

Laboratorium metrologii

Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych

Temat ćwiczenia: Pomiar temperatury i termowizja

Opracował: Jacek Zapłata

Szczecin 2014

## **Wprowadzenie**

Niniejsze opracowanie powstało jako pomoc do ćwiczeń laboratoryjnych z miernictwa warsztatowego, metrologii i systemów pomiarowych, metrologii oraz podstaw metrologii odrabianych przez studentów Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki ZUT w Szczecinie.

### **1. Cel ćwiczenia**

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych metod pomiaru temperatury. Zapoznanie się z ograniczeniami poszczególnych metod oraz zakresem ich zastosowań. Zdobycie umiejętności samodzielnego wykonywania pomiarów temperatury metodami elektrycznymi oraz pirometrycznymi.

### **2. Wymagany zakres wiedzy**

**Uwaga:**

**- Na końcu instrukcji znajduje się formularz niezbędny podczas przebiegu laboratoriów. Posiadanie wydrukowanego formularza oraz znajomość poniższego wprowadzenia jest warunkiem dopuszczenia do udziału w zajęciach.**

#### **2.1 Jednostki miary temperatury**

Jednostką miary temperatury w układzie SI (Międzynarodowy Układ Jednostek Miar) jest Kelvin. Skala Kelvina jest skalą bezwzględną, tzn. nie występują w niej wartości ujemne. Temperatura 0K (zero kelwinów) jest najniższą możliwą temperaturą jaką może przyjąć jakiekolwiek ciało.

Najczęściej spotykaną w użytku codziennym w Polsce jednostką miary temperatury jest stopień Celsjusza. Temperaturze 0°C odpowiada punkt potrójny zamarzania wody wyznaczony przy swobodnym dostępie powietrza atmosferycznego, natomiast temperaturze 100°C punkt wrzenia wody przy ciśnieniu 1 atmosfery fizycznej (101325 Pa). W krajach anglosaskich najczęściej spotykaną w użytku codziennym jednostką miary jest stopień Farenheita. Temperaturze 0°C odpowiada 32°F natomiast temperaturze 100°C odpowiada 212 °F. W celu przeliczenia jednostek temperatury pomiędzy poszczególnymi skalami wykorzystujemy następujące zależności:

$$T[\text{K}] = t[^\circ\text{C}] + 273,15 \quad (1)$$

$$T[^\circ\text{F}] = 32 + 9/5 * t[^\circ\text{C}] \quad (2)$$

gdzie:

T[K]- temperatura wyrażona w kelwinach

t[°C]- temperatura wyrażona w stopniach Celsjusza

T[°F]- temperatura wyrażona w stopniach Farenheita

W celu rozróżnienia skal, często temperaturę wyrażoną w kelwinach oznacza się wielką literą T, zaś temperaturę wyrażoną w stopniach Celsjusza oznacza się małą literą t. Jednak takie oznaczenie może być kłopotliwe, szczególnie gdy obok symbolu temperatury w stopniach Celsjusza pojawia się oznaczenie czasu, również tradycyjnie oznaczane małą literą t.

#### **2.2 Metody pomiaru temperatury**

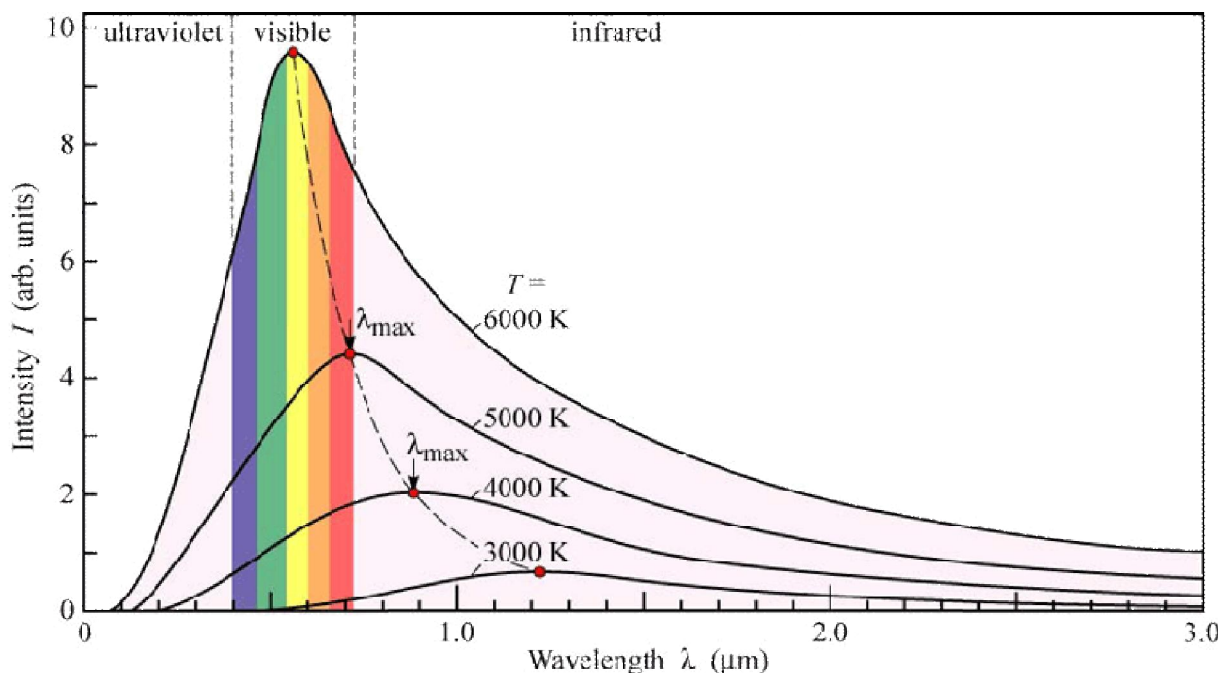
Metody pomiaru temperatury możemy podzielić w zależności od użytkowanych czujników na:

- nielektryczne, które jako czujniki pomiarowe wykorzystują np.:
  - termometry rtęciowe

- bimetale ( równolegle połączone taśmy metale o odmiennych współczynnikach odkształceń cieplnych, bimetale wyginają się na skutek zmiany temperatury)
- farby zmieniające kolor wraz zmianą temperatury
- elektryczne, które jako czujniki pomiarowe wykorzystują np.:
  - czujniki rezystancyjne, termistory
  - termopary
- pomiar zdalne, które jako czujniki pomiarowe wykorzystują np.:
  - pirometry
  - kamery termograficzne

