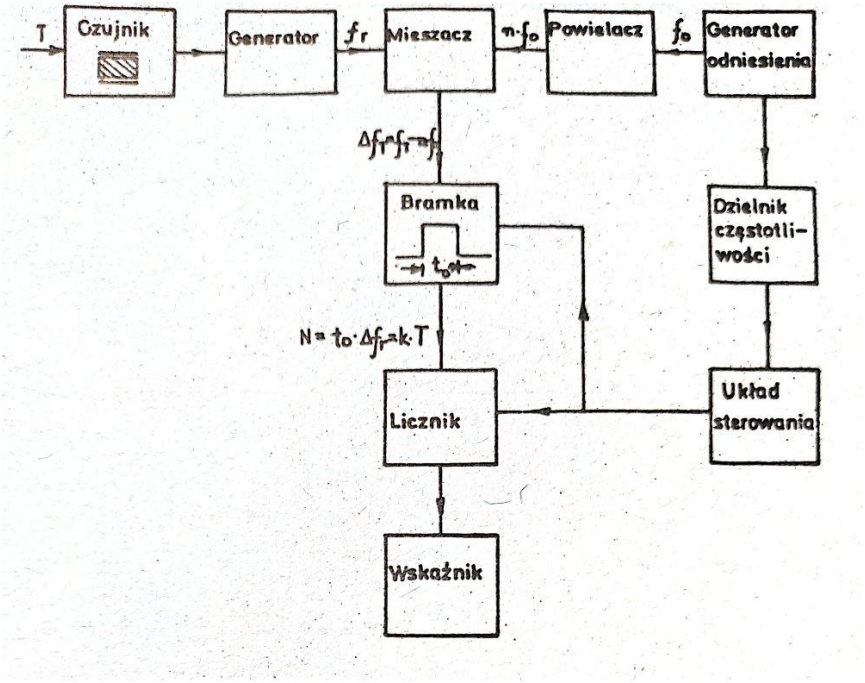
$$f = f_o[1 + \alpha(\Delta T)^2 + \beta(\Delta T)^2 + \gamma(\Delta T)^3 + \cdots] \tag{49}$$

W przypadku zastosowania kwarcu w generatorach, jako elementów do stabilizacji ich częstotliwości, dąży się do takiego cięcia płytek kwarcu, aby α≈0, a β i γ były możliwie małe. W przypadku stosowania kwarców jako czujników temperatury, wykonuje się inne cięcia tak, aby uzyskać α możliwie duże i nie zmieniające się z temperaturą, a β i γ były bliskie zeru. Tego typu czujnik kwarcowy charakteryzuje się dużą czułością rzędu 1000Hz/K, dużą stałością parametrów w czasie oraz stosunkowo małą stałą czasową. Przy zastosowaniu układu różnicowego z dwoma czujnikami kwarcowymi, można rozróżnić zmianę temperatury o 10^{-4}K, w czasie 10 s.

Takiej rozdzielności, przy podanym czasie pomiaru, nie można osiągnąć obecnie przez stosowanie innych typów czujników temperatury. Na rys. 20. przedstawiono schemat blokowy termometru kwarcowego. W termometrze sygnał generatora o częstotliwości f_T, odpowiadający temperaturze T czujnika, jest zdudniany (mieszany) z sygnałem stabilnej częstotliwości odniesienia f_o, otrzymywanej z generatora wzorcowego stabilizowanego kwarcem. Częstotliwość odniesienia f_o jest taka dobrana, aby dla temperatury czynnika 0°C, częstotliwość dudnień wynosiła

$$\Delta f_T = f_T - f_o = 0$$

Sygnał o częstotliwości różnicowej przechodzi przez bramkę otwartą na przeciąg wzorcowego odcinka czasu t_o. Liczba okresów zliczanych przez licznik w czasie t_o jest miarą temperatury czujnika. Wzorcowy odcinek czasu jest uzyskiwany również z generatora wzorcowego, wytwarzającego częstotliwość odniesienia f_o. Zakres pomiarowy termometrów z czujnikami kwarcowymi wynosi –60 do +300°C.



Rys. 20. Zasada działania cyfrowego termometru kwarcowego.

3. Właściwości dynamiczne czujników temperatury

Znajomość właściwości dynamicznych czujników temperatury jest potrzebna do:
a) Określania niezbędnego czasu umieszczania czujników w ośrodku badanym o stałej temperaturze, przy pomiarach dorywczych,
b) Wyznaczania błędu dynamicznego, w celu właściwego doboru czujnika przy pomiarach temperatur zmiennych w czasie,
c) Uzyskania możliwości porównywania właściwości różnych czujników,
d) Określania właściwości czujnika jako części układów automatycznej regulacji temperatury.

