

POMIARY TEMPERATURY TERMOMETRAMI REZYSTANCYJNYMI

1. PODSTAWY FIZYCZNE POMIARU TEMPERATURY ZA POMOCĄ TERMOMETRÓW REZYSTANCYJNYCH

Wszystkie ciała występujące w przyrodzie można podzielić ze względu na właściwości przewodzenia prądu elektrycznego na trzy grupy : metale, półprzewodniki i dielektryki. Ciała zaliczane do poszczególnych grup różnią się zakresami- zmian wartości rezystywności, które orientacyjnie wynoszą:

- metale $\rho = 10^{-8}$ do 10^{-6} [Ωm]
- półprzewodniki $\rho = 10^{-5}$ do 10^8 [Ωm]
- dielektryki $\rho = 10^8$ do 10^{12} [Ωm]

Do budowy termometrów rezystancyjnych wykorzystuje się pierwsze dwie grupy ciał, a więc metale i półprzewodniki. Szczególnie duże możliwości kryją w sobie półprzewodniki, gdyż obejmują najszerszy zakres zmian wartości rezystywności różniących się o 13 rzędów wielkości.

Zasada działania termometrów rezystancyjnych polega na wykorzystaniu zjawiska zmian rezystancji metali lub półprzewodników ze zmianą temperatury.

Dla metali o przewodności elektronowej funkcję tą można przedstawić z dostatecznym przybliżeniem w postaci

$$R = R_0 [1 + \alpha (T - T_0) + \beta (T - T_0)^2 + \gamma (T - T_0)^3 + \dots] \quad (1)$$

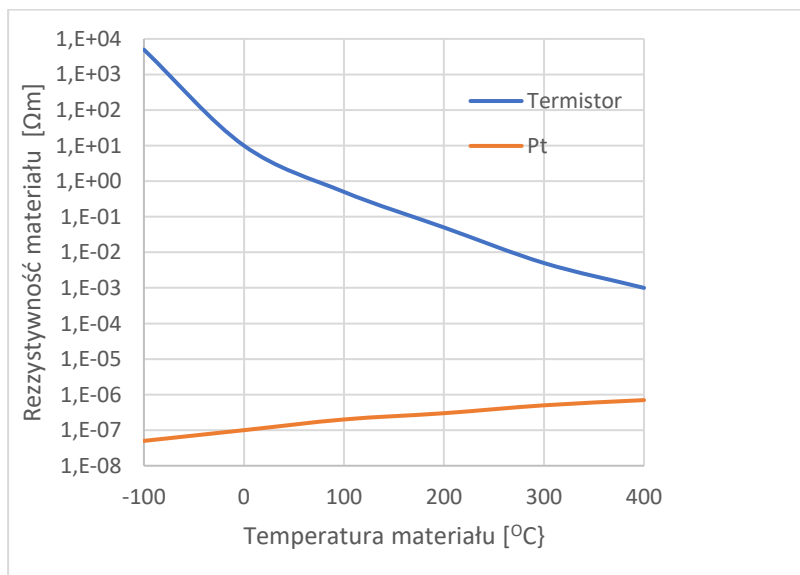
Rezystywność większości metali zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury, a wtedy temperaturowy współczynnik rezystancji α jest dodatni. Zjawisko to tłumaczy się następująco: przewodzenie prądu elektrycznego w metalach odbywa się za pomocą ruchu elektronów. Liczba nośników prądu elektrycznego jest stała, niezależna od temperatury. Ze wzrostem temperatury wzrasta amplituda drgań cieplnych atomów w siatce krystalicznej oraz prędkość ruchu bezładnego swobodnych elektronów, na skutek czego zwiększa się prawdopodobieństwo zderzeń swobodnych elektronów z drgającymi atomami w siatce krystalicznej. Powoduje to hamowanie ruchu swobodnych elektronów i wzrost rezystancji przewodnika.

Dla półprzewodników o przewodności dziurowo-elektronowej zależność ta ma charakter wykładniczy

$$R = A * e^{\frac{B}{T}} \quad (2)$$

gdzie A i B są wielkościami stałymi, a T jest temperaturą bezwzględną.

Dla przedstawienia zmian rezystancji, wynikających z zależności (1) i (2), co jest równoznaczne ze zmianą rezystywności tych materiałów, na rysunku 1 pokazano przebiegi charakterystyki $\rho = f(T)$ dla czujników metalicznych i półprzewodnikowych.



Rys. 1 Zmiana rezystywności materiału platyny i termistora (tlenki Mn, Ni i Co)

Zmianę rezystancji danego materiału określa w pierwszym przybliżeniu jego temperaturowy współczynnik rezystancji

$$\alpha = \frac{1}{R} \left(\frac{dR}{dT} \right)_T \quad (3)$$

gdzie: R oznacza rezystancję materiału w temperaturze T.

Wartość współczynnika α jest zwykle podawana w literaturze we względnych wielkościach lub w procentach zmiany rezystancji na stopień Kelwina. Bardzo często w praktyce korzysta się również ze średniego temperaturowego współczynnika rezystancji, który jest zdefiniowany w postaci

$$\alpha = \frac{1}{100} \left(\frac{R_{100}}{R_0} \right) \quad (4)$$

gdzie: R_{100} - rezystancja materiału w temperaturze 100°C;

R_0 - rezystancja materiału w temperaturze 0°C.

2. REZYSTANCYJNE CZUJNIKI METALOWE

Wykonuje się je najczęściej z czystej platyny, niklu lub miedzi. Charakterystyczne dane zawiera tablica 1. Inne metale i stopy (np. niklu i żelaza) stosowane są raczej wyjątkowo.

