



## PRZEGLĄD PODSTAWOWYCH METOD I TECHNIK POMIARU TEMPERATURY

Autor – prof. dr hab. inż. Janusz Terpiłowski

---

Temperatura jest jedną z podstawowych wielkości charakteryzujących stan fizyczny materii. Jej wartość, obok wartości na przykład ciśnienia, jest miarą "jakości" materii i z tego powodu jest ona wykorzystywana jako, między innymi, jeden z głównych parametrów kontrolnych poprawności pracy maszyn cieplnych oraz przebiegu poszczególnych etapów procesów technologicznych w przemyśle.

Z reguły, każdy pomiar temperatury stanowi problem sam w sobie i wymaga indywidualnego rozwiązania, a zadanie jest typu optymalizacyjnego ze względu na z góry narzucone warunki przeprowadzenia pomiaru, techniczne możliwości jego realizacji oraz koszty.

Poprawne przeprowadzenie pomiaru temperatury wymaga gruntownych wiadomości z zagadnień wymiany ciepła, wiedzy o metodach i technikach pomiaru temperatury oraz rodzajach i właściwościach termometrów. Poniżej podano podstawowe wiadomości dotyczące, przede wszystkim, termometrii, natomiast zagadnienia wymiany ciepła zostały jedynie uwzględnione w zakresie niezbędnym do określenia błędów pomiaru temperatury.

### 1.1. Temperatura i skala temperatury

Pojęcie "temperatura", wbrew pozorom, nie jest pojęciem oczywistym i wymaga ścisłej definicji. Tym bardziej, że w literaturze dość często jest ona powiązana z przymiotnikiem, na przykład: temperatura empiryczna, temperatura absolutna, temperatura spiętrzenia (całkowita), temperatura spoczynkowa, temperatura rotacyjna, temperatura wibracyjna, temperatura translacyjna, temperatura elektronowa, temperatura promieniowania, itd.

Od współczesnego inżyniera, żyjącego w epoce atomu, komputerów i lotów kosmicznych, wymaga się aby swobodnie identyfikował te pojęcia w konkretnych sytuacjach, nawet w przypadku kiedy przy określaniu temperatury brakuje przymiotnika (tzn. wiedział o jaką chodzi temperaturę). Dla porządku pojęcia te zostaną poniżej zdefiniowane.



Temperatura empiryczna - jest to wielkość termodynamiczna, charakteryzująca stan równowagi termodynamicznej układu makroskopowego. Jest ona jednakowa dla wszystkich części układu izolowanego, znajdującego się w stanie równowagi termodynamicznej. Prawdziwe jest również twierdzenie: po to, by dwa układy termiczne jednorodne były w równowadze diatermicznej, potrzeba i wystarcza, by ich temperatury empiryczne były równe. Przepis pozwalający wyrazić temperaturę empiryczną przez inne parametry nazywa się równaniem stanu. Dla gazu doskonałego może ono mieć postać  $\Theta = pV/mR$ ,  $\Theta = \ln pV/mR$  lub jeszcze bardziej skomplikowaną. Dla cieczy praktycznie równania stanu dotychczas nie udało się sformułować. Równanie Van der Waalsa jedynie w sposób jakościowy pozwala ocenić stan cieczy poniżej punktu krytycznego. Dla ciała stałego równanie stanu wyraża zależność modułu sprężystości w prawie Hooke'a od temperatury i ciśnienia, na przykład zależność modułu Younga od tych wielkości  $E = f(\Theta, p)$ . Równanie stanu dla promieniowania stanowi prawo Plancka. Zatem postać równania stanu zależy od przyjętej skali temperatury, tj. od wyboru funkcji  $\Theta$ . Gdy ustalimy równanie stanu dla jednego układu, możemy wyznaczyć  $\Theta$  dla tego układu z pomiaru innych parametrów wchodzących do równania stanu.

Temperatura bezwzględna (absolutna) - jest to temperatura wyrażona w skali, której zerem jest temperatura niższa o 273.16 K od temperatury punktu potrójnego wody. Parametry punktu potrójnego substancji (rys.1.2) jest oskładnikowej są niezmiennicze.

Temperatura spoczynkowa - jest to temperatura poruszającego się z prędkością w płynie, mierzona przez obserwatora poruszającego się w płynie z taką samą prędkością i w tym samym kierunku. Innymi słowy, obserwator jest nieruchomy w stosunku do płynu. Praktyczny sposób pomiaru temperatury spoczynkowej  $T$  pokazano na rys.1.1.

Temperatura spiętrzenia (całkowita) - jest to temperatura poruszającego się z prędkością w płynie, mierzona bezpośrednio po jego wyhamowaniu do prędkości  $w = 0$  oraz przy założeniu, że objętość płynu, w której mierzy się temperaturę, stanowi układ adiabatyczno-izentropowy i nie jest w nim wykonywana praca efektywna. Jeżeli przez  $T$  oznaczymy temperaturę spoczynkową płynu, a przez  $c_p$  jego ciepło właściwe, wtedy temperatura spiętrzenia  $T_c = T_0$  jest równa

$$T_c = T_0 = T + \frac{w^2}{2c_p} \quad (1.1)$$

Z zależności (1.1) wynika, że temperatura spiętrzenia jest większa od temperatury spoczynkowej ( $w=0$ ) o przyrost  $\Delta T$  wywołany zmianą energii



kinetycznej płynu ( $mw^2/2$ ) w ciepło ( $mc_p\Delta T$ ) przy jego wyhamowaniu do prędkości równej zero, w warunkach jak wyżej. Praktyczny sposób pomiaru temperatury spoczynkowej pokazano na *rys. 1.1*.

Przykładowo: powietrze ( $c_p \cong 1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ) o temperaturze spoczynkowej  $T = 300 \text{ K}$ , poruszające się z prędkością  $3600 \text{ km/h}$  ma temperaturę spiętrzenia

$$T_c = T + \frac{w^2}{2c_p} = 300 \text{ K} + \frac{(1000 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})} = 300 \text{ K} + 500 \text{ K} = 800 \text{ K}$$

i taką temperaturę należy podstawić do prawa Newtona

$$\dot{q} = \alpha (T_p - T_{sc}) \quad (1.2)$$

w miejsce  $T_p$  ( $= T_c = 800 \text{ K}$ ) przy obliczaniu gęstości konwekcyjnego strumienia ciepła  $\dot{q}$ , wymienianego między płynem o temperaturze  $T_p$  a ustawioną prostopadle do kierunku przepływu ścianką o temperaturze  $T_{sc}$ . Gdyby ścianka była ustawiona równolegle do kierunku przepływu wtedy należy w (1.2) podstawić  $T_p = T = 300 \text{ K}$ . Dla innych wariantów konfiguracji kierunku przepływu i położenia ścianki temperaturę  $T_p$  oblicza się z zależności (1.1), podstawiając zamiast  $w$  wartość jej składowej normalnej w stosunku do powierzchni ścianki.

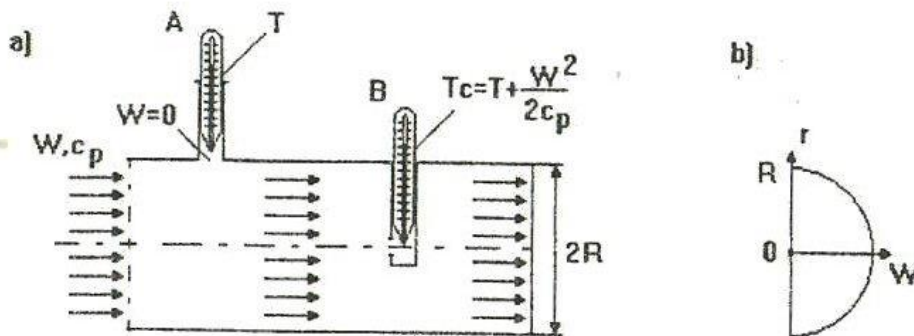
Temperatura promieniowania - wielkość umowna, charakteryzująca całkowitą panchromatyczną intensywność strumienia promieniowania danego ciała. Mierząc całkowitą panchromatyczną intensywność strumienia promieniowania ciała traktujemy je jako ciało czarne. Temperaturę promieniowania danego ciała obliczamy z prawa Stefana - Boltzmana.

Temperatura elektronowa i sieci - w stanie równowagi termodynamicznej są one takie same, natomiast są one różne w stanach nierównowagowych. Taka sytuacja zachodzi gdy stała czasowa dojścia do równowagi podukładu elektronowego ciała jest dużo mniejsza od stałej czasowej ustalania się równowagi pomiędzy elektronami a siecią. W praktyce tego typu efekty obserwuje się w metalach i półprzewodnikach poddanych impulsowym zmianom warunku brzegowego (np. strzał z lasera w powierzchnię).

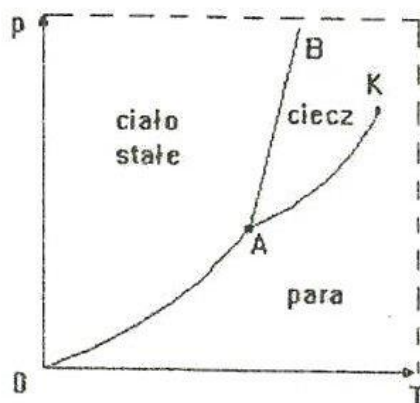
Temperatura rotacyjna, wibracyjna, translacyjna - są to umowne temperatury związane z poszczególnymi stopniami swobody cząstki, np. w układzie gazowym.

Obserwacje zmian objętości gazów i cieczy pod wpływem temperatury były podstawą pierwszych definicji skali temperatury. Następnym krokiem w tym

ĆWICZENIE NR 1



Rys.1.1 Rysunek ilustrujący: a) sposób pomiaru temperatury spoczynkowej (termometr A) i spiętrzenia (termometr B) płynu; b) rozkład prędkości płynu w funkcji promienia.