3.1. Idealny czujnik temperatury

Za idealny czujnik temperatury przyjmuje się czujnik wykonany na przykład w postaci walca lub kuli, z materiału o nieskończenie dużej wartości przewodności cieplnej $\lambda \to \infty$, masie m i cieple właściwym c. Wymiana ciepła z otoczeniem zachodzi wyłącznie drogą wnikania przez powierzchnię zewnętrzną γ czujnika. Pojemność cieplna $C_T = m \cdot c$ czujnika jest pomijalnie mała, w stosunku do pojemności cieplnej ośrodka badanego. Jeżeli temperatura ośrodka, w którym zanurzony jest czujnik zmieni się gwałtownie, z wartości T_o do wartości T_x, to odpowiedź czujnika y = T(t) opisuje równanie różniczkowe. Równanie to wyznacza się z bilansu energii w stanie przejściowym. Ciepło dQ dopływające do czujnika z otoczenia, w czasie dt wynosi

$$dQ = \propto F(T_X - T)dt \tag{50}$$

gdzie:

α – współczynnik przejmowania ciepła między czujnikiem a ośrodkiem badanym (przyjęto α = const)[$W/m^2 \cdot {}^oC$].

Ilość ciepła zaakumulowana przez czujnik wyraża się należnością

$$dQ = m \cdot c \cdot dT \tag{51}$$

Porównując wzory (50) i (51) otrzymamy należność

$$\alpha \cdot F(T_z - T)dt = m \cdot c \cdot dT \tag{52}$$

Po uporządkowaniu otrzymamy

$$\frac{m \cdot c}{\alpha F}\frac{dT}{dt} + T = T_x \tag{53}$$

$$\tau_T + T = T_X \tag{54}$$

W rozpatrywanych warunkach stała czasowa τ czujnika idealnego wynosi

$$\tau = \frac{m \cdot c}{\alpha\, F} \tag{55}$$

Równanie (53) można napisać w formie

$$\frac{dT}{T_X - T} = \frac{dt}{\tau} \tag{56}$$

Całkując to równanie obustronnie, otrzymamy odpowiedź czujnika idealnego na wymuszenie skokowe

$$T = (T_X - T_O)\,(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_o \tag{57}$$

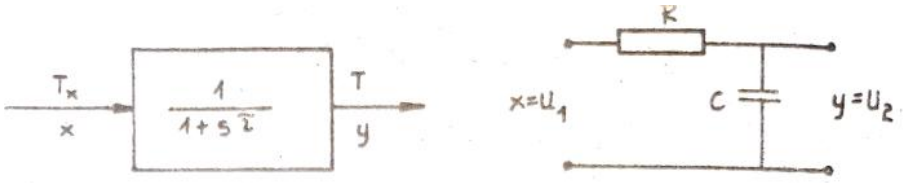
Po dokonaniu transformacji Laplace'a obu stron równania (54) możemy wyznaczyć transmitację operatorową czujnika

$$G(s) = \frac{1}{1 + s \cdot \tau} \tag{58}$$

Tak więc czujnik idealny stanowi człon inercyjny o stałej τ.

Zachowuje się podobnie jak szeregowe połączenie opornika i kondensatora (rys. 21). Pojemności cieplnej termometru $C_T = c \cdot m$ [$\frac{W \cdot s}{K}$] odpowiada rezystancja elektryczna C, a oporności cieplnej $R_T = \frac{1}{\alpha F}\left[\frac{K}{W}\right]$ odpowiada rezystancja elektryczna R.

Właściwości rzeczywistych czujników temperatury odbiegają znacznie od właściwości czujnika idealnego, głównie ze względu na stosowane konstrukcje i materiały $\lambda \neq \infty$, zmienność wartości współczynnika przejmowania ciepła α i stałej czasowej τ nie tylko z temperaturą, ale również z chwilową różnicą temperatur czujnika z ośrodka.



Rys. 21. Analog elektryczny idealnego czujnika temperatury.

Model czujnika idealnego dobrze opisuje właściwości dynamiczne czujników temperatury bez osłon, takich jak termoelementy wykonane z cienkich drutów, niektóre czujniki rezystancyjne, a także termometry szklane.

Dokładny opis matematyczny właściwości dynamicznych rzeczywistych czujników temperatury (szczególnie z osłonami), prowadzi do skomplikowanych postaci rozwiązań i małej przydatności praktycznej. Dlatego właściwości dynamiczne czujników temperatury, najczęściej bada się doświadczalnie, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy czujników.

3.2. Odpowiedź idealnego czujnika temperatury na skok prędkości

Poznanie zachowania się czujnika temperatury, pod wpływem skoku prędkości, pozwala, między innymi, ustalić dopuszczalną szybkość narastania temperatury obiektu, przy wyznaczaniu charakterystyk statycznych czujników temperatury. Znane powinny być parametry dynamiczne badanych czujników oraz założona dopuszczalna wartość błędu dynamicznego.