Tablica 1

Właściwości metali stosowanych do budowy termometrów rezystancyjnych metalicznych

Metal	$P \cdot 10^8$ [Ωm] w 0°C	$\alpha \cdot 10^3$ [K^{-1}] w zakresie 0°C do 100°C	Zakres stosowania [K]	Wzór do odtwarzania charakterystyki
Pt	9,83	3,91	70 - 670	$RT = R) [1+A(T^*) +B(T^*)^2]$ gdzie $T^* = T-273$
Ni	6,38	5,40	220 - 420	$RT = R) [1+A(T^*) +B(T^*)^2+C(T^*-100)(T^*)^3]$ gdzie $T^* = T-273$
Cu	1,56	4,31	70 - 320	$RT = R) [1+A(T^*) +B(T^*)^2]$ gdzie $T^* = T-273$

Termometr oporowy platynowy został przyjęty jako wzorcowy w zakresie temperatury od punktu tlenu do 903,9K jako narzędzie interpolacji MPST. Przez zastosowanie odpowiednich środków pomiaru (metody kompensacyjne, specjalne układy mostkowe) osiąga się niepewność pomiaru mniejszą niż 0.001 K. W zastosowaniach technicznych platynowy termometr oporowy pozwala również na osiągnięcie wysokich dokładności. Koniecznym warunkiem jest duża czystość platyny. Platyna stosowana do budowy czujników temperatury powinna spełniać warunek

$$\frac{R_{100}}{R_0} \geq 1,385$$

a dla termometrii precyzyjnej stosunek ten powinien być większy od 1,391 .

Warunkiem uzyskania dużej dokładności pomiaru jest ochrona przed zanieczyszczeniem platyny (szczególnie szkodliwe są pary metali - przy wyższej temperaturze), starzeniem (zaleca się wyżarzać przez 24 godziny w temperaturze około 700°C) oraz odpowiednia konstrukcja czujnika (brak naprężeń mechanicznych).

Charakterystyka $R(T) = f(T)$ dla miedzi w zakresie od - 40°C do 200°C odbiega od liniowości o mniej niż 0,1°C, dla platyny w zakresie od 0°C do 100°C o 0,36°C, natomiast dla niklu już o 2,96°C. Oprócz tego

uzyskanie ściśle powtarzalnych charakterystyk dla niklu z różnych wytopów jest praktycznie niemożliwe z powodu znacznej zależności charakterystyki od znikomych nawet zanieczyszczeń.

Najczęściej stosowane są czujniki termometryczne platynowe. Czujniki z niklu coraz bardziej tracą na znaczeniu, głównie wobec niemożności sprostania narastającym wymaganiom dokładności. Nieliniowość zależności rezystancji platyny od temperatury wymaga linearyzacji w przypadku przetwarzania analogowo-cyfrowego. W przypadkach stosowania wyjść analogowych linearyzacja jest zwykle zbędna.

Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne czujników rezystancyjnych PT100 pokazano na rysunku 2.



a) Platyna napyłona na płytkę ceramiczną b) Spirala z drutu platynowego nawinięta na karkas szklany

Rys. 2 Przykładowe wykonania czujników metalicznych

3. CZUJNIKI TERMISTOROWE

Rezystory półprzewodnikowe, powszechnie znane jako termistory, są wykonywane z mieszanin tlenków różnych metali, na przykład Fe, Ni, Ti, Zn, Mn, Sc, V, Co, Cu. Są formowane w różne kształty, a następnie spiekane razem z elektrodami doprowadzającymi. Na elektrody stosuje się najczęściej drut platynowy o średnicy 50 μm .

Rezystancję termistorów można w przybliżeniu przedstawić w postaci wzoru (2)

$$R = A e^{\frac{B}{T}}$$

gdzie A [Ω] jest stałą, teoretycznie odpowiadającą rezystancji termistora przy $T \rightarrow \infty$, natomiast B [K] jest stałą zależną od materiału termistora. Wartość temperaturowego współczynnika rezystancji termistora wylicza się ze wzoru (2) jako:

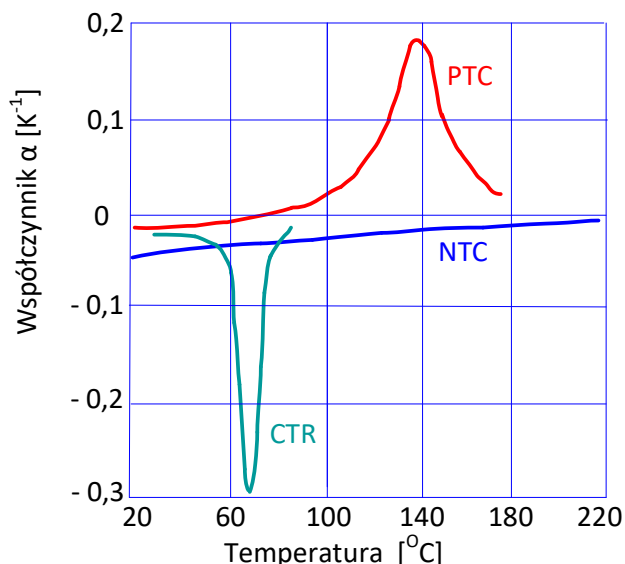
$$\alpha = \frac{1}{R} \left(\frac{dR}{dT} \right)_T = - \frac{B}{T^2} \quad [K]^{-1} \quad (5)$$

Wartość współczynnika α jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury T. Wartości B są zawarte w granicach od 3200K do 4200K.

Termistory dzieli się, w zależności od charakteru funkcji $\alpha = f(T)$, na trzy zasadnicze grupy:

- I. Termistory NTC. Mają one ujemny temperaturowy współczynnik rezystancji, przeważnie zawarty w przedziale od $-2.5 \cdot 10^{-2} \text{K}^{-1}$ do $-6 \cdot 10^{-2} \text{K}^{-1}$ i rezystywności w zakresie od 104 Ωm do 107 Ωm .
- II. Termistory PTE. Mają one w pewnym zakresie temperatury duży dodatni temperaturowy współczynnik rezystancji, dochodzący nawet do 0.7K^{-1} ,
- III. Termistory CTR. Są to termistory, których temperaturowy współczynnik rezystancji ma w pewnym wąskim zakresie temperatury ostro zarysowane minimum, którego wartość może osiągać nawet -0.7K^{-1}

Typowy przebieg zmian temperaturowego współczynnika rezystancji termistorów NTC, PTC i CTR pokazano na rysunku 3. W przypadku termistorów szczególnie ważnym zagadnieniem jest szkodliwy, dla dokładności wyniku pomiaru, efekt samonagrzewania się czujnika wywołanym ciepłem Joule'a od prądu pomiarowego. Należy tak dobrać małą wartość przepływającego prądu pomiarowego, aby wpływ ciepła Joule'a był pomijalnie mały.



