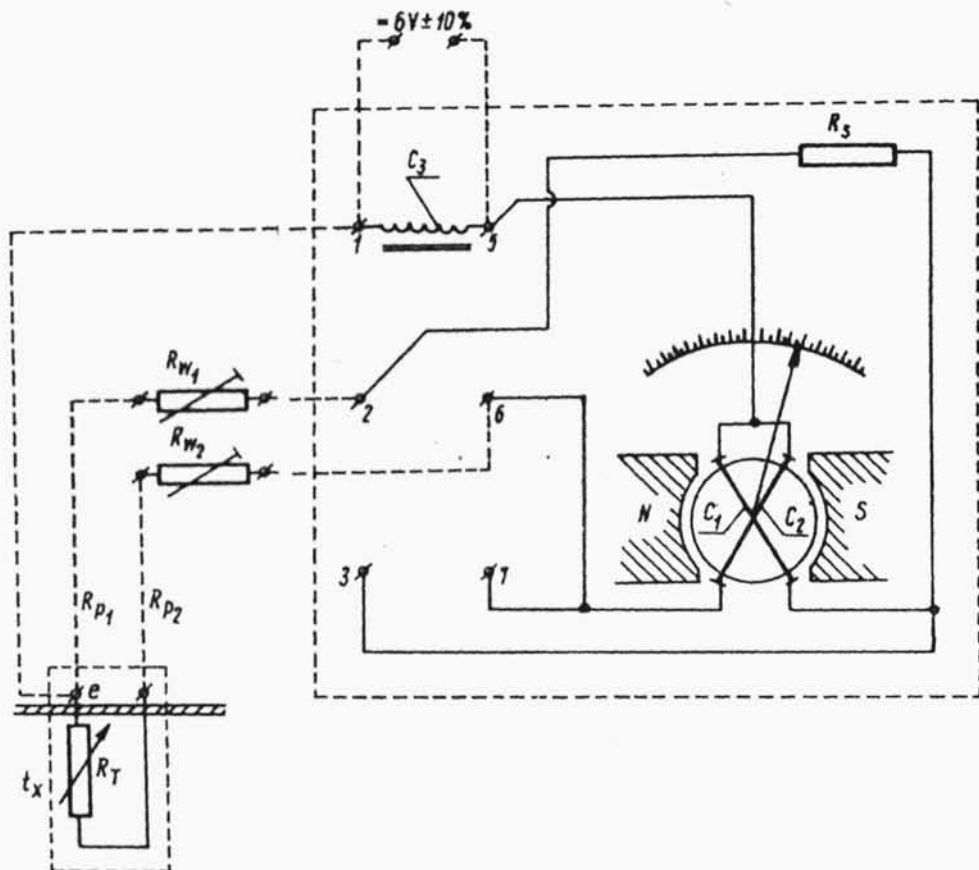
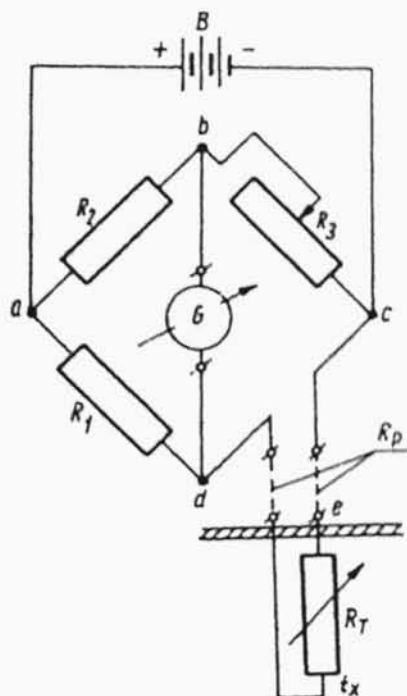


Układ trójprzewodowy

W celu zmniejszenia wpływu zmian oporu przewodów R_p na wskazania miernika, stosuje się układ trójprzewodowy pokazany na rys.2.10. Schemat elektryczny różni się od układu dwuprzewodowego przyłączeniem źródła zasilania do czujnika w punkcie oznaczonym literą e zamiast jak poprzednio w punkcie 5 (rys. 2.9). W tym przypadku czujnik łączy się z miernikiem trzema przewodami i stąd pochodzi nazwa układu. Powyższa zmiana schematu elektrycznego prowadzi do równomiernego rozkładu oporów przewodów na dwie gałęzie mostka R_{p1} i R_{p2} . Ewentualne zmiany oporności tych przewodów oddziałują symetrycznie na opór obwodów elektrycznych (pomiarowego i porównawczego),



Rys.2.10. Schemat elektryczny termometru oporowego z miernikiem ilorazowym w układzie trójprzewodowym (oznaczenia jak na rys.2.9)



Rys.2.11. Schemat połączeń termometru oporowego ze zrównoważonym mostkiem Wheatstone'a w układzie dwuprzewodowym: R_1, R_2 - opory stałe mostka, R_3 - opór regulowany, R_p - opór przewodów, R_T - opornik termometryczny, G - galwanometr, B - bateria, t_x - temperatura mierzona

dzięki czemu zmniejsza się wpływ zmian temperatury otoczenia na pomiar. W układzie trójprzewodowym każdy przewód (oprócz zasilającego) jest wyposażony w opornik wyrównawczy. W układzie trójprzewodowym opór każdego przewodu łączącego czujnik z miernikiem, tzn. $R_{p1} + R_{w1}$ oraz $R_{p2} + R_{w2}$ powinien wynosić 10Ω względnie 15Ω , zgodnie z wymaganiami miernika. Odległość czujnika od miernika może przekraczać podane poprzednio wartości dla układu dwuprzewodowego.

Układy mostkowe zrównoważone

Mostek Wheatstone'a pracujący w układzie zrównoważonym pokazano na rys.2.11. Pomiar polega na takim ustawieniu opornika R_3 , aby galwanometr zajmował położenie zerowe. Wartość oporu czujnika oblicza się z warunku równowagi mostka

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_T + R_p}{R_3}, \quad (2.15)$$

stąd

$$R_T = R_3 \frac{R_1}{R_2} - R_p, \quad \Omega, \quad (2.16)$$

gdzie:

R_1, R_2 - oporniki stałe, Ω ,

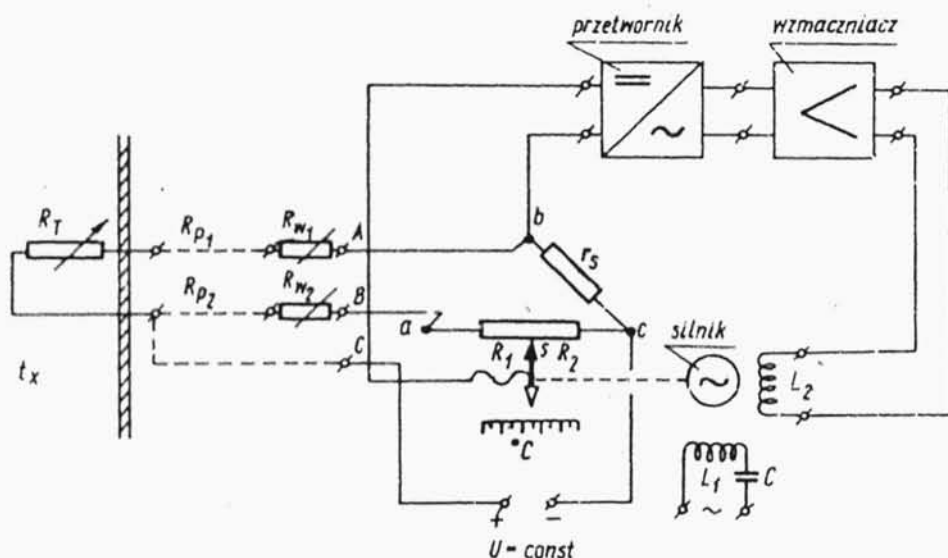
R_3 - opornik regulowany, Ω ,

R_T - opornik termometryczny, Ω ,

R_p - opór przewodów łączących, Ω .

