



Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowej Akademii Technicznej



INSTYTUT POJAZDÓW I TRANSPORTU
ZAKŁAD SILNIKÓW I INŻYNIERII EKSPLOATACJI

LABORATORIUM TERMODYNAMIKI TECHNICZNEJ

Instrukcja do ćwiczenia T-03

Temat:

Pomiar temperatury różnymi metodami.

Opracował:

dr inż. Mirosław Karczewski

WAT, Warszawa 2007, modyfikacja 2022

1 Wprowadzenie

1.1 Pojęcia podstawowe

Przetwornik: elementarny zespół elementów realizujących określoną funkcję przetwarzania. Może to być nielektryczna lub elektryczna część toru pomiarowego. Przetworniki mogą realizować funkcję przetwarzania:

- n/n – wielkość nielektryczna/wielkość nielektryczna
- n/e - wielkość nielektryczna/ wielkość elektryczna,
- $e/e + -$ wielkość nielektryczna/ wielkość elektryczna.

Czujnik: wyodrębniony, funkcjonalny zespół przetworników, pobierający sygnał bezpośrednio z obiektu pomiaru.

1.2 Klasyfikacja czujników

Czujniki można podzielić na dwie główne grupy: czujniki parametryczne i czujniki generacyjne.

W czujnikach parametrycznych mierzona wielkość nielektryczna powoduje zmianę wielkości elektrycznej - np. rezystancji, pojemności, indukcyjności natężenia prądu, napięcia, częstotliwości, nie następuje przy tym (w zasadzie) wytwarzanie energii elektrycznej wskutek działania mierzonej wielkości nielektrycznej.

W czujnikach generacyjnych mierzona wielkość nielektryczna powoduje wytwarzanie siły elektro motorycznej (ogniwa termoelektryczne, ogniwa fotoelektryczne, ogniwa stężeniowe).

Poniżej przedstawiono przykłady poszczególnych grup czujników:

a) parametryczne (wybrane):

- rezystancyjne
 - potencjometry liniowe $R(\Delta x)$,
 - potencjometry obrotowe $R(\Delta \alpha)$,
 - tensometry oporowe $\varepsilon R(\varepsilon)$, $\varepsilon R = \Delta R/R$, $\varepsilon = \Delta l/l$,
 - piezorezystancyjne $R(p)$,
 - termorezystancyjne $R(T)$,
 - fotorezystancyjne $R(\Phi)$,
- indukcyjnościowe
 - pojedyncze $L(\Delta x)$, przesunięcie
 - różnicowe $\Delta L(\Delta x)$,
- pojemnościowe
 - pojedyncze $C(d)$, lub $C(A)$, $C(\varepsilon)$,
 - geometryczne i mikrofony
 - różnicowe $\Delta C(d)$
- transformatorowe $M(\Delta x)$,
przesunięcie, presduktor, torduktor

b) generacyjne (wybrane):

- termoelektryczne,
- piezoelektryczne $dq/dt = k_p d\sigma/dt$, pomiary dynamiczne sił,
ciśnień, przyspieszeń
- magnetoindukcyjne $SEM(dx/dt)$, prędkościowy, dynamiczny

1.3 Termometria

Termometria jest działem termodynamiki zajmującym się ilościowym określaniem temperatury.

Temperatura jest jedną z najważniejszych wielkości w naukach przyrodniczych. Wyraża w sposób makroskopowy intensywność ruchów mikrocząsteczek, a energia kinetyczna tych

ruchów stanowi podstawową część energii termicznej ciał fizycznych.

Wielkość termometryczna jest to wybrana wielkość fizyczna, której wartość służy do ilościowego określenia temperatury, w przypadku ustalenia pozostałych wielkości opisujących stan fizyczny ciała. Wielkość termometryczna może być określona bezpośrednio lub za pośrednictwem innej wybranej wielkości pomiarowej. Najogólniej można określić temperaturę jako wielkość odwrotną pochodnej entropii S układu względem jego energii

$$\frac{1}{T} = \frac{dS}{dE} \quad (1)$$

I-prawo termometrii.

Dwa układy materialne nie działające na siebie chemicznie i odosobnione od otoczenia z czasem wyrównują swoje temperatury.

II-prawo termometrii.

Jeśli dwa układy materialne są w równowadze termicznej z trzecim układem, to są również w równowadze termicznej między sobą.

Dla jednoznacznego określenia wartości temperatury ciała konieczna jest skala termometryczna, czyli umownie przyjęta zależność między charakterystycznymi stanami ciała a przypisanymi im temperaturami. Przykładem może być ustalona skala oparta na założeniu, że temperatura topniejącego lodu wynosi 0° , a wrzącej wody przy ciśnieniu 760 Tor 100°C . Tak określona skala nosi nazwę Celsjusza i oznacza się $[\text{C}]$. Natomiast przy założeniu, że temperatura topniejącego lodu wynosi 32° , a wrzącej wody 212° , ustalono tzw. skalę Fahrenheita, oznaczoną skrótem F° .

Temperatura mierzona od zera absolutnego nosi nazwę absolutnej (lub bezwzględnej) i wyrażana jest w Kelvinach (tzw. skala Kelvina) $[K]$. Ze skalą Celsjusza powiązana jest zależnością:

$$T[K] = t[^\circ\text{C}] + 273.15 \quad (2)$$

w praktyce często stosuje się przybliżenie :

$$T[K] \cong t[^\circ\text{C}] + 273 \quad (3)$$

Nie mniej ważnym pojęciem jest ciepło. Ciepło jest ilością energii cieplnej, która istnieje w danym ograniczonym obszarze fizycznym, Tak, więc dwie porcje płynów po zmieszaniu zachowują swoją sumę swoich energii cieplnych, choćby nawet temperatura nie uległa zmianie. Często określenie ciepła używa się do opisanie ilości energii wydzielonej lub pochłoniętej w jakimś procesie.

