

POMIARY TEMPERATURY TERMOMETRAMI TERMOELEKTRYCZNYMI

Termometry termoelektryczne należą do najbardziej rozpowszechnionych przyrządów służących do pomiaru temperatury. Są stosowane w szerokim zakresie zmian temperatury. Odznaczają się dużą możliwością dopasowania do lokalnych warunków i potrzeb. Jedną z ich najistotniejszych cech jest to, że termoelement zawsze mierzy różnicę temperatury.

2.1. ZJAWISKO TERMOELEKTRYCZNE. PODSTAWOWE PRAWA.

Kontaktowa różnica potencjałów V_{AB} na styku metali A i B (rys.2.1.a) wynosi

$$V_{AB} = V_B - V_A = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) \quad (2.1)$$

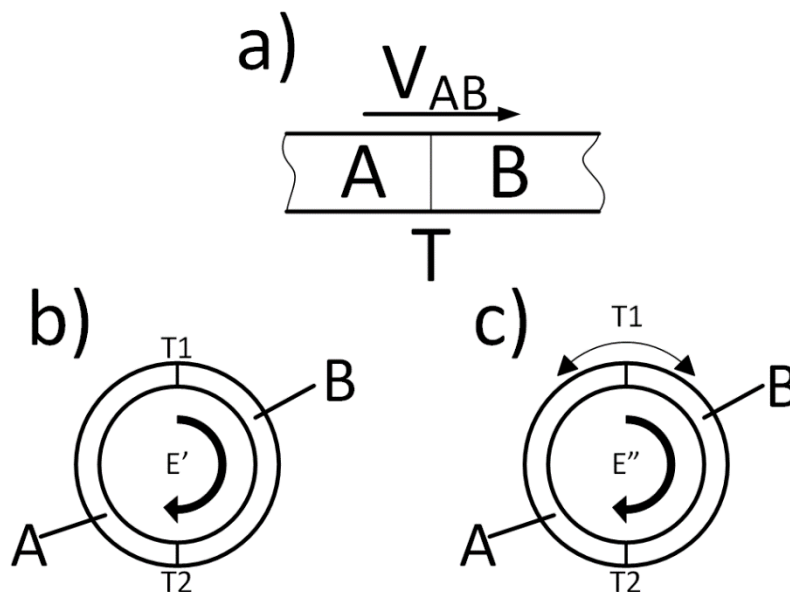
gdzie: V_A i V_B oraz n_A i n_B oznaczają odpowiednio prace wyjścia i liczby swobodnych elektronów w 1 cm^3 metali A i B; k - stała Boltzmana; e - ładunek elektronu; T - temperatura bezwzględna. W zamkniętym obwodzie złożonym z dwu metali (rys.2.1.5) o różnych temperaturach styków T_1 i T_2 siłę termoelektryczną (STE), powstającą na stykach przedstawia wzór:

$$E' = V_{AB}(T_1) + V_{BA}(T_2) = \frac{k \cdot T_1}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) + \frac{k \cdot T_2}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_B}{n_A}\right) \quad (2.2. a)$$

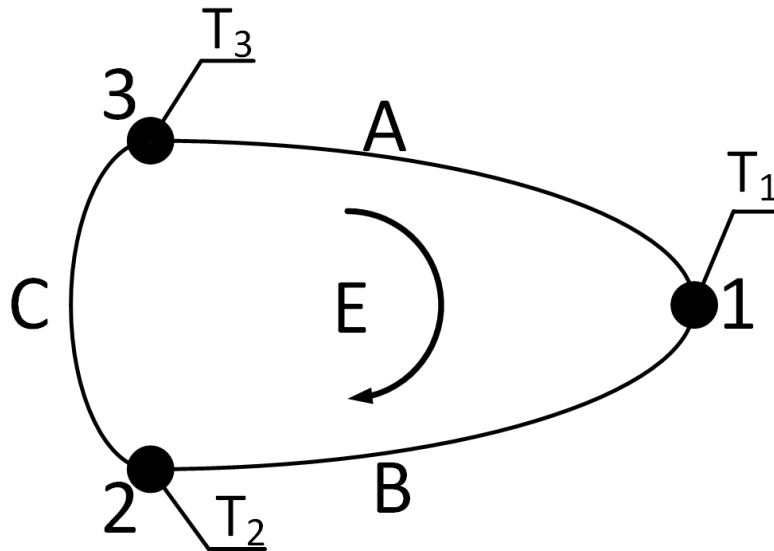
lub

$$E' = \frac{k}{e} \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right) \quad (2.2. b)$$

Przyjęto tu przybliżone założenie, że praca wyjścia oraz liczba wolnych elektronów nie są zależne od temperatury. Wielkość E' odpowiada sile elektromotorycznej Peltiera. W rzeczywistości liczba wolnych elektronów w metalu jest również funkcją temperatury, co jest również źródłem gradientów potencjałów powstających wzdłuż gradientu temperatury w jednorodnym przewodniku metalowym.



Rys. 2.1. Zjawiska termoelektryczne. Wzory pomocnicze: a) $V_{AB} = V_B - V_A = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right)$; b) $E' = \left[\frac{k}{e} \cdot \ln\left(\frac{n_A}{n_B}\right)\right] \cdot (T_1 - T_2)$; c) $E'' = (\sigma_B - \sigma_A) \cdot (T_1 - T_2)$.



Rys. 2.2. Obwód termoelektryczny złożony z trzech różnych metali (A,B,C).

W zamkniętym obwodzie metali A i B (rys.2.1 c) powstaje tzw. siła elektromotoryczna Thomson

$$E'' = (\sigma_B - \sigma_A) \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.3)$$

przy czym σ_A i σ_B są współczynnikami Thomsona dla metali A i B.

W normalnym obwodzie termoelektrycznym obydwa rodzaje siły termoelektrycznej, tj. Thomsona i Peltiera są skojarzone, możemy więc ogólnie napisać

$$E = f(T_1 - T_2) \quad (2.4)$$

Powyższy wzór jest podstawą stosowania układu dwu różnych metali do pomiaru temperatury, a ściślej biorąc, różnicy temperatury. Układ dwu różnych metali do pomiaru temperatury nazywamy termoelementem, a spoiną pomiarową lub "gorącą" - tę spoinę, która znajduje się w mierzonej temperaturze, drugą zaś - spoiną odniesienia.

Zjawisko termoelektryczne jest odwracalnym procesem termodynamicznym, w przeciwieństwie do zjawiska nieodwracalnego, jakim jest wydzielanie się ciepła przy przepływie prądu elektrycznego, proporcjonalnie do I^2R . Zgodnie z prawami termodynamiki (I i II zasada) w obwodzie o wyrównanej temperaturze nie może powstać siła elektromotoryczna. Powyższe rozważania prowadzą do wniosku jak niżej.

W obwodzie złożonym z trzech różnych metali A, B i C o spoinach 1, 2 i 3, znajdujących się w temperaturze T_1 , T_2 i T_3 , siła termoelektryczna całego obwodu (rys.2.2) wynosi

$$E = e_{AB}(T_1) + e_{BC}(T_2) + e_{CA}(T_3) \quad (2.5)$$

gdzie: e - oznaczają siły elektromotoryczne między poszczególnymi parami metali.

Dla $T_1=T_2=T_3=T_0$ jest $E=0$, zatem możemy napisać $-e_{AB}(T_1) = -e_{BC}(T_2)+e_{CA}(T_0)$. Dla równości temperatury dwóch spoin $T_1=T_2=T_0$, przy trzeciej temperaturze T_1 otrzymamy