Zasadniczą informacją, którą należy sobie uświadomić przed przystąpieniem do projektowania układu pomiaru temperatury jest, fakt iż dotykowe czujniki temperatury zawsze i tylko i wyłącznie wskazują „swoją temperaturę”. A więc na pogorszenie poprawności wykonywanego pomiaru wpływ mają: oporność cieplna występująca pomiędzy badanym obiektem a czujnikiem, pojemność cieplna użytego czujnika, kontakt czujnika z dodatkowym ciałem o temperaturze różnej od badanego obiektu. W celu obniżenia oporności cieplnej pomiędzy ciałem którego temperatura jest mierzona a czujnikiem, w miejscu kontaktu nanosi się ciekłą warstwę kleju lub smaru termoprzewodzącego. Takie postępowanie ma na celu usunięcie powietrza pomiędzy ciałem a czujnikiem. Nadmierna cieplna rezystancja kontaktowa oraz nadmierna pojemność cieplna czujnika prowadzą do wprowadzenia opóźnień w torze pomiarowym oraz mogą być przyczyną powstawania błędów pomiarowych.

W przypadku bezstykowych urządzeń pomiarowych wartość wskazania uzależniona jest od natężenia promieniowania padającego na detektor urządzenia pomiarowego. Zależność pomiędzy natężeniem promieniowania a temperaturą ciał opisuje rozkład Planck’a.



Rys. 1 Ilustracja rozkładu natężenia promieniowania ciał, wg. prawa Plancka

Natężenie promieniowania obliczone zgodnie z rozkładem Plancka dotyczy przypadku ciał doskonale czarnych. Według definicji ciało doskonale czarne jest to ciało, które pochłania całkowicie promieniowanie na nie padające. Ciała rzeczywiste charakteryzują się zdolnością częściowego odbijania promieniowania padającego na nie. Cechę tę opisuje współczynnik refleksyjności przyjmujący wartość z zakresu (0÷1). Z tego względu na dokładność pomiaru wykonywanego metodą

bezstykową (np. pirometrem) wpływ ma promieniowanie odbite od powierzchni, której temperatura ma być zmierzona.

Zmianę koloru ciała doskonale czarnego wraz ze wzrostem jego temperatury obrazuje prawo Wiena. Zmiana ta wynika z przesuwania się maksimum rozkładu promieniowania. Zmiana położenia wspomnianego maksimum zaznaczona jest na rys. 1 linią przerywaną.

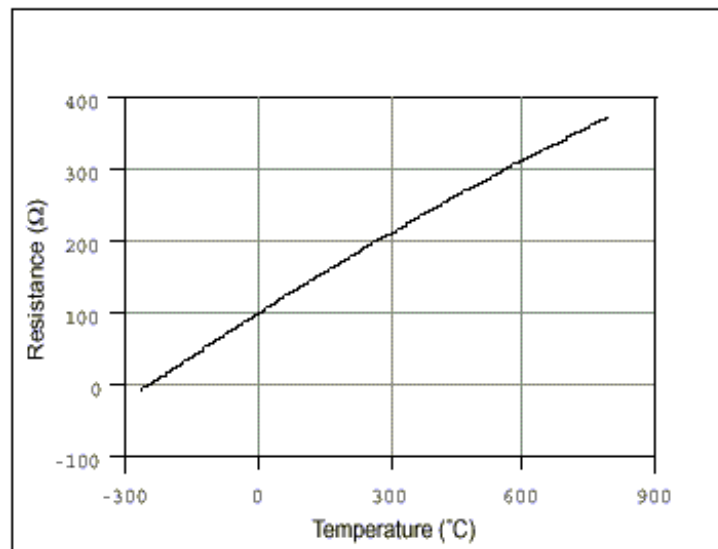
### 2.3 Czujniki rezystancyjne temperatury oraz termistory

Czujniki o rezystancji zmieniającej się wraz ze zmianą temperatury ze względu na sposób budowy dzieli się na metalowe (czujniki rezystancyjne) lub półprzewodnikowe (termistory). W metalowych czujnikach rezystancyjnych zmiana rezystancji czujników odbywa się na skutek zmian wymiarów rezystora, powstałych w wyniku odkształceń cieplnych. W przypadku termistorów półprzewodnikowych zmiana rezystancji ma swoją przyczynę w efektach kwantowych.

Ze względu na fakt, iż pomiar rezystancji wymaga przepływu prądu, podczas projektowania układu pomiarowego korzystającego z czujników termistorowych albo czujników rezystancyjnych należy uwzględnić występowanie zjawiska samonagrzewania się czujników temperatury. Wzrost temperatury czujnika wynikły z przepływu prądu pomiarowego zależy od: natężenia prądu, oporności czujnika oraz od szybkości odprowadzania ciepła od czujnika.

W praktyce przemysłowej do budowy czujników rezystancyjnych wykorzystuje się platynę, rzadziej nikiel. Powszechnie stosowany jest czujnik Pt100. Oznaczenie literowe symbolizuje materiał z którego wykonany jest sensor. Oznaczenie cyfrowe podaje oporność w Ohmach w temperaturze 0°C. Rzadziej stosowane są czujniki Pt500, Pt1000, Ni100, Ni1000.

Zależność pomiędzy rezystancją a temperaturą czujnika nazywana jest charakterystyką termometryczną. W przypadku czujników rezystancyjnych metalowych charakterystyka termometryczna bliska jest zależności liniowej.



Rys. 2. Charakterystyka termometryczna czujnika PT100

Ze względu na małe nachylenie tej charakterystyki, rezystancja okablowania podłączonego do czujnika rezystancyjnego może wprowadzać błąd systematyczny pomiaru. W celu usunięcia wpływu oporności okablowania na dokładność pomiaru stosuje się okablowanie trój- lub czteroprzewodowe.

Charakterystyki termometryczne podstawowych metalowych rezystancyjnych czujników temperatury stabilizowano w normach [4,5]. Normy określają klasy tolerancji czujników: A i B. (patrz tab. 1).

Klasa tolerancji	Tolerancja
A	$\pm ( 0,15+0,002 \cdot t[^\circ\text{C}] )$
B	$\pm ( 0,3+0,005 \cdot t[^\circ\text{C}] )$

Tabela 1. Maksymalny dopuszczalny błąd pomiarowy metalowych czujników rezystancyjnych

W praktyce stosowane są także klasy tolerancji uzyskane jako iloraz klasy tolerancji określonej w normie oraz stałej np.: B/3 B/10.