Dwie porcje płynu, każda o innej temperaturze, po zmieszaniu (bez dodatkowej wymiany ciepła) utrzymują ilość energii cieplnej równą sumie początkowych energii cieplnych każdej z nich, lecz w tym przypadku zmieni się i temperatura osiągnie wartość pośrednią między temperaturami początkowymi obu składników. Na tym przykładzie widać, że temperatura i zawartość ciepła, to dwie różne wielkości, które można poddawać odpowiednim pomiarom. Ciepło w sensie „ilości energii” nie może być mylone z pojęciem „ciepło” w sensie np. „dzisiaj jest ciepło”. To ostatnie oznacza, bowiem właściwości substancji związaną z jej temperaturą.

Tabela 1. Mierzone wielkości termiczne i ich jednostki miary w układzie SI

Grupa pojęciowa	Wielkość mierzona	Jednostka miary (SI)	Nazwa (jeżeli istnieje)	Inna dopuszczalna jednostka miary
Temperatura	Temperatura termodynamiczna, Temperatura Celsjusza, Przedział temperatur.	K - K	Kelwin Kelwin	°C (stopień Celsjusza)
Ciepło	Ilość ciepła, Strumień cieplny, Gęstość strumienia cieplnego.	J W Wm ⁻²	Jul Wat	
Parametry układu	Współczynnik temperaturowej rozszerzalności liniowej lub objętościowej. Wiele innych współczynników temperaturowych, np. oporu elektrycznego, Przewodność cieplna, Przejmowalność cieplna (współczynnik przenikania ciepła): - Liczony na jednostkę powierzchni, - Liczony na określony układ Pojemność cieplna: - Liczona na układ, - Liczona na jednostkę objętości	K ⁻¹ Wm ⁻¹ , K ⁻¹ Wm ⁻² K ⁻¹ WK ⁻¹ JK ⁻¹ Jm ⁻³ K ⁻¹		Stosuje się także KW ⁻¹

Każdy punkt skali wymaga odpowiedniej aparatury, przy użyciu, której może być zrealizowany punkt odniesienia. Urządzenia takie przechowywane są w centralnych instytucjach miar poszczególnych państw. Wzorce te służą do wzorcowania poszczególnych rodzajów termoelementów. Międzynarodowa Praktyczna Skala Temperatur (MPST 1968) oparta jest na punktach charakterystycznych – punkt potrójny, przemiany fazowe poszczególnych pierwiastków i związków chemicznych.

Tabela 2. Wzorce Międzynarodowej Praktycznej Skali Temperatur (MPST 1968)

Punkt odniesienia (wzorzec)	Temperatura [°C]	Temperatura [K]
Punkt potrójny wodoru	-259.24	13.61
Punkt wrzenia wodoru	-252.87	20.28
Punkt wrzenia neonu	-246.048	27.102
Punkt potrójny tlenu	-218.789	54.361
Punkt wrzenia tlenu	-182.962	90.188
Punkt potrójny wody	0.01	273.16
Punkt wrzenia wody	100	373.15
Punkt krzepnięcia cynku	419.58	692.73
Punkt krzepnięcia srebra	961.39	1235.08
Punkt krzepnięcia złota	1064.43	1337.58
Punkt krzepnięcia cyny	231.9681	505.1181
Punkt krzepnięcia ołowiu	327.502	606.652
Punkt wrzenia siarki	444.674	717.824

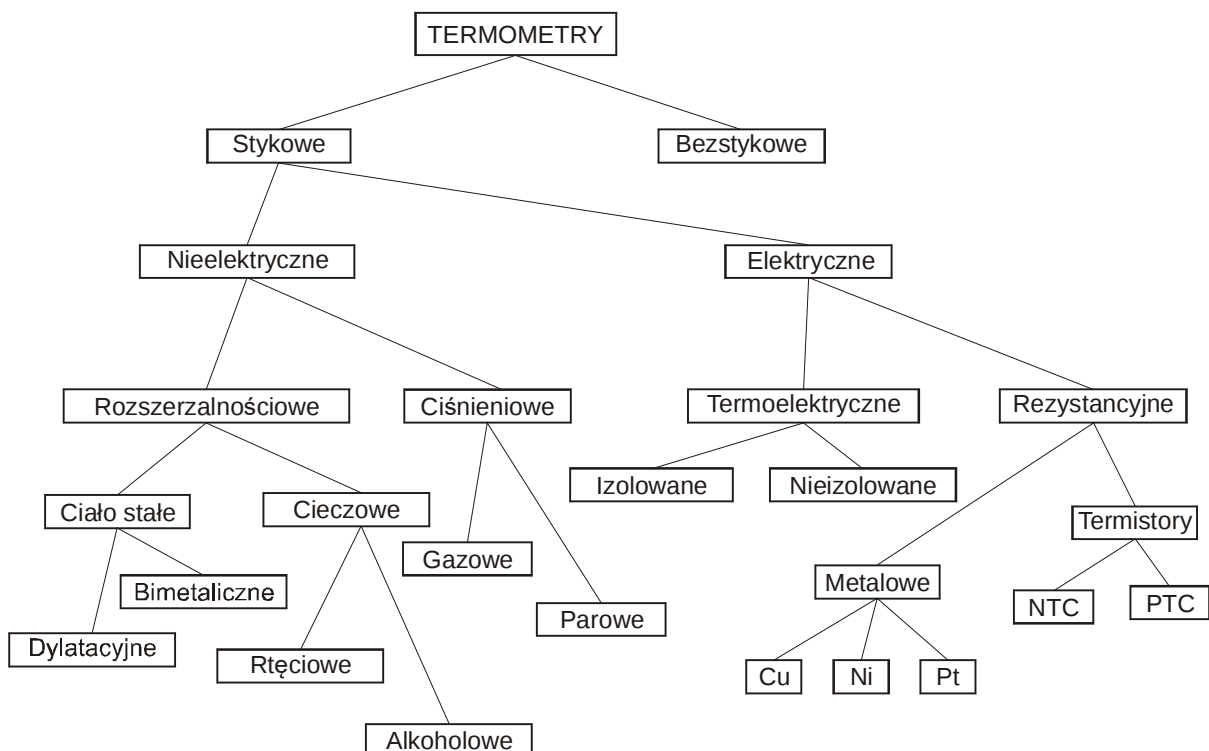
Punkt krzepnięcia antymonu	630.74	903.89
Punkt krzepnięcia glinu	660.37	933.52