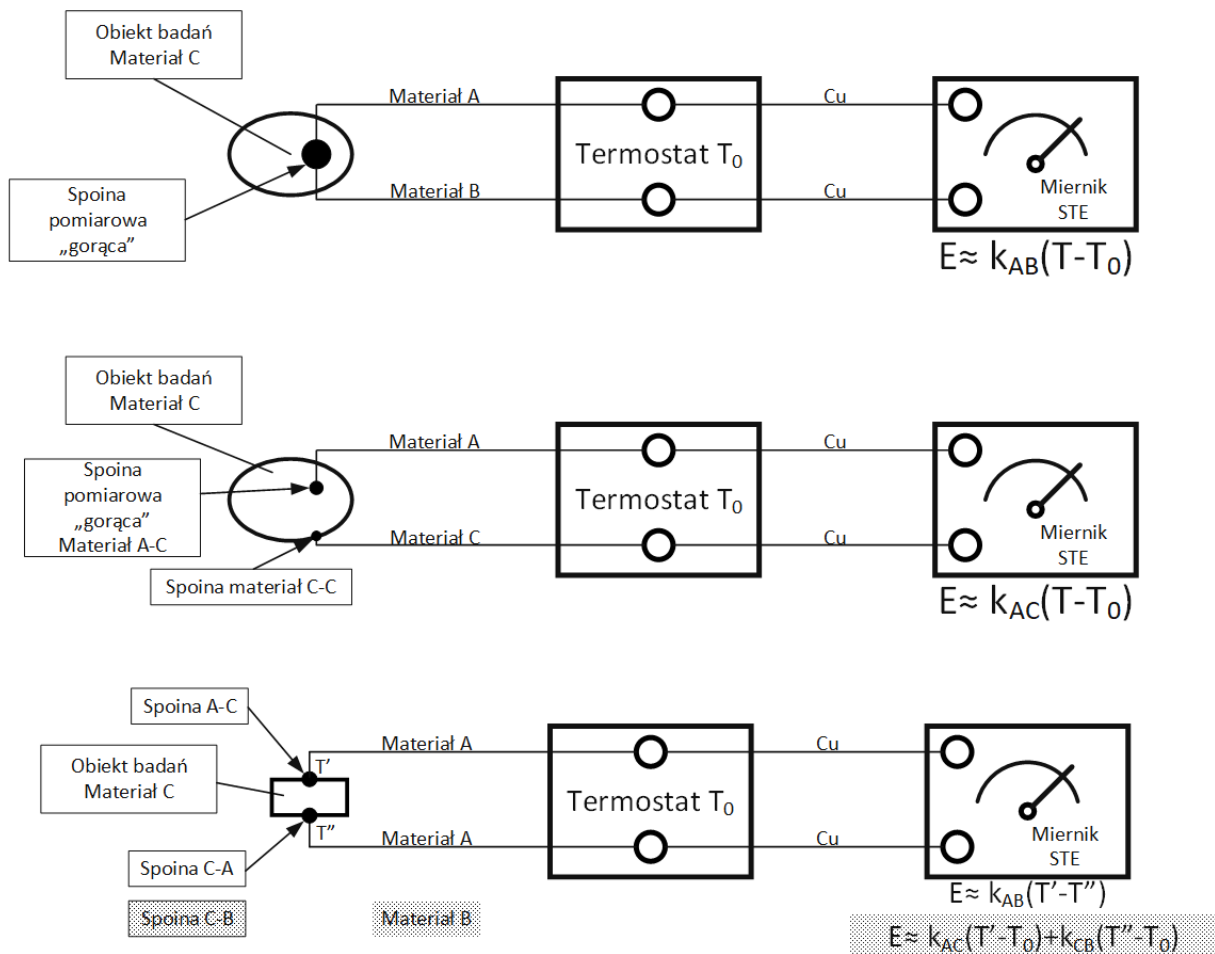
$$E = e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_0) \quad (2.6)$$

Siła elektromotoryczna obwodu złożonego z dwóch metali A i B nie ulega zmianie przez włączenie dalszych różnych metali (np. C), pod warunkiem, aby wszystkie dodatkowe spoiny (np. BC i CA) miały taką samą temperaturę jak spoina BA, do której dołączono dalsze metale.

Można więc, bez spowodowania błędów, do końców termoelementów o temperaturze odniesienia T_0 , dołączyć przewody miedziane, można nie spojone termoelektrody zanurzyć w kąpiel metalową lub połączyć (spoić) dwa metale trzecim metalem, byle tylko temperatury obu w ten sposób powstających nowych spoin były sobie równe.

Siła termoelektryczna termoelementu mierzącego różnicę temperatury T_3-T_1 , jest sumą algebraiczną sił termoelektrycznych dwu identycznych termoelementów mierzących różnicę T_2-T_1 oraz T_3-T_2 .

Korzystamy z tego prawa nieraz w różnych układach, np. do kompensacji zmian temperatury odniesienia, pomiaru temperatury i różnicy temperatury (warianty na rys.2.3), itp.



Rys.2.3. Schematy ideowe różnych wariantów pomiaru temperatury ciała stałego przewodzącego prąd elektryczny: E - siła termoelektryczna; k_{AB}, k_{AC}, k_{CB} - średnie czułości temperaturowe poszczególnych

termoelementów w rozważanym zakresie temperatury; T – temperatura obiektu; T_0 – temperatura odniesienia.

Tablica 1. Dane podstawowe o najczęściej stosowanych termoelementach.

Symbol według normy IEC584-1	Typ termoelementu ^{*)}	Zakres temperatury	Średnia czułość [$\mu\text{V/K}$]	Zalety i wady
J	Żelazo + Konstantan –	$-210^{\circ}\text{C} \div +760^{\circ}\text{C}$ $63\text{K} \div 1033\text{K}$	55	Najbardziej popularny klasyczny typ termoelementu. Ma stosunkowo dużą czułość w zakresie $100 \div 470^{\circ}\text{C}$. Mała powtarzalność związana z zanieczyszczeniami żelaza.
K	Chromel Ni-Cr10 + Alumel – Ni-Mn2Al2Si1	$-270^{\circ}\text{C} \div +1372^{\circ}\text{C}$ $3\text{K} \div 1645\text{K}$	41	Jest odporny na atmosferę utleniającą. W wyższych temperaturach wrażliwy na związki siarki. Elektroda aluminiowa naogół zużywa się szybciej a Ni-Cr. Najczęściej aktualnie stosowany termoelement w zakresie do 1000°C , o prawie liniowej charakterystyce.
T	Miedź + Konstantan –	$-270^{\circ}\text{C} \div +400^{\circ}\text{C}$ $3\text{K} \div 673\text{K}$	40	Nie może pracować w atmosferze utleniającej, zwłaszcza w wyższej temperaturze. Jego charakterystyka termometryczna w dużej mierze zależy od czystości elektrody miedzianej.
E	Chromel + Konstantan –	$-270^{\circ}\text{C} \div +100^{\circ}\text{C}$ $3\text{K} \div 1273\text{K}$	68	Najczęściej stosowany w niskiej i bardzo niskiej temperaturze. Jest niemagnetyczny.
S	Platyna + PtRh10 –	$-50^{\circ}\text{C} \div +1765^{\circ}\text{C}$ $223\text{K} \div 2040\text{K}$	12	Stanowi wzorzec międzynarodowej skali temperatury w przedziale $630 \div 1064^{\circ}\text{C}$. Stosuje się go normalnie w atmosferze utleniającej, ale w wysokiej temperaturze bywa zanieczyszczany przez Pb, Fe, Zn i Cd. Metale te tworzą z Pt łatwotopliwe stopy, które mogą zanieczyszczać termoelektrody.
R	Platyna + PtRh13 –	$-50^{\circ}\text{C} \div +1765^{\circ}\text{C}$ $223\text{K} \div 2040\text{K}$	14	Ma właściwości bardzo zbliżone do termoelementu typu S.
B	Platyna PtRh30 + Platyna PtRh6 –	$0^{\circ}\text{C} \div +1820^{\circ}\text{C}$ $273\text{K} \div 2093\text{K}$	10	Pozwala na pomiar temperatury do 1800°C . Jej czułość w temperaturze pokojowej jest tak mała, że nie jest wymagane termostatowanie zimnych końców.

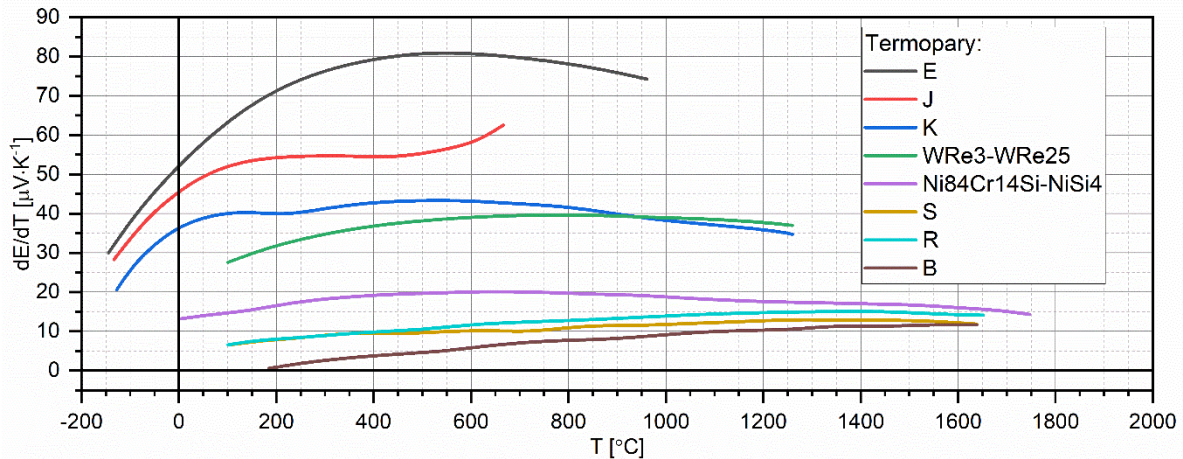
-	Wolfram WRe5 + Wolfram Wre26 -	0°C ÷ +2000°C 273K ÷ 273K	17	Pomiar temperatury do 2000°C i wyżej w atmosferze redukującej, obojętnej lub próżni. Mała plastyczność stopów wolframu nie pozwala na produkcję termoelementów płaszczowych.
---	-----------------------------------	------------------------------	----	--

*) w tej rubryce znakami „+” i „-”, oznaczono polaryzacje odpowiednich elektrod.