Rys.1.2 Wykres stanu układów jednoskładnikowych:

OA - krzywa sublimacji;  
 AK - krzywa wrzenia;  
 AB - krzywa topnienia;  
 A - punkt potrójny (równowaga fazy stałej, ciekłej i gazowej);  
 K - punkt krytyczny (koniec równowagi ciecz - para).

| Substancja       | Punkt potrójny A |        | Punkt krytyczny K |        |
|------------------|------------------|--------|-------------------|--------|
|                  | p [kPa]          | T [K]  | p [MPa]           | T [K]  |
| CO <sub>2</sub>  | 518              | 216.65 | 7.33              | 304.15 |
| H <sub>2</sub> O | 0,610.7          | 273.16 | 22.13             | 647.30 |



kierunku było przyjęcie, na mocy Uchwały Międzynarodowego Komitetu Miar i Wag w Paryżu, wodoru jako ciała termometrycznego, którego zmiany ciśnienia przy stałej objętości były podstawą do określenia nowej skali temperatury. Przedziałem podstawowym tej skali był przedział między temperaturą równowagi układu "woda - lód" i układu "woda - para wodna" w temperaturze wrzenia, przy ciśnieniu jednej atmosfery fizycznej. Przedział między obu temperaturami podzielono na 100 równych części, przypisując pierwszej z nich wartość liczbową równą 0. Skalę tą nazwano skalą Celsjusza. Taki stan trwał do 1948 roku. Następnie kolejne uchwały międzynarodowych organizacji, jakimi są Generalna Konferencja Miar i Wag oraz Międzynarodowy Komitet Miar i Wag, ustaliły zasady najnowszej skali temperatury, nazwanej Międzynarodową Praktyczną Skalą Temperatury z 1968 roku, w skrócie MPST-68.

Podstawą MPST-68 jest skala termodynamiczna, zdefiniowana zerem absolutnym oraz jednym punktem termometrycznym. Jako punkt termometryczny przyjęto temperaturę równowagi wody w stanie gazowym, ciekłym i stałym, tj. punkt potrójny wody i przypisano mu wartość 273.16 K (*rys. 1.2*). Symbol K oznacza kelwin - co jest nową jednostką temperatury termodynamicznej. Jako symbol ogólny temperatury w skali termodynamicznej przyjęto literę T.

MPST-68 definiuje również skalę Celsjusza na podstawie skali termodynamicznej, przy czym między temperaturą wyrażoną w stopniach Celsjusza ( $^{\circ}\text{C}$ ), a temperaturą termodynamiczną w kelwinach istnieje relacja

$$t[^{\circ}\text{C}] = T[\text{K}] - 273.15 \quad (1.3)$$

Oznacza to, że położenie punktu 0  $^{\circ}\text{C}$  nie uległo zmianie, tj. odpowiada jak poprzednio punktowi równowagi wody w stanie ciekłym i stałym. Natomiast w skali Celsjusza temperatura punktu potrójnego wody wynosi 0.01  $^{\circ}\text{C}$ .

Przyjętą za podstawę MPST-68 skalę termodynamiczną odtwarzano poprzednio za pomocą termometrów gazowych, oraz dla wyższej temperatury na podstawie prawa promieniowania Plancka. Porównanie obu zasad odtwarzania - gazowego i promienistego - jest obecnie możliwe w szerokim zakresie temperatury, od 1000 K do około 1500 K. Również dzięki postępowi w dziedzinie technologii, elektroniki oraz konstrukcji aparatury pomiarowej nastąpiło znaczne zawężenie niepewności skali temperatury, zwłaszcza w pobliżu zera absolutnego oraz przy wysokich temperaturach. Miarą postępu jest fakt, że niepewność, z jaką jest obecnie określony punkt krzepnięcia złota, wynosi  $\pm 0.01$  K, podczas gdy w 1948 roku wynosiła ona jeszcze  $\pm 1$  K. Oprócz tego skalę znacznie rozszerzono w kierunku niskiej temperatury, ustalając pięć nowych punktów stałych poniżej temperatury wrzenia tlenu. Stało się to niezbędne, ale i



## ĆWICZENIE NR 1

możliwe, dzięki rozwojowi techniki niskich temperatur i na jej rosnące zastosowanie w nauce i przemyśle.

Skala temperatury MPST-68 była w chwili jej przyjęcia najlepszym, osiągalnym przybliżeniem do teoretycznej skali termodynamicznej. Skala MPST-68 jest określona definicyjnymi punktami stałymi, odpowiadającymi temperaturom równowagi stanów skupienia wybranych substancji w ściśle sprecyzowanych warunkach oraz zasadami interpolacji temperatury pośredniej. Definicyjne punkty stałe MPST-68 zestawiono w *tablicy 1.1*.

Do odtworzenia dowolnej temperatury w całym zakresie MPST-68 przyjęto trzy zasady pomiaru temperatury, zapewniające najwyższą powtarzalność:

1. Termometr oporowy platynowy dla temperatury od 13.81 do 903.89 K;
2. Termometr termoelektryczny PtRh-Pt dla przedziału temperatury od 903.89 do 1064.43 K;
3. Pirometr monochromatyczny lub odpowiadające mu urządzenie do pomiaru gęstości strumienia promieniowania, przy czym temperaturę z przedziału powyżej 1064.43 K określa się według wzoru

$$\frac{M_{\lambda}(T)}{M_{\lambda}(T_{Au})} = \frac{\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1}{\exp \frac{C_2}{\lambda T_{Au}} - 1} \quad (1.4)$$

gdzie:  $M_{\lambda}(T)$  i  $M_{\lambda}(T_{Au})$  oznaczają odpowiednio monochromatyczne gęstości strumienia promieniowania emitowanego przez ciało czarne w temperaturze  $T$  i w temperaturze krzepnięcia złota, a stała  $C_2 = 14\,388 \mu m \cdot K$ .

Określono również wymagania co do aparatury pomiarowej, funkcyjnych zależności między rezyystancją wzorcowego termometru oporowego oraz STE termoelementu PtRh-Pt a temperaturą służącą do obliczania wyników oraz szczegóły procedury pomiarowej.

Najnowsze tendencje dotyczące modernizacji MPST-68 zmierzają w kierunku: uzyskania większej zgodności z termodynamiczną skalą temperatury; rozszerzenia skali temperatury w dół, do około 0.5 K; zastąpienia termoelementu przez wysokotemperaturowy platynowy termometr oporowy i zastąpienia punktów wrzenia poprzez punkty potrójne, za wyjątkiem helu.

Ponieważ w praktyce przemysłowej można spotkać termometry wyskaiowane w stopniach Celsjusza, Kelwina, Farenheita i Rankina, w *tablicy 1.2* zestawiono podstawowe dane dotyczące tych skal temperatury w stosunku do skali Celsjusza.



ĆWICZENIE NR 1

Tablica 1.1  
Definicyjne punkty stałe  
Międzynarodowej Praktycznej Skali Temperatury MPST-68

| Lp. | Rodzaj punktu<br>(stan równowagi)                                    | Temperatura<br>[K] | Temperatura<br>[°C] |
|-----|--|--------------------|---------------------|
| 1.  | Punkt potrójny wodoru  | 13.81              | -259.34             |
| 2.  | Punkt równowagi fazy ciekłej i pary wodoru przy ciśnieniu 33330.6 Pa | 17.042             | -256.108            |
| 3.  | Punkt wrzenia wodoru *)  | 20.28              | -252.87             |
| 4.  | Punkt wrzenia neonu *)   | 27.102             | -246.048            |
| 5.  | Punkt potrójny tlenu   | 54.361             | -218.789            |
| 6.  | Punkt wrzenia tlenu *)   | 90.188             | -182.962            |
| 7.  | Punkt potrójny wody  | 273.16             | 0.01                |
| 8.  | Punkt wrzenia wody *)  | 373.15             | 100                 |
| 9.  | Punkt krzepnięcia cynku  | 692.73             | 419.58              |
| 10. | Punkt krzepnięcia srebra   | 1235.08            | 961.93              |
| 11. | Punkt krzepnięcia złota  | 1337.58            | 1064.43             |
| -   | Punkt krzepnięcia antymonu **)                                       | 903.89             | 630.74              |

\*) przy ciśnieniu  $p_n = 101325 \text{ Pa}$ ;

\*\*\*)punkt pomocniczy, dzieli zakres interpolacji termometrem rezystancyjnym od interpolacji termoelementem;

Tablica 1.2  
Podstawowe dane dotyczące skal temperatury

| Rodzaj punktu termometrycznego                       | Skala Celsjusza  | Skala Kelwina | Skala Farenheita | Skala Rankina |
|--|--|---------------|------------------|---------------|
| Zero bezwzględne                                     | 273.15 °C  | 0 K           | -459.67 °F       | 0 °R          |
| Punkt krzepnięcia wody ( $p_n = 101325 \text{ Pa}$ ) | 0 °C   | 273.15 K      | 32 °F            | 491.67 °R     |
| Punkt wrzenia wody ( $p_n = 101325 \text{ Pa}$ )     | 100 °C   | 373.15 K      | 212 °F           | 671.67 °R     |
| Wzory transformacyjne:                               | $T \text{ [K]} = t \text{ [°C]} + 273.15$<br>$t \text{ [°C]} = 5/9 (t \text{ [°F]} - 32)$<br>$t \text{ [°F]} = t \text{ [°R]} - 459.6$ |               |                  |               |



## 1.2. Uwagi ogólne o metodach i technikach pomiaru temperatury

Metody pomiaru temperatury ciał stałych, cieczy i gazów można podzielić na stykowe i bezstykowe.

Stykowe metody pomiaru temperatury charakteryzują się tym, że czujnik bezpośrednio styka się z badanym ośrodkiem, którego temperaturę należy określić (ciało stałe, ciecz, gaz).

Bezstykowe metody pomiaru temperatury charakteryzują się tym, że ośrodek, którego temperaturę należy określić nie styka się z czujnikiem temperatury, a czujnik reaguje na wartość intensywności promieniowania temperaturowego emitowanego przez badany ośrodek. Wartość tego promieniowania jest zależna od temperatury ośrodka.

Inny podział metod pomiaru temperatury opiera się na wyróżnieniu rodzaju efektu podlegającego zmianie ze zmianą temperatury i związanego z czujnikiem temperatury lub badanym ośrodkiem. Na przykład, jeżeli temperaturę mierzy się termoelementem (czujnik) to napięcie termoelektryczne czujnika jest zależne od temperatury. Jeżeli temperaturę mierzy się termistorem to wraz z temperaturą zmienia się jego rezystancja.