2 Urządzenia do pomiaru temperatury i ich własności

Termometr jest to przyrząd stykowy służący do ilościowego określenia temperatury ciał w przypadkach równowagi termicznej pomiędzy mierzonym ciałem i przyrządem. Zasadniczą częścią termometru jest tzw. ciało termometryczne, którego charakterystyczna wielkość (wielkość termometryczna) służy do określenia temperatury.

Termometr mierzy zawsze temperaturę własną, która tylko w przypadku osiągnięcia równowagi termicznej z mierzonym ciałem, może być równa temperaturze tego ciała.

Pirometr to przyrząd bezstykowy służący do ilościowego określenia temperatury umownej, będącej złożoną funkcją rzeczywistej temperatury ciała oraz jego pewnych charakterystycznych właściwości wpływających na wartość temperatury umownej. Skala pirometru opracowana jest na podstawie praw promieniowania ciała doskonale czarnego.



Rys. 1. Podział termometrów

W zależności od rodzaju wykorzystywanej własności fizycznej (wielkości termometrycznej) można wyróżnić następujące rodzaje termometrów:

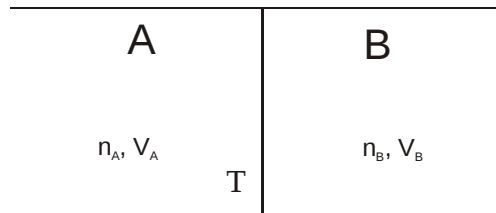
1. Termometry rozszerzalnościowe, do których zaliczamy:
 - a) gazowe,
 - b) cieczowe,
 - c) ciśnieniowo-cieczowe,
 - d) ciśnieniowe parowe,
 - e) oparte na rozszerzalności ciał stałych.
2. Termometry elektryczne:
 - a) oporowe,
 - b) termopary (termoelektryczne).
 - c) półprzewodnikowe
 - d) Piezoelektryczne,
3. Termometry optyczne.
4. Termometry specjalne:

- a) gazowe, termo-farby termo-kredki,
- b) oznaczenie temperatury według barwy ciała,
- c) metoda metalograficzna,
- d) metoda kalorymetryczna,
- e) metoda fotograficzna,
- f) stożki Segera.

2.1 Termoogniwa

W roku 1821 Seebeck odkrył, że w pętli utworzonej z dwóch różnych metali połączonych na końcach, jeżeli istnienie różnic temperatur $\Delta T = T_2 - T_1$ to między złączami następuje przepływ prądu elektrycznego. W roku 1834 Peltier zaobserwował zjawisko odwrotne: przepływ prądu w takim obwodzie wywołuje ochładzanie jednego złącza i ogrzewanie drugiego.

2.1.1 Zjawisko termoelektryczne



Rys. 2. Złącze dwóch metali

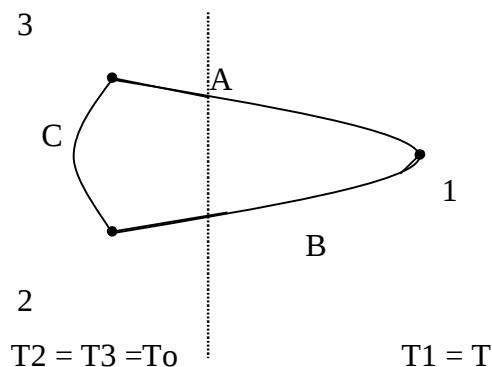
Kontaktowa różnica potencjałów:

$$V_{AB} = V_B - V_A + \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{n_A}{n_B} \quad (4)$$

gdzie:

- n_A, n_B - koncentracja swobodnych elektronów,
- V_A, V_B - praca wyjścia elektronu,
- T - temperatura złącza,
- k - stała Boltzmanna,
- e - ładunek elektronu.

Dla pomiaru kontaktowej różnicy potencjałów niezbędne jest zamknięcie obwodu elektrycznego, co prowadzi do sytuacji:



Rys.3. Termoelement (A – B) w obwodzie do pomiaru siły termoelektrycznej (C)

Siła elektromotoryczna E , tak zwane napięcie Seebecka jest wykorzystywana w czujnikach temperatury, zwanych termoelementami (termoparami lub termoogniwami). Ta wielkość E wiąże się z różnicą temperatur $\Delta T = T_2 - T_1$ między złączami zgodnie z równaniem:

$$E = a\Delta T + b(\Delta T)^2 + c(\Delta T)^3 \quad (5)$$

W którym a , b i c są stałymi, właściwymi dla dwóch użytych materiałów. Dla różnych znormalizowanych par metali i przy określonej ich czystości można sporządzić tablice wartości E w układach, w których jedno złącze (złącze odniesienia) jest utrzymywane w temperaturze 0°C .

