

$$\bar{S}_m = 2\bar{S}_m + 0,5\%, \quad (1.20)$$

Wyniki pomiaru strumienia masy płynu należy podawać w postaci

$$\dot{m}_0 \pm \dot{m} \pm \bar{S}_m, \quad (1.21)$$

zaś objętości strumienia masy płynu w postaci

$$\dot{V}_0 = \dot{V} \pm \bar{S}_V \quad (1.22)$$

2. POMIARY TEMPERATURY

2.1. POJĘCIA PODSTAWOWE

Temperatura jest miarą średniej energii kinetycznej cząsteczek danego ciała, a zatem charakteryzuje ona stan energetyczny ciała. Ze względu na brak możliwości pomiaru prędkości z jaką poruszają się cząsteczki i obliczenia energii kinetycznej cząsteczek, pomiar temperatury odbywa się w sposób pośredni. W tym celu wykorzystuje się zjawiska fizyczne zależne bezpośrednio od temperatury, jak np.: rozszerzalność ciał, zmiana oporu elektrycznego przewodników, intensywność promieniowania itd. Budowa i kształt termometru oraz sposób prowadzenia pomiaru zależą od rodzaju zjawiska fizycznego wykorzystanego do określenia temperatury.

2.2. SKALE TERMOMETRYCZNE

Skala termometryczna ma na celu przyporządkowanie określonych wartości liczbowych pewnym stanom cieplnym ciała (temperaturom). Ponieważ nie ma wzorca temperatury, skale termometryczne oparto na tzw. punktach termometrycznych, tj. temperaturze przemian fazowych niektórych ciał chemicznie czystych. Obecnie najbardziej rozpowszechniona jest skala Celsjusza (stustopniowa). Opracował ją w 1742 roku fizyk i astronom

szwedzki A.Celsjusz, przyjmując temperaturę równowagi pomiędzy stanem ciekłym i gazowym (wrzenie) wody, przy ciśnieniu $p = 101\,325\text{ Pa}$ jako 0°C , zaś temperaturę równowagi pomiędzy stanem ciekłym i stałym wody przy tym samym ciśnieniu jako 100°C . Cały przedział między tymi temperaturami został podzielony na 100 równych części. W roku 1850 M.Strömer odwrócił te wartości i tak ustalona skala jest stosowana do chwili obecnej, przy czym poszerzono ją drogą ekstrapolacji dla temperatur powyżej 100°C i poniżej 0°C .

Termodynamiczna skala temperatur

W układzie SI jednostką określającą temperaturę ciała jest kelwin [K], który powstał w wyniku przyjęcia termodynamicznej skali temperatur. Jest to skala teoretyczna, która wg koncepcji Kelwina wykorzystuje zależność pomiędzy sprawnością obiegu Carnota a temperaturami panującymi w źródle górnym (grzejnika) i dolnym (chłodnicy). Sprawność obiegu Carnota wyrażają zależności

$$\eta_c = \frac{Q - Q_0}{Q} \quad (2.1a)$$

oraz

$$\eta_c = \frac{T - T_0}{T} \quad (2.1b)$$

zatem

$$T = T_0 \frac{1}{1 - \eta_c} \quad (2.2)$$

gdzie:

T, T_0 - temperatury źródła górnego i dolnego, K,

Q, Q_0 - ilość ciepła wymieniona pomiędzy czynnikiem a źródłem górnym i dolnym, J.

Przypisując pewną wartość temperaturze T_0 można określić za pomocą wzoru (2.2) temperaturę T , przy czym sprawność obiegu oblicza się ze wzoru (2.1a). Skala termodynamiczna oparta jest na jednym punkcie stałym - tj. punkcie potrójnym wody, dla którego $T = 273,16\text{ K}$ ($0,01^{\circ}\text{C}$). Stanowisko do realizacji punktu potrójnego wody omówiono dokładnie w p.2.4.1.

W praktyce korzystanie ze skali termodynamicznej jest niemożliwe, ponieważ zależność która ją określa została wypro-

wadzona na podstawie równania opisującego idealny obieg Carnota. Termodynamicznej skali temperatur odpowiada podziałka termometru gazowego wypełnionego gazem doskonałym. Niektóre gazy rzeczywiste (wodór, hel, neon) w szerokim zakresie odpowiadają własnościom gazu doskonałego i mogą być użyte do korzystania z koncepcji skali termodynamicznej. Termometr gazowy opisano w p.2.3.2. Termodynamiczną skalę temperatur można odtworzyć za pomocą termometru gazowego do ok. 1000 K; powyżej tej temperatury wykorzystuje się zjawisko promieniowania ciał.

Stosowanie w praktyce termometru gazowego jest kłopotliwe i dlatego od dawna starano się zastąpić termometr gazowy innymi termometrami. Międzynarodowa praktyczna skala temperatur ustalona w 1968 r. (MPST-68) oparta jest na wartościach temperatury punktów stałych podanych w tablicy 2.1. Skala ta jest najlepszym przybliżeniem skali termodynamicznej, zaś wartości temperatury oznacza się jako T_{68} i t_{68} . Jednostką T_{68} jest kelwin - symbol K, zaś t_{68} - stopień Celsjusza -

Tablica 2.1

Definicyjne punkty stałe MPST - 68

| Rodzaj punktu | Przypisane wartości temperatury ¹⁾ | |
|--|---|--------------------|
| | wg MPST-68 | |
| | T_{68}, K | $t_{68}, ^\circ C$ |
| Punkt potrójny wodoru w równowadze | 13,81 | -259,34 |
| Równowaga między fazą ciekłą i parą wodoru pod ciśnieniem 33330,6 Pa | 17,042 | -256,108 |
| Punkt wrzenia wodoru | 20,28 | -252,87 |
| Punkt wrzenia neonu | 27,102 | -246,048 |
| Punkt potrójny tlenu | 54,361 | -218,789 |
| Punkt wrzenia tlenu | 90,188 | -182,962 |
| Punkt potrójny wody | 273,16 | 0,01 |
| Punkt wrzenia wody ²⁾ | 373,15 | 100 |
| Punkt krzepnięcia srebra | 1235,08 | 961,93 |
| Punkt krzepnięcia złota | 1337,58 | 1064,43 |

1) Poza punktami potrójnymi oraz punktem 17,042 K podane wartości temperatury odpowiadają ciśnieniu w warunkach umownych $p_u = 101\,325$ Pa.

