

ELEKTRYCZNE METODY POMIARU TEMPERATURY 48

I. 1. Temperatura

Temperatura jest wielkością fizyczną, ściślej mówiąc termodynamiczną, która odgrywa niezmiernie istotną rolę zarówno w opisie praw przyrody, w technologii przemysłowej, oraz w życiu codziennym. Początkowo stosowano wyłącznie empiryczne (doświadczalne) skale temperatury, oparte na zależności różnych cech fizycznych, (np. wydłużenia pręta metalowego, przyrostu objętości cieczy lub gazu, zmiany oporu elektrycznego) od zmiany temperatury¹. Dla wielu z tych cech jest to zależność liniowa. Celsiusz przypisał wartość 0^o, temperaturze topnienia lodu a temperaturze wrzenia wody wartość 100^o (przy ciśnieniu normalnym) i przedział ten podzielił na 100 części. Dla temperatur niższych i wyższych skalę ekstrapolowano. Niestety, stosowanie empirycznych skal temperatury opartych na zjawiskach rozszerzalności cieplnej, zależności oporu czy innych cech fizycznych od temperatury, ma tę niedogodność, że wyniki pomiarów zależą od użytych materiałów, nie są więc jednoznaczne. Nie można na nich oprzeć ścisłej, odtwarzalnej w wielu laboratoriach skali temperatury. Dopiero wprowadzona przez Kelvina tzw. termodynamiczna skala temperatur, oparta na sprawności znanego z termodynamiki silnika pracującego według odwracalnego cyklu Carnota [1].

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (1)$$

wykorzystuje tę właściwość, że sprawność η tego cyklu zależy tylko od temperatur T_1 i T_2 a nie zależy od czynnika roboczego zastosowanego w silniku. Odróżnia to tę skalę od np. skali termometrów cieczowych, których podziałka zależy od rodzaju cieczy. Ponieważ jednak nie można zbudować realnego silnika pracującego według cyklu Carnota, wykazano najpierw, że identyczną skalę można odtworzyć wykorzystując tzw. termometr gazowy, wypełniony gazem idealnym. Następnie określono takie warunki ciśnienia i objętości gazu rzeczywistego, przy których wskazania termometru gazowego wypełnionego np. gazem szlachetnym, będą identyczne jak dla gazu idealnego. Termometr gazowy, wykorzystujący rozszerzalność objętościową gazu, jest podstawowym wzorcem termometrycznym w przedziale od temperatur helowych (kilka kelwinów) aż do temperatury ok. 1350 K. Jest on urządzeniem stosunkowo dużym, a jego obsługa jest czasochłonna. Dlatego w praktyce jako termometry wzorcowe stosuje się najczęściej termometry oporowe (rezystancyjne) w których zastosowano bardzo czysty drut platynowy.

Skalę termodynamiczną (Kelvina) określono przyjmując za podstawę jeden punkt stały : punkt potrójny wody², temperaturę którego przyjęto jako równą 273.16 K, zaś jednostka tej skali czyli 1 K (1 kelwin) jest równa 1/273.16 części temperatury odpowiadającej punktowi potrójnemu wody. Dlatego różnice temperatur wyrażone w skalach Celsjusza i Kelvina są identyczne. Dla zwiększenia dokładności pomiarów w szerokich przedziałach temperatur, oprócz punktu potrójnego wody wybrano jeszcze szereg tzw. punktów stałych, związanych z temperaturami krzepnięcia i wrzenia różnych substancji lub ich punktami potrójnymi. Dzięki temu dokładność pomiaru temperatury wynosi 0.01 K, a w pewnych przedziałach osiąga nawet 0.001 K. Warto jednak zauważyć, że np. dokładność pomiarów wielkości elektrycznych czy mechanicznych jest znacznie większa i dlatego jesteśmy w stanie mierzyć jeszcze mniejsze zmiany (różnice) temperatury, ale jej wartości absolutne mogą być podane jedynie z dokładnością podaną dla punktów stałych. Dokładność termometrów powszechnego użytku wynosi najczęściej 1 K lub co najwyżej 0.1 K.

¹ Warto podkreślić, że każdy termometr wskazuje własną temperaturę, a tylko w przypadku gdy znajduje się on w stanie równowagi cieplnej z ciałem, w którym jest umieszczony, także temperaturę tego ciała.

