

**PODSTAWY INŻYNIERII
MATERIAŁOWEJ
LABORATORIUM**

pod redakcją Jerzego Rutkowskiego

Wydanie II



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2005

Autorzy:

**Ryszard Kacprzyk (1, 9,10), Bożena Łowkis (8), Jerzy Rutkowski (6, 7),
Adam Tymań (4), Leszek Woźny (5), Jan Ziaja (2), Zbigniew Zubel (3)**

Recenzent

Jarosław Juchniewicz

Opracowanie redakcyjne

Alicja Kordas

Korekta

Maria Izbicka

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003

ISBN 83-7085-867-8

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 217/2005

SPIS RZECZY

Wstęp.....	4
Regulamin bezpieczeństwa w Laboratorium Podstaw Inżynierii Materiałowej.....	5
1. Badanie rezystywności dielektryków.....	7
2. Wyznaczanie przenikalności elektrycznej.....	19
3. Pomiary współczynnika strat dielektrycznych.....	29
4. Badanie wytrzymałości elektrycznej.....	41
5. Badanie właściwości magnetycznych próbek blach elektrotechnicznych.....	53
6. Badanie właściwości mechanicznych materiałów izolacyjnych.....	69
7. Badanie właściwości cieplnych materiałów izolacyjnych.....	79
8. Badanie wybranych właściwości fizycznych i chemicznych dielektryków ciekłych.....	87
9. Badanie zjawisk termoelektrycznych.....	101
10. Badanie zjawiska Halla.....	115

WSTĘP

Podczas rozwiązywania każdego problemu technicznego, niezależnie od charakteru pracy zawodowej, zawsze istotne są zagadnienia związane z inżynierią materiałową. Należy przez to rozumieć świadomy dobór materiałów dla osiągnięcia zamierzonego celu. Umożliwiają to badania, prowadzone w celu wyznaczenia lub sprawdzenia, w sposób powtarzalny, istotnych właściwości materiałów i ich zależności od czynników zewnętrznych. Badania takie są ściśle określone przez odpowiednie międzynarodowe dokumenty normalizacyjne.

Tematyka skryptu obejmuje wybrane zagadnienia z zakresu badań podstawowych właściwości materiałów przewodzących, półprzewodzących, dielektrycznych i magnetycznych, zebrane w dziesięć tematycznych ćwiczeń laboratoryjnych.

Omówienie każdego ćwiczenia składa się z wyjaśnienia fizycznych podstaw zjawisk, układów pomiarowych, sposobu wykonania badań i programu ćwiczenia.

Skrypt jest przeznaczony dla studentów Wydziału Elektrycznego kierunku *elektrotechnika oraz automatyka i robotyka*, ale może być również przydatny inżynierom i technikom elektrykom.

REGULAMIN BEZPIECZEŃSTWA W LABORATORIUM PODSTAW INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

1. W laboratorium należy zachować szczególne środki ostrożności, ustalone w celu ochrony zdrowia i życia zatrudnionych i ćwiczących w nim.
2. Przed przystąpieniem do pracy należy zapoznać się z rozmieszczeniem w laboratorium dróg ewakuacyjnych i gaśnic śniegowych.
3. Zapoznać się z celem i podstawami teoretycznymi wykonywanych pomiarów i badań.
4. Dokonać oględzin przydzielonej aparatury i urządzeń. Sprawdzić, czy izolacja przewodów i przyrządów pomiarowych nie jest uszkodzona.
5. Poznać i praktycznie opanować sposoby załączania, regulacji i wyłączenia napięcia.
6. Sprawdzić układ połączeń, rozmieszczenie aparatury i przewodów. Sprawdzenie i przygotowanie układu powinno być dokonane przez ćwiczących i zatwierdzone przez prowadzącego zajęcia przed rozpoczęciem pomiarów i po każdej zmianie układu. Załączenie napięcia do układu może odbywać się jedynie w obecności prowadzącego.
7. Ćwiczenie może być wykonywane tylko na stanowisku wskazanym przez prowadzącego. Nie wolno używać innego sprzętu i aparatów niż te, które przydzielił prowadzący ćwiczenie.
8. Przed przystąpieniem do pracy przy wysokim napięciu należy dodatkowo:
 - a) poznać i praktycznie opanować sposoby załączania, regulacji i wyłączenia wysokiego napięcia oraz uziemienia układu,
 - b) sprawdzić dokładnie układ połączeń obwodu wysokiego napięcia (zgodność z wymaganym schematem połączeń, rozmieszczenie aparatury i przewodów z odpowiednimi odstępami izolacyjnymi, stan i ciągłość przewodów uziemiających),
 - c) podzielić czynności pomiędzy wykonujących ćwiczenie (w okresie od załączenia wysokiego napięcia do jego wyłączenia nie wolno zmieniać tego podziału),
 - d) wejście w pole wysokiego napięcia jest dozwolone jedynie po osobistym sprawdzeniu, że oba wyłączniki obwodu probierczego są wyłączone,

e) zabrania się dokonywania jakichkolwiek czynności w polu wysokiego napięcia bez załączenia przenośnego uziemiacza na zacisk źródła napięcia,

f) w czasie przebywania osób w polu wysokiego napięcia wejście do pola wysokiego napięcia musi być otwarte (przerwane styki blokad drzwiowych),

g) włączenie wysokiego napięcia musi być każdorazowo poprzedzone:

- sprawdzeniem, że nikt nie znajduje się w polu wysokiego napięcia,
- sprawdzeniem, że zdjęty jest przenośny uziemiacz ze źródła napięcia,
- sprawdzeniem, że regulator napięcia jest w położeniu zerowym,
- głośnym ostrzeżeniem pozostałych ćwiczących: „Uwaga, włączam napięcie”,

h) w okresie, kiedy wysokie napięcie jest włączone, osoba obsługująca łączniki musi być gotowa do natychmiastowego wyłączenia napięcia w razie wystąpienia zagrożenia obsługi lub aparatury oraz wystąpienia przeskoku lub przebicia w obiekcie badanym. W tym celu osoba ta musi przez cały okres włączenia wysokiego napięcia przebywać w bezpośrednim sąsiedztwie przycisku wyłącznika transformatora i musi być gotowa do natychmiastowego wyłączenia napięcia,

i) w trakcie wykonywania przez obsługę prac w polu wysokiego napięcia nie wolno manipulować łącznikami ani ich dotykać.