Półprzewodnikowe rezystancyjne czujniki temperatury można podzielić na dwie grupy: PTC oraz NTC. Pierwsza to czujniki o rezystancji rosnącej wraz ze wzrostem temperatury (PTC - positive temperature coefficient). Druga grupa to czujniki o rezystancji malejącej wraz ze wzrostem temperatury (NTC negative temperature coefficient). Czujniki półprzewodnikowe charakteryzuje nieliniowa zależność pomiędzy rezystancją a temperaturą. Termistory charakteryzują się wysoką czułością. W celu obliczenia wskazania temperatury czujnika termistorowego NTC stosowane jest równanie Steinhart'a-Hart'a:

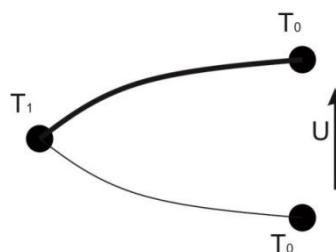
$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln R + c \cdot (\ln R)^3 \quad (3)$$

Współczynniki a, b, c podawane są przez producenta.

W przypadku czujników PTC istnieje groźba utraty stabilności wskazania na skutek dodatniego sprzężenia zwrotnego. Występuje ona ponieważ ciepło wydzielające się wskutek przepływu prądu przez czujnik zależy w sposób proporcjonalny od oporności czujnika, natomiast oporność czujnika zwiększającą się wraz z wzrostem temperatury.

## 2.4 Termopary

Działanie termopary opiera się na zjawisku Seebecka. Polega ono na generowaniu siły elektromotorycznej w obwodzie składającym się z dwóch metali, pod warunkiem, iż złącza tych metali znajdują się w odmiennej temperaturze, np.  $T_0$  i  $T_1$ .



Rys. 3. Powstawanie napięcia w termoparze

Wyróżnić zatem możemy złącze pomiarowe mające temperaturę  $T_1$  oraz złącze odniesienia mające temperaturę  $T_0$ . Złącze pomiarowe umieszczone jest na badanym obiekcie. Pomiar z użyciem termopary sprowadza się zatem do pomiaru napięcia na złączu odniesienia. Napięcie to będzie tym większe im większa jest różnica temperatur pomiędzy złączami. Wynika stąd, że taki sposób pomiaru nie dostarcza nam jednoznacznej informacji o temperaturze badanego obiektu, lecz tylko o nadwyżce temperatury  $\Delta T$  ( $\Delta T = T_1 - T_0$ ) w stosunku do temperatury odniesienia  $T_0$ . Temperatura odniesienia może zostać zmierzona inną metodą lub zostać ustaloną na stałym, znanym poziomie np. poprzez umieszczenie złącza odniesienia w mieszaninie wody i lodu. W celu zwiększenia czułości urządzenia pomiarowego stosuje się czasami kilka termopar w jednym obwodzie, budując tzw. stos.

Termopary noszą nazwy w zależności od materiałów z których zbudowane jest złącze: typ J (Fe-CuNi), typ K (NiCr-Ni), typ N (NiCrSi-NiSi), typ T (Cu-CuNi), typ L (Fe-CuNi), typ E (NiCr-CuNi), typ S (PtRh10-Pt), typ R (PtRh13-Pt), typ B (PtRh30-PtRh6).

## 2.5 Pirometry i kamery termograficzne

Jedną z historycznych metod zdalnego pomiaru temperatury jest ocena temperatury żarzącej się stali na podstawie jej koloru. Dokładność takiego pomiaru jest ściśle zależna od doświadczenia i umiejętności osoby go wykonującej. W najlepszym przypadku metoda ta osiąga dokładność 20°C [3]. Podobną zasadę pomiaru poprzez porównanie koloru promieniującego obiektu i wzorca wykorzystują pirometry z wzorcem żarnikowym (dziś używane sporadycznie).

Obecnie najczęściej stosowane są urządzenia z detektorem mikrobolometrycznym (pasmo dalekiej podczerwieni, ang. LW – Large Wavelength, 3-5µm) lub detektorem fotonowym (pasmo średniej podczerwieni, ang. SW – Short Wavelength 8-14µm) (np. HgCdTe, InSb). Detektory fotonowe do funkcjonowania wymagają chłodzenia. Wspomniane detektory, niezależnie od konstrukcji, mierzą natężenie promieniowania padającego na nie. Detektory różnią się czułością, która jest zmienna w funkcji częstotliwości promieniowania podczerwonego.

Pirometry umożliwiają pomiar temperatury „w punkcie”. Aby ułatwić użytkownikowi określenie punktu pomiarowego, w urządzeniu często montowany jest wskaźnik laserowy.

Kamery termograficzne posiadają detektory w postaci matryc. Umożliwiają one obrazowanie oraz pomiar pola rozkładu temperatury. Wyposażone są w układ optyczny, opcjonalnie filtry. Ze względu na dobrą przepuszczalność fal w zakresie podczerwieni w zależności od spektrum rejestrowanego przez detektor stosuje się obiektywy wykonane z BaF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub>, Ok<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Si dla pasma poniżej 5µm lub Ge, ZnS, ZnSe dla pasma LW. Podobnie jak w innych urządzeniach optycznych konieczna jest regulacja ostrości obrazu.

Ze względu na zastosowaną metodę pomiaru pirometry i kamery termograficzne cechują się maksymalną dokładnością na poziomie ±1°C ÷ ±2°C. Nie należy mylić czułości detektora kamery termowizyjnej z jej dokładnością pomiarową. Czułość detektora najczęściej wyrażana jest wskaźnikiem NETD (Noise Equivalent Temperature Difference). NETD oznacza zmianę temperatury promieniującego ciała doskonale czarnego, która powoduje zmianę sygnału pomiarowego o wartość równą poziomowi szumów danego detektora. Współczynnik NETD wynosi ok. 50-200 mK dla detektorów mikrobolometrycznych oraz nawet do 10 mK dla detektorów fotonowych. Dokładność pomiaru ograniczona jest poprzez dodatkowe czynniki wynikające z metody pomiaru.

