



Politechnika Lubelska
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Urządzeń Elektrycznych i TWN
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
www.kueitwn.pollub.pl

LABORATORIUM INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Podstawy teoretyczne do ćwiczenia **nr 4**

Podstawowe właściwości materiałów przewodzących

1. CEL ĆWICZENIA

Celem pierwszej części ćwiczenia jest określenie rezystywności metali i wyznaczenie temperaturowego współczynnika rezystywności trzech różnych materiałów przewodzących. Stanowisko laboratoryjne umożliwia pomiar rezystancji w temperaturach od temperatury otoczenia (około 20°C) do około 110°C. Badanymi materiałami są: miedź, żelazo i konstantan.

Celem drugiej części ćwiczenia jest pomiar i porównanie rezystancji zestykowej wyłączników o różnym stopniu wyeksploatowania.

2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

2.1. TEORIE OPISUJĄCE PRZEWODNICTWO ELEKTRYCZNE METALI

Zdolność niektórych materiałów do dobrego przewodzenia prądów można wyjaśnić w oparciu o teorie zakładające, iż nośnikami ładunku elektrycznego są elektrony. Pierwsze niedoskonałe teorie powstały na początku XX wieku. Oparte były na klasycznych zasadach stosowanych już wcześniej w opisie gazu doskonałego. Niezgodności między wyliczeniami mikroskopowymi, a wielkościami makroskopowymi, które możemy zmierzyć, spowodowały, że skorzystano z osiągnięć fizyki kwantowej. Powstała w ten sposób kwantowa teoria przewodnictwa daje wyniki zgodne z wynikami doświadczeń.

2.1.1. Klasyczna teoria przewodnictwa elektronowego metali

Pierwszą teorię przewodnictwa metali opracował P. Drude w roku 1900. Opierała się ona na założeniu, że nośnikami ładunku elektrycznego w metalach są elektrony. Pole elektryczne istnieje w bezpośrednim sąsiedztwie jonów i zakłóca ono bieg elektronów. Zakłócenia te można traktować schematycznie jako zderzenia elektronów z jonami sieci.

Klasyczna teoria przewodnictwa elektronowego (Drude'ego) metali gaz elektronowy traktowała jako gaz doskonały i w celu jego opisu stosowała kinetyczno - molekularną teorię gazu doskonałego. W związku z tym elektronom możemy przypisać pewną drogę swobodną, przebytą pomiędzy dwoma kolejnymi zderzeniami, czyli dokładniej między dwoma wyraźnymi zakłóceniami biegu elektronu przez jony. Oznaczmy długość średniej drogi swobodnej elektronu przez l , przez v jego średnią prędkość termiczną (wynikającą ze średniej energii kinetycznej gazu elektronowego).

Jeżeli do metalu przyłożymy zewnętrzne pole elektryczne o natężeniu E , to popłynie w nim prąd elektryczny o gęstości j , przy czym zgodnie z prawem Ohma:

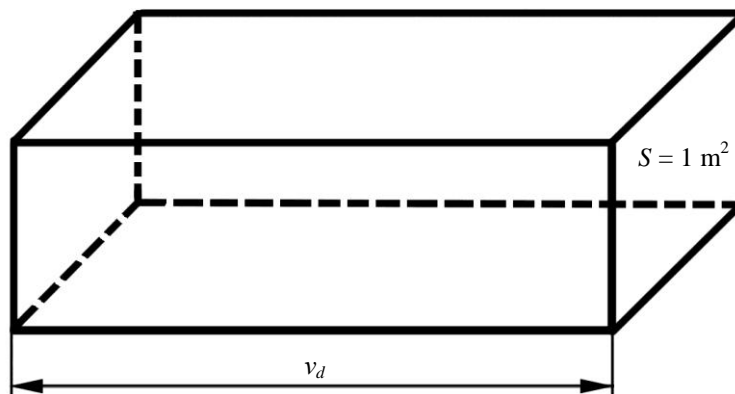
$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (1)$$

Współczynnik proporcjonalności σ nosi nazwę konduktywności (przewodności właściwej) metalu (przewodnika).

Używana jest również wielkość, zwana rezystywnością (oporem właściwym), będąca odwrotnością przewodności:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2)$$

Ponieważ ładunek elektronu jest ujemny, więc kierunek jego ruchu jest przeciwnie skierowany do kierunku wektora wymuszającego pola elektrycznego \vec{E} . Ruch elektronu pod wpływem pola elektrycznego nazywamy dryfem, jego średnią prędkość nazywamy prędkością unoszenia i oznaczamy przez v_d . W celu wyznaczenia gęstości prądu posłużymy się następującym modelem, jak na rysunku 1. Budujemy prostopadłościan o podstawie $S = 1 \text{ m}^2$ i długości boku v_d .



