



## POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMoeLEKTRYCZNYMI

Autor: prof. dr hab. inż. Janusz Terpiłowski

---

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

$$V_{AB} = V_B - V_A = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} \quad (2.1)$$

gdzie:  $V_A$  i  $V_B$  oraz  $n_A$  i  $n_B$  oznaczają odpowiednio prace wyjścia i liczby swobodnych elektronów w  $1 \text{ cm}^3$  metali  $A$  i  $B$ ;  $k$  - stała Boltzmanna;  $e$  - ładunek elektronu;  $T$  - temperatura bezwzględna. W zamkniętym obwodzie złożonym z dwu metali (rys.2.1.b) o różnych temperaturach styków  $T_1$  i  $T_2$  siłę termoelektryczną (STE), powstającą na stykach przedstawia wzór

$$E' = V_{AB}(T_1) + V_{BA}(T_2) = \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_B}{n_A} \quad (2.2.a)$$

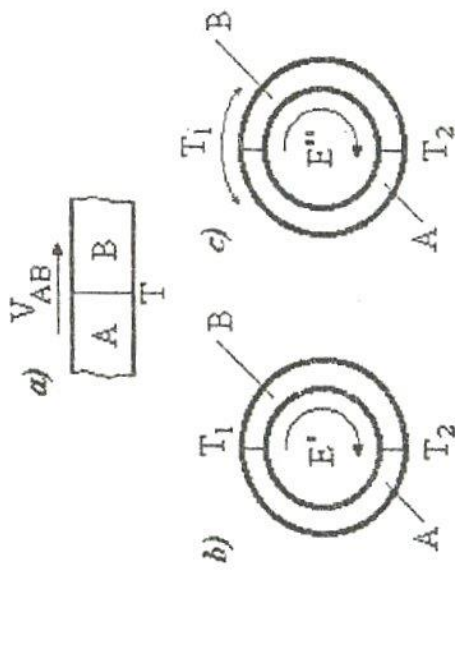
lub

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

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

ĆWICZENIE NR 2

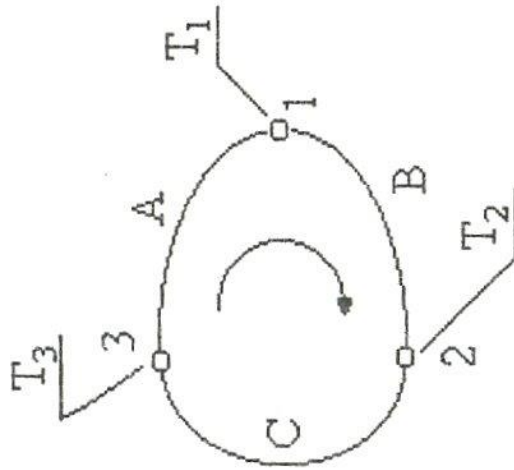
POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMIELEKTRYCZNYMI



Rys. 2.1 Zjawisko termoelektryczne (rysunki pomocnicze):

$$a) \quad V_{AB} = V_B - V_A = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

$$b) \quad E' = \left[ \frac{k}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} \right] (T_1 - T_2) \quad c) \quad E'' = (\sigma_B - \sigma_A) (T_1 - T_2)$$



Rys. 2.2 Obwód termoelektryczny złożony z trzech różnych metali.



## ĆWICZENIE NR 2

## POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMOELEKTRYCZNYMI

powstających wzdłuż gradientu temperatury w jednorodnym przewodniku metalowym.

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

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

przy czym  $\sigma_A$  i  $\sigma_B$  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 wydzielenie 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.

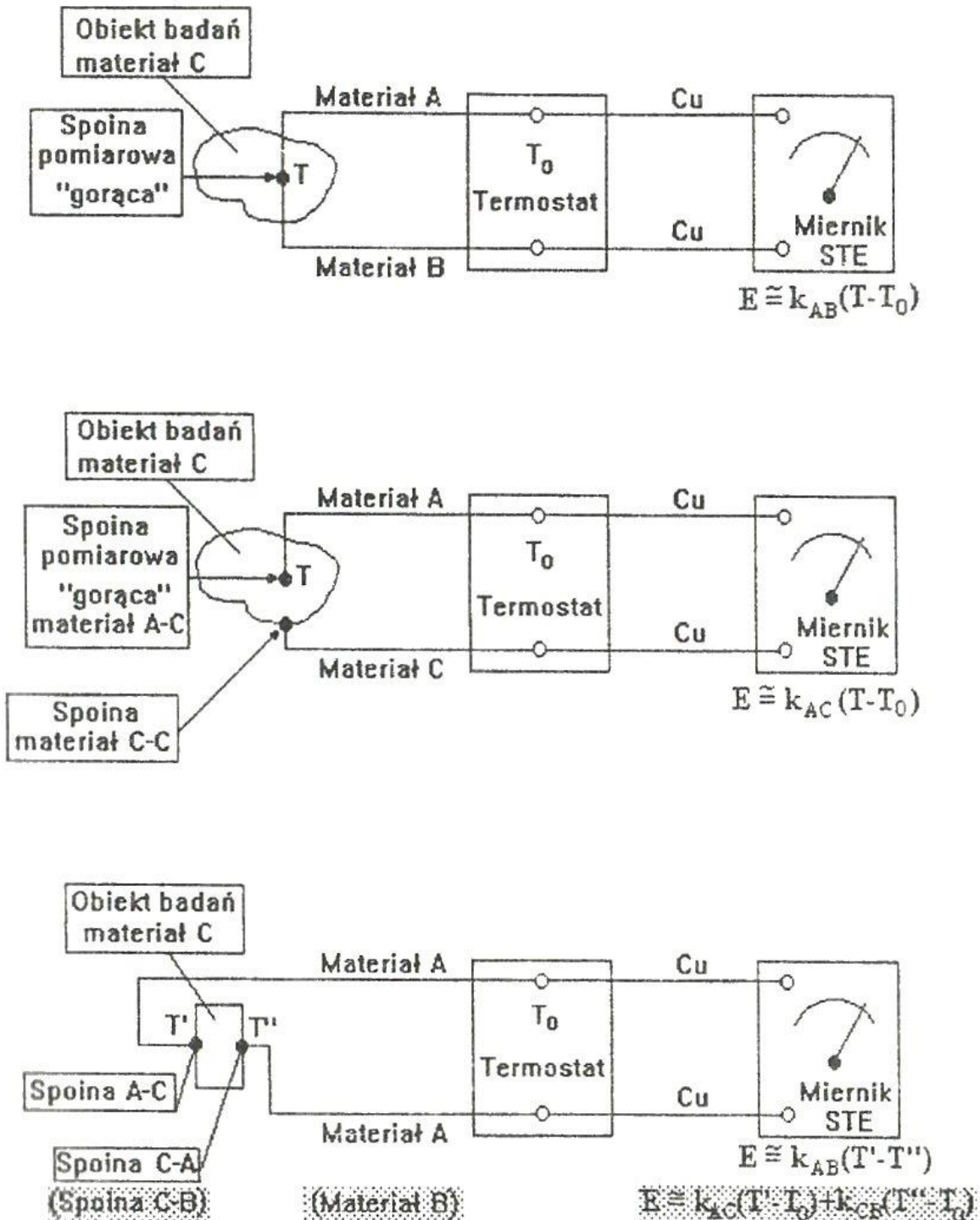
Dla  $T_1 = T_2 = T_3 = T_0$  jest  $E = 0$ , zatem możemy napisać  $-e_{AB}(T_1) = -e_{BC}(T_2) + e_{CA}(T_0)$ . Dla równości temperatury dwóch spoin  $T_1 = T_2 = T_0$ , przy trzeciej temperaturze  $T_1$ , otrzymamy

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

Powyższe rozważanie, w postaci uogólnionej, nosi najczęściej nazwę *"prawa trzeciego metalu"* i jest formułowane w postaci jak niżej.

ĆWICZENIE NR 2

POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMIELEKTRYCZNYMI



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.