Jak wspomniano we wcześniejszej części niniejszego opracowania, metoda termograficznego pomiaru polega na analizie natężenia promieniowania padającego na detektor kamery IR. Moc wypromieniowywaną z jednostki powierzchni przez ciało doskonale czarne w zależności od temperatury tego ciała opisuje prawo Stefana-Boltzmana.

$$\Phi = \sigma \cdot T^4, \quad (4)$$

gdzie:

$\Phi$  – strumień energii wypromieniowywany przez ciało doskonale czarne [W/m<sup>2</sup>],

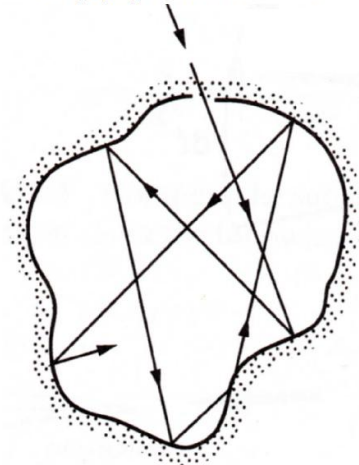
$\sigma$  – stała Stefana-Boltzmana,  $\sigma \approx 5,67 \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ ,

T – temperatura ciała doskonale czarnego [K].

Ciało doskonale czarne to ciało, które całkowicie pochłania promieniowanie na nie padające. Jest ono tworem teoretycznym, wykorzystywanym w prawach Wiena, Stefana-Boltzmana oraz rozkładzie Plancka. Pojęcie ciała doskonale czarnego ilustruje rysunek poniżej. Wnęka całkowicie pochłania promieniowanie na nie padające dzięki nieskończonej liczbie odbić w jej wnętrzu. Promieniowanie emitowane na zewnątrz jest zależne jedynie od temperatury wnętrza.

### Ciało doskonale czarne

Absorpcja promieniowania



Emisja promieniowania



Rys. 4. Ilustracja pojęcia ciało doskonale czarne

W rzeczywistości, otaczające nas ciała nie tylko pochłaniają, ale również odbijają padające na nie promieniowanie, a czasem część padającego na nie promieniowania przepuszczają (ciała częściowo przezroczyste). Współczynniki opisujące nasilenie tych zjawisk to:

- $\epsilon$  - współczynnik emisyjności
- $\rho$  - współczynnik refleksyjności
- $\tau$  - współczynnik transmisyjności
- $\alpha$  - współczynnik absorpcyjności

Współczynnik emisyjności  $\epsilon$  opisuje stosunek mocy promieniowania emitowanego przez powierzchnię ciała rzeczywistego do mocy promieniowania emitowanego przez powierzchnię ciała doskonale czarnego, będącego w tej samej temperaturze.

Współczynnik refleksyjności  $\rho$  danej powierzchni, określa stosunek mocy promieniowania odbitego przez daną powierzchnię do mocy promieniowania na nią padającego.

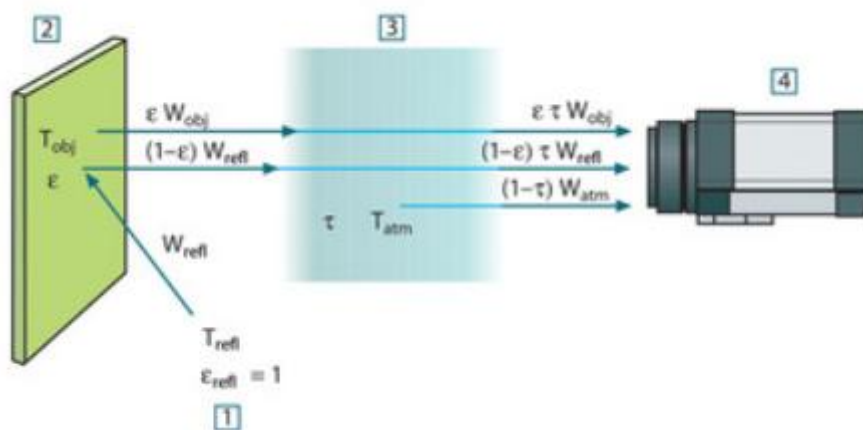
Współczynnik transmisyjności  $\tau$  określa stosunek mocy promieniowania przenikającego przez daną powierzchnię do mocy promieniowania na nią padającego.

Współczynnik absorpcyjności  $\alpha$  określa stosunek mocy promieniowania pochłanianego przez daną powierzchnię do mocy promieniowania na nią padającego.

Z praw termodynamiki wynika, że:

- współczynnik emisyjności danej powierzchni równy jest współczynnikowi absorpcyjności:  $\epsilon = \alpha$ ,
- promieniowanie padające na dane ciało może zostać pochłonięte, odbite lub przepuszczone, stąd:  $\epsilon + \rho + \tau = 1$ , a dla ciał nieprzezroczystych  $\tau = 0 \rightarrow \epsilon + \rho = 1$ .

Przypadek pomiaru temperatury powierzchni nieprzezroczystej zilustrowano na rys. 5. Promieniowanie  $W_{\text{det}}$  padające na detektor jest wypadkową promieniowania emitowanego przez powierzchnię obserwowaną  $\epsilon \cdot (1 - \tau) \cdot W_{\text{obj}}$ , odbitego promieniowania otoczenia  $\rho \cdot (1 - \tau) \cdot W_{\text{refl}}$ , oraz promieniowania atmosfery  $\tau \cdot W_{\text{atm}}$  znajdującej się pomiędzy obiektywem a badaną powierzchnią.



Rys. 5. Schemat termograficznego pomiaru temperatury ciała nieprzezroczystego

Jeżeli przez  $W_{\text{det}}$  oznaczymy strumień promieniowania padającego na detektor to:

$$W_{\text{det}} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{\text{ref}} + (1 - \tau) \cdot W_{\text{atm}}, \quad (5)$$

gdzie:

$\varepsilon$  - współczynnik emisyjności obserwowanej powierzchni,

$\tau$  - współczynnik transmisyjności,

$\rho$  - współczynnik refleksyjności obserwowanej powierzchni,  $\rho = (1 - \varepsilon - \tau)$

$W_{\text{det}}$  - moc promieniowania padającego na detektor

$\varepsilon \cdot (1 - \tau) \cdot W_{\text{obj}}$  - moc promieniowania emitowanego przez obserwowane ciało

$\rho \cdot (1 - \tau) \cdot W_{\text{ref}}$  - moc promieniowania emitowanego przez otoczenie

$\tau \cdot W_{\text{atm}}$  - moc promieniowania emitowanego przez atmosferę

Dla małych odległości i atmosfery o niewielkiej zawartości wilgoci można przyjąć, że  $\tau = 1$ , wtedy:

$$W_{\text{det}} = \varepsilon \cdot W_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \cdot W_{\text{refl}} \quad (6)$$

W procesie kalibracji kamery IR ustalana jest zależność pomiędzy sygnałem a natężeniem promieniowania generowanym przez wzorec o rejestrowanej temperaturze. Dane dotyczące temperatury otoczenia ( $T_{\text{refl}}$ ) oraz emisyjności obiektu obserwowanego ( $\varepsilon$ ) są zwykle możliwe do zdefiniowania w urządzeniu przez użytkownika. Pirometry mogą być wyposażone w termometr, który mierzy temperaturę otoczenia. W przypadku zastosowania filtrów nakładanych na powierzchnię obiektywu lub wymiany obiektywu, w procedurze pomiarowej należy uwzględnić wpływ zmiany transparentności układu pomiarowego na wynik pomiaru.