Rys.3 Zmiany wartości temperaturowego współczynnika rezystancji α w funkcji temperatury dla różnych typów termistorów

Podstawowym materiałem, z którego wykonuje się termistory PTC jest tytanian baru (BaTiO). Dodatek odpowiednich tlenków umożliwia zmniejszenie rezystywności BaTiO oraz umożliwia przesuwanie zakresu temperaturowego efektu PTC w termistorze. Termistory CTR wykonuje się głównie z odpowiednio domieszkowanych tlenków wanadu. Dużą rezystywność właściwą, rzędu $10^5 \Omega\text{m}$, w temperaturze 25°C , mają materiały termistorowe zawierające Mn, Co i Ni, Małą rezystywność, rzędu $5 \cdot 10^2 \Omega\text{m}$, mają materiały zawierające Mn, Co i Cu. Pierwszych używa się do masowej produkcji termistorów o dużej rezystancji a drugich - o małej rezystancji. Do produkcji termistorów żaroodpornych, stosowanych do 1000°C , stosuje się ZrO , z dodatkiem tlenków metali ziem rzadkich bądź też TiO , i SnO , z dodatkiem tlenków Sb, Ta i Zn.

Termistory niezależnie od typu mogą mieć różne kształty i wymiary. Mogą one mieć kształt pałeczek, perełek, płytek lub pastylek. Przykładowe ich wykonanie pokazano na rysunku 4.



Rys.4 Przykładowe wykonania czujników półprzewodnikowych

Duża bezwzględna wartość temperaturowego współczynnika rezystancji termistorów, możliwość wykonywania termistorów o bardzo małych wymiarach (w postaci perełek o średnicach 0,3 do 1 mm) i duże wartości ich rezystancji powodują to, że w coraz szerszym zakresie będą one wykorzystywane jako czujniki temperatury. Tym bardziej, że dzięki ciągłemu doskonaleniu technologii ich wytwarzania osiąga się coraz większą powtarzalność parametrów, a nieliniowa zależność ich rezystancji od temperatury nie stanowi już problemu w dobie powszechnego stosowania mikroprocesorów.

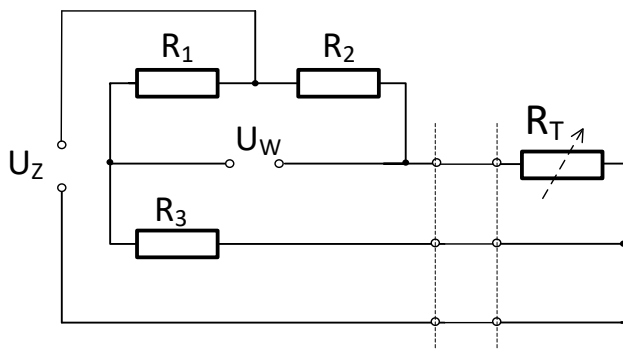
Czujniki półprzewodnikowe aktualnie stosuje się jako czujniki temperatury do bardzo dokładnych pomiarów małych różnic temperatury a także do kompensacji wpływu zmiany temperatury otoczenia.

4. POMIAR REZYSTANCJI CZUJNIKÓW TERMOMETRYCZNYCH REZYSTANCYJNYCH

Do pomiaru zmiany rezystancji czujników termometrycznych w warunkach przemysłowych stosuje się mostki, przede wszystkim, mostki niezrównoważone i zrównoważone, zasilane stabilizowanym napięciem lub prądem. Przy mniej dokładnych pomiarach, w wąskim zakresie temperatury stosuje się również

mierniki ilorazowe. Do najdokładniejszych pomiarów stosuje się mostki zrównoważone, także prądu zmiennego, z równoważeniem indukcyjnym i dzielnikami napięcia. Często stanowią one moduł wejściowy cyfrowego miernika – omomierza.

Na rysunku 5 pokazano schemat niezrównoważonego mostka Wheatstone'a z trójprzewodowym połączeniem czujnika termometrycznego R_T . Kompensacja zmian rezystancji połączeń czujnika z mostkiem wymaga pełnej symetrii elektrycznej i termicznej przewodów łączących.



Rys. 5 Mostek Wheatstone'a z termistorem R_T w jednej gałęzi mostka

Pierwotny sygnał wyjściowy niezrównoważonego mostka rezystancyjnego z czujnikiem do pomiaru temperatury, w standardowych przemysłowych urządzeniach, ma wartość w granicach od 0,2 do 1 mV/K. Jego zależność od temperatury jest nieliniowa z powodu nieliniowej zależności rezystancji czujnika od temperatury oraz z powodu nieliniowości napięcia wyjściowego symetrycznego mostka o jednej gałęzi aktywnej.

W Laboratorium do pomiaru rezystancji wykorzystuje się cyfrowe omomierze o rezystancji wejściowej $10^9 \Omega$ pozwalające na pomiar rezystancji w całym zakresie zmian rezystancji czujników. Wykorzystuje się uniwersalny miernik cyfrowy KEITHLEY 2000 pozwalający m. in. na dwu-przewodowy i dokładny, czwórprzewodowy pomiar rezystancji z rozdzielczością $0,0001 \Omega$.

5. POMIAR TEMPERATURY TŁOKA W TRAKCIE PRACY SILNIKA

Tłok silnika spalinowego jest poddawany jednocześnie obciążeniom mechanicznym od sił gazowo-masowych oraz obciążeniom cieplnym wywołanym zmiennym przejmowaniem ciepła przez denko tłoka od spalin zawartych w komorze spalania. Wielkość obciążeń cieplnych naprężenia tłoka jest zależna od warunków pracy silnika oraz od warunków chłodzenia. Najwyższe temperatury występują na denku tłoka, a najniższe na dolnych krawędziach płaszcza tłoka.