Jeszcze inny podział metod pomiaru może być dokonany ze względu na to czy ciało, którego temperaturę należy określić jest nieruchome, czy też znajduje się w ruchu. Czy pomiar dotyczy ustalonej w czasie temperatury, czy też nieustalonej.

Możliwości różnych metod pomiaru temperatury powierzchni ciał stałych, z uwzględnieniem przedstawionego powyżej podziału, zebrano i zestawiono w *tablicy 1.3*, natomiast w *tablicy 1.4* przedstawiono podstawowe czujniki stosowane najczęściej do pomiaru temperatury, zasadę ich działania oraz zakres stosowalności.

W niniejszym opracowaniu, ze względu na ograniczoną jego objętość, niesposób było dokładnie przedstawić wszystkie wymienione w *tablicach 1.3* i *1.4* metody i techniki pomiaru temperatury. W zasadzie ograniczono się jedynie do, w miarę dokładnego opisu zasady działania, rozwiązań konstrukcyjnych i aplikacji termometrów termoelektrycznych i rezystancyjnych (rozdziały 2 i 3). Z tego względu, poniżej, w bardzo zwięzłej formie, przedstawiono metody opisane w rozdziałach 2 i 3, natomiast nieco więcej miejsca poświęcono przybliżeniu czytelnikowi pozostałych metod i technik pomiaru temperatury.

Metoda związana z wykorzystaniem efektu termoelektrycznego. Polega na pomiarze siły termoelektrycznej STE (napięcia termoelektrycznego), która powstaje między dwoma różnymi metalami, ze spoinami w różnej temperaturze. Różnicowa STE zmienia się wraz ze zmianą temperatury obu spoin.





## ĆWICZENIE NR 1

Metoda związana z wykorzystaniem zmiany rezystancji elektrycznej materiału w funkcji temperatury. Polega na pomiarze rezystancji elektrycznej czujnika temperatury, umieszczonego w miejscu (punkt, powierzchnia, objętość), którego temperaturę należy określić.

Metoda związana z wykorzystaniem zmiany gęstości strumienia promieniowania termicznego z powierzchni w funkcji temperatury. Polega na pomiarze natężenia promieniowania całkowitego, monochromatycznego, określonego pasma lub pasm promieniowania. Kolosalną zaletą tej metody, we wszystkich jej odmianach, jest to, że pomiar jest bezstykowy. Zatem unika się kłopotliwych obliczeń wartości błędu związanego z zaburzeniem pola temperatury badanego obiektu przez czujnik w miejscu jego instalacji. Obiekt, którego temperatura powierzchni jest określana może zmieniać położenie w stosunku do detektora od pojedynczych centymetrów do kilku metrów. Natomiast największą wadą, poza kilkoma wyjątkami, jest to, że mierzona temperatura jest zazwyczaj obciążona błędem zależnym od wartości emisyjności badanej powierzchni. Generalnie pirometry są wzorcowane w oparciu o promieniowanie ciała czarnego ( $\varepsilon = 1$ ), natomiast powierzchnia badanego obiektu ma zwykle  $\varepsilon < 1$ , a zatem temperatura rejestrowana przez tak wywzorcowany miernik jest zaniżona. Emisyjność jest parametrem termofizycznym, który w warunkach rzeczywistych może zmieniać się w dosyć dużych granicach. Jego wartość zależy od wartości temperatury, od intensywności korozji powierzchni, od czystości powierzchni (np. obecność smaru), itd. Czasem, celem wyeliminowania błędu pomiaru związanego z wpływem nieznannej lub znanej zgrubnie wartości emisyjności powierzchni zaleca się pokrycie jej sadzą. Jednakże należy sobie zdawać sprawę, że jest to zabieg sztuczny, który wprawdzie eliminuje błąd związany z wpływem nieznannej wartości emisyjności, ale z drugiej strony powoduje zmianę gęstości strumienia ciepła wymienianego przez promieniowanie z otoczeniem, a zatem rzeczywista temperatura powierzchni ciała będzie w tym przypadku niższa niż przed pokryciem jej sadzą. W przypadku, kiedy w rachubę wchodzi jedynie kontrola temperatury procesu technologicznego, tj. utrzymanie jej stałej wartości, znajomość emisyjności nie jest istotna.

Również ośrodek między badaną powierzchnią a detektorem musi być w zasadzie przezroczysty dla pasma (pasem) promieniowania podlegającego (podlegających) pomiarowi. Zatem niedopuszczalnym jest aby badana powierzchnia była zanurzona w cieczy, a nawet pokryta filmem cieczowym. Detektor musi być tak zlokalizowany aby "widział" badaną powierzchnię bezpośrednio lub przez okienko (np. powierzchnia tłoka w silniku spalinowym). W przypadku zastosowania okienka należy uwzględnić absorpcję promieniowania przez materiał okienka.

Tablica 1.3 Metody i techniki stosowane do pomiaru temperatury powierzchni ciał stałych

| Wielkość fizyczna podlegająca zmianie w zależności od zmiany temperatury i technika pomiaru | Temperaturowy zakres pomiaru [K] | Dokładność [%] | Lokalizacja czujnika |   |   |   |   |   | Zastosowania | Literatura |                |
|---|----------------------------------|----------------|----------------------|---|---|---|---|---|--------------|------------|----------------|
|   |                                  |                |                      |   |   |   |   |   |              |            |                |
| <b>SILA TERMOELEKTRYCZNA (STE)</b>  |                                  |                |                      |   |   |   |   |   |              |            |                |
| - dwa przewody z różnych metali   |                                  |                | +                    | + | + | + | + | + | +            | +          | [1,2,3,4,5,6,] |
| - jeden przewód + ciało jako drugi materiał   |                                  |                | +                    | + | + | - | + | + | +            | +          |                |
| - cienka warstwa metalu (1 materiał) naniesiona na powierzchnię ciała (2 materiał)          | 70 ÷ 1900                        | 1              | -                    | + | - | - | + | + | +            | +          |                |
| - dwa ciała z różnych metali stykające się ze sobą  |                                  |                | -                    | - | - | - | - | - | -            | -          |                |
| <b>REZYSTANCJA ELEKTRYCZNA</b>  |                                  |                |                      |   |   |   |   |   |              |            |                |
| - trójwymiarowa cewka   | 30 ÷ 870                         | 1              | -                    | + | + | + | + | + | +            | +          | [1,2,3,4,6]    |
| - dwuwymiarowa siatka, cewka lub taśma  | 30 ÷ 870                         | 1              | +                    | + | + | - | + | + | +            | +          |                |
| - jednowymiarowy przewód  | 30 ÷ 870                         | 1              | -                    | + | + | - | + | + | +            | +          |                |
| - termistor (w kształcie kulistym itp.)   | 250 ÷ 870                        | -              | +                    | + | + | - | + | + | +            | +          |                |



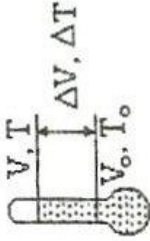
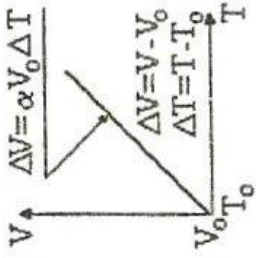
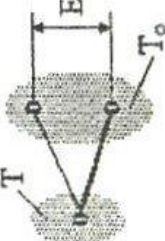
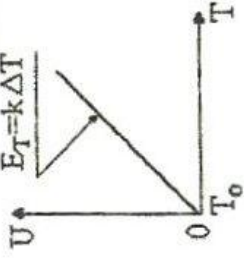

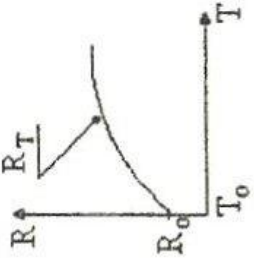
| PROMIENIOWANIE TERMICZNE   |            |      |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--|------------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - porównanie jasności optycznych grzanego odniesienia z powierzchnią obiektu | 320 ÷ 2270 | 1+2  | - | - | - | - | - | + | + | + |
| - pomiar całkowitego promieniowania emitowanego lub w paśmie                 | 290 ÷ 4270 | 1+2  | - | - | - | - | - | + | + | + |
| - pomiar emitowanego promieniowania podczerwonego                            | > 370      | 1+2  | - | - | - | - | - | + | + | + |
| - pirometr odbiciowy   | > 570      | 1+2  | + | - | - | - | - | + | + | + |
| - pirometr dwubarwowy  | 470 ÷ 4270 | 1+2  | - | - | - | - | - | + | + | + |
| - termowizja   | 250 ÷ 1900 | -    | - | - | - | - | - | + | + | + |
| <b>INNE TECHNIKI</b>   |            |      |   |   |   |   |   |   |   |   |
| - rozszerzalność termiczna (termometr dylatacyjny, bimetali)                 | 400 ÷ 1200 | 2    | + | - | + | - | + | + | - | - |
| - częstotliwość rezonansowa kryształu piezokwarcu                            | 190 ÷ 520  | 0.01 | + | - | + | - | + | + | - | - |
| - kredki (nagła zmiana koloru substancji w znanej temperaturze)              | 340 ÷ 940  | 2    | + | + | - | + | + | + | - | + |
| - farby (nagła zmiana koloru substancji w znanej temperaturze)               | 310 ÷ 1620 | 2    | + | + | - | + | + | + | - | + |
| - wskaźniki topikowe (zmiana koloru substancji po stopieniu się)             | 330 ÷ 1700 | 1    | + | + | - | + | + | + | - | + |

[1,2,3,4,7,8]


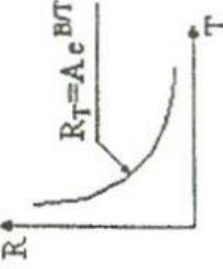

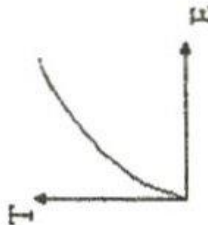

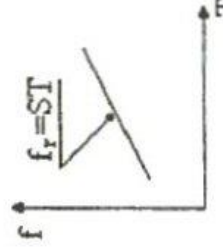
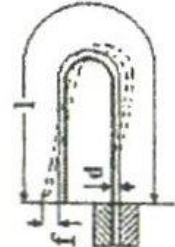
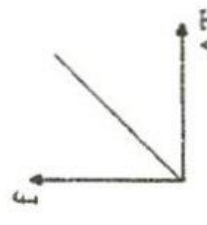
[1,2,3,4]

