Instytut Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Politechnika Wrocławska

Laboratorium Pomiarów Wielkości Nieelektrycznych

Pomiary temperatur metodami stykowymi

Wrocław 2010

Program ćwiczenia

1. Zmierzyć charakterystyki statyczne wskazanych czujników temperatury: termoelementu, termorezystorów metalowych, termistorów i czujników półprzewodnikowych w uzgodnionym z prowadzącym przedziale temperatur. Uzgodnić z prowadzącym wartości temperatur zadawanych w kalibratorze temperatury TCS 140.
   OSTATNIA NASTAWA kalibratora TCS 140 (przed wyłączeniem kalibratora) powinna być zawsze bliska temperatury otoczenia niezależnie od realizowanego cyklu zmian nastaw kalibratora.
2. Zapisać wszystkie charakterystyki badanych czujników w postaci analitycznej uwzględniając błędy podstawowe pomiarów (w tym błędy przyrządów pomiarowych oraz błędy kalibratora TCS 140) oraz wskazać źródła błędów dodatkowych. Dla każdego badanego czujnika należy przyjąć postać funkcji analitycznej zgodną z podaną w instrukcji. Do obliczeń wykorzystać arkusz kalkulacyjny.
3. Sporządzić wykresy charakterystyk. Sprawdzić poprawność takiego odwzorowania dla kilku temperatur. Określić czułość każdego z czujników w różnych temperaturach.
4. Dla czujników znormalizowanych porównać uzyskane wyniki z wartościami odpowiednich parametrów podanych w polskich normach.

Wprowadzenie

Mimo dużej różnorodności czujników do pomiaru temperatury wyróżnić można 4 podstawowe grupy czujników elektrycznych do stykowych pomiarów temperatury, które przedstawiono w tab. 1 i tab. 2. W tabeli 1 podano jednocześnie procentowy udział poszczególnych grup czujników w stosunku do wszystkich sprzedawanych czujników temperatury. Podano też temperaturowy przedział pracy poszczególnych grup czujników.

Tabela 1.

Rodzaj czujnika	Udział w sprzedaży %	Zakres temperatury pracy °C
Termopary	50	–273–3000
Rezystory termometryczne	27	–273–1000
Termistory	13	–273–250
Złącza p-n	5	–273–150
Pirometry	5	–10–3000

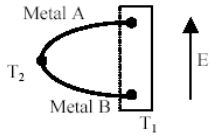
Wybór czujnika do konkretnego zastosowania uwzględnić musi wiele różnych kryteriów, takich jak:
– zakres temperatury pracy,
– czułość,
– stałość charakterystyki – powtarzalność (wymienialność czujników),
– dokładność,
– stopień komplikacji układu pomiarowego współpracującego z czujnikiem, w zależności od celu pomiaru,
– stała czasowa.

TERMOELEMENTY

Obecnie najbardziej rozpowszechnionym czujnikiem do pomiaru temperatury jest termoelement. Siła elektromotoryczna termoelementu, zwana siłą termoelektryczną E, mierzona jest na zaciskach termoelementu (termopary) z dwu różnych metali lub stopów, w obwodzie jak na rys. 1. Jeśli jedne końce materiałów A i B znajdują się w temperaturze T_1, a drugie w temperaturze T_2, to zależność siły termoelektrycznej od tych temperatur można przedstawić w postaci równania:

$$E = k_t \left\{ T_2 - T_1 \right\} \tag{1}$$

gdzie: k_t – czułość termoelektryczna w przedziale $T_2 - T_1$.



Rys. 1. Termoelement

Warunkiem jednoznaczności pomiaru temperatury T_2 jest znajomość wartości temperatury T_1. Najczęściej temperatura T_1 ma stałą i znaną wartość (temperatura odniesienia).