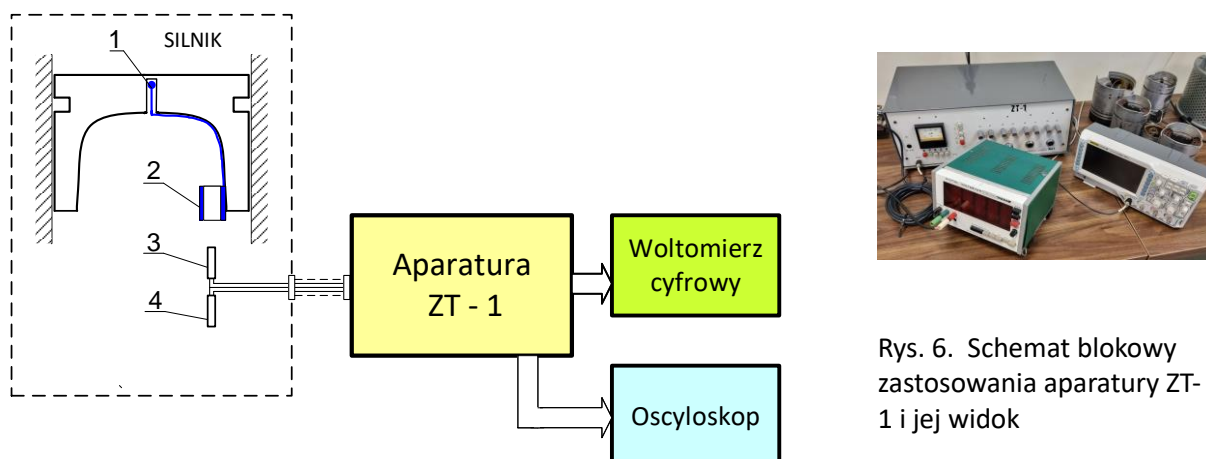
Bezpośrednią miarą obciążeń cieplnych tłoka jest wartość jego temperatury, która jest zależna od ilości ciepła przejmowanego przez denko tłoka od gazów z komory spalania oraz od oporów cieplnych, na jakie trafia na swej drodze strumień ciepła odpływający od denka tłoka przez strefę pierścieniową do ścianek cylindra i do czynnika chłodzącego.

Istnieją dwa główne cele pomiaru temperatury w tłoku. W pierwszym przypadku interesują nas wartości temperatury maksymalnej w określonych obszarach tłoka, które podczas eksploatacji silnika nie mogą przekraczać wartości granicznych dopuszczalnych ze względu na zastosowany materiał tłoka lub temperaturę koksowania użytego oleju w rowkach pierścieni tłoka. W drugim przypadku pomiar temperatury w określonych punktach tłoka pozwala na uściślenie warunków brzegowych wymiany ciepła koniecznych do przeprowadzenia symulacji numerycznych pola temperatury w tłoku i wyznaczenia naprężeń cieplnych spowodowanych nierównomiernym nagraniem materiału tłoka.

Aparatura ZT-1 do pomiaru temperatury tłoka

W ćwiczeniu do pomiaru temperatury tłoka użyto specjalistycznej aparatury do pomiaru temperatury w tłoku ZT-1 z obwodem wejściowym przystosowanym do pomiaru temperatury za pomocą czujników rezystancyjnych półprzewodnikowych (termistorów) i bezstykowego przekazywania sygnału pomiarowego

za pomocą sprzężenia indukcyjnego. Schemat blokowy zastosowania aparatury ZT-1 w pomiarze temperatury tłoka w silniku i jej widok jest pokazany na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy zastosowania aparatury ZT-1 i jej widok

Wejściowy obwód pomiarowy aparatury ZT-1 jest wykonany w postaci symetrycznego mostka indukcyjnego. Jedna połówka (półmostek czynny) wraz z obwodem sprzęgającym znajduje się w skrzyni korbowej silnika, a druga (półmostek regulacyjny) znajduje się na zewnątrz silnika w przyrządzie pomiarowym ZT-1. Półmostek czynny jest wykonany z dwóch identycznych cewek rdzeniowych (czynnej i kompensacyjnej). Obydwa półmostki są połączone ekranowanym kablem sygnałowym.

Termistor (1), zamocowany w punkcie pomiarowym w tłoku, jest połączony przewodami z cylindryczną cewką wtórną (2), zamocowaną na wsporniku do dolnej wewnętrznej ścianki tłoka. Termistor i cewka stanowią wtórny obwód pomiarowy. Podczas pracy silnika obwód ten porusza się wraz z tłokiem ruchem posuwisto-zwrotnym a w położeniu zwrotu wewnętrzного tłoka sprzęga się z nieruchomą cewką (3) czynnego półmostka, przymocowaną na wsporniku do dolnej krawędzi tulei cylindrowej. Na osi przemieszczania się cewki wtórnej jest zamocowana cewka pierwotna czynna (3) oraz cewka kompensacyjna (4). Cewki pierwotne (3) i (4) stanowią półmostek pomiarowy, który podczas pomiaru jest połączony kablem z półmostkiem regulacyjnym, znajdującym się w przyrządzie pomiarowym ZT-1.

Na rysunku 7 pokazano tłoki silników spalinowych przygotowane do pomiarów temperatury. Widoczne są cewki sprzężenia przymocowane do pobocznic tłoków oraz zespół cewek kompensacyjnych wraz z kablami łączeniowymi z aparaturą ZT-1.