### 3. Pytania kontrolne.

- Co to jest ciało doskonale czarne?
- Co określa współczynnik emisyjności?
- O czym mówi prawo Wiena?
- Co określa rozkład Plancka?
- Czy umiesz zapisać prawo Stefana-Boltzmana?
- Czy wiesz jak przeliczyć temperaturę ze skali Celsjusza do skali Kelvina?
- Jakie cechy odróżniają rezystancyjny czujnik temperatury od termistora?
- Co mierzy termopara?
- Jaki jest rząd dokładności poprawnie wykonanego pomiaru temperatury kamerą termograficzną?




## 4. Przebieg ćwiczenia.


### 4.1 Instrukcja obsługi pirometru AZ8857


**UWAGA: Urządzenie wyposażone w laser. Groźba uszkodzenia wzroku<sup>1</sup>.**





Urządzenie AZ8857 służy do:


- pirometrycznego pomiaru temperatury powierzchni,
- pomiaru temperatury powietrza,
- pomiaru wilgotności względnej<sup>2</sup>,
- wyznaczania temperatury punktu rosy<sup>2</sup>,
- wskazuje temperaturę termometru mokrego<sup>2</sup>.

Włączenie urządzenia następuje po naciśnięciu przycisku set  lub measIR. Przyrząd automatycznie mierzy temperaturę powietrza oraz jego względną wilgotność po wcześniejszym wysunięciu wbudowanego czujnika. Przycisk measIR uruchamia pirometryczny pomiar temperatury.

Dla ułatwienia identyfikacji punktu pomiarowego przyrząd posiada wbudowany laser. Laser automatycznie oświetla punkt pomiaru pirometrycznego. **Nakierowanie wiązki lasera na oczy może być groźne dla zdrowia<sup>1</sup>. Nakierowanie lasera na powierzchnię refleksyjną może powodować odbicie się wiązki lasera w kierunku oczu.** Włączenie i wyłączenie funkcji automatycznego wskaźnika laserowego możliwe jest przez jednoczesne naciśnięcie przycisków measIR oraz .

Przytrzymanie przycisku set  przez co najmniej 2 sekundy powoduje wyłączenie urządzenia. Urządzenie posiada też wbudowany automatyczny timer wyłączający nieużywane urządzenie po upływie 500s<sup>3</sup>.

Krótkie naciśnięcie przycisku set  powoduje przejście do trybu ustawień timera wyłączającego urządzenie. Kolejne krótkie naciśnięcie przycisku set  powoduje przejście do trybu ustawień emisyjności powierzchni. Zmiana wartości emisyjności odbywa się przyciskami:  °C/°F i  laser. Kolejne krótkie ustawiania czasu powoduje przejście do trybu pomiarowego.

Naciśnięcie przycisku  °C/°F w trybie pomiarowym powoduje zmianę jednostek w jakich wyświetlany jest pomiar.

### DANE TECHNICZNE


Zakres temperatur mierzonych w trybie pirometru: -40°C ÷ +500°C

Dokładność pomiaru:

Temperatura powietrza: ±0,6°C

Temperatura mierzona pirometrem: ±2% (odczytu w °C) lub ±2°C (obowiązuje większa wartość)

### 4.2 Instrukcja obsługi kamery termograficznej TESTO875

Kamera Testo 875 posiada detektor mikrobolometryczny o rozdzielczości 160x120 pikseli oraz wyświetlacz o rozdzielczości 640 x 480 pikseli. Kamerę włączamy oraz wyłączamy przyciskiem . W trybie pomiaru punktowego kamera wyświetla w punkcie środkowym ekranu wartość mierzonej temperatury oraz w sposób barwny przedstawia rozkład mierzonego pola temperatury.

<sup>1</sup> Powodowanie zagrożenia dla zdrowia swojego lub innych uczestników zajęć stanowi podstawę do natychmiastowego usunięcia z zajęć.

<sup>2</sup> Niniejsze ćwiczenie nie obejmuje tematyki pomiaru wilgotności. Zainteresowani tą tematyką odnajdą definicję wspomnianych parametrów oraz dodatkowe informacje w literaturze.

<sup>3</sup> Wartość tą można zmieniać.

Przyciskiem spustu (znajdującym się pod palcem wskazującym) zapisuje się obserwowany obraz w pamięci kamery. Zapis należy potwierdzić przyciskiem OK. Przed wykonaniem pomiaru należy wyregulować ostrość pokrętle przy obiektywie, zdefiniować emisyjność powierzchni której temperatura jest mierzona, oraz zdefiniować temperaturę otoczenia. Parametry te (emisyjność, temperatura otoczenia) można również zmieniać już po zarejestrowaniu obrazu ukazującego rozkład temperatury wykorzystując do tego celu oprogramowanie Testo IR Soft.

Naciśnięcie przycisku OK uruchamia okno Menu. Nawigowanie w oknie Menu odbywa się za pomocą sprzężonego z przyciskiem OK joysticku, przycisku OK. oraz ESC. Ustawienie emisyjności oraz temperatury otoczenia możliwe jest w oknie Emisyjność, które jest dostępne w oknie Menu. W oknie Menu→Pomiar możliwa jest zmiana trybu pomiarowego oraz zakresu pomiarowego. Okno Menu→Galeria Obrazów umożliwia przegląd wykonanych pomiarów. Okno Menu→Skala umożliwia zmianę skali barw wyświetlanych na ekranie ciekłokrystalicznym.