Tabela 3. Właściwości podstawowych typów termopar

Rodzaj	Przeznaczenie	Symbol	dE/dT [uV/°C]			t dop [°C]	
			0 [°C]	300 [°C]	800 [°C]	ciągła	chwilowa
PtRh-Pt	Wzorcowy, kontrolny i użytkowy do wyższych temperatur	R,S	5,6	9,1	10,9	1300	1600
Chromel-Alumel	Uniwersalny przemysłowy	K	39,5	41	40,5	1200	1350
Fe-Konstanta n	Do średnich temperatur	J	52	55,5	65	600	900
Cu-Konstanta n	Do niskich temperatur	T	38,5	53,2	61,7	300	400

Tablice te są zawarte w odpowiednich normach przedmiotowych. Istnieje szereg kombinacji metali stosowanych na złącza termoelektryczne.

- E zależy od różnicy temperatur spoiny pomiarowej i spoin odniesienia (nie zaś od samej $T!$),
- Zależność jest nieliniowa,
- Metal, którego końce znajdują się w tej samej temperaturze (T_0) nie wpływa na E , niezależnie od przebiegu temperatury pomiędzy końcami (t. zw. „prawo trzeciego metalu”),
- Dla pomiarów temperatury metodą termoelektryczną zasadnicze znaczenie ma równość temperatury spoin odniesienia i jej wartość.

2.1.2 Budowa i układy pomiarowe

Złącza sporządza się przez skręcenie drutów, przez ich zgrzanie lub przez osadzenie jednego metalu na drugim. W praktyce złącza odniesienia nie utrzymują się w temperaturze 0°C . Specjalny układ elektroniczny mierzy temperaturę otoczenia i wytwarza w pętli termoelementu napięcie symulujące tak jego wartość, jaka występowałaby dla temperatury odniesienia równej 0°C .

Przewody kompensacyjne stosowane są do doprowadzenia spoin do miejsca o kontrolowanej temperaturze. Najczęściej stosowana jest następująca termostatyizacja (stabilizacja temperatury zimnych końców):

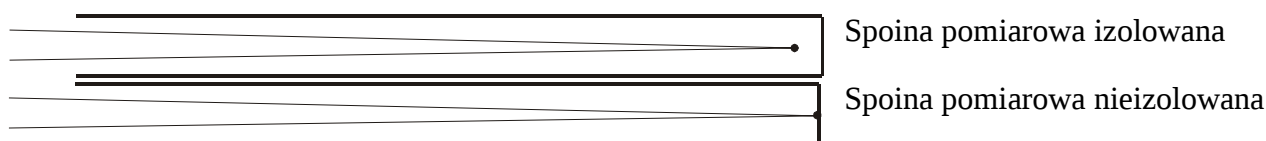
- $T_0 = 0$ lub 20 [°C] - w laboratorium,
- $T_0 = 50$ [°C] - w przemyśle.

Zaletami termoelementów są: niskie koszty, bardzo duży zakres mierzonych temperatur (przy użyciu różnych materiałów pomiarami można objąć cały zakres temperatur od okolicy zera bezwzględnego do, blisko 3000°C) oraz możliwość znacznej miniaturyzacji układu. Termoogniwa stosuje się bardzo szeroko w procesach przemysłowych, gdzie zarówno rodzaje termoelementów jak i warunki ich użytkowania są znormalizowane, gdzie, zatem użytkownicy nie muszą zbytnio zgłębiać

właściwości złączy, przewodów, obwodów, mierników itp.

Materiały stosowane na termoelementy powinny w miarę możliwości wykazywać następujące cechy:

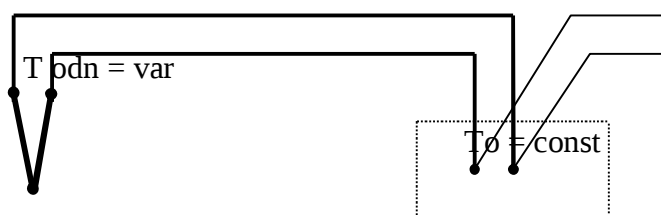
- wysoka temperatura topnienia,
- wysoka dopuszczalna temperatura pracy ciągłej,
- duża odporność na wpływy atmosferyczne,
- możliwie mała rezystywność,
- mały cieplny współczynnik rezystancji,
- stałość powyższych własności w czasie,
- mała nieliniowość charakterystyki,
- duża czułość - metale odległe w szeregu termoelektrycznym,
- odporność na wpływy otoczenia



Rys. 6. Umieszczenie spoiny pomiarowej w stosunku do obudowy

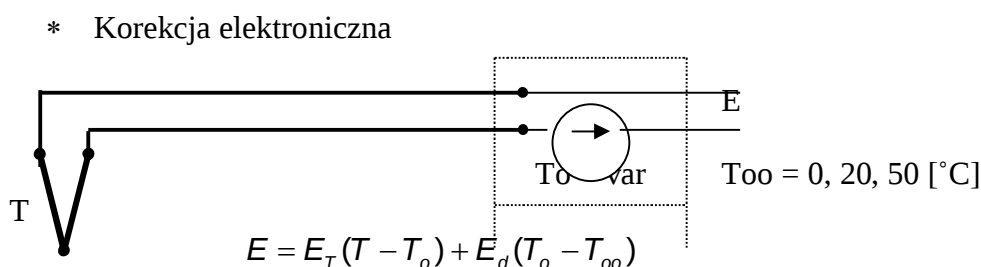
Termopary odznaczają się dużą niezawodnością, dokładnością i elastycznością konstrukcji, co pozwala na ich zastosowanie w różnych warunkach.