Mając wykres lub tablice zależności oporu czujnika od temperatury można określić jej wartość liczbową. Zmiany napięcia zasilania w granicach $\pm 20\%$ nie wpływają na dokładność pomiaru oporu metodą mostka zrównoważonego. Dokładność mierników tego typu jest duża i wynosi od 0,05 do 0,1%, jednak ze względu na kłopotliwą obsługę, przyrządy te mają zastosowanie jedynie przy pomiarach laboratoryjnych.

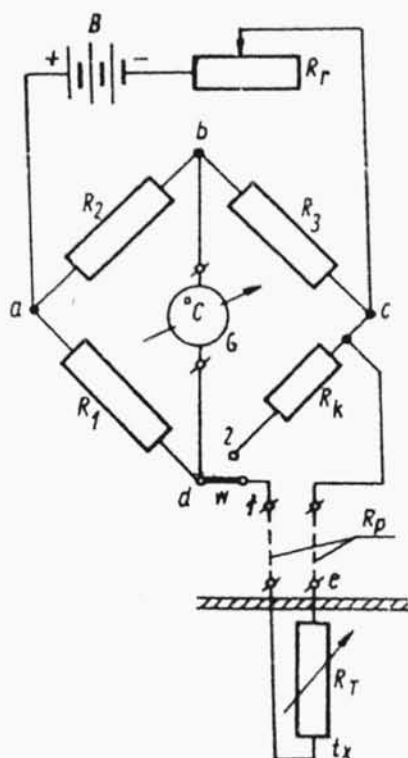
Układy mostkowe zrównoważone mogą być wykonane jako trójprzewodowe, lecz wówczas przewód zasilający (rys.2.11) łączy się z czujnikiem w p.e, zamiast z mostkiem w p.c. Korzyści z układu trójprzewodowego są podobne, jak dla mierników ilorazowych.



Rys.2.12. Schemat termometru oporowego z samoczynnie równoważonym mostkiem Wheatstone a w układzie trójprzewodowym

Układy mostkowe równoważone samoczynnie bywają stosowane w przyrządach rejestrujących. Schemat takiego mostka w ukła-

dzie trójprzewodowym pokazano na rys.2.12. W obwód mostka włączony jest opór stały r_s , opory sprzężone R_1 i R_2 oraz opornik termometryczny R_T wraz z dwoma opornikami wyrównawczymi. W przypadku równowagi mostka napięcie między punktami b-s jest równe zero.



Rys.2.13. Schemat połączeń termometru oporowego z niezrównoważonym mostkiem Wheatstone'a w układzie dwuprzewodowym (metoda wychyleniowa) R_1, R_2, R_3 - opory stałe mostka, R_T - opornik regulacyjny, R_K - opornik kontrolny, w - przełącznik (pozostałe oznaczenia jak na rys.2.11)

Jeżeli mostek nie jest w równowadze wówczas

$$\frac{R_T + R_{p1} + R_{w1}}{R_1 + R_{p2} + R_{w2}} \neq \frac{r_s}{R_2} \quad (2.17)$$

gdzie:

R_{p1}, R_{p2} - opory przewodów łączących,

R_{w1}, R_{w2} - opory wyrównawcze linii.

W przypadku braku równowagi i między punktami b-s pojawia się napięcie niezrównoważenia mostka. Po przetworzeniu różnicy potencjałów na napięcie prądu zmiennego i wzmacnieniu, sygnał uruchamia dwufazowy, indukcyjny silnik wykonawczy z uzwojeniem wzbudzenia L_1 i uzwojeniem sterującym L_2 .

Silnik obracając się przesuwają za pomocą cięgna suwak s do momentu, aż nastąpi nowa równowaga mostka. Wynik pomiaru jest odczytywany lub rejestrowany w miejscu położenia suwaka s. Dokładność mierników tego typu wynosi od 0,25 do 0,5%.

Układy mostkowe niezrównoważone

Układy te umożliwiają pomiar metodą wychyleniową. Wszystkie gałęzie mostka (rys.2.13) mają opory stałe, a jedynie opór R_T czujnika zmienia się wraz z temperaturą. Wychylenie galwanometru G jest zależne od napięcia występującego między punktami b, d.

Przyjmując napięcie zasilające mostek między punktami a, c jako U_{ac} , można obliczyć U_{bd} ze wzoru

$$U_{bd} = U_{ac} \frac{R_2(R_T + R_p) - R_1 R_3}{(R_2 + R_3)(R_1 + R_p + R_T)} \quad (2.18)$$

oznaczenie oporów jak we wzorze (2.16).

Ażeby wychylenie galwanometru zależało jedynie od temperatury czujnika, tzn. aby $U_{bd} = f(R_T)$, należy przeprowadzić stabilizację wszystkich wielkości występujących w równaniu (2.18) z wyjątkiem oporu czujnika R_T . Szczególnie należy zwrócić uwagę na napięcie zasilania U_{ac} oraz stałość oporu przewodników łączących R_p . Napięcie zasilania regulujemy opornikiem R_T po przełączeniu wyłącznika W w położenie 2.

Wskazania galwanometru powinno ustalić się w położeniu kontrolnym K, oznaczonym czerwoną kreską na podzielnicy. Ewentualne korekty przeprowadza się za pomocą opornika R_T . Według opisanego schematu działa miernik termistorowy typu POZ 030. Układy mostkowe z metalowymi czujnikami oporowymi mogą wymagać stosowania dodatkowo oporników wyrównawczych linii lub wykonania linii trójprzewodowych według zasad podanych dla układów mostkowych zrównoważonych. Dokładność metody wychyleniowej z mostkiem Wheatstone'a wynosi od 1 do 1,5% i dlatego ma ona zastosowanie do pomiarów technicznych.

2.3.4. TERMOMETRY TERMoeLEKTRYCZNE

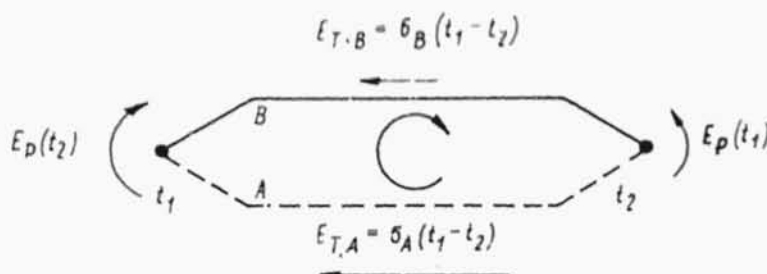
Przyrządy te są w technice rozpowszechnione równie szeroko jak termometry oporowe.

Zasada działania termoelementu (termopary) oparta jest na dwóch zjawiskach fizycznych Peltiera i Thomsona, które były odkryte w połowie XIX w.

Zjawisko Peltiera polega na występowaniu różnicy potencjałów w miejscu styku dwóch różnych metali. Wielkość siły termoelektrycznej wynikającej ze zjawiska Peltiera zależy od rodzaju stykających się metali i temperatury w miejscu ich połączenia. Występowanie zjawiska Peltiera powoduje różną liczbę swobodnych elektronów w metalach, które się ze sobą stykają.