Rys. 1. Ilustracja sposobu wyznaczania gęstości prądu w przewodniku

Objętość takiego prostopadłościanu wynosi v_d . W objętości tej znajduje się liczba elektronów $n \cdot v_d$, gdzie n - koncentracja elektronów w przewodniku. Wszystkie te elektrony w ciągu jednej sekundy przejdą przez podstawę prostopadłościanu wywołując prąd o gęstości:

$$\vec{j} = -en\vec{v}_d \quad (3)$$

Ze wzorów (1) i (3) wyznaczamy średnią prędkość unoszenia elektronów:

$$v_d = -\frac{\sigma}{ne}\vec{E} = -\mu\vec{E} \quad (4)$$

Prędkość ta jest wprost proporcjonalna do natężenia pola elektrycznego. Współczynnik proporcjonalności:

$$\mu = \frac{\sigma}{ne} \quad (5)$$

nazywamy ruchliwością elektronów.

Wyznaczając przewodność właściwą przewodnika ze wzoru (5) otrzymamy:

$$\sigma = en\mu \quad (6)$$

Przybliżoną wartość ruchliwości elektronów μ można obliczyć za pomocą następującego uproszczonego rozumowania. Załóżmy, że wszystkie elektrony mają tę samą średnią prędkość ruchu cieplnego v i tę samą średnią drogę swobodną l , a więc między ich zderzeniami upływa ten sam czas t . Pole elektryczne nadaje elektronom przyspieszenie:

$$\vec{a} = -\frac{e\vec{E}}{m}, \quad (7)$$

zatem pod koniec średniej drogi swobodnej elektrony uzyskują prędkość:

$$\vec{v}_d = -\frac{e\vec{E}t}{m} \quad (8)$$

Ruchliwość elektronów obliczymy porównując wzór (8) z wzorem (4), skąd, otrzymamy:

$$\mu = \frac{e\bar{t}}{m} = \frac{e\bar{l}}{m\bar{v}} \quad (9)$$

Podstawiając wyrażenie (9) do wzoru (6) otrzymamy wzór na przewodność elektryczną metali:

$$\sigma = \frac{ne^2\bar{l}}{m\bar{v}} \quad (10)$$

Otrzymana w ten sposób postać jest równoważna wyrażeniu:

$$\sigma = \frac{ne^2\bar{l}}{\sqrt{3}km\sqrt{T}} \quad (11)$$

Wynika z niej, że konduktywność jest odwrotnie proporcjonalna do pierwiastka z temperatury bezwzględnej, gdyż kwadrat średniej prędkości ruchu cieplnego jest proporcjonalny do temperatury. Otrzymane wyniki (11) są niezgodne z wynikami badań nad konduktywnością. Z doświadczeń wynika, że rezystywność w pobliżu temperatury pokojowej zależy liniowo od temperatury.

Teoria Drude'ego pomimo swojej niedoskonałości i wielu błędnych wniosków (ciepło atomowe metali, zależność temperaturowa konduktancji) w wielu sytuacjach prowadzi do dostatecznie dobrych wniosków. Po pierwsze wskazuje, że przewodzenie metali jest związane z ruchem ujemnie naładowanych elektronów. Po drugie wyjaśnia podstawowe zasady rządzące prawami przepływu prądu elektrycznego przez metale (prawo ciągłości, prawo Ohma). Obrazuje też, dlaczego przewodność zależy od temperatury.

2.1.2. Kwantowa teoria przewodnictwa elektrycznego

Wzór (10) wyprowadzony został przez Sommerfelda na innej drodze, mianowicie na podstawie kwantowej statystyki Fermiego-Diraca.

Według teorii kwantowej ruch elektronu wewnątrz kryształu metalu rozpatruje się jako ruch fal elektronowych, o długości fali określonej wzorem de Broglie'a:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (12)$$

Podobnie jak promieniowanie elektromagnetyczne, które przechodząc przez ośrodek materialny ulega rozproszeniu, tak i fale elektronowe przechodząc przez kryształ, w którym znajdują się centra rozproszenia w postaci niedoskonałości sieci krystalicznej oraz fluktuacji gęstości wskutek drgań sieci, ulegają rozproszeniu. Z obliczeń wynika, że średnią drogę swobodną l elektronów w takim ośrodku można wyrazić wzorem:

$$\bar{l} = \frac{Ea}{\pi n k T}, \quad (13)$$

gdzie: E - moduł Younga, a - stała sieci krystalicznej, k - stała Stefana-Boltzmann, T - temperatura bezwzględna, n - liczba atomów w jednostce objętości.