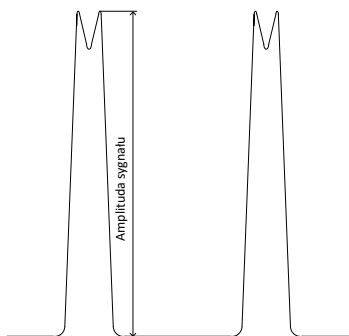


Rys. 7. Tłoki silników 8C22, PF 125p, Leyland SW680 i Wola h6 przygotowane do pomiarów temperatury

Sposób pomiaru temperatury tłoka

Przed pomiarem mostek jest zrównoważony i napięcie wyjściowe równa się zero. Podczas pracy silnika przy położeniu tłoka w pobliżu zwrotu wewnętrzного następuje sprzężenie cewki wtórnej (2) z cewką pierwotną czynną (3). Powoduje to zmianę catkowitej impedancji czynnego ramienia mostka na skutek

impedancji wnoszonej z obwodu wtórnego do pierwotnego. Wartość wnoszonej chwilowej impedancji z obwodu wtórnego do pierwotnego w chwili maksymalnego sprzężenia jest funkcją rezystancji termistora, a ta z kolei jest funkcją temperatury tłoka w miejscu zamocowania termistora. Napięcie nierównowagi mostka w chwilach sprzężenia cewek (2) i (3) jest podawane na dalsze człony układu pomiarowego. Dobór wzajemnego położenia cewek sprzężenia powoduje, że na wyjściu mostka tensometrycznego otrzymuje się sygnał pomiarowy w postaci krzywej dwugarbowej. Dwugarbowy kształt sygnału pomiarowego świadczy o poprawności pomiaru. Przebieg tego napięcia może być obserwowany na oscyloskopie dołączonym do aparatury ZT-1. Na rysunku 8 jest pokazany przykładowy oscylogram sygnału z jednego punktu pomiarowego.



Rys 3.8. Przykładowy oscylogram sygnału pomiarowego

Widoczna na oscylogramie linia oddzielająca impulsy dwugarbowe odpowiada stanowi bez sprzężenia (linia zerowa). Obydwa maksima impulsu dwugarbowego odpowiadają maksymalnym sprzężeniom. Sygnał dwugarbowy po detekcji i wzmacnieniu jest podawany na wyjście aparatury jako sygnał analogowy stałoprądowy. Wartość amplitudy napięcia wyjściowego jest zależna od rezystancji termistora i jest miarą temperatury tłoka w miejscu zamocowania termistora

Pomiar temperatury tłoka za pomocą opisanej metody może być wykonany pod warunkiem, że wcześniej zostaną wyznaczone charakterystyki wzorcowe dla każdego punktu pomiarowego: charakterystyka temperaturowa termistora i charakterystyka napięciowa toru pomiarowego aparatury ZT-1. Charakterystyki takie powinny być wykonane w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Ponieważ stworzenie rzeczywistych, dynamicznych warunków pomiaru jest trudne do zrealizowania, charakterystyki wzorcowe układu pomiarowego wyznacza się poza silnikiem w warunkach statycznych na stanowisku laboratoryjnym. W postępowaniu takim przyjmuje się założenia, że dla badanego silnika:

- w układzie pomiarowym nie występuje zaburzający wpływ mas metalowych i ruchomych podzespołów silnika (tłok, wał korbowy, korbówód) na własne pole magnetyczne cewek sprzęgających pierwotnych i wtórnych;
- w układzie pomiarowym występuje samokompensacja wpływu zmian temperatury w skrzyni korbowej silnika na zmianę parametrów elementów przekazywania sygnałów pomiarowych (cewki pomiarowe i wtórne);
- wyniki pomiarów nie zależą od prędkości obrotowej silnika.

Jeżeli układ pomiarowy spełnia przedstawione powyżej warunki, to wyznaczanie charakterystyki wzorcowej może być wykonane poza silnikiem w dwóch etapach:

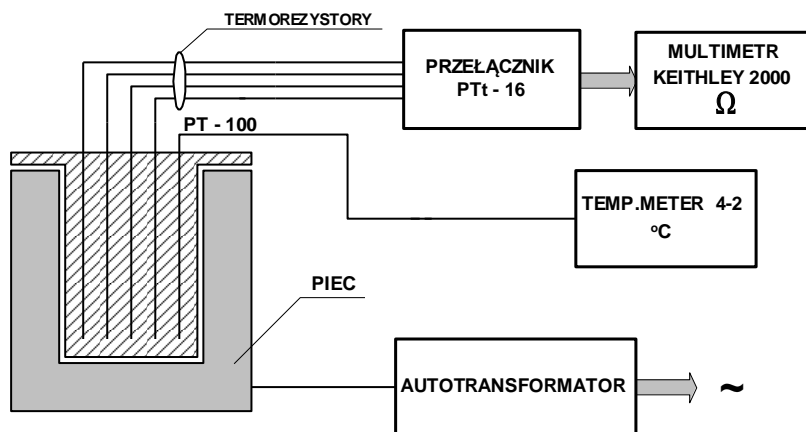
- a) wyznaczenie charakterystyk termometrycznych zmian rezystancji termistora w funkcji temperatury $R_T = f(T)$ dla wszystkich termistorów zastosowanych do pomiaru;
- b) wyznaczenie charakterystyki wzorcowej układu pomiarowego - zależności wartości napięcia wyjściowego od rezystancji termistora dla każdego toru pomiarowego aparatury.

Wyznaczenie charakterystyki termometrycznej termistora

Żaroodpome termistory perłkowe, zastosowane do pomiaru temperatury tłoka, mają zakres pomiarowy do 450°C i średnicę perłki od 0.3 do 1.2 mm. Dobrze nadają się do punkтового pomiaru

temperatury w całej objętości materiału tłoka. Wpływ zamocowania termistora na zmianę pola temperatury w jego otoczeniu jest pomijalnie mały. Dzieje się tak nawet w cienkich ściankach płaszcza tłoka ze względu na małe wymiary termistora w stosunku do pól przekrojów, przez które przepływa ciepło. W procesie wytwarzania, podczas obróbki cieplnej termistorów następują zmiany kształtów wiążące się ze zmianami ich własności fizycznych - między innymi i rezystancji. Wynika stąd konieczność doświadczalnego wyznaczania charakterystyki termometrycznej dla każdego egzemplarza termistora zastosowanego do pomiaru temperatury.