Odpowiedź na wymuszenie typu $x = n\,t\,1(t)$, które ma transformatę Laplace'a X(s)=a/s^2, można wyznaczyć z równań

$$Y(s) = X(s)\,G(s) = \frac{1}{1+s\tau}\frac{a}{s^2} \tag{59}$$

Po dokonaniu transformacji odwrotnej, otrzymuje się

$$y(t) = at\ - a\tau\,(1 - e^{\frac{t}{\tau}}) \tag{60}$$

Równanie stanu ustalonego, dla dostatecznie dużego t, ma postać

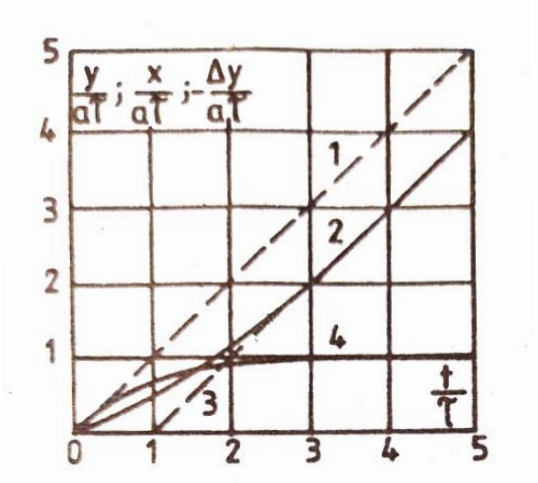
$$lim_{t\to\infty}\, y(t)\ = n(t-\tau) \tag{61}$$

Błąd dynamiczny wynosi

$$\Delta y(t) = y(t) - x(t) = at - a\tau(1 - e^{\frac{t}{\tau}}) - at = a(e^{\frac{t}{\tau}} - 1) \tag{62}$$

Pierwszy człon wyrażenia (62) zanika, tym prędzej im mniejsza jest stała czasowa τ. W chwili t=τ, wartość jego wynosi $a\tau^{-1}$=aτ/3. Drugi człon wyrażenia na błąd pomiaru nie zanika z upływem czasu. Jego wartość zależy od x=a i od stałej τ. Jest to błąd ustalony o charakterze dynamicznym, którego wartość nie zależy od właściwości układu w stanie statycznym.

Z powodu istnienia dynamicznego błędu ustalonego, czujnik wskazuje wartość wielkości mierzonej, która miała miejsce w chwili t = -τ, czyli pomiar jest opóźniony o czas τ, względem zjawiska. Na rys. 22. przedstawiono przebieg odpowiedni i przebieg błędu dynamicznego, dla wielkości bezwymiarowych.



Rys. 22. Odpowiedź idealnego czujnika temperatury na skok prędkości i przebieg błędu dynamicznego
1- wymuszenie x/aτ = t/τ, 2 - odpowiedź $y/a\tau = \frac{t}{\tau}(1 - e^{\frac{t}{\tau}})$, 3 - asymptota przebiegu odpowiedzi y/aτ = t/τ – 1, 4- błąd dynamiczny $\frac{\Delta y}{a\tau} = e^{-\frac{t}{\tau}-1}$.

3.3. Doświadczalne wyznaczenie właściwości dynamicznych czujników temperatury

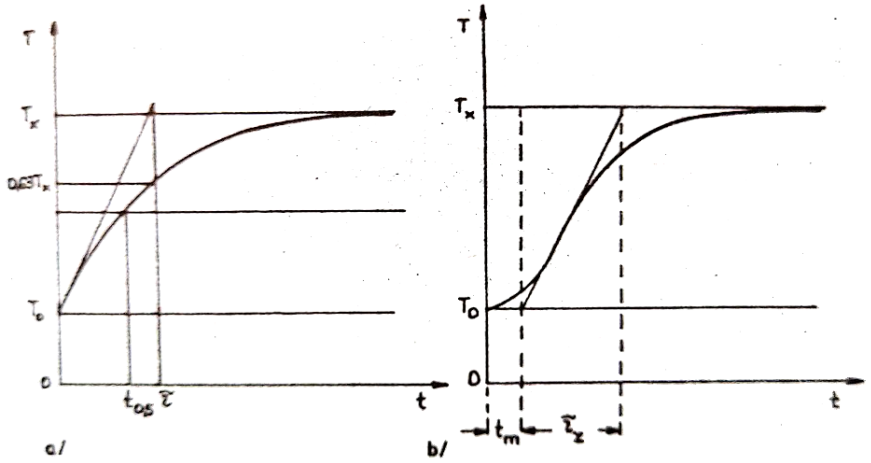
Właściwości dynamiczne czujników temperatury bada się najczęściej przez doświadczalne wyznaczenie odpowiedzi na wymuszenie skokowe lub impulsowe, w warunkach pracy i przy temperaturze, w jakiej badany czujnik będzie stosowany. Te dwa wymuszenia standardowe, skok jednostkowy i impuls jednostkowy są w dziedzinie temperatur najłatwiejsze do praktycznej realizacji.