Po podstawieniu zależności (13) do wzoru (10) na przewodność właściwą metali otrzymujemy wzór:

$$\sigma = \frac{e^2 E a}{m \pi v_d k T}, \quad (14)$$

z którego wynika, że **przewodność właściwa metali jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury bezwzględnej.**

Z przeprowadzonych wcześniej rozważań wynika, że zarówno przewodność właściwa, jak i opór właściwy metali zależą od temperatury. Zgodnie ze wzorem (14) mamy związek $\rho \sim T$.

Zależność taką otrzymuje się np. dla bardzo czystej miedzi, której opór właściwy osiąga minimum w temperaturze zera bezwzględnego. Technicznie otrzymywane metale zawierają zwykle domieszki innych pierwiastków. Opór właściwy takich metali wyraża się związkiem:

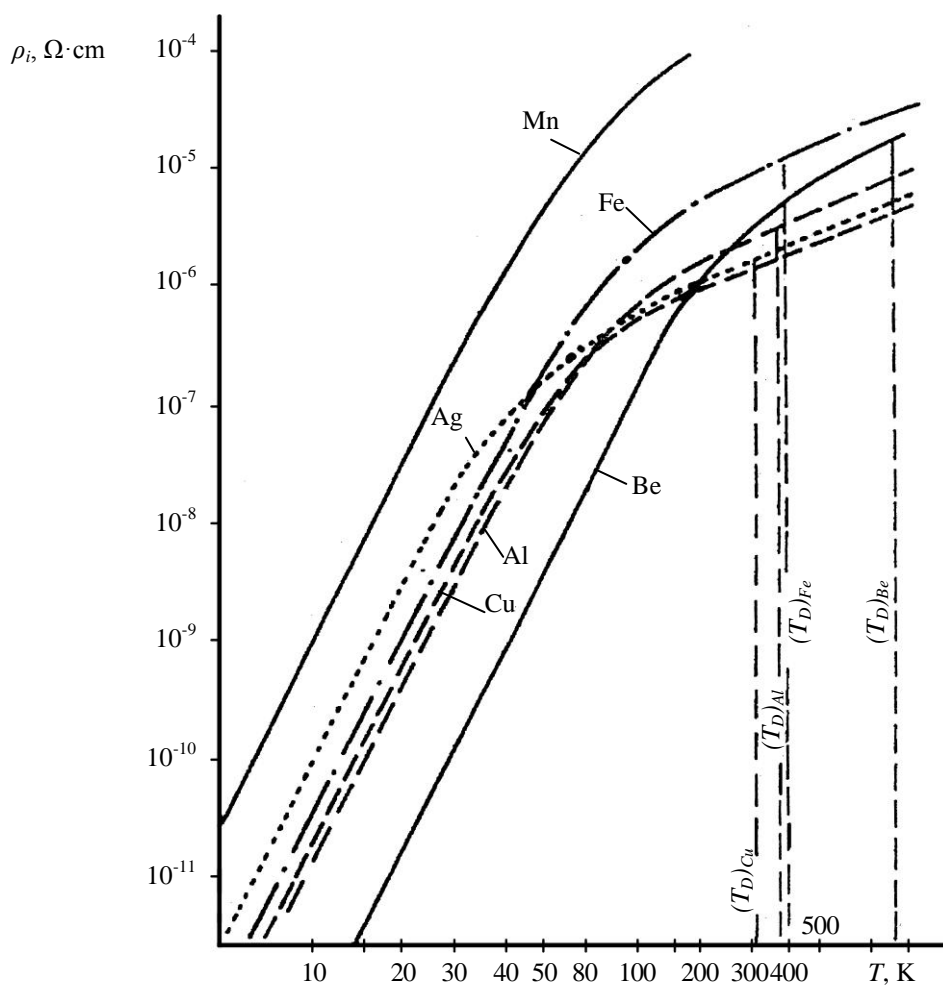
$$\rho = \rho_r + \rho_i, \quad (15)$$

gdzie ρ_r nosi nazwę rezystywności resztkowej. Wielkość ta zależy od zakłóceń sieci krystalicznej, a wobec tego praktycznie nie zależy od temperatury. Wielkość ρ_i nazywamy rezystywnością idealną, która zależy od drgań cieplnych jonów w węzłach sieci krystalicznej, czyli jest uzależniona od temperatury. Zależność ρ_i od temperatury dla kilku przewodników przedstawia rysunek 2. W każdej z tych charakterystyk można wyróżnić dwa obszary. Punktem je dzielącym jest charakterystyczna