Efekt Thomsons (Kelvina) powoduje, że w przewodniku jednorodnym którego końce są w różnych temperaturach powstaje różnica potencjałów. Różnica ta wynika z różnego stopnia zagęszczenia swobodnych elektronów w przewodniku o niejednorodnej temperaturze. Nałożenie się tych dwóch zjawisk powoduje powstanie siły termoelektrycznej (tzw. zjawisko Seebecka).

W obwodzie zamkniętym (rys.2.14), wykonanym z dwóch różnych metali A i B, których spoiny znajdują się w różnych temperaturach, będzie istniał ruch elektronów na skutek powstałej siły termoelektrycznej.



Rys.2.14. Zamknięty obwód termoelektryczny

Wielkość wypadkowej siły termoelektrycznej można obliczyć ze wzoru

$$E = E_P(t_1) - E_P(t_2) + E_T(A) - E_T(B), \quad (2.19)$$

gdzie:

$E_P(t_1)$ - siła termoelektryczna wynikająca ze zjawiska Peltiera w spoinie o temperaturze t_1 ,

$E_P(t_2)$ - siła termoelektryczna wynikająca ze zjawiska Peltiera w spoinie o temperaturze t_2 ,

$E_T(A)$ - siła termoelektryczna wynikająca z efektu Thomsons dla metalu A,

$E_T(B)$ - siła termoelektryczna wynikająca z efektu Thomsons dla metalu B,

$$E_T(A) = \delta_A(t_2 - t_1),$$

$$E_T(B) = \delta_B(t_2 - t_1),$$

gdzie δ_A, δ_B - współczynnik Thomsona dla metalu A i B.

Po podstawieniu

$$E = E_p(t_1) - E_p(t_2) + \delta_A(t_2 - t_1) - \delta_B(t_2 - t_1). \quad (2.20)$$

Ponieważ w praktyce nie oblicza się osobno wartości sił występujących w powyższym równaniu, zatem można je uprościć przez umowne odniesienie sił termoelektrycznych do dwóch spoin o temperaturze t_1 i t_2 . Równanie przyjmie wówczas postać

$$E_{AB}(t_1, t_2) = e_{AB}(t_1) - e_{AB}(t_2). \quad (2.21)$$

Z powyższego wynika, że wypadkowa siła termoelektryczna zależy od rodzaju materiałów użytych do wykonania termooogniwa i różnicy temperatur obu spoin.

Używając termoelementu do pomiaru temperatury należy umieścić jedną ze spoin w środowisku o mierzonej temperaturze t_x , zaś temperaturę drugiej spoiny stabilizować (np. w punkcie lodu). Wówczas siła termoelektryczna $E = f(t_x)$, gdyż $t_2 = t_x$, zaś $t_1 = \text{const}$. Spoina o stabilizowanej temperaturze nazywa się spoiną odniesienia lub "zimnym końcem" termoelementu.

Prawo trzeciego metalu głosi, że jeżeli do obwodu wykonanego z dwóch metali A i B wprowadzi się przewód z trzeciego metalu C, to siła termoelektryczna nie ulegnie zmianie, jeżeli obydwa końce przewodu z metalu C będą miały tę samą temperaturę.

Dowód powyższego prawa znajduje się w literaturze [11]. Z prawa trzeciego metalu korzysta się szczególnie przy włączaniu w obwód termoelementu przyrządu (np. miliwoltomierza) - do pomiaru siły termoelektrycznej. W tym celu rozcina się obwód w dowolnym miejscu lub w spoinie odniesienia. Ze względu na bliskość połączeń można założyć, że obydwa końce trzeciego metalu mają tę samą temperaturę.

Prawo kolejnych metali umożliwiło usystematyzowanie zdolności termoelektrycznej poszczególnych metali względem platyny przy różnicy temperatur równej 100 K. Tak sporządzony

szereg metali dla najczęściej używanych materiałów do budowy termoelementów zestawiono w tablicy 2.2.

Tablica 2.2

Siły termoelektryczne różnych metali względem platyny
przy różnicy temperatur spoin $\Delta t = 100 \text{ K}$

Metal	E mV	Metal	E mV
Konstantan (55% Cu, 45% Ni)	-3,51	Srebro	+0,74
Nikiel	-1,48	Miedź	+0,76
Platyna	0,00	Żelazo	+1,39
Aluminium	+0,42	Nikielchrom (85% Ni, 12% Cr)	+2,2
Platynorod (90% Pt, 10% Rh)	+0,643	Chromel	+2,81

Termoelementy wykonuje się z dwóch różnych, połączonych ze sobą przewodników (czyste metale, stopy lub niemetale). Po-
zostałe wolne końce przewodników łączy się z miernikiem za po-
mocą tzw. linii łączeniowej. Materiały użyte do wykonania ter-
moelementów powinny mieć następujące własności:

- dostatecznie wysoką temperaturę topnienia,
- dostatecznie wysoką dopuszczalną temperaturę pracy ciągłej,
- niezmiennie właściwości fizyczne w czasie,
- możliwie liniową charakterystykę.

Spśród wielu materiałów najczęściej wykonuje się typowe termoelementy opisane poniżej.

Platynorod-platyna (oznaczenie S lub PtRh10-Pt) jest naj-
bardziej rozpowszechnionym, termoelementem wykonanym ze stopów
metali szlachetnych. Zakres stosowania od 0 do 1600°C .

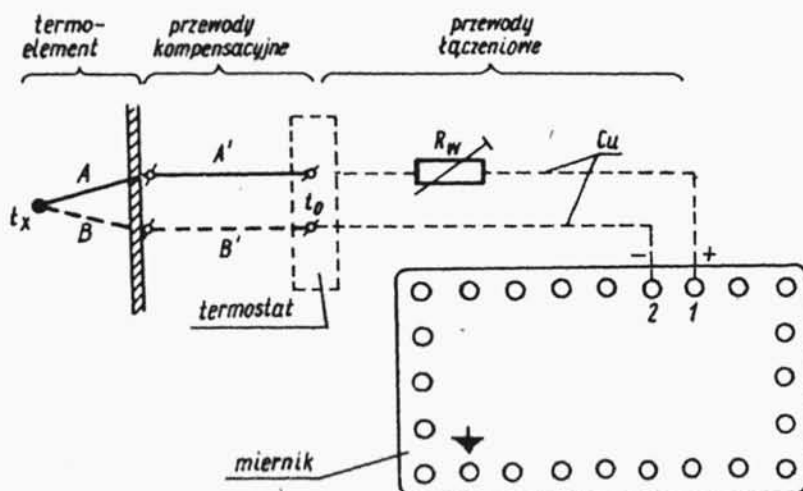
Nikielchrom-nikiel aluminium (oznaczenie K lub NiCr-NiAl)
jest to termoelement do pomiarów technicznych w zakresie od
0 do 1300°C .

Żelazo-konstantan (oznaczenie J lub Fe-Konst) jest szeroko
stosowanym termoelementem w pomiarach technicznych, gdyż ma
dużą odporność na wpływy środowiska i stosunkowo dużą wartość
siły termoelektrycznej. Zakres stosowania od -200 do $+900^{\circ}\text{C}$.

Miedź-konstantan (oznaczenie T lub Cu-Konst) jest termoelementem o dużej wartości siły termoelektrycznej, stosowanym w zakresie temperatur od -200 do $+400^{\circ}\text{C}$. Ze względu na właściwości, łatwość wykonania i dostępność materiałów termoelement ten jest często stosowany w pomiarach laboratoryjnych.