#### DANE TECHNICZNE

Detektor: Matryca mikrobolometryczna, niechłodzona, FPA, 160 x 120 pikseli

Zakres spektralny: 8 ÷ 14μm

Czułość termiczna (NETD): <50 mK przy 30°C

Wyświetlacz: 640 x 480 pikseli

Zakres temperatur mierzonych (przełączany):

-20°C ÷ +100°C

0°C ÷ +350°C

Dokładność pomiaru: ±2°C lub ±2% odczytu (obowiązuje większa wartość)

### 4.3 Wprowadzenie praktyczne do pomiarów termowizyjnych

Z użyciem kamery termowizyjnej Flir SC640 zaprezentowane przez prowadzącego zostaną podstawowe zasady prawidłowego przeprowadzania pomiarów termowizyjnych. Zaprezentowany zostanie m.in. wpływ na dokładność pomiaru zakłóceń prowadzanych przez operatora.

#### DANE TECHNICZNE

Detektor: Matryca mikrobolometryczna, niechłodzona, FPA, 640 x 480 pikseli

Zakres spektralny: 7.5 ÷ 13μm

Czułość termiczna: 60 mK przy 30°C

Wyświetlacz: 640 x 480 pikseli

Zakres temperatur mierzonych: -40°C ÷ + 1500°C

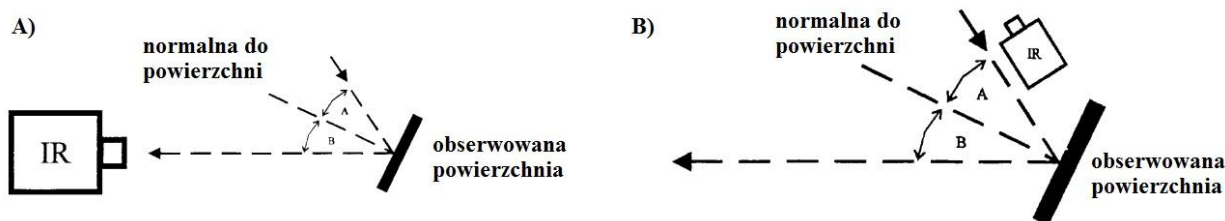
Dokładność pomiaru: ±2°C lub ±2% odczytu (obowiązuje większa wartość)

### 4.4 Wyznaczenie emisyjności cieplnej taśmy winylowej

#### (Uwaga: Niebezpieczeństwo oparzenia!)

Jeden ze sposobów przybliżonego wyznaczenia emisyjności cieplnej powierzchni polega na wykonaniu pomiaru temperatury tej powierzchni dodatkową, inną niż termograficzną, metodą.

Na początku należy zmierzyć natężenie promieniowania padającego na obserwowaną powierzchnię  $W_{refl}$ . Dokonujemy tego rejestrując temperaturę odbitą  $T_{refl}$ . Kamerę termowizyjną, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys 6b), ustawiamy w kierunku, z którego pada promieniowanie odbite. Przypisujemy w kamerze termowizyjnej parametrowi emisyjności wartość wynoszącą 1.00 (Menu → Emisyjność → Zdef. Przez użyt. → ε). Następnie odczytujemy temperaturę wskazywaną przez urządzenie. W ten sposób otrzymujemy wartość  $T_{refl}$ , którą wprowadzamy w kamerze termowizyjnej jako temperaturę odbitą (Menu → Emisyjność → Zdef. Przez użyt. → Refleksy temp. °C).



Rys 6. Wyznaczanie natężenia promieniowania padającego na obserwowaną powierzchnię

Następnie, zgodnie z zależnością (6), należy obserwowane ciało podgrzać tak aby  $W_{obj} \neq W_{refl}$ <sup>4</sup>. Podczas ćwiczenia należy wyznaczyć emisyjność wskazanej przez prowadzącego taśmy winylowej. Nagrzewanie taśmy wykonywane jest za pomocą płyty grzewczej. Podczas uruchamiania płyty grzewczej należy stosować się do zamieszczonej poniżej instrukcji:

Uruchom płytę grzewczą Prazitherm zmieniając położenie przycisku z „O” na „I”. Na wskaźniku LED pojawi się aktualna temperatura płyty. Upewnij się poprzez przyciśnięcie przycisku „SET” że zadana temperatura nagrzewania się płyty wynosi 85°C. Poczekaj aż temperatura wskazywana przez wyświetlacz LED ustabilizuje się wokół zadanej temperatury.

#### 4.5 Pomiar temperatury zbiornika z cieczą

**(Uwaga: Niebezpieczeństwo oparzenia!)**

Wybór odpowiedniej metody pomiarowej dla danego przypadku wymaga od projektanta znajomości jej zalet i wad. Niniejszy punkt ma na celu porównanie cech metod pomiarów temperatury najczęściej stosowanych w praktyce.

Obiektem badań jest zbiornik z cieczą wyposażony w czujniki temperatury. Na powierzchni zbiornika umieszczono miniaturowy czujnik Pt100 klasy B/3 oraz czujnik Pt100 klasy A z wbudowanym magnesem. Wewnątrz zbiornika umieszczono czujnik temperatury Pt100 klasy B/3, oraz termistorowy czujnik temperatury NTC. Oba umieszczone w cieczy czujniki dla ochrony przed zniszczeniem zostały uprzednio pokryte warstwą kleju termoprzewodzącego. Dla zastosowanego czujnika NTC stałe a, b, c, pozwalające obliczyć temperaturę czujnika [K] na podstawie jego rezystancji [ $\Omega$ ] zgodnie z równaniem Steinhart’a-Hart’a (3), mają wartości:

$$a = 1.245601 \cdot 10^{-3} \quad b = 0.235327 \cdot 10^{-3} \quad c = 0.093 \cdot 10^{-6}.$$

Załącznik nr 1 zawiera tabelę 3 ukazującą zależność pomiędzy temperaturą czujnika  $t[^\circ\text{C}]$  a jego opornością  $R[\Omega]$ . Na podstawie danych producenta, dopuszczalny błąd graniczny wskazań czujnika w temperaturze powyżej 25°C, można wyrazić zależnością:  $\pm (0.002 \cdot t[^\circ\text{C}] - 0,005)$ .


Do pomiaru temperatury wykorzystano przetworniki pomiarowe firmy National Instruments: NI9217 oraz NI9219. Standardowe niepewności pomiarowe przetworników National Instruments zawiera poniższa tabela.