dla każdego metalu temperatura zwana temperaturą Debye'a T_D . Powyżej $1/3T_D$ wartość ρ_i wzrasta praktycznie wprost proporcjonalnie do temperatury. Poniżej - zależność na ρ_i nabiera charakteru potęgowego. Dla temperatury mniejszej od $0,1T_D$ ρ_i staje się proporcjonalna do temperatury bezwzględnej w piątej potęgze. Przybliżoną zależność na ρ_i w zakresie od $0,25T_D$ do $1,5T_D$ podaje wzór Borelius-Gruneyena:

$$\rho_i = \rho_D \left(1,17 \frac{T}{T_D} - 0,17 \right), \quad (16)$$

gdzie ρ_D jest rezystywnością mierzoną w temperaturze Debye'a.



Rys. 2. Zależność rezystancji idealnej od temperatury dla kilku metali. Liniami przerywanymi zaznaczono temperaturę Debye'a dla miedzi Cu, aluminium Al, żelaza Fe i berylu Be

W praktyce, dla wielu metali, dla których T_D nie odbiega daleko od temperatury 293 K, jak np. dla miedzi i aluminium, posługujemy się jeszcze bardziej uproszczonym wzorem na zależność rezystywności od temperatury, a mianowicie:

$$\rho = \rho_{20^\circ\text{C}} (1 + \alpha(T - T_{20^\circ\text{C}})), \quad (17)$$

gdzie: ρ - rezystywność całkowita (łącznie idealna i resztkowa), $\rho_{20^\circ\text{C}}$ - rezystywność przy temperaturze 20°C (293K), α - temperaturowy współczynnik rezystywności, $T_{20^\circ\text{C}}$ - temperatura odniesienia równa zwykle 20°C .

Powyższa zależność jest słuszna również dla stopów, przy czym w miarę zwiększania zakłóceń sieci krystalicznej danego metalu przez dodawanie innego metalu, współczynnik α maleje. Empiryczna zależność zwana regułą Mathesena mówi, że iloczyn rezystywności ρ i współczynnika α , dla danej temperatury, jest wielkością w przybliżeniu stałą dla różnych stosunków składników stopu i równa się iloczynowi $\rho\alpha$ metalu czystego. Wartość ρ_i dąży do zera, gdy temperatura T (K) dąży do zera, ponieważ znikają wówczas drgania cieplne jonów. W niższych temperaturach uwypukla się zatem wpływ rezystywności resztkowej ρ_r . Jeśli o wartości ρ_r decydują zniekształcenia sieci krystalicznej, a nie zanieczyszczenia, to stan ten można poprawić wyżarzając odpowiednio dany przewodnik. Proces ten poprawia stopień uporządkowania sieci krystalicznej, a tym samym obniża rezystywność. Wzrost regularności sieci krystalicznej po wyżarzeniu powoduje, iż średnia droga swobodna elektronu znajdującego się w paśmie przewodnictwa ulega znacznemu wydłużeniu. Wartość ρ_r można wydatnie zmniejszyć w miarę podwyższania czystości metalu. W skali technicznej można wyprodukować metale o bardzo wysokiej czystości nawet do 99,9999% zawartości głównego składnika.

W zakresie temperatur od -30°C (243K) do $+100^\circ\text{C}$ (373K), w jakim zazwyczaj się odbywa praca większości materiałów przewodowych, zależność rezystywności tych materiałów od ich temperatury ma charakter liniowy (rysunek 3), opisany następującą zależnością:

$$\rho_T = \rho_{20^\circ\text{C}}[1 + \alpha_{20^\circ\text{C}}(T - 293\text{K})], \quad (18)$$

gdzie: ρ_T - rezystywność w danej temperaturze, $\rho_{20^\circ\text{C}}$ - rezystywność w temperaturze 20°C (293K), $\alpha_{20^\circ\text{C}}$ - temperaturowy współczynnik rezystywności, odpowiadający temperaturze odniesienia 20°C (293K).