Budowa termometrów termoelektrycznych

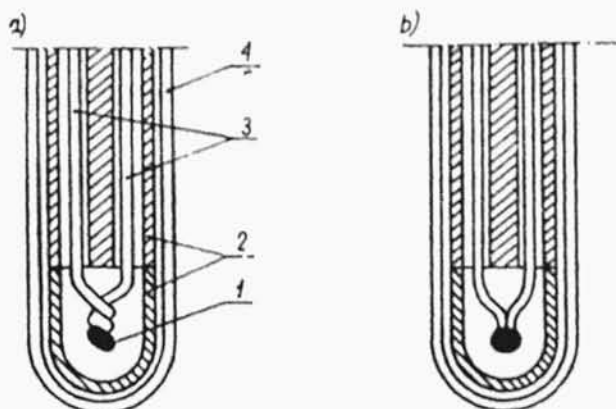
Termometr termoelektryczny składa się (podobnie jak termometr oporowy) z czujnika, miernika i linii łączeniowej.



Rys.2.15. Schemat termometru termoelektrycznego z miernikiem EWO: A, B - materiały termoelementu, A, B' - materiały zastępcze, z których wykonano przewód kompensacyjny, R_w - opornik wyrównawczy, t_x - temperatura mierzona, t_0 - temperatura spoin odniesienia

W większości układów stosowanych do pomiarów przemysłowych zbędne jest dodatkowe źródło zasilania, co jest dodatkową zaletą. Schemat najprostszego termometru termoelektrycznego pokazano na rys.2.15. Jako miernik w tym przypadku może być zastosowany miliwoltomierz z podziałką w $^{\circ}\text{C}$. Czujnik termometru termoelektrycznego jest zbudowany podobnie jak czujnik termometru oporowego (rys.2.8) z tą jednak różnicą, że do zacisków w głowicy zamiast przewodów miedzianych doprowadza się końce przewodów, z których wykonany jest termoelement. Sposób wyko-

niania spoiny pomiarowej pokazano na rys.2.16. Spoina może być wykonana drogą zgrzewania końców przewodów lub przez spajanie



Rys.2.16. Sposób wykonania czujnika termometru termoelektrycznego: a) spoina skręcona, b) spoina prosta; 1-spoina pomiarowa, 2 - izolacja ceramiczna, 3-przewody termoelementu, 4 - rura ochronna

np. srebrem, co zgodnie z prawem trzeciego metalu nie zmienia charakterystyki termoelementu.

Przewody kompensacyjne

Nazwa ta nie jest adekwatna do przeznaczenia tych przewodów, gdyż mają one na celu przedłużenie termoelementu do miejsca gdzie jest możliwe stabilizowanie temperatury spoiny odniesienia (zimnego końca). Zbudowane są one z dwóch przewodników o takich samych właściwościach termoelektrycznych, jak przewody termoelementu w zakresie temperatur od 0 do 200°C. Ma to istotne znaczenie, gdyż np. dla termoelementu PtRh-Pt przewody są wykonane ze stopów metali nieszlachetnych zamiast platyny, co znacznie obniża koszty instalacji. Poza tym przewody kompensacyjne ułatwiają montaż instalacji. W czasie montażu należy określić sposób połączenia przewodu kompensacyjnego z termoelementem. W tym celu zwierają się druty w jednym końcu przewodu kompensacyjnego i dla tak wykonanego "termoelementu" określa się biegunowość (np. po podgrzaniu spoiny). Analogicznie określa się biegunowość termoelementu znajdującego się w czujniku. Druty o zgodnej biegunowości łączą się razem.

Wymagania dotyczące przewodów kompensacyjnych podane są w normie PN/M-53859.

Istnieje kilka typów przewodów kompensacyjnych w zależności od rodzaju termoelementu, z którym powinny współpracować. Aby nie zachodziły pomyłki, są one oznaczone barwnie na zewnętrznym oplocie izolacyjnym.

Według podanej wyżej normy obowiązują następujące oznaczenia przewodów:

PtRh - Pt	- kolor biały,
NiCr - Ni	- kolor zielony,
Fe - Konst	- kolor niebieski
Cu - Konst	- kolor brązowy.

Linia łączeniowa w termometrach termoelektrycznych składa się z przewodów kompensacyjnych i przewodów miedzianych. Wymagania dotyczące przewodów kompensacyjnych omówiono powyżej, dla przewodów miedzianych podane są one w normie PN-62/M-53858. Normę tę omówiono w punkcie dotyczącym linii łączeniowych dla termometrów oporowych. Należy pamiętać, że w metodzie wychyleniowej oporność linii zewnętrznej powinna odpowiadać wymaganiom mierników. Ewentualne korekty przeprowadza się przy zastosowaniu opornika wyrównawczego.

Sposób stabilizacji temperatury spiny odniesienia

Istnieją następujące metody stabilizacji temperatury spiny odniesienia (tzw. zimnych końców):

- 1) w temperaturze punktu lodu 0°C (dokładność $\pm 0,01\text{ K}$),
- 2) w temperaturze otoczenia 20°C (dokładność $\pm 5\text{ K}$),
- 3) w termostatach elektrycznych - zazwyczaj $t_0 > 20^{\circ}\text{C}$ (dokładność od $\pm 0,1$ do $\pm 0,5\text{ K}$),
- 4) za pomocą elektrycznych kompensatorów temperatury odniesienia (w temperaturze 0°C lub 20°C ; dokładność $\pm 1\text{ K}$).

Stabilizacja w punkcie lodu polega na odtworzeniu temperatury tego punktu w naczyniu Dewara (termos). Należy pamiętać, że w celu otrzymania dużej dokładności odtworzenia temperatury, lód powinien być otrzymany z wody destylowanej. Naczynie uzupełnia się również wodą destylowaną o temperaturze

bliskiej 0°C . Stabilizacja spójny odniesienia w temperaturze punktu lodu jest kłopotliwa, jednak ze względu na wysoką dokładność (maksymalnie $\pm 0,001\text{ K}$) bywa stosowana w pomiarach laboratoryjnych.

Stabilizacja w temperaturze otoczenia jest najprostsza i bywa stosowana jedynie w niektórych pomiarach przemysłowych. Należy zgodnie z normą PN-62/M-53858 sprawdzić, czy błąd powstały z wahań temperatury odniesienia nie przekracza $1/5$ błędu określonego klasą dokładności miernika.

Przykład

Miernik EWO klasy $\delta_{\max} = 1,0$ i zakresie pomiarowym $0 + 400^{\circ}\text{C}$ zastosowano wraz z termoelementem do pomiaru temperatury

$t_x = 105^{\circ}\text{C}$. Zimne końce termoelementu stabilizowano w temperaturze odniesienia $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$ z dokładnością $\Delta t_0 = \pm 4\text{ K}$. Sprawdzić, czy stabilizacja temperatury odniesienia spełnia wymagania PN-62/M-53858?

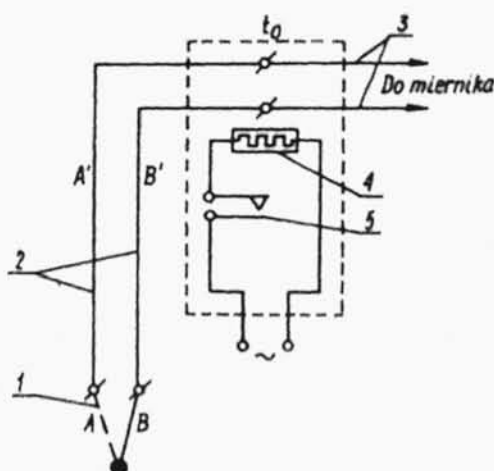
Błąd dopuszczalny wynosi

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{dop}} &= \frac{1}{5} \delta_{\max} (X_{\max} - X_{\min}) \cdot \\ &\cdot 10^{-2} = \frac{1}{5} \cdot 1 \cdot (400 - 0) \cdot \\ &\cdot 10^{-2} = 0,8\text{ K}.\end{aligned}$$

Ponieważ $\Delta t_0 > \Delta_{\text{dop}}$ należy zastosować dokładniejszą stabilizację temperatury.