## ĆWICZENIE NR 2

## POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMIELEKTRYCZNYMI

Tablica 2.1. Dane podstawowe o najczęściej stosowanych termoelementach

Symbol wg. normy IEC584-1	Typ termoelementu *)	Zakres temperatury	Średnia czułość [ $\mu\text{V/K}$ ]	Zalety i wady
J	Żelazo Konstantan	-210÷+760°C 63÷1033K	55	Najbardziej popularny klasyczny typ termoelementu. Ma stosunkowo dużą czułość w zakresie 100÷470°C. Mała powtarzalność związana z zanieczyszczeniami żelaza.
K	Chromel Ni-Cr10 Alumel Ni-Mn2Al2Si1	-270÷+1372°C 3÷1645K	41	Jest odporny na atmosferę utleniającą. W wyższych temperaturach wrażliwy na związki siarki. Elektroda aluminiowa naogół zużywa się szybciej niż Ni-Cr. Najczęściej aktualnie stosowany termoelement w zakresie do 1000°C, o prawie liniowej charakterystyce.
T	Miedz Konstantan	-270÷+400°C 3÷673K	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÷+1000°C 3:1273K	68	Najczęściej stosowany w niskiej i bardzo niskiej temperaturze. Jest nie-magnetyczny.
S	Platyna PtRh10	-50÷+1767°C 223÷2040K	12	Stanowi wzorzec międzynarodowej skali temperatury w przedziale 630÷1064°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÷+1767°C 223÷2040K	14	Ma własności bardzo zbliżone do termoelementu typu S.
B	Platyna PtRh30 Platyna PtRh6	0÷+1820°C 273÷2093K	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÷+2000°C 273÷2273K	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 polaryzację odpowiednich elektrod.

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 błędu, 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.

Ważne jest również stwierdzenie znane jako "*prawo kolejnych metali*", wyjaśnione na *rys. 2.2*, o brzmieniu jak niżej.

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 (patrz 1.5), pomiaru temperatury i różnicy temperatury (warianty na *rys. 2.3*), itp.

## 2.2. Termoelementy

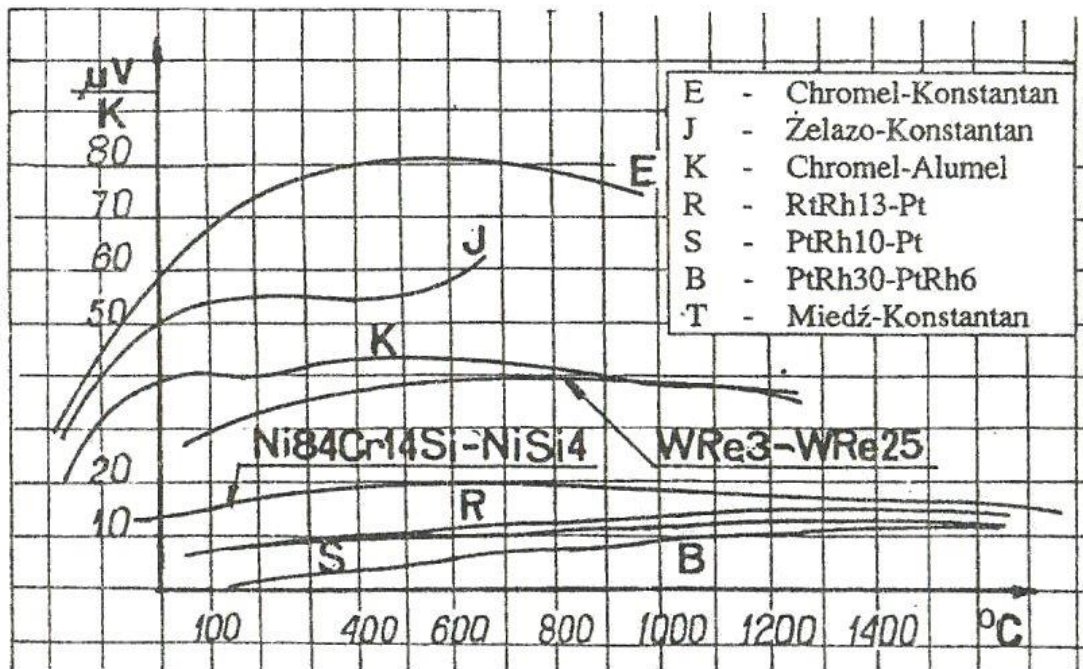
Metale i stopy stosowane do budowy termoelementów powinny odpowiadać następującym wymaganiom: liniowości, powtarzalności i stałości charakterystyki, tj. zależności  $E = f(T - T_0)$ ; dużej czułości, tj. dużej wartości  $\frac{dE}{dT}$ ; odporności na wpływy spotykane w przemyśle w szerokim zakresie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

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

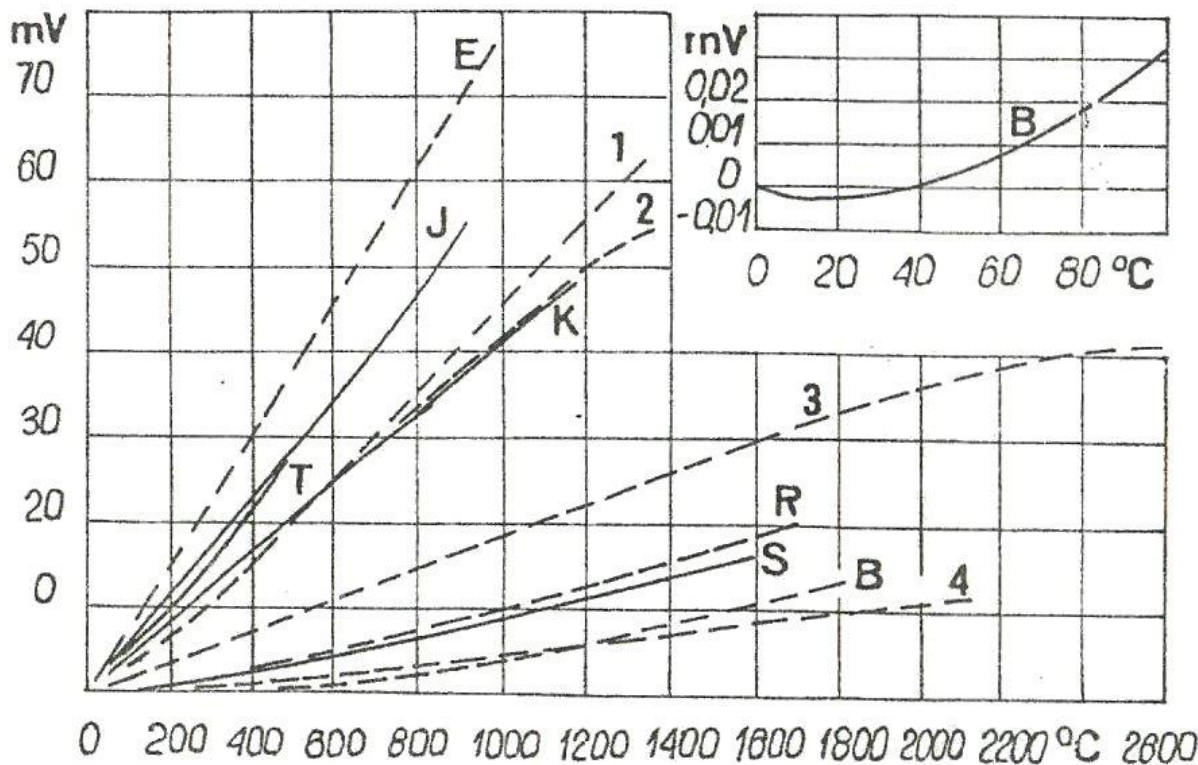
Do pomiaru temperatury w warunkach ekstremalnych stosuje się wiele termoelementów specjalnych. Termoelement PtRh30 - PtRh6 (oznaczany też PtRh18 lub symbolem B w/g normy IEC) nadaje się do pomiaru temperatury do około 1800 °C. Dodatek rodu w drugim ramieniu zmniejsza wpływ dyfuzji rodu. Stopy rodu z renem i irydu z rutem stosowano do około 2000 °C, a stopy wolframu z molibdenem do około 3000 °C. Do pomiaru bardzo niskiej

ĆWICZENIE NR 2

POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMoeLEKTRYCZNYMI



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: B,E,J,K,R,S i T - standardowe symbole termometrów jak na rys.2.3; 1- Pallaplat(PtRh5-AuPd46Pt2),f-my Engelhardt; 3- WRe3-WRe25; 4- IrRh60-Ir.