Na rys. 23 przedstawiono odpowiedzi skokowe czujników temperatury oraz sposoby określania wskaźników charakteryzujących odpowiedź skokową. Stałą czasową τ czujnika idealnego można określić jako podatyczną w dowolnym punkcie lub jako czas, po którym wartość T = 0,632 T_x. Można ją również wyznaczyć przez pomiar czasu połówkowego $t_{0,5}$, po upływie którego odpowiedź skokowa osiągnie połowę ustalonej wartości. Stałą czasową znajdujemy wówczas z wzoru

$$\tau = \frac{t_{0,5}}{1n\ \ 2} = \frac{t_{0,5}}{0.693} \tag{63}$$

Nie zawsze podaje się pełną charakterystykę dynamiczną czujnika. Często opisuje się właściwości dynamiczne czujników za pomocą wskaźników liczbowych, charakteryzujących pewne cechy czujników i umożliwiających ich porównanie. Opis właściwości dynamicznych, rzeczywistych czujników temperatury, przedstawia się za pomocą stałej czasowej następczej τ_Z i czasu opóźnienia zastępczego t_m.

Wskaźniki te definiowane są następująco: stała czasowa τ_Z jest to przedział czasu, w którym odpowiedź skokowa osiągnęłaby swą wartość końcową, gdyby zmieniała się ze stałą prędkością równą maksymalnej prędkości zmian odpowiedzi skokowej (rys. 23. b). Czas opóźnienia zastępczego t_m jest przedziałem czasu, pomiędzy chwilą podania wymuszenia a chwilą początkową przedziału odpowiadającego stałej czasowej zastępczej, to jest chwilą wyznaczoną przez przecięcie się z osią czasu stycznej do odpowiedzi skokowej, w punkcie odpowiadającym maksymalnej prędkości zmian tej odpowiedzi (rys. 23. b). Są używane jeszcze inne wskaźniki liczbowe opisujące właściwości dynamiczne czujników temperatury.



Rys. 23. Odpowiedzi na skok jednostkowy czujników temperatury a) idealnego, b) rzeczywistego.

Często w praktyce czujniki rzeczywiste opisuje się jako układ dwu szeregowe połączonych, wstecznie na siebie nie oddziaływujących, członów inercyjnych pierwszego rzędu o transmitancji

$$G(s) = \frac{1}{(1+s\tau_1)\,(1+a\tau_2)} \tag{64}$$

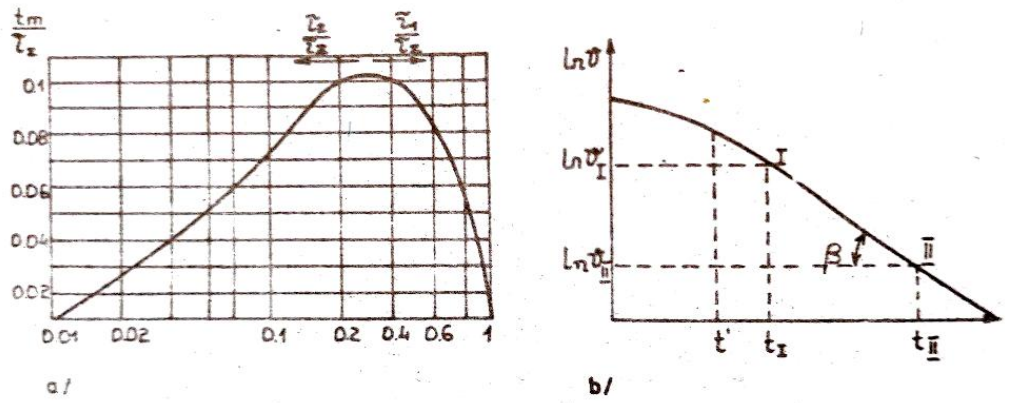
gdzie:

τ_1, τ_2 – zastępcze stałe czasowe.

Odpowiedź na skok jednostkowy takiego czujnika ma postać

$$T = T_X\left[1 - \frac{\tau_1 e^{-\frac{t}{\tau}} - \tau_2 e^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau_1 - \tau_2}\right] \tag{65}$$

Wartości zastępczych stałych czasowych τ_1 i τ_2 wyznaczyć można z wykresu (rys. 23) gdy znany jest stosunek wyznaczonych doświadczalnie wartości stałej zastępczej τ_Z i czasu opóźnienia zastępczego t_m.



Rys. 24. Wykresy do wyznaczania stałych czasowych: a) z równania, b) w metodzie Kandratiewa.

Odpowiedź na skok jednostkowy z temperatury T_o do T_x, rzeczywistego termometru (zanurzonego w ośrodku płynnym), można opisać wyrażeniem (metoda Kondratiewa)

$$\theta = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\frac{t}{\tau_n}} \tag{66}$$

gdzie:

θ- względna zmiana temperatury $\theta = \frac{T-T_O}{T_X-T_O}$,

A_n – stałe zależne od właściwości materiału czujnika i jego konstrukcji,

τ_n – stałe czasowe spełniające nierówności $T_1 > T_2 > T_3$ ….

