

CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE CZUJNIKÓW TEMPERATURY

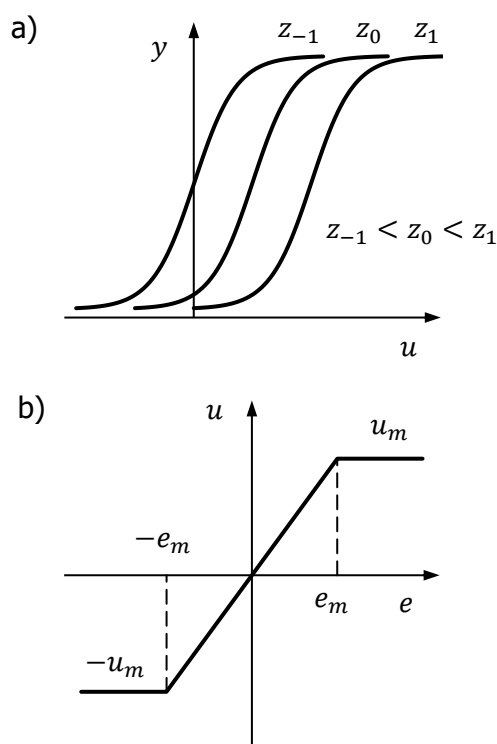
SPIS TREŚCI

Linearyzacja charakterystyk	1
Linearyzacja statyczna elementów nieliniowych	1
Charakterystyki wybranych czujników	3
Termometry rozszerzalnościowe	3
Termometry oporowe (termorezystory)	4
Termoelementy (termopary)	9
Pirometry	11
Inne czujniki	12
Instalowanie czujników temperatury	14
Stanowisko dydaktyczne	16
Budowa stanowiska	16
Wykonanie ćwiczenia	16
Prezentacja wyników	16
Pytania kontrolne	17
Literatura	17

LINEARYZACJA CHARAKTERYSTYK

LINEARYZACJA STATYCZNA ELEMENTÓW NIELINIOWYCH

Rzeczywiste układy zazwyczaj nie posiadają charakterystyk liniowych [1], szczególnie gdy analizowany jest szeroki zakres zmian parametrów pracy (Rys. 1).



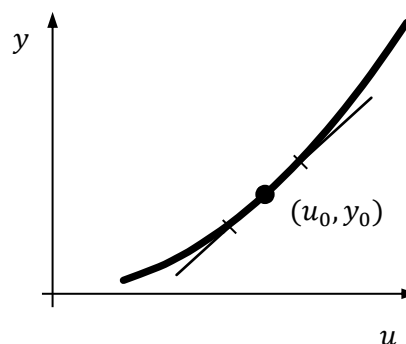
Rys. 1. Przykładowe charakterystyki statyczne obiektu regulacji (a) oraz regulatora (b).

Nieliniowość komplikuje analizę i projektowanie. Jednocześnie wiele rzeczywistych elementów wykazuje zachowanie zbliżone do liniowego w ograniczonym zakresie pracy. Dlatego w praktyce często zastępuje się charakterystykę nieliniową przybliżeniem liniowym w otoczeniu wybranego punktu pracy [2]. Proces ten nazywany jest **linearyzacją charakterystyki**.

Rozważmy element statyczny opisany zależnością:

$$y = f(u) \quad (1)$$

dla którego typowy zakres pracy należy do otoczenia wybranego punktu pracy (u_0, y_0) .



Rys. 2. Przykładowa charakterystyka nieliniowa z wyróżnionym fragmentem liniowym wokół wybranego punktu pracy (u_0, y_0) .

Nieliniową funkcję można rozwinąć w szereg Taylora wokół wybranego punktu (u_0) :

$$f(u) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(u_0)}{n!} (u - u_0)^n \quad (2)$$

co rozwija się jako:

$$f(u) = f(u_0) + \left. \frac{df}{du} \right|_{u_0} (u - u_0) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2f}{du^2} \right|_{u_0} (u - u_0)^2 + \dots \quad (3)$$

gdzie:

pierwszy składnik określa wartość funkcji w punkcie pracy, natomiast drugi przybliża zmianę wartości wyjściowej wynikającą z niewielkiej zmiany wejścia względem punktu pracy.

W przypadku małych odchyień od punktu pracy składniki wyższego rzędu można pominąć, ponieważ ich wartości szybko maleją. Otrzymuje się wtedy przybliżenie liniowe:

$$y \approx f(u_0) + k(u - u_0)$$

gdzie stała $k = \left. \frac{df}{du} \right|_{u_0}$ jest współczynnikiem nachylenia charakterystyki w punkcie pracy. W praktyce oznacza to zastąpienie fragmentu krzywej nieliniowej prostą styczną do charakterystyki w punkcie pracy.

Współczynnik (k) można wyznaczyć:

- **analitycznie** – jeżeli znana jest funkcja opisująca charakterystykę $y = f(u)$,
- **graficznie** – poprzez wyznaczenie nachylenia stycznej do krzywej $y = f(u)$ w punkcie pracy (u_0, y_0) . Tangens kąta α nachylenia stycznej do wykresu jest współczynnikiem proporcjonalności c między przyrostami Δu i Δy .

CHARAKTERYSTYKI WYBRANYCH CZUJNIKÓW

W układach automatyki stosuje się wiele rodzajów czujników służących do pomiaru różnych wielkości fizycznych, takich jak temperatura, ciśnienie, przepływ, poziom cieczy, przemieszczenie czy wilgotność. W niniejszym laboratorium szczególną uwagę poświęcono czujnikom temperatury, które należą do najczęściej wykorzystywanych elementów pomiarowych w automatyce przemysłowej, energetyce, motoryzacji oraz systemach HVAC.

Ze względu na zasadę działania czujniki temperatury można podzielić na kontaktowe i bezkontaktowe (Rys. 3).

TERMOMETRY ROZSZERZALNOŚCIOWE

Termometry rozszerzalnościowe wykorzystują zależność rozszerzalności cieplnej substancji od temperatury. Wzrost temperatury powoduje zmianę objętości lub wymiarów materiału pomiarowego, która

