

Pomiary temperatury

Pomiary temperatury są najczęściej spotykany w zastosowaniach przemysłowych pomiarem wielkości fizycznej. Temperaturę mierzy się różnych sytuacjach, np. podczas lutowania, w produkcji tworzyw sztucznych, przemyśle spożywczym, przy szybkim ładowaniu akumulatorów, w celu lokalizacji przeciążonych prądowo detali i w wielu innych procesach przemysłowych.

Wybór metody i przyrządów pomiarowych powinien zostać poprzedzony gruntowną analizą problemu, według sformułowanych niżej zagadnień.

- Jaki jest zakres zmian mierzanej temperatury?
- Jaki typ czujnika jest możliwy do zastosowania?
- Jaka jest wymagana dokładność wyniku pomiaru?
- Jak szybko i jak często powinien odbywać się pomiar?

Najważniejsze zagadnienia przy pomiarach temperatury:

- Uzyskanie dokładnej wartości wyniku pomiaru.
- Powtarzalność pomiarów dokonywanych w tym samym punkcie.
- Różnica temperatur pomiędzy kilkoma punktami pomiarowymi.

Poniżej zostaną scharakteryzowane metody pomiarowe najczęściej spotykane w zastosowaniach przemysłowych.

Czujniki rezystancyjne

Czujnik rezystancyjny składa się z drutu metalowego, którego rezystancja wzrasta wraz z temperaturą. Jest on wykonany z platyny, miedzi lub niklu i umieszczony w obudowie. Rezystancja czujnika wynosi najczęściej 100Ω w temperaturze 0°C , ale stosuje się również rezystancje $10, 500$ i 1000Ω . Symbolem **Pt 100** oznacza się najczęściej spotykany czujnik platynowy o rezystancji 100Ω przy 0°C . Czujniki platynowe są przeznaczone do pomiarów temperatury w zakresie od -250 do $+800^\circ\text{C}$.

Względna temperaturowa zmiana rezystancji czujnika jest niewielka i wynosi ok. $0,4\Omega/\text{ }^\circ\text{C}$ dla Pt 100. W celu uniknięcia zbyt dużego błędu pomiarowego należy kompensować rezystancje doprowadzeń pomiędzy czujnikiem i przyrządem pomiarowym; tzw. połączenie czteroprzewodowe daje bardzo dużą dokładność pomiaru.

Rezystancja czujnika Pt 100 wg EN60751 (ITS90) może być wyznaczona następująco:

dla zakresu temperatur $-100^\circ\text{C} < t < 0^\circ\text{C}$:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3)$$

dla zakresu $0^\circ\text{C} < t < 850^\circ\text{C}$:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2)$$

gdzie:

R_t jest rezystancją czujnika w temperaturze t

R_0 jest rezystancją przy 0°C

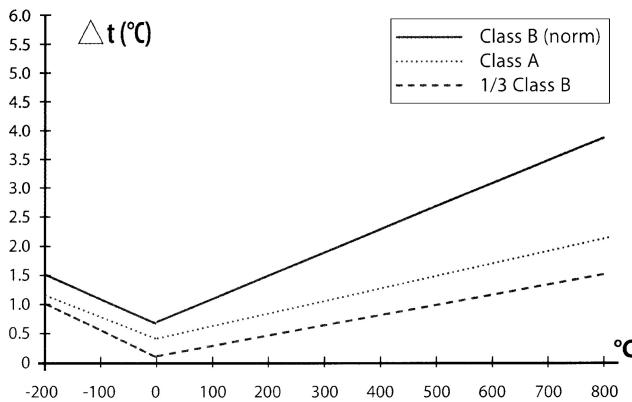
$$A = 3,9083 \times 10^{-3} / \text{ }^\circ\text{C}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} / \text{ }^\circ\text{C}^2$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} / \text{ }^\circ\text{C}^4$$

Kilka wartości rezystancji wyliczonych wg tego wzoru znaleźć można w tabeli "Sygnały wyjściowe czujników Pt100 i K".

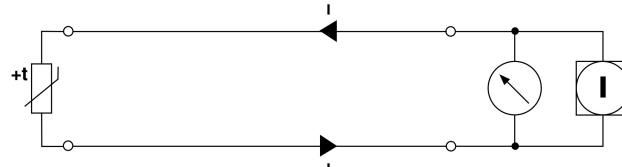
EN60751 definiuje trzy klasy A, B i $\frac{1}{3}B$ które określają dopuszczalną wielkość odchyłek - w stosunku do normy - sygnałów podawanych przez czujnik.