9. W razie zagrożenia pożarowego należy stosować się do instrukcji przeciwpożarowej. Nie gasić pożaru wodą, tylko gaśnicami śniegowymi.

10. Wstęp do laboratorium w czasie trwania ćwiczeń jest zabroniony dla osób nie uczestniczących w ćwiczeniach.

11. Po zakończeniu pomiarów, a przed opuszczeniem laboratorium, stanowisko pomiarowe musi być przyjęte od grupy studenckiej przez prowadzącego ćwiczenie.

12. Za uszkodzenie przyrządów i inne szkody wynikłe z winy ćwiczących materialnie odpowiadają studenci.

1. BADANIE REZYSTYWNOŚCI DIELEKTRYKÓW

Zjawisko przewodnictwa elektrycznego w materiałach dielektrycznych wynika z ruchu nośników ładunku zarówno po ich powierzchni, jak i w objętości. Na przewodnictwo elektryczne będzie się zatem składało tzw. przewodnictwo skośne – charakteryzowane przez stałą materiałową ρ_v , zwaną **rezystywnością skośną** (właściwa oporność skośna), oraz przewodnictwo powierzchniowe, charakteryzowane **rezystywnością powierzchniową** ρ_s .

Rezystancja skośna R_v jest to stosunek napięcia prądu stałego U doprowadzonego do przeciwległych powierzchni próbki badanego materiału do natężenia prądu elektrycznego I_v przepływającego na skroś próbki

$$R_v = \frac{U}{I_v}, \quad \Omega. \quad (1.1)$$

Rezystywność skośna ρ_v (czyli rezystancja skośna odniesiona do wymiarów jednostkowych) jest określona zależnością

$$\rho_v = \frac{U}{I_v} \frac{S}{d} = R_v \frac{S}{d}, \quad (1.2)$$

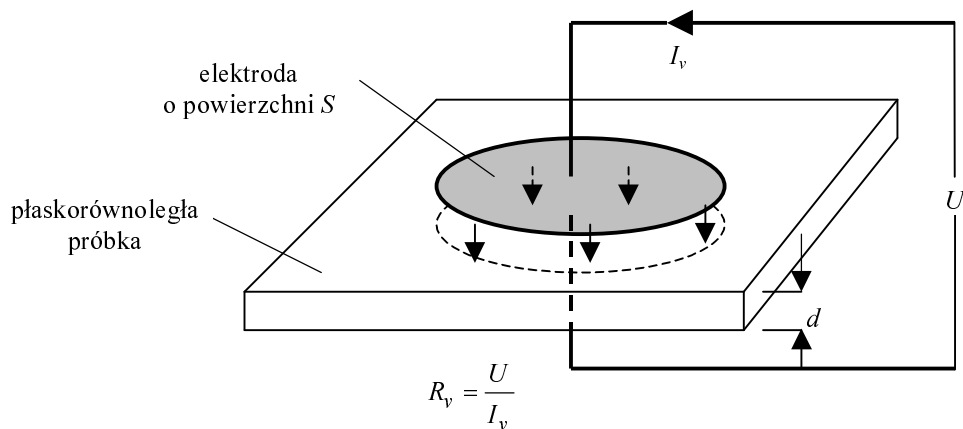
w której:

S – powierzchnia elektrody na próbce, m^2 (przyjęto, że elektrody są jednakowe i leżą w jednej osi po obu stronach próbki) – patrz rys. 1.1,

d – grubość próbki, m.

Rezystancja powierzchniowa R_s jest to stosunek napięcia prądu stałego U doprowadzonego do elektrod przylegających do jednej powierzchni próbki badanego materiału do natężenia prądu elektrycznego I_s , płynącego pomiędzy tymi elektrodami

$$R_s = \frac{U}{I_s}, \quad \Omega. \quad (1.3)$$



Rys. 1.1. Zasada pomiaru rezystancji skrośnej w układzie dwuelektrodowym

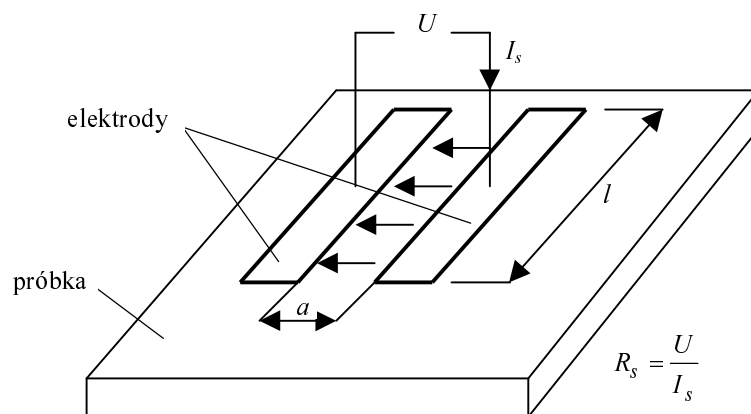
Rezystywność powierzchniowa ρ_s (czyli rezystancja powierzchniowa odniesiona do jednostkowych wymiarów) jest określona zależnością