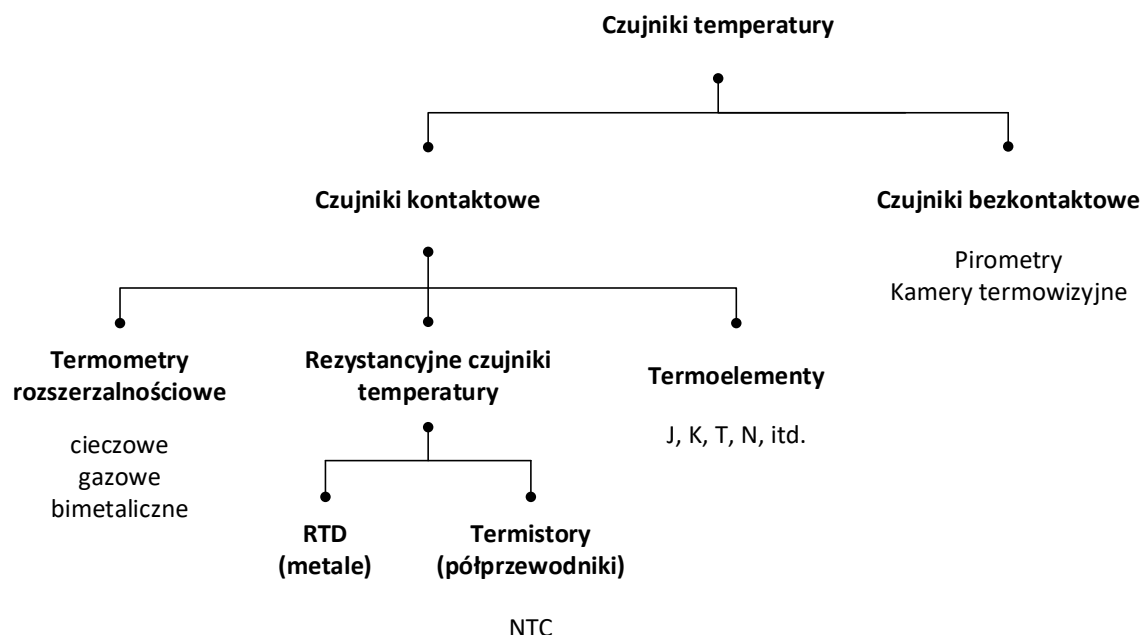
jest przekształcana na wskazanie temperatury. Najczęściej stosowane są termometry cieczowe, w których ciecz robocza znajduje się w kapilarze połączonej ze zbiorniczkiem pomiarowym. Zmiana wysokości słupa cieczy stanowi miarę temperatury.

Podstawową zależność opisującą działanie termometru cieczowego można przedstawić jako:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad (4)$$

gdzie:

ΔV – zmiana objętości cieczy,
 β – współczynnik rozszerzalności objętościowej cieczy,
 V_0 – objętość początkowa cieczy,
 ΔT – zmiana temperatury.



Rys. 3. Podział czujników temperatury.

W przeszłości szeroko stosowano termometry rtęciowe, wykorzystujące rtęć – metal występujący w stanie ciekłym w temperaturze pokojowej.

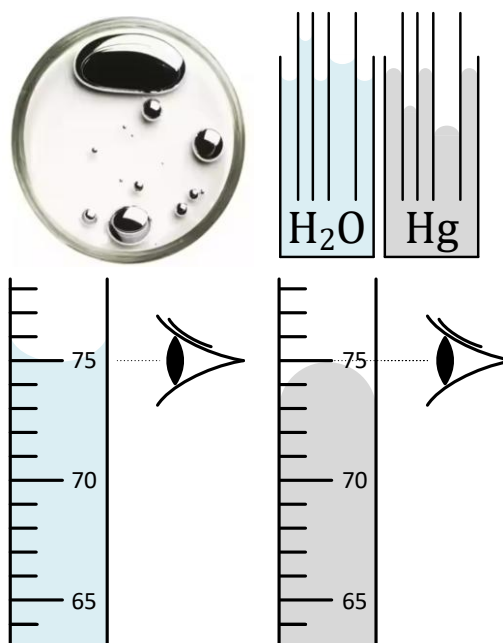
Charakteryzowały się one dużą dokładnością, stabilnością oraz dobrą powtarzalnością pomiarów dzięki korzystnym właściwościom fizycznym rtęci, m.in. braku zwilżania szkła i szerokiemu zakresowi temperatur pracy. Obecnie zostały w dużej mierze zastąpione ze względu na toksyczność rtęci i wymagania dotyczące ochrony środowiska.

Ciekawostka

Rtęć charakteryzuje się dużą kohezją, dlatego po rozlaniu tworzy kuliste krople odpowiadające stanowi o najmniejszej energii powierzchniowej (Rys. 4a).

Alternatywą są termometry alkoholowe, w których cieczą roboczą jest etanol lub inne ciecze organiczne. Charakteryzują się dużą rozszerzalnością cieplną, jednak ich dokładność i stabilność są zazwyczaj niższe niż w przypadku termometrów rtęciowych. Czysty alkohol jest bezbarwny i słabo widoczny w cienkiej kapilarze, dlatego ciecz w termometrach alkoholowych jest często barwiona. Dodanie barwnika poprawia kontrast między cieczą a szklaną kapilarą, ułatwiając odczyt wskazania temperatury.

Podczas odczytu temperatury należy uwzględnić zjawiska kapilarne wynikające ze zwilżania ścianek kapilary przez ciecz (Rys. 4b). Ciecze zwilżające szkło (np. woda lub alkohol) tworzą menisk wklęsły, natomiast rtęć, która nie zwilża szkła, tworzy menisk wypukły. Odczyt należy wykonywać odpowiednio dla dolnej lub górnej części menisku, ponieważ niewłaściwe określenie poziomu cieczy może prowadzić do błędów pomiarowych (Rys. 4c,d).



Rys. 4. Rtęć na szalce Pertiego (a), zjawisko kapilarności (b) i sposób odczytu poziomu cieczy w termometrach: (c) ciecz zwilżająca szkło – menisk wklęsły (np. woda), (d) ciecz niezwilżająca szkła – menisk wypukły (np. rtęć).

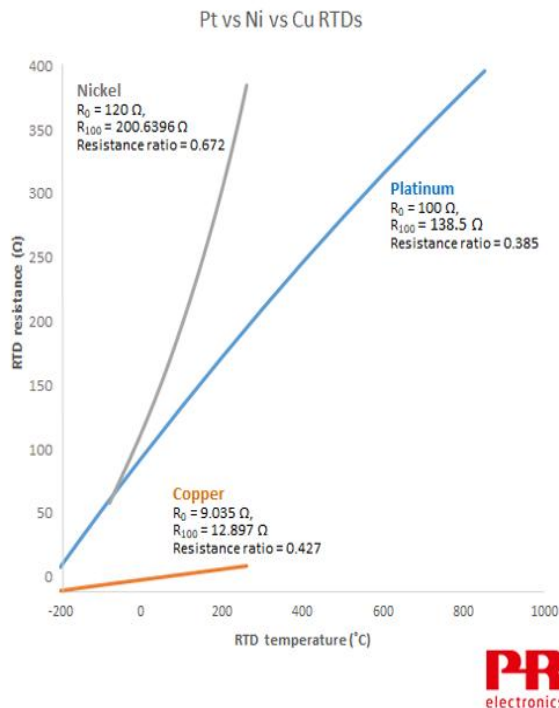
TERMOMETRY OPOROWE (TERMOREZYSTORY)

Rezystancyjne czujniki metalowe

Termometr rezystancyjny (RTD – Resistance Temperature Detector) jest pasywnym elementem pomiarowym, wykonanym z czystego metalu, którego rezystancja zmienia się wraz z temperaturą (Rys. 5). Czujniki te posiadają dodatni temperaturowy współczynnik rezystancji, co oznacza, że wzrost temperatury powoduje wzrost ich rezystancji.