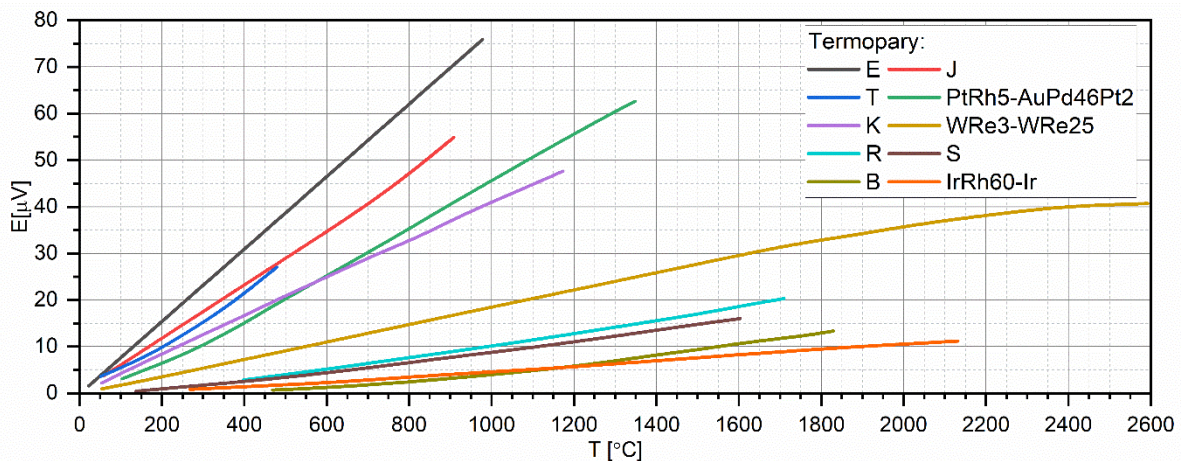
2.2. TERMOELEMENTY

Metale i stopy stosowane do budowy termoelementów powinny odpowiadać następującym wymaganiom: liniowości, powtarzalności i stałości charakterystyki, tj. zależności $E = f(T-T_0)$; dużej czułości, tj. dużej wartości dE/dT , odporności na wpływ spotykane w przemyśle w szerokim zakresie temperatury, jak również niskiemu kosztowi.

Kilka typowych termoelementów, zestawionych w tabelicy 2.1 zaspokajają większość potrzeb przemysłu. Charakterystyki termometryczne najważniejszych termoelementów pokazano na rys.2.4 i rys.2.5.



Rys.2.4 Zależność czułości temperaturowej dE/dT od temperatury, dla wybranych termoelementów.



Rys.2.5 Charakterystyki termometryczne wybranych termoelementów dla temperatury wyższej od 0°C.

Do pomiaru temperatury w warunkach ekstremalnych stosuje się wiele termoelementów specjalnych. Termoelement PtRh30 - PtRh6 (oznaczany też PtRh18 lub symbolem B w/g normy IEC) nadaje się do



pomiaru temperatury do około 1800°C. Dodatek rodu w drugim ramieniu zmniejsza wpływ dyfuzji rodu. Stopy rodu z renem i irydu z rutem stosowano do około 2000°C, a stopy wolframu z molibdenem do około 3000°C. Do pomiaru bardzo niskiej temperatury stosuje się wiele specjalnych termoelementów (miedź z domieszkami - platyna, złoto z kobaltem - miedź, miedź - miedź z domieszkami), które mają dostateczny gradient siły termoelektrycznej (rzędu 1÷4 $\mu\text{V/K}$) nawet przy temperaturze około 4 K.

W przypadku wysokiej temperatury termoelementy nie powinny znajdować się w atmosferze utleniającej. Atmosfery redukujące, zwłaszcza zawierające wodór, powodują duże i szybkie zmiany charakterystyki oraz kruchość termoelementów. Szczególnie wrażliwy jest termoelement PtRh-Pt z powodu chciwego pochłaniania przez platynę par metali znajdujących się zawsze w atmosferach redukujących. Najczęściej spotykane są pary żelaza. Przy wyższej temperaturze niekorzystnie również wpływa krzem zawarty w osłonach termoelementu PtRh-Pt, zwłaszcza w obecności siarki (np. smarów), która tworzy lotny związek z krzemem, rozkładający się na platynie.

To samo odnosi się, chociaż w mniejszym stopniu, do termoelementów z metali nieszlachetnych. Dlatego należy je chronić przed atmosferami redukującymi. W atmosferze gorących gazów spalinowych nieosłonięte termoelementy zmieniają swą charakterystykę nieraz w ciągu kilkudziesięciu godzin. Z rozpowszechnionych termoelementów najmniej wrażliwym na atmosferę redukującą jest termoelement żelazo - konstantan (typ J według normy IEC).

W atmosferze utleniającej następuje utlenienie z prędkością zależną od temperatury, co jest przyczyną zużycia termoelementu. Np. termoelement chromel - alumel (typ K) o średnicy 3 mm w powietrzu wytrzymuje około 300 godzin przy temperaturze 1200°C, a około 2000 godzin przy 1000°C. Równocześnie wskutek selektywnego utleniania składników następują stopniowe zmiany charakterystyki. Siła termoelektryczna termoelementu żelazo-konstantan przy temperaturze do około 500°C w ciągu kilku pierwszych godzin pracy ulega obniżeniu, po czym ustala się. Natomiast w wyższej temperaturze zachodzi jej powolny spadek. Zmiany te dla termoelementu żelazo-konstantan leżą zazwyczaj w granicach normalnych tolerancji. Termoelementy NiCr-Ni, a także chromel - alumel zachowują się odwrotnie: siła termoelektryczna stopniowo wzrasta. Utlenianie termoelementu żelazo-konstantan można znacznie ograniczyć umieszczając go w osłonie szczelnie napełnionej czystym tlenkiem glinu. W takich warunkach termoelement żelazo-konstantan pracuje zadowalająco do temperatury ok. 900°C.

Jeżeli termoelement jest zupełnie jednorodny, głębokość zanurzenia nie wpływa na przebieg funkcji $E = f(T)$. Pod wpływem zanurzenia w obszar podwyższonej temperatury, a także wskutek oddziaływań chemicznych ośrodka termoelement szybko traci jednorodność. Zatem zmniejszenie głębokości zanurzenia powoduje błędy. Należy na to zwrócić uwagę przy wzorcowaniu używanych już termoelementów w innym zanurzeniu niż przy pracy.

2.3. KONSTRUKCJA TERMOELEMENTÓW I OSŁON

Przy nieomal wszystkich zastosowaniach przemysłowych termoelementy muszą być chronione przed mechanicznymi i chemicznymi działaniami ośrodka. Dobranie osłony, konstrukcji i materiału jest trudnym - kompromisowym uwzględnieniem następujących właściwości: odporności na mierzoną temperaturę i agresywności chemicznej ośrodka, szczelności, wytrzymałości mechanicznej, izolacji elektrycznej, bezwładności cieplnej (właściwości dynamicznych) oraz wpływu na statyczny błąd pomiaru temperatury. Dwie ostatnie właściwości omówiono oddzielnie, gdyż mają szczególne znaczenie i są zależne od właściwości ośrodka, sposobu wbudowania termoelementu oraz rozkładu temperatury ośrodka i jego otoczenia.