Modelem czujnika temperatury jest w metodzie Kondratiewa układ inercyjny n-tego rzędu o przepustowości

$$G(s) = \frac{1}{(1+s\tau_1)(1+s\tau_2)\ldots(1+s\tau_n)} \tag{67}$$

Stałe czasowe $\tau_1 \ldots \tau_2$ wyznacz się następująco: zarejestrowaną w danych warunkach odpowiedź czujnika, na skok jednostkowy, wykreśla się w postaci V(t), w półlogarytmicznym układzie współrzędnych (rys. 24. b). Uzyskaną krzywą aproksymuje się na końcowym odcinku linią prostą. Na tym odcinku wpływ największej stałej czasowej jest dominujący i przyjmuje się, że nachylenie tej prostej równa jest stałej czasowej τ_1.

Dla odcinka prostoliniowego t>t' można zapisać

$$V = A_n e^{-\frac{t}{\tau_1}} \qquad \text{lub} \qquad \ln V = ln\ A_n - \frac{t}{\tau_1} \tag{68}$$

A więc

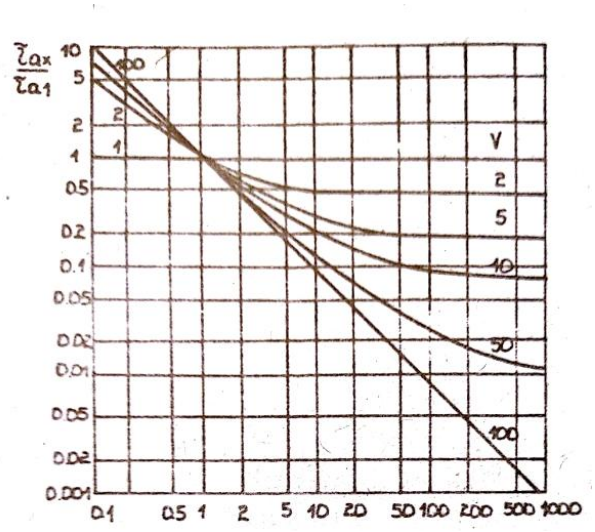
$$\tau_1 = tg\beta = \frac{t_{II}-t_I}{ln\, V_I - ln\, V_{II}} \tag{69}$$

Natomiast współczynnik λ_1 wynosi

$$A_1 = V_I e^{\frac{t_I}{\tau_1}} \tag{70}$$

Następnie wyznacza się różnicę $V - A_1 e^{\frac{t}{\tau_1}}$ i konstruuje wykres $\ln (V - A_1 e^{\frac{t}{\tau_1}})$. Wykreślona krzywa zawiera odcinek prostoliniowy, z którego jak poprzednio wyznacza się stałą czasową τ_2. W taki sposób można wyznaczyć stałe czasowe τ_3 a nawet τ_4.

Właściwości dynamiczne czujników temperatury zależą w znacznej mierze od ośrodka, w którym pracują. Powodowane jest to zmianą współczynnika α. Liensweg opracował nomogram umożliwiający obliczenie parametrów dynamicznych czujnika, dla danego ośrodka o współczynniku α_x, gdy znane są charakterystyki dynamiczne czujnika w dwu różnych ośrodkach o znanych wartościach współczynników α. Nomogram stanowi rodzinę krzywych v=f($\frac{\tau_{ax}}{\tau}, \frac{\alpha_x}{\alpha_1}$), rys. 25. Pomiary czujnika przeprowadza się najczęściej w powietrzu i w wodzie. Z wyznaczonych charakterystyk dynamicznych znajduje się w obu ośrodkach na przykład stałe czasowe τ_p i τ_w.



Rys. 25. Wykres parametru charakterystycznego $v = f(\frac{\tau_{ax}}{\tau_{a1}}, \frac{\alpha_x}{\alpha_1})$

Parametr charakterystyczny v badanego czujnika wyznacza się z nomogramu znając stosunek stałych czasowych $\frac{\tau_w}{\tau_p}$ oraz stosunek współczynników $\frac{\alpha_w}{\alpha_p}$. Posługując się tym samym nomogramem, gdy znany jest współczynnik α_x, można ze stosunku $\frac{\alpha_x}{\alpha_p}$ i wartości γ określić stosunek $\frac{\tau_x}{\tau_p}$, a więc i poszukiwaną wartość stałej czasowej w warunkach pracy.

3.4. Błędy dynamiczne w pomiarach temperatury

Dla pomiarów ośrodków o stałej temperaturze właściwości dynamiczne czujnika temperatury decydują o czasie trwania pomiaru. Dla czujnika idealnego względny błąd pomiaru wynosi

$$\delta = \frac{T-T_X}{T_X} = -e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{71}$$

Im później dokonuje się pomiaru temperatury czujnika od chwili umieszczenia go w badanym ośrodku, tym mniejszy jest błąd względny pomiaru. Błąd mniejszy niż 1% osiąga się po czasie 4,6 τ, a mniejszy niż 0,1% po czasie 6,9 τ. Właściwości dynamiczne czujnika mają decydujący wpływ na dokładność pomiarów temperatur zmiennych w czasie. Dla czujnika idealnego moduł i argument transmitancji widmowej określonej z zależności (58) wynosi

$$G(\omega) = \frac{T_m}{T_{xm}} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \tag{72}$$

$$\varphi(\omega) = -arc\ tg\ (\omega\tau) \tag{73}$$

Tak więc przy sinusoidalnej zmianie temperatury ośrodka o amplitudzie zmian T_{xm} amplituda zmian temperatury czujnika T_m wynosi

$$T_m = T_{xm}\frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \tag{74}$$

A opóźnienie

$$t_m = \frac{aro\ tg(\omega\tau)}{\omega} \tag{75}$$

Z równań (74) i (75) wynika, że czujnik idealny przenosi wiernie zmiany temperatury, dla których spełniony jest warunek ω<<1.