ĆWICZENIE NR 1

Tablica 1.4 Podstawowe dane techniczne czujników najczęściej stosowanych do pomiaru temperatury.

| Lp. | Typ detektora temperatury  | Symbol detektora i typowy zakres mierzonyj temperatury  | Wielkość wyjściowa z detektora i jej związek z temperaturą   | Charakterystyka statyczna detektora   |
|-----|--|---|--|---|
| 1   | Szklany, napełniony cieczą termometryczną (rtęć, alkohol, pentan, eter...) |  <p>73 ÷ 273 K<br/>-200 ÷ 500 °C</p>                 | <p>Zmiana <math>\Delta V</math> cieczy termometrycznej</p> $\Delta V = \alpha V_0 \Delta T$ <p><math>\alpha</math> - pozorny współczynnik rozszerzalności objętościowej cieczy;<br/> <math>V</math> - objętość zbiornika termometru;<br/> <math>\Delta T</math> - zmiana temperatury cieczy.</p> |    |
| 2   | Termoelement   |  <p>150 ÷ 1900 K<br/>-123 ÷ 1627 °C</p>              | <p>Siła termoelektryczna <math>E_T</math> termoelementu</p> $E_T = k(T - T_0) = k\Delta T$ <p><math>k</math> - współczynnik materiałowy;<br/> <math>T</math> - temperatura spoiny pomiarowej;<br/> <math>T_0</math> - temperatura spoin odniesienia.</p>   |   |
| 3   | Opornik termometryczny metalowy (platyna, miedź, nikiel...)                |  <p>Pt100</p> <p>50 ÷ 1100 K<br/>-223 ÷ 827 °C</p> | <p>Rezystancja <math>R_T</math> opornika termometrycznego w temperaturze <math>T</math></p> $R_T = R_0 (1 + AT + BT^2)$ <p><math>R_0</math> - rezystancja opornika w temperaturze <math>T_0</math>;<br/> <math>A, B</math> - stałe wzorcowania opornika.</p>                                     |  |

ĆWICZENIE NR 1

|   |   |   |  |   |
|---|---|---|--|---|
| 4 | <p>Opornik termometryczny półprzewodnikowy (termistor)</p>  |  <p>193 ÷ 573 K<br/>-80 ÷ 300 °C</p>   | <p>Rezystancja <math>R_T</math> termistora w temperaturze <math>T</math></p> $R_T = A \exp(B/T)$ <p>A - rezystancja termistora dla <math>T = \infty</math>;<br/>B - stała zależna od materiału termistora.</p> |    |
| 5 | <p>Fotoelement (fotoogniwo, fotodioda o jedynym złączu)</p> |  <p>323 ÷ 2273 K<br/>-80 ÷ 300 °C</p>  | <p>Prąd I w obwodzie fotodiody</p> $I = kE$ $E = f(T)$ <p>k - współczynnik zależny od materiału i konstrukcji fotodiody;<br/>E - natężenie oświetlenia fotodiody;<br/>T - temperatura obiektu badanego.</p>    |    |
| 6 | <p>Rezonator kwarcowy</p>                                   |  <p>263 ÷ 328 K<br/>-10 ÷ 55 °C</p>    | <p>Częstotliwość rezonansowa <math>f_r</math> rezonatora</p> $f_r = ST$ <p>S - stały współczynnik;<br/>T - temperatura rezonatora.</p>   |   |
| 7 | <p>Bimetal</p>  |  <p>473 ÷ 673 K<br/>200 ÷ 400 °C</p> | <p>Przesunięcie f bimetalu</p> $f = 10^{-4} K \frac{l^2}{2d} \Delta T$ <p>K - ugięcie właściwe [K<sup>-1</sup>];<br/><math>\Delta T</math> - różnica temperatury [K];<br/>l, d - wymiary w [mm].</p>           |  |

## ĆWICZENIE NR 1

Tablica 1.5 Własności i dane techniczne pirometrów.

| Typ pirometru          | Obszar pomiarowy [K] | Dokładność  | Czas war- tości 1) 98% [s] | Współczyn- nik odleg- łościowy 2) | Współpraca z regulato- rem lub rejestra- torem | Zdolność emisyjna ciała badanego |  |
|------------------------|----------------------|-------------|----------------------------|-----------------------------------|--|----------------------------------|--|
|                        |                      |             |                            |                                   |  | wpływ na wskazania               | obliczanie poprawek                        |
| <b>Radiacyjne</b>      |                      |             |                            |                                   |  |                                  |  |
| 1. Soczewkowe          |                      |             |                            |                                   |  |                                  |  |
| a) soczewka szklana    | 970 ÷ 2270           | ±15 ÷ ±25 K | 0.5 ÷ 2                    | 7 ÷ 20 (50)                       | możliwa  | duży                             | możliwe lecz mało dokładne                 |
| b) soczewka kwarcowa   | 670 ÷ 1470           |             | 5                          |                                   |  |                                  | nie wymagane dla powierzchni niemetalowych |
| c) soczewka z fluoru   | 320 ÷ 870            |             | 0.5 ÷ 2                    |                                   |  |                                  | możliwe lecz nie stosowane                 |
| 2. Ze światłowo- dem   | 970 ÷ 2270           |             | 2 ÷ 5                      | 7 ÷ 20 (40)                       |  | duży                             | nie wymagane dla powierzchni niemetalowych |
| 3. Zwierciadło- we     | -230 ÷ +870          | ±2 %        |                            |                                   |  |                                  |  |
| <b>Fotoelektryczne</b> |                      |             |                            |                                   |  |                                  |  |
| 1. Monochroma- tyczne  | 320 ÷ 270            | ±2 ÷ 1.5 %  | 0.001 <sup>3)</sup>        | 20 ÷ 300                          | możliwa  | niewielki                        | możliwe lecz rzadko stosowane              |
| 2. Pasmowe             |                      |             |                            |                                   |  | średni                           | nie stosowane                              |

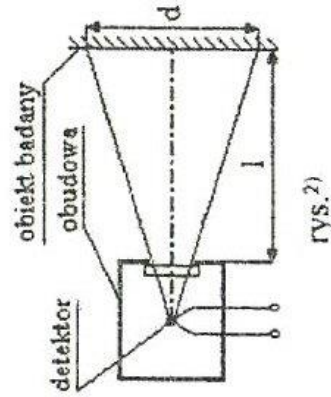
ĆWICZENIE NR 1

| Monochromatyczne z zanikającym włóknem |                           |            |                     |                             |            |   |                          |
|--|---------------------------|------------|---------------------|-----------------------------|------------|---|--------------------------|
| Monochromatyczne z zanikającym włóknem | 970 ÷ 1770<br>1670 ÷ 2270 | ±6 ÷ 15 K  | -                   | 130<br>(mikropirometr 5000) | niemożliwa | duży, nieco mniejszy niż w radiacyjnych                         | stosowane, dość dokładne |
| <b>Dwubarwowe</b>                      |                           |            |                     |                             |            |   |                          |
| 1. Ręcznie regulowane                  | 970 ÷ 2470                | ±10 K      | -                   | 20 ÷ 50                     | niemożliwa | nie istnieje dla ciał szarych; pomijalny dla ciał rzeczywistych | nie jest wymagane        |
| 2. Samoczynne elektryczne              |                           |            | 0.001 <sup>3)</sup> |                             | możliwa    |   |                          |
| 3. Samoczynne elektromechaniczne       | 1070 ÷ 2470               | ±1 ÷ 1.5 % | -                   |                             |            |   |                          |

1) Czas wartości 98 % jest to czas, po którym wskazania pirometru osiągają 98 % wartości odpowiadającej stanowi ustalonemu, przy założeniu że sygnał wejściowy (wymuszenie) ma postać skoku jednostkowego  $1(t)$ .

2) Współczynnik odległościowy jest to stosunek odległości  $l$  przedniej krawędzi lunety pirometru od powierzchni badanej do minimalnej wymaganej średnicy powierzchni ciała badanego  $d$  (rys. 2).

3) Wartości nie uwzględniające bezwładności miernika.



rys. 2)

## ĆWICZENIE NR 1

Zależnie od zasady działania rozróżnia się: pirometry radiacyjne, monochromatyczne z zanikającym włóknem, fotoelektryczne i dwubarwowe.

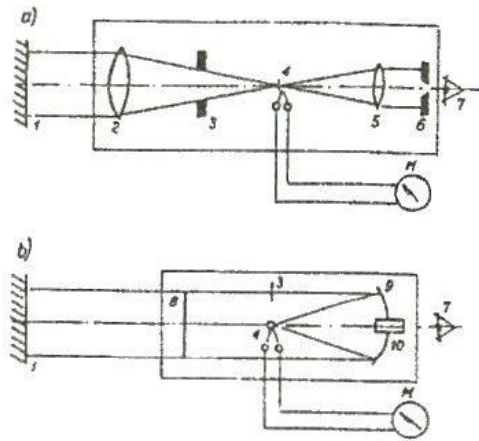
Podstawowe dane techniczne dotyczące własności i możliwości metrologicznych pirometrów przedstawiono w *tablicy 1.5*.

*Pirometr radiacyjny (rys.1.3)* - jest to pirometr całkowitego promieniowania. Jego działanie polega na zogniskowaniu (soczewka, lustro) na detektorze promieniowania panchromatycznego (w całym zakresie widmowym) emitowanego przez powierzchnię badanego obiektu. Aktualnie, w większości przypadków, jako detektor promieniowania stosuje się termostos (zminiaturyzowane połączenie szeregowo kilku lub kilkunastu termoelementów). W różnych wersjach pirometry radiacyjne umożliwiają pomiar temperatury w przedziale  $230 \div 2270$  K z dokładnością  $\pm (15 \div 20)$  K. Są one stosowane, między innymi, do ciągłych pomiarów temperatury powierzchni ciał stałych (mogą być w ruchu), dużych objętości gazów, powierzchni wewnętrznych komór spalania silników (okienko).