$$\rho_s = \frac{U}{I_s} \frac{l}{a} = R_s \frac{l}{a}, \quad \Omega, \quad (1.4)$$

w której:

l – długość elektrod, m (rys. 1.2),

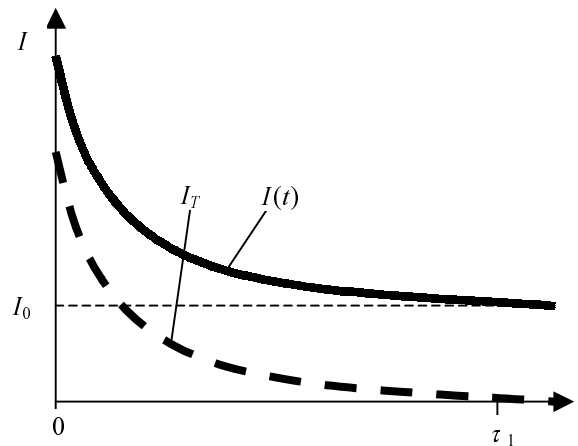
a – odległość między elektrodami, m.



Rys. 1.2. Zasada pomiaru rezystancji powierzchniowej w układzie dwuelektrodowym

Zarówno ρ_v jak ρ_s są wielkościami umownymi, kontrolowanymi po 1 minucie przepływu prądu. Umowność tego określenia wiąże się z czasowym przebiegiem mierzonego prądu (rys. 1.3), który to prąd może się ustalić dopiero po bardzo długim cza-

się. Całkowity prąd I płynący przez dielektryk stały jest sumą dwóch składowych: stałej – I_0 (związanej z przewodnictwem elektrycznym) oraz przejściowej I_T (związanej z efektami polaryzacyjnymi). Po czasie τ_1 prąd przejściowy jest praktycznie równy zeru, a prąd całkowity I można utożsamić z prądem upływu czy przewodnictwa. Dla dielektryków stałych przyjmuje się $\tau_1 = 1$ min, dla ciekłych zaś $\tau_1 = 5$ min.



Rys. 1.3. Zależność prądu płynącego przez dielektryk od czasu

Okazuje się, że nie wszystkie materiały zachowują się w opisany sposób. W przypadku niektórych materiałów (np. przeznaczonych do budowy elektretów) prąd przepływający przez dielektryk może się ustalić po czasie znacznie dłuższym niż 1 minuta. Dla dielektryków takich czas τ_1 jest rzędu godzin, miesięcy lub lat.

Określona rezystywność skrośna czy powierzchniowa materiałów wynika z istnienia nikłego przewodnictwa elektronowego lub jonowego, uwarunkowanego obecnością przewodzących wtrącin, nieregularności budowy krystalicznej itp. Rezystywność silnie zależy od składników ulegających dysocjacji i maleje ze wzrostem zawilgocenia oraz temperatury.

Rezystywność może także zależeć od wartości napięcia pomiarowego i czasu jego przyłożenia. Wpływ wymienionych czynników występuje szczególnie wyraźnie w badaniach dielektryków ciekłych, których rezystancja skrośna wyraźnie zwiększa się w miarę upływu czasu (oczyszczanie cieczy).

1.1. Metody pomiaru rezystancji

W celu wyznaczenia rezystywności dielektryków niezbędny jest pomiar rezystancji w bardzo szerokim zakresie, tzn. od około 10^6 do 10^{18} Ω . Tak szeroki zakres mierzonych wartości wymaga stosowania kilku różnych metod, które można podzielić na:

- metody techniczne,
- metody mostkowe,
- metody porównawcze,
- metody ładowania kondensatora,
- metody elektrometryczne.

Pierwsze trzy rodzaje metod stosuje się do pomiaru rezystancji nieprzekraczających $10^{13} \Omega$. Pozostałe dwie stosuje się do pomiaru rezystancji wyższych niż $10^{13} \Omega$. Uwagi dotyczące wykonania pomiarów wymienionymi metodami są zawarte w normie PN-88/E-04405.

Metoda techniczna

Jest to najprostsza metoda pomiaru rezystancji, polegająca na pomiarze napięcia przyłożonego do elektrod oraz natężenia prądu płynącego między elektrodami. Przy zastosowaniu jako miernika prądu galwanometru z bocznikiem (rys. 1.4) mierzona rezystancję określa się wzorem

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{c_i \alpha_x p_x}, \quad (1.5)$$

w którym:

R_x – mierzona rezystancja, Ω ,

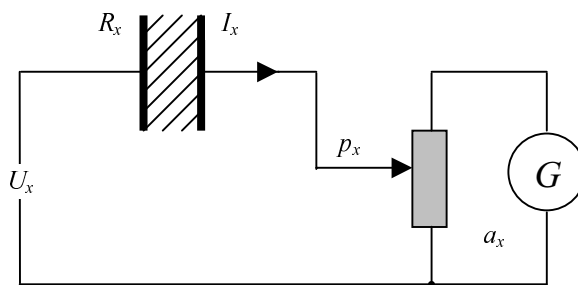
U_x – napięcie na mierzonej rezystancji, V,

I_x – prąd płynący przez R_x , A,

c_i – stała prądowa galwanometru, A/dz,

α_x – wychylenie wskazówki galwanometru, dz,

p_x – przekładnia bocznika.



Rys. 1.4. Pomiar rezystancji metodą techniczną z wykorzystaniem galwanometru

Przy czułości galwanometru $c_i = 10^{-10}$ A/dz oraz jego wychyleniu $\alpha_x = 1$ dz i najwyższej czułości $p_x = 1$ oraz napięciu pomiarowym $U_x = 1000$ V maksymalna wyznaczalna rezystancja jest rzędu $10^{13} \Omega$.