2) W MPST-68 zamiast punktu wrzenia wody może być stosowany punkt krzepnięcia cyny (231,968°C).

-, symbol $^{\circ}\text{C}$. Zależność między Międzynarodową Praktyczną Skalą Temperatur wyrażoną w $^{\circ}\text{C}$ i K określa wzór

$$T_{68} = t_{68} + 273,15, \quad \text{K.} \quad (2.3)$$

Dla wypełnienia stosunkowo szerokich przedziałów temperatury pomiędzy punktami stałymi ustalono 27 wtórnych punktów stałych [11].

Wzorcowanie przyrządów w warunkach laboratoryjnych odbywa się z reguły przy ciśnieniu różnym od ciśnienia umownego $p_u = 101\,325\text{ Pa}$ i dlatego w celu dokładnego wyznaczenia temperatury przemiany fazowej należy stosować wzory interpolacyjne:

- dla punktu wrzenia wody obowiązuje wzór w zakresie ciśnień od 87,99 do 114,66 kPa

$$t = 100,0 + 28,012 \left(\frac{p}{p_u} - 1 \right) - 11,64 \left(\frac{p}{p_u} - 1 \right)^2 + \\ + 7,1 \left(\frac{p}{p_u} - 1 \right)^3, \quad ^{\circ}\text{C}, \quad (2.4)$$

- dla punktu wrzenia naftalenu (C_{10}H_8) obowiązuje wzór w zakresie ciśnień od 90,66 do 103,99 kPa

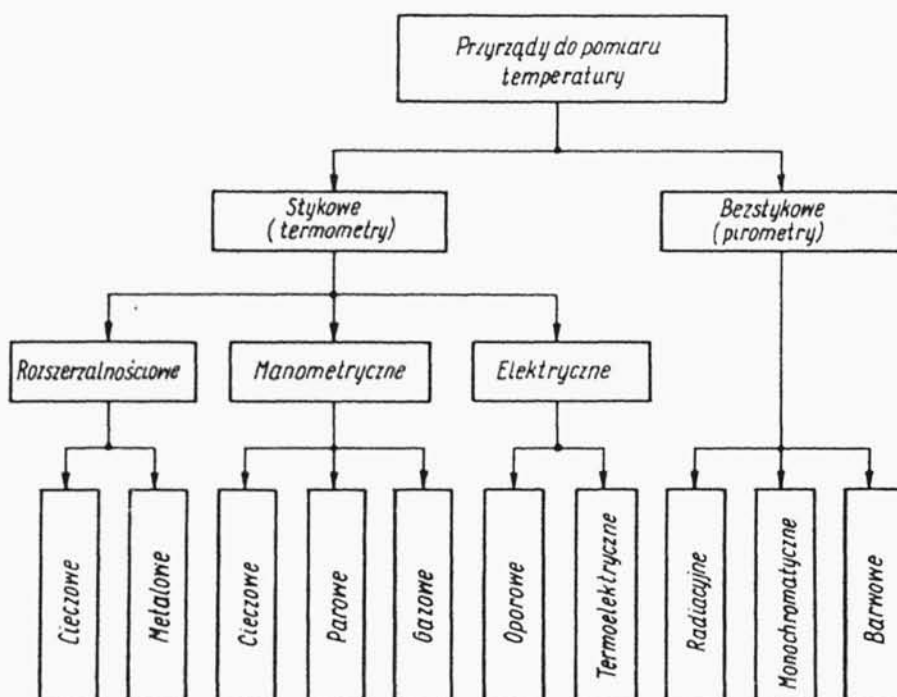
$$t = 218,0 + 44,4 \left(\frac{p}{p_u} - 1 \right) - 19,0 \left(\frac{p}{p_u} - 1 \right)^2, \quad ^{\circ}\text{C}. \quad (2.5)$$

Punkt naftalenu nie jest przewidziany przez MPST - 68 jako wtórny punkt termometryczny, jednak ze względu na łatwość jego realizacji bywa stosowany w warunkach laboratoryjnych.

W powyższych wzorach $p_u = 101\,325\text{ Pa}$ oznacza ciśnienie umowne, zaś p - ciśnienie panujące nad wrzącą cieczą. w Pa.

2.3. PRZYRZĄDY POMIAROWE

Zasadniczy podział przyrządów do pomiaru temperatury pod względem sposobu odbierania impulsu pokazano na rys.2.1. Wszystkie termometry dzielą się na dwie zasadnicze grupy, tj. stykowe i niestykowe.



Rys.2.1. Podział ogólny przyrządów do pomiaru temperatury

Termometry stykowe charakteryzują się bezpośrednim kontaktem z ciałem, którego temperaturę mierzą (np. termometry szklane), zaś bezstykowe mierzą temperaturę na odległość, wykorzystując w tym celu zjawiska optyczne.

W podanej klasyfikacji pominięto wskaźniki termometryczne, jak: termofarby, termokredki, stożki Segera itp. Powyższe metody pomiarowe nie mają szerszego zastosowania w technice pomiarowej, są one również znacznie mniej dokładne.

2.3.1. TERMOMETRY ROZSZERZALNOŚCIOWE

Ze względu na sposób działania, termometry rozszerzalnościowe dzielą się na cieczowe i metalowe.

Termometry rozszerzalnościowe cieczowe

W termometrach cieczowych przyrost objętości cieczy termometrycznej jest miarą zmiany temperatury. Zmiany objętości cieczy pod wpływem zmian temperatury wyraża zależność

$$V_2 = V_1 \left[1 + \beta \left| \begin{smallmatrix} t_2 \\ t_1 \end{smallmatrix} \right| (t_2 - t_1) \right], \quad \text{m}^3, \quad (2.6)$$

gdzie:

V_2 - objętość cieczy w temperaturze t_2 , m^3 ,

V_1 - objętość cieczy w temperaturze t_1 , m^3 ,

$\beta \left| \begin{smallmatrix} t_2 \\ t_1 \end{smallmatrix} \right|$ - średni współczynnik rozszerzalności cieczy termometrycznej w zakresie temperatur $t_1 + t_2$, K^{-1} .