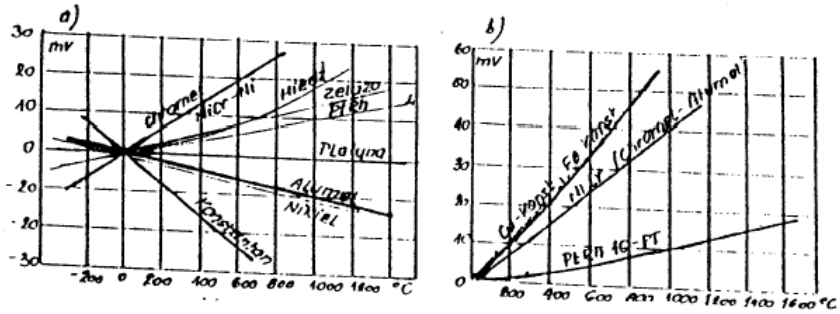
W praktyce jako temperaturę odniesienia przyjmuje się:

– temperaturę otoczenia (mniej dokładne pomiary przemysłowe),

– temperaturę nasyconego roztworu wody z lodem: dokładność uzyskania tej temperatury wynosi od ±0,1 °C do ±0,0001 °C,

– temperaturę termostatu o innej temperaturze niż 0 °C i temperatura otoczenia (np. T = 50 °C).

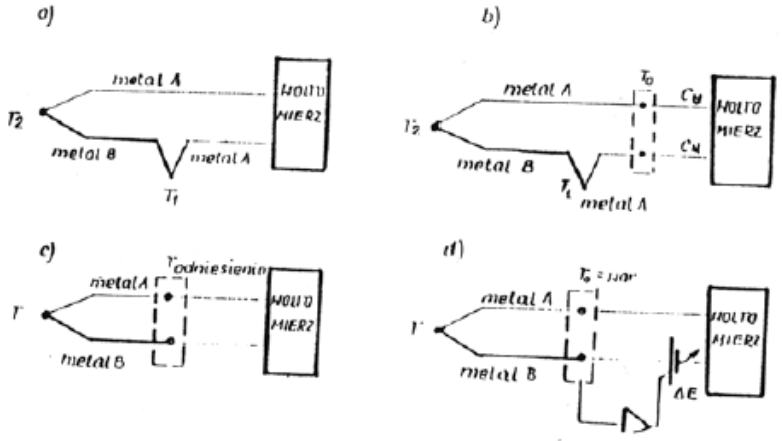
Spotyka się również rozwiązania przyjmujące za temperaturę odniesienia temperaturę otoczenia, przy jednoczesnym zastosowaniu członu korygującego wskazania do znamionowej temperatury odniesienia (rys. 3d). Powszechnie znane tabele (podane np. przez Polskie Normy) oraz wykresy – rys. 2b – odzwierciedlają zależność (1) dla T_1 = 0 °C = const. Jak widać z rys. 2b współczynnik k_t występujący w zależności (1) ma wartość rzędu kilkunastu-kilkudziesięciu μV/°C.



Rys. 2. Zależność siły termoelektrycznej od temperatury:
a) dla różnych metali, b) dla par materiałów

Należy podkreślić, że znormalizowanie charakterystyk termometrycznych termoelementów jest możliwe dzięki dużej powtarzalności tych charakterystyk. Stwarza to z kolei możliwość wymiany termoelementów, bez uwzględnienia ich indywidualnych charakterystyk, z zachowaniem dokładności przewidzianych Normami.

Wymienialność termoelementów oraz ich stosunkowo niska cena stanowią poważne zalety decydujące o szerokim zastosowaniu tych czujników temperatury. Poważną wadą termoelementów stanowi mała wartość siły termoelektrycznej (rys. 2b), co w połączeniu z wymaganiem stabilizacji lub kompensacji temperatury odniesienia stawia (zależnie od zadanej dokładności pomiaru) określone wymagania układowi pomiarowemu. Idee układów pomiarowych z wykorzystaniem termoelementów przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Układy do pomiaru temperatury z wykorzystaniem termoelementów