Metoda mostkowa

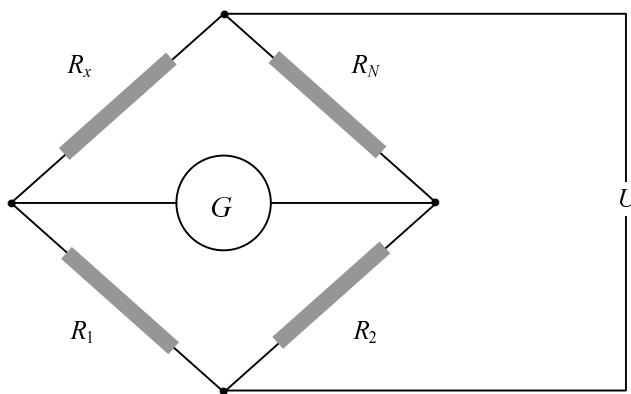
Do pomiarów można stosować mostek Wheatstone'a (rys. 1.5). Mierzoną rezystancję R_x wyznacza się ze wzoru

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N, \quad (1.6)$$

w którym:

R_N – rezystor wzorcowy,

R_1, R_2 – rezystory wzorcowe o regulowanej wartości.



Rys. 1.5. Pomiar rezystancji za pomocą mostka Wheatstone'a

Galwanometr służy jako wskaźnik równowagi mostka. Maksymalna mierzona rezystancja R_x wynosi około $10^{13} \Omega$. Ograniczenie wynika ze skończonej czułości galwanometru oraz wartości rezystorów wzorcowych.

Metoda porównawcza

Wymieniona metoda polega na porównaniu wskazań galwanometru połączonyego w szereg z rezystorem wzorcowym ze wskazaniem tegoż galwanometru po załączeniu badanej próbki (rys. 1.6). Rezystancję R_x mierzoną metodą porównawczą oblicza się z zależności

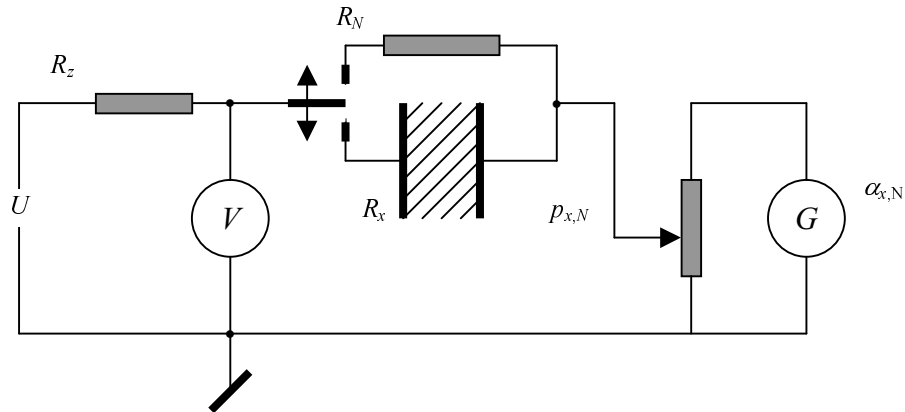
$$R_x \approx \frac{U_x \alpha_N R_N}{U_N \alpha_x p_x}, \quad (1.7)$$

w której:

R_N – rezystancja rezystora wzorcowego,

x – indeks dla przypadku rezystancji mierzonej,

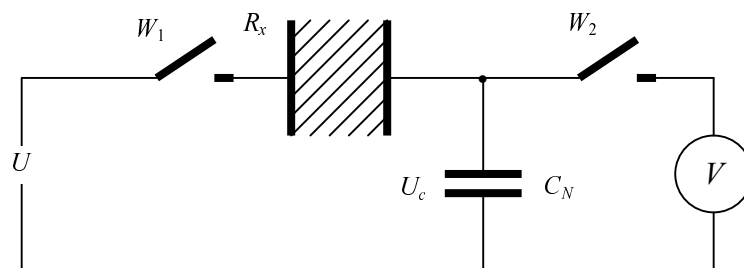
N – indeks dla przypadku rezystancji wzorcowej.



Rys. 1.6. Pomiar rezystancji za pomocą metody porównawczej

Metoda ładowania kondensatora

Pomiar rezystancji metodą ładowania kondensatora polega na pomiarze napięcia U_c na kondensatorze wzorcowym ładowanym prądem płynącym przez badaną rezystancję oraz pomiarze czasu t , po upływie którego na kondensatorze wzorcowym C_N pojawi się napięcie U_c . Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.7.



Rys. 1.7. Pomiar rezystancji metodą ładowania kondensatora

Po włączeniu włącznika W_1 następuje ładowanie się kondensatora C_N prądem płynącym przez R_x . Włącznik W_2 jest załączony tylko na czas pomiaru napięcia U_c na kondensatorze C_N , tzn. po upływie czasu t (czasu gromadzenia się na pojemności C_N ładunku elektrycznego). Wartość R_x wyznacza się z zależności

$$R_x = \frac{Ut}{C_N U_c}, \quad (1.8)$$

w której:

U – napięcie zasilania,

U_c – napięcie na kondensatorze wzorcowym o pojemności C_N mierzone za pomocą woltomierza V (rys. 1.7) po upływie czasu t , gdzie t – czas liczony od momentu załączenia napięcia (włączenia W_1 – rys. 1.7) do momentu odczytu. Czas odczytu t powinien spełniać zależność $t \ll R_x C_N$.

Woltomierz powinien mieć bardzo dużą rezystancję wejściową. Właściwy jest np. woltomierz elektrostatyczny. W opisaney metodzie stosuje się również kompensacyjny pomiar napięcia (patrz PN-88/E-04405).