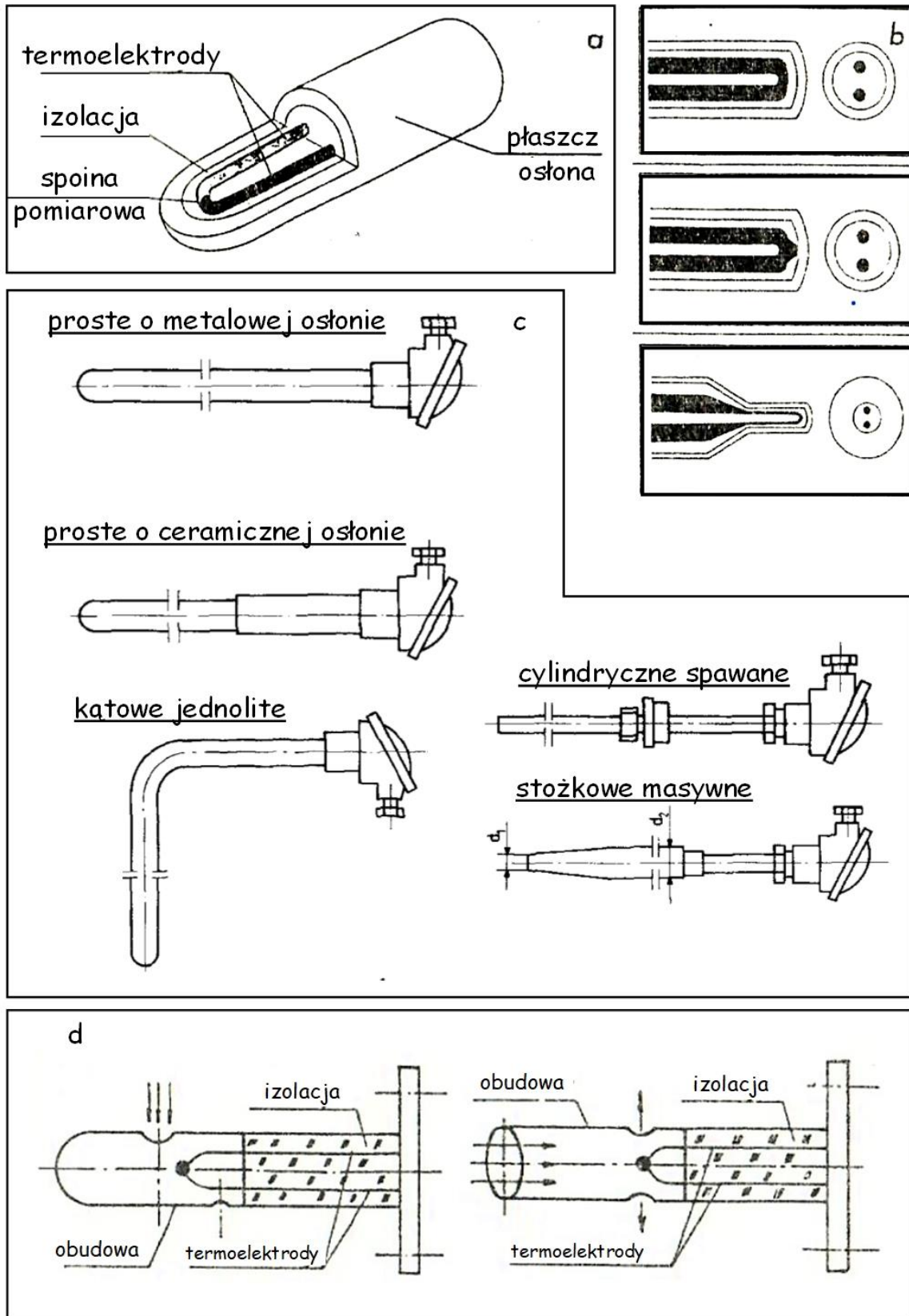
W związku z rozwojem elektrowni i reaktorów jądrowych opracowano nowe konstrukcje termoelementów, niezawodne i odporne na promieniowanie. Jedną z nich jest bardzo rozpowszechniona zwłaszcza w trudnych warunkach.



Są to termoelementy w izolacji z czystego tlenku glinu lub magnezu w płaszczu metalowym (rys.2.6 a i b). Wykonuje się je przez przeciąganie z rury o dużej średnicy, wypełnionej izolacją (MgO lub AlO_3) z umieszczonymi wewnątrz prętami z materiału termoelektrycznego. Osłony wykonuje się z dowolnych materiałów, takich jak stal żaroodporna lub kwasoodporna, stopy termoelektryczne, itd., a dla najwyższej temperatury, tj. powyżej 1600°C - z platyny. Średnica osłon wynosi od 0.2 do 6 mm. W jednej osłonie umieszcza się od jednego do czterech przewodów. Osłona może być użyta jako jedna z termoelektrod, Wartość izolacji między przewodami a osłoną wynosi w stanie zimnym około $10^{11} \Omega/\text{m}$ i spada do około $100 \text{ M}\Omega/\text{m}$ przy 600°C oraz do $0,03 \text{ M}\Omega/\text{m}$ przy 1000°C . Termoelementy płaszczowe w zakresie temperatury do około 1000°C są niezastąpione w eksperymentalnie trudnych warunkach i agresywnym otoczeniu.

Oprócz typowych osłon termoelementów istnieją liczne konstrukcje dostosowane do specjalnych potrzeb (rys.2.6 c i d).

Termoelektrody muszą być od siebie izolowane. Do tego celu służą izolacyjne rurki jednoworowe lub dwuworowe oraz paciorki. Izolacja termoelementów platynowych powinna być szczelna i uboga w związki krzemu. Przy wysokiej temperaturze wartość oporu izolacji ceramicznych maleje wykładniczo, dlatego w takich warunkach spoina pomiarowa powinna być starannie izolowana. Zaniedbanie tego środka ostrożności prowadzi nieraz do znacznych błędów z powodu prądów upływowych.



Rys.2.6 Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne termoelementów: a) termoelement płaskowy; b) typy komórek pomiarowych termoelementów płaskowych; c) wykonania przemysłowe termoelementów ($\varphi_{\text{płaszcz}} = 6 \div 30 \text{ mm}$, $L = 0.2 \div 2 \text{ m}$); d) termoelementy lotnicze (do pomiaru temperatury spiętrzenia).

2.4. POMIAR NAPIĘCIA TERMIELEKTRYCZNEGO (STE) TERMIELEMENTÓW

Pierwotny sygnał wyjściowy termoelementu, STE będąca nieliniową funkcją różnicy temperatury mierzonej i odniesienia, przetwarza się w wzmacniaczu na sygnał znormalizowany albo doprowadza do miernika lub rejestratora. Pierwsze rozwiązanie bywa częściej stosowane, ale istnieje wiele sytuacji w których celowy jest bezpośredni pomiar STE termoelementu i odpowiadającej mu temperatury. Jest tak zazwyczaj przy małej liczbie punktów pomiarowych, mało rozbudowanym systemie pomiarowym i regulacji oraz nieznaczących odległościach między termoelementami a miernikiem i brakiem źródeł zakłóceń.

W przypadku przetwarzania na sygnał cyfrowy niezbędna jest linearyzacja jednym ze sposobów opisanych w prawie każdym podręczniku metrologii.

Do bezpośredniego pomiaru STE termoelementów w warunkach przemysłowych stosowane są: miliwoltomierze DC, automatyczne kompensatory oraz mierniki i układy cyfrowe. Stosowanie pierwszych jest uzasadnione, gdy dopuszczalna jest klasa niedokładności od 1 do 1.5.

Miliwoltomierze z podziałką opisaną w stopniach temperatury opisane są przy założeniu określonej wartości oporu zewnętrznego R_z . Jego zmiany powodują zmiany czułości miliwoltomierza

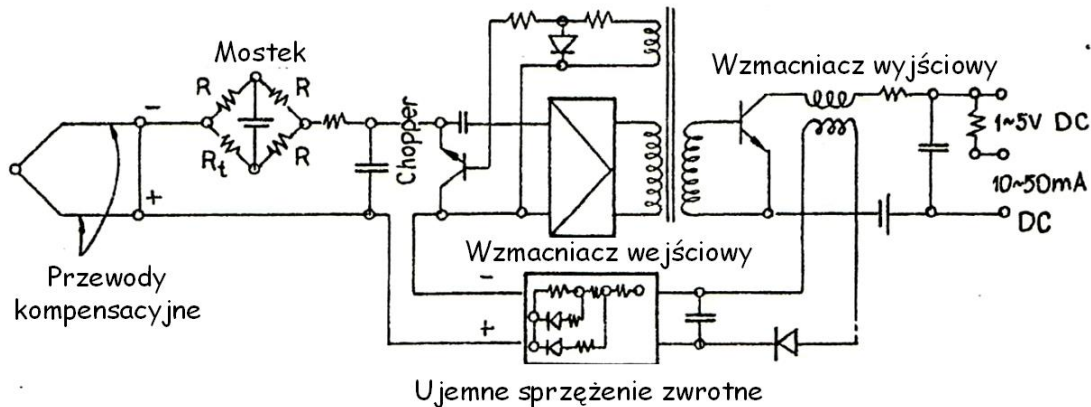
$$\Delta S = \frac{\Delta U}{E_n} = \frac{\Delta R_z}{R_z + R_m} \quad (2.7)$$

a zatem odpowiedni błąd wskazań temperatury. Wielkość E_n oznacza siłę termoelektryczną termoelementu dla górnej granicy zakresu, R_z - opór miliwoltomierza. Aby utrzymać pomiar w żądanej klasie dokładności przy oczekiwanej zmianie ΔR_z należy dobrać odpowiednią wartość R_m . Stąd stosowanie miliwoltomierzy wysokooporowych (200÷1000 Ω), o małym poborze mocy, źle dobranym R_z (rzędu 5÷10 Ω) z punktu widzenia dopasowania energetycznego.