Rys.2.17. Termostat elektryczny zaciskowy: 1 - spójna pomiarowa, 2 - przewody kompensacyjne, 3 - grzejnik, 4 - regulator temperatury

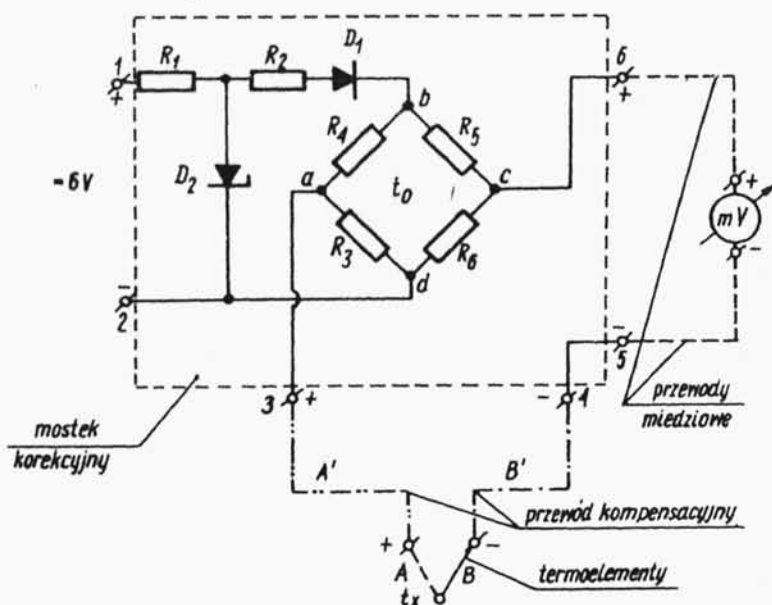
Termostaty elektryczne zaciskowe stosowane są do pomiarów przemysłowych (rys.2.17). Działają one na zasadzie stabilizacji temperatury spójny odniesienia w zamkniętej izolowanej komorze. Komora wyposażona jest w grzejnik współpracujący z układem automatycznej regulacji. Temperatura odniesienia zim-



nej spoiny wynosi 50°C i zgodnie z normą PN-70/M-53870 nie powinna się wahać przy zmianach temperatury otoczenia od 10 do 40°C oraz napięcia zasilania $\pm 10\%$ o więcej niż $\pm 2\text{K}$.

Istnieją również ultratermostaty laboratoryjne, gdzie w komorze wypełnionej wodą lub olejem znajduje się oprócz grzejnika również chłodnica i mieszadło. Zakres roboczy ultratermostatu UTP produkcji polskiej wynosi -30 do $+200^{\circ}\text{C}$, zaś dokładność stabilizacji od $\pm 0,1$ do $\pm 0,03\text{K}$. Schemat takiego ultratermostatu wykorzystanego do sprawdzania termometrów pokazano na rys.2.31.

Elektryczne kompensatory temperatury odniesienia KTO (zwane też puszką kompensacyjną) składają się z dwóch niezależnych części mostka elektrycznego (rys.2.18) i zasilacza. Mostek zbudowany jest z oporników R_3, R_4, R_5 i R_6 o różnych termicznych współczynnikach zmian oporności. Jest on zrównoważony w znamionowej temperaturze t_0 (0°C lub 20°C). Zadaniem diod D_1 i D_2 jest stabilizacja napięcia zasilającego mostek U_{ac} w przypadku wahań temperatury otoczenia. Kompensatory elektryczne działają na tej zasadzie, że gdy zmienia się temperatura otoczenia t_0 zostaje zachwiana równowaga mostka, a więc:



Rys.2.18. Schemat elektryczny kompensatora temperatury odniesienia KTO

($R_3/R_6 \neq R_4/R_5$). W związku z tym pojawia się w punktach a-c napięcie niezrównoważenia mostka, które sumuje się algebraicznie z napięciem pochodzącym od termoelementu U_{3-4} . Napięcie wynikowe jest mierzone przez miernik - miliwoltomierz. Mostek kompensuje zmiany temperatury odniesienia w granicach -5 do $+50^{\circ}\text{C}$ z dokładnością ± 1 do 2°C .

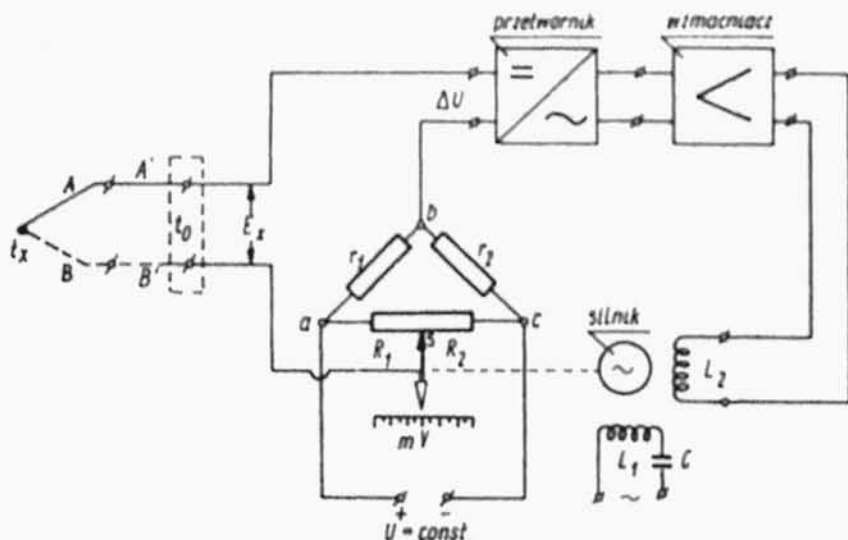
Układy pomiarowe termometrów termoelektrycznych

Pomiar metodą wychyleniową z zastosowaniem miernika magnetoelektrycznego o ruchomej cewce typu EWO (rys.2.15) należy do najprostszych układów stosowanych w pomiarach przemysłowych. Spoina odniesienia może być umieszczona w temperaturze otoczenia lub może być zastosowany elektryczny kompensator temperatury odniesienia (KTO). Najmniejszy zakres pomiarowy takiego termometru przy zastosowaniu termoelementu Fe-Konst wynosi $0 - 150^{\circ}\text{C}$, a dokładność pomiaru: $\pm 1\%$. Należy pamiętać o dopasowaniu oporności linii zewnętrznej R_L do wymagań miernika za pomocą opornika wyrównawczego R_w .

Pomiar metodą kompensacyjną (zerową) z zastosowaniem elektrycznego kompensatora napięciowego należy do dokładnych metod pomiarowych. W metodzie kompensacyjnej (zerowej) mierzoną siłę termoelektryczną E_x porównuje się z napięciem kompensacyjnym U_k . Odczyt dokonuje się w chwili, gdy zachodzi równość obu napięć, tzn. $E_x = U_k$, co obserwuje się na galwanometrze włączonym w obwód pomiarowy. Regulacja napięcia kompensacyjnego może odbywać się ręcznie lub automatycznie. Uproszczony schemat kompensatora ręcznego pokazano na rys.2.19.