## ĆWICZENIE NR 2

## POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMIELEKTRYCZNYMI

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  $1 \div 4 \mu\text{V/K}$ ) 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 w/g 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 niemal 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.

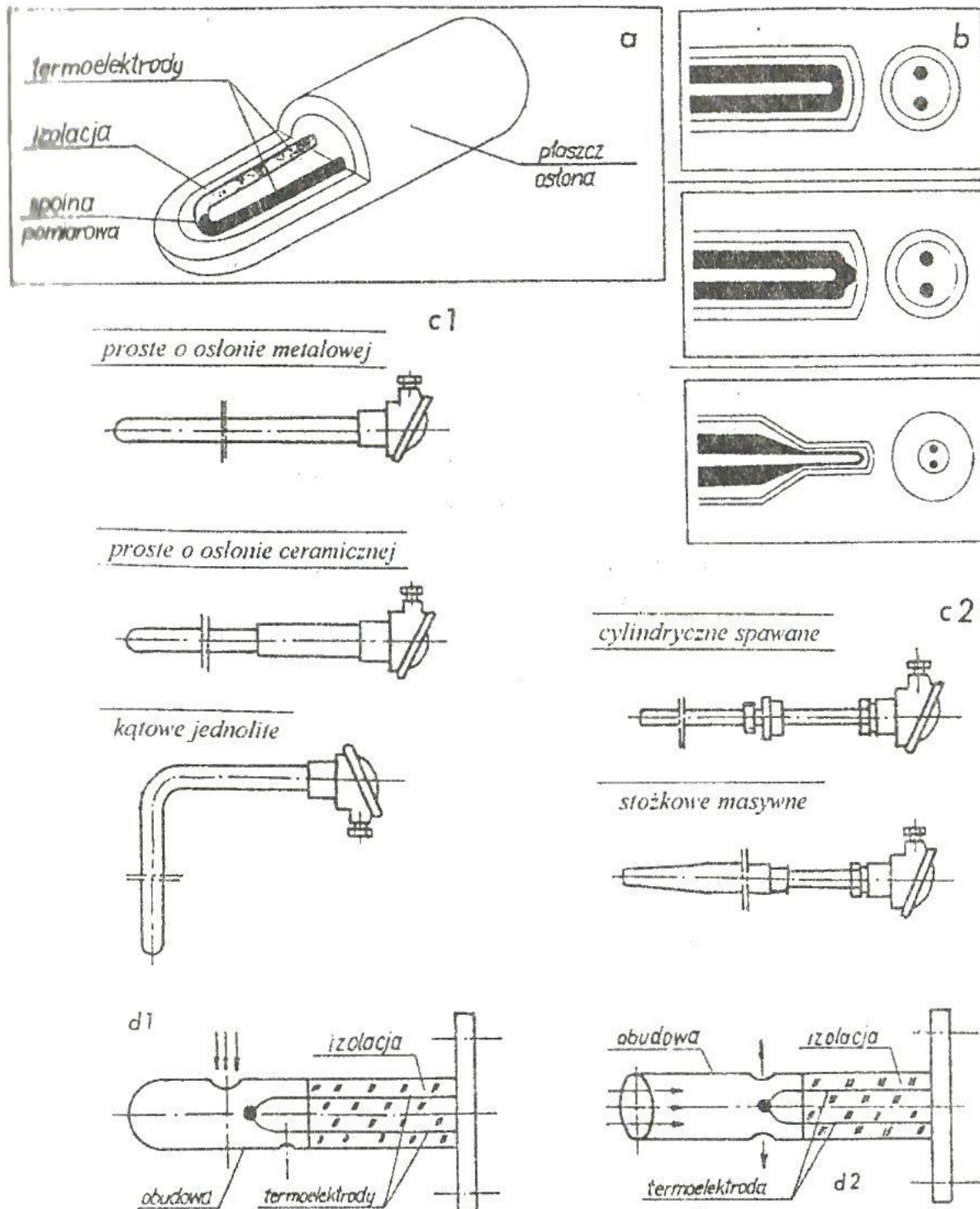
Są to termoelementy w izolacji z czystego tlenku glinu lub magnezu w płaszczu metalowym (*rys. 2.6 a i b*). Wykonuje się je przez przeciąganie z rury o dużej średnicy, zabezpieczonej izolacją ( $MgO$  lub  $Al_2O_3$ ) z umieszczonymi wewnątrz prętami z materiału termoelektrycznego. Osłony wykonuje się z dowolnych materiałów, takich jak stal żaroodporna lub kwasoodporna, stopy termoelektryczne, itd., a dla najwyższej temperatury, tj. powyżej  $1600\text{ }^{\circ}C$  - 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  $10^{11}\ \Omega/m$  i spada do około  $100\ M\Omega/m$  przy  $600\text{ }^{\circ}C$  oraz do  $0.03\ M\Omega/m$  przy  $1000\text{ }^{\circ}C$ . Termoelementy płaszczowe w zakresie temperatury do około  $1000\text{ }^{\circ}C$  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 jednociałkowe lub dwuciałkowe 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

ĆWICZENIE NR 2

POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMIELEKTRYCZNYMI



Rys.2.6 Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne termoelementów: a) termoelement płaszczowy; b) typy komórek pomiarowych termoelementów płaszczowych; 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).

starannie izolowana. Zaniedbanie tego środka ostrożności prowadzi nieraz do znacznych błędów z powodu prądów upływowych.

#### 2.4. Pomiar napięcia termoelektrycznego (STE) termoelementów

Pierwotny sygnał wyjściowy termoelementu, STE będąca nieliniową funkcją różnicy temperatury mierzonej i odniesienia, przetwarza się we 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 nieznacznych odległościach między termoelementami a miernikiem i brakiem źródeł zakłóceń. W ogólności przegląd sposobów pomiaru STE jest zademonstrowany na rys. 1.12.

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

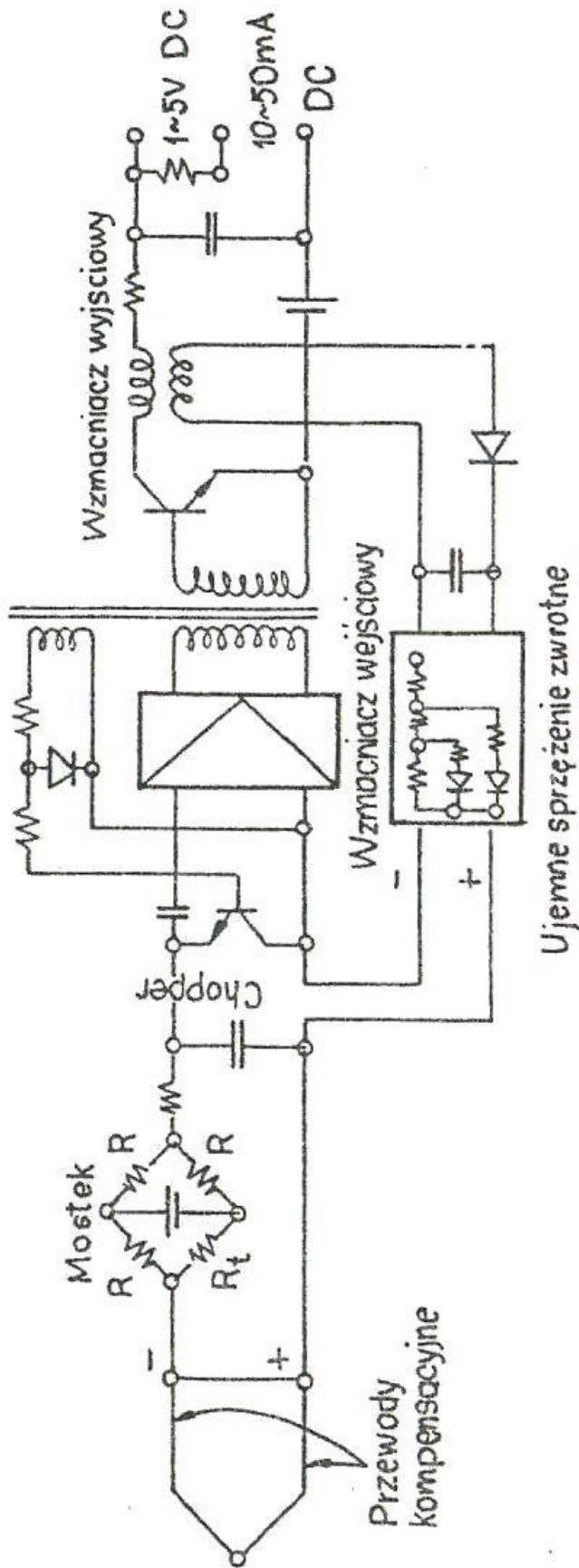
$$\Delta S = \frac{\Delta U}{E_n} = \frac{\Delta R_z}{R_z + R_m}, \quad (2.7)$$