Metody elektrometryczne

Wymieniona grupa metod zawiera elementy metod przedstawionych wcześniej, przy czym w miejsce galwanometru wprowadza się elektrometry. W najogólniejszym znaczeniu elektrometry są miernikami bardzo małych prądów, około 10^{-15} A, zasilanymi elektronicznymi wzmacniaczami prądu stałego. Elektrometry przeznaczone do pomiaru wysokich rezystancji są zwykle nazywane teraomometrami i zawierają, oprócz czułego miernika prądu, zasilacz napięć pomiarowych (napięcia U_0). Ogólny schemat elektrometrycznego miernika wysokich rezystancji (teraomometru) przedstawiono na rysunku 1.8. Mierzoną rezystancję określa się z zależności

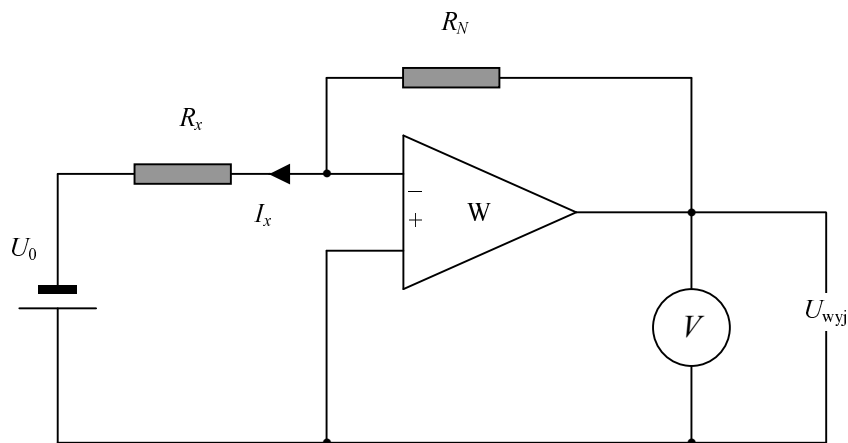
$$R_x = \frac{U_0 R_N}{U_{\text{wyj}}}, \quad (1.9)$$

w której:

U_0 – napięcie pomiarowe, V; najczęściej 100, 200, 500, 1000 V,

R_N – rezystor wzorcowy, wymienny – $10^8 \div 10^{12} \Omega$,

U_{wyj} – wyjściowe napięcie wzmacniacza, na ogół 1÷3 V dla pełnego wychylenia.

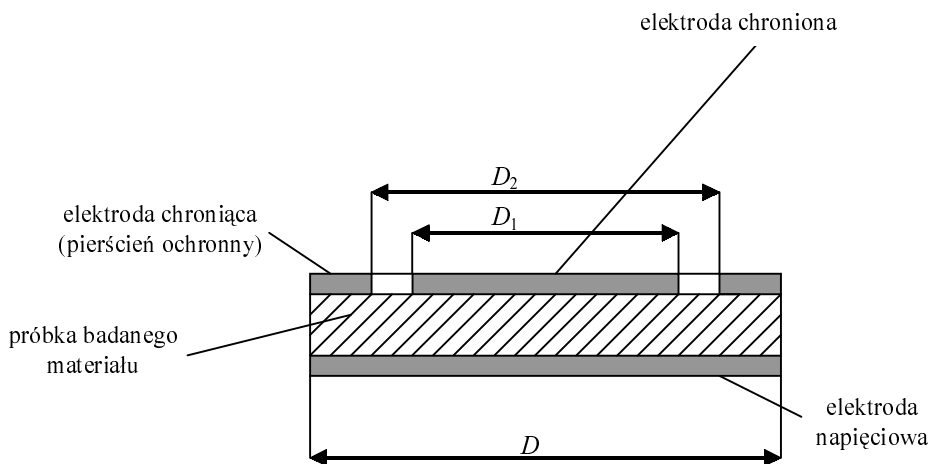


Rys. 1.8. Elektrometryczny miernik wysokich rezystancji;
W – wzmacniacz elektrometryczny

Ze względu na hiperboliczną zależność napięcia wyjściowego U_{wyj} od rezystancji R_x , teraomierze z odczytem analogowym mają na ogół naniesioną hiperboliczną skalę rezystancji. Na podobnej zasadzie działają mikroprocesorowe mierniki najwyższych rezystancji, gdzie wynik w postaci cyfrowej otrzymuje się przez operacje dzielenia wartości napięcia U_0 przez wartość mierzonego prądu I_x wykonywaną przy użyciu mikroprocesora.