Przykładowy układ do pomiaru temperatury za pomocą termopary przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Układ pomiarowy z termoelementem i przewodami kompensacyjnymi doprowadzonymi do złącza o znanej temperaturze

W układzie zastosowano termoparę typu J. Wartość mierzonego napięcia zależy tutaj od temperatury obu złączy termoelektrycznych i jest ona w przybliżeniu proporcjonalna do różnicy temperatur obu złączy. Złącze odniesienia umieszcza się w stałej temperaturze i na ogół jest to 0°C. Wykorzystuje się do tego kąpiele lodowe lub niewielkie pudełka ze stabilizowaną temperaturą wnętrza.



Rys. 5. Układ pomiarowy z termoelementem i przewodami kompensacyjnymi, doprowadzonymi do złącza z pomiarem i korekcją zmiennej temperatury odniesienia

Termopara typu J jest to złącze żelaza i konstantanu (55%Cu i 45%Ni). Temperatura maksymalna tego złącza to 760°C (czas życia termopary skraca się przez zbyt długą pracę w temperaturze zbliżonej do maksymalnej). Współczynnik temperaturowy napięcia przy 20°C wynosi 51,45 mikroV/°C, a napięcie wyjściowe 5,268mV przy 100°C i 21,846mV przy 400°C. Wzrost

czułości można uzyskać przez szeregowe połączenie kilku termoelementów w obwód tak, aby wszystkie złącza odniesienia były utrzymywane w temperaturze otoczenia (lub 0°C), wszystkie złącza pomiarowe - w temperaturze badanej. Zespół taki nazywa się *termostosem*. Metoda ta można osiągnąć rozdzielczość do mikrokelwina, przy krótkim czasie pomiaru.

2.2 Metalowe czujniki oporowe

Zasadę działania czujników oporowych odkrył w roku 1821 Humphrey Davy. Opór czujnika R_t dla powszechnie stosowanych metali (miedź, nikiel, platyna) zależy w zakresie powyżej 0°C od temperatury w następujący sposób:

$$R_t = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2) \quad (6)$$

gdzie:

R_0 - opór w punkcie odniesienia (zwykle 0°C),

α, β - współczynniki aproksymujące przebieg funkcji

Im dokładniejsze mają być pomiary tym więcej stałych wprowadza się do powyższego szeregu potęgowego. Dla czujników miedzianych wystarczy podanie dwóch stałych natomiast dla niklu i platyny podaje się zazwyczaj trzy współczynniki. Liczba stałych zależy również od wymaganego zakresu, w którym ma być stosowany czujnik.

Termometry oporowe charakteryzuje się często za pomocą ich zakresu podstawowego. Jest to zmiana oporu $R_{100} - R_0$, która występuje pomiędzy 0°C o 100°C. Wielkość ta występuje również w równaniu Callebdera, które ujmuje zależność między temperaturą i oporem w następującej postaci:

$$T = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} * 100 + \delta(T - 100)T \quad (7)$$

gdzie:

T - mierzona temperatura,

R_t - opór czujnika w mierzonej temperaturze,

R_{100} - opór czujnika w temperaturze 100°C,

R_0 - opór czujnika w temperaturze 0°C,

δ - stała charakteryzująca nieliniowość charakterystyki,

Pierwszy człon prawej strony nosi nazwę *temperatury platyny* T_{Pt} . Różnica temperatury mierzonej i temperatury platyny w stopniach Celsjusza wynosi, zatem:

$$T - T_{Pt} = \delta(T - 100)T \quad (8)$$

Korzystając z tablic sporządzonych dla wartości tej różnicy odczytywana jest mierzona temperatura przy użyciu określonych metali jako materiałów czujników.

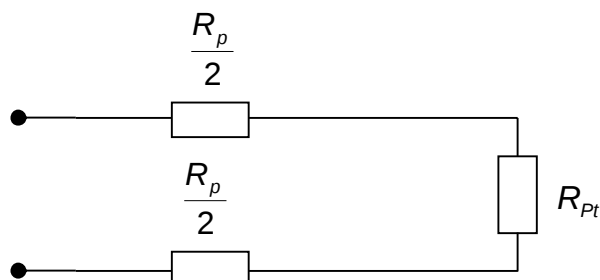
Tabela 5. Właściwości podstawowych typów czujników oporowych

Metal	Zakres	R100/R0	klasa
Pt - platyna	-200 +850 (-250 +1000)	1,385	1,2,3
Cu - miedź	-50 +150	1,426	2,3
Ni - nikiel	-60 +150	1,617	3

Czujniki oporowe wykonują się najczęściej jako druty nawinięte w różny sposób na izolator albo w postaci warstw metalu o różnej grubości osadzonych na podstawie ceramicznej. Czujnik na ogół osadzony jest w metalowej obudowie. Czujnik składa się następujących elementów:

- osłona - ochrona przed działaniem środowiska (ciśnienie, aktywność chemiczna, drgania, narażenia mechaniczne),
- głowica - ochrona zacisków (mechaniczna i izotermiczna), ochrona przetwornika elektronicznego, połączenia wewnętrzne,
- płaszcz – dodatkowa ochrona dla ciężkich warunków przemysłowych.

Opór czujnika mierzy się zazwyczaj metoda mostka Wheatstone'a. Stosowane są mostki odpowiednio zmodyfikowane. Wartość oporu czujników są zazwyczaj małe ($200-500\Omega$).