W rzeczywistości, oprócz rozszerzalności cieczy termometrycznej następuje również rozszerzalność (szklanej) obudowy termometru i dlatego istotną wielkością jest względna rozszerzalność objętościowa cieczy termometrycznej określona wzorem

$$\beta \left| \begin{smallmatrix} t_2 \\ t_1 \end{smallmatrix} \right| = \beta' \left| \begin{smallmatrix} t_2 \\ t_1 \end{smallmatrix} \right| - \beta'' \left| \begin{smallmatrix} t_2 \\ t_1 \end{smallmatrix} \right|, \quad \text{K}^{-1},$$

gdzie:

$\beta' \left| \begin{smallmatrix} t_2 \\ t_1 \end{smallmatrix} \right|$ - współczynnik rozszerzalności objętościowej cieczy termometrycznej, K^{-1} ,

$\beta'' \left| \begin{smallmatrix} t_2 \\ t_1 \end{smallmatrix} \right|$ - współczynnik rozszerzalności objętościowej materiału, z którego wykonany jest termometr, K^{-1} .

Ze względu na temperaturę krzepnięcia rtęci $-38,87^\circ\text{C}$ i jej temperaturę wrzenia $+356,7^\circ\text{C}$ przy ciśnieniu umownym ($p_u = 101\,325\text{ Pa}$) termometry rtęciowe są stosowane do pomiaru temperatur w zakresie od -30 do $+300^\circ\text{C}$. Jeżeli przestrzeń w kapilarze nad rtęcią jest wypełniona gazem obojętnym, to przy ciśnieniu gazu 7 MPa zakres pomiarowy można rozszerzyć do $+800^\circ\text{C}$. Działka elementarna rtęciowych termometrów laboratoryjnych wynosi zwykle $0,1\text{K}$. Bywają termometry o działce elementarnej $0,01\text{K}$, które mają zastosowanie w kalorymetrii.

W termometrach rozszerzalnościowych jako ciecz termometryczną stosuje się oprócz rtęci również alkohol (dla temperatur wyższych od -100°C) oraz toluen (w zakresie od -70 do

+110°C). Termometry alkoholowe są znacznie mniej dokładne od rtęciowych ze względu na trudność otrzymania chemicznie czystego alkoholu, potrzebę jego barwienia oraz złe przewodzenie ciepła. Działka elementarna tych termometrów wynosi zwykle 0,5 lub 1 K.

Ze względu na przeznaczenie i konstrukcję termometry cieczowe można podzielić na:

- laboratoryjne o dużej dokładności odczytu 0,01 do 0.002 K (rys.2.2a,b),
- do pomiaru wysokich temperatur wypełnione np. galem o zakresie do 1000°C lub rtęciowe z poduszką gazową,
- termometry minimalne i maksymalne mające zastosowanie głównie w meteorologii i rolnictwie,
- termometry kontaktowe stosowane m.in. do automatycznej regulacji temperatury w ultratermostatach,
- termometry przemysłowe (napełnione najczęściej toluenem), które montowane są w specjalnych osłonach metalowych (rys.2.2c,d).

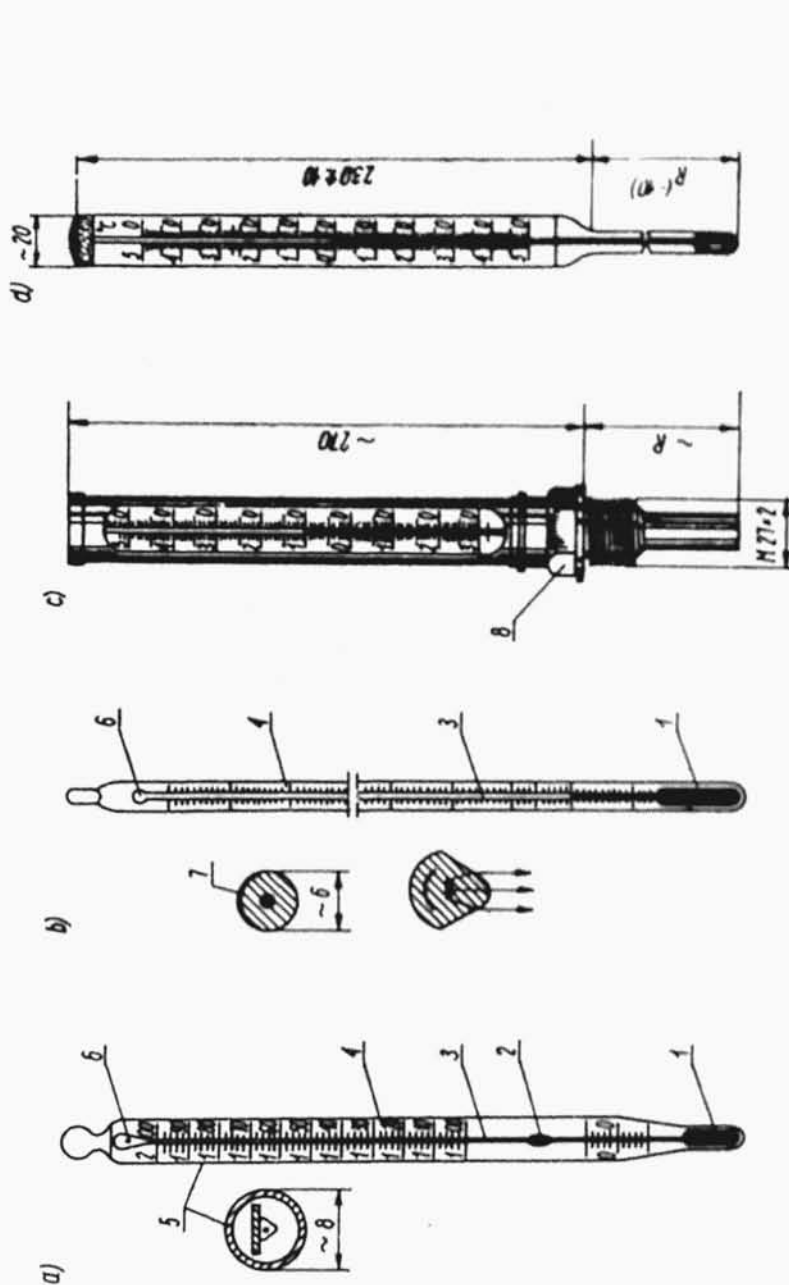
W celu zmniejszenia bezwładności cieplnej oraz wymiarów termometrów laboratoryjnych ogranicza się ich zakres pomiarowy do około 50 K, przy długości 40 ÷ 50 cm.

Zbędną część podzielní skraca się tworząc kontrakcyjne rozszerzenie kapilary (dodatkowy zbiornik cieczy - rys.2.2a).