Zmiany oporu ΔR_z powstają wskutek zużycia termoelementów, zmian oporu termoelementu pod wpływem temperatury mierzonej i zmian rezystancji przewodów łączących termoelement z miernikiem. Wymagania dotyczące przewodów są zawarte w odpowiednich normach. Przy wyższych wymaganiach dokładności i dużej rezystancji obwodów zewnętrznych konieczne jest stosowanie kompensatorów automatycznych.

Układy cyfrowe stosuje się wtedy, gdy wymagają tego zadania regulacji czy centralnej rejestracji danych, zwłaszcza gdy liczba punktów pomiarowych jest duża, a także do bardzo dokładnych pomiarów. Przy cyfrowym pomiarze dla małych zmian temperatury przyjmuje się liniowość charakterystyki, natomiast przy szerokim zakresie pomiarowym konieczna jest linearyzacja.

Na rys.2.7 jest pokazany schemat ideowy konwertera przetwarzającego STE termoelementu na sygnały wyjściowe 10÷50 mA DC i 1÷5 A DC proporcjonalne do STE (Yokogawa, Gen.Catalog). Zakres pomiarowy STE tego konwertera zawiera się w przedziale od 3 mV do około 60 mV z możliwością przesuwu zera od -10 mV do około 60 mV. Impedancja wejściowa wynosi około 200 Ω , a jego wyjście prądowe nie może być obciążone impedancją większą niż 200 Ω . Dokładność i czułość konwertera wynoszą odpowiednio $\pm 0.5\%$ i $\pm 0.02\%$ zakresu pomiarowego. Konwerter może być wykonany wraz z układem linearyzującym, przy czym nieliniowość charakterystyki termoelementu nie może przekroczyć 10 %.



Rys.2.7 Schemat ideowy konwertora przetwarzającego STE termoelementu na znormalizowany sygnał prądowy DC proporcjonalny do STE.

2.5. KOMPENSACJA WPŁYWU ZMIAN TEMPERATURY ODNIESIENIA

Gdy przyjęta przy wzorcowaniu temperatura odniesienia T_0 , zmieni się na T'_0 to powstanie błąd wskazań (rys. 2.8)

$$\Delta T_m = \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} (T_0 - T'_0) \quad (2.8)$$

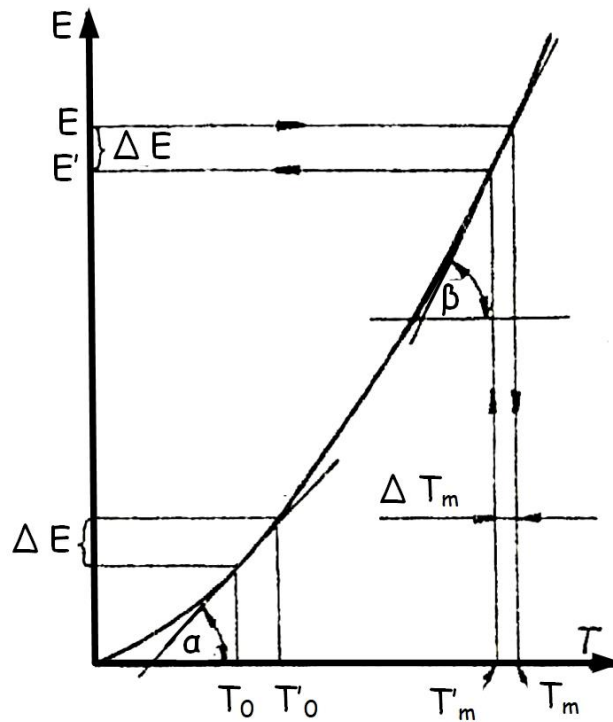
gdzie $\tan \alpha = \frac{dE}{dT}$ dla temperatury $(T_0 + T'_0)$ oraz $\tan \beta = \frac{dE}{dT}$ dla temperatury $T_m + \Delta T_m/2$.

Dla prostoliniowej charakterystyki termoelementu zawsze zachodzi $\Delta T_m = -(T_0 - T'_0)$. Ponieważ w warunkach rzeczywistych temperatura spoin odniesienia ulega zazwyczaj znacznym wahaniom, zachodzi konieczność kompensacji jej wpływu. Osiągamy to stosując jeden z następujących sposobów:

- oddalenie złącza od obiektu do obszaru o niewielkich zmianach temperatury;
- poprzez stabilizację temperatury spoiny złącza odniesienia;
- poprzez dodanie w układzie pomiarowym napięcia odpowiadającego zmianie siły termoelektrycznej $E = f(T - T'_0)$;
- poprzez mechaniczne przesunięcie zera miliwoltomierza.

Ad. a) Przez zastosowanie przewodów dołączonych do głowicy termoelementu wykonanych z materiału o właściwościach termoelektrycznych identycznych ze stosowanym termoelementem, można spoiny odniesienia przenieść do dogodnego miejsca. Przewody takie noszą nazwę kompensacyjnych. Dla termoelementów z metali nieszlachetnych wykonuje się je z tego samego stopu co odpowiednie ramiona termoelementu (dla termoelementu PtRh-Pt z odpowiednio dobranych stopów miedzi i niklu). Przewody kompensacyjne są znormalizowane.

Ad. b) Temperaturę spoin odniesienia stabilizuje się za pomocą ogrzewanych elektrycznie termostatów do temperatury wyższej od otoczenia. Termostaty są znormalizowane. Dokładność stabilizacji temperatury wynosi od 0.1 do 1 K zależnie od wymagań. Mechaniczne zero wskaźnika temperatury musi odpowiadać temperaturze stabilizacji równej najczęściej 50°C (w nasz klimacie). Dla celów kontrolnych i laboratoryjnych stosuje się do stabilizacji temperatury odniesienia topniejący lód.



Rys.2.8 Graficzny sposób określania poprawki do pomierzonej wartości STE gdy temperatura odniesienia T'_0 nie jest równa temperaturze znamionowej T_0 .

Ad. c) Wpływ temperatury odniesienia kompensować można z dostateczną dokładnością przez wprowadzenie w obwód wyrównawczego napięcia przy pomocy układów przedstawionych na rys.2.9 i 2.10.

Przypadek A) na rys.2.9 przedstawia kompensację za pomocą niezrównoważonego mostka, umieszczonego w temperaturze T_0 , złącza odniesienia. Mostek składa się z trzech niezmiennych oporników R oraz z opornika, którego rezystancja zależy od temperatury (np. z miedzi), o wartości $R_0 = R$ przy normalnej temperaturze odniesienia T_0 . Dla T'_0 mamy

$$R_t = R_0[1 + \alpha_0(T'_0 - T_0)]$$

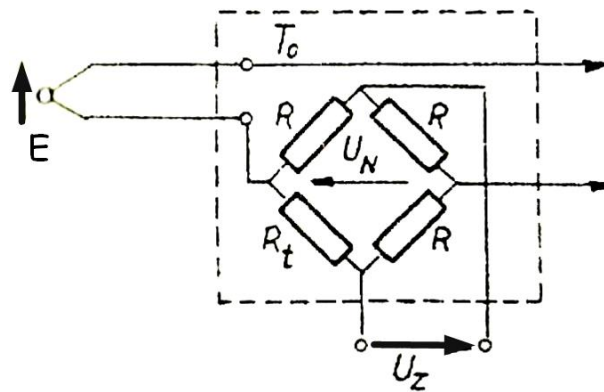
przy czym α_0 oznacza temperaturowy współczynnik oporu R , odniesiony do T_0 . Mostek jest więc w równowadze przy T_0 , natomiast przy temperaturze T'_0 napięcie równowagi wynosi

$$U_N = U_Z \left(\frac{R_t}{R_t + R} - \frac{1}{2} \right) \quad (2.9)$$

gdzie: U_Z - napięcie zasilania mostka. Dla małych zmian temperatury odniesienia zmianę siły termoelektrycznej termoelementu przy niezmienniej temperaturze złącza pomiarowego T_m , określa z dostatecznym przybliżeniem wzór $\Delta E = k(T_0 - T'_0)$, gdzie $k = dE/dT$. Stąd warunek kompensacji $\Delta E = U_N$. Ze wzoru (2.9), dla określonej różnicy temperatury otoczenia ΔT_0 i odpowiadającego jej ΔE , po pominięciu wielkości wyższego rzędu, można obliczyć prawidłową wartość napięcia zasilania mostka

$$U_Z = \frac{4k}{\alpha} \quad (2.10)$$

Praktyczna aplikacja tego sposobu kompensacji zmian temperatury odniesienia jest pokazana na rys. 2.7.