Rys. 7. Wewnętrzny obwód rezystancyjnego czujnika temperatury

R_{pt} – rezystancja termorezystora, R_p – rezystancja wewnętrznych połączeń czujnika, (pomiędzy zaciskami w głowicy i termorezystorem)

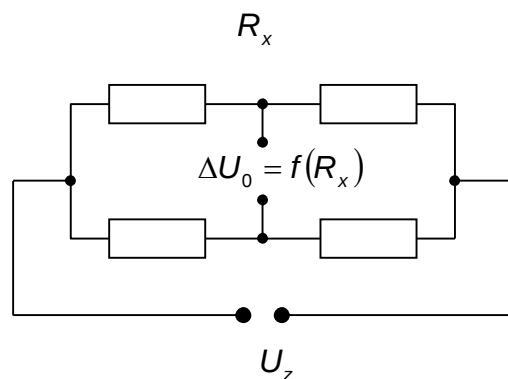
Rezystancja czujnika (między zaciskami głowicy) jest sumą:

$$R_c = R_{pt} + R_p \quad (9)$$

Rezystancja R_p – niezależna od temperatury, może mieć wartość znaczącą.

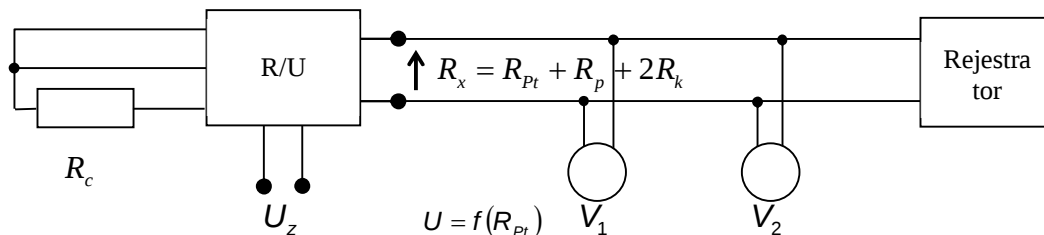
Dla pomiaru rezystancji czujnika może być zastosowany:

- specjalny mostkowy układ laboratoryjny $\Delta < 0,001\text{ }^\circ\text{C}$
- mostek Wheatstone'a



Rys. 8. Układ podstawowy mostka Wheatstone'a

W powyższym układzie mostek mierzy sumę rezystancji termorezystora, połączeń wewnętrznych czujnika i przewodu łączącego mostek z czujnikiem.



Rys. 9. Tor pomiaru temperatury z przetwornikiem elektronicznym o wyjściu napięciowym

2.3 Czujniki półprzewodnikowe

W pomiarach temperatury stosuje się również materiały i przyrządy półprzewodnikowe. W wykorzystuje się tu w zasadzie dwie formy czujników: termistory i półprzewodnikowe złącza diodowe.

W przypadku termistora elementem oporowym jest materiał półprzewodnikowy. Ze wzrostem temperatury maleje opór termistorowego elementu pomiarowego tzw. termistor NTC. Istnieją termistory o dodatnim współczynniku temperaturowym PTC, ale w technice pomiaru temperatury są one praktycznie niewykorzystywane.

W termistorach szybkość zmian oporu z temperaturą jest na ogół przeszło 10-krotnie większa niż w przypadku stosowania czujnika metalowego. Charakterystyka czujnika termistorowego jest jednak bardziej nieliniowa i jest mniej stabilna, zwłaszcza, gdy czujnik ma mierzyć temperatury w szerokim zakresie. Zależność między oporem i temperaturą ma postać wykładniczą w odniesieniu do zera absolutnego.

$$R_T = R_{20} \exp\left(\frac{B}{T} - \frac{B}{293}\right) \quad (10)$$

gdzie:

- R_T - opór czujnika termistorowego w temperaturze T (w K),
- R_{20} - opór czujnika termistorowego w temperaturze $T=20^\circ\text{C}$,
- B - temperatura charakterystyczna danego czujnika (w K).

Do najważniejszych zalet termistorów należy zaliczyć możliwość nadawania im dowolnych kształtów, można je nawet tak zminiaturyzować, że zmieszczą się w igłach strzykawek medycznych.

3 Właściwości czujników temperatury

Użytkownicy czujników przyzwyczajeni są do operowania charakterystykami statycznymi tzn. zależnościami wiążącymi wartość sygnału na wejściu i wyjściu przy założeniu, że sygnał wejściowy jest stały lub na tyle wolnozmienny, że sygnał wyjściowy zmienia się wraz z sygnałem wejściowym. W celu określenia charakterystyk statycznych konieczne jest wykonanie cechowania i sprawdzenia.

Cechowanie to czynność wyznaczania zależności między podziałką przyrządu a rzeczywistą wartością temperatury.

Sprawdzenie to ustalanie czy skala sprawdzanego termometru jest zgodna z rzeczywistą temperaturą czujnika.

Zwykle cechowanie wykonuje się w oparciu o termometryczne punkty stałe przyjętej „**międzynarodowej skali temperatur**” i punkty stałe pomocnicze. Natomiast przy sprawdzaniu najczęściej porównujemy wskazania termometru sprawdzanego ze wskazaniem termometru wzorcowego, który posiada świadectwo wzorcowania.

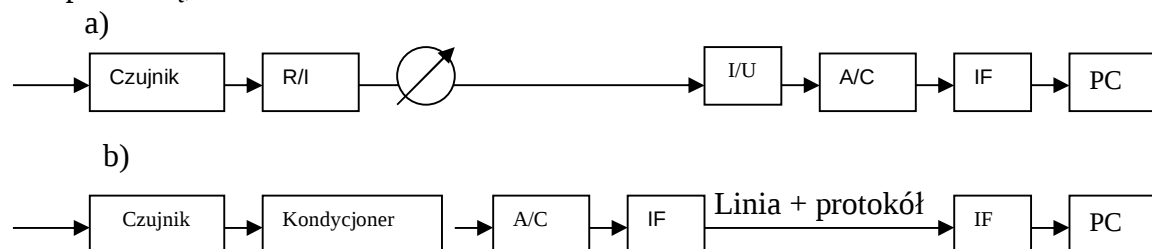
W sytuacjach, gdy sygnał wejściowy (wielkość mierzona) zmienia się w funkcji czasu, statyczny opis czujnika może być niewystarczający. W czujnikach i przetwornikach pomiarowych jak we wszystkich układach fizycznych zachodzą przemiany energetyczne (akumulacja, rozpraszania) a osiągnięcie stanu równowagi wymaga określonego czasu.