Przy dokładnym pomiarze temperatury termometrami cieczowymi należy uwzględnić błędy wynikające z:

- 1) niejednakowej średnicy na całej długości kapilary,
- 2) niedokładności punktów stałych podzielní,
- 3) histerezy szkła,
- 4) różnicy temperatury cieczy termometrycznej w zbiorniku i kapilarze,
- 5) bezwładności cieplnej termometru.

Błędy wyszczególnione w p.1, 2 i 3 można eliminować przez okresowe sprawdzanie termometru i przygotowanie tablicy poprawek. Sposób sprawdzania termometrów będzie omówiony w p.2.4. Błąd histerezy w zakresie temperatur 0 ÷ 100°C wynosi 0,2 ÷ 0,6 K dla zwykłego szkła termometrycznego, zaś 0,03 ÷ 0,04K dla szkła tzw. jenańskiego. Dla termometrów przemysłowych



Rys.2.2. Termometry cieczowe rozszerzalnościowe: a) rurkowy, b) pałeczkowy, c) przemysłowy w obudowie, d) przemysłowy bez obudowy; 1 - zbiornik, 2 - kontrakcyjne rozszerzenie kapilary, 3 - kapilara, 4 - podzielnia, 5 - rurka osłonowa, 6 - ekspansyjne rozszerzenie kapilary, 7 - ekran ze szkła białego, 8 - obudowa metalowa

słowych nie uwzględnia się błędu histerezy. Bezwładność cieplna termometru ma istotny wpływ przy pomiarach temperatur szybkozmiennych. Własności dynamiczne czujnika określa stała czasowa termometru. Błąd względny wskazań termometru, przy skokowej zmianie temperatury, określa zależność

$$\Delta v = \frac{v_{cz} - v_r}{v_r} = -\exp(-\tau/\tau_{s.cz.}), \quad K, \quad (2.7)$$

gdzie:

- v_{cz} - różnica pomiędzy temperaturą chwilową czujnika a temperaturą początkową (otoczenia), $v_{cz} = t_{cz} - t_0$, K,
- v_r - różnica pomiędzy mierzoną temperaturą ośrodka a temperaturą początkową, $v_r = t_r - t_0$, K,
- τ - czas, po którym czujnik osiągnął temperaturę t_{cz} , s,
- $\tau_{s.cz.}$ - stała czasowa czujnika, s.

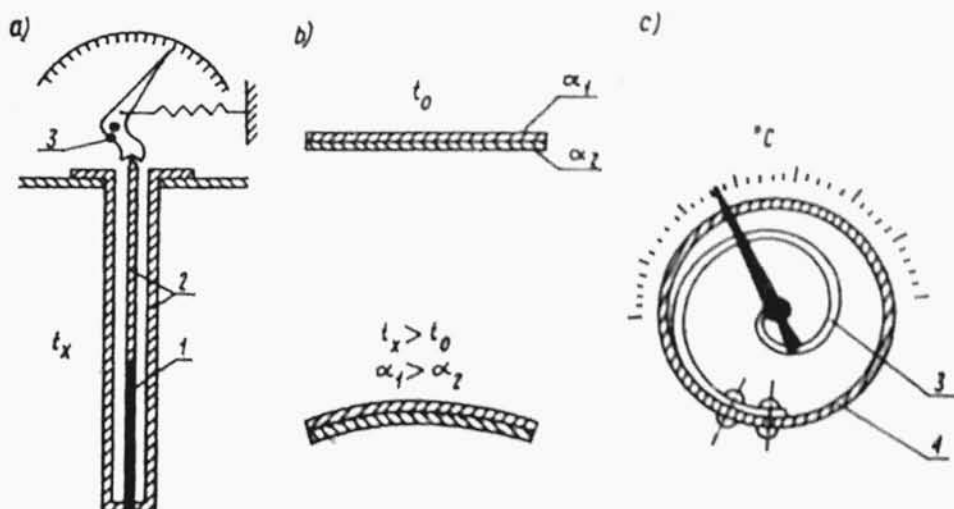
Sposób określania błędu pomiaru przy innych rodzajach zmian temperatury w czasie, można znaleźć w literaturze [11].

Termometry rozszerzalnościowe metalowe

W termometrach tych następuje zmiana długości elementów metalowych pod wpływem zmiany temperatury. Można wyróżnić dwa typy termometrów - dylatacyjne i bimetalowe, które różnią się znacznie budową.

Czujnik termometru dylatacyjnego zbudowany jest z rury, wewnątrz której znajduje się metalowy pręt. Rura oraz pręt są wykonane z różnych materiałów i połączone trwale w jednym końcu (rys.2.3a). Pod wpływem temperatury następuje zmiana długości obu elementów, zaś różnica długości wynikająca z różnych wartości współczynnika rozszerzalności liniowej materiałów jest miarą temperatury. Zakres stosowania termometrów dylatacyjnych dochodzi do 1000°C , zaś dokładność pomiaru jest rzędu $1 \div 2\%$. Wadą tych przyrządów są duże wymiary. Praktyczne zastosowanie mają termometry dylatacyjne jako elementy układów sterowania automatycznego.

W termometrach bimetalicznych elementem czynnym jest metalowa taśma wykonana z dwóch materiałów trwale połączonych, o różnych współczynnikach rozszerzalności liniowej. Pod wpływem



Rys.2.3. Zasada działania termometrów metalowych: a) termometr dylatacyjny, b) taśma bimetalowa c) termometr bimetalowy; 1 - pręt z materiału biernego, 2 - części z materiału czynnego, 3 - taśma bimetalowa, 4 - obudowa

wem zmiany temperatury następuje zmiana kształtu taśmy (rys. 2.3b), co jest przekazywane bezpośrednio na podzielną. Schemat działania takiego termometru pokazano na rys.2.3c. Czujniki bimetalowe bywają stosowane w rejestratorach dobowych i tygodniowych temperatury. Zakres wskazań termometrów bimetalowych dochodzi do 400°C , zaś osiągnięta dokładność od 1 do 2%.