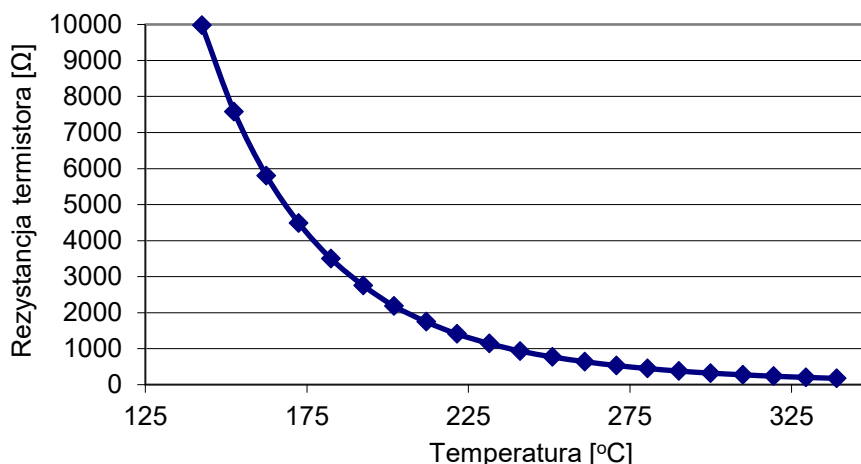
Wyznaczanie charakterystyki termometrycznej termistora sprowadza się do pomiaru jego rezystancji nominalnej przy różnych temperaturach środowiska, w którym termistor jest umieszczony. Blokowy schemat układu do wyznaczania charakterystyk termometrycznych termistorów jest przedstawiony na rysunku 9.



Rys. 9. Schemat układu do wzorcowania termistorów

Termistory umieszcza się w otworach bloku aluminiowego w piecu. Przewody termistorów są izolowane od ścianek otworów za pomocą dwukanałowych koszulek ceramicznych. Blok aluminiowy jest osadzony w piecu sylitowym. Temperatura pieca jest regulowana ręcznie przez zmianę napięcia zasilania grzejnika pieca za pomocą autotransformatora. Temperatura bloku aluminiowego jest mierzona za pomocą termopary typu K dołączonej do miernika temperatury RS-41. Wartość zmierzonej temperatury jest wyświetlana na wyświetlaczu cyfrowym miernika z rozdzielczością $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pomiar rezystancji czujnika jest przeprowadzany przy wolno narastającej temperaturze pieca, z odczytem co stały krok np. 10°C .

Przykładowe charakterystyki wzorcowania rezystora PT100 i termistora perełkowego pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Przykładowe charakterystyki wzorcowania rezystora PT100 i termistora perełkowego

W trakcie pomiarów temperatury tłoków w różnych silnikach stwierdzono dużą zależność wyznaczonej wartości temperatury w punkcie pomiarowym od temperatury cewek sprzężenia w skrzyni korbowej. Opracowano nową aparaturę ZT-2, będącą modyfikacją aparatury ZT-1. Uwzględniono w niej wpływ zmian

temperatury cewek kompensacyjnych znajdujących się w skrzyni korbowej na parametry mostka pomiarowego i tym samym na wartości napięcia wyjściowego z aparatury. Wykorzystano w tym celu algorytm obliczający skorygowaną wartość temperatury w punkcie pomiarowym na podstawie trzech charakterystyk toru pomiarowego uzyskanych przy trzech wartościach temperatury cewek kompensacyjnych. Przyjęto wartości temperatury cewek odpowiadające minimalnej, maksymalnej i średniej wartości temperatury mgły olejowej w skrzyni korbowej pracującego silnika. Wartości temperatury mgły olejowej są charakterystyczne dla danego silnika i muszą zostać mierzone przed procesem wzorcowania. Cewki kompensacyjne toru pomiarowego umieszczono w suszarce laboratoryjnej o ustawianej temperaturze wygrzewania. Pozwoliło to wyznaczyć trzy charakterystyki toru pomiarowego przy ustalonych wcześniej wartościach temperatury cewek sprzężenia. Cewki kompensacyjne w skrzyni korbowej są wyposażone w termoparę pozwalającą wyznaczyć aktualną, rzeczywistą temperaturę cewek. Algorytm oblicza rzeczywistą wartość temperatury w punkcie pomiarowej na podstawie trzech charakterystyk wzorcowania i zmierzonej temperatury cewek. W skład aparatury ZT-2 wchodzi mikrokomputer realizujący wyliczenie temperatury.

Wyznaczanie charakterystyki wzorcowej układu pomiarowego

Wyznaczanie charakterystyki wzorcowej samego układu pomiarowego aparatury ZT-1 powinno obejmować wszystkie człony, tj. cewki sprzęgające, kable połączeniowe i aparaturę ZT-1. Wyznaczanie charakterystyki wzorcowej pełnego układu pomiarowego różni się od pomiarów temperatury tłoka na pracującym silniku tym, że:

- wartości rezystancji termistora symulowane są odpowiednimi wartościami rezystancji ustawianymi na opornicy dekadowej.
- wzorcowanie odbywa się przy maksymalnym sprzężeniu cewek (czynnych) nie dynamicznie lecz statycznie.

Zbudowano elementy stanowiska laboratoryjnego do symulacji ruchu posuwisto zwrotnego tłoka. Przedstawiono je na rysunku 11.



Rys.11 Elementy stanowiska laboratoryjnego do symulacji ruchu posuwisto zwrotnego tłoka

Ruch suwadła jest uzyskany za pomocą tarczy zamocowanej na osi silnika prądu stałego. Zmiana napięcia zasilania silnika powoduje zmianę prędkości obrotowej tarczy. Symuluje to zmianę prędkości obrotowej silnika w rzeczywistych pomiarach. Do suwadła jest zamocowana cylindryczna cewka połączona z rezystorem dekadowym. W punkcie zwrotnym ruchu suwadła cewka cylindryczna sprzęga się z nieruchomą cewką walcową przymocowaną do wspornika. Cewka nieruchoma stanowi element

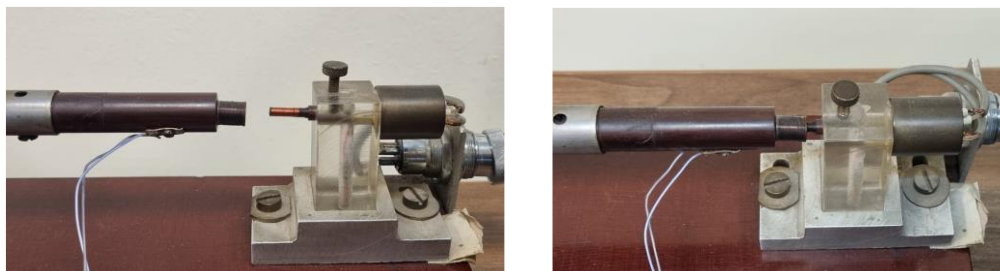


Rys.12 Stanowisko laboratoryjne z aparaturą ZT-1

wejściowy mostka aparatury ZT-1. Widok kompletnego stanowiska laboratoryjnego do wyznaczania charakterystyki wzorcowej układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 12.