Rys.2.9 Mostkowy układ do kompensacji zmian temperatury otoczenia T_0 z rezystancją zależną od T_0 .

Przypadek B) na rysunku 2.10 przedstawia układ kompensacyjny, którego warunek równowagi określa zależność

$$E - E_0 = U_Z \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_t}{R_t + R_3} \right) \quad (2.11)$$

gdzie: $R_1=R'_1+r_1$ oraz $R_2=R'_2+r_2$ oznaczają rezystancje w temperaturze mierzone T_m oraz

$$R_t = R_0[1 + \alpha_0(T'_0 - T_0)]$$

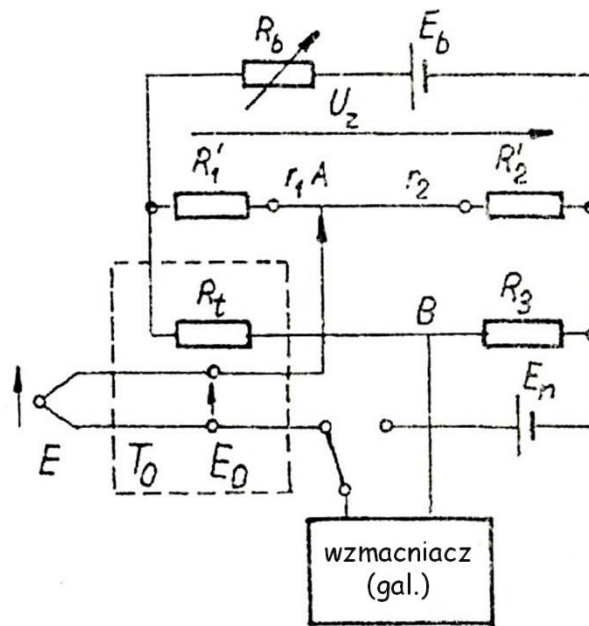
przy czym R_0 i α_0 odnoszą się do normalnej temperatury otoczenia T_0 , natomiast T'_0 oznacza rzeczywistą temperaturę otoczenia oraz E i E_0 - siłę termoelektryczną złącza pomiarowego i złącza odniesienia. Przyjmując, że $R=\text{idem}$ oraz $E_0=\text{var}$ otrzymuje się, że warunek prawidłowej kompensacji jest następujący

$$\frac{d(E - E_0)}{dT} = U_Z \frac{d \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_t}{R_t + R_3} \right)}{dT} \quad (2.12)$$

Po wykonaniu działań otrzymujemy

$$\frac{dE_0}{dT} = k = U_Z 2\alpha_0 R_0 \frac{R_3}{R_3 + R_0} \quad (2.13)$$

Pominięto tu w mianowniku wyrazy $\alpha_0 R_0 (T'_0 - T_0)$ jako wielkość małą oraz przyjęto, że $r_1 \ll R'_1$ i $r_2 \ll R'_2$ i że zarówno $k=dE_0/dT$, jak i α_0 są liniowe w zakresie zmian temperatury otoczenia. Wzór (2.13) pozwala obliczyć α (tj. dobrać dla gałęzi R_t stosunek manganu do miedzi lub niklu) lub przy określonym α obliczyć wartość R_0 .



Rys.2.10 Kompensacyjny układ mostkowy z rezystancją zależną od temperatury otoczenia stosowany w kompensatorach.

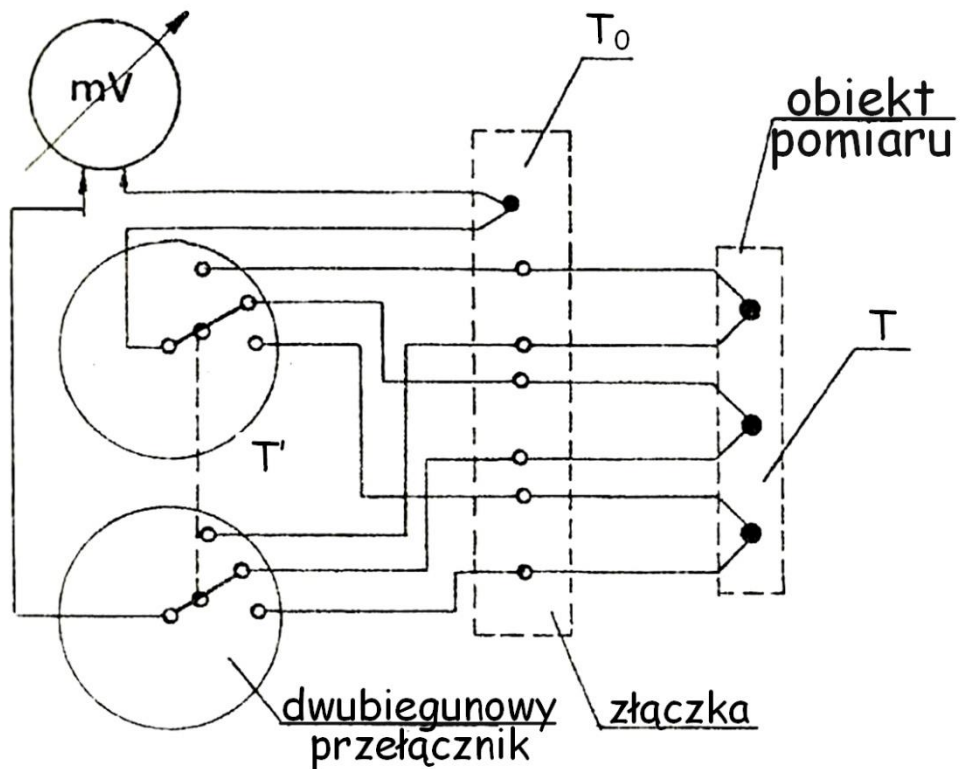
Ad. d) Przy pomiarze siły termoelektrycznej można uzyskać kompensację przez takie przesuwanie mechanicznego zera, aby przy otwartym obwodzie wskazówka stale wskazywała rzeczywistą temperaturę odniesienia. Jest to dopasowywanie miernika do panującej temperatury odniesienia. Uzyskuje się to za pomocą paska bimetalowego, który przemieszcza odpowiednio jedną ze sprężynek zwrotnych miliwoltomierza.

2.6. UKŁAD POŁĄCZEŃ INSTALACJI POMIAROWYCH

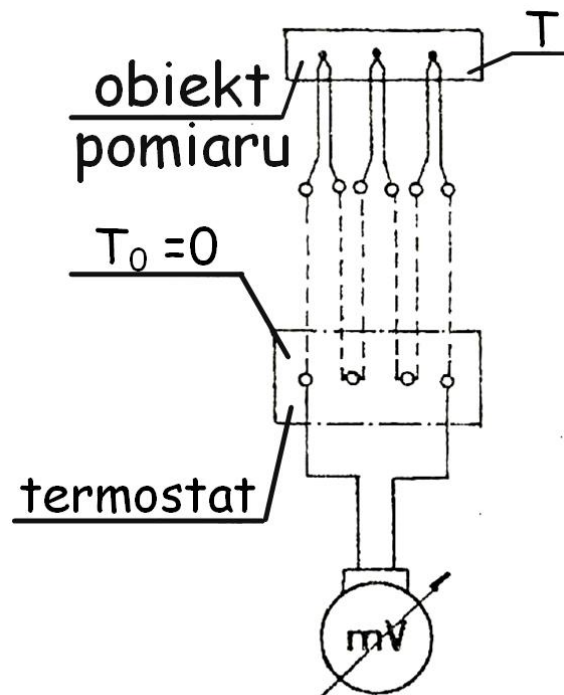
Przy wielopunktowych instalacjach pomiarowych można uzyskać znaczną oszczędność przewodów kompensacyjnych, kosztownych i o znacznym oporze, stosując skrzynki rozdzielcze umieszczone w pobliżu punktów pomiarowych. Skrzynki mogą być termostatowane. Przy większej liczbie punktów dogodniej jest przyjąć jako temperaturę odniesienia temperaturę oddzielnego termostatu i za pomocą termoelementu połączonego w szereg z termoelementami pomiarowymi, którego siła termoelektryczna sumuje się z pomiarową, kompensować różnicę (rys.2.11) temperatury T_0 skrzynki i T_0 odniesienia (termostatu).

Stosowanie wspólnego przewodu dla jednego z biegunów jest dopuszczalne tylko przy niskiej temperaturze i doskonałej izolacji, gdyż łatwo powstają poważne błędy spowodowane prądami błądzącymi.