Idea korekcji, przedstawiona na rys. 3d, polega na dodaniu w szereg z termoparą układu dodającego (z uwzględnieniem znaku) wartość $\Delta E(T_{0,zn} - T_{otocz})$, uwzględniającą zmianę wartości E na skutek zmiany temperatury odniesienia z wartości $T_{0,zn}$ do wartości T_{otocz}. Sygnał korygujący ΔE może być również przetwarzany na postać cyfrową i dodany bezpośrednio do cyfrowego wskaźnika temperatury. Metoda ta pozwala ograniczyć wpływ wahań temperatury otoczenia (i odniesienia) do około 0,01 K na 1 K zmian tej temperatury. We współczesnych systemach pomiarowych temperatura T_1 jest mierzona niezależnym czujnikiem półprzewodnikowym, jej wartość przetwarzania ma postać cyfrową a sygnał korygujący ΔE uwzględniany w sposób numeryczny.

TERMOREZYSTORY METALOWE

Rezystancyjne czujniki termoelektryczne w (literaturze anglosaskiej RTD) wykorzystują zależność zmian rezystancji metali w funkcji temperatury.

Metale stosowane jako czujniki rezystancyjne mają dodatni temperaturowy współczynnik rezystancji oraz stałą i powtarzalną zależność rezystancji od temperatury, co umożliwia znormalizowanie ich charakterystyk termometrycznych, podobnie jak w wypadku termoelementów (patrz dodatek).

Znormalizowane w Polsce rezystory termometryczne:

– platynowy Pt100,
– niklowy Ni100,
– miedziany Cu100,

mają rezystancje R_0 = 100,0 Ω w temp. 0 °C.

Charakterystykę termometryczną termorezystorów można (w zakresie t > 0 °C) aproksymować wielomianem drugiego stopnia 4.

$$R = R_o(1 + At + Bt^2) \tag{2}$$

gdzie: t – temperatura w °C,

A = 3,9083 10^{-3} K^{-1} dla platyny
B= – 0,5775 10^{-6} K^{-2}

A= 5,43 10^{-3} K^{-1} dla niklu
B = 7,85 10^{-6} K^{-2}

A = 4,25 10^{-3} K^{-1} dla miedzi
B = 0

Względne zmiany rezystancji R_t/R_o podano na rys. 4.

Jak widać z podanych wartości współczynników A i B w podanym zakresie temperatur (do 150 °C) rezystancja miedzi zależy liniowo od temperatury.

Temperaturowy współczynnik rezystancji definiuje się jako:

$$\alpha_t = \frac{\mathrm{d}R_t}{R\mathrm{d}t} \tag{3}$$

co po uwzględnieniu zależności (2) można zapisać w postaci:

$$\alpha_t = \frac{A + Bt}{1 + At + Bt^2} \tag{4}$$

a dla miedzi (B = 0)

$$\alpha_t = \frac{1}{\frac{1}{A} + t} = \frac{1}{235 + t} \tag{5}$$

Dla określenia zmian rezystancji termorezystorów stosuje się cały szereg układów pomiarowych. Powszechnie stosowane są układy mostkowe

– dwuprzewodowe (rys. 5a),

– trzyprzewodowe (rys. 5b), kompensujące przy pewnych założeniach wpływ rezystancji doprowadzeń.

Do pomiarów precyzyjnych stosuje się układy czteroprzewodowe (rys. 5c), pozwalające przy dużej rezystancji wewnętrznej woltomierza praktycznie pominąć wpływ rezystancji przewodów doprowadzających czujnik. Układy z rys. 5 b, c nadają się do stosowania przy dużych odległościach czujnika od reszty układu pomiarowego.

Ponieważ termorezystory są czujnikami parametrycznymi, to określenie ich rezystancji wymaga pobudzenia prądem elektrycznym, co wiąże się z nieuniknionym samoogrzewaniem się czujników (ciepło Joula). Jednakże dla czujników o rezystancji 100 Ω moc wydzielona przy prądzie 1 mA wynosi 100 μW, co w większości wypadków stanowi wartość pomijalnie małą. Tzw. błąd samoogrzewania określa się z przyrównania mocy wydzielanej w czujniku z mocą oddawaną do otoczenia

$$I^2 R_\mathrm{t} = k(t - t_\mathrm{os}) \tag{6}$$

gdzie: k – współczynnik strat, mW/K,

t – temperatura czujnika,

t_os – temperatura ośrodka.