W praktyce przemysłowej najczęściej stosuje się czujniki wykonane z platyny, która charakteryzuje się wysoką stabilnością długoterminową, dobrą powtarzalnością pomiarów, szerokim zakresem pracy oraz niemal liniową charakterystyką rezystancji w funkcji temperatury. Znacznie rzadziej stosowane są czujniki niklowe i miedziane.

Najpopularniejszymi przemysłowymi czujnikami RTD są Pt100, Pt500 oraz Pt1000, gdzie liczba oznacza rezystancję znamionową czujnika w temperaturze 0°C (R_0). Czujniki te są produkowane m.in. przez firmy WIKA, Endress+Hauser, JUMO oraz Siemens.



Rys. 5. Charakterystyki statyczne termorezystorów, PR electronics [3].

Zależność rezystancji od temperatury dla platynowych czujników RTD została znormalizowana w PN-EN IEC 60751:2022-11. W praktyce do opisu charakterystyki rezystancja–temperatura stosuje się równanie Callendar–Van Dusen.

Dla temperatur 0–850°C:

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (5)$$

natomiast dla temperatur poniżej 0°C:

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2 + (T - 100)CT^3) \quad (6)$$

gdzie:

T – temperatura (°C),
 $R(T)$ – rezystancja w funkcji T ,
 R_0 – rezystancja w temperaturze $T = 0$ °C;
 $A, B, i C$ – stałe specyficzne dla danego czujnika RTD.

Przykład

W przypadku $\alpha = 0,00385055$ norma PN-EN IEC 60751:2022-11 dla czujników RTD definiuje wartości współczynników Callendar-Van Dusen A, B i C jako: $A = 3,90830 \times 10^{-3}$, $B = -5,77500 \times 10^{-7}$ oraz $C = -4,18301 \times 10^{-12}$ w przedziale od -200°C do 0°C a $C = 0$ od 0°C do +850°C (ma to tę zaletę, że redukuje wielomian do prostszego równania kwadratowego względem temperatury).

Temperaturowy współczynnik rezystancji wyznacza się z zależności:

$$\alpha = \frac{(R_{100} - R_0)}{R_0} \quad (7)$$

Gdzie:

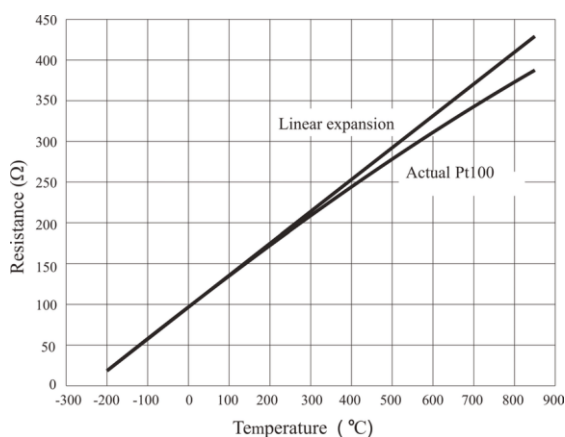
R_0 – rezystancja w temperaturze 0 °C,
 R_{100} – rezystancja w temperaturze 100 °C

Mimo że normy definiują charakterystykę odniesienia dla czujników platynowych, rzeczywista charakterystyka poszczególnych egzemplarzy może nieznacznie od niej odbiegać. W zastosowaniach wymagających bardzo dużej dokładności czujniki poddaje się charakteryzacji w laboratorium wzorującym. Polega ona na wyznaczeniu rezystancji w kilku punktach temperaturowych i określeniu indywidualnych współczynników modelu opisującego charakterystykę rezystancja–temperatura (Rys. 6).

Tab. 1. Oznaczenia oraz zakresy temperatur pracy termorezystorów [4].

Typ czujnika	Rezystancja znamionowa R_0 [Ω]	Współczynnik temperaturowy α [$\frac{\Omega}{\Omega \cdot ^\circ C}$]	Typowy zakres pracy [$^\circ C$]
Pt100	100	0,00385	od -200 do +850
Pt500	500	0,00385	od -200 do +850
Pt1000	1000	0,00385	od -200 do +850
Ni100	100	0,00617	od -60 do +180-250*
Cu100	100	0,00426	od -50 do +150

* Zakres pracy czujników niklowych zależy od producenta i może się różnić.



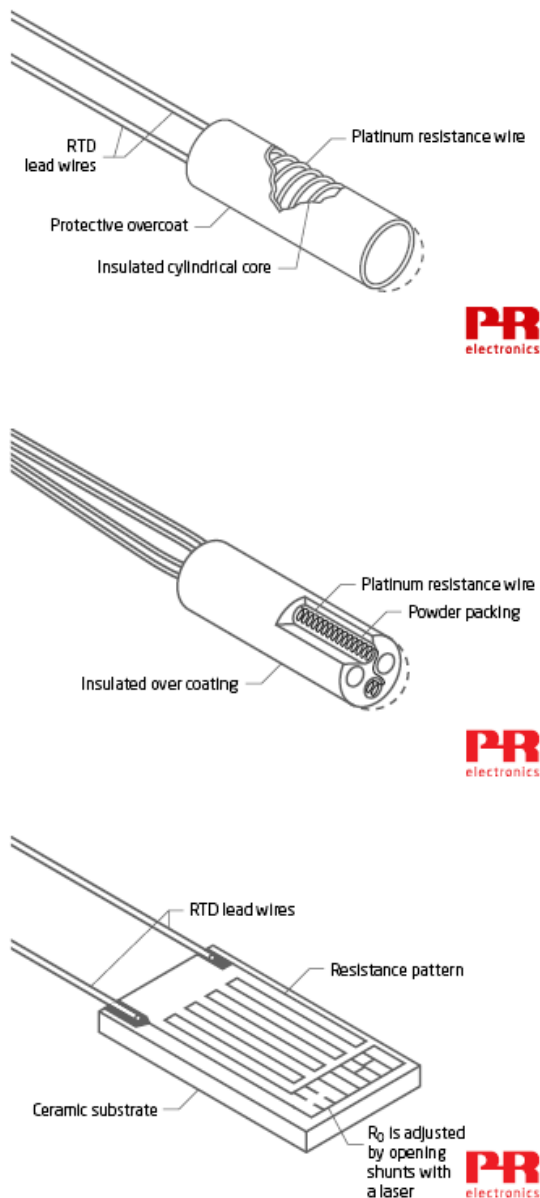
Rys. 6. Charakterystyka czujnika PT100 [5].

Wybór konstrukcji wpływa na dokładność, stabilność, czas odpowiedzi oraz zakres zastosowań czujnika. RTD mogą być wykonywane w trzech podstawowych konstrukcjach:

- **RTD drutowe (wire wound RTD):**
W konstrukcji drutowej cienki drut rezystancyjny (najczęściej platynowy) jest nawinięty na izolacyjny rdzeń ceramiczny. Długość drutu jest dobierana tak, aby uzyskać wymaganą rezystancję znamionową R_0 w temperaturze $0\ ^\circ C$ (np. $R_0=100\Omega$ dla Pt100). Czujniki te charakteryzują się wysoką dokładnością i stabilnością, jednak są bardziej wrażliwe na naprężenia mechaniczne.