² Temperatura punktu potrójnego wody, czyli temperatura równowagi trzech faz: lodu, wody i pary nasyconej jest określona z większą precyzją niż temperatura topnienia lodu, przyjęta przez Celsjusza jako punkt wzorcowy.

I. 2. Zasada działania termometru oporowego

Ciała stałe mogą występować albo jako substancje amorficzne (np. szkła), albo jako kryształy. Te ostatnie już dawno zwracały uwagę badaczy regularnością kształtu zewnętrznego jak np. kryształy kwarcu, czy soli kuchennej. Okazało się, że jest to spowodowane regularnym ułożeniem atomów, lub grup atomów w całej objętości kryształu. Najczęściej spotykamy materiały zbudowane z drobnych kryształków („kryształitów”), tworzących konglomerat (zlepek). Do takich substancji polikrystalicznych należą np. przewodniki metalowe, choć potrafimy produkować laboratoryjnie z metali także duże próbki o pełnej regularności ułożenia atomów, tzw. monokryształy.

Metale w stanie stałym tworzą sieć krystaliczną zbudowaną z dodatnio naładowanych jonów metalu, zanurzonych w morzu swobodnie poruszających się elektronów. Te elektrony, to „byłe” elektrony walencyjne atomów, które zostały od nich odłączone i które utworzyły wspólny, ujemnie naładowany „gaz elektronowy”. Siły przyciągania pomiędzy elektronami i dodatnimi jonami utrzymują kryształ w równowadze. Ten typ wiązania elementów sieci nazywamy wiązaniem metalicznym. W kryształach metalu elektrony walencyjne, choć mogą poruszać się swobodnie wewnątrz kryształu, nie mogą z niego wyjść na zewnątrz, bez uzyskania dodatkowej energii. Elektrony zachowują się podobnie jak cząsteczki cieczy w głębokim naczyniu, np. cząsteczki H₂O w studni: Mówimy, że elektrony w metalu znajdują się w studni potencjału elektrycznego.

W wielu eksperymentach stwierdzono jednoznacznie, że prąd w metalu przenoszą wyłącznie elektrony. Dokładne pomiary właściwości elektrycznych metali, szczególnie w niskich temperaturach, wykazały, że gaz elektronowy w metalu podlega innym prawom fizyki niż klasyczny gaz idealny. Podlega on prawom mechaniki kwantowej, z której wynika m. in. to, że średnia energia elektronów w gazie kwantowym bardzo słabo zależy od temperatury. Dlatego można pominąć wpływ temperatury na prędkość ruchu elektronów, a obserwowana doświadczalnie zależność oporu elektrycznego metali od temperatury jest spowodowana innymi czynnikami.

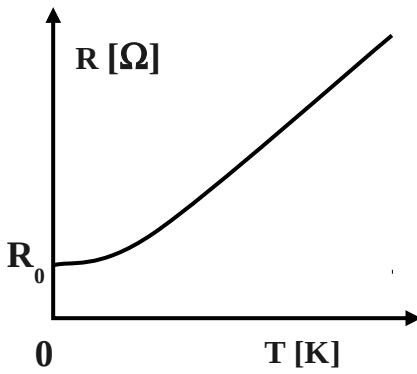
Teoria przewiduje, że gdyby sieć jonów była idealna, czyli gdyby potencjał elektryczny wewnątrz kryształu był doskonale periodyczny, to elektrony przepływałyby przez taki przewodnik bez oporu. Jednakże realne jony wykonują drgania wokół położenia równowagi, co zaburza periodyczność potencjału. Każdy jon oddziałuje ze swoimi sąsiadami siłami elektrycznymi, dlatego drgają wszystkie jony w sieci. Takie drgania sieci nazywamy fononami. Do opisu tych drgań, musimy zastosować prawa kwantowe (podobnie jak do elektronów przewodnictwa w metalu). Wynika z nich, że dozwolone energie drgań są skwantowane. Wynika także, że drgania jonów (lub atomów) nie zanikają w temperaturze zera kelwinów, lecz drgają one, z tzw. energią zerową. Dla opisu procesu oddziaływania elektronów z fononami wprowadzono pojęcie tzw. „przekroju czynnego na rozpraszanie”. W tym modelu, drgający jon jest przeszkodą, która stoi na drodze poruszających się elektronów. Im większa jest amplituda drgań, tym większa jest powierzchnia przekroju tej przeszkody, i tym trudniej przelecieć elektronowi obok niej. Elektron zderzający się z nią zmienia kierunek ruchu i nie wnosi pełnego wkładu w uporządkowany ruch ładunków w kierunku pola elektrycznego. Obliczono, że wielkość przekroju czynnego na rozpraszanie elektronów, zależy liniowo od energii drgań sieci, a więc od temperatury metalu. Dlatego wartość oporu właściwego metalu w przedziale temperatur powyżej kilkudziesięciu kelwinów, zależy liniowo od temperatury, co opisuje znany wzór³:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (2)$$