Niedokładność czujników Pt100. $\Delta t = \text{Błąd pomiaru temperatury dla czujnika Pt 100, klasa A, B i } \frac{1}{3}B \text{ wg EN 60751.}$

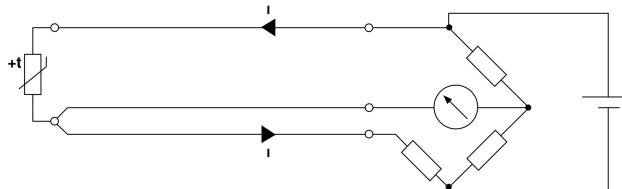
Podłączenie czujników rezystancyjnych

W przypadku włączenia czujnika do obwodu za pomocą połączenia **2-przewodowego**, rezystancja każdego przewodu może przykładowo wynosić $0,5\Omega$. Całkowita, dodatkowa rezystancja widziana przez przyrząd pomiarowy wynosi 1Ω . Dla czujnika Pt100, 1Ω oznacza zmianę temperatury o ok. 3°C , tak więc przyrząd wskaże temperaturę o 3°C za wysoką. Dlatego też 2-przewodowe połączenie czujnika powinno być używane wyłącznie, kiedy czujnik znajduje się bardzo blisko przyrządu pomiarowego i gdy nie wymaga się wysokiej dokładności pomiaru.



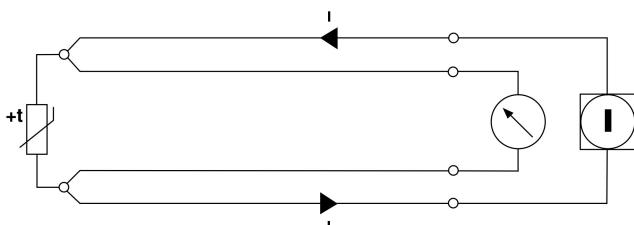
Połączenie 2-przewodowe. Prąd pomiarowy płynie w tym samym przewodzie, który jest dołączony do przyrządu mierzącego napięcie na oporniku. Spadek napięcia w przewodach powoduje błąd wskazania, jeśli przewody są np. zbyt długie.

Połączenie 3-przewodowe.. W nieco uproszczony sposób można powiedzieć, że trzeci przewód jest używany do pomiaru rezystancji kabla, tak aby przyrząd mógł kompensować tę rezystancję. Wszystkie trzy przewody powinny mieć taką samą rezystancję, ponadto 2 przewody powinny być ekranowane, zaś wymóg ekranowania nie dotyczy trzeciego przewodu. Jeśli sygnał z czujnika będzie przesyłany na duże odległości lub też w środowisku, które jest narażone na zakłócenia (np. w pobliżu kabli energetycznych lub dużych maszyn elektrycznych), zaleca się stosowanie kabli ekranowanych. Układy połączeń 3-przewodowych czujników Pt 100 spotykane są w zastosowaniach przemysłowych dość często.



Połączenie 3-przewodowe. Rezystancja przewodów może być skompensowana w układzie mostka Wheatstone'a. Pomiar napięcia jest wysokoimpedancyjny.

Wariantem najdokładniejszym jest połączenie **4-przewodowe**. Ewentualną różnicę rezystancji między przewodami pomiarowymi można tu skompensować (porównaj z opisem połączenia 3-przewodowego). Połączenie 4-przewodowe zapewnia wysoką dokładność i jest używane przede wszystkim w dokładnych pomiarach laboratoryjnych i przy kalibracji przyrządów.



Połączenie 4-przewodowe. Prąd pomiarowy płynie w dwóch przewodach, a napięcie jest mierzone wysokoimpedancyjnie poprzez pozostałe dwa przewody. Zapewnia to wysoką dokładność pomiaru.

Termoelementy

Metoda pomiaru polega na tym, że różne metale w tej samej temperaturze uwalniają lub absorbują różną liczbę elektronów. Jeśli połączysz szeregowo dwa różne przewody metalowe i mierzysz między nimi napięcie, można zaobserwować, że spadek napięcia na punkcie styku metali zmienia się wraz z temperaturą. Napięcie to jest nazywane napięciem termoelektrycznym i posiada niewielką wartość, ok. 40 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (dla typu K). Termoelementy są używane do większości przemysłowych pomiarów temperatury.