- **RTD spiralne (coiled element RTD):**
W tej konstrukcji drut rezystancyjny jest zwinięty w spiralę i umieszczony w ceramicznej obudowie wypełnionej proszkiem izolacyjnym. Umożliwia to kompensację rozszerzalności cieplnej drutu oraz ograniczenie wpływu naprężeń mechanicznych. Konstrukcja ta jest często stosowana w przemysłowych sondach temperatury.
- **RTD cienkowarstwowe (thin film RTD):** Czujniki cienkowarstwowe wykonuje się poprzez naniesienie cienkiej warstwy platyny na podłoże ceramiczne. Charakteryzują się małymi wymiarami, szybkim czasem odpowiedzi oraz niskim kosztem produkcji. Ich dokładność jest nieco niższa niż czujników drutowych ze względu na wpływ naprężeń wynikających z różnej rozszerzalności cieplnej platyny i podłoża.

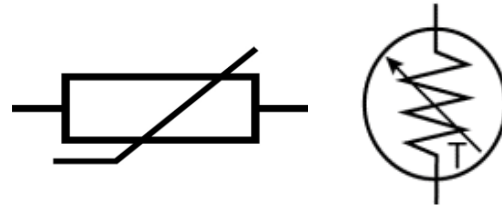
Obecnie w zastosowaniach przemysłowych najczęściej stosuje się cienkowarstwowe czujniki Pt100 i Pt1000, natomiast konstrukcje drutowe wykorzystuje się głównie w pomiarach wymagających najwyższej dokładności.



Rys. 7. Konstrukcje rezystancyjnych czujników temperatury (RTD): drutowa, z elementem spiralnym oraz cienkowarstwowa [3].

Termistor

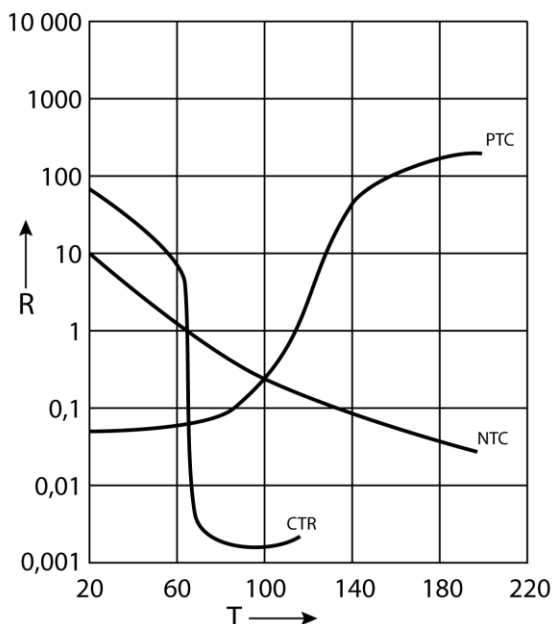
Termistory są rezystancyjnymi czujnikami temperatury wykonanymi z materiałów półprzewodnikowych. W porównaniu z metalowymi czujnikami RTD charakteryzują się większą czułością na zmiany temperatury, jednak ich charakterystyka rezystancja–temperatura jest silnie nieliniowa.



Rys. 8. Symbol termistora NTC (a), symbol używany przez US i Japonię (b) [6].

Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje termistorów:

- **NTC (Negative Temperature Coefficient)** – termistor o ujemnym współczynniku temperaturowym, którego rezystancja maleje wraz ze wzrostem temperatury. Wykonywany jest najczęściej z półprzewodnikowych ceramiek tlenkowych zawierających tlenki metali przejściowych, np. manganu, niklu i kobaltu.
- **PTC (Positive Temperature Coefficient)** – termistor o dodatnim współczynniku temperaturowym, którego rezystancja wzrasta wraz ze wzrostem temperatury po przekroczeniu temperatury Curie. Najczęściej stosuje się ceramiki na bazie tytanianu baru (BaTiO_3) oraz polimery przewodzące z dodatkiem węgla.
- **CTR (Critical Temperature Resistor)** – termistor o gwałtownej zmianie rezystancji po przekroczeniu określonej temperatury progowej. W zależności od zastosowanego materiału zmiana ta może oznaczać wzrost lub spadek rezystancji.



Rys. 9. Charakterystyki statyczne termistorów NTC, PTC i CTR [6].

Najczęściej wykorzystywane są termistory **NTC**, które dzięki dużej czułości temperaturowej umożliwiają dokładny pomiar temperatury oraz kompensację temperaturową układów elektronicznych. Termistory **PTC** i **CTR** są natomiast stosowane głównie jako elementy zabezpieczające oraz przełączające, wykorzystujące gwałtowną zmianę rezystancji po osiągnięciu określonej temperatury.

Termistor NTC

Ze względu na wykładniczy charakter zależności rezystancji od temperatury termistory NTC są jednak czujnikami silnie nieliniowymi. Oznacza to, że ich charakterystyka nie może być dokładnie aproksymowana zależnością liniową nawet w stosunkowo niewielkim zakresie temperatur i wymaga stosowania odpowiednich modeli matematycznych lub linearyzacji.

Charakterystykę termistorów NTC opisuje się najczęściej za pomocą modelu Beta lub równania Steinharta-Harta.

Uproszczony model Beta ma postać:

$$R(T) = R_0(T_0) \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (8)$$

gdzie:

$R_0(T_0)$ – rezystancja w temperaturze odniesienia,
 β – stała materiałowa termistora,
 T – temperatura bezwzględna.

Z równania możemy uzyskać współczynnik temperaturowy rezystancji, jest to równanie wrażliwości termistora:

$$\alpha_T = \frac{1}{R(T)} \frac{dR_0(T_0)}{dT} = -\frac{\beta}{T^2} \quad (9)$$

Współczynnik α_T występuje w równaniu ze znakiem ujemnym, co wskazuje na ujemną charakterystykę rezystancyjno-temperaturową termistorów NTC.

Przykład

Dla wartości $\beta = 4000K$ oraz $T = 298K$ otrzymuje się $\alpha_T = -0,0045/K$. Wartość ta jest znacznie większa niż czułość platynowych czujników RTD, co oznacza, że termistory NTC mogą wykrywać bardzo małe zmiany temperatury.

Model Beta jest stosowany w prostych układach pomiarowych, w których wymagana jest szybka aproksymacja charakterystyki.