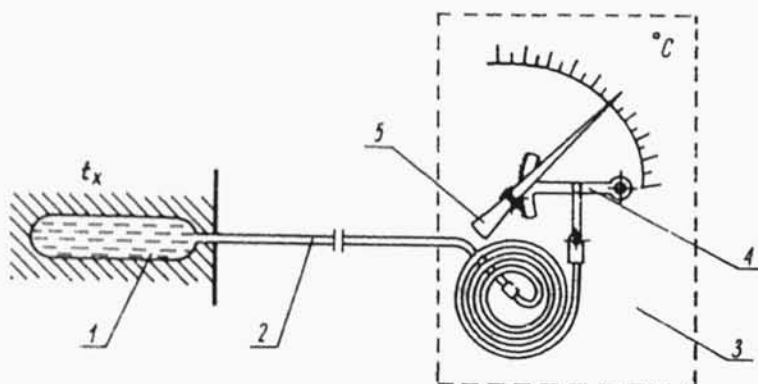
2.3.2. TERMOMETRY MANOMETRYCZNE

Termometry manometryczne (ciśnieniowe) są zbudowane z następujących elementów: czujnika, rurki kapilarnej i miernika. Czujnikiem jest zbiornik, w którym następuje zmiana objętości lub ciśnienia płynu termometrycznego. Zadaniem kapilary jest przekazanie powyższych zmian do miernika. Miernikiem jest manometr z podziałką w $^{\circ}\text{C}$.

Termometry manometryczne cieczowe

W termometrach cieczowych (rys.2.4) cały układ jest wypełniony cieczą termometryczną. Pod wpływem wzrostu temperatury czujnika następuje przyrost objętości cieczy termome-

trycznej w układzie, co wywołuje odkształcenie rurki Bourdona w mierniku. Wynik odczytuje się na podzielnii w $^{\circ}\text{C}$. Jako ciecz termometryczna może być stosowana: rtęć dla zakresu temperatur -30 do $+600^{\circ}\text{C}$; cieczy organiczne (nafta, dwumetylobenzen) dla zakresu -35 do $+350^{\circ}\text{C}$. Długość kapilary między czujnikiem



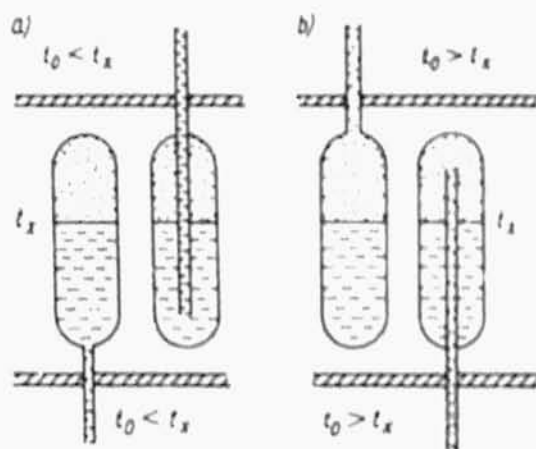
Rys.2.4. Manometryczny termometr cieczowy: 1 - czujnik, 2 - kapilara, 3 - manometr z rurką Bourdona, 4 - przekładnia zębata, 5 - wskazówka

a miejscem pomiaru nie przekracza zwykle 15 m, zaś w przyrządach z kompensacją mechaniczną 50 m. Ograniczenie długości ma na celu eliminowanie wpływu zmian temperatury otoczenia na wynik pomiaru. Dokładność manometrycznych termometrów cieczowych wynosi około 1,5%; są one stosowane w pomiarach przemysłowych. Do zalet przyrządu należy mocna konstrukcja i brak potrzeby zasilania energią. Przy dużych różnicach położenia czujnika i miernika, dodatkowy błąd wskazań powoduje ciśnienie hydrostatyczne cieczy termometrycznej - szczególnie istotne przy zastosowaniu rtęci.

Termometry manometryczne parowe

W termometrach tych wykorzystuje się zależność ciśnienia pary nasyconej nad roztworem od temperatury. Warunkiem prawidłowej pracy termometru parowego jest, aby w czujniku występował płyn w dwóch fazach, zaś w kapilarze tylko w jednej. W związku z tym, w przypadku gdy temperatura otoczenia t_o jest niższa od temperatury mierzonej t_x , płyn impulsowy musi być w fazie ciekłej. Dla $t_o > t_x$ płynem impulsowym są pary

cieczy termometrycznej. Konstrukcja czujnika termometru parowego jest pokazana na rys.2.5. Zależy ona od fazy w jakiej jest płyn impulsowy oraz od sposobu wyprowadzenia kapilary.



Rys.2.5. Schemat budowy czujnika manometrycznego termometru parowego:
a) czujnik z kapilarą wypełnioną cieczą ($t_0 < t_x$), b) czujnik z kapilarą wypełnioną parą ($t_0 > t_x$)

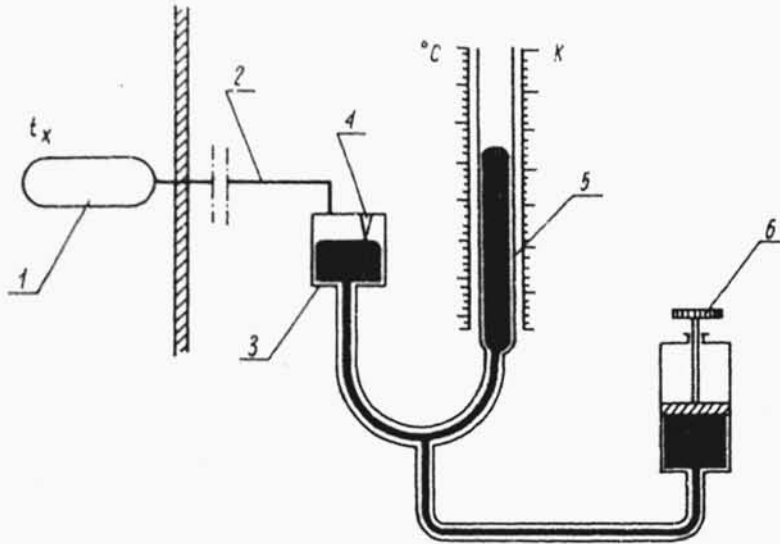
Schemat budowy termometru parowego jest taki sam jak termometru manometrycznego cieczowego (rys.2.4), z wyjątkiem różnicy w budowie czujnika.

Zakres stosowania termometrów parowych jest zależny od rodzaju cieczy termometrycznej: dla dwutlenku węgla -70 do $+30^{\circ}\text{C}$, eteru $+50$ do $+180^{\circ}\text{C}$ i rtęci $+360$ do 650°C . Dokładność wskazań termometrów parowych jest podobna jak termometrów manometrycznych cieczowych i wynosi od 1 do 2%. Przy dużych różnicach poziomów należy uwzględnić wpływ ciśnienia hydrostatycznego cieczy termometrycznej w kapilarze.