Współczynnik temperaturowy rezystancji termorezystorów α jest rzędu 0,4 %/°C, co w przypadku czujnika o rezystancji 100 Ω oznacza zmiany tej rezystancji (czułość) 0.4 Ω/°C. Oznacza to, że napięcie na czujniku zmienia swą wartość o 400 μV/°C przy prądzie zasilającym czujnik o wartości 1 mA. **Jest to wartość o rząd większa niż w przypadku termopar**. Stanowi to w połączeniu z dużą stałością charakterystyk termometrycznych oraz wymienialnością tych czujników, dużą zaletę rezystorów termometrycznych.

Wadę termorezystorów stanowi (wynikająca z technologii) stosunkowo wysoka cena oraz stosunkowo duże wymiary czujników drutowych nawijanych. Znaczne zmniejszenie wymiarów czujnika uzyskuje się w technologii cienkowarstwowej.

TERMISTORY

Termistory są półprzewodnikowymi rezystorami o bardzo dużym ujemnym temperaturowym współczynniku rezystancji (NTC) – rys. 6. Produkuje się również elementy o dodatnim temperaturowym współczynniku rezystancji (PTC).

Charakterystykę termometryczną termistorów aproksymuje się wyrażeniem:

$$R_T = A\mathrm{e}^{\frac{B}{T}} \tag{7}$$

gdzie: A – rezystancja termistora w temperaturze $T = \infty$,

B – stała materiałowa, przeciętnie B = 3000–4000 K,

T – temperatura, K.

W praktyce korzysta się z zależności:

$$R_T = R_{T\mathrm{o}}\mathrm{e}^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\mathrm{o}}\right)} \tag{8}$$

gdzie: R_{T_o} – rezystancja termistora w temperaturze T_o (temperatura odniesienia, najczęściej T_o = 298 K (25°C).

Rezystancja R_{T_o} produkowanych w kraju termistorów zawiera się w granicach od kilku Ω do kilkuset kΩ.

Współczynnik temperaturowy rezystancji termistora obliczony wg definicji (3) wynosi

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2} \tag{9}$$

Wartość współczynnika jest duża, około –4 %/K w temperaturze T_o = 25 °C, co jest największą zaletą termistorów. We współczesnych systemach pomiarowych charakterystykę termistorów opisuje się zależnością:

$$\frac{1}{T} = a + b\left(\ln R\right) + c\left(\ln R\right)^3 \tag{10}$$

Należy podkreślić, że w zależnościach (7) – (10) temperaturę podaje się w K.

Duża nieliniowość charakterystyki oraz jej niepowtarzalność (poszczególne egzemplarze mają różne charakterystyki, co uniemożliwia ich znormalizowanie) stanowią zasadnicze wady termistora. Praktycznie każdy układ pomiarowy z termistorem musi być indywidualnie wzorcowany. Częściową wymienialność termistorów osiągnęły niektóre firmy sprzedające serie czujników o zbliżonej do siebie charakterystyce. Spotyka się również czujniki oparte o termistory, ale o zlinearyzowanej charakterystyce.

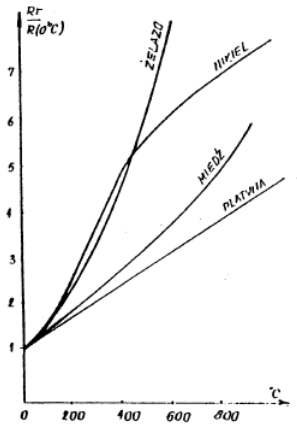
W zasadzie nie ma istotnych różnic w idei układów pomiarowych współpracujących z termistorami i rezystorami metalowymi.

W wypadku termistorów należy zwracać większą uwagę na efekt samoogrzewania się ze względu na mniejsze na ogół wymiary oraz często duża rezystancje czujników.