Tabela 2. Standardowe niepewności pomiarowe użytych przetworników

	NI 9217	NI 9219
Zakres pomiarowy	-200 ÷ 150 °C	10k $\Omega$
Standardowa niepewność pomiaru	$\pm 0.2$ °C	$\pm (0.1\% \cdot R[\Omega] + 1.2\Omega)$

<sup>4</sup> Jeżeli  $T_{obj} = T_{refl}$  to czy  $W_{obj} = W_{refl}$ ? Czy zatem istnieje w takim przypadku możliwość wyznaczenia z zależności (6) współczynnika  $\epsilon$ ?

Na powierzchni zbiornika znajduje się przyklejona taśma winylowa ułatwiająca wykonanie pomiaru metodą termowizyjną.

Jeżeli jeszcze tego nie wykonano, uruchom program LabView. Następnie otwórz projekt „Pomiary temperatury.lvproj”. W rozwijalnym drzewie znajdź i uruchom plik „Virtual Instrument.vi”. Naciśnij przycisk „Run Continuously” , aby uruchomić ciągle wyświetlanie wyników pomiarów przez program. Włącz zasilanie grzałki zbiornika. Obserwuj zmiany wartości rejestrowanych temperatur. W jaki sposób umieszczenie czujnika oraz jego pojemność cieplna wpływa na wynik pomiaru?

Przyciskiem „Abort execution”  zakończ cykliczne działanie programu. Przycisk „Run”  wyzwala pojedynczy pomiar. Wykonaj jednoczesny pomiar temperatury przy użyciu kamery termowizyjnej oraz zainstalowanych przy obiekcie czujników. W sprawozdaniu porównaj otrzymane rezultaty. Jakie są wady a jakie zalety wymienionych metod?

Po wykonanym ćwiczeniu odłącz zasilanie grzałki zbiornika z ciecżą.

Podczas obliczania niepewności pomiarów nie zapomnij uwzględnić niepewności wprowadzanych przez przetworniki pomiarowe.

#### 4.6 Pomiar temperatury gazu

Do pomiaru temperatury powietrza tradycyjnie wykorzystywane są termometry rtęciowe. W urządzeniach elektronicznych, ze względu na łatwość cyfryzacji wykorzystuje się czujniki rezystancyjne bądź termistory.

Zapisz temperaturę powietrza wskazywaną przez termometr rtęciowy oraz termometry rezystancyjne PT100 klasy A. Oblicz niepewności wskazań. Porównaj wyniki.

### 5. Sprawozdanie.

Sprawozdanie z ćwiczenia stanowi wypełniony przez uczestnika zajęć formularz, który został umiejscowiony na końcu instrukcji. Sprawozdanie winno zawierać samodzielne wnioski wyciągnięte przez uczestnika w trakcie przeprowadzenia doświadczeń. W sporządzeniu obliczeń niepewności pomocnym może być wcześniejsze zaznajomienie się z instrukcją do ćwiczenia „Wyznaczanie niepewności pomiaru” [2].

### Literatura

- [1] Majda P.: Laboratorium metrologii ITM ZUT, Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych, Temat: Ogólna instrukcja sporządzania sprawozdania z ćwiczeń laboratoryjnych, Szczecin 2010.
- [2] Majda P.: Laboratorium metrologii ITM ZUT, Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych, Temat ćwiczenia – Wyznaczanie niepewności pomiaru, Szczecin 2010.
- [3] Weber J.: Zarys kowalstwa i obróbki cieplnej. Warszawa: Księgarnia Techniczna "Przeglądu Technicznego", 1939
- [4] Norma: PN-EN 60751:2009
- [5] Norma: DIN 43760
- [6] Michalski L.: Termometria: przyrządy i metody. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1998.
- [7] Michalski L.: Pomiary temperatury. Warszawa: WNT, 1986.
- [8] Vollmer M., Möllmann K. P.: Infrared thermal imaging fundamentals research and applications. Wiley-VCH, Weinheim, 2011

Tabela 3. Zależność pomiędzy temperaturą a opornością użytego czujnika NTC

Temperatura [°C]	Oporności [Ω]
20	7495
21	7164
22	6851
23	6552
24	6269
25	5999
26	5742
27	5498
28	5265
29	5044
30	4833
31	4632
32	4440
33	4258
34	4084
35	3917
36	3759
37	3608
38	3464
39	3326
40	3194
41	3069
42	2949
43	2834
44	2725
45	2620
46	2520
47	2424
48	2332
49	2244
50	2160
51	2080
52	2003
53	1929
54	1859
55	1791
56	1726
57	1664
58	1604
59	1547

60	1492
61	1439
62	1389
63	1340
64	1294
65	1249
66	1206
67	1165
68	1126
69	1087
70	1051
71	1016
72	982
73	949
74	918
75	888
76	859
77	831
78	804
79	778
80	754
81	730
82	707
83	684
84	663
85	642
86	622
87	603
88	585
89	567
90	550
91	533
92	517
93	501
94	487
95	472
96	458
97	445
98	432
99	419
100	407

**ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY  
W SZCZECINIE**

**Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki**

**Sprawozdanie**  
**Temat : Pomiar temperatury i termowizja**

**Imię i nazwisko:**

**Grupa:**

**Data wykonania ćwiczenia:**

**Prowadzący:**  
**dr inż. Jacek Zapłata**

**Ocena z wejściówki:**

**Ocena ze sprawozdania:**

**Ocena wypadkowa:**

## Wstęp

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych metod pomiaru temperatury. Zapoznanie się z ograniczeniami poszczególnych metod oraz zakresem ich zastosowań. Zdobycie umiejętności samodzielnego wykonywania pomiarów temperatury metodami elektrycznymi oraz pirometrycznymi.

### 1. Wyznaczenie emisyjności wybranych powierzchni.

Pomiar metodami pirometrycznymi może być w znacznym stopniu zależny od emisyjności badanych powierzchni. Należy wyznaczyć emisyjność powierzchni wskazanych przez prowadzącego, zgodnie z metodą opisaną w instrukcji do ćwiczenia. Wpisz samodzielne wnioski i odpowiedz na pytanie 1.

Zarejestrowana wartość „temperatury odbitej”:

Wartość emisyjności przy której zarejestrowano „temperaturą odbitą”:

Typ powierzchni:			
$\epsilon$ Emisyjność ustawiona w kamerze IR	$T_{\text{kam}}$ Temperatura zarejestrowana za pomocą kamery IR	$T_{\text{płyty}}$ Temperatura zmierzona przez czujnik umiejscowiony w płycie grzewczej	Różnica wskazań: $T_{\text{kam}} - T_{\text{płyty}}$

Typ powierzchni:			
$\epsilon$ Emisyjność ustawiona w kamerze IR	$T_{\text{kam}}$ Temperatura zarejestrowana za pomocą kamery IR	$T_{\text{płyty}}$ Temperatura zmierzona przez czujnik umiejscowiony w płycie grzewczej	Różnica wskazań: $T_{\text{kam}} - T_{\text{płyty}}$

Samodzielne wnioski:

.....