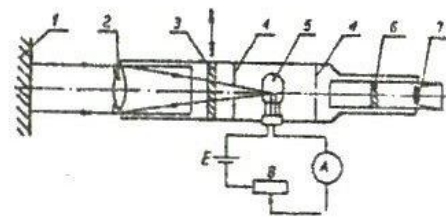
*Pirometr monochromatyczny z zanikającym włóknem (rys.1.4)* - jego zasada działania polega na porównaniu okiem luminacji świetlnej powierzchni ciała badanego z luminacją włókna żarówki pirometrycznej, która jest regulowana poprzez regulowany rezystor sterujący natężeniem przepływu prądu przez włókno. Prąd reguluje się dotąd aż pozornie zniknie obraz włókna żarówki na tle powierzchni ciała badanego. Włączony w obwód żarówki amperomierz jest wywzorcowany w jednostkach temperatury. Typowy zakres stosowalności wynosi  $970 \div 2270$  K z dokładnością  $\pm (5 \div 15)$  K. Ma coraz mniejsze zastosowanie z powodu subiektywności pomiaru. Ze względu na obsługę ręczną nie nadaje się do stosowania w układach automatycznych.

*Pirometr fotoelektryczny (pasmowy)* - wykorzystuje się w nim zależność uśrednionej gęstości strumienia promieniowania w paśmie, którego zakres jest narzucony przez charakterystykę widma detektora, od temperatury. Typowymi czujnikami promieniowania w pirometrach pasmowych są fotorezystory wykonane z PbS, CdS, PbTe i PbSe oraz fotodiody germanowe lub krzemowe, elementy fotoemisyjne lub fotowoltaiczne. Zakres długości fal, na który reaguje detektor nazywa się pasmem pracy pirometru, np. dla fotodetektora z PbS wynosi ono  $0.4 \div 4.7$   $\mu\text{m}$ , a dla fotodiody germanowej  $0.4 \div 1.7$   $\mu\text{m}$ . Typowe rozwiązania metrologiczne tego typu pirometrów (*rys.1.5*) zawierają przetwornik elektryczny lub modulator strumienia promieniowania. Niektóre wersje handlowe pirometrów są zaopatrzone w układ pamięciowy, umożliwiający zapamiętanie wartości maksymalnej temperatury. Typowy zakres pomiarowy pirometru

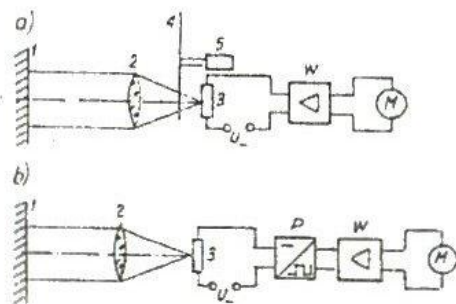




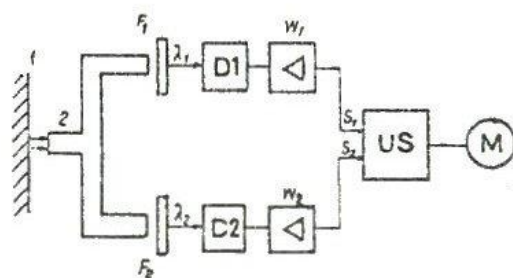
Rys. 1.3 Schemat blokowy pirometru radiacyjnego: a) soczewkowego; b) zwierciadłowego. 1-ciąło badane; 2-soczewka; 3,6-przesłona; 4-termostat; 5-okular; 7-obserwator; 8-przesłona przezroczysta; 9-zwierciadło; 10-wziernik; M-miernik.



Rys. 1.4 Schemat budowy pirometru monochromatycznego z zanikającym włóknem: 1-obiekt badany; 2-soczewka; 3-filtr szary; 4-przesłony; 5-żarówka; 6-filtr czerwony; 7-okular; 8-rezystor regulacyjny.



Rys. 1.5 Schemat budowy pirometru fotoelektrycznego: a) z modulacją strumienia; b) z przetwornikiem elektrycznym. 1-ciąło badane; 2-soczewka; 3-detektor fotoelektryczny; 4-wirująca tarcza z otworami; 5-silnik napędzający tarczę; P-przetwornik; W-wzmacniacz; M-miernik.

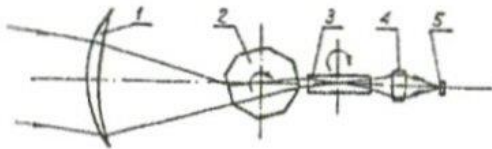


Rys. 1.6 Schemat budowy pirometru dwubarwowego: 1-obiekt badany; 2-światłowód typu "portki" F1, F2-filtry wąskopasmowe; W1, W2-wzmacniacze; S1, S2-sygnały wyjściowe ze wzmacniaczy; US-układ realizujący funkcję S1/S2; M-miernik.

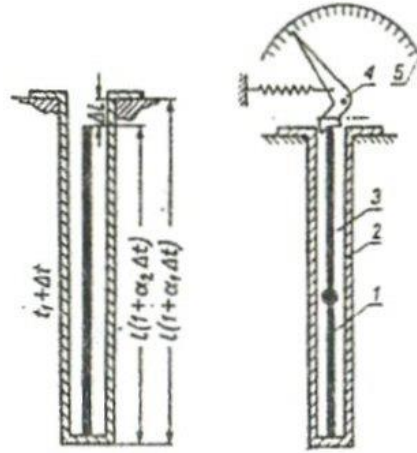
pasmowego wynosi  $320 \div 2270$  K, a niedokładność  $\pm (0.2 \div 1.5\%)$  zakresu pomiarowego. Pirometry pasmowe stosuje się najczęściej w układach pomiaru i regulacji szybkozmiennej temperatury, np. przy nagrzewaniu indukcyjnym, przy walcowaniu blach na gorąco, itp.

*Pirometr dwubarwowy (rys.1.6)* - pirometr, którego zasada działania polega na wykorzystaniu zależności ilorazu gęstości strumieni promieniowania bardzo wąskich pasm wokół długości fal  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  od temperatury. Zwykle przyjmuje się, że  $\lambda_1 = 0.55 \mu\text{m}$  (barwa zielona) oraz  $\lambda_2 = 0.65 \mu\text{m}$  (barwa czerwona). Rozwiązania konstrukcyjne tego typu pirometrów są różne, ale najczęściej do wydzielenia wąskich pasm promieniowania wokół  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  stosuje się filtry interferencyjne i oddzielne detektory, a iloraz sygnałów pomiarowych realizuje się w specjalnym układzie elektronicznym lub na drodze obliczeń numerycznych. Jeszcze dotąd spotyka się wersje z filtrem dwubarwowym. W tym przypadku obserwator tak ustawia dwubarwowy filtr przesuwany, aby ciało obserwowane przez ten filtr wydawało się szare. Zakres pomiarowy pirometru dwubarwowego wynosi  $970 \div 2470$  K, a błąd pomiaru zwykle nie przekracza  $\pm 10$  K. Pirometry dwubarwowe mogą samoczynnie współpracować z regulatorami i rejestratorami temperatury. Ich sygnał wyjściowy praktycznie nie zależy od emisyjności powierzchni. Są one stosowane do pomiarów temperatury powierzchni, których emisyjność zmienia się w dużych granicach, a także do pomiarów temperatury w ośrodkach pochłaniających promieniowanie cieplne (pary, gazy). Są one stosunkowo drogą drogą.

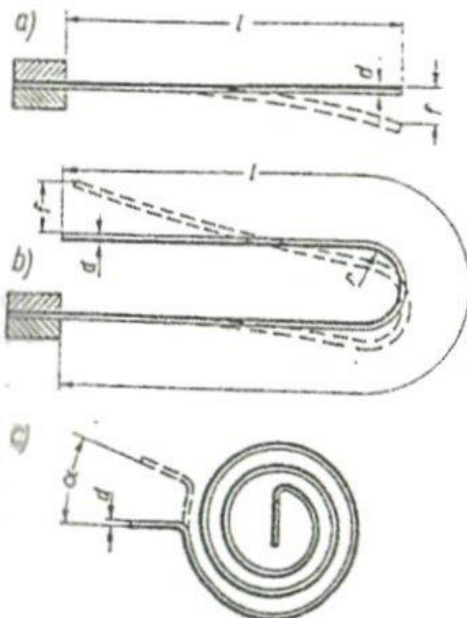
*Kamera termowizyjna (termowizja)* - jest to urządzenie umożliwiające zobrazowanie (wizualizację) rozkładu pola temperatury występującej na określonym obszarze powierzchni badanego obiektu. Ścisłej, jest to wizualizacja gęstości strumienia promieniowania podczerwonego emitowanego niezależnie przez poszczególne punkty (wraz z otoczeniem) tworzące powierzchnię widzialną przez układ optyczny kamery. Podstawowym zespołem takiej kamery jest układ próbkujący (omiatający powierzchnię), którego zadaniem jest przekazanie informacji o amplitudzie sygnału do detektora punkt po punkcie (rys.1.7). Najczęściej stosowaną techniką omiatania badanej powierzchni jest technika analogiczna jak omiatanie przez wiązkę elektronową ekranu telewizyjnego. W praktyce do tego celu służy w przeważającej ilości przypadków układ optomechaniczny złożony z obracających się lub wahających lusterek lub pryzmatów wykonanych z materiału przezroczystego dla detekowanego pasma promieniowania. Częstotliwość omiatania powierzchni badanego obiektu wynosi 25 Hz. Sygnał z określonego punktu (z najbliższym otoczeniem) badanej powierzchni padając na detektor (np. InSb) jest przetwarzany na sygnał



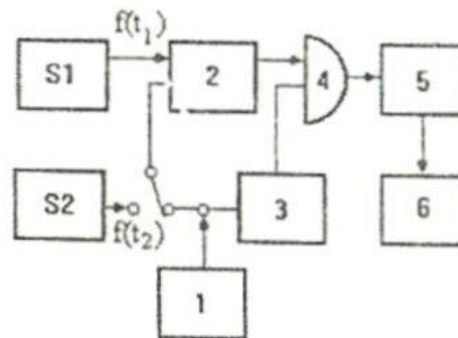
Rys. 1.7 Układ optomechaniczny urządzenia termowizyjnego: 1,4-soczewka; 2-pryzmat obrotowy pionowy; 3-pryzmat obrotowy poziomy; 5-detektor promieniowania podczerwonego.