Termoelementy mogą być produkowane w różnych kombinacjach metali; wykazują wówczas różne właściwości i mogą być stosowane np. do pomiarów ekstremalnie wysokich temperatur. Ze względów praktycznych niektóre typy termoelementów są standaryzowane. Najczęściej spotykanym standardem jest **typ K**, który można stosować z wieloma przyrządami i przetwornikami pomiarowymi.

Ze względu na wystarczającą wysoką dokładność termoelementy typu K są najczęściej używanymi w przemyśle.

Sygnały wyjściowe czujników Pt100 i termoelementów typu K.

Temperatura °C	Rezystancja Pt 100 Ω	Napięcie Termoelementu typu K μV
-50	80,31	-1889
-40	84,27	-1527
-30	88,22	-1156
-20	92,16	-778
-10	96,09	-392
0	100	0
10	103,90	397
20	107,79	798
30	111,67	1203
40	115,54	1612
50	119,40	2023

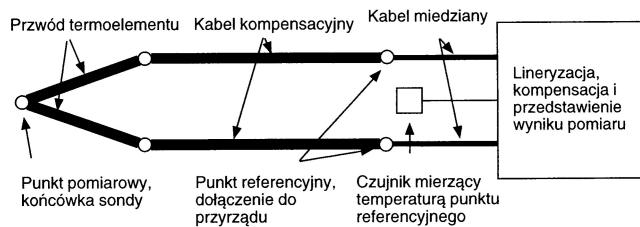
60	123,24	2436
70	127,08	2851
80	130,90	3267
90	134,71	3682
100	138,51	4096
110	142,29	4509
120	146,07	4920
130	149,83	5328
140	153,58	5735
150	157,33	6138

Podłączenie termoelementów

Ponieważ zasada budowy termoelementów polega na łączeniu dwóch różnych metali, kabel pomiędzy czujnikiem i przyrządem musi być zbudowany z tych samych dwóch metali, z których jest wykonany czujnik, lub też z metali o tych samych własnościach termoelektrycznych.

Taki typ kabla nazywa się **kablem kompensacyjnym**.

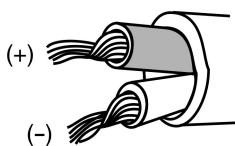
Podobnie jak kable, również i złącza muszą być wyprodukowane z tych samych metali. W przeciwnym przypadku mielibyśmy do czynienia z szeregowym połączeniem pewnej liczby termoelementów, po jednym w każdym punkcie styku dwóch różnych metali. W takim przypadku pomiar temperatury nastąpiłby w wielu punktach, co spowodowałoby znaczny, całkowity błąd pomiaru. Należy również zwrócić uwagę na polaryzację czujników, kabla kompensacyjnego i złączy.



Schemat ideowy połączenia termoelementu z przyrządem pomiarowym.

Poniższy rysunek pokazuje oznaczenia kolorów kabli kompensacyjnych według normy DIN IEC 584 oraz DIN 43714. Należy pamiętać, że 200°C jest maksymalną temperaturą pracy kabli kompensacyjnych, nawet jeśli wytrzymałość ich materiałów izolacyjnych przewyższa tę temperaturę. Wynika to stąd, że właściwości termoelektryczne materiałów są gwarantowane jedynie do 200°C . Przy pracy w wyższych temperaturach należy używać przewodów termoparowych lub termicznych. Stosowanie w układzie kabli pochodzących od różnych wytwórców może wprowadzać dodatkowy błąd pomiarów, gdyż różni wytwórcy stosują różne stopy metali.

Kable kompensacyjne muszą być bezpośrednio galwanicznie połączone, poprzez splatanie lub zaciskanie w tym samym zacisku. Następnie miejsce połączenia należy zabezpieczyć przed utlenianiem.

**DIN IEC 584**

Przewód "minusowy"- biały; "plusowy"- - jak niżej

T Brązowy	Cu - CuNi
E Fioletowy	NiCr - CuNi
J Czarny	Fe - CuNi
N Różowy	NiCrSi - NiSi
B Szary	Pt30Rh - Pt6Rh
K Zielony	NiCr - NiAl
R Pomarańczowy	Pt13Rh - Pt
S Pomarańczowy	Pt10Rh - Pt

DIN 43714

Przewód "plusowy"- czerwony; "minusowy"- - jak niżej

U Brązowy	Cu - CuNi
L Niebieski	Fe - CuNi
K Zielony	NiCr - NiAl
S Biały	Pt13Rh - Pt
S Biały	Pt10Rh - Pt

Oznaczenie kolorów dla kabli kompensacyjnych według normy DIN IEC 584 i DIN 43714. Nie należy stosować typu J (Fe - CuNi) jednocześnie z typem L (Fe - CuNi). Posiadają one różne współczynniki temperaturowe. To samo dotyczy typów T (Cu - CuNi) i U (Cu - CuNi). Należy zwrócić uwagę, że podane powyżej materiały dotyczą termoelementów; materiały przewodów kompensacyjnych mogą się różnić.

Punkt referencyjny, zimny punkt dołączenia

Punktem referencyjnym (odniesienia) lub też zimnym punktem dołączenia nazywamy punkt, gdzie kabel kompensacyjny przechodzi w zwyczajny kabel miedziany, najczęściej wewnątrz przyrządu pomiarowego. Czujnik wraz z sondą są nazywane punktem pomiarowym, lub też gorącym punktem lutowniczym.

Gdy punkt dołączenia i punkt pomiarowy posiadają taką samą temperaturę np. +20°C, to napięcie elektryczne wyczuwane przez przyrząd pomiarowy jest równe zeru. Przyrząd powinien jednak wówczas wskazywać temperaturę +20°C, a nie zerową (przy założeniu, że sonda nie wprowadza dodatkowego błędu pomiaru). Dlatego też należy dokonywać kompensacji temperatury punktu odniesienia; jest to tzw. "kompensacja zimnego punktu dołączenia".

Dlatego też w każdym przyrządzie pomiarowym współpracującym z termoelementem jest umieszczony czujnik temperatury w miejscu doprowadzenia kabli kompensacyjnych. Niedokładność tego czujnika może spowodować błędy pomiarowe gdy przyrząd pomiarowy jest zbyt gorący lub zbyt zimny. Największą dokładność pomiarową otrzymuje się dla większości przyrządów, kiedy znajdują się one w temperaturze pokojowej.

Niektóre standardowe termoelementy można stosować od -200°C, niektóre zaś mierzą nawet temperatury powyżej +1500°C.

Termistory

Termistory używane są w niektórych przyrządach jako czujniki temperatury. Istnieją dwa typy termistorów: PTC - z dodatnim współczynnikiem temperaturowej zmiany rezystancji (tzn. rezystancja termistora rośnie wraz ze wzrostem temperatury), oraz NTC - z ujemnym współczynnikiem temperaturowej zmiany rezystancji.

Układy elektroniczne do lineryzacji sygnału czujnika w przyrządzie pomiarowym, są stosunkowo proste. Dlatego produkcja przyrządów wykorzystujących termistory jest tania.

Nie mają one zbyt wysokiej dokładności pomiarowej, ale można ją poprawić poprzez staranną kalibrację i dokładną regulację

przyrządu pomiarowego łącznie z czujnikiem. Można również dokładnie skalibrować przyrząd jedynie w ograniczonym zakresie mierzonych temperatur, polepszając jego dokładność. Termistory stosuje się zazwyczaj w zakresie temperatur od -50°C do +150°C, maksymalnie do kilkuset °C. Przykładem zastosowań termistorów są termometry do pomiaru temperatury wewnętrz i na zewnątrz pomieszczeń, jak również termometry do badania temperatury ciała ludzkiego.

Czujniki półprzewodnikowe

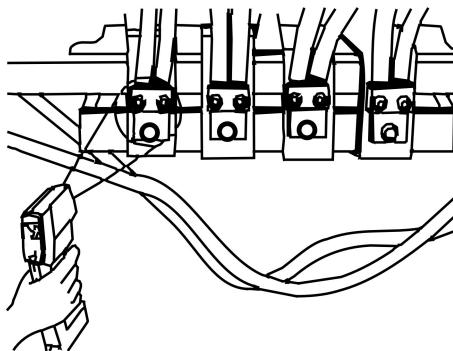
Czujniki półprzewodnikowe istnieją w różnych wariantach i są mniej lub bardziej inteligentne. Niektóre posiadają zakres napięć wyjściowych rzędu miliwoltów, inne mają wyjście dopasowane do sygnałów akceptowanych przez komputery. Mają one stosunkowo niską cenę, ale również, niestety, mały zakres mierzonych temperatur, do ok. +150°C. Ponadto użytkownik musi sam skonstruować układy elektroniczne, niezbędne do współpracy komputera z tymi czujnikami.

Wskaźniki czołe na temperaturę

Wskaźniki czołe na temperaturę wyglądają jak taśma przylepna z jednym lub wieloma polami odpowiadającymi danym temperaturom. Kiedy temperatura charakterystyczna dla danego pola zostaje przekroczena, zmieniają one kolor. Na ogół zmiana ta jest nieodwracalna, tak by później można było stwierdzić, czy obiekt został poddany działaniu zbyt wysokiej temperatury.

Pomiary podczerwienią, pirometry

Wszystkie przedmioty w temperaturze wyższej niż zero absolutne (ok. -273°C) emitują promieniowanie cieplne w postaci promieniowania podczerwonego - IR. Natężenie promieniowania rośnie wraz ze wzrostem temperatury przedmiotu.



Bezdotykowy pomiar temperatury można wykorzystywać do wyszukiwania uszkodzeń w sieciach wysokiego napięcia podczas ich pracy. Przegrzane punkty połączeń mogą wskazywać na przeciążenie lub zły styk.

Pirometr odbiera promieniowanie cieplne i prezentuje wynik pomiaru w postaci temperatury. Przy pomiarze należy wziąć pod uwagę rodzaj materiału, z którego została wykonana zewnętrzna powierzchnia mierzonego obiektu. Różne materiały posiadają bowiem różne właściwości promieniowania podczerwonego przy tej samej temperaturze.

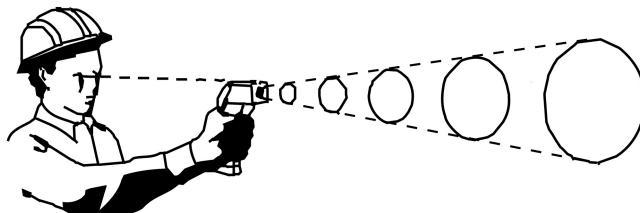
Współczynnik emisji ϵ opisuje własność promieniującej powierzchni. W wielu przyrządach wartość tego współczynnika można dowolnie ustalać tak, aby można było mierzyć temperaturę różnego rodzaju powierzchni. Dla innych przyrządów wartość współczynnika emisji jest stała, ustalona jako 0,9–1,0. Przyrząd wskazuje wówczas nieco za niską temperaturę np. przy pomiarze błyszczących powierzchni

metalowych. Niektóre powierzchnie mogą również funkcjonować jako lustro i odbijać promieniowanie cieplne, które pochodzi ze znajdujących się w pobliżu gorących przedmiotów. W tym przypadku można pomalować powierzchnię na czarnomatowy kolor lub zbudować tabelę kalibracyjną.

Ten rodzaj pomiarów charakteryzuje się wysoką powtarzalnością tzn. różnica między każdorazowym wynikiem pomiaru, wykonywanym w taki sam sposób, jest niewielka. Ponieważ pomiaru dokonuje się bezkontaktowo, można mierzyć przedmioty, które są niemożliwe do zmierzenia w sposób tradycyjny, np. duże ściany, bardzo gorące przedmioty, obracające się, czy też poruszające się w inny sposób elementy, a także przedmioty, które są pod napięciem. Ponadto pomiar jest bardzo szybki, gdyż nie używa się żadnej sondy, której masa musiałaby być podgrzana przez mierzony obiekt.

Należy jednak zwrócić uwagę, że przyrząd wskazuje średnią wartość temperatury powierzchni, jako że czujnik "widzi" wiele punktów o różnych temperaturach (mowa tu o uśrednianiu temperatury zarówno na powierzchni, jak i w przeciągu czasu trwania pomiaru).

Pirometria jest jedyną metodą pomiarową, dzięki której można mierzyć temperatury powyżej 2000°C.



Przy bezkontaktowym pomiarze temperatury, powierzchnia pomiarowa powiększa się ze zwiększeniem odległości.

Kalibracja

Podczas kalibracji kontroluje się błąd wskazania przyrządu przy znanej wartości sygnału wejściowego. Błąd pomiaru jest zapisany w tabeli kalibracyjnej i używany następnie w celu wprowadzenie porawki tak, aby określić dokładny wynik pomiaru.

Prostą kalibrację można wykonać samodzielnie. W tym celu umieszczamy sondę lub czujnik pomiarowy w mieszaninie wody z lodem. Przyrząd musi wskazywać temperaturę jak najbliżej 0°C. Sondę lub czujnik należy następnie umieścić w gotującej się wodzie, bez dotykania dna naczynia, w którym wrze woda. Przyrząd powinien wówczas wskazywać 100°C, przy normalnym ciśnieniu powietrza. Kalibracja przyrządu z dokładnością wymaganą przez normy międzynarodowe, może być wykonana jedynie przez autoryzowane, pomiarowe punkty serwisowe.