.....

.....

.....

.....

Pyt. 1. Jeżeli  $T_{obj} = T_{refl}$  to czy  $W_{obj} = W_{refl}$ ? Czy zatem istnieje w takim przypadku możliwość wyznaczenia z zależności  $W_{det} = \varepsilon \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot W_{refl}$  współczynnika  $\varepsilon$ ?

.....

.....

.....

.....

.....

.....

**2. Pomiar temperatury zbiornika z cieczą**

Należy zmierzyć temperaturę zbiornika z cieczą za pomocą dostępnych metod. Wpisz samodzielne wnioski i odpowiedz na pytanie 2.

Rodzaj czujnika	Zarejestrowana temperatura	Niepewność pomiarowa wraz z poziomem ufności
Pt 100 z magnelem, na zewnątrz naczynia, klasa A		
Pt 100 na zewnątrz naczynia, miniaturowy, klasa B/3		
Pt 100 wewnątrz cieczy, klasa B/3		
NTC wewnątrz cieczy		
Kamera IR		

**Pt 100 z magnelem, na zewnątrz naczynia, klasa A.**

Wyznaczenie dopuszczalnego granicznego błędu ww. czujnika, na podstawie znanej klasy czujnika.

Wzór:  $MPE = \pm ( 0,15+0,002 \cdot t[^\circ C] )$

Wartość:  $MPE =$

Wyznaczenie niepewności standardowej ww. czujnika [2].

Wzór:  $u_1 = \frac{MPE}{\sqrt{3}}$

Wartość:  $u_1 =$

Wyznaczenie na podstawie załączonej w instrukcji dokumentacji niepewności standardowej przetwornika NI9217.

Wartość:  $u_2 =$

Wyznaczenie złożonej niepewności standardowej [2].

Wzór:  $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$

Wartość:  $u_c =$



Wyznaczanie niepewności rozszerzonej pomiaru na poziomie pewności 95%,  $k_{95\%}=2$  [2].

Wzór:  $U = k \cdot u_c$

Wartość:  $U =$

### **Pt 100 na zewnątrz naczynia, miniaturowy, klasa B/3.**

Wyznaczenie dopuszczalnego granicznego błędu ww. czujnika, na podstawie znanej klasy czujnika.

Wzór:  $MPE = \pm ( 0,10+0,0017 \cdot t[^\circ C] )$

Wartość:  $MPE =$

Wyznaczenie niepewności standardowej ww. czujnika [2].

Wzór:  $u_1 =$

Wartość:  $u_1 =$

Wyznaczenie na podstawie załączonej w instrukcji dokumentacji niepewności standardowej przetwornika NI9217.

Wartość:  $u_2 =$

Wyznaczenie złożonej niepewności standardowej [2].

Wzór:  $u_c =$

Wartość:  $u_c =$

Wyznaczanie niepewności rozszerzonej pomiaru na poziomie pewności 95%,  $k_{95\%}=2$  [2].

Wzór:  $U =$

Wartość:  $U =$

### **Pt 100 wewnątrz cieczy, klasa B/3.**

Wyznaczenie dopuszczalnego granicznego błędu ww. czujnika, na podstawie znanej klasy czujnika.

Wzór:  $MPE =$

Wartość:  $MPE =$

Wyznaczenie niepewności standardowej ww. czujnika [2].

Wzór:  $u_1 =$

Wartość:  $u_1 =$

Wyznaczenie na podstawie załączonej w instrukcji dokumentacji niepewności standardowej przetwornika NI9217.

Wartość:  $u_2 =$

Wyznaczenie złożonej niepewności standardowej [2].

Wzór:  $u_c =$

Wartość:  $u_c =$

Wyznaczanie niepewności rozszerzonej pomiaru na poziomie pewności 95%,  $k_{95\%}=2$  [2].

Wzór:  $U =$

Wartość:  $U =$

### **NTC wewnątrz cieczy.**

Wyznaczenie na podstawie załączonej w instrukcji dokumentacji dopuszczalnego granicznego błędu ww. czujnika.

Wzór:  $MPE = \pm (0,002 \cdot t[^\circ C] - 0,005)$ .

Wartość:  $MPE =$

Wyznaczenie niepewności standardowej ww. czujnika [2].

Wzór:  $u_1 =$

Wartość:  $u_1 =$



### 3. Pomiar temperatury otoczenia.

Należy zmierzyć temperaturę otoczenia za pomocą różnych metod. Wpisz samodzielne wnioski i odpowiedz na pytanie 3.

Rodzaj czujnika	Zarejestrowana temperatura	Niepewność pomiarowa
Pt 100 - czujnik 1		
Pt 100 - czujnik 2		
Pt 100 - czujnik 3		
Termometr rtęciowy		

#### Pt100

Wyznaczeniem na podstawie dokumentacji dopuszczalnego granicznego błędu ww. czujnika.

Wzór:  $MPE =$

Wartość:  $MPE =$

Wyznaczenie niepewności standardowej ww. czujnika.

Wzór:  $u_1 =$

Wartość:  $u_1 =$

Wyznaczenie na podstawie dokumentacji niepewności standardowej przetwornika NI9217.

Wartość:  $u_2 =$

Wyznaczenie złożonej niepewności standardowej

Wzór:  $u_c =$

Wartość:  $u_c =$

Wyznaczanie niepewności rozszerzonej pomiaru na poziomie pewności 95%,  $k_{95\%}=2$ .

Wzór:  $U =$

Wartość:  $U =$

#### Termometr rtęciowy

Wyznaczeniem na podstawie dokumentacji dopuszczalnego granicznego błędu ww. czujnika.

Wartość:  $MPE =$

Wyznaczenie niepewności standardowej ww. czujnika.

Wzór:  $u_1 =$

Wartość:  $u_1 =$

Wyznaczanie niepewności rozszerzonej pomiaru na poziomie pewności 95%,  $k_{95\%}=2$ .

Wzór:  $U =$

Wartość:  $U =$

Samodzielne wnioski:

.....  
.....  
.....  
.....

Pyt. 3. Jakie są wady a jakie zalety poznanych metod pomiaru temperatury?

.....  
.....  
.....  
.....