Rys. 1.8 a) zasada działania termometru dy-latacyjnego - stan w temperaturze  $(t_1 + \Delta T)$ ; b) przekrój przez termometr: 1-material bierny; 2-material czynny; 3-przedłużenie pręta; 4-wskazówka z przeludnią mechaniczną; 5-skala temperatury.



Rys. 1.9 Najczęściej spotykane kształty bime-tali: a) taśma płaska; b) taśma w kształcie litery U; c) spirala płaska.



Rys. 1.10 Schemat blokowy termometru kwarcowego: S1,S2-czujniki temperatury; 1-generator częstotliwości  $f_0$ ; 2-mieszacz; 3-generator impulsów zegarowych; 4-układ detektora częstotliwości różnicowej z przetwornikiem A/C; 5-licznik; 6-wyświetlacz.

elektryczny, a ten z kolei po wzmocnieniu (synchronicznie) jest pokazany w postaci świecącego punktu na ekranie lampy oscyloskopowej. Amplituda sygnału pomiarowego padającego w danej chwili (a zatem i z określonego miejsca badanego obiektu) na detektor decyduje o intensywności świecenia plamki na ekranie (poziom jasności) lub może być zakodowana w skali kolorowej np. 10-cio stopniowej. Obraz pola temperatury powierzchni badanego obiektu na ekranie kineskopu nazywa się termogramem. Oraz ten może być zapamiętany w pamięci urządzenia z możliwością jego odtworzenia. Detektor promieniowania powinien być tak dobrany aby pasmo jego detekcji leżało w zakresie  $3 \div 5 \mu\text{m}$  lub  $8 \div 14 \mu\text{m}$ , gdyż w tych zakresach pochłanianie promieniowania przez atmosferę jest pomijalnie małe. Za pomocą termowizji można wizualizować pole temperatury w zakresie od 250 do 1900 K. Zdolność rozdzielcza tego typu urządzeń zależy od zakresu mierzonej temperatury. Termowizję stosuje się do wykrywania nieszczelności izolacji cieplnej, w diagnostyce medycznej, w prognozowaniu stanu upraw rolniczych (z kosmosu), do wykrywania badań podziemnych (z kosmosu), zanurzonych okrętów podwodnych (samolot, kosmos), do wykrywania złóż surowców mineralnych.

Metoda związana z wykorzystaniem różnicy rozszerzalności liniowej różnych materiałów w funkcji temperatury. Różnica ta wyraża się wzorem

$$\Delta l = l(1 + \alpha_1 \Delta T) - l(1 + \alpha_2 \Delta T) = l(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \quad (1.5)$$

gdzie:  $l$  - długość czujnika w temperaturze  $T$ ;  $\alpha_1$  /  $\alpha_2$  - współczynniki rozszerzalności liniowej zastosowanych materiałów;  $\Delta T$  - zmiana temperatury. Przykładowym rozwiązaniem *termometru dylatacyjnego* jest rozwiązanie pokazane na *rys.1.8*. Czujniki tych termometrów są najczęściej wykonane w postaci rurki o dużej wartości współczynnika  $\alpha_1$  z umieszczonym w niej współosiowo prętem wykonanym z materiału o małym współczynniku  $\alpha_2$ . Pary materiałów stosowanych w termometrach dylatacyjnych powinny charakteryzować się możliwie wysoką dopuszczalną temperaturą pracy, dużą różnicą ( $\alpha_1 - \alpha_2$ ) oraz odpornością na korozję i utlenianie (Al, Ni, mosiądz, NiCr, porcelana, FeNi36, kwarc). Maksymalne mierzone temperatury sięgają 1200 K (NiCr - porcelana), a błąd pomiaru nie przekracza 2 %.

Zjawisko to jest również wykorzystywane w konstrukcji *termometru bimetalowego* (*rys.1.9*). Podstawowym elementem tego typu termometru jest bimetal, stanowiący dwa zgrzane lub zwalcowane na gorąco paski metali lub stopów o różnych liniowych współczynnikach rozszerzalności. Przy zmianie temperatury bimetal wygina się w kierunku paska o mniejszym współczynniku rozszerzalności. W przypadku płaskiej taśmy bimetalowej przesunięcie  $f$  w [mm] na końcu bimetalu wyraża się następująco

## ĆWICZENIE NR 1

$$f = 10^{-4} K \frac{l^2}{d} \Delta T \quad (1.6)$$

gdzie:  $K$  - ugięcie właściwe w [K];  $l$  - długość bimetalu w [mm];  $d$  - grubość bimetalu w [mm];  $\Delta T$  - przyrost temperatury ponad temperaturę spoczynkową. Niezamocowany koniec bimetalu porusza wskazówką na skali termometru. Typowy zakres temperaturowy stosowalności tego typu termometrów wynosi  $200 \div 400$  °C. Dokładność pomiarów  $1 \div 2\%$ . Mogą one zastępować techniczne termometry cieczowe. Bimetal czasami stosuje się w innych termometrach jako element kompensujący wpływ temperatury otoczenia.

Metoda związana z wykorzystaniem zależności częstotliwości kryształu piezoelektrycznego od temperatury i innych efektów.

*Termometry kwarcowe.* Częstotliwość drgań własnych oscylatora kwarcowego zależy od temperatury  $T$  i może być zapisana w postaci

$$f(\theta) = f_0(1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3) \quad (1.7)$$

gdzie:  $f_0$  - częstotliwość w temperaturze odniesienia  $T_0$ ;  $\theta = T - T_0$ ;  $\alpha, \beta, \gamma$  - współczynniki zależne od usytuowania osi monokryształu kwarcu do płaszczyzny cięcia.

W typowych oscylatorach monokryształ piezoelektrycznego kwarcu jest tak wycięty, że jego częstotliwość jest praktycznie niezależna od temperatury, tj.  $\alpha = 0$ . Natomiast w przypadku zastosowania go w termometrii tak się dobiera wzajemne usytuowanie osi i płaszczyzny cięcia aby  $\beta = 0$  i  $\gamma = 0$ , wtedy  $f(\theta)$  jest liniową funkcją  $\theta$ . Jednym z możliwych rozwiązań układowych termometru kwarcowego jest układ pokazany na *rysunku 1.10*. Rozwiązanie takie zastosowano w termometrze firmy Hewlett-Packard. Umożliwia ono zarówno pomiar temperatury  $T_1$  (czujnik  $S_1$ ) jak i różnicy temperatury  $T_1$  i  $T_2$  (czujniki  $S_1$  i  $S_2$ ). Płytki kwarcowe w czujnikach temperatury mają zazwyczaj średnicę kilku milimetrów, przy częstotliwości rezonansowej rzędu kilkudziesięciu MHz i jej zmianie w funkcji temperatury około 1 kHz/K. Rozdzielczość termometru jest zależna od czasu trwania pomiaru, np. dla 10 s wynosi ona  $10^{-4}$  K, a dla 0.1 s  $10^{-2}$  K. Typowy zakres mierzonej tym termometrem temperatury wynosi od  $-80$  °C do  $250$  °C, a błąd pomiaru winien być określony indywidualnie dla każdego konkretnego problemu pomiarowego.

*Kolor.* Do badania rozkładu temperatury na powierzchni ciał stałych stosowane są często pokrycia termoczułe, gwałtownie zmieniające barwę przy przekroczeniu temperatury krytycznej. Pokrycia termoczułe powinny zmieniać barwę w



czasie krótszym od jednej sekundy, nie mogą zmieniać swych własności pod wpływem działania płynu otaczającego pokrytą powierzchnię i nie mogą wydzielać szkodliwych gazów podczas nagrzewania. Pokrycia termoczule można podzielić na:

- zmieniające barwę odwracalnie lub nieodwracalnie na skutek zmiany składu chemicznego lub budowy siatki krystalicznej pigmentów czułych na zmiany temperatury. Przy zastosowaniu mieszanin różnych pigmentów można otrzymać farby termoczule zmieniające barwę wielokrotnie, aż do 12-krotnie;
- zmieniające barwę na skutek topnienia jednego ze składników;
- ciekłe kryształy (najczęściej cholesterole), które mają własności cieczy (ciekłość) i kryształów ciała stałego (nieizotropowość), zmieniające barwę przy zmianie temperatury o setne części stopnia.

Jako przykład wykorzystania pokryć termoczulych mogą służyć kredki i farby termoczule firmy Faber-Castell, Stein bei Numberg, Niemcy. Firma ta produkuje kredki Thermochrom, których 18 pokrywa zakres temperatury  $65\text{ }^{\circ}\text{C} \div 670\text{ }^{\circ}\text{C}$ , oraz farby Thermocolor, których 34 pokrywa zakres temperatury  $40\text{ }^{\circ}\text{C} \div 1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dokładność pomiaru wynosi  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Do zalet tych farb i kredek należy niski koszt określania rozkładów temperatury na badanych powierzchniach i możliwość wyznaczenia izoterm natychmiast po ostygnięciu przedmiotu. Farby dostarczane są w postaci proszków rozpuszczonych w alkoholu.

Wśród 34 farb Thermocolor 5 zmienia barwę dwukrotnie, 4 zmienia barwę trzykrotnie i 2 zmieniają barwę czterokrotnie.

Kredki Thermochrom stosuje się do szybkiego i taniego określania temperatury przy spawaniu, wytłaczaniu, starzeniu itp., procesach technologicznych oraz przy nadzorowaniu nagranych części podczas eksploatacji. Farby Thermocolor stosuje się do określania rozkładu temperatury na dużych powierzchniach, np. aparatury chemicznej, ścian pieców, poszycia samolotów, ścianek silników raketowych, łopatek turbin gazowych, ścianek kanałów przepływowych, itp. W szczególnych przypadkach stosuje się farby do określania maksymalnej temperatury tłoków oraz cylindrów i głowic chłodzonych powietrzem silników spalinowych lub do określania temperatury skrawania. W odróżnieniu od kredek farby muszą być nanoszone na powierzchnie przed nagrzewaniem ciała.