Wyznaczenie charakterystyki toru pomiarowego $U = f(R_T)$ odbywa się w etapach:

- 1) Na przyrządzie do wzorcowania (suwadło z silnikiem napędzającym) ustawiamy cewkę suwadła w pozycji bez sprzężenia z cewką pierwotną na wsporniku – rysunek 13.a. Pokrętłami kanału pomiarowego na płycie czołowej aparatury ZT-1 doprowadzamy mostek wejściowy do stanu równowagi – wskazania miernika równe 0V.
- 2) Ustawiamy cewkę tłokową w pozycji maksymalnego sprzężenia z cewką pierwotną – rysunek 13.b. Na rezystorze dekadowym ustawiamy kolejno wartości oporności odpowiadającą wartościom rezystancji termistora w całym zakresie zmian jego rezystancji i odczytujemy wartość napięcia na woltomierzu.

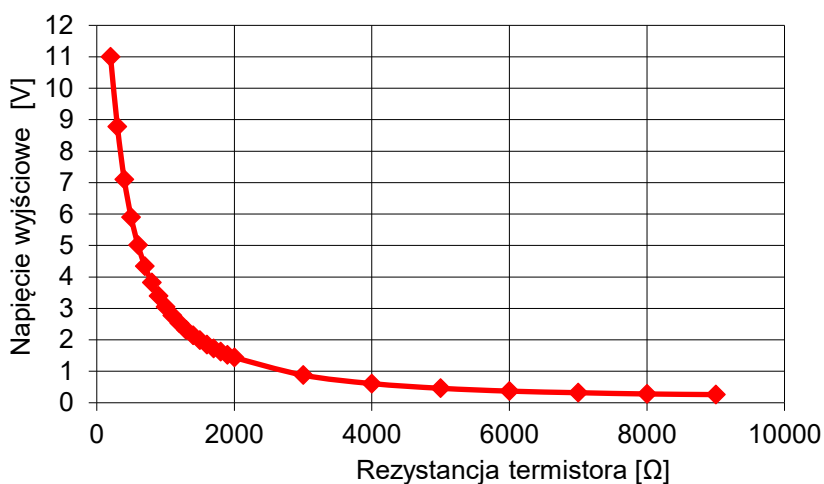


a)

b)

Rys.13 Wzajemne położenie cewek na stanowisku laboratoryjnym: a) bez sprzężenia, b) maksymalne sprzężenie.

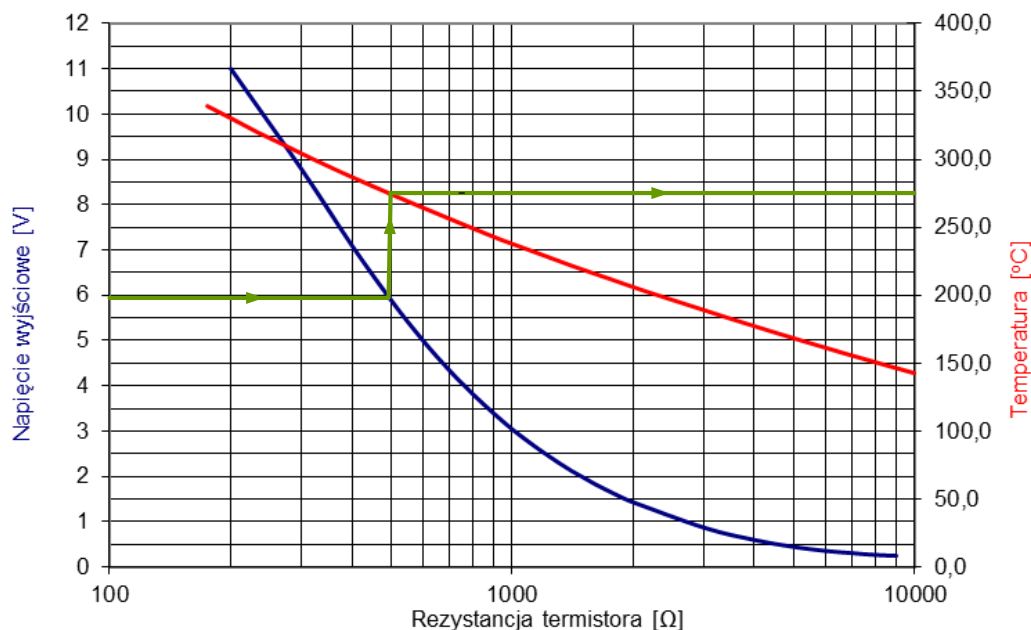
Wyniki pomiarów należy każdorazowo zapisać w odpowiedniej tabelce. Przykładową charakterystykę toru pomiarowego pokazano na rysunku 14.



Rys.14 Charakterystyka toru pomiarowego $U_{\text{wyjściowe}} = f(R_T)$

Charakterystyki temperaturową termistora $R_T = f(T)$ i toru pomiarowego $U = f(R_T)$ należy zestawić na wspólnym wykresie $T = f(U)$ o dwóch skalach na osi y. Pozioma oś wykresu dotyczy rezystancji termistora i ma logarytmiczną skalę wartości rezystancji. Przykładowe wyniki zestawienia obu charakterystyk na jednym polu przedstawiono na rysunku 3.15.

Za pomocą tego wykresu można bezpośrednio odczytać wartość temperatury w punkcie pomiarowym znając wartość zmierzonego napięcia. Przykładowy odczyt przedstawiono na rysunku 15 za pomocą linii przerywanej zaczynającej się na osi napięcia U od wartości 6V. Wartość temperatury odczytana z wykresu wynosi 275°C .