4. Pomiary

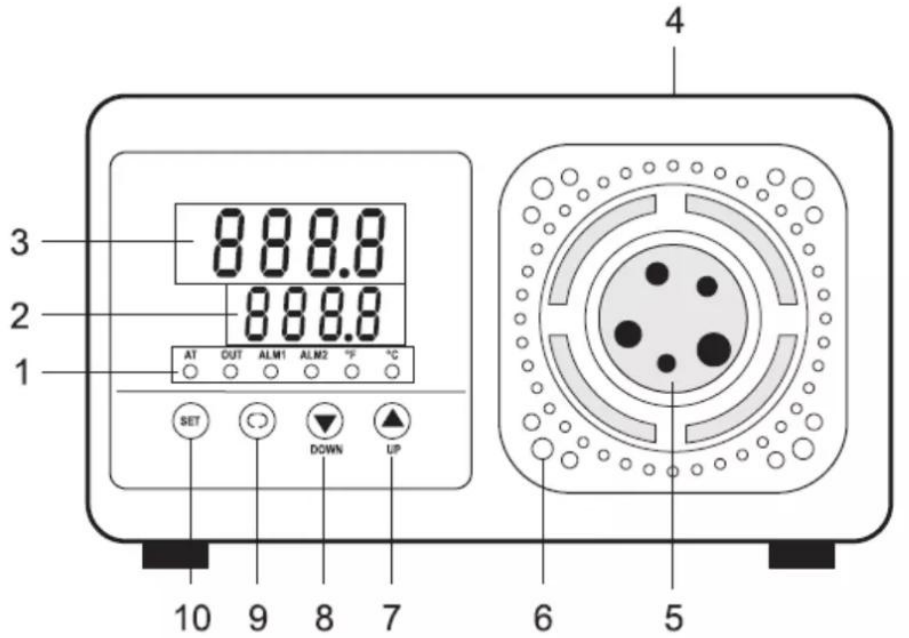
1. Wyznaczyć charakterystyki temperaturowe termoelementów

Należy wyznaczyć charakterystyki temperaturowe termoelementów, w zakresie temperatur od + 20 do +100^{o}C. Badane termoelementy umieścić w kalibratorze temperatury TC-150. Temperaturę zmienia się w zakresie od temperatury otoczenia do +100^{o}C co 5 ^{o}C.

Zapoznaj się z instrukcją kalibratora temperatury TC-150, którego panel przedni przedstawiony jest na rys. 26.

Spoiny odniesienia termoelementów umieszczone są w termostacie o stałej temperaturze T_o, której wartość mierzy się również termometrem. Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk temperaturowych termoelementów, w zakresie temperatur 20 ÷ 100^{o}C.

Na podstawie otrzymanych wartości sił termoelektrycznych E_1 i odpowiadających im temperatur T_1 wykreślić charakterystyki termoelementów do charakterystyk $E=f(T_1)$, przy T_o=const. Sprowadzić pomierzone charakterystyki termoelementów do charakterystyk $E=f(T_1)$, odpowiadające temperaturze odniesienia $T_o=T_{on}=0^oC$, przez wprowadzenie poprawek zgodnie z zależnością (38). Porównać otrzymane charakterystyki badanych termoelementów z ich charakterystykami podanymi w tabeli 4. W przypadku istnienia niezgodności, wytłumaczyć przyczyny ich powstawania.



Rys. 26. Kalibrator temperatury TC-150 do wyznaczania charakterystyk temperaturowych.

1. Wyświetlanie funkcji:
   AT - Wyświetlane dla potrzeb fabrycznych;
   OUT - Wskaźnik grzania;
   ALM1 - Przekroczona temperatura (element grzewczy wyłączony);
   ALM2 - Przekroczona temperatura (aktywne wzmocnione chłodzenie);
   °C - Wyświetlanie temperatury w jednostkach europejskich – stopniach Celsjusza;
2. Zielone wskazanie „temperatura docelowa”;
3. Czerwone wskazanie „aktualna temperatura”;
4. Otwór pomiarowy dla czujników stykowych (maks. Średnica 3 mm);
5. Korpus kalibracyjny (korpus grzewczy) z otworami;