*Wskaźniki topikowe* - są to związki chemiczne o różnych temperaturach topnienia, dostępne handlowo w postaci szybkooschnających cieczy lub kredek. Powierzchnia pomalowana taką substancją w temperaturze niższej od temperatury topnienia jest matowa, tak jak gdyby zarysowano ją kredą. Po osiągnięciu przez powierzchnię temperatury znamionowej (topnienia) i wyższej oraz po jej ostudzeniu substancja na powierzchni staje się szklista i nosi ślady

nadtopienia. Wskaźniki topikowe są produkowane w zakresie temperatury od 330 do 1700 K z gradacją od 5 do 30 K. Błąd wskazań jest określany maksymalnie na  $\pm 1\%$ .

### 1.3. Warunki poprawnego pomiaru temperatury

Duża różnorodność zjawisk termodynamicznych, które zachodzą w różnych ośrodkach (ciało stałe, ciecz, gaz) pociąga za sobą konieczność wyboru najwłaściwszej metody pomiaru temperatury w każdym przypadku oddzielnie.

Współcześnie każdy inżynier ma do dyspozycji dużą różnorodność metod i technik pomiaru temperatury, a problem sprowadza się jedynie do optymalnego wyboru metody pomiaru oraz sposobu jej wdrożenia w praktyce.

Przed przystąpieniem do pomiaru temperatury należy w pierwszej kolejności ustalić

- lokalizację punktu w przestrzeni pomiarowej, gdzie będzie umieszczony czujnik pomiarowy;
- warunki pracy czujnika, tj. orientacyjny zakres zmian wielkości mierzonej, charakter tych zmian, czas pracy czujnika, właściwości chemiczne środowiska w którym będzie umieszczony czujnik;
- błąd pomiaru wielkości mierzonej.

Znajomość powyższych danych pozwala wybrać najwłaściwszy czujnik, którego właściwości będą gwarantowały spełnienie tych wymagań. Ramowy tok postępowania, gwarantujący dobór optymalnego czujnika temperatury ze względu na z góry narzucone warunki przeprowadzenia eksperymentu oraz aktualnie dostępny asortyment metod i związanych z nimi czujników temperatury pokazano na *rys. 1.11*.

Układ pomiarowy, współpracujący z czujnikiem przeznaczonym do pomiaru temperatury dobiera się w zależności od rodzaju i parametrów cieplno-elektrycznych samego czujnika.

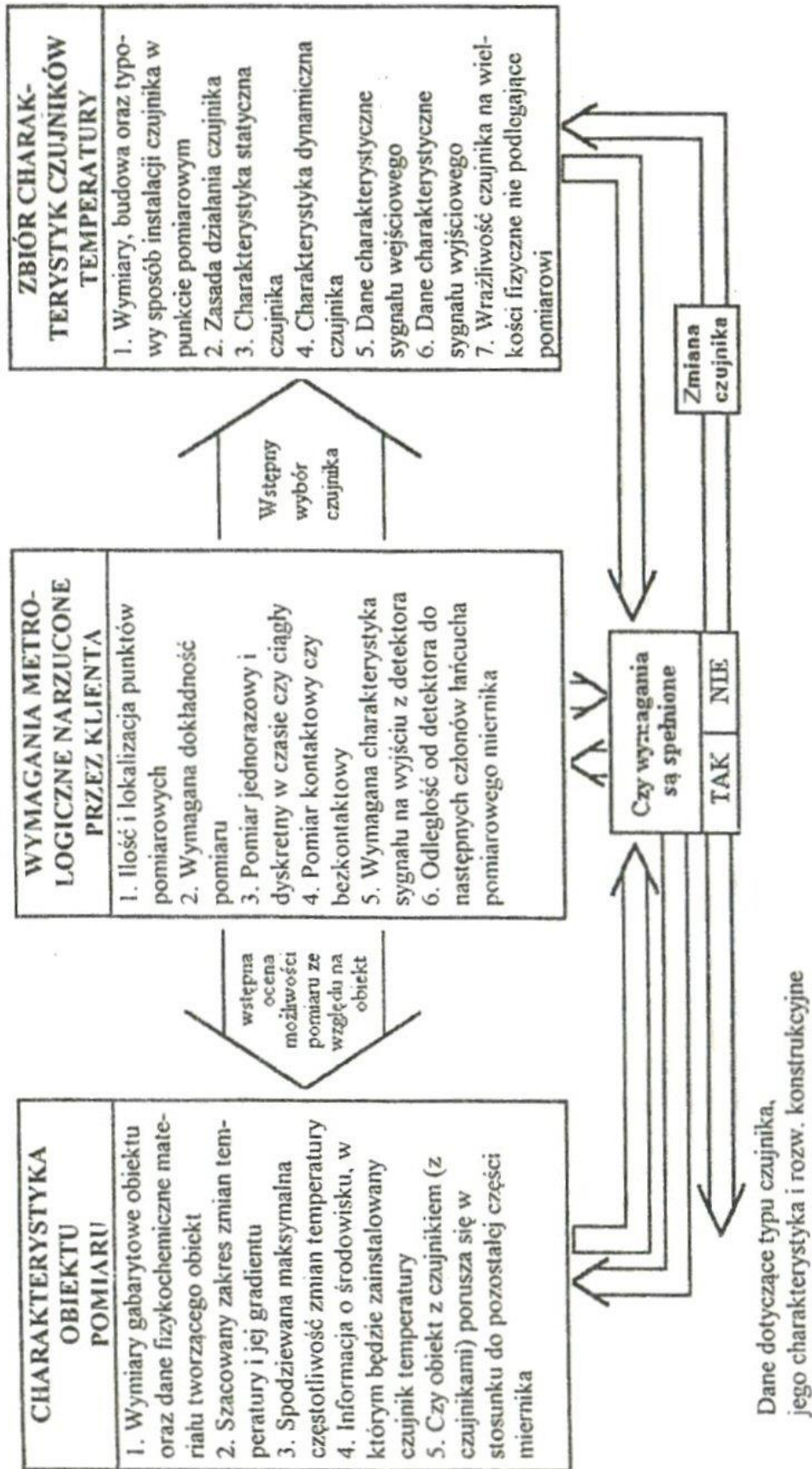
Nie mniej ważnym zagadnieniem, po wybraniu czujnika i układu pomiarowego jest dobór następnego członu łańcucha pomiarowego, tj. systemu wizualizacji i zapisu wyników pomiaru.

Ogólny schemat miernika służącego do pomiaru temperatury obiektu pokazano na *rys. 1.12*.

Układ pomiarowy, współpracujący z danym czujnikiem temperatury, dobiera się ze względu na:

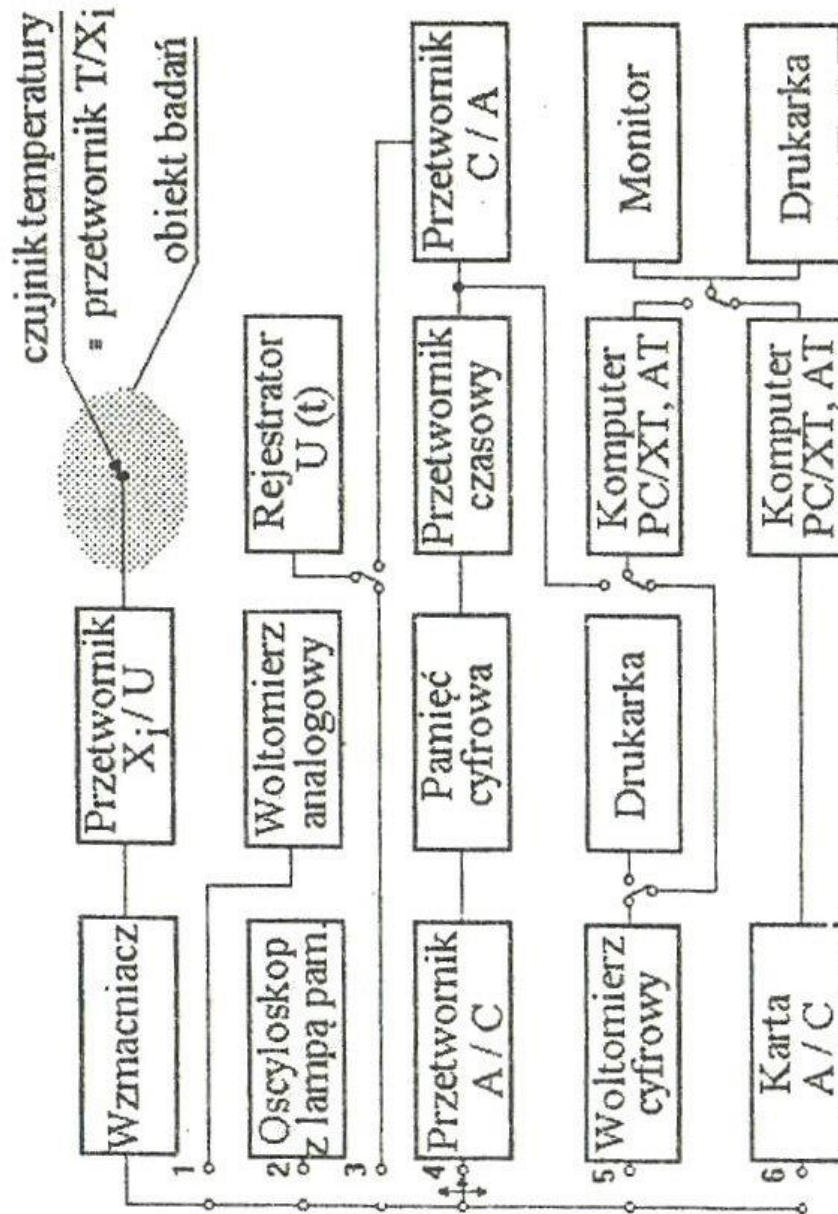
- charakter zmian wielkości mierzonej (temperatura stała lub zmienna w czasie);

ĆWICZENIE NR 1



Rys. 1.11 Tok postępowania przy doborze rodzaju i typu czujnika do pomiaru temperatury.





Rys. 1.12 Schemat blokowy połączeń najczęściej stosowanych układów do pomiaru i rejestracji temperatury.