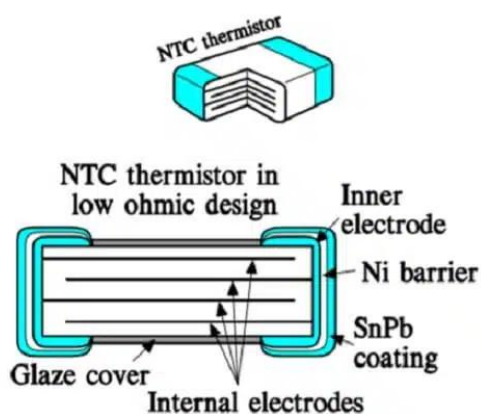
Dla większej dokładności stosuje się równanie Steinharta-Harta:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3 \quad (10)$$

gdzie:

A, B, C – współczynniki modelu Steinharta-Harta określone przez producenta lub wyznaczone podczas kalibracji,
 R – rezystancja termistora [Ω],
 T – temperatura bezwzględna [K].

Model Steinharta-Harta umożliwia dokładniejsze odwzorowanie nieliniowej charakterystyki termistora w szerokim zakresie temperatur. W praktyce przemysłowej często stosuje się również tablice rezystancja–temperatura dostarczane przez producenta.



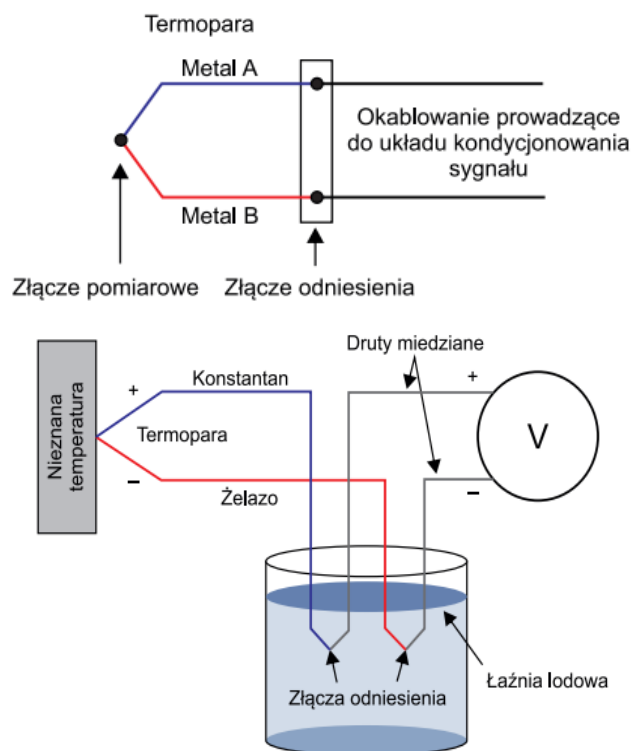
Rys. 10. Konstrukcja niskoomowego termistora chipowego [7].

Termistory wykonuje się najczęściej z mieszaniny sproszkowanych tlenków metali półprzewodnikowych, które po połączeniu ze spoiwem tworzą element pomiarowy. Materiał nanoszony jest na wyprowadzenia elektryczne, a następnie poddawany procesowi spiekania, podczas którego uzyskuje wymaganą strukturę i właściwości elektryczne. Gotowy element

jest zabezpieczany powłoką ochronną, najczęściej szklaną lub ceramiczną, która zapewnia odporność na wilgoć, stabilność parametrów oraz ochronę mechaniczną.

TERMOELEMENTY (TERMOPARY)

Termopara (TC – *Thermocouple*) jest jednym z najprostszych i najczęściej stosowanych czujników temperatury. Składa się z dwóch przewodników wykonanych z różnych metali lub stopów, połączonych na jednym końcu, tworząc złącze pomiarowe (spoinę pomiarową). Drugie końce przewodników stanowią złącze odniesienia (porównawcze).



Rys. 11. Schemat budowy termopary oraz historyczny sposób realizacji złącza odniesienia z wykorzystaniem łaźni lodowej (0°C). Zastosowanie łaźni lodowej jako punktu odniesienia dało początek określeniom zimne złącze (złącze odniesienia) oraz gorące złącze (złącze pomiarowe), które są stosowane do dziś [8].

Różnica temperatur pomiędzy złączem pomiarowym i odniesienia powoduje powstanie siły elektromotorycznej (SEM), będącej wynikiem efektu Seebecka. Zjawisko to wynika z różnicy koncentracji oraz energii elektronów w obu materiałach, co prowadzi do powstania różnicy potencjałów zależnej od temperatury. Gdy oba złącza mają jednakową temperaturę, napięcie wyjściowe jest równe zero.

Historia: Za odkrywcę opisywanego zjawiska termoelektrycznego uznaje się niemieckiego uczonego Thomasa Johana Seebecka, który w 1821 roku stwierdził, że igła magnetyczna umieszczona między połączonymi na obu końcach płytkami wykonanymi z miedzi i bizmutu ulega wychyleniu, jeżeli jedno ze złączy zostanie ogrzane. Poprawnej interpretacji tego zjawiska dokonał twórca elektromagnetyzmu, duński fizyk Hans Christian Ørsted, który wprowadził pojęcie zjawisko termoelektryczne.

Podstawową zależność opisującą działanie termopary można zapisać w postaci:

$$V(T) = (S_A - S_B)(T_2 - T_1) \quad (11)$$

gdzie:

V – napięcie termoelektryczne [V],
 S_A, S_B – współczynniki Seebecka materiałów tworzących termoparę [V/K],
 T_1 – temperatura złącza odniesienia [°C lub K],
 T_2 – temperatura złącza pomiarowego [°C lub K].

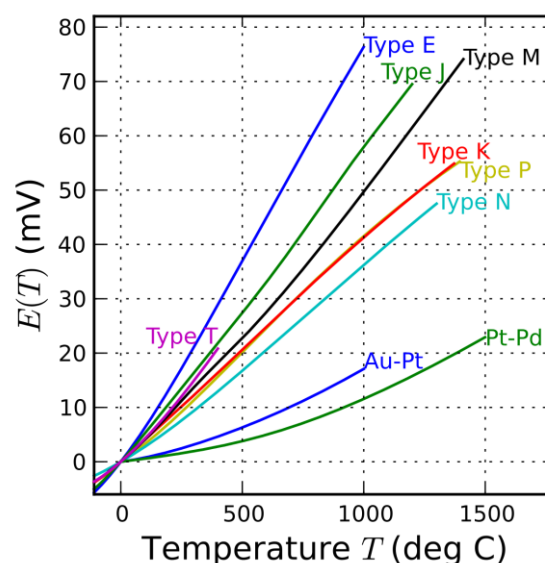
W rzeczywistości charakterystyki napięciowo-temperaturowe większości termopar są wyraźnie nieliniowe w całym zakresie ich pracy (Rys. 12). Z tego względu

wyznaczenie temperatury na podstawie zmierzonego napięcia wymaga zastosowania **linearyzacji**, realizowanej za pomocą tablic referencyjnych lub odpowiednich algorytmów obliczeniowych, np. wielomianów aproksymacyjnych:

$$E(T) = \sum_{i=0}^n a_i T^i = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 \dots + a_n T^n \quad (12)$$

gdzie

a_i są współczynnikami zależnymi od typu termopary.



Rys. 12. Charakterystyki statyczne termopar [9].