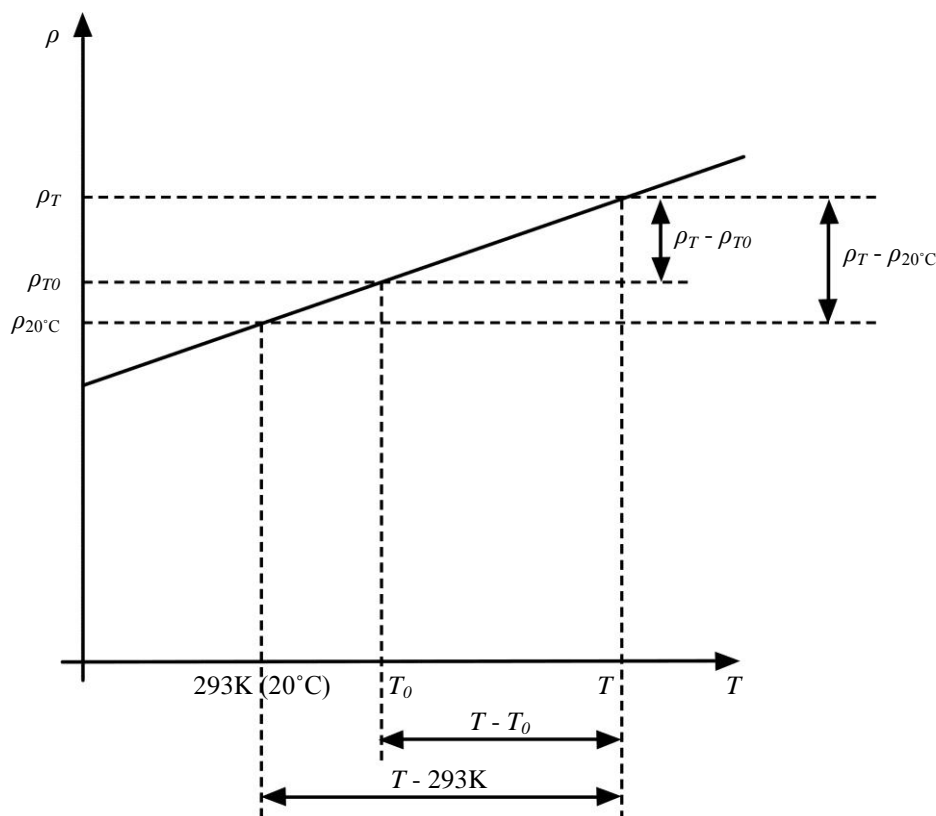
Przekształcając zależność (17) otrzymujemy wzór na temperaturowy współczynnik rezystywności:

$$\alpha_{20^\circ\text{C}} = \frac{\rho_T - \rho_{20^\circ\text{C}}}{\rho_{20^\circ\text{C}}(T - 293\text{K})} \quad (19)$$

Gdy w badaniach laboratoryjnych najniższa temperatura pomiarowa T_0 różni się od 20°C , temperaturowy współczynnik rezystywności należy obliczać ze wzoru:

$$\alpha_{T_0} = \frac{\rho_T - \rho_{T_0}}{\rho_{T_0}(T - T_0)} \quad (20)$$

Parametry, wchodzące do wzoru (19) przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zależność rezystywności materiałów przewodzących od temperatury

2.2. REZYSTANCJA ZESTYKOWA

Zestykiem nazywamy część toru prądowego, w której przepływ prądu odbywa się dzięki umożliwiającej to styczności dwóch styków.

Zestyki dzielimy ze względów konstrukcyjnych na podstawowe, opalne i pośrednie. Dwa pierwsze połączone równolegle tworzą zestyk zespolowy.

Lity przewód po przecięciu i ponownym zetknięciu, nawet z dużym naciskiem, będzie miał większą rezystancję. Jest to spowodowane wprowadzeniem zestyku do toru prądowego.

Rezystancja wprowadzonego zestyku wyznaczana według technicznego sposobu pomiaru zawiera następujące składniki:

- rezystancję litego zespołu przewodników, tj. styków tworzących zestyk,
- rezystancję przewężenia przekroju dla przepływu prądu,
- rezystancję warstw zewnętrznych (nalotowych) występujących na stykających się ze sobą powierzchniach styków.

W praktycznych obliczeniach rezystancji zestykowej używa się wzoru półempirycznego, pozwalającego na wyznaczenie składnika tej rezystancji od przewężeń przepływu prądu, z uwzględnieniem przeciętnych warstw nalotowych:

$$R_p = \frac{c\rho}{(0,1F)^m}, \quad (21)$$

gdzie: ρ - rezystywność materiału styków, c - stała zależna od stanu powierzchni styków, m - stała zależna od rodzaju zestyku (płaszczyznowy $m = 1,0$, liniowy $m = 0,7$, punktowy $m = 0,5$).