Z codziennego doświadczenia wiadomo że włożenie termometru rtęciowego wskazującego określoną temperaturę do kąpieli o innej temperaturze powoduje, że wskazania termometru rtęciowego zmieniają się i dopiero po pewnym czasie stabilizują się. Oznacza to że termometr przez pewien czas nie wskazuje wartości rzeczywistej tzn. jego wskazania obarczone są błędem. Błąd taki nazywany jest błędem dynamicznym (ujawnia się tylko przy zmianie sygnału wejściowego czujnika). Znajomość właściwości dynamicznych czujników temperatury jest istotna ze względu na:

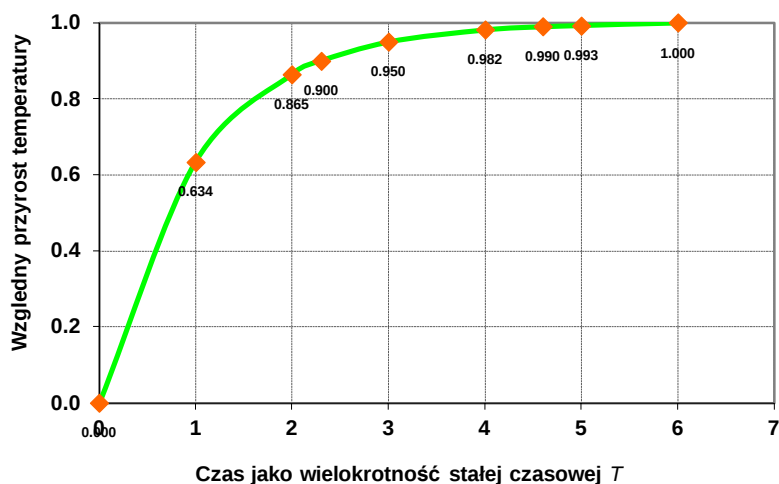
- Określenie minimalnego czasu pomiaru (przebywanie czujnika w ośrodku w celu ustalenia się wskazań przy pomiarach doraźnych),
- Określenie wartości błędu w celu właściwego doboru czujnika do określonych zadań np. w automatyce, stworzenie możliwości porównywania czujników,

- Możliwość dokonywania programowej i sprzętowej korekcji błędów w warunkach dynamicznych.

Na rysunku 10 przedstawiono przykładowe nowoczesne układy pomiaru temperatury. Jest to pomiar temperatury czujnikiem Pt, z przetwornikiem R/I, transmisją prądową, wskazaniem lokalnym na mA, przetworzeniem na U, przetworzeniem A/C, transmisją do RS, akwizycją komputerową,



Rys . 10. Struktura toru pomiarowego z linią transmisyjną a) analogową i b) cyfrową



Rys. 11. Odpowiedź czujnika na skok dodatni

Tabela 5. Zależność względnych zmian temperatury od czasu x wyrażonego jako wielokrotność stałej czasowej

τ	T	2T	2.3T	3T	4T	4.6T	5T
$\Delta T / T_z$	0.632	0.865	0.900	0.95	0.982	0.990	0.993

gdzie:

ΔT - przyrost temperatury od początku wymuszenia,

T_z - całkowity zakres zmiany temperatury podczas wymuszenia.

4 Przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z różnymi metodami pomiaru temperatury, cechowaniem, sprawdzaniem przyrządów pomiarowych. Jako elementy pomiarowe zastosowano następujące elementy pomiarowe:

- Termopara współpracująca z puszką kompensacyjną o temperaturze kompensacji zimnych końców $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- Termopara współpracująca ze wzmacniaczem napięciowym o zakresie określonym na podstawie charakterystyki technicznej urządzenia, sygnał wyjściowy $0 \dots 10\text{ V}$ lub podobnym.
- Termistor współpracujący z miernikiem rezystancji (omomierzem),
- Termopara współpracująca z mikroprocesorowym miernikiem cyfrowym.
- Inny dowolny pomiaru temperatury z zależności od dostępności.

4.1 Skalowanie układów pomiaru temperatury:

W celu przeprowadzenia skalowania poszczególnych czujników temperatury należy:

- Napełnić naczynie grzewcze mieszaniną wody z lodem do $2/3$ objętości,
- Odczekać około 5 minut w celu ustalenia się równowagi termicznej,
- Odczytać wskazania poszczególnych układów pomiaru temperatury i zapisać je w tabeli pomiarowej I,
- Włączyć zasilanie naczynia grzewczego na około 10 ...15 sekund, następnie odczekać około 20 sekund celu ustalenia się równowagi termicznej, odczytać wskazania poszczególnych wskaźników i zapisać je ponownie w tabeli I,
- Proces ogrzewania i odczytywania powinien trwać do osiągnięcia przez ciecz w naczyniu grzewczym temperatury wrzenia lub temperatury wskazanej przez prowadzącego.
- Wyłączyć grzanie naczynia, doczytać wartości końcowe.