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

Zmiany oporu  $\Delta R_z$  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

ĆWICZENIE NR 2

POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMIELEKTRYCZNYMI



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

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  $10 \div 50$  mA DC i  $1 \div 5$  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 k $\Omega$ , a jego wyjście prądowe nie może być obciążone impedancją większą niż 200  $\Omega$ . 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 %.

### 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)

$$\Delta T_m = \frac{I_g \alpha}{I_g \beta} (T_0 - T_0'), \quad (2.8)$$

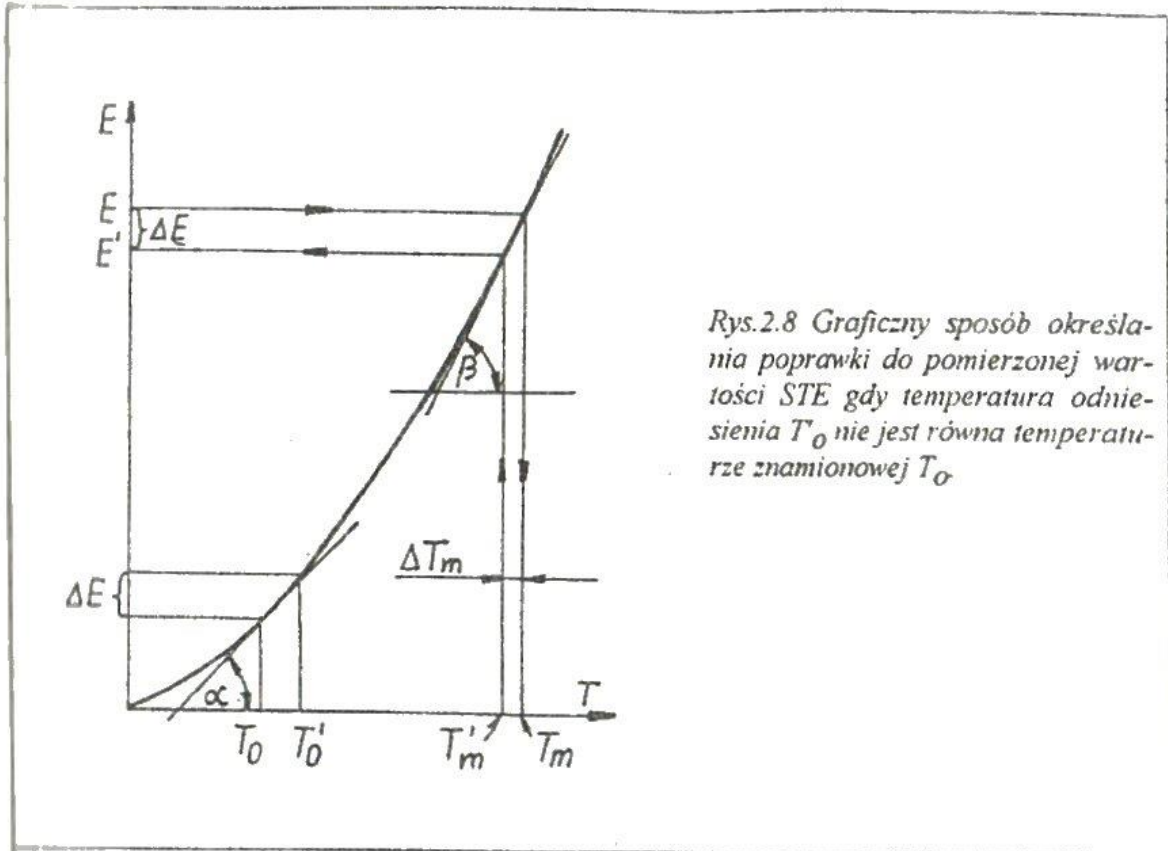
gdzie:  $I_g \alpha = \frac{dE}{dT}$  dla temperatury  $(T_0 + T_0')/2$  oraz  $I_g \beta = \frac{dE}{dT}$  dla temperatury  $T_m + \Delta T_m / 2$ .

Dla prostoliniowej charakterystyki termoelementu zawsze zachodzi  $\Delta T_m = -(T_0 - T_0')$ . Ponieważ w warunkach rzeczywistych temperatura spoiny odniesienia ulega zazwyczaj znacznym wahaniom, zachodzi konieczność kompensacji jej wpływu. Osiągamy to stosując jeden z następujących sposobów:

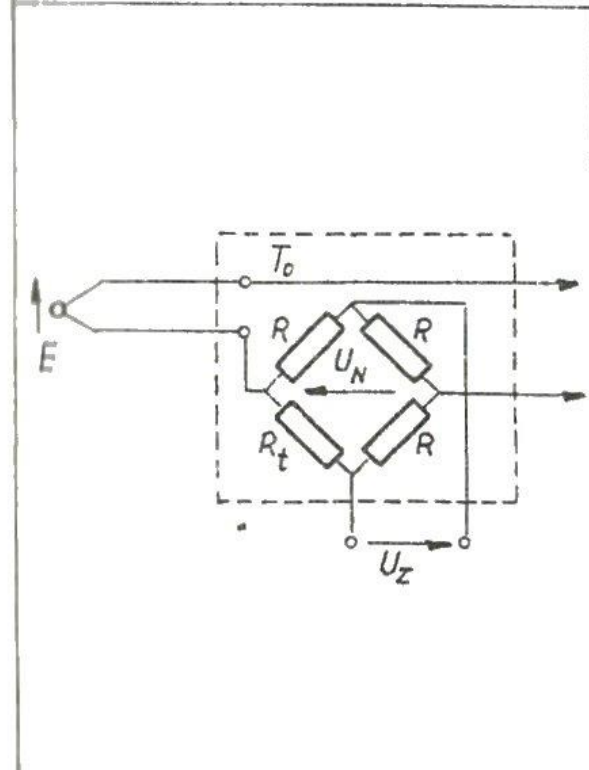
- oddalenie złącza od obiektu do obszaru o niewielkich zmianach temperatury;
- poprzez stabilizację temperatury spoiny złącza odniesienia;
- poprzez dodanie w układzie pomiarowym napięcia odpowiadającego zmianie siły termoelektrycznej  $E = f(T - T_0')$ ;
- poprzez mechaniczne przesunięcie zera miliwoltomierza.