Termometry manometryczne gazowe

W termometrze tym wykorzystano wnioski wynikające z przemiany izochorycznej gazu, a mianowicie że przy stałej objętości ciśnienie gazu zależy od temperatury. Schemat termometru pokazano na rys.2.6. Czujnik termometru 1 oraz kapilara 2 wypełnione są gazem, np. wodorem, hellem, azotem. W czasie pomiaru zmienia się ciśnienie gazu oraz poziom cieczy w zbior-

niku 3. Za pomocą pokręćla 6 reguluje się położenie tioka tak, aby poziom w zbiorniku 3 stykał się z ostrzem 4, co zapewnia stałą objętość zajmowaną przez gaz. Ciśnienie odczytywane



Rys.2.6. Termometr gazowy

mikromanometrem rtęciowym 5 jest miarą temperatury. Termometry gazowe są przyrządami bardzo dokładnymi i bywają stosowane w zakresie temperatur od -200 do $+800$ °C. Ze względu na kłopotliwą obsługę mają one zastosowanie jedynie w niektórych badaniach naukowych oraz przy odtwarzaniu termodynamicznej skali temperatur (p.2.2).

2.3.3. ELEKTRYCZNE TERMOMETRY OPOROWE

W termometrach oporowych wykorzystuje się zmianę oporności właściwej przewodników i półprzewodników w zależności od ich temperatury. W przewodnikach (metalach) zwiększa się amplituda drgań jąder atomów i prędkość ruchu bezwładnego elektronów. Powyższe zjawiska powodują wzrost liczby zderzeń przepływających elektronów - hamując je, co zwiększa opór przewodnika. Materiały stosowane na oporniki termometryczne charakteryzuje cieplny współczynnik zmiany oporu α , podawany najczęściej dla temperatur w zakresie od 0 do 100 °C wzorem

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_{100} - R_0}{100}, \quad K^{-1}, \quad (2.8)$$

gdzie: R_0, R_{100} - opór przewodnika odpowiednio w temperaturze 0 i 100°C, Ω .

Oporniki termometryczne są wykonywane z czystych metali lub półprzewodników. Dla metali wartość współczynnika $\alpha = 0,4 \div 0,6 \text{ \%}/K$, zaś dla półprzewodników $\alpha = -(2 \div 6) \text{ \%}/K$; opór półprzewodnika maleje ze wzrostem temperatury.

Metale stosowane do wyrobu oporników termometrycznych powinny mieć następujące własności:

- duży współczynnik zmian oporu α ,
- duży opór właściwy,
- szeroki zakres temperatur, dla którego opornik nie zmienia trwale właściwości,
- odporność na korozję,
- powtarzalne właściwości (zapewnia to pełną zamiennność czujników),
- liniową i ciągłą zależność zmian oporu od temperatury oraz brak histerezy,
- łatwość obróbki.

Tak wysokie wymagania spełnia niewiele metali i tylko w ograniczonym zakresie:

| | | | |
|---------|-----------------|---------------------------------|------------|
| platyna | -200 do +550°C, | $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3}$, | K^{-1} , |
| nikiel | -50 do +150°C, | $\alpha = 6,17 \cdot 10^{-3}$, | K^{-1} , |
| miedź | -50 do +180°C, | $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}$, | K^{-1} . |

W podanych powyżej zakresach temperatur oporność czujników można zapisać z dostatecznym przybliżeniem następującym równaniem

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2), \quad \Omega, \quad (2.9)$$

gdzie:

R_t, R_0 - opór czujnika w temperaturze t i 0°C, Ω ,

a, b - współczynniki.

Oprócz czystych metali stosuje się również do budowy czujników termometrów oporowych półprzewodniki. Czujniki tego typu

bywają nazywane czujnikami termistorowymi. Półprzewodniki (termistory) wykonuje się z proszków takich metali, jak: żelazo, nikiel, miedź, mangan, które są prasowane i spiekane w wysokiej temperaturze.

Czujniki termistorowe mają zastosowanie dzięki takim zaletom, jak:

- wielokrotnie większa zmienność oporu w zależności od temperatury niż dla czystych metali (ok. 10 razy), przy czym opór termistora maleje ze wzrostem temperatury;
- bardzo małe wymiary,
- mała bezwładność cieplna,
- duży opór czujnika (od 1 do 1000 kΩ), co w praktyce pozwala na pominięcie oporu przewodów łączących z miernikiem.

Oprócz zalet termistory mają również poważne wady, jak: brak powtarzalnych właściwości i zmienność właściwości w czasie. Wady te zmuszają do okresowego sprawdzania poprawności wskazań oraz wzorcowania przyrządu przy wymianie uszkodzonego czujnika. Zakres stosowania termistorów wynosi od -80 do +300°C. Zależność oporu termistora od temperatury można zapisać za pomocą wzoru

$$R_T = R_\infty \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad \Omega, \quad (2.10a)$$

gdzie:

R_T - opór czujnika w temperaturze T, Ω ,

$R_\infty = \lim_{T \rightarrow \infty} R_T, \Omega$,

B - stała zależna od typu termistora, K,

T - temperatura, K.

Ponieważ w praktyce nie można określić wartości R_∞ , korzysta się ze wzoru otrzymanego z rozwiązania układu równań

$$R_T = R_\infty \exp\left(\frac{B}{T}\right),$$

$$R_{T_0} = R_\infty \exp\left(\frac{B}{T_0}\right),$$

stąd wynika że

$$R_T = R_{T_0} \exp\left[B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] = R_{T_0} \exp \alpha_{T_0} (T - T_0) \frac{T_0}{T}, \quad (2.10b)$$

gdzie:

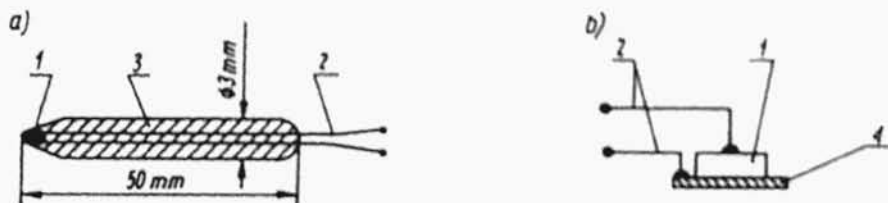
R_{T_0} - opór czujnika w temperaturze odniesienia, Ω ,

T_0 - temperatura odniesienia, $T_0 = 293,15$ K.