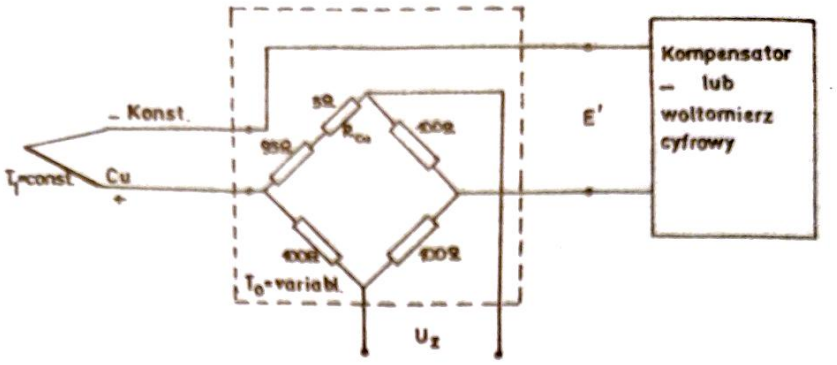
Tabela 4. Charakterystyki termometryczne wybranych termoelementów PN-81/M-53854/.

Temperatura °C	**E [mV]**			
	PtRh	**NiCr-NiAl**	**Fe-Konst.**	**Cu-Konst.**
1	2	3	4	5
0	0	0	0	0
10	0,055	0,397	0,507	0,391
15	0.084	0,597	0,762	0,589
20	0,113	0,798	1,019	0,789
25	0,142	1,000	1,277	0,992
30	0,173	1,203	1,536	1,196
35	0,203	1,407	1,797	1,403
40	0,235	1,611	2,058	1,611
45	0,266	1,817	2,321	1,822
50	0,299	2,022	2,585	2,035
55	0,331	2,229	2,849	2,250
60	0,365	2,436	3,115	2,467
65	0,398	2,643	3,381	2,687
70	0,432	2,850	3,649	2,908
75	0,467	3,058	3,917	3,131
80	0,502	3,266	4,186	3,357
85	0,537	3,473	4,455	3,584
90	0,5733	3,681	4,725	3,813
95	0,609	3,888	4,996	4,044
100	0,645	4,095	5,268	4,277
150	1,029	6,137	8,008	6,702

200	1,440	8,137	10,777	9,206
250	1,873	10,151	13,553	12,011
300	2,323	12,207	16,325	14,860
400	3,260	16,395	21,846	20,669
500	4,234	20,640	27,388	
700	6,274	29,128	39,130	
900	8,448	37,325	51,875	
1100	10,754	45,108	51,875	
1	2	3	4	5
1200	11,947	48,828	69,536	
1400	14,368			
1600	16,771			
1760	18,612			

2. Wyznaczyć pomiar skuteczności kompensacji zmian temperatury otoczenia.

Dla termoelementu miedź-konstantan i układu kompensacyjnego o wartościach elementów jak na rys. 27, obliczyć napięcie zasilające mostek kompensacyjny U_z z zależności (43).



Rys. 27. Układ do pomiaru skuteczności kompensacji zmian temperatury wolnych końców termoelementu.

Spoinę pomiarową termoelementu umieścić w termostacie i utrzymywać stałą temperaturę T_1 = const. (na przykład $T_1 = 60^oC$), natomiast mostek kompensacyjny i wolne końce termoelementu umieścić w suszarce o regulowanej temperaturze T_o – zmienne. Zmieniać temperaturę To w zakresie $20^oC \div 50^oC$. Pomiary napięcia E dokonać dla napięcia $U_z = U_{ob1}$, $U_z = 1{,}5\ U_{ob1}$ i $U_z = 0{,}5_{ob1}$.

3. Wyznaczyć charakterystyki temperaturowe czujnika rezystancyjnego platynowego.

Pomiar charakterystyki czujnika PT 100 w zakresie $20^oC \div 100^oC$, przeprowadza się umieszczając go w kalibratorze temperatury TC-150, podobnie jak w punkcie 3.1.

Na podstawie powierzonych wartości rezystancji R_T i odpowiadających im temperatur wykreślić charakterystykę temperaturową czujnika. Porównać otrzymane charakterystyki z podanymi w tabeli 5. W przypadku stwierdzenia niezgodności, wytłumaczyć przyczyny powstania. Wyznaczyć nieliniowość badanego czujnika.

Tabela 5. Charakterystyki termometryczne termorezystorów Pt 100, Ni 100, Cu 100, PN-83/µ53852.