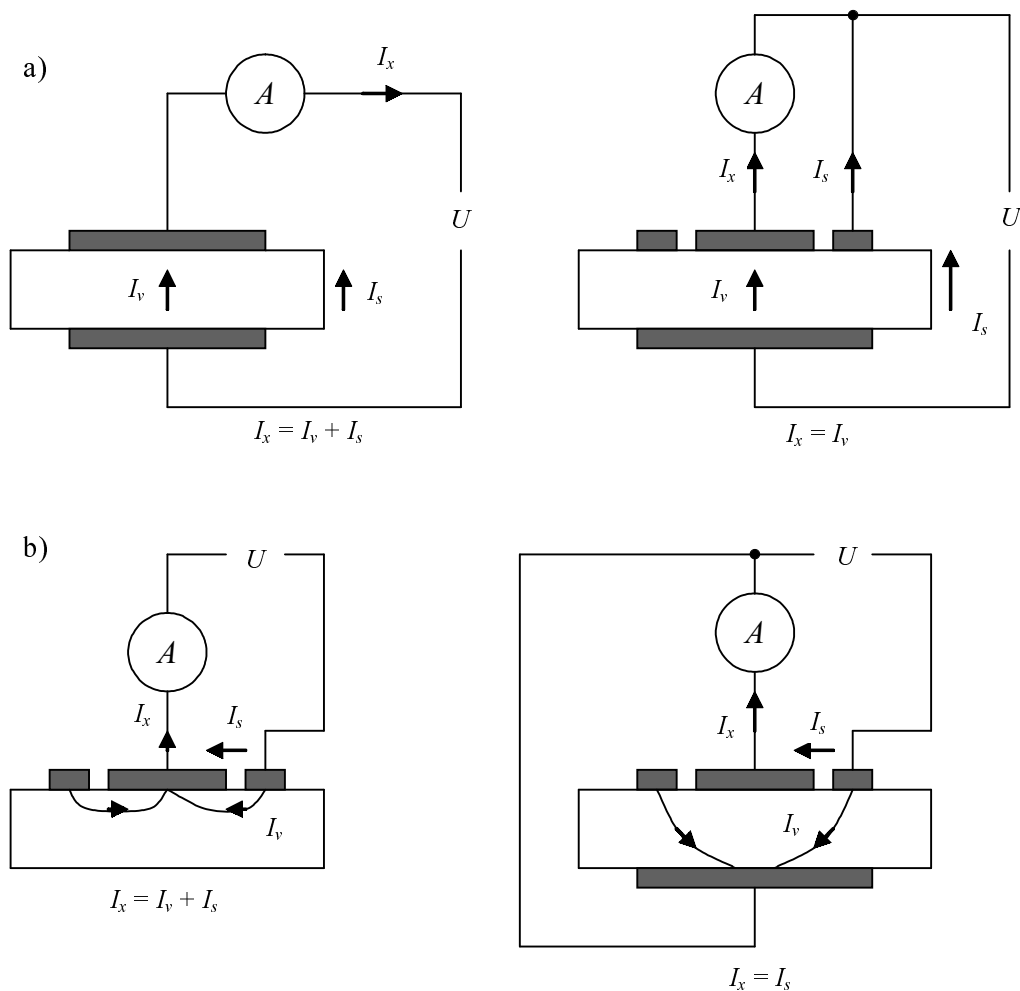
1.2. Zasada pomiaru rezystancji z zastosowaniem układu trójelektrodowego

Podczas dokładnych pomiarów rezystancji skośnej stosuje się tzw. system trójelektrodowy, tzn. elektrody z pierścieniem ochronnym (rys. 1.9). System trójelektrodowy może być stosowany we wszystkich wymienionych wyżej metodach pomiaru rezystancji. System trójelektrodowy stosuje się zarówno do pomiaru rezystancji skośnej, jak i powierzchniowej. Zadaniem pierścienia ochronnego jest wyeliminowanie wpływu prądów powierzchniowych podczas pomiaru rezystancji skośnej. W trakcie pomiaru rezystancji powierzchniowej role elektrod napięciowej i ochronnej się zmieniają. Obydwa przypadki przedstawiono na rysunku 1.10a i b.



Rys. 1.9. Przekrój przez próbkę z trzema koncentrycznymi elektrodami. Nazwy poszczególnych elektrod podano dla przypadku pomiaru rezystancji skośnej

Zastosowanie układu trzech elektrod pozwala odprowadzić prąd pasożytniczy (powierzchniowy podczas pomiaru rezystancji skośnej lub skośny podczas pomiaru rezystancji powierzchniowej) poza miernik prądu.



Rys. 1.10. Pomiar rezystancji w układach dwu- i trójelektrodowym:
a – rezystancji skośnej, b – rezystancji powierzchniowej

1.3. Elektrody

Pomiar rezystancji wymaga wykonania na próbkach odpowiednich elektrod. Ze względu na sposób wykonania elektrody można podzielić następująco:

- naklejane z folii metalicznej,
- nanoszone metodą parowania w próżni,
- nanoszone metodą rozpylania katodowego w próżni,
- wpalane,

- rtęciowe,
- malowane (z grafitu lub past niewymagających wypalania).

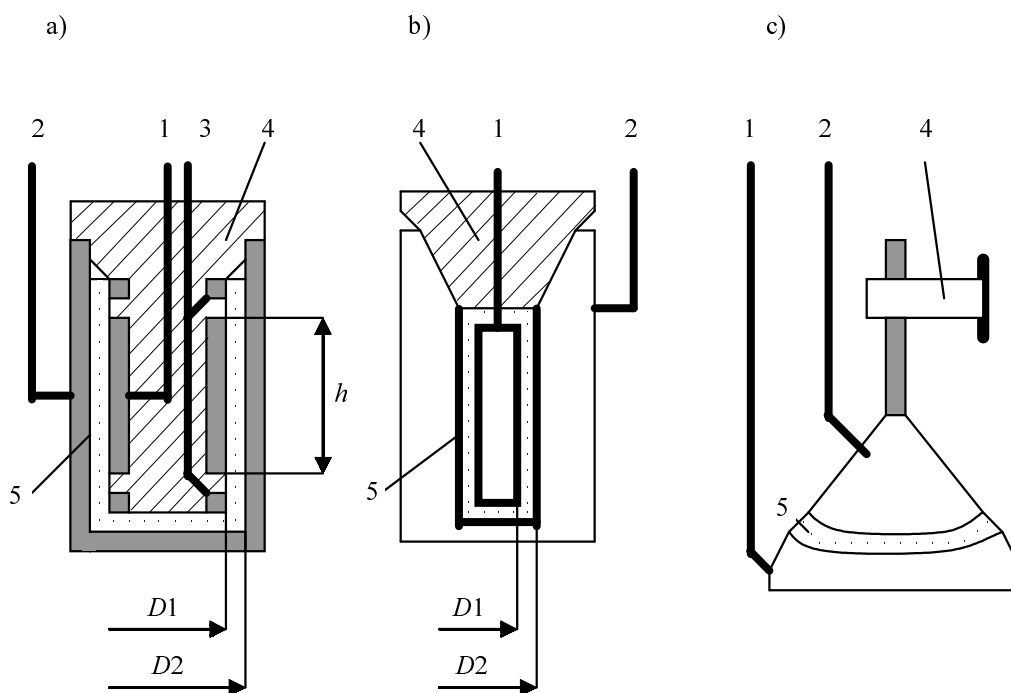
Dobór odpowiednich elektrod podyktowany jest właściwościami fizycznymi badanych materiałów.