W ograniczonym zakresie temperatur charakterystykę termopary można przybliżyć zależnością liniową, dzięki czemu możliwe jest zastosowanie uproszczonego modelu proporcjonalnego:

$$E = \alpha \Delta T \quad (13)$$

gdzie:

α jest efektywnym współczynnikiem Seebecka termopary.

Termopara jest czujnikiem **różnicy temperatur**, dlatego do wyznaczenia temperatury bezwzględnej konieczna jest znajomość temperatury złącza odniesienia. Dawniej realizowano ją poprzez umieszczenie złącza w łaźni lodowej (0°C). Współczesne mierniki wykorzystują elektroniczną kompensację zimnego złącza (*Cold Junction Compensation, CJC*), najczęściej z użyciem czujnika RTD lub półprzewodnikowego czujnika temperatury umieszczonego przy zaciskach termopary.

Napięcie termoelektryczne zależy wyłącznie od rodzaju materiałów oraz różnicy temperatur i nie zależy od wymiarów geometrycznych przewodów. Natomiast średnica przewodów wpływa na właściwości użytkowe czujnika. Większa średnica zapewnia większą wytrzymałość mechaniczną i dłuższą żywotność w wysokiej temperaturze, lecz zwiększa bezwładność cieplną i wydłuża czas odpowiedzi. Cieńsze przewody umożliwiają szybszy pomiar, jednak są mniej odporne na oddziaływanie wysokiej temperatury.

Tab. 2. Charakterystyka termopar [4, 8].

Typ	Materiały	Współczynnik Seebecka [$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$]*	Typowy zakres pracy [$^\circ\text{C}$]
E	Chromel–Konstantan	61	od -270 do +1000
J	Żelazo–Konstantan	52	od -210 do +760
K	Chromel–Alumel	41	od -200 do +1260
N	Nicrosil–Nisil	27	od -200 do +1300
T	Miedź–Konstantan	41	od -270 do +400
R	Pt–13%Rh / Pt	9	od 0 do +1600
S	Pt–10%Rh / Pt	6	od 0 do +1600

* Podane wartości mają charakter orientacyjny i mogą różnić się w zależności od producenta.

PIROMETRY

Pirometry należą do grupy czujników bezkontaktowych. Umożliwiają pomiar temperatury na podstawie analizy promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez badaną powierzchnię. W przeciwieństwie do czujników kontaktowych nie wymagają bezpośredniego kontaktu z obiektem, dzięki czemu mogą być stosowane do pomiaru temperatury elementów znajdujących się w ruchu, trudno dostępnych miejsc oraz obiektów o bardzo wysokiej temperaturze, dla których zastosowanie tradycyjnych czujników byłoby niemożliwe lub niebezpieczne.

Podstawą działania pirometrów jest zależność między temperaturą ciała a emitowanym przez nie promieniowaniem cieplnym. Dla ciała doskonale czarnego całkowita moc promieniowania opisana jest prawem Stefana–Boltzmannia:

$$P = \sigma AT^4 \quad (14)$$

gdzie:

P – moc promieniowania cieplnego [W],
 σ – stała Stefana–Boltzmannia ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$),
 A – powierzchnia emitująca promieniowanie [m^2],
 T – temperatura bezwzględna obiektu [K].

natomiast dla rzeczywistych powierzchni:

$$P = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (15)$$

gdzie:

ε – współczynnik emisyjności powierzchni [-].

Należy zauważyć, że podstawowa zależność opisująca promieniowanie cieplne jest nieliniowa. Współczesne pirometry wykorzystują układy elektroniczne, które przetwarzają i linearyzują zmierzony sygnał promieniowania, dzięki czemu sygnał wyjściowy przetwornika może być proporcjonalny do temperatury.

W pirometrach zmierzone promieniowanie jest przetwarzane na sygnał elektryczny odpowiadający temperaturze obiektu. Dokładność pomiaru zależy m.in. od poprawnego określenia emisyjności badanego materiału. Zagadnienia związane z zastosowaniem pirometrów, szczególnie w procesach wysokotemperaturowych, takich jak odlewanie i obróbka cieplna metali, są szerzej omawiane w ramach kursów z odlewnictwa oraz technologii materiałowych.

INNE CZUJNIKI

Oprócz czujników temperatury w układach automatyki powszechnie stosowane są również czujniki siły i ciśnienia, umożliwiające pomiar obciążeń mechanicznych oraz parametrów cieczy i gazów. Wielkości te odgrywają istotną rolę m.in. w monitorowaniu procesów technologicznych, sterowaniu układami hydraulicznymi i pneumatycznymi oraz diagnostyce maszyn.

Czujniki siły

Czujniki siły służą do pomiaru obciążeń działających na elementy konstrukcyjne lub mechaniczne. Najczęściej wykorzystują zjawisko odkształcenia sprężystego elementu pomiarowego. W praktyce przemysłowej najpowszechniej stosowane są **tensometryczne czujniki siły**, w których zmiana rezystancji tensometrów jest proporcjonalna do odkształcenia elementu sprężystego. W specjalistycznych zastosowaniach wykorzystuje się również **piezoelektryczne czujniki siły**, przeznaczone do pomiaru szybkozmiennych obciążeń i drgań.

W zakresie pracy znamionowej charakterystyka statyczna czujników siły jest zazwyczaj liniowa i może być opisana zależnością:

$$y = kF \quad (16)$$

gdzie:

F – wartość mierzonej siły [N],
 y – sygnał wyjściowy (np. napięcie lub prąd),
 k – współczynnik czułości czujnika.

W przypadku analizy samego elementu tensometrycznego wykorzystuje się zależność opisującą zmianę rezystancji pod wpływem odkształcenia:

$$\frac{\Delta R}{R} = k_g \varepsilon \quad (17)$$

gdzie:

R – rezystancja początkowa [Ω],
 ΔR – zmiana rezystancji [Ω],
 k_g – współczynnik tensometryczny [-],
 ε – odkształcenie względne [-].

Ponieważ siła lub odkształcenie są proporcjonalne do działającej siły (prawo Hooke'a), ostatecznie otrzymuje się liniową charakterystykę $y = f(F)$.

Szczegółowe zagadnienia związane z budową i zasadą działania czujników siły są omawiane podczas kursów z wytrzymałości materiałów.

Czujniki ciśnienia

Czujniki ciśnienia umożliwiają pomiar ciśnienia cieczy i gazów w układach hydraulicznych i pneumatycznych. W automatyce przemysłowej najczęściej stosuje się przetworniki ciśnienia z elementem odkształcalnym, w których zmiana ciśnienia powoduje odkształcenie membrany pomiarowej. Odkształcenie to jest następnie przetwarzane na sygnał elektryczny, np. za pomocą elementów tensometrycznych lub piezorezystancyjnych.