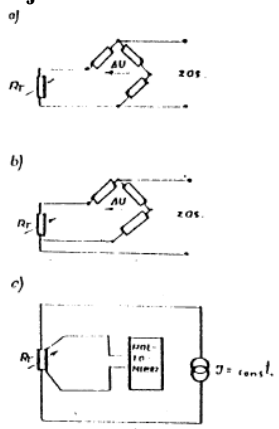
W układach z termistorem nie stosuje się w zasadzie eliminacji rezystancji doprowadzeń, zwłaszcza dla dużych wartości rezystancji termistorów, istnieje natomiast bardzo dużo odmian układów linearyzacji ich charakterystyk termometrycznych.

CZUJNIKI ZE ZŁĄCZEM p-n

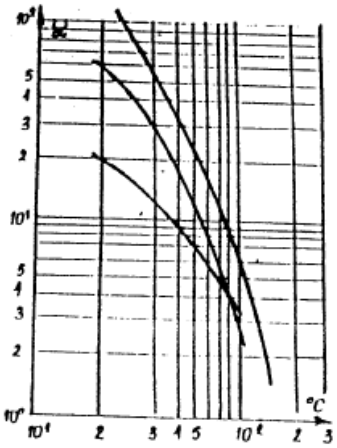
Obecnie obserwuje się rozwój czujników temperatury wykorzystujących zależność napięcia złącza półprzewodnikowego od temperatury. Współczynnik tych zmian wynosi –2 mV/K i w dużym stopniu nie zależy od temperatury (rys.7). Ostatnio obserwuje się wzrost produkcji scalonych czujników temperatury ze złączem p-n np. AD590 firmy Analog Devices. **Czujniki te mają wyjście znormalizowane np. 10 mV/K lub 1 μA/K. Zaletą tych czujników jest liniowa charakterystyka.**



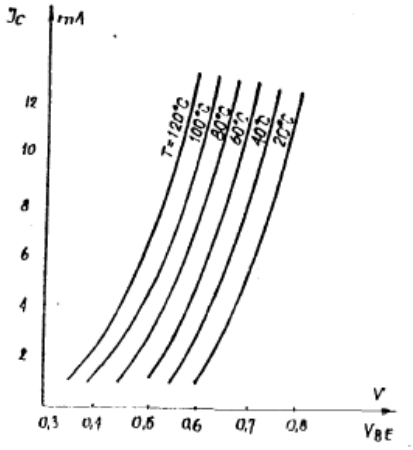
Rys. 4. Względne zmiany rezystancji niektórych metali w funkcji temperatury



Rys. 5. Układy współpracujące z rezystorami termometrycznymi



Rys. 6. Typowe charakterystyki termometryczne termistorów



Rys. 7. Zależność $I_c = f(U_{BE})/V_{CE}$

Tabela 2. Porównanie czujników temperatury

Rodzaj czujnika	Zakres temperatur pracy	Czułość przy 25 °C	Dokładność określenia charakterystyki temperaturowej	Liniowość	Normalizacja
Termoelementy	-270°C –1800 °C	15–60µV/ typ. 1%/K	rzędu pojedynczych K, 0,5 K przy wzorcowaniu	słaba	Pt Rh – Pt Ni Cr – Ni Fe – Ko Cu – Ko
Rezystor platynowy	-250°C –900 °C	ok. +0,5 %K	±0,1K, wyk. lab. ±0,01K	ok. 1% w zakresie do 200 °C	Pt Ni Cu
Termistory	-100°C –450 °C	-5 %K	do ±0,1 K	bardzo nieliniowy	indywid. kal.
Złącze p-n (diody, tranzystory)	-250°C –175 °C	-2 mV/K typ. 0.4 %/K	ok. 1 K	typ. 1%	indyw. kal.

Zadania kontrolne

1. Porównać właściwości (szczególnie zakres pracy, czułość, dokładność, liniowość) czujników do stykowych pomiarów temperatury
2. Omówić zagadnienia współpracy czujnik – układ pomiarowy na przykładzie występujących w ćwiczeniu czujników temperatury.
3. Jakie kryteria decydują o wyborze danego czujnika temperatury?
4. Czym uwarunkowana jest czułość napięciowa rezystancyjnych czujników temperatury?