Wartość wyrażoną równaniem

$$\alpha_{T_0} = -\frac{B}{T_0^2}, \quad \% / K, \quad (2.11)$$

nazywa się cieplnym współczynnikiem zmiany oporności.



Rys.2.7. Typowe czujniki termometrów termistorowych: a) pałeczkowy, b) na płytce miedzianej (do pomiaru temperatury powierzchni); 1 - termistor, 2 - przewody miedziane, 3 - osłona szklana, 4 - płytka miedziana

Budowę typowych czujników termistorowych pokazano na rys.2.7.

Stała czasowa czujników termistorowych może osiągać nawet wartości 5 ÷ 10 ms i dlatego czujniki te mają zastosowanie w pomiarach temperatur szybkozmiennych [19].

Termometr oporowy składa się z następujących części: czujnika, miernika, przewodów łączących i zasilacza. Dodatkowo wyposażenie termometrów przemysłowych stanowi opornik wyrównawczy i kontrolny. Czujnik termometru oporowego w wykonaniu przemysłowym (rys.2.8) składa się z opornika termometrycznego, metalowej osłony, głowicy i miedzianych przewodów wewnętrznych. Typowe osłony są wykonane ze stali nierdzewnej (1H18N9T) i wytrzymują ciśnienie do 6 MPa.

W głowicy czujnika wyprowadzone są przewody miedziane łączące opornik termometryczny z zaciskami do przyłączenia linii zewnętrznej. Aby zapewnić pełną zamiennność przemysłowych czujników oporowych produkuje się je zgodnie z normą PN-75/M-53852 o oporności nominalnej 100 Ω w temperaturze 0°C.

Mierniki określają wartość oporu czujnika termometru oporowego i bywają opisane w $^{\circ}\text{C}$.

W zależności od metody pomiarowej można wyróżnić:

- mierniki ilorazowe (logometry),
- mostki zrównoważone,
- mostki niezrównoważone.

Mierniki ilorazowe zwane również logometrami mają szerokie zastosowanie w pomiarach przemysłowych dzięki takim zaletom, jak: prosta budowa i dopuszczalne wahania napięcia zasilania w granicach $\pm 10\%$. Duży moment obrotowy jaki występuje w tych przyrządach umożliwia ich zastosowanie w rejestratorach. Zasadę działania mierników ilorazowych zastosowanych w termometrii oporowej pokazano na przykładzie miernika IMW4 (rys.2.9). Ustrój

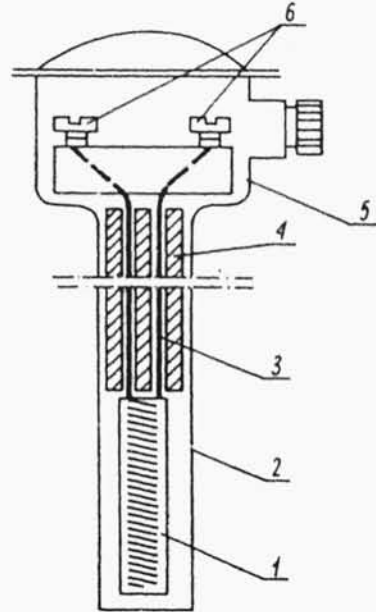
pomiarowy miernika składa się z dwóch cewek C_1 i C_2 umieszczonych pomiędzy biegunami magnesu stałego N - S. Cewki te nawinięte są w dwóch różnych płaszczyznach przechodzących przez oś obrotu. W układ miernika włączony jest opór stały R_s . Do śrub zaciskowych logometru przyłącza się źródło zasilania prądu stałego 6 V oraz linię łączeniową wraz z opornikiem termometrycznym R_T .

Położenie jakie przyjmuje wskazówka miernika zależy od kąta wychylenia φ określonego wzorem

$$f(\varphi) = \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_T + R_p + R_w + R_{c2}}{R_s + R_{c1}}, \quad (2.12)$$

ponieważ

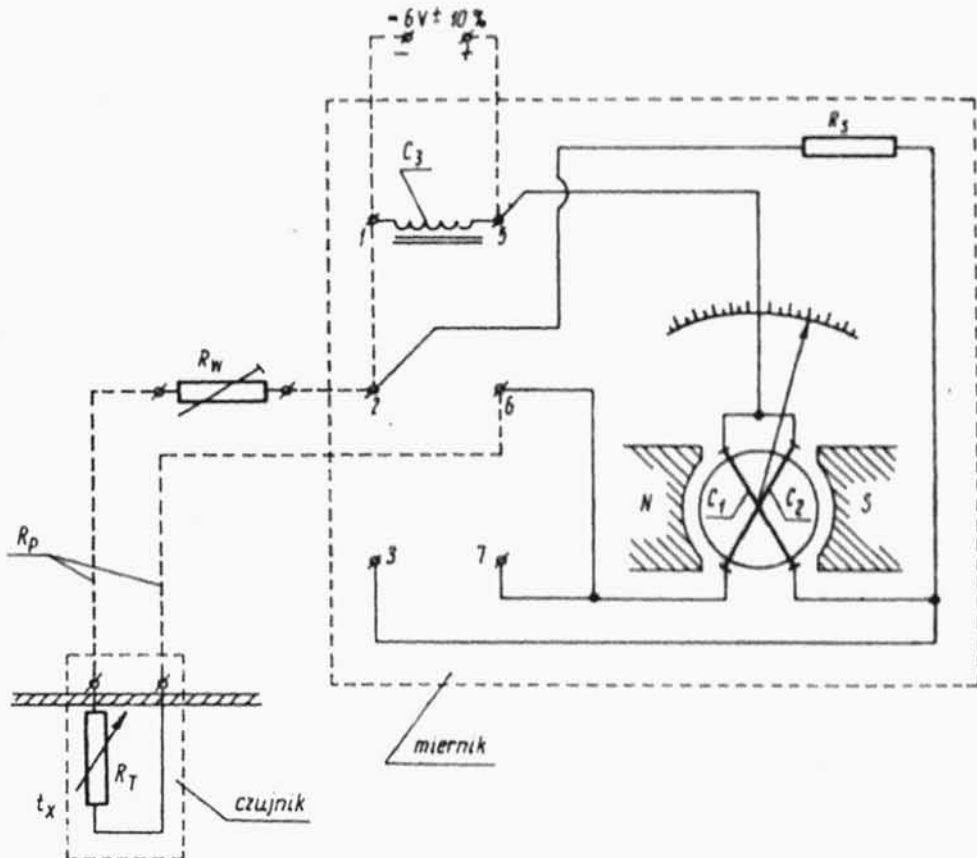
$$I_1 = \frac{U_{1,5}}{R_s + R_{c1}}, \quad \text{zaś} \quad I_2 = \frac{U_{1,5}}{R_T + R_p + R_w + R_{c2}},$$