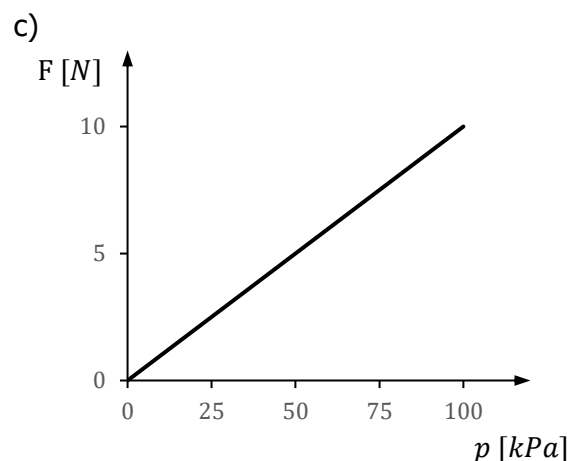
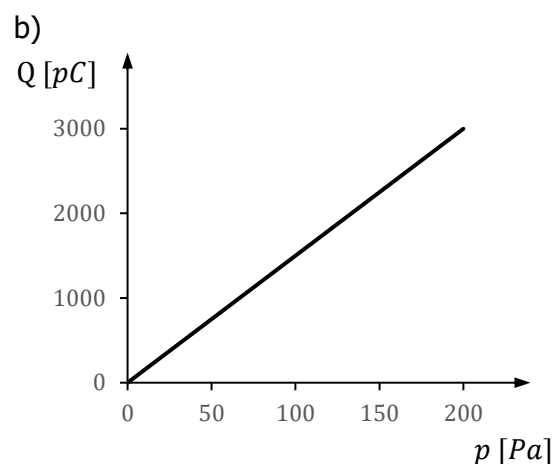
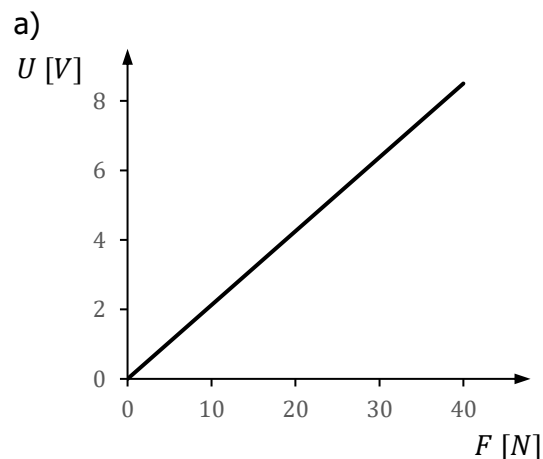
W zakresie pracy przemysłowe przetworniki ciśnienia charakteryzują się zazwyczaj liniową charakterystyką statyczną:

$$y = kp \quad (18)$$

gdzie:

p – ciśnienie [Pa],
 y – sygnał wyjściowy (np. napięcie lub prąd),
 k – współczynnik przetwarzania.

W zależności od zastosowanej technologii elementu pomiarowego wykorzystuje się m.in. czujniki tensometryczne, piezorezystancyjne, pojemnościowe oraz piezoelektryczne. Szczegółowa budowa, zasada działania oraz charakterystyki tych czujników są omawiane w ramach kursów z mechaniki płynów, hydrauliki, oraz pneumatyki.



Rys. 13. Charakterystyki statyczne tensometru (napięcie-siła, a), przetwornika piezoelektrycznego (ładunek elektryczny-ciśnienie, b), przetwornika ciśnienia z membraną tensometryczną (siła-ciśnienie, c) [10].

INSTALOWANIE CZUJNIKÓW TEMPERATURY

Wybór czujnika temperatury zależy od zastosowania, po wzięciu pod uwagę warunków otoczenia, zakresów temperatury czy dokładności pomiaru.

Prawidłowy montaż czujnika temperatury ma istotny wpływ na dokładność i wiarygodność pomiarów. Sposób instalacji zależy od rodzaju czujnika, właściwości mierzonego medium (cieczy, gazu lub ciała stałego), warunków pracy (temperatura, ciśnienie, prędkość przepływu) oraz wymaganej dokładności pomiaru. W zależności od zastosowania dobiera się odpowiedni typ osłony pomiarowej, materiał wykonania oraz sposób mocowania czujnika.

Należy pamiętać, że czujnik mierzy temperaturę jedynie w miejscu, w którym znajduje się element pomiarowy. W przypadku czujników rezystancyjnych jest to element rezystancyjny (np. Pt100), natomiast w termoparach – spoina pomiarowa. Dlatego dokładność pomiaru zależy przede wszystkim od właściwego umiejscowienia tego elementu w badanym ośrodku.

Osłona czujnika zwiększa jego wytrzymałość mechaniczną oraz chroni przed działaniem agresywnego środowiska, jednak jednocześnie zwiększa bezwładność cieplną układu. Im większa masa osłony oraz mniejsza jej przewodność cieplna, tym wolniej czujnik reaguje na zmiany temperatury.

Istotnym źródłem błędów pomiarowych jest przewodzenie ciepła przez osłonę czujnika do otoczenia. Jeżeli znaczna część osłony znajduje się poza mierzonym medium, temperatura elementu pomiarowego może różnić się od rzeczywistej temperatury badanego obiektu. Zjawisko to jest

szczególnie istotne podczas pomiaru temperatury gazów oraz przy małych głębokościach zanurzenia.

Zalecenia dotyczące montażu

Podczas instalowania czujników temperatury należy przestrzegać następujących zasad:

- zapewnić odpowiednią głębokość zanurzenia czujnika, tak aby element pomiarowy znajdował się całkowicie w obszarze o ustalonej temperaturze,
- ograniczyć straty ciepła przez wystającą część osłony, stosując izolację cieplną lub odpowiednio długie osłony,
- w rurociągach umieszczać czujniki w miejscach zapewniających dobry kontakt z przepływającym medium, np. w kolanach lub w osi przepływu,
- unikać montażu w miejscach narażonych na silne promieniowanie cieplne; w razie potrzeby stosować ekrany ochronne,
- w przypadku małych prędkości przepływu zapewnić odpowiednią cyrkulację medium wokół czujnika, co poprawia wymianę ciepła i skraca czas odpowiedzi,
- chronić czujniki przed nadmiernymi drganiami mechanicznymi lub stosować wykonania odporne na wibracje,
- montować czujniki w miejscach umożliwiających łatwą kontrolę, konserwację i ewentualną wymianę.

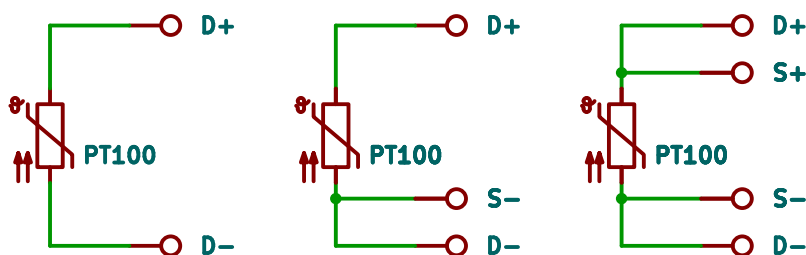
Sygnał z **rezystancyjnego czujnika temperatury** jest przesyłany do przetwornika, sterownika lub przyrządu pomiarowego za pomocą przewodów połączeniowych. Ponieważ rezystancja przewodów sumuje się z rezystancją czujnika, może powodować powstawanie błędów pomiarowych, szczególnie w przypadku długich linii pomiarowych. W celu ograniczenia wpływu rezystancji przewodów stosuje się połączenia dwu-, trój- oraz czteroprzewodowe.