ĆWICZENIE NR 1

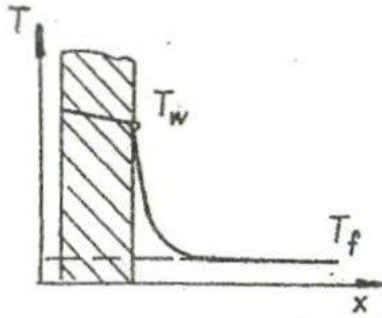
- wymagania co do wielkości mierzonej (mierzona jest wartość średnia, minimalna, maksymalna lub chwilowa temperatury nieustalonej);
- charakter pomiaru (pomiar ciągły lub dyskretny w czasie). Ma to szczególne znaczenie przy pomiarze temperatury części poruszających się ruchem obrotowym lub posuwisto-zwrotnym;
- sposób obróbki końcowej sygnału pomiarowego (odczyt analogowy, cyfrowy, rejestracja analogowa lub cyfrowa).

Kryterium decydującym o szczegółach układu pomiarowego jest zazwyczaj z góry zadany błąd pomiaru oraz to, czy układ pomiaru temperatury współpracuje z układem kontroli i automatyki obiektu jako szerszej całości.

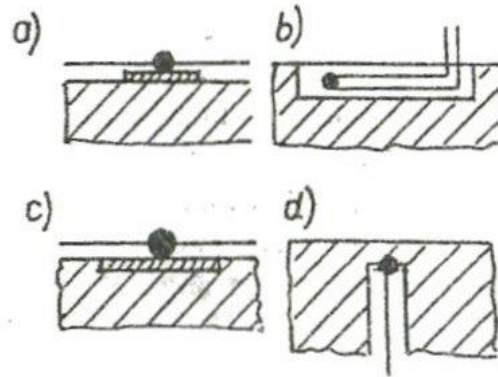
Na pokazanym na *rys.1.12* schemacie czujnik temperatury, który jest przetwornikiem  $T/X_i$  (przy czym  $X$  może być siłą termoelektryczną  $E$ , rezystancją elektryczną  $R$ , gęstością strumienia promieniowania  $I$ , wydłużeniem  $l$ , ...) jest połączony z następnym przetwornikiem  $X_i/U$ . Generalnie rzecz biorąc układ "czujnik temperatury - przetwornik  $X_i/U$ " ma za zadanie przetransformować zmianę wielkości zależnej od temperatury na napięcie elektryczne. Przykładowo, w przypadku czujnika rezystancyjnego sam czujnik transformuje zmianę temperatury na zmianę rezystancji elektrycznej  $T/R$ , natomiast następny człon (przetwornik  $X_i/U$ ) transformuje zmianę rezystancji na zmianę napięcia elektrycznego  $R/U$ . W przypadku termoelementu przetwornik  $X_i/U$  nie jest konieczny gdyż sam czujnik bezpośrednio transformuje zmianę temperatury na zmianę napięcia termoelektrycznego  $T/U$ .

Poprawny pomiar temperatury danego obiektu, danym czujnikiem pomiarowym wraz ze stowarzyszonym z nim układem pomiarowym i wizualizacji, wymaga za każdym razem oddzielnej analizy błędów. Ilustracją tego problemu może być, na przykład, pomiar temperatury powierzchni. Dokładny pomiar temperatury powierzchni ciała stałego, wbrew pozorom, nie jest problemem trywialnym. Szczególnie, jeżeli powierzchnia ciała wymienia ciepło z otoczeniem (płyn) na drodze konwekcji (*rys.1.13*). Cechą charakterystyczną takiego sposobu wymiany ciepła jest występowanie dużego gradientu temperatury w przyściennej warstwie płynu i w związku z tym, celem zredukowania do minimum błędów pomiaru, czujnik (termoelement, termistor) na powierzchni ciała stałego musi być umieszczony w sposób specjalny. Różne sposoby umieszczenia termoelementów, przeznaczonych do pomiaru temperatury powierzchni ciała stałego pokazano na *rys.1.14*.

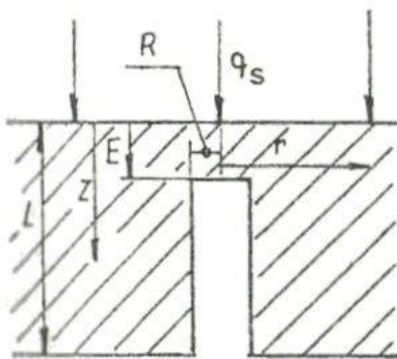
Każdy ze sposobów umieszczenia czujnika na powierzchni powoduje zaburzenie lokalnego pola temperatury ciała w sąsiedztwie miejsca zamocowania termometru. Zaburzenie to jest spowodowane lokalną zmianą warunków wymiany ciepła między płynem a powierzchnią, na której jest zamocowany



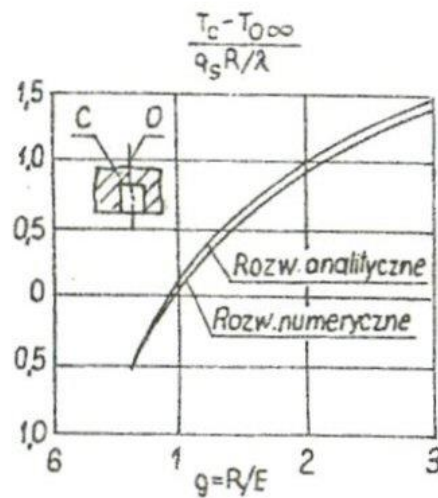
Rys. 1.13 Przebieg zmian temperatury w płytce i przyściennej warstwie materiału.



Rys. 1.14 Sposoby umieszczania termoelementów do pomiaru temperatury powierzchni: P-płytkę z dobrego przewodnika ciepła; • - spoina termoelementu.



Rys. 1.15 Geometria pomiaru temperatury powierzchni termometrem umieszczonym w otworze pod powierzchnią.



Rys. 1.16 Zależność błęd pomiaru temperatury powierzchni termometrem umieszczonym w punkcie C od g.

## ĆWICZENIE NR 1

termoelement i odprowadzeniem ciepła przez przewody czujnika. Wartość błędu pomiaru temperatury powierzchni czujnika jest zależna od zaburzenia pola temperatury. Jako ilustracja złożoności zagadnienia określania błędu pomiaru zostanie rozpatrzony przypadek pokazany na *rys. 1.14.d*), przy założeniu, że opór dla przepływu ciepła od ciała do czujnika jest nieskończenie duży.

Taki przypadek ma miejsce kiedy występuje konieczność pomiaru temperatury powierzchni bez bezpośredniej możliwości zainstalowania na niej czujnika temperatury, np. wewnętrzna powierzchnia ścianki wysokociśnieniowego zbiornika lub tulei cylindra silnika spalinowego. Wtedy stosuje się sposób pokazany na *rys. 1.14.d*). Termometr jest umieszczany, w tym przypadku, prostopadle do powierzchni, której temperaturę należy określić w małym cylindrycznym otworze wywierconym od zewnętrznej strony ścianki. Błąd pomiaru temperatury powierzchni tym sposobem określili Beck i Hurwicz (1960r.). Po przyjęciu oznaczeń jak na *rys. 1.15*, dla ustalonej wymiany ciepła i przy założeniu, że termometr nie odprowadza ciepła, a otwór jest nieskończenie długi, otrzymali oni, że

$$\frac{T_0 - T_\infty}{g \dot{q} \frac{R}{\lambda}} = 0.5$$

gdzie:

- |                                   |   |  |
|-----------------------------------|---|--|
| $T_0 = T(r = 0, z = 0)$           | - | jest temperaturą w punkcie 0 ( <i>rys. 1.15</i> );     |
| $T_\infty = T(r = \infty, z = 0)$ | - | jest niezaburzoną przez otwór temperaturą powierzchni; |
| $g = R/E$                         | - | współczynnik bezwymiarowy;                             |
| $\dot{q}$                         | - | gęstość strumienia ciepła na powierzchni;              |
| $\lambda$                         | - | współczynnik przewodzenia ciepła materiału ścianki.    |

Ci sami autorzy określili również błąd bezwzględny określenia temperatury powierzchni przy pomiarze temperatury w punkcie C, któremu odpowiada temperatura  $T_C = T(r = 0, z = E)$ , w funkcji  $g$ , przy takich samych założeniach jak wyżej. Wykres tej zależności jest pokazany na *rys. 1.16*. Z przedstawionego wykresu wynika, że błąd ten jest równy zero jeżeli  $g = 1$ . Ponieważ termometr nie mierzy temperatury w punkcie C ale średnią temperaturę na powierzchni czołowej otworu zaleca się stosować  $g = 1.1$ .



1.4. Przebieg ćwiczenia

Zadaniem tego ćwiczenia jest unaocznienie studentowi mnogości i różnorodności metod i technik pomiaru temperatury oraz niuansów związanych z ich stosowaniem.

W części pierwszej prowadzący ćwiczenie dokona, korzystając z materiałów audiowizualnych, przeglądu wybranych metod pomiaru temperatury stosowanych w tych dziedzinach techniki, gdzie mają one zasadnicze znaczenie.

W części drugiej, która ma charakter demonstracyjny, prowadzący zajęcia zapozna studentów z różnymi typami czujników i przyrządów do pomiaru temperatury oraz praktycznie zademonstruje sposób ich działania.

Zaliczenie ćwiczenia wiąże się z opracowaniem przez grupę do końca semestru tematu zadanego przez prowadzącego i wiążącego się bezpośrednio z konkretnym zagadnieniem pomiaru temperatury. Zakres, treść i objętość sprawozdania z zadanego tematu określa prowadzący ćwiczenie.

Literatura

- [1] *Mała Encyklopedia Metrologii*. WNT, Warszawa 1989.
- [2] Michalski L., Eckersdorf K. *Pomiary temperatury*. WNT, Warszawa 1986.
- [3] Wiśniewski S. *Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych*. WNT, Warszawa 1983.
- [4] Watson G.G. *Techniques for Measuring Surface Temperature*. Instrument Practice, No 3÷8, 1966.
- [5] *Thermocoax. Which Thermocouple to Choose*. Prospekt firmy Philips.
- [6] *Mantel-Thermoelemente*. Prospekt firmy Heraeus .
- [7] *System für temperaturmeß - und - reglungstechnik*. Heiman LP 1/74. Prospekt firmy Therm.
- [8] *TS32 - D Thermal Elbow*. Prospekt firmy ELOPTRO.