ĆWICZENIE NR 2

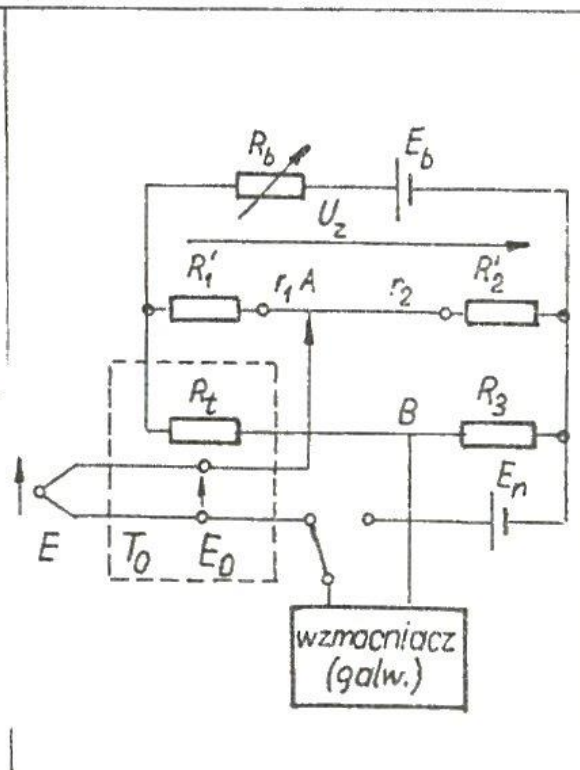
POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMIELEKTRYCZNYMI



Rys.2.8 Graficzny sposób określenia poprawki do pomierzonej wartości STE gdy temperatura odniesienia  $T_0$  nie jest równa temperaturze znamionowej  $T_0$



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



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



## ĆWICZENIE NR 2

## POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMOELEKTRYCZNYMI

Ad. a) Przez zastosowanie przewodów dołączonych do głowiczki 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 naszym klimacie). Dla celów kontrolnych i laboratoryjnych stosuje się do stabilizacji temperatury odniesienia topniejący lód.

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  $\alpha_0$  oznacza temperaturowy współczynnik oporu  $R_0$  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  $\Delta T_0$  i odpowiadającego jej

ĆWICZENIE NR 2

POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMOELEKTRYCZNYMI

$\Delta E$ , 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.

Przypadek B) na rys.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 mierzonej  $T_m$  oraz

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

przy czym  $R_0$  i  $\alpha_0$  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  $E = idem$  oraz  $E_0 = var$  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 wyraz  $\alpha_0 R_0 (T'_0 - T_0)$  jako wielkość małą oraz

przyjęto, że  $r_1 \ll R'_1$  i  $r_2 \ll R'_2$  i że zarówno  $k = \frac{dE_0}{dT}$ , jak i  $\alpha_0$  są liniowe w zakresie zmian temperatury otoczenia. Wzór (2.13) pozwala obliczyć  $\alpha$  (tj. dobrać dla gałęzi  $R_t$  stosunek manganianu do miedzi lub niklu) lub przy określonym  $\alpha$  obliczyć wartość  $R_0$ .

Ad. d) Przy pomiarze siły termoelektrycznej można uzyskać kompensację przez takie przesuwanie mechanicznego zera, aby przy otwartym obwodzie wskazówka



ĆWICZENIE NR 2

POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMOELEKTRYCZNYMI

$\Delta E$ , 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.

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

$$E - E_0 = U_z \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right), \quad (2.11)$$

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

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

przy czym  $R_0$  i  $\alpha_0$  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  $E = idem$  oraz  $E_0 = var$  otrzymuje się, że warunek prawidłowej kompensacji jest następujący

$$\frac{d(E - E_0)}{dT} = U_z \frac{d \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right)}{dT} \quad (2.12)$$

Po wykonaniu działań otrzymujemy

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

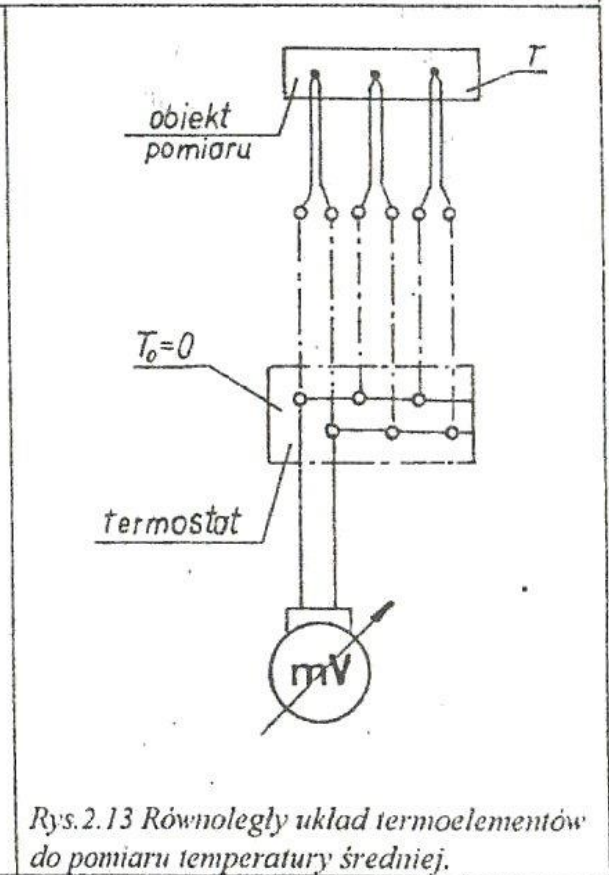
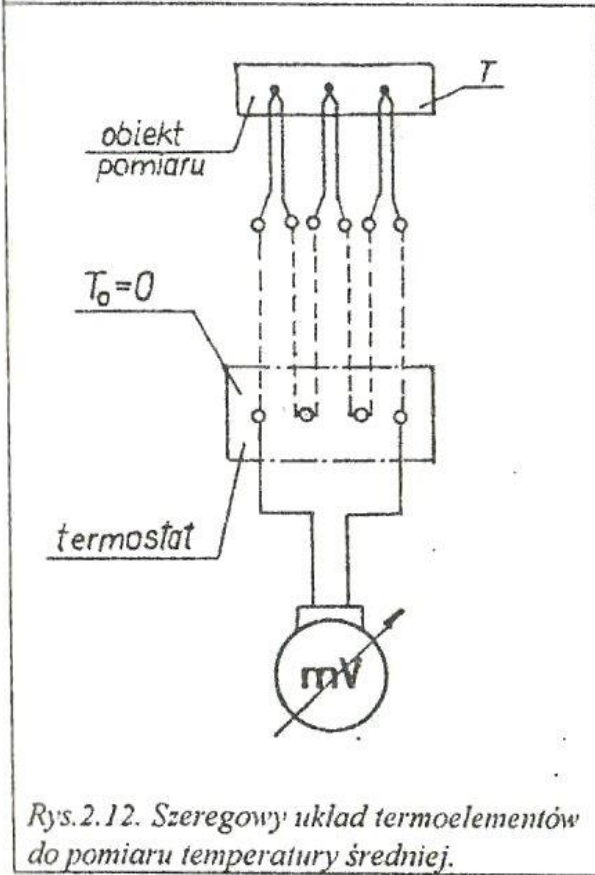
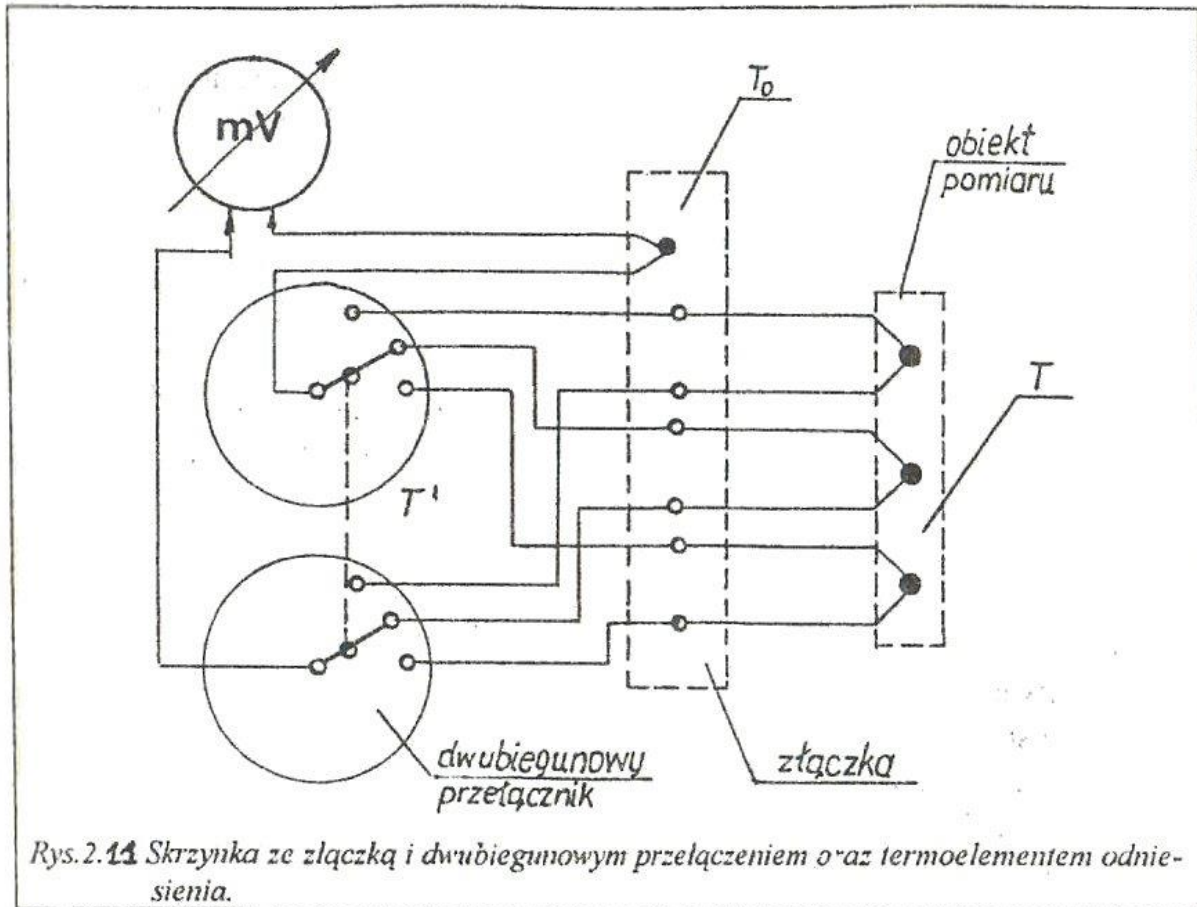
Pominięto tu w mianowniku wyraz  $\alpha_0 R_0 (T'_0 - T_0)$  jako wielkość małą oraz