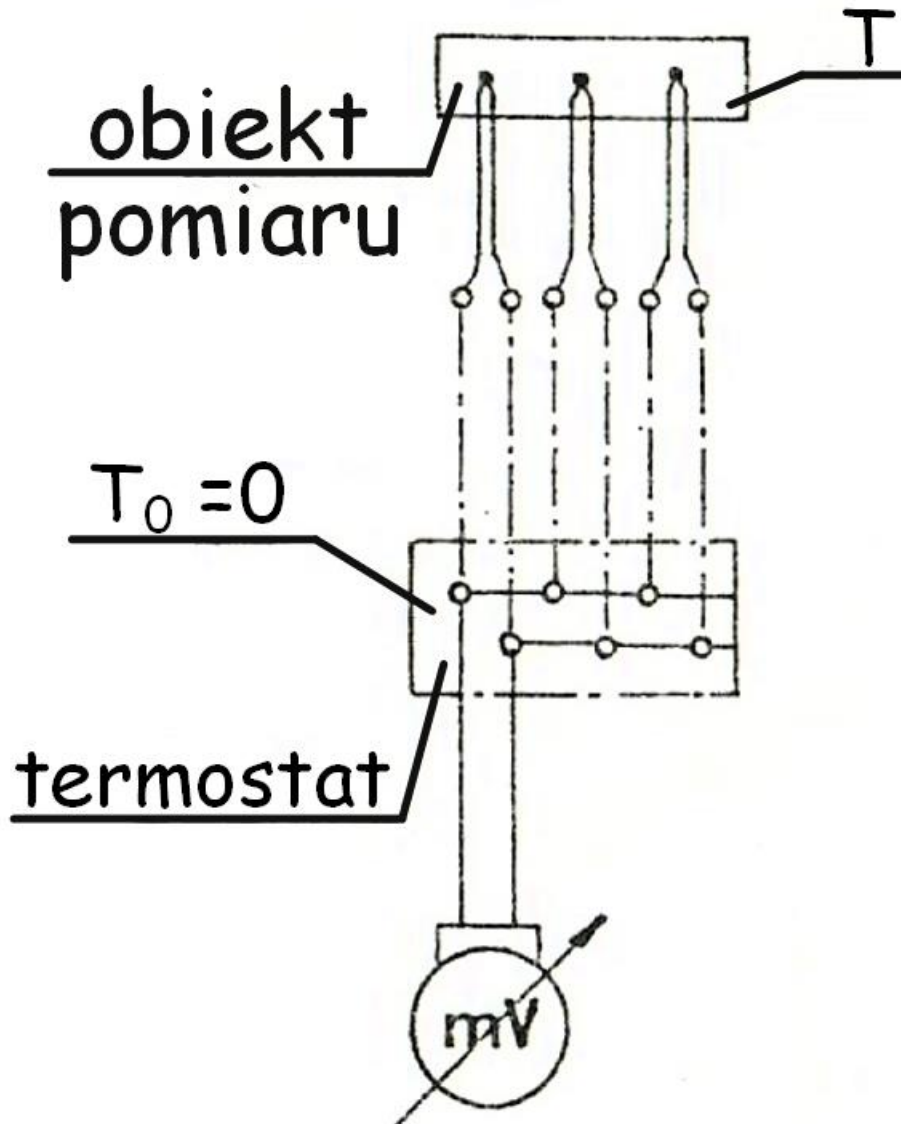
Do pomiarów średniej temperatury ośrodka można zastosować kilka termoelementów umieszczonych w różnych punktach tego ośrodka, łącząc je w układzie szeregowym lub równoległym. W pierwszym przypadku, dla $R_m \approx \infty$ (rys.2.11) mamy $E = \sum_{i=1}^n E_i$ zatem zakładając prostoliniową charakterystykę termoelementu $E=cT$, otrzymujemy $\bar{T} = \frac{E}{cn}$. W drugim przypadku (rys.2.13) jest $E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i$ lub dla $E_i=cT_i$, również $T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$ przy czym musi być $R_m \approx \infty$ lub musi zachodzić równość oporów wszystkich obwodów. Wielkość R_m oznacza opór miernika zaś n -liczbę termoelementów.



Rys. 2.11. Skrzynka ze złączką i dwubiegunowym przełączeniem oraz termoelementem odniesienia.



Rys. 2.12. Szeregowy układ termoelementów do pomiaru temperatury średniej.



Rys. 2.12. Równoległy układ termoelementów do pomiaru temperatury średniej.

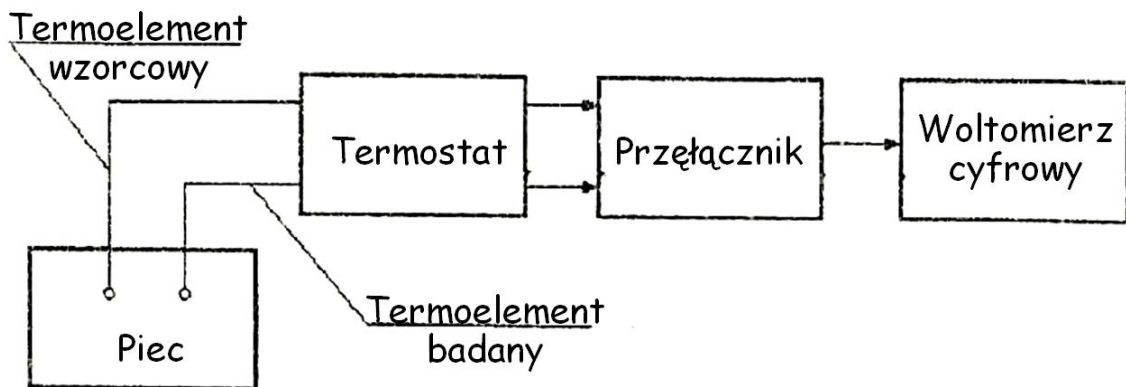
Instalacja przewodów pomiarowych termometrów oporowych i termoelementów musi być bardzo staranna. Szczegółowe wymagania są określone odpowiednimi normami. Przekrój przewodów powinien wynosić co najmniej 1.5 mm^2 . Przewody należy układać w sposób wykluczający uszkodzenia i wpływ sieci silnoprądowych. Połączenia powinny być wykonane za pomocą zacisków zabezpieczonych przed korozją i uszkodzeniem. Opór izolacji między przewodami i ziemią musi być większy niż $3 \text{ M}\Omega$. W układach stosujących elektroniczne kompensatory lub miliwoltomierze cyfrowe konieczne jest stosowanie środków w celu wyeliminowania szumów i składowych zmiennych.

2.7. CECHOWANIE TERMoeLEMENTÓW

W celu określenia własności termoelektrycznych termoelementu należy przeprowadzić jego cechowanie, tzn. wyznaczyć zależność wartości napięcia termoelektrycznego generowanego przez termoelement w funkcji różnicy temperatury spiny pomiarowej i spiny odniesienia.

Na rys.2.14 przedstawiono typowy schemat blokowy układu cechowania termoelementu w warunkach laboratoryjnych. Spiny pomiarowe termoelementu badanego i wzorcowanego są umieszczone w przestrzeni pomiarowej pieca elektrycznego. Spiny odniesienia termoelementów są umieszczone w termostacie, wewnątrz którego jest utrzymywana stała i znana temperatura. Wskazania wartości napięcia obu termoelementów odczytuje się na woltomierzu cyfrowym poprzez specjalny przełącznik. Zmieniając temperaturę pieca i określając jej wartość za pomocą termoelementu wzorcowego odczytuje się wartość napięcia dla badanego termoelementu. Umożliwia to sporządzenie charakterystyki termoelementu - zależności $E=E(\Delta T)$.

W ćwiczeniu zastosowano termostat elektroniczny utrzymujący we wnętrzu temperaturę 50°C z tolerancją $\pm 0.2^\circ\text{C}$. Niekiedy wygodnie jest spiny odniesienia umieszczać w termosie z mieszaniną wody destylowanej z lodem, co zapewnia stałą temperaturę równą 0°C.



Rys.2.14. Schemat ideowy układu do wzorcowania termoelementu.