Przed pomiarem należy przy ustawieniu wyłącznika w położeniu A przeprowadzić adiustację galwanometru, a następnie sprawdzić wartość prądu kompensacji I_k . Czynność tę wykonuje się opornikiem R_r przy ustawieniu wyłącznika w położeniu K. Regulację przeprowadzamy do chwili, aż nastąpi równość między napięciem pochodzącym od ogniwa normalnego E_n , a spadkiem napięcia pochodzącym od baterii B na oporniku porównawczym R_g . W chwili zrównania się napięć słuszna jest zależność $E_n - I_k \cdot R_g = 0$ i galwanometr wskazuje zero. Dokładność wyregulowania prądu kompensującego I_k ma istotny wpływ na wyniki pomiarowe. Czynność tę przeprowadza się jeden raz dla ca-

go, indukcyjnego silnika wykonawczego. Silnik ten porusza suwak s , aż do zaniku różnicy napięcia $\Delta U = E_x - U_{s-b}$. Odczyt wykonuje się w miejscu położenia suwaka na podzielnicy. Budowa przyrządu jest bardzo zbliżona do układu mostkowego równoważonego samoczynnie, który stosuje się w termometrii oporowej (rys.2.12). W praktyce budowane są uniwersalne przy-



Rys.2.20. Schemat ideowy samoczynnego kompensatora napięciowego: A, B - termoelement, A', B' - przewód kompensacyjny, r_1 , r_2 - oporniki stałe, R_1 , R_2 - oporniki sprzężone mostka, L_1 - uzwojenie wzbudzenia, L_2 - uzwojenie sterujące silnika

rzędy, w których dzięki wymianie skrzynki z opornikami uzyskuje się przystosowanie do jednej z podanych metod. Przyrządy mają wbudowane przełączniki, dzięki którym mogą mierzyć oraz rejestrować wyniki nawet z 12 termoelementów. Dokładność tych rejestratorów wynosi od 0,25 do 0,5%.

2.3.5. PIROMETRY

W pirometrach wykorzystuje się zależność między temperaturą ciała a ilością wypromieniowanej energii. Czujnik pirometru nie styka się z ciałem, którego temperaturę mierzy, a pomiar jest dokonywany na drodze optycznej - dlatego przyrządy te nazywane są termometrami bezstykowymi. Ponieważ pirome-

try umieszcza się w pewnej odległości od ciała, którego temperatura jest mierzona, należy zwrócić uwagę na prawidłowe skierowanie czujnika przyrządu. Półożenie pirometru kontroluje się wzrokiem, korzystając z układu optycznego przyrządu. Dużą zaletą pirometrów jest krótki czas pomiaru, wynoszący kilka do kilkunastu sekund. Przy zastosowaniu czujnika fotoelektrycznego można je stosować do rejestracji temperatur szybkozmiennych.

Ze względu na zasadę działania rozróżnia się trzy typy pirometrów:

- radiacyjne,
- monochromatyczne,
- barwowe.

Podstawowe wymagania dotyczące pirometrów są zawarte w normach PN-71/M-53930 ÷ 53932.

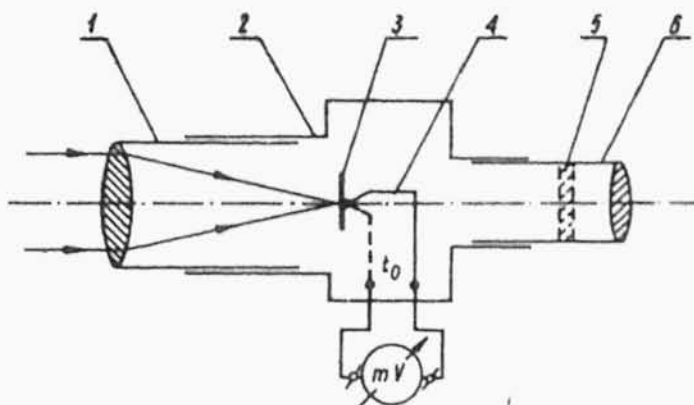
Pirometr radiacyjny (całkowitego promieniowania) działa wykorzystując prawo Stefana Boltzmana zapisane równaniem

$$E = C_0 \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad W/m^2, \quad (2.22)$$

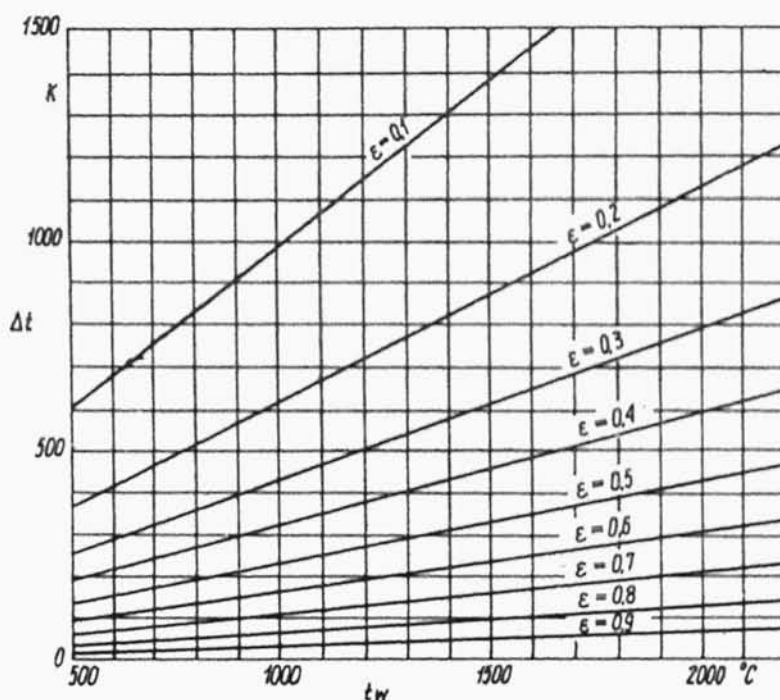
gdzie:

- E - ilość wypromieniowanej energii,
- C_0 - stała promieniowania, $C_0 = 5,6697 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$,
- ε - współczynnik emisyjności,
- T - temperatura ciała, K.

Schemat pirometru radiacyjnego pokazany jest na rys.2.21. Wewnątrz pirometru znajduje się detektor promieniowania w postaci stosu termoelementów 4. Na spoinach pomiarowych termoelementów skupiona jest wiązka promieniowania wysyłanego przez mierzone ciało. Zimne końce termopar znajdują się w obudowie i mają w przybliżeniu jej temperaturę. Zakres pomiarowy pirometrów radiacyjnych jest bardzo szeroki i wynosi od 0 do 6000°C . Do pomiarów technicznych używa się pirometrów o zakresie wskazań od 800 do 1600°C i dokładności wskazań wynoszącej od ± 15 do ± 20 K. Zadaniem obserwatora jest skierowanie osi optycznej przyrządu na ciało, którego temperatura jest mierzona. Powierzchnia ciała powinna zakrywać całe pole widzenia czujnika. Czujnik pirometru łączy się linią dwuprzewodową



Rys. 2.21. Schemat pirometru radiacyjnego (całkowitego promieniowania): 1 - obiektyw, 2 - obudowa, 3 - płytka pokryta czernią platynową, 4 - termoelement, 5 - filtr szary, 6 - okular



Rys. 2.22. Nomogram z poprawkami Δt do wskazań pirometrów radiacyjnych: ϵ - emisyjność mierzonego ciała, t_w - temperatura mierzona, $^{\circ}\text{C}$, Δt - poprawka, K.

z miernikiem, którym jest miliwoltomierz z podziałką w $^{\circ}\text{C}$. Oporność linii łączeniowej należy dopasować do wymagań miernika. Wyniki odczytane z miernika są słuszne dla ciał doskonale czarnych. Ponieważ większość ciał ma własności ciał szarych, należy pomiar wykonywać w warunkach odpowiadających modelowi ciała czarnego lub obliczyć poprawkę. Rzeczywistą wielkość temperatury można określić z zależności

$$T_r = T_w \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}} = T_w + \Delta t, \text{ K}, \quad (2.23)$$

gdzie:

T_r - temperatura rzeczywista, K,

T_w - temperatura wskazywana, K,

ε - współczynnik emisyjności całkowitej ciała.