Rys.2.8. Przemysłowy czujnik termometru oporowego: 1 - opornik termometryczny, 2 - osłona, 3 - przewody miedziane, 4 - izolacja ceramiczna, 5 - głowica, 6 - zaciski

Gdzie:

- I_1 - natężenie prądu w obwodzie 1,
- I_2 - natężenie prądu w obwodzie 2,
- $U_{1,5}$ - napięcie między punktami 1 i 5,
- R_T - opór czujnika termometru,
- R_p - opór przewodów linii łączeniowej,
- R_w - opór wyrównawczy,
- R_{c1} - opór cewki C_1 miernika,
- R_{c2} - opór cewki C_2 miernika.



Rys.2.9. Schemat elektryczny termometru oporowego z miernikiem ilorazowym w układzie dwuprzewodowym: R_T - opornik termometryczny, R_p - opór przewodów, R_w - opornik wyrównawczy, C_1 , C_2 - cewki skrzyżowane, C_3 - elektromagnes zwalniający napis "Błądny pomiar", R_s - opór stały miernika, N-S - bieguny magnesu

Przekształcając równanie (2.12), otrzymuje się następującą zależność

$$\varphi = \Phi \left(\frac{R_T + R_p + R_w + R_{c2}}{R_s + R_{c1}} \right). \quad (2.13a)$$

Zakładając stałą wartość oporów: R_p , R_w , R_{c1} , R_{c2} i R_s równanie przyjmuje postać

$$\varphi = \Phi_1(R_T) = \varphi(t_x), \quad (2.13b)$$

co umożliwia zastosowanie układu do pomiaru temperatury t_x . Dokładne wyprowadzenie wzoru (2.14) podano w literaturze [11].

Wadą miernika ilorazowego jest dowolne położenie wskazówki w przypadku zaniku napięcia zasilającego. Mierniki te nie mają sprężyny zawracającej i dlatego wyposaża się je w dodatkowy elektromagnes oznaczony na schemacie jako C_3 . Przy zaniku napięcia elektromagnes zwalnia zworę, która opadając ukazuje się na podzielnii jako tabliczka z napisem "Błędny pomiar". Dokładność mierników ilorazowych wynosi 1 lub 1,5% i dlatego stosuje się je głównie w pomiarach przemysłowych.

Linia łączeniowa w układzie dwuprzewodowym

Przewody łączące czujnik z miernikiem (rys.2.9) noszą nazwę linii łączeniowej. Linia ta powinna być wykonana zgodnie z wymaganiami normy PN-62/M-53858 z drutu miedzianego o oporności właściwej $\rho = 17,5 \cdot 10^{-3} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$. Pole powierzchni przekroju przewodu ze względów wytrzymałościowych nie powinno być mniejsze od $1,5 \text{ mm}^2$. Opór całkowity linii łączeniowej, tzn. przewodów i opornika wyrównawczego, powinien być równy wartości R_L , dla której wykonano miernik. Przykładowo dla miernika LMW4 $R_L = 15 \Omega$, dla EWI $R_L = 10 \Omega$. Jeżeli przewody miedziane mają opór R_p mniejszy od wartości R_L , wówczas należy szeregowo włączyć opornik wyrównawczy R_w . Z opornika tego odwija się nadmiar drutu oporowego tak, aby została spełniona zależność $R_p + R_w = R_L$. Dokładność pomiaru oporu linii powinna wynosić 1%, co można uzyskać jedynie przy zastosowaniu do pomiaru mostka Wheatstone'a. Inną metodą dostrajania

oporu linii jest wykorzystanie opornika kontrolnego załączonego do każdego przyrządu. W tym celu należy włączyć opornik kontrolny (R_K) zamiast czujnika (R_T). Wówczas wskazówka powinna zatrzymać się przy wartości podanej na oporniku kontrolnym. Jeżeli tak nie jest, to zmieniając wartość oporu R_W doprowadzamy wskazania do wymaganej wartości. Opornik R_K służy również do okresowego sprawdzania poprawności wskazań. Maksymalna długość linii łączeniowej dla przewodów miedzianych o przekroju $1,5 \text{ mm}^2$ może wynosić $2 \times 400 \text{ m}$, przy dopuszczalnej oporności linii $R_L = 10 \Omega$.

Jeżeli temperatura otoczenia przewodów zmienia się, to odległość czujnika od miernika w układzie dwuprzewodowym nie powinna przekraczać dla

$$\begin{aligned} \Delta t_0 &= \pm 20 \text{ K}, & L &\leq 100 \text{ m}, \\ \Delta t_0 &= \pm 10 \text{ K}, & L &\leq 200 \text{ m}. \end{aligned}$$

Powyższe zależności wyprowadzono na podstawie normy PN-62/M-53858.

Jeżeli warunek podany powyższymi zależnościami nie jest dotrzymany, to można obliczyć poprawkę temperatury mierzonej ze wzoru przybliżonego

$$\Delta t \approx \frac{R_p \cdot \Delta t_0}{R_0} \cdot k, \quad K, \quad (2.14)$$

gdzie:

R_p - opór przewodów łączących, Ω ,

Δt_0 - różnica między średnią temperaturą przewodów w czasie pomiaru i w chwili dobierania opornika wyrównawczego, K,

R_0 - opór czujnika termometrycznego w temperaturze $t = 0^\circ\text{C}$,
 $R_0 = 100 \Omega$.

k - współczynnik

$k=1$ dla czujników Pt $100 \Omega/0^\circ\text{C}$,

$k=0,67$ dla czujników Ni $100 \Omega/0^\circ\text{C}$.

Opór izolacji przewodów miedzianych linii łączeniowej powinien zgodnie z podaną normą być większy od $3 \text{ M}\Omega$.