2.8. Wyznaczanie stałej czasowej termoelementu

Siła termoelektryczna STE termoelementu $E(t)$ wyeksponowanej na skokową zmianę temperatury $\Delta T = T_1 - T_0$ co pokazano na rys.2.15, jest dana funkcją typu

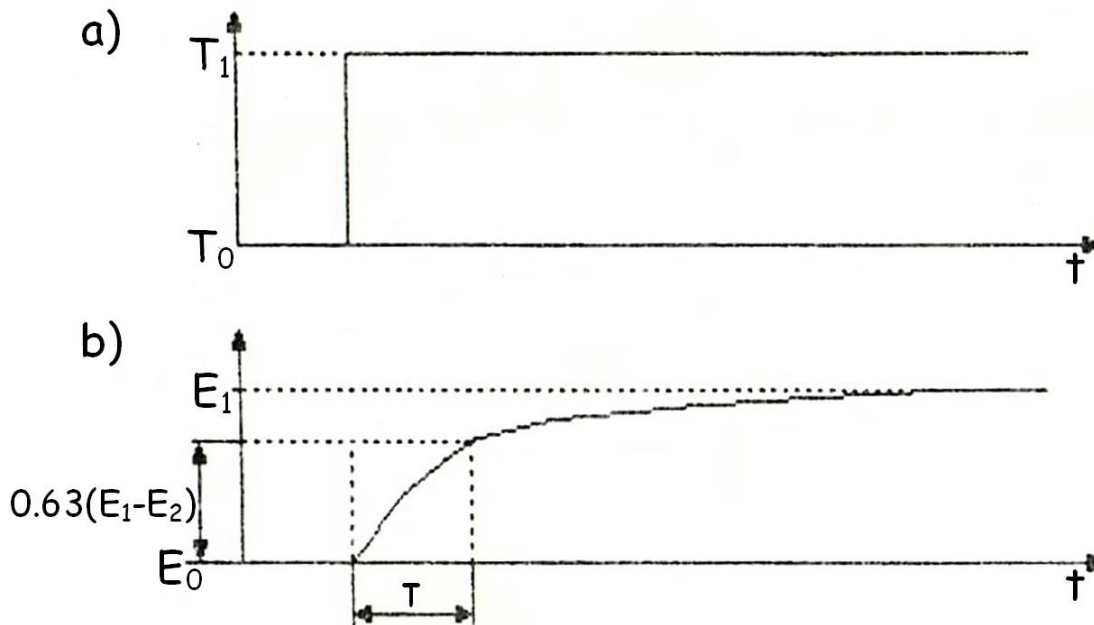
$$E(t) - E_0 = (E_1 - E_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (2.14)$$

gdzie:

E_0 - siła termoelektryczna odpowiadająca temperaturze początkowej T_0 ;

E_1 - siła termoelektryczna odpowiadająca temperaturze końcowej T_1 ;

t - czas; τ - stała czasowa.



Rys.2.15. Rysunek ilustrujący pojęcie stałej czasowej termoelementu: a) temperaturowe wymuszenie skokowe; b) odpowiedź czujnika.

Zależność (2.14) jest słuszna jedynie przy założeniu, że termoelement (precyzyjniej - spoina termoelementu) może być traktowany jako element o parametrach skupionych. Dla wartości $t=\tau$ mamy

$$E(\tau) - E_0 \cong 0,63 \cdot (E_1 - E_0) \quad (2.15)$$

tj. że STE osiąga około 63 % maksymalnej amplitudy ($E_1 - E_0$) zmian jej wartości.

Czas τ , po którym STE osiąga 63 % swojej zmiany w stosunku do wartości ($E_1 - E_0$) jest powszechnie stosowany do określenia innych wartości procentowych zmian STE w stosunku do całkowitej STE. Tymi wartościami są

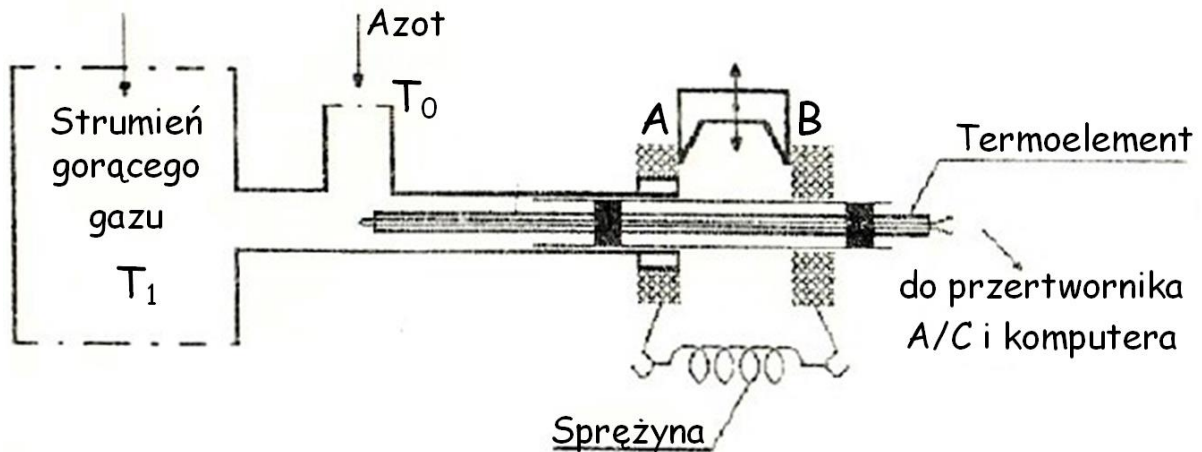
% od ($E_1 - E_0$)	63%	80%	90%	95%	98%	99%
Odpowiedni czas odpowiedzi	τ	$1,6\tau$	$2,3\tau$	$3,0\tau$	$4,0\tau$	$5,0\tau$

Czas odpowiedzi jest krótszy, kiedy ośrodek, w którym jest umieszczony czujnik ma dużą pojemność cieplną, dobrze przewodzi ciepło i kiedy oporność cieplna między ośrodkiem a termoelementem jest mała.

Te warunki mają miejsce, kiedy np. termoelement jest umieszczony w strumieniu ciekłego metalu. Wtedy czas odpowiedzi jest zredukowany do minimum i zależy tylko od rodzaju termoelementu, jego geometrii, współczynników przewodzenia ciepła i pojemności cieplnej płaszczka oraz izolacji.

Czas odpowiedzi termoelementu płaszczkowego będzie mały, kiedy izolacja będzie lepiej *ubita* (lepsza przewodność cieplna), kiedy termoelement ma mniejszą średnicę i kiedy spoina termoelementu jest bliżej płaszczka.

Do pomiaru czasów odpowiedzi w strumieniu gazów służy stanowisko pomiarowe pokazane schematycznie na rys. 2.16.



Rys.2.16. Schemat ideowy urządzenia do wstrzeliwania czujnika pomiarowego w strumień gorącego gazu z przeznaczeniem do określania stałej czasowej.

Do natychmiastowego wprowadzenia termoelementu w strumień gazu (temperatura T_1 około $350 \div 500$ K) służy urządzenie, którego główną częścią jest termoelement umieszczony w niewielkiej rurce, która może być wstrzelona w kanał (przewód) ze strumieniem gorącego gazu. Napięta sprężyna, która podaje rurkę z termoparą do wnętrza kanału jest ustawiona w pozycji "strzał" przez metalowy kotek wciśnięty pomiędzy pierścienie A i B. W tej pozycji inny mały kanał pozwala utrzymywać spoinę termoelementu w strumieniu azotu, którego temperatura jest traktowana jako temperatura otoczenia T_0 . Siła termoelektryczna termoelementu jest poprzez wzmacniacz i przetwornik analogowo-cyfrowy podawana na wejście komputera. Początek pomiaru następuje w momencie zetknięcia się pierścieni A i B. Przebieg krzywej zmian STE jest pokazywany na ekranie monitora oraz zapisywany w pamięci komputera.

2.9. Procedura przeprowadzenia pomiarów

1. Uruchomić układ pomiarowy.
2. Przygotować termoparę do wstrzelenia do strumienia ciepłego powietrza – naciągnąć sprężynę termopary.
3. Uruchomić oprogramowanie DAS-TC Datalogger.
4. Ustawić parametry oprogramowania zgodnie z wytycznymi prowadzącego ćwiczenia laboratoryjne.
5. Uruchomić zapis danych w oprogramowaniu DAS-TC Datalogger jednocześnie wstrzeliwując termoparę.
6. Po zakończeniu pomiaru (około 100 sekund) zapisać i zgrać wyniki do dalszej obróbki.

Co powinno zawierać sprawozdanie z zajęć:

1. Strona tytułowa wraz z numerem i listą grupy, danymi prowadzącego zajęcia.
2. Krótki wstęp teoretyczny na temat termopar – maksymalnie 1 strona.
3. Cel i zakres pomiarów.
4. Opis procedury pomiaru oraz stanowiska pomiarowego.
5. Przedstawione wyniki pomiarów – obliczenia, błędy pomiaru, tabele, wykresy itp.
6. Wnioski – wnioski powinny zawierać uzyskane wyniki oraz komentarz do tych wyników. Opis ewentualnych błędów pomiarowych.