przyjęto, że  $r_1 \ll R'_1$  i  $r_2 \ll R'_2$  i że zarówno  $k = \frac{dE_0}{dT}$ , jak i  $\alpha_0$  są liniowe w zakresie zmian temperatury otoczenia. Wzór (2.13) pozwala obliczyć  $\alpha$  (tj. dobrać dla gałęzi  $R_4$  stosunek manganianu do miedzi lub niklu) lub przy określonym  $\alpha$  obliczyć wartość  $R_0$ .

Ad. d) Przy pomiarze siły termoelektrycznej można uzyskać kompensację przez takie przesuwanie mechanicznego zera, aby przy otwartym obwodzie wskazówka

ĆWICZENIE NR 2

POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMOELEKTRYCZNYMI





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  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  z tolerancją  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Niekiedy wygodnie jest spiny odniesienia umieszczać w termosie z mieszaniną wody destylowanej z lodem, co zapewnia stałą temperaturę równą  $0^{\circ}\text{C}$ .

### 2.8. Wyznaczanie stałej czasowej termoelementu

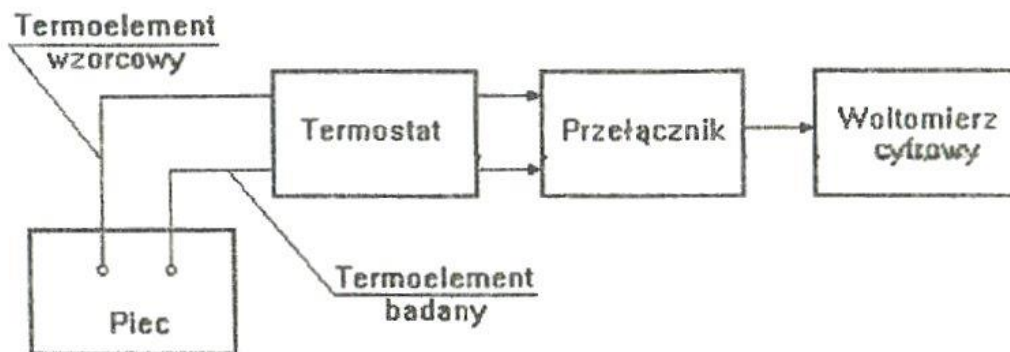
Siła termoelektryczna STE termoelementu  $E(t)$  wyeksponowanego na skokową zmianę temperatury  $\Delta T = T_1 - T_0$ , co pokazano na *rys.2.15*, jest dana funkcją typu

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

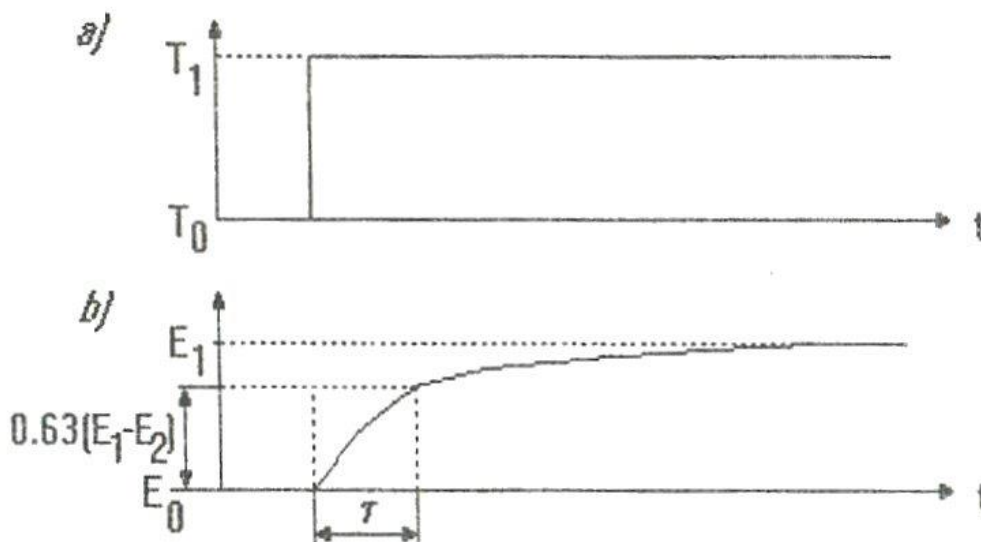
gdzie:  $E_0$  - siła termoelektryczna odpowiadająca temperaturze początkowej  $T_0$ ;  
 $E_1$  - siła termoelektryczna odpowiadająca temperaturze końcowej  $T_1$ ;  
 $t$  - czas;

ĆWICZENIE NR 2

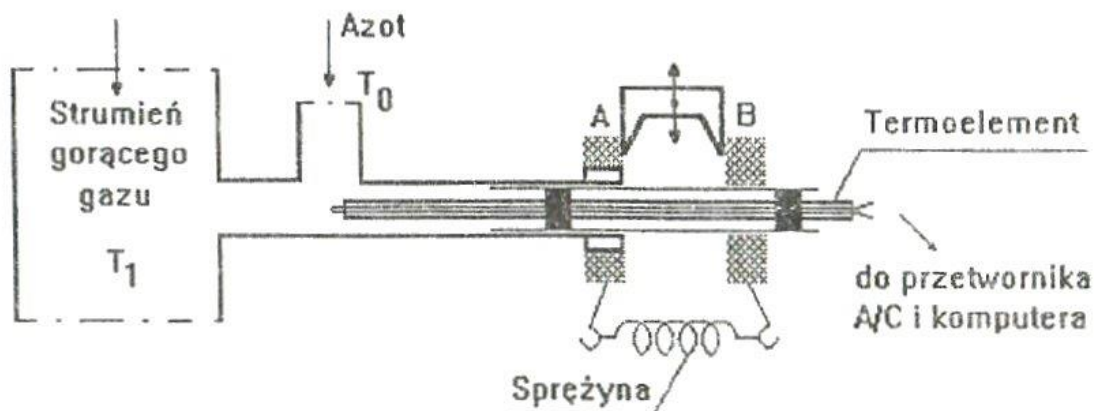
POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMOELEKTRYCZNYMI



Rys.2.14. Schemat ideowy układu do wzorcowania termoelementu.