Przykładowe wartości $c\rho$ dla różnych materiałów zestyków symetrycznych (o stykach z tego samego materiału) przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Wartości $c\rho$ dla różnych materiałów zestyków

MATERIAŁ STYKÓW	$c\rho, m\Omega \cdot N^m$
Cu-Cu	0,08-0,14
Ag-Ag	0,06
Al-Al	0,13
Ms-Ms	0,67

3. PRZEPROWADZENIE POMIARÓW

3.1. WYZNACZENIE WPLYWU TEMPERATURY NA REZYSTYWNOSĆ MATERIAŁÓW PRZEWODZĄCYCH

3.1.1. Obiekt badań

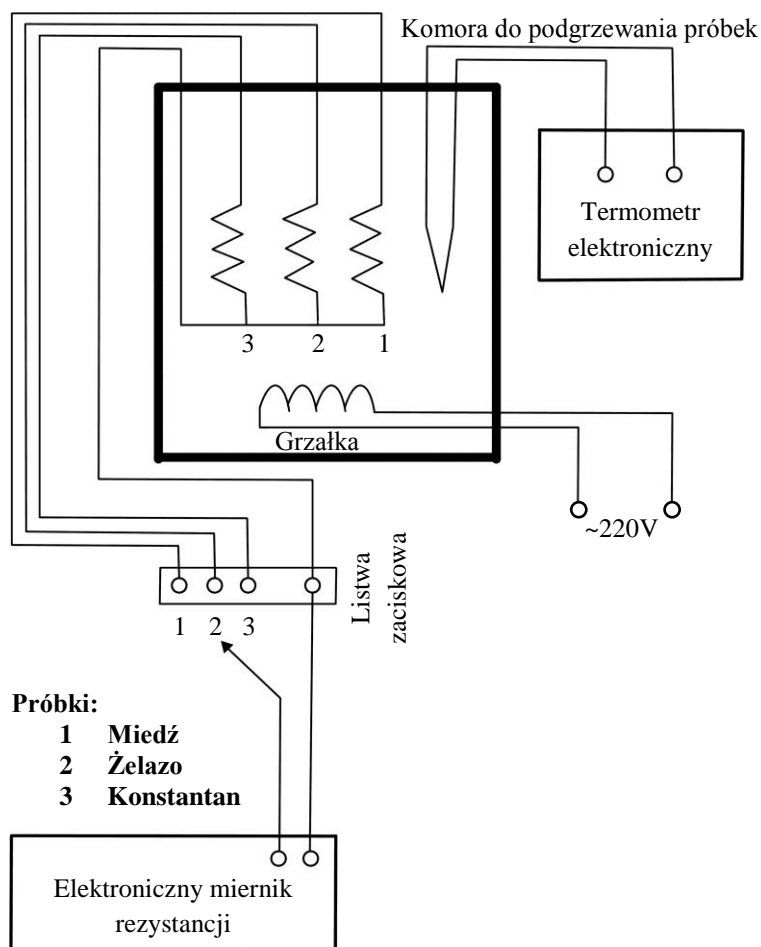
W celu określenia wpływu temperatury na przewodność przewodników metalowych, badaniom zostaną poddane próbki wykonane z trzech różnych materiałów: **miedzi**, **żelaza** oraz **konstantanu**.

Podczas pomiarów zostaną użyte próbki poszczególnych materiałów wykonane z drutów o różnym przekroju i długości $l = 5$ m. Średnice poszczególnych drutów wynoszą:

- dla miedzi $\phi = 0,1$ mm,
- dla żelaza $\phi = 0,25$ mm,
- dla konstantanu $\phi = 0,35$ mm.

Próbki te zostały umieszczone w komorze piecyka z grzałką o mocy 1,5 kW. Po włączeniu grzałki (wyłącznik oznaczony literą G) i osiągnięciu przez komorę temperatury 40°C należy wyłączyć grzałkę i od razu załączyć chłodzenie (wyłącznik oznaczony literą CH). Następnie czekamy aż komora osiągnie temperaturę powyżej 100°C, gdy temperatura zacznie opadać odczytujemy z mostka RLC rezystancję trzech materiałów przewodzących: żelaza (F), miedzi (C), konstantanu (K) co 10°C, przełączając odpowiednio przełącznik na listwie zaciskowej.

3.1.2. Sposób wykonania pomiarów



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do badania wpływu temperatury na rezystancję materiałów przewodzących

Do wykonania niezbędnych pomiarów służy stanowisko laboratoryjne, wykonane według schematu przedstawionego na rysunku 4.