Ze względu na kształt elektrody dzieli się na:

- pierścieniowe.

Wymienione elektrody są stosowane do pomiaru rezystancji dielektryków stałych.

Do pomiaru rezystancji dielektryków ciekłych stosuje się kondensatory w wykonaniu dwu- lub trójelektrodowym (rys. 1.11a–c).



Rys. 1.11. Kondensatory pomiarowe do badania dielektryków ciekłych:

a – kondensator cylindryczny trójelektrodowy,

b, c – kondensatory dwuelektrodowe;

1, 2, 3 – elektrody, 4 – izolator, 5 – badana ciecz

W przypadku pomiaru rezystancji o wartości powyżej $10^{12} \Omega$, próbkę wraz z elektrodami (lub naczynie pomiarowe) zaleca się zamknąć w klatce Faradaya. Ma to na celu wyeliminowanie wpływu zakłóceń od zewnętrznych pól elektrycznych (np. od ładunków elektrostatycznych). Szczegółowe informacje na temat elektrod podają normy PN-88/E-04405 oraz PN-84/E-04409.

1.4. Program ćwiczenia

1. Wyznaczyć rezystywność skrośną wybranych dielektryków stałych.
2. Wyznaczyć rezystywność powierzchniową wybranych dielektryków stałych.
3. Wyznaczyć rezystywność cieczy izolacyjnej w zależności od czasu i wartości napięcia.
4. Wyznaczyć rezystywność cieczy w zależności od temperatury.

Wymienione pomiary należy wykonać w układzie trójelektrodowym (tzn. odpowiednie elektrody nanieść z folii aluminiowej wg PN-88/E-04405 lub zastosować trójelektrodowe naczynie pomiarowe). Wartości uzyskanych rezystywności porównać z wymaganiami norm PN-90/C-96058, PN-85/C-89271.

Literatura

1. Siciński Z., *Badanie materiałów elektroizolacyjnych*, WNT, Warszawa 1968, s. 72–91, 255.
2. Starczakow W., *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*, Politechnika Łódzka, Łódź 1969.
3. Polskie Normy:
 - PN-88/E-04405 *Materiały elektroizolacyjne stałe – Pomiary rezystancji.*
 - PN-90/C-96058 *Przetwory naftowe – Olej elektroizolacyjny do transformatorów i aparatury łączeniowej.*
 - PN-72/E-04400 *Materiały elektroizolacyjne stałe – Przygotowanie i badanie próbek – Znormalizowane warunki otoczenia.*
 - PN-84/E-04409 *Materiały elektroizolacyjne ciekłe – Pomiary współczynnika strat dielektrycznych, przenikalności elektrycznej względnej i rezystywności.*
 - PN-85/C-89271 *Tworzywa sztuczne – Tłoczywa aminowe.*

2. WYZNACZANIE PRZENIKALNOŚCI ELEKTRYCZNEJ

Dielektrykami nazywamy materiały pozbawione ładunków swobodnych, a więc charakteryzujące się bardzo dużą rezystywnością. W materiały dielektryczne może wnikać pole elektryczne.

Wielkością, która określa ilość energii elektrycznej gromadzonej w jednostce objętości materiału, przy jednostkowym natężeniu pola elektrycznego, jest **przenikalność elektryczna bezwzględna** ε (F/m).

Przenikalność elektryczna względna ε_r jest to stosunek pojemności C_x kondensatora, w którym przestrzeń pomiędzy i wokół elektrod jest całkowicie wypełniona badanym materiałem elektroizolacyjnym (dielektrykiem), do pojemności elektrod C_0 , w ten sam sposób rozmieszczonych w próżni, tj.

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0}, \quad (2.1)$$

gdzie:

C_x – pojemność badanego materiału, F,

C_0 – pojemność geometryczna, F.

Kondensator płaski jest to układ dwóch płaskich metalowych płyt (elektrod) o powierzchni S i odległości między nimi d . Jeżeli d jest dużo mniejsze od wymiarów liniowych elektrod, to możemy pominąć zniekształcenie pola elektrycznego na brzegach płyt. Różnica potencjału pomiędzy płytami jest proporcjonalna do zgromadzonego na nich ładunku. Zależność ta jest słuszna dla dowolnego układu naładowanych elektrod. Dlatego też wprowadzono pojęcie pojemności elektrycznej (oznaczanej przez C), którą definiujemy jako stosunek zgromadzonego ładunku q do różnicy potencjałów między elektrodami

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2}. \quad (2.2)$$

Jednostką pojemności w układzie SI jest farad (F). Jeden farad jest to pojemność takiego kondensatora, w którym zmiana ładunku o 1 C (kulomb) powoduje zmianę napięcia o 1 V (wolt).

Pojemność geometryczną wyznacza się ze wzoru

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (2.3)$$

a pojemność kondensatora wypełnionego dielektrykiem ze wzoru

$$C_x = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}, \quad (2.4)$$

w którym:

S – pole powierzchni elektrody, m^2 ,

d – odległość między elektrodami, m.

Przenikalność elektryczna suchego powietrza w normalnych warunkach atmosferycznych wynosi 1,00053 i dlatego do określania przenikalności elektrycznej materiału zamiast pojemności międzyelektrodowej w próżni można z wystarczającą dokładnością stosować pojemność międzyelektrodową C_0 w powietrzu.