5 Instrukcja do wykonania sprawozdania.

1. Sprawozdanie należy wykonać na szablonie zamieszczonym poniżej – szablon należy wydrukować i uzupełnić, dołączyć niezbędne wykresy, zszyć przed oddaniem!
2. Podać cel realizacji ćwiczenia, omówić sposób jego realizacji.
3. Przedstawić schemat stanowiska pomiarowego, zaznaczyć jego najważniejsze elementy.
4. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów należy wykonać następujące charakterystyki/wykresy (format A4)
 - t_w - temperatura wzorcowa odczytana z normy na podstawie napięcia termoelektrycznego termopary:
 - dla termopary z puszką kompensacyjną charakterystykę temperatury w funkcji napięcia termoelektrycznego,
 - dla termopary ze wzmacniaczem napięciowym charakterystykę zmian napięcia w funkcji temperatury $U=f(t_w)$,
 - dla termopary ze wzmacniaczem napięciowym charakterystykę temperatury wyznaczonej na podstawie napięcia w funkcji temperatury wzorcowej $U=f(t_w)$,
 - dla termistora charakterystykę zmian rezystancji w funkcji temperatury $R=f(t_w)$,
 - dla miernika cyfrowego zależność wskazań miernika cyfrowego od temperatury $t=f(t_w)$,
 - inne wskazane przez prowadzącego.
5. Dla termopary ze wskaźnikiem cyfrowym określić:
 - odchyłkę względną i bezwzględną oraz klasę przyrządu stosując następujące zależności:

odchyłka bezwzględna:

$$\Delta t_i = t_i - t_w \quad (11)$$

gdzie

- t_i - temperatura odczytana z termometru sprawdzanego,
 t_w - temperatura wzorcowa,

odchyłka bezwzględna

$$\delta t_i = \left| \frac{\Delta t_i}{t_w} \right| * 100\% \quad (12)$$

klasa przyrządu:

$$kl = \frac{(\Delta t_i)_{\max}}{z} * 100\% \quad (13)$$

gdzie:

- $(\Delta t_i)_{\max}$ - maksymalna odchyłka bezwzględna
 z - zakres pomiarowy przyrządu.

We wszystkich przypadkach za temperaturę odniesienia należy traktować temperaturę odczytaną z tablic na podstawie napięcia termoelektrycznego.

6. Dla termopary ze wzmacniaczem napięciowym wyznaczyć krzywą skalowania, określić współczynnik korelacji oraz odchyłki w poszczególnych punktach pomiarowych.
7. Dla termistora wyznaczyć krzywą skalowania, określić współczynnik korelacji oraz odchyłki w poszczególnych punktach pomiarowych.
8. Przeprowadzić analizę błędów pomiarowych.
9. Zamieścić wnioski i spostrzeżenia dotyczące poszczególnych punktów ćwiczenia.

6 Przykładowe pytania kontrolne

1. Podać definicję temperatury.
2. Omówić skalę temperatur.
3. O jakie zjawisko oparta jest zasada działania termopary.
4. Podać definicję punkty wrzenia, krzepnięcia i punktu potrójnego.
5. Wymienić najczęściej stosowane materiały do budowy termopar, co oznaczają symbole literowe w oznaczeniu termopary.
6. Co to jest termistor?
7. Omówić zasadę działania pirometru.
8. Omówić zastosowania elementów do pomiaru temperatury.
9. Podać definicje „Pierwszego Prawa Termometrii”,
- 10.

7 Literatura:

1. Jasiak A., Pomiary inżynierskie, Poznań: Wydaw. Politechniki Poznańskiej, 1999.
2. Ichalski L., Pomiary temperatury, Warszawa : WNT, 1986.
3. Kotlewski F, Mieszkowski M., Pomiary w technice cieplnej, Warszawa, WNT, 1972.
4. Wiśniewski S., Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych, Warszawa: WNT, 1983.
5. Buchowski H., Podstawy termodynamiki, Warszawa, WNT, 1994.
6. Terpiłowski J., Termodynamika: pomiary cieplne, skrypt WAT, Warszawa, 1993.
7. Michalski L., Eckersdorf K.: Pomiary temperatury. Warszawa, WNT 1986.
8. Hagel R., Zakrzewski J., Miernictwo dynamiczne, Warszawa, WNT 1984.

9. Romer E.: Miernictwo przemysłowe. Warszawa, PWN 1970.
10. Zatorski A., Rozkrut A., Miernictwo elektryczne, Materiały do ćwiczeń laboratoryjnych, Kraków, Wyd. AGH 1990, 1992, 1994
11. **PN-EN 60584-1:2014-04**, Termoelementy – Charakterystyki,
12. **PN-EN 60584-1:2014-04**, Termoelementy – Tolerancje,
13. **PN-EN 61515:2016-10**, Przewody termoelementowe płaszczone i termoelementy płaszczone

**WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
ZAKŁAD SILNIKÓW I INŻYNIERII EKSPLOATACJI**

LABORATORIUM TERMODYNAMIKI TECHNICZNEJ

**SPRAWOZDANIE
Z ćwiczenia laboratoryjnego nr T- 03**

Temat: Pomiar temperatury różnymi metodami

Grupa:

Data wykonania ćwiczenia:.....

Data oddania sprawozdania:.....

Poprawa - data oddania.....

Prowadzący:

1. Cel i przebieg ćwiczenia

2. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

2. Wykaz przyrządów stosowanych podczas pomiarów:

Nazwa	Typ	Zakres	Nr fabryczny	Działka elementarna

4. Wzory stosowane do obliczeń i przykładowe obliczenia:

Tabela I. Protokół obliczeń

[illegible]

Wnioski

- **Odniesione do celu ćwiczenia:**
- **Otrzymanych wyników:**
- **Praktycznego wykorzystania otrzymanych wyników:**
- **Analiza błędów:**