gdzie ρ jest oporem właściwym w temperaturze t , ρ_0 oporem właściwym w temperaturze początkowej równej np. $t = 0$ °C, zaś α jest temperaturowym współczynnikiem oporu. W niskich temperaturach przybliżenie liniowe nie jest wystarczająco dokładne.

Drugim czynnikiem odpowiedzialnym za opór elektryczny metali są niedoskonałości budowy sieci krystalicznej realnych próbek. Nie wszystkie jony znajdują się w położeniach węzłowych, lecz mogą być np. przesunięte w położenia międzywęzłowe. Część jonów „macierzystych” może być zastąpiona przez jony domieszek, np. przez jony innych metali. Rozpraszanie elektronów na defektach sieci krystalicznej prowadzi do zwiększenia oporu elektrycznego. Wpływ defektów jest niewielki w temperaturach wyższych, ale staje się dominujący w pobliżu zera bezwzględnej, gdzie energia drgań sieci jest bardzo mała. To zjawisko wykorzystuje się dla oznaczania stopnia zdefektowania i domieszkowania próbek metalicznych.

³We wzorze tym temperaturę wyrażamy zwykle w stopniach Celsjusza



Rys. 1. Zależność oporu od temperatury dla metali

Na Rys. 1. pokazano typową zależność oporu przewodnika metalowego od temperatury. W temperaturach wyższych jest to zależność liniowa, ale w pobliżu zera kelwinów przechodzi w odcinek poziomy, gdzie opór nie zależy od temperatury. Wartość oporu, odpowiadająca odcinkowi poziomemu, oznaczona jako R_0 , zależy od stanu zdeformowania sieci krystalicznej i od zawartości domieszek w danej próbce. Stosunek wartości oporu próbki w temperaturze pokojowej R_{pok} , do oporu w temperaturze bliskiej zera bezwzględnej R_0 jest miarą ilości defektów i domieszek w próbce.

I. 3. Zasada działania termopary

Termopara jest czujnikiem termometru elektrycznego, wykorzystującego tzw. zjawisko Seebecka. Polega ono na powstawaniu różnicy potencjałów w obwodzie elektrycznym zestawionym z dwu różnych materiałów (np. dwu drutów metalowych) połączonych szeregowo, wtedy, gdy ich styki utrzymywane są w różnych temperaturach. Pod względem teoretycznym opis zjawiska Seebecka jest bardzo skomplikowany. Wyniki eksperymentalne nie wnoszą jasnych informacji o własnościach elektronowych metalu [1, 2]. Ponieważ jednak termopary są powszechnie stosowane jako czujniki termometrów z odczytem elektronicznym, przytoczymy, za Ashcroftem i Merminem [2] najprostszy model zjawiska, tłumaczący działanie stosowanych w praktyce termopar. Uwzględnia on dwa czynniki:

1. Gradient (spadek) temperatury wzdłuż przewodnika powoduje ukierunkowanie ruchu elektronów od końca gorętszego do chłodniejszego. Zjawisko to jest nazywane „unoszeniem fononowym”. Ponieważ nośnikami prądu w metalach są elektrony, to możemy rozpatrywać ich ruch w sposób podobny do ruchu cząsteczek gazu idealnego w zamkniętym naczyniu (przybliżenie klasyczne). Jeśli w cienkim przewodniku metalicznym (np. w drucie) wytworzymy gradient (spadek) temperatury, to elektrony w części gorętszej drutu mają większą prędkość i energię kinetyczną niż te w części chłodniejszej. Dzięki temu uzyskują one różną od zera prędkość średnią, skierowaną ku części chłodniejszej. Elektrony przenoszą ładunek ujemny od gorącego do chłodniejszego końca drutu, wskutek czego wzdłuż drutu powstaje różnica potencjałów V , i pole elektryczne o natężeniu E . Pole to kompensuje wpływ gradientu temperatury na średnią prędkość elektronów i hamuje ich ruch. W najprostszym modelu zakłada się, że natężenie wytworzonego pola E jest proporcjonalne do gradientu temperatury:

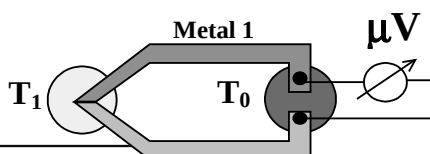
$$E = Q \text{ grad } T = Q \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

gdzie Q to współczynnik, nazywany niekiedy siłą termoelektryczną, a oś x jest skierowana wzdłuż drutu.

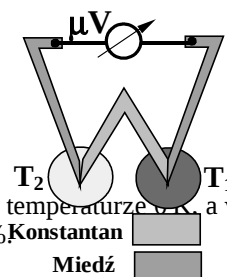
2. Gradient temperatury wzdłuż przewodnika powoduje ponadto niewielkie zmiany poziomu Fermiego E_F wzdłuż tego przewodnika. To powoduje pojawienie się dodatkowego ruchu dyfuzyjnego elektronów wzdłuż drutów. Wpływ temperatury na wartość E_F jest wprawdzie stosunkowo mały, ale możliwy do wykrycia. W praktyce trudno jest określić udział tego czynnika w zjawisku Seebecka.

Przy pomiarach temperatury przy użyciu termopary mierzymy bezpośrednio tzw. siłę elektromotoryczną, zwaną w skrócie SEM. Jest to napięcie na końcach przewodów termopary, mierzone woltmierzem o bardzo wysokim oporze wewnętrznym, w porównaniu z oporem drutów termopary. Gdybyśmy do pomiaru napięcia użyli woltmierzera o małym oporze wewnętrznym, musielibyśmy uwzględniać opór tych drutów. Wtedy wskazywane napięcie było by różne dla różnych termopar i mogłoby się zmieniać w czasie np. na skutek korozji drutów. Pomiar SEM pozwala korzystać z gotowych tablic dla określonego rodzaju termopar, niezależnie od ich oporu wewnętrznego.

Siła termoelektryczna Q w realnych metalach ma wartość rzędu 10 mikrowoltów na kelwin, jest więc bardzo mała. Dlatego też i mierzone w praktyce wartości SEM są najczęściej rzędu miliwoltów. Nie



Rys. 2. Termoogniwo.



Rys. 3. Termopara

⁴ Poziom Fermiego to najwyższa energia jaką posiadają elektrony w metalu w temperaturze T_0 , a w wyższych temperaturach jest to energia stanu dla którego prawdopodobieństwo obsadzenia wynosi 50%.

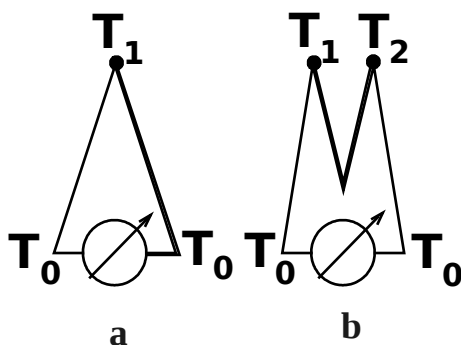
da się ich zmierzyć bezpośrednio na końcach tego samego przewodnika, gdyż dwa przewody łączące go z woltomierzem nie miały by tej samej temperatury. Musielibyśmy wtedy uwzględnić wpływ gradientu temperatury i dodatkowej siły termoelektrycznej powstającej na tych przewodach. Jeśli jednak weźmiemy dwa różne metale, i ich złącza umieścimy w różnych temperaturach T_1 i T_0 , tak jak to pokazano na Rys. 2, to oba przewody woltomierza będą w tej samej, znanej temperaturze T_0 i będzie on mierzył różnicę napięć powstających w obu metalach. Takie złącze dwu metali nazywamy **ogniwem termoelektrycznym**.