Grzałka elektryczna zasilana jest napięciem o wartości 230 V. Dzięki temu zachowana jest odpowiednia równomierność nagrzewania próbek. Temperaturą wyjściową jest temperatura otoczenia. Maksymalna temperatura próbek wynosi $100 \div 110^{\circ}\text{C}$.

Do pomiarów używa się następujących mierników:

- miernik elektroniczny do pomiaru rezystancji, pojemności i indukcyjności typu ELC-3131D, nr PL-W-52109 - pomiar rezystancji próbek,
- elektroniczny miernik temperatury typu TES 1310,
- miernik RLC pracujący z częstotliwością pomiarową równą 1 kHz.

Wyniki pomiarów należy zanotować w tabeli 2.

Ćw. 4. Podstawowe właściwości materiałów przewodzących

Tabela 2. Wyniki pomiarów rezystancji w zależności od temperatury

L.p.	Temperatura	Rezystancja		
	°C	Miedź (C)	Żelazo (F)	Konstantan (K)
		Ω	Ω	Ω
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				
8.				
9.				
10.				
11.				
12.				

Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów należy obliczyć rezystywność próbek, korzystając ze wzoru:

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (22)$$

gdzie: R - rezystancja w danej temperaturze, S - pole przekroju próbki, l - długość próbki.

Następnie należy obliczyć temperaturowy współczynnik rezystywności α , korzystając ze wzoru:

$$\alpha = \frac{\rho_T - \rho_p}{(T - T_p)\rho_p}, \quad (23)$$

gdzie: ρ_T - rezystywność w danej temperaturze, ρ_p - rezystywność w temperaturze początkowej T_p .

Wymiary próbek materiałów przewodzących zestawiono w tabeli 3. Wyniki obliczeń rezystywności należy zanotować w tabeli 4, natomiast wartości współczynnika rezystywności α należy zanotować w tabeli 5.

Tabela 3. Wymiary próbek materiałów przewodzących

MATERIAŁ PRÓBKII	Długość l , m	Średnica d , mm
Miedź (Cu)	5,0	0,10
Żelazo (Fe)	5,0	0,25
Konstantan (K)	5,0	0,35

Tabela 4. Wyniki obliczeń rezystywności

L.p ·	Temperatura	Rezystywność ρ		
	°C	Miedź (C)	Żelazo (F)	Konstantan (K)
		Ω	Ω	Ω
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				
8.				
9.				
10.				
11.				
12.				

Tabela 5. Wyniki obliczeń temperaturowego współczynnika rezystywności

Material	Miedź (C)	Żelazo (F)	Konstantan (K)
Współczynnik α			

3.2. POMIAR REZYSTANCJI ZESTYKOWEJ WYŁĄCZNIKÓW TYPU W10

3.2.1. Obiekt badań

Pomiar rezystancji zestyków wyłączników W10 przeprowadzamy dla 6 różnych wyłączników. Różnią się one zużyciem i zastosowanymi materiałami zestykowymi. Pomiar ma na celu określenie jak zużycie i zastosowane materiały wpływają na wielkość rezystancji zestykowej.

Wśród 6 wyłączników trzy są nowe, natomiast pozostałe są w różnym stopniu eksploatowane. Jeden z nowych wyłączników ma styki wykonane z miedzi. Pozostałe pięć wyłączników są to wyłączniki o zestykach miedzianych powlekanych warstwą srebra. Wykaz zastosowanych wyłączników przedstawia tabela 6.

Tabela 6. Wyłączniki wykorzystane do pomiarów

Nr wyłącznika	Typ wyłącznika	Material zestykowy	Orientacyjna liczba cykli pracy
1	W10T125	posrebrzana miedź	około 10000
2	W10T125	posrebrzana miedź	około 2000
3	W10T125	posrebrzana miedź	nowy
4	W10T125	posrebrzana miedź	około 10000
5	W10T125	miedź	nowy
6	W10T125	posrebrzana miedź	nowy