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



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

ĆWICZENIE NR 2

POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMOELEKTRYCZNYMI

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

$$E(\tau) - E_0 \cong 0.63(E_1 - E_0) \quad (2.15)$$

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

Czas  $\tau$ , 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 %
Odpowiedni czas odpowiedzi	$\tau$	$1.6 \tau$	$2.3 \tau$	$3.0 \tau$	$4.0 \tau$

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 termoclementu płaszczkowego będzie małał 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.

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 kolek wcisnięty 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



## ĆWICZENIE NR 2

## POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMOELEKTRYCZNYMI

zestknięcia się pierścieni A i B. Przebieg krzywej zmian STE jest pokazywany na ekranie monitora oraz zapisywany w pamięci komputera.

## 2.9. Przebieg ćwiczenia

1. Sprawdzić za pomocą magnesu, czy materiały termoelektrod, przeznaczonych do badań termoelementów są materiałami ferromagnetycznymi. Jeżeli tak, to oznakować je. Jednocześnie sprawdzić w tabelicy 2.1, które z termoelektrod są magnetykami.
2. Wykonać wzorcowanie dwóch, dostarczonych przez prowadzącego, termoelementów dla różnych wartości temperatury pieca z przedziału  $300 \div 450$  K. Wyniki pomiarów wpisać do poniższej tabelicy

Numer termoelementu	Siły termoelektryczne termoelementów wzorcowego i badanych w [mV] przy temperaturze pieca w [K]							
	300	320	340	360	380	400	420	440
1								
2								

Wyniki wzorcowania termoelementów przedstawić w postaci wykresu  $E = E(t)$ . Na jego podstawie określić czułości i rodzaje badanych termoelementów.

3. Określić stałą czasową (czas odpowiedzi) dostarczonego przez prowadzącego termoelementu płaszczowego.

W sprawozdaniu należy umieścić:

1. Krótki opis czynności i sposobów związanych z wykonywaniem spoin termoelementów za pomocą zgrzewarki kondensatorowej i naczynia elektrolitycznego.
2. Krótki opis wzorcowania badanych termoelementów i uzyskane wyniki wraz z komentarzem.
3. Ocenę otrzymanych wyników ze względu na aproksymację liniową tych charakterystyk.

## Literatura

- [1] Michalski L. Eckersdorf K. *Pomiary temperatury*. WNT. W-wa 1986.
- [2] Wiśniewski S. *Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych*. WNT. W-wa 1983.

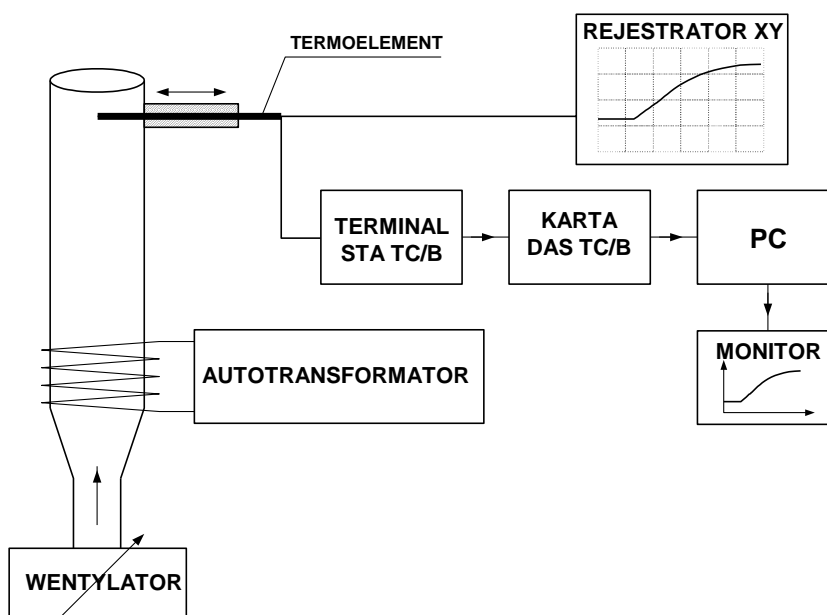
**OPIS WYKONYWANIA ZADAŃ**

Autor: dr inż. Marek Preiskorn

Celem pomiarów jest wyznaczenie przebiegu zmian wartości czasu charakterystycznego  $t_{char}$  dla termoelementów z dwoma rodzajami spoin pomiarowych (odsłoniętej i przyspawanej do obudowy), wstrzeliwanych do ośrodka o zmieniających parametrach.

**PRZEBIEG POMIARÓW**

1. Połączyć (sprawdzić połączenia) elementy aparatury w zestaw wg poniższego schematu:



Rys.1 Schemat blokowy aparatury pomiarowej

2. Poprosić prowadzącego ćwiczenie o weryfikację połączeń zestawionej aparatury. Po uzyskaniu zezwolenia od prowadzącego włączyć zasilanie przyrządów i PC-ta.
3. Za pomocą autotransformatora ustawić wartość napięcia zasilania odkurzacza (pierwsza wartość to 25V). Odczekać ok. 10 minut w celu uzyskania ustalonego stanu cieplnego powietrza w kanale przepływowym.

**Zapis wyników pomiaru za pomocą rejestratora.**

**POMIARY**

Uruchomić zapis na rejestratorze Y-T - uruchomić przesuw taśmy (wcisnąć przycisk CHART) i opuścić pisak na papier rejestratora (wcisnąć przycisk PEN). Wstrzelić termoelement do kanału przepływowego. Prowadzić rejestrację do czasu ustalenia się wartości maksymalnej napięcia. Przerwać



## ĆWICZENIE NR 2

### POMIARY TEMPERTURY TERMOMETRAMI TERMIELEKTRYCZNYMI

zapis (zatrzymać przesuw papieru i podnieść pióro pisaka) i odciągnąć wstrzelony termoelement..

**Zapis za pomocą systemu pomiarowego z kartą DAS TC/B.** Program pomiarowy LOGGER służy do konfigurowania procesu pomiaru oraz pomiaru i wyświetlania mierzonych wartości temperatury w trybie on line. Wyniki pomiarów, w postaci zbioru, są zapisywane w katalogu **c:\pomiary**.

#### KONFIGURACJA

Kliknąć na ikonę DAS TC na pulpicie W98. Kliknąć na przycisk **CONTINUE** okna DAS TC HELP. W kolejnym oknie dotyczącym zbioru konfiguracyjnego nacisnąć **OK**. Po krótkiej chwili pojawi się główne okno konfiguratora - DAS TC DATALOGGER.

W lewym górnym rogu jest okno SETUP. Wprowadzić nastawy:

- SCAN ORDER – położenie QUEUE
- LOGGING – położenie ENABLE – pojawi się pytanie o nazwę zbioru wynikowego. Ustawić katalog C:\POMIARY\ i dopisać 8-znakową nazwę zbioru związaną z grupą. np. c:\pomiary\A21a-1. Kliknąć OK.
- LOG SCAN – wprowadzić liczbę 120 (120 pomiarów zapisanych do zbioru),
- W polu POS kanałów pomiarowych najechać i kliknąć na cyfrze 1 przy kanale pomiarowym (pierwsza kolumna) - spowoduje to usunięcie z kolejki mierzenia wszystkich kanałów poza wybranym pierwszym podłączonym do przewodu kompensacyjnego 0.

#### POMIARY

Nacisnąć START w polu ACQUISITION. Program zaczyna przemiatać co 1 sekundę wybrany kanał pomiarowy a wartości zmierzone są wyświetlane w postaci przebiegu kolorowej linii na ekranie monitora a wartości liczbowe w okienku obok numeru kanału.

Nacisnąć przycisk START w polu LOG (zapis do określonego wcześniej pliku). W polu Log jest pokazywany aktualny numer zapisanego rekordu.

Po upływie 10 cykli pomiarowych wstrzelić termoparę. Po osiągnięciu liczby 120 cykli pomiarów zapis zakończy się automatycznie.

Nacisnąć STOP w polu ACQUISITION oraz przycisk EXIT kończąc działanie Loggera.

Wysunąć termoparę z przestrzeni pomiarowej.

4. Czynności punktu 3 dotyczące pomiarów powtórzyć kolejno dla wartości napięcia zasilania odkurzacza 30V i 45V (Wartość napięcia ustawić suwakiem autotransformatora oznaczonym literą C).