Uwaga

1. Dodatkowe informacje o czujnikach temperatury i charakterystyki wybranych znormalizowanych czujników temperatury można znaleźć m.in. w materiałach firmowych producentów czujników np.: http://www.kfap.pl/produkt.php?id=112 .

2. Zał. 1. Skrócony opis obsługi kalibratora TCS 140 oraz warunki jego bezpiecznego użycia.

3. Zał. 2. Stanowisko pomiarowe i rozmieszczenie aparatury na stanowisku.

4. Pełne instrukcje i dodatkowe materiały zawarte są w segregatorze na stanowisku pomiarowym w laboratorium.

Załącznik 1.

I. WSKAZÓWKI BEZPIECZNEGO UŻYTKOWANIA KALIBRATORA TCS 140

1. **Przed użyciem pieca kalibracyjnego TCS 140 zapoznaj się z instrukcją obsługi.**

2. **WŁĄCZANIE I WYŁĄCZANIE.**

   Urządzenie może być włączane i wyłączane tylko za zgodą i pod nadzorem prowadzącego zajęcia.

3. **Nastawy i użycie kalibratora muszą być zgodne z instrukcją.**

4. **W trakcie pracy wybrane elementy pieca kalibracyjnego (np. radiator bloku grzewczego) mają temperaturę równą lub zbliżoną do temperatury nastawy. Zakres nastaw wynosi od -50 ^{O}C poniżej temperatury otoczenia do +140 ^{O}C.**

5. **NIE WOLNO WYŁĄCZAĆ ani urządzenia gorącego ani gdy jego temperatura jest <0°C. Przed wyłączeniem należy doprowadzić urządzenie do temperatury bliskiej temperatury otoczenia. Nieprzestrzeganie tej zasady może doprowadzić do uszkodzenia urządzenia.**

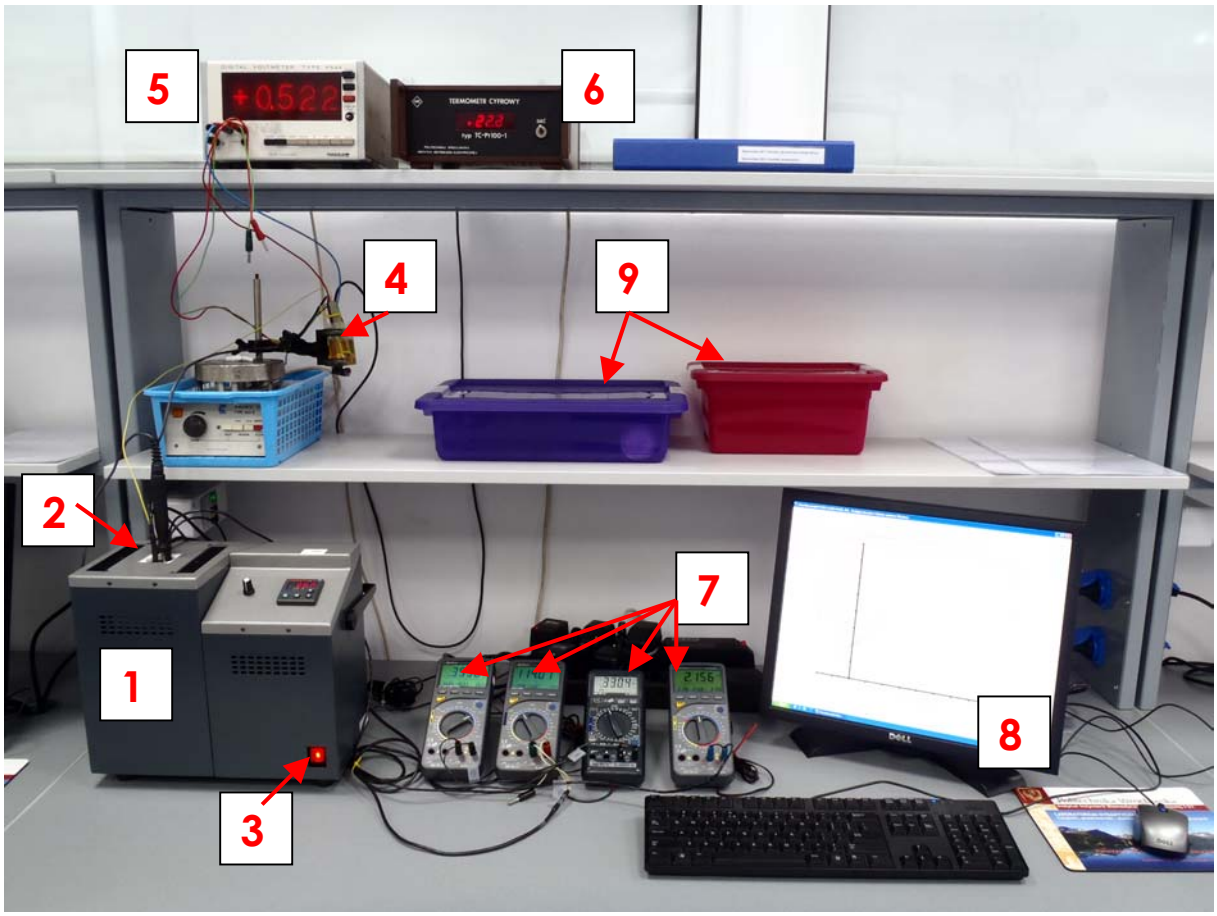
6. **NIE WOLNO WKŁADAĆ czujników (sond) do otworów bloku grzewczego, kiedy przyrząd już osiągnął ustawioną temperaturę różną od temperatury otoczenia. Wstrząs termiczny powoduje niestabilność pracy urządzenia i może uszkodzić elementy sterujące lub elementy ceramiczne bloku grzewczego.**