- **Połączenie dwuprzewodowe** jest najprostszym i najtańszym sposobem podłączenia czujnika. Rezystancja obu przewodów dodaje się do rezystancji elementu pomiarowego, dlatego rozwiązanie to stosuje się głównie w układach o niewielkiej długości przewodów lub tam, gdzie wymagana jest umiarkowana dokładność pomiaru.
- **Połączenie trójprzewodowe** umożliwia kompensację rezystancji przewodów połączeniowych. Metoda ta opiera się na założeniu, że rezystancje dwóch przewodów doprowadzających są jednakowe. Przy spełnieniu tego warunku wpływ rezystancji przewodów jest w znacznym stopniu eliminowany, dlatego jest to obecnie najczęściej stosowany sposób podłączenia przemysłowych czujników RTD.

- **Połączenie czteroprzewodowe** zapewnia najwyższą dokładność pomiaru. Dwie żyły służą do doprowadzenia prądu pomiarowego, natomiast dwie pozostałe do pomiaru spadku napięcia bezpośrednio na elemencie rezystancyjnym. Dzięki temu rezystancja przewodów połączeniowych nie wpływa na wynik pomiaru. Rozwiązanie to stosowane jest przede wszystkim w układach laboratoryjnych oraz aplikacjach wymagających bardzo dużej dokładności.

Oprócz rezystancji przewodów na jakość pomiaru wpływają również zakłócenia elektromagnetyczne. W celu ograniczenia ich wpływu zaleca się stosowanie przewodów symetrycznych, najlepiej skręcanych, a w środowiskach o dużym poziomie zakłóceń również ekranowanych. Symetria przewodów umożliwia skuteczniejsze tłumienie zakłóceń wspólnych przez różnicowe układy pomiarowe stosowane we współczesnych przetwornikach temperatury.

W przypadku **termopar** należy stosować przewody kompensacyjne lub przedłużające wykonane z materiałów o odpowiednich właściwościach termoelektrycznych [6]. Ich nieprawidłowy dobór może powodować powstawanie dodatkowych sił termoelektrycznych i zwiększać błąd pomiaru.



Rys. 14. Technologia 2-, 3-, 4-przewodowa do połączenia termorezystorów.

STANOWISKO DYDAKTYCZNE

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie i porównanie charakterystyk statycznych wybranych czujników temperatury: rezystancyjnego czujnika Pt100, termistora oraz termopar typu J i typu K. Na podstawie uzyskanych wyników należy wyznaczyć współczynnik temperaturowy rezystancji dla czujników rezystancyjnych oraz czułość (stałą termoelektryczną) termopar.

BUDOWA STANOWISKA

Stanowisko pomiarowe składa się z:

- termostatu wodnego wyposażonego w grzałkę elektryczną, układ chłodzenia oraz regulator temperatury z termoparą
- badanych czujników temperatury: Pt100, termistora oraz termopar typu J i typu K,
- termometru cieczowego (alkoholowego) służącego do kontroli temperatury wody.

WYKONANIE ĆWICZENIA

Badane czujniki umieszcza się w termostacie wypełnionym wodą. Temperaturę wody zwiększa się stopniowo, rozpoczynając od temperatury otoczenia i zmieniając ją co około 10°C. Po osiągnięciu stanu ustalonego (około 5–8 min) odczytuje się temperaturę oraz wskazania wszystkich badanych czujników.

Pomiary należy wykonać dla co najmniej ośmiu wartości temperatury.

PREZENTACJA WYNIKÓW

Na podstawie wykonanych pomiarów należy:

- wyznaczyć charakterystyki rezystancyjnych czujników temperatury $R = f(T)$ dla oraz napięciowe $E = f(T)$ dla termopar
- określić współczynniki temperaturowe rezystancji czujników oraz wyznaczyć czułość (stałą termoelektryczną) termopar
- porównać otrzymane charakterystyki

Parametry czujników należy wyznaczyć na podstawie analizy otrzymanych wykresów.

PYTANIA KONTROLNE

1. Przeprowadź linearyzację statyczną funkcji $y = u^2$ w wybranym punkcie pracy.
2. Jaka jest rola zbiorniczka pomiarowego w termometrze cieczowym?
3. Który czujnik temperatury charakteryzuje się większą czułością: metalowy czujnik RTD czy termistor NTC? Uzasadnij odpowiedź.
4. Omów podstawowe konstrukcje rezystancyjnych czujników temperatury (RTD).
5. Czy charakterystyka statyczna termistora NTC jest liniowa? W jaki sposób można ją linearyzować?
6. Jakie są typowe zastosowania termistorów PTC i CTR?
7. Która z termopar E i R ma większy zakres, a która większą czułość?
8. Czy pirometr można traktować jako człon proporcjonalny? Uzasadnij odpowiedź.
9. Dlaczego w pomiarach z wykorzystaniem czujników RTD stosuje się połączenia dwu-, trój- i czteroprzewodowe?

LITERATURA

- [1] Stefański T., Teoria sterowania. Cz. 1, Układy liniowe: materiały pomocnicze do wykładów i ćwiczeń z teorii sterowania dla studiów zaocznych, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2005, 193 s. Dostęp online: [Teoria sterowania. Cz. 1](#)
- [2] Islam T., Mukhopadhyay S. C., Linearization of the sensors characteristics: a review, International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 1–21. DOI: 10.21307/ijssis-2019-007.
- [3] RTD Temperature Sensors, PR electronics, 2013. Dostęp online: [RTDs](#)
- [4] LUMEL S.A., Czujniki temperatury. Katalog, LUMEL S.A., Zielona Góra. Dostęp online: [Katalog czujników temperatury LUMEL](#)
- [5] Radetić R. M., Pavlov-Kagadejev M., Milivojević N., The Analog Linearization of Pt100 Working Characteristic, Serbian Journal of Electrical Engineering, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 345–357. DOI: 10.2298/SJEE1503345R.
- [6] Kurzela M., Co to jest termistor – zasada działania, jak dobierać?, Elportal.pl, 8 czerwca 2022. Dostęp elektroniczny: [Podstawy elektroniki](#)
- [7] Thermistors Basics, NTC and PTC Thermistors, 2026. Dostęp online: [Thermistors Basics](#)
- [8] Pomiar temperatury za pomocą termopary, Wybór konstruktora: Czujniki czynników środowiskowych, 12/2020. Dostęp online: [Dwa podejścia do pomiaru temperatury za pomocą termopary](#)
- [9] Bern University of Applied Sciences (BFH), Thermocouple Description, Measurement Flow / BFH. Dostęp online: [Thermocouple Description](#)
- [10] Mikulczyński T. (red.), Laboratorium podstaw automatyki i automatyzacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2005.