Przenikalność elektryczna próżni (ε_0) wynosi

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}. \quad (2.5)$$

Polaryzacja elektryczna

Zjawisko polaryzacji elektrycznej polega na odwracalnym rozsunięciu ładunków elektrycznych w dielektryku pod wpływem pola elektrycznego. Każdy ruch ładunku elektrycznego wywołuje przepływ prądu w dielektryku. Podczas procesu ładowania kondensatora płynie tzw. prąd absorpcji, podczas procesu rozładowania natomiast – prąd resorpcji.

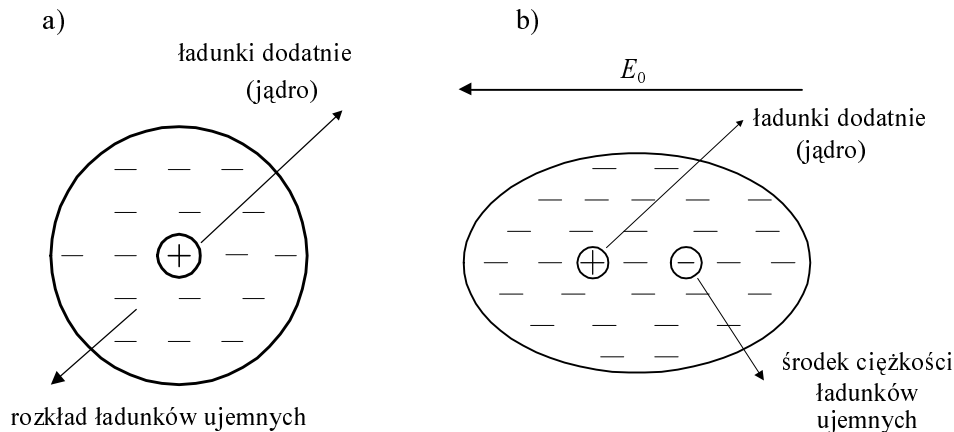
Zewnętrzną miarą zjawiska polaryzacji elektrycznej jest **przenikalność elektryczna**. Im większa jest zdolność materiału do polaryzowania się, tym większa jest przenikalność elektryczna.

Polaryzacja elektronowa

Wszystkie ładunki wchodzące w skład materiału dielektrycznego wiążą się z atomami lub jonami macierzystymi i nie mogą poruszać się swobodnie pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego. Nie oznacza to, że pole elektryczne nie wywiera żadnego wpływu na ładunki. Jeżeli rozpatrzemy izolowany atom, to w nieobecności zewnętrznego pola elektrycznego E_0 środki ciężkości ładunku dodatniego i ujemnego się pokrywają (rys. 2.1a). Taki atom jest elektrycznie obojętny, ponieważ pola elektryczne wytworzone przez ładunki dodatnie i ujemne na zewnątrz atomu się znoszą.

Jeżeli do izolowanego atomu przyłożymy zewnętrzne pole elektryczne E_0 , to siły, z jakimi pole to działa na ładunki ujemne i dodatnie, będą skierowane przeciwnie.

Środki ciężkości ładunków dodatnich i ujemnych ulegną przesunięciu i atom zacznie wytwarzać własne pole elektryczne, które będzie skierowane przeciwnie do pola zewnętrznego (rys. 2.1b). Przemieszczeniu ulegają chmury elektronowe względem jąder atomowych. Rozsuniecie rozkładu elektronów, które wywołuje indukowany moment dipolowy, nazywa się **polaryzacją elektronową**.



Rys. 2.1. Wyizolowany atom w nieobecności pola elektrycznego (a) i w zewnętrznym polu elektrycznym (b)

Polaryzacja elektronowa zachodzi w bardzo krótkim czasie $10^{-15} \div 10^{-13}$ s i nie powoduje strat energii.

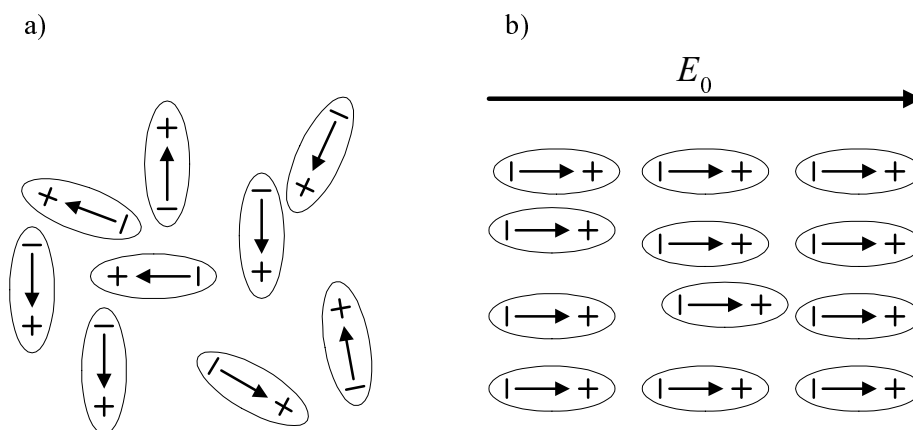
Polaryzacja jonowa

Polaryzacja jonowa (atomowa) polega na odwracalnym przemieszczaniu się jonów dodatnich względem jonów ujemnych w siatce krystalicznej pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego. Zjawisko to zachodzi w czasie $10^{-13} \div 10^{-12}$ s i również nie powoduje strat energii.

Polaryzacja dipolowa

Polaryzacja dipolowa polega na orientowaniu (ustawianiu) się istniejących bez pola elektrycznego trwałych (permanentnych) dipoli. Polaryzacja dipolowa występuje w materiałach mających