Δt - poprawka określona z nomogramu (rys.2.22), K.

Wartość współczynników emisyjności całkowitej dla niektórych ciał pokazano w tabelicy 2.3.

Tabela 2.3

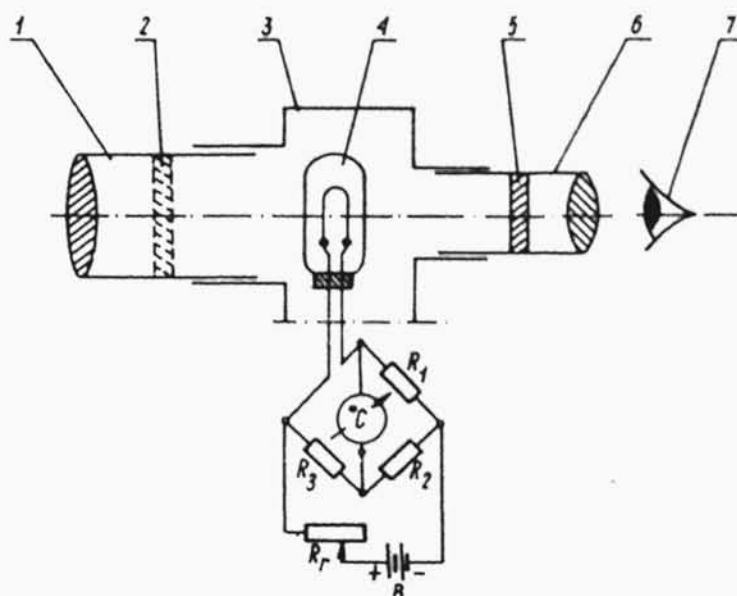
Współczynnik emisyjności ε niektórych ciał szarych

Lp.	Nazwa materiału	Współczynnik emisyjności całkowitej dla $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$	
		ε	$\varepsilon_{0,65}^{1)}$
1	Aluminium czyste (utlenione)	0,1 (0,4)	0,22(0,4)
2	Cegła szamotowa	0,75 - 0,9	0,6 - 0,7
3	Miedź czysta (utleniona)	0,1 - 0,25	0,1(0,7)
4	Sadza	0,95 - 0,97	-
5	Węgiel	0,79 - 0,81	0,8 - 0,93
6	Stal czysta (utleniona)	(0,8 - 0,98)	0,35 (0,8)
7	Żeliwo czyste (utlenione)	(0,64 - 0,78)	0,37 (0,7)
8	Żużel płynny	-	0,6

¹⁾ $\varepsilon_{0,65}$ - współczynnik emisyjności odpowiadający barwie czerwonej o długości fali $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$.

Pirometr monochromatyczny (rys.2.23) ma układ optyczny podobny do pirometru radiacyjnego. Wewnątrz obudowy znajduje się żarówka pirometryczna z żarnikiem wolframowym w kształcie łuku. W czasie pomiaru zmienia się jasność żarnika włączonego

w układ mostka Wheatstone'a dzięki regulacji napięcia zasilającego mostek za pomocą opornika R_r .



Rys.2.23. Schemat pirometru monochromatycznego:
1 - obiektyw, 2 - filtr szary (II zakres), 3 - obudowa, 4 - żarówka z włóknem wolframpowym, 5 - filtr czerwony, 6 - okular, 7 - obserwator

Obserwator wzrokiem określa, czy nastąpiło zrównanie się jasności świecenia środkowej części żarnika z powierzchnią emitującą promieniowanie. Napięcie niezrównoważenia mostka jest miarą temperatury ciała; miernik zaopatrzony jest w podziałkę w $^{\circ}\text{C}$. Pomiar dokonuje się w wąskim paśmie promieniowania ($\lambda = 0,65 \mu\text{m}$) przez wprowadzenie filtra czerwonego. W przedziale tym oko ludzkie wykazuje dużą wrażliwość, a jednocześnie promieniowanie odpowiada stosunkowo niskim temperaturom.

Produkowany w Polsce pirometr EP-7 ma następujące parametry:

- zakres pomiaru od 800 do 1400°C i od 1200 do 2000°C ,
- błąd pomiaru w pierwszym zakresie wynosi $\pm 20 \text{ K}$, w drugim $\pm 30 \text{ K}$,
- odległość obiektu od czujnika powinna wynosić powyżej $0,6 \text{ m}$.

Wynik pomiarowy jest prawidłowy bez poprawek, jedynie dla ciał czarnych. Dla ciał szarych rzeczywistą wartość temperatury określa się za pomocą wzoru

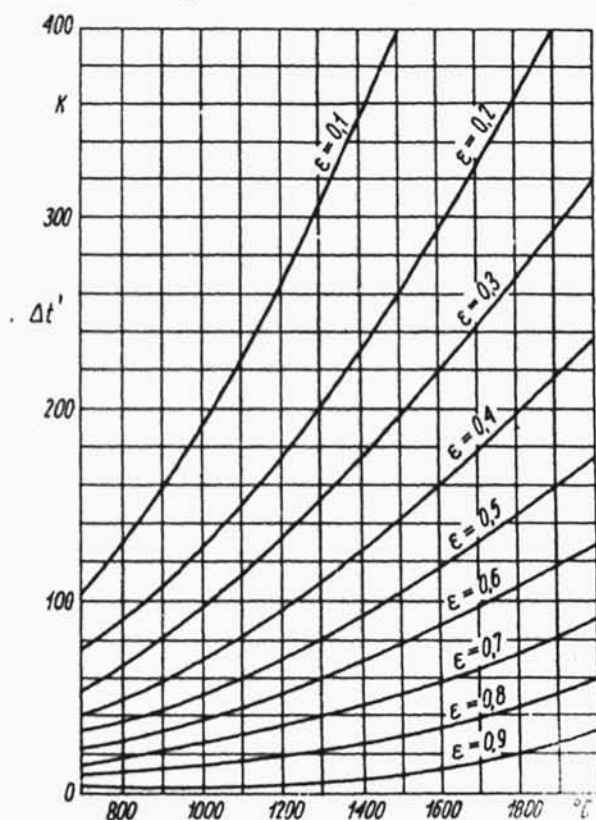
$$T_r = \frac{1}{\frac{1}{T_w} + \frac{\log \varepsilon_{0,65}}{9500}} = T_w + \Delta t', \quad K, \quad (2.24)$$

gdzie:

$\varepsilon_{0,65}$ - współczynnik emisyjności monochromatycznej, (tablica 2.3).

$\Delta t'$ - poprawka określana z nomogramu (rys.2.24), K.