II. NASTAWA i ODCZYT TEMPERATURY W KALIBRATORZE TCS 140

1. Na rys. II.1. przedstawiono widok panelu nastaw i odczytu aktualnej temperatury.
2. **Aktualna temperatura** bloku grzewczego kalibratora wyświetlana jest na polu odczytowym 1 panelu nastaw **(czerwone cyfry).**
3. **Zadana temperatura** bloku grzewczego kalibratora wyświetlana jest na polu odczytowym 2 panelu nastaw **(żółte cyfry)**.
4. Aby zmienić wartość temperatury zadanej wprowadź na wskaźniku 2. pola odczytowego nową wartość naciskając przycisk **V (mniej)** lub **/\ (więcej)**. Zaakceptuj nastawę poprzez naciśnięcie przycisku 3.
5. Czas, po którym kalibrator osiąga wartość zadaną temperatury oraz czas stabilizacji zadanej temperatury zależne są od wartości bieżącej temperatury oraz nastawionej temperatury. Można je oszacować na podstawie danych technicznych zawartych w instrukcji obsługo kalibratora TCS 140.

Rys. II.1. Panel nastaw i odczytu temperatury (TCS 140)

III. Stanowisko pomiarowe i rozmieszczenie aparatury na stanowisku.



Rys. III.1. Stanowisko pomiarowe i rozmieszczenie aparatury na stanowisku

Oznaczenia:

1. Piec kalibracyjny TCS 140.
2. Blok termostatu ceramicznego kalibratora TCS 140 z wkładką z czujnikami badanymi.
3. Wyłącznik sieciowy TCS 140. **Wyłączać tylko po wcześniejszym wyrównaniu temperatury kalibratora i temperatury otoczenia!**
4. Termostat złącza odniesienia termoelementów.
5. Miernik siły termoelektrycznej STE termoelementów.
6. Miernik temperatury złącza odniesienia termoelementów.
7. Mierniki Metex do pomiaru sygnałów wyjściowych badanych czujników temperatury.
8. PC do gromadzenia i analizy wyników.
9. Pojemniki z czujnikami i materiałami pomocniczymi.