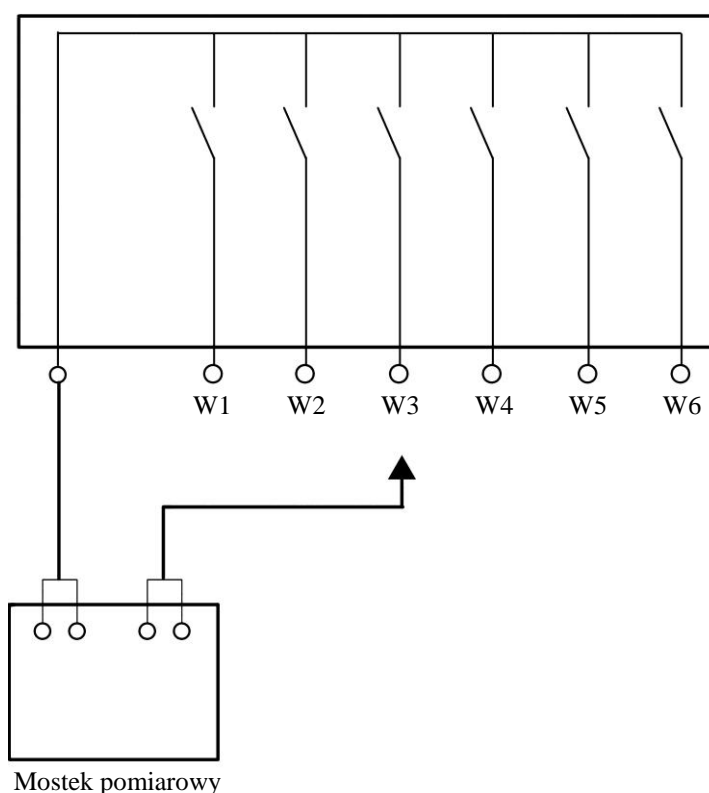
3.2.2. Sposób wykonania pomiarów

Badane wyłączniki są umieszczone w jednej obudowie. Do ich styków połączeniowych są doprowadzone przewody łączące je z zaciskami pomiarowymi. Połączenia zostały wykonane według schematu przedstawionego na rysunku 5.

Wyniki pomiarów należy zanotować w tabeli 7.

Tabela 7. Wyniki pomiarów rezystancji zestykowej wyłączników typu W10

Numer wyłącznika	Liczba cykli	Rezystancja zestykowa			
		zmierzona			średnia
		mΩ	mΩ	mΩ	
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego do pomiaru rezystancji przejścia zestyków wyłączników typu W10

Po dołączeniu przewodów pomiarowych do zacisku wspólnego i zacisku wybranego wyłącznika należy załączyć wyłącznik i dokonać pomiaru. Załączenie wyłącznika należy wykonać tak, by wyraźnie wyczuć zadziałanie sprężyny dociskowej. W przeciwnym wypadku zmierzona rezystancja może być nawet kilka razy większa od rzeczywistej. Do pomiaru rezystancji przejścia zastosowano przenośny mostek do pomiaru rezystancji typu TMT-5.

4. OPRACOWANIE SPRAWOZDANIA

Sprawozdanie powinno zawierać:

- schematy układów pomiarowych,
- tabele wyników pomiarów
- tabelę z obliczeniami
- charakterystyki $\rho = f(t)$, sporządzone na jednym wykresie,
- wartości współczynnika rezystywności α , dla miedzi, żelaza oraz konstantanu,
- uwagi i wnioski z przeprowadzonych pomiarów.

5. PYTANIA KONTROLNE

- Przedstaw wnioski wynikające z klasycznej teorii przewodnictwa elektrycznego.
- Przedstaw wpływ temperatury na rezystywność metali wg kwantowej teorii przewodnictwa.
- Wyjaśnij pojęcie rezystywności idealnej.
- Wyjaśnij pojęcie rezystywności reszkowej.
- Opisz przebieg zależności rezystywności w funkcji temperatury typowych metali.
- Przedstaw wzór Borelius-Gruneisena na rezystywność.
- Przedstaw uproszczoną zależność na związek pomiędzy temperaturą przewodnika i jego rezystywnością dla temperatur nie odbiegających od 293K.
- Przedstaw regułę Mathesena.
- Przedstaw wpływ wyżarzania na strukturę przewodnika i jego przewodność.
- Wyjaśnij dlaczego metale są przewodnikami prądu elektrycznego.
- Wyjaśnij dlaczego temperatura wpływa na rezystywność.
- Wyjaśnij dlaczego czystość składu metali wpływa na rezystywność.
- Opisz jak zmienia się rezystywność stopów jednorodnych i niejednorodnych wraz ze zmianami temperatury.
- Opisz wpływ obróbki plastycznej na rezystywność metali.
- Podaj definicję zestyku.
- Przedstaw czynniki składające się na rezystancję zestyku.
- Podaj wzory na rezystywność i konduktywność, a następnie wymień jednostki używane do ich opisu (stare i nowe) oraz ich wzajemne zależności.