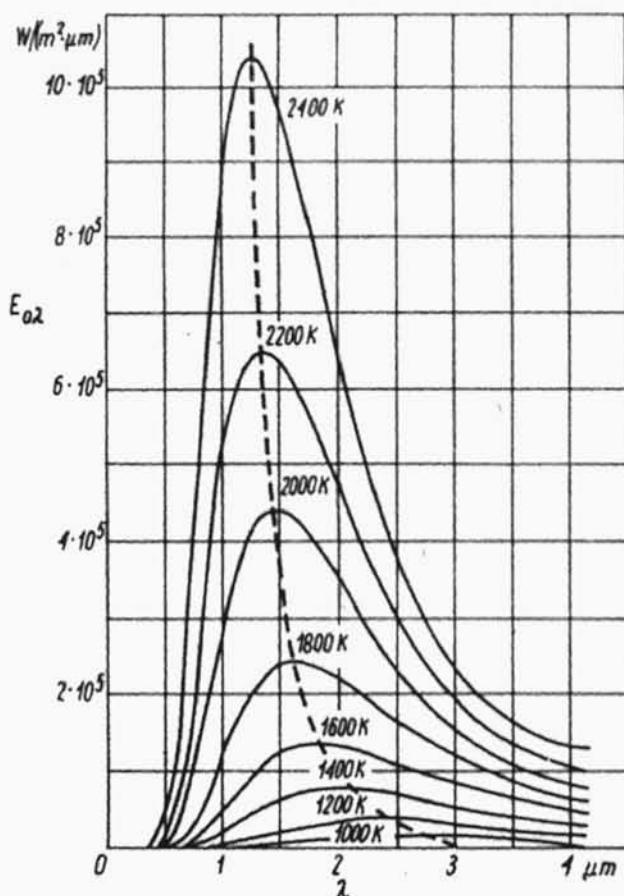
Pozostałe oznaczenia jak we wzorze (2.23).



Rys.2.24. Nomogram z poprawkami Δt do wskazań pirometrów monochromatycznych (oznaczenia jak na rys.4.22)

Pirometr barwowy

Do pomiaru temperatury pirometrem barwowym wykorzystano prawo Plancka, które uzależnia ilość emitowanej energii od długości fali λ i temperatury ciała T . Zależność powyższa przedstawiona jest graficznie na rys.2.25. Dla małych wartości iloczynu λT prawo Plancka można zastąpić z wystarczającą dokładnością prawem Wiena.



Rys.2.25. Zależność zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego $E_{0\lambda}$ od temperatury (wg prawa Plancka)

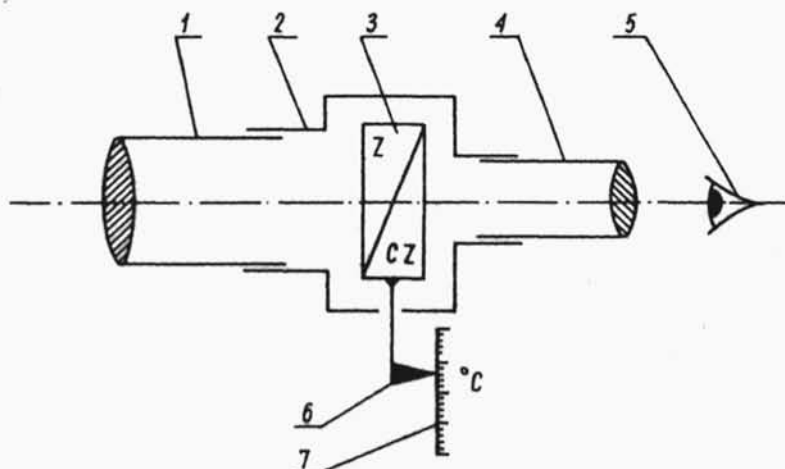
Z rys.2.25 wynika, że ze wzrostem temperatury maksimum emitowanej energii przesunęło się w kierunku mniejszych długości fal. Długość fali, dla której występuje to maksimum w danej temperaturze można określić z prawa przesunięć Wiena.

Wśród pirometrów barwowych największe zastosowanie znalazł pirometr dwubarwny. Miarą temperatury ciała w tej metodzie pomiarowej jest stosunek natężenia promieniowania czerwonego o długości fali $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$ i zielonego - o długości $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ emitowanego przez ciało, co można zapisać za pomocą wzoru

$$\frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}} = f(t), \quad (2.25)$$

gdzie:

E_{λ_1} , E_{λ_2} - wartość energii emitowanej przez jednostkę powierzchni ciała szarego o długości fali odpowiednio λ_1 i λ_2 .



Rys.2.26. Pirometr dwubarwny: 1 - obiektyw, 2 - obudowa, 3 - zespolony filtr zielono-czerwony, 4 - okular, 5 - obserwator, 6 - wskazówka, 7 - podzielnia

Schemat pirometru pokazano na rys.2.26. Pomiar polega na takim ustawieniu zespołu filtrów: czerwonego i zielonego, aby otrzymać w efekcie obraz białoszary. Wartość temperatury odczytuje się z położenia wskazówki przymocowanej do filtrów. Typowe pirometry dwubarwne mają zakres od 1200 do 1400°C , zaś dokładność wskazań wynosi od ± 20 do ± 30 K. Zaletą pirometrów

dwubarwnych jest niezależność mierzonej temperatury od współczynnika emisyjności ciała, co eliminuje potrzebę wprowadzania poprawek. Wynika to z faktu, że dla ciał szarych zmniejsza się bezwzględna wartość wypromieniowanej energii, natomiast stosunek tych wartości dla dwóch barw czerwonej i zielonej pozostaje niezmienny. Zależność tę można określić wzorem

$$\frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}} \approx \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} \frac{B_{\lambda_1}}{B_{\lambda_2}}, \quad (2.26)$$

ponieważ dla ciała szarego współczynniki emisyjności dla różnych długości fali mają podobną wartość, tzn. $\epsilon_{\lambda_1} \approx \epsilon_{\lambda_2}$

2.4. SPRAWDZANIE TERMOMETRÓW

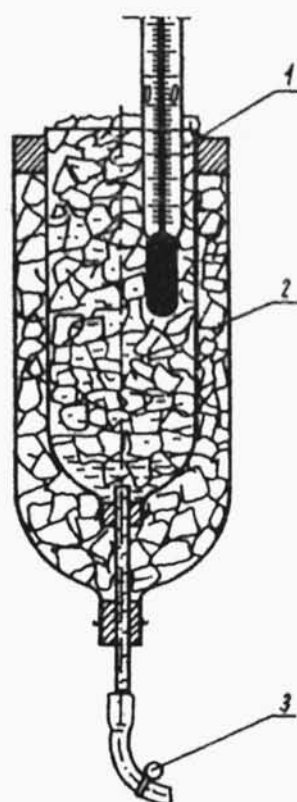
2.4.1. SPRAWDZANIE SZKŁANYCH TERMOMETRÓW LABORATORYJNYCH

Sprawdzanie termometrów polega na oględzinach zewnętrznych oraz kontroli wymiarów, zamocowania podzielnicy względem kapilary, dokładności wskazań i zbadaniu zjawiska starzenia.

Sprawdzenie dokładności wskazań przeprowadza się metodą stałych punktów termometrycznych lub przez porównanie wskazań termometru sprawdzanego ze wskazaniami termometrów kontrolnych.

Sprawdzenie wskazań w stałych punktach termometrycznych

Sprawdzenie to jest najczęściej realizowane w punkcie topnienia lodu lub punkcie potrójnym wody. Przed przystąpieniem do sprawdzania termometry przez okres doby powinny znajdować się w temperaturze pokojowej. W czasie sprawdzania termometry umieszcza się w położeniu pionowym zanurzone do wysokości wystającego



Rys.2.27. Urządzenie do realizacji punktu lodu