**UWAGA** – zapis pomiaru za pomocą systemu komputerowego wymaga nadania nowej, oryginalnej nazwy zbioru wynikowego dla każdego nowego pomiaru. W wyniku pomiarów uzyskuje się trzy krzywe przebiegu zmian temperatury w funkcji czasu zarejestrowane na papierze i trzy zbiory w katalogu pomiarów.

5. (Opcjonalnie) Zmienić termoelement na drugi, z innym typem spoiny pomiarowej. Czynności opisane w punktach 3 - 4 wykonać dla nowego termoelementu.

## OPRACOWANIE WYNIKÓW

### A. OPRACOWANIE WYNIKÓW UZYSKANYCH Z REJESTRATORA Y-T.

Przykład przebiegu zmian temperatury zarejestrowanego na rejestratorze Y-T i sposób wyznaczania wielkości charakterystycznych dla przebiegu pokazano na rysunku 2.

Dla każdej zarejestrowanej krzywej pomiarowej obliczyć czas charakterystyczny  $t_{char}$  trzema sposobami na podstawie wyznaczonego czasu  $t_{0,632}$ ,  $t_{0,5}$ , i  $t_{0,9}$ . Czasy  $t_{0,632}$ ,  $t_{0,5}$ , i  $t_{0,9}$  odpowiadają czasom osiągnięcia przez krzywą przebiegu wartości odpowiednio  $0,632 \cdot \theta_{max}$ ,  $0,5 \cdot \theta_{max}$ ,  $0,9 \cdot \theta_{max}$ .  $\theta_{max}$  to wartość maksymalnego przyrostu temperatury wyrażona w milimetrach na rysunku przebiegu krzywej na papierze z rejestratora..

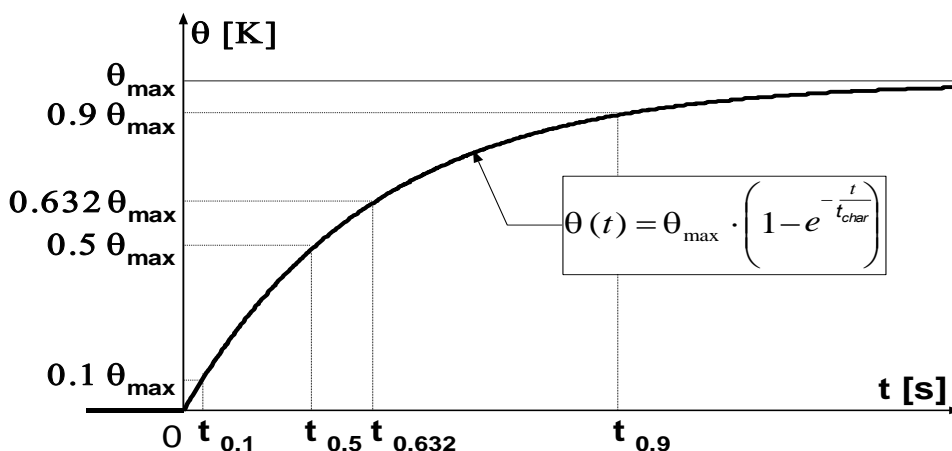
6. Na rysunku przebiegu zmian temperatury zmierzyć wartość  $\theta_{max}$  (wyrazić w mm). Obliczyć (wyrazić również w mm) wartości  $0,632 \cdot \theta_{max}$ ,  $0,5 \cdot \theta_{max}$ ,  $0,9 \cdot \theta_{max}$  i zaznaczyć je na rysunku. Wyznaczyć i obliczyć czasy osiągnięcia przez krzywą zaznaczonych, podanych

7. wyżej wartości  $\theta$  – będą to czasy odpowiednio  $t_{0,632}$ ,  $t_{0,5}$  i  $t_{0,9}$ . Prędkość przesuwu taśmy rejestratora wynosi 5 mm/s .

8. Obliczyć wartości czasu charakterystycznego przebiegu dla wyznaczonych trzech wartości czasów stosując zależności:

- $t_{char1(i)} = t_{0,632}$
- $t_{char2(i)} = t_{0,5} \cdot 1,443$
- $t_{char3(i)} = t_{0,9} \cdot 0,434$

Wyznaczyć średnią wartość czasu charakterystycznego  $t_{char(i)}$  dla danego przebiegu.



Rys.2. Przebieg zmian temperatury z zaznaczonymi charakterystycznymi parametrami

**Czynności z punktów 6 - 7 powtórzyć dla wszystkich zarejestrowanych przebiegów.**

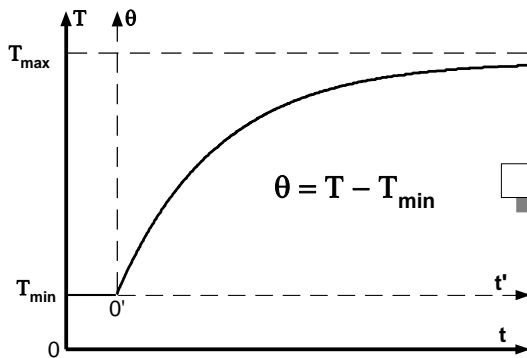
### B. OPRACOWANIE WYNIKÓW UZYSKANYCH Z SYSTEMU KOMPUTEROWEGO

9. Zbiór wyników pomiarów jest zapisany jako zbiór tekstowy. Należy wczytać go do EXCELA. Pomiąć kilkanaście pierwszych wierszy zbioru pozostawiając wyłącznie wiersze ze zmierzonymi wartościami temperatury
10. Określić minimalną  $T_{\min}$  i maksymalną  $T_{\max}$  wartość temperatury. Od zmierzonych wartości  $T$  odjąć wartość minimalną  $T_{\min}$  oraz przesunąć początek skali czasu do początku narastania krzywej przebiegu (pomiąć czas  $t_{\min}$  przed wstrzeleniem termoelementu). Uzyskuje się w ten sposób przejście od wyników przedstawionych na rysunku 3a (układ osi  $t - T$ ) do wyników z rysunku 3b (układ osi  $t' - \Theta$ ) przy czym  $t' = t - t_{\min}$ ,  $\Theta = T - T_{\min}$ .
11. Kolejnym etapem jest zastosowanie programu Curvexpert do obliczenia czasu charakterystycznego badanego przebiegu. Z danych pomiarowych odrzucamy wartości mniejsze niż  $0,7 \Theta_{\max}$ . Pozostałe liczby wprowadzamy jako dane do programu Curvexpert. Wprowadzamy własną postać równania aproksymującego krzywą pomiarową

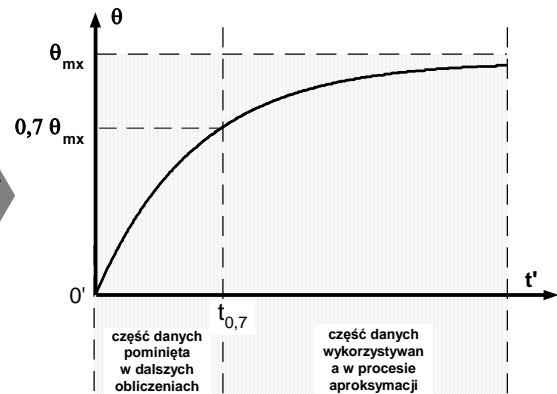
$$y = Ae^{\frac{t}{B}} + C$$

gdzie: A,B,C stałe obliczane w procesie aproksymacji,  
B – szukany czas charakterystyczny przebiegu.

Proces obliczeń ma charakter iteracyjny, należy podać wartości zerowego przybliżenia dla stałych A, B, C. Przykładowe wartości: A= , B= , C= .



Rys. 3a



Rys. 3b

Przebiegi zmian temperatury a) pierwotny, b) po zmianie układu współrzędnych.

**Czynności z punktów 8 - 10 powtórzyć dla wszystkich zarejestrowanych przebiegów.**

### SPRAWOZDANIE

W sprawozdaniu przedstawić tablice czasów charakterystycznych badanego termoelementu dla trzech wartości napięć zasilania odkurzacza oraz sporządzić odpowiedni wykres w Excelu.