Rys15 Zestawienie charakterystyk temperaturowej termistora i wzorcowania toru pomiarowego

OPIS WYKONYWANIA ZADAŃ W RAMACH ĆWICZENIA LABORATORYJNEGO.

Celem pomiarów jest sporządzenie przebiegu charakterystyk temperaturowych wybranych termometrów rezystancyjnych oraz wyznaczenie charakterystyki toru pomiarowego aparatury do pomiaru temperatur tłoka silnika spalinowego.

I WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYK TEMPERATUROWYCH WYBRANYCH TERMOMETRÓW REZYSTANCYJNYCH

Ze względu na zakres zmian temperatury w tłoku mieszczący się w przedziale do 350 °C wzorcowanie termistora w całym zakresie zmian temperatury w trakcie ćwiczeń w warunkach quasi-ustalonych zajęłoby zbyt dużo czasu. W ramach ćwiczenia należy wykonać wzorcowanie dwóch czujników rezystancyjnych: termistora i rezystora metalicznego platynowego w zakresie temperatury do 150°C.

W ramach pierwszej części ćwiczenia należy:

1. Sprawdzić połączenia elementów aparatury do wzorcowania termistorów według rysunku 9.
2. Włączyć zasilanie przyrządów i odczekać ok. 5 minut.. Ustawić rodzaj pracy multimetru na pomiar rezystancji (zakres 10MΩ) – pomiar dwuprzewodowy.
3. Sporządzić tablicę do zapisywania wyników pomiarów według wzoru (tablica 2).

Tablica 2

$T_{\text{pieca}} [^{\circ}\text{C}]$	$R_{T1} [M\Omega]$	$T_{\text{pieca}} [^{\circ}\text{C}]$	$R_{T2} [M\Omega]$	$T_{\text{pieca}} [^{\circ}\text{C}]$	$R_{T3} [M\Omega]$
25,0		26,0		27,0	
35,0		36,0		37,0	
45,0		46,0		47,0	
...		

4. Nastawić zadaną wartość napięcia zasilania pieca (pokrętko autotransformatora nastawić na działkę podaną przez Wykładowcę. Za pomocą pokrętki przełącznika Pt-16 dołączać kolejno termorezystory do multimetru. Zapisać wartości zmierzonej rezystancji w tabeli dla temperatury pieca podanej w tablicy 2. Pomiary przeprowadzić w zakresie podanym przez Wykładowcę.

UWAGA: Przy osiągnięciu przez piec temperatury 95°C - WYŁĄCZYĆ ZASILANIE PIECA (pokrętko autotransformatora ustawić na ZERO) !!!

WYNIKI pomiarów przedstawić w postaci wykresu dwóch krzywych na jednym rysunku, sporządzonego np. w Excelu (skala półlogarytmiczna na osi R dla rezystancji termistora).

II WYZNACZENIE CHARAKTERYSTYKI TORU POMIAROWEGO APARATURY ZT-1 DO BADANIA TEMPERATURY TŁOKA SILNIKA SPALINOWEGO.

1. Włączyć zasilanie przyrządów i odczekać ok. 5 minut. Ustawić wartość 200Ω na rezystorze dekadowym. Sprawdzić i ew. skorygować położenie suwadła dla uzyskania maksymalnego sprzężenia cewek (uzyskać maksimum wartości napięcia wyjściowego).
2. Przepisać, z danych dostarczonych przez prowadzącego, charakterystykę temperaturową termistora $R_T=f(T)$.
3. Sporządzić tablicę wg wzoru:

Tablica.3

R_T [Ω]	$U_{\text{wyjściowe}}$ [V]
9000	
8000	
.....	

Odczytać wartość napięcia wyjściowego dla następujących wartości rezystancji nastawianych na rezystorze dekadowym:

- od 9000Ω do 2000Ω co 1000Ω,
- od 1900Ω do 200Ω co 100Ω.

Uwaga: przed odczytem napięcia na woltomierzu wcisnąć każdorazowo przycisk zerowania **D** w aparaturze ZT-1.

Sporządzić wspólny wykres charakterystyki temperaturowej termistora $R_T=f(T)$ i charakterystyki toru pomiarowego $U_{\text{wyjściowe}} = f(R_T)$ korzystając z ustawienia osi R jako osi poziomej na rysunkach obu charakterystyk). Oś R przedstawić jako zmienną w skali logarytmicznej. Korzystając z obu sporządzonych wykresów odczytać wartość temperatury dla podanej przez prowadzącego wartości napięcia wyjściowego.

SPRAWOZDANIE

W sprawozdaniu:

- przedstawić wykresy opisane w punktach I oraz II
- podać wartość napięcia $U_{\text{wyjściowe}}$ podaną przez prowadzącego i odpowiadającej mu temperatury tłoka, wyznaczonej z wykresu sporządzonego w części II,.

Wykresy sporządzić np. w Excelu.

Pytania kontrolne:

1. Budowa i własności rezystancyjnych metalicznych czujników temperatury.
2. Budowa i własności rezystancyjnych półprzewodnikowych czujników temperatury.
3. Wyjaśnij fizykę zmiany rezystancji czujników termometrycznych metalicznych i półprzewodnikowych NTC.
4. Porównaj charakterystyki temperaturowe rezystancyjnych czujników metalicznych i półprzewodnikowych.



5. Omów działanie układu do pomiaru temperatury tłoka silnika spalinowego.

LITERATURA

- 1 Terpiłowski J., Panas A., Wiśniewski S., Preiskorn M., Koniorczyk P., Zmywaczyk J., Szodrowski S.: Termodynamika. Pomiary cieplne. WAT, Warszawa 1994;
- 2 Instrukcje do ćwiczeń laboratoryjnych: <https://wml.wat.edu.pl/instytut-techniki-lotniczej/zaklad-aerodynamiki-i-termodynamiki/materialy-dydaktyczne/>
- 3 Michalski L., Eckersdorf K.: Pomiary temperatury, WNT 1996;