Temperatura °C	Rezystancja		
	Pt 100	Ni 100	Cu 100
1	2	3	4
0	100,00	100.00	100,00
5	101,95	102,77	102,13
10	103,90	105,56	104,26
15	105,85	108,39	106,39
20	107,79	111,25	108,52
25	109,73	114,14	110,65
30	111,67	117,07	112,78
35	113,61	120,02	114,91
40	115,54	123,01	117,04
45	117,45	126,03	119,17
50	119,40	129.09	121,30
55	121,32	132,18	123,43
60	123,24	135,30	125,56
65	125,16	138,47	127,69
70	127,07	141,67	129,82
75	128,98	144,91	131,95
80	130,89	148,19	134,02
85	132,80	151,50	136,64
90	134,70	154,86	138,34
1	2	3	4
95	136,60	158,27	140,47
100	138,88	161,71	142,60
150	157,31	198,71	163,90
180	168,46	223,10	176,68
200	175,84		
300	212,02		
400	247,04		
500	280,90		
600	313,59		
700	345,13		
800	377,51		
850	390,26		
-200	18,49		
-100	60,25		
-60	76,33	69,51	
-40	84,27	70,06	82,95
-20	92,16	89,26	91,48
-10	96,09	94,56	95,74

4. Przeprowadzić wzorcowanie termometru rezystancyjnego w układzie ilorazowym.

Badany termometr z czujnikiem platynowym PT 100 pracuje w układzie jak na rys. 6 a). Przed połączeniem czujnika PT 100 do miernika termometru należy:

a. Włączyć w miejsce czujnika R_T rezystor kontrolny R_K.
b. Włączyć napięcie zasilające i porównać odczytane wskazanie na termometrze, z wartością T_K podaną na rezystorze kontrolnym. Gdy wskazanie termometru jest większe niż wartość temperatury T_K, należy zmniejszyć rezystancję R_W rezystora wyrównawczego tak, by termometr wskazywał wartość T_K.
c. Odłączyć rezystor kontrolny i podłączyć czujnik PT 100.

Umieścić czujnik PT 100 w kalibratorze temperatury TC-150. Wzorcowanie przeprowadzić w zakresie 20°C ÷ 100°C. Na podstawie pomiarów sporządzić wykres poprawek termometru.

5. Wyznaczyć charakterystyki temperaturowe termistora.

Pomiar charakterystyki temperaturowej termistora przeprowadza się w zakresie temperatur $20^oC \div 100^oC$, po umieszczeniu termistora w kalibratorze temperatury TC-150, podobnie jak w punkcie 4.3. Rezystancję termistora mierzyć metodą techniczną, w układzie dwuprzewodowym, wykorzystując cyfrowy miernik rezystancji.
Na podstawie powierzonych wartości rezystancji R_T i odpowiadających im temperatur T wykreślić zależności $R_T=f(T)$, a następnie $\log R_T=f(\frac{1}{T})$, gdzie T – temperatura bezwzględna.

Aproksymując wykres $\log R_T=f(\frac{1}{T})$ zależnością liniową (11), wyznaczyć wartość stałej materiałowej termistora B. Z zależności (15) wyznaczyć wartość stałej A, a ze wzoru (10), wartość współczynnika temperaturowego rezystancji termistora.

6. Wyznaczyć stałe czasowe czujników temperatury.

Właściwości dynamiczne badanych czujników temperatury określa się na podstawie odpowiedzi tych czujników, na jednostkowy skok temperatury. Jednostkowy skok temperatury realizuje się przenosząc badany czujnik z temperatury otoczenia, do kalibratora temperatury TC-150 o ustalonej temperaturze. Należy zarejestrować odpowiedzi na skok jednostkowy następujących czujników termoelementu Cu-Konst, bez obudowy i w obudowie. Na podstawie zarejestrowanych charakterystyk dynamicznych wyznaczyć stałe czasowe metodami podanymi w punkcie 3.2.
Oszacować wartość dynamicznego błędu ustalonego, powstałego podczas wyznaczania charakterystyk temperaturowych, badanych czujników temperatury.
Zarejestrować odpowiedź na skok jednostkowy w powietrzu czujnika rezystancyjnego PT-100. Jednostkowy skok temperatury zrealizować przez przeniesienie czujnika z temperatury otoczenia do kalibratora temperatury TC-150 o ustalonej temperaturze.

Literatura:

1. Tumański S.: Technika pomiarowa, WNT, Warszawa, 2016, ebook – 2013;
2. Piotrowski J. (red.): Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego, wyd. I, WNT, Warszawa, 2009; wyd. II, PWN, Warszawa, 2017;
3. Zakrzewski J.: Czujniki i przetworniki pomiarowe, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004;
4. Kampik M., Zakrzewski J: Sensory i przetworniki pomiarowe, wyd. I, Wyd. Politechniki Śląskiej 2013;
5. Miłek M.: Metrologia elektryczna wielkości nieelektrycznych, Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra, 2006;
6. Hagel R.: Miernictwo wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1975;
7. Kuźma E.: Termometry termistorowe. Warszawa: PWN 1967;
8. Lapiński M.: Pomiary elektryczne i elektroniczne wielkości nieelektrycznych. Warszawa, WNT, 1974;
9. Michalski L., Eckersdorf K.: Pomiary temperatury. Warszawa, WNT, 1969;
10. Romer E.: Miernictwo przemysłowe. Warszawa, PWN, 1970;
11. Romer E.: Przemysłowe pomiary temperatury. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1967;
12. Wiśniewski S.: Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych. Warszawa, WNT, 1983.