Aby uniknąć kłopotów związanych z utrzymaniem znanej temperatury T_0 na obu zaciskach woltomierza, wygodniej jest zastosować układ dwu termoogniw, zwany **termoparą**. Pokazano to na Rys. 3, na przykładzie termopary miedź - konstantan. Jedno złącze służy wtedy do pomiaru badanej temperatury T_2 , a drugie jest umieszczone w termostacie o stałej i znanej temperaturze T_1 . Rolę termostatu może pełnić np. naczynie wypełnione mieszaniną wody z lodem o temperaturze 0 ± 0.1 °C. Temperatura obu końcówek woltomierza jest wtedy nieistotna (patrz Dodatek 1).

Do budowy termopar można stosować bardzo cienkie druciki, nawet o średnicy rzędu jednego mikrometra. To gwarantuje bardzo małą bezwładność wskazań, czyli szybką reakcję termometru na zmiany temperatury. Pomimo małych wartości napięć generowanych przez termopary, mogą być one, po wzmocnieniu elektronicznym, wprowadzane do takich urządzeń automatyki, które sterują procesami technologicznymi w przemyśle. Prostota budowy termopar powoduje dużą ich niezawodność oraz mały koszt. Niewiele jest par metali lub stopów, które mogą być praktycznie wykorzystane do budowy termopar. Tylko dla kilku takich par mierzona SEM jest prawie liniową funkcją temperatury.

Termopary nadają się do pomiaru temperatury w szerokim zakresie. Tak np. termopara z platyny i stopu platyny z 10% rodu może pracować do temperatur dochodzących do ok. 1600 °C. Często w urządzeniach automatyki przemysłowej stosuje się tańsze i wydajniejsze termopary żelazo / konstantan (stop 55% Cu + 45% Ni) lub miedź / konstantan, które mogą pracować w przedziale od -200° C do $+1000^{\circ}$ C (Fe/konstantan) i od -200° C do $+400^{\circ}$ C (Cu/konstantan). Te dwa rodzaje termopar w odróżnieniu od termopary Pt/Pt+10% Rh, są niestety wrażliwe na korozję i utlenianie przy wysokich temperaturach i dlatego ich zastosowania są ograniczone do podanych zakresów pomiarowych [3]. Gdy nie jest wymagana duża dokładność pomiarów, można stosować termoogniwa. Wtedy temperatura T_0 jest równa temperaturze otoczenia.

DODATEK 1 ⁵



Termoogniwo (a) i termopara (b)

Na rysunku obok pokazano schematy termoogniwa i termopary. O tym, że termopara i termoogniwo dają taką samą siłę elektromotoryczną przy takiej samej różnicy temperatur może przekonać następujące rozumowanie: Skorzystamy ze wzoru wiążącego napięcie U z natężeniem pola elektrycznego E dla przypadku jednowymiarowego:

$$U = \int E dx = SEM \quad (5)$$

oraz ze wzoru (3). Musimy zsumować siły elektromotoryczne powstające na odcinkach poszczególnych przewodników, których końce mają różne temperatury, np. T_0 , T_1 , T_2 .

Wtedy SEM dla termoogniwa będzie równa:

⁵ Opracował dr Piotr Mazur

gdzie granice całkowania (punkty 0 i 1) oznaczają odpowiednio końce poszczególnych drutów termooeniwa w temperaturach T_0 i T_1 . Ostatnia część tego równania jest prawdziwa tylko wtedy, gdy wyrażenie podcałkowe ($Q_A - Q_B$) nie zmienia się w granicach całkowania, czyli od T_0 do T_1 .

Analogicznie SEM dla termopary będzie równa:

$$\begin{aligned} SEM_{TP} &= \int_0^1 E_A dx + \int_1^2 E_B dx + \int_2^0 E_A dx = \int_2^1 Q_A \frac{\delta \Gamma}{\delta x} dx + \int_1^2 Q_B \frac{\delta \Gamma}{\delta x} dx = \\ &= - \int_{T_1}^{T_2} Q_A dT + \int_{T_1}^{T_2} Q_B dT = \int_{T_1}^{T_2} (Q_B - Q_A) dT = (Q_B - Q_A)(T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (7)$$

a więc zależy tylko od różnicy temperatur obu złącz T_2 i T_1 , a nie zależy od temperatury T_0 zacisków woltomierza.

DODATEK 2

Zależność $R(T)$ dla czujnika Pt 100

$$R = 100 \cdot (1 + 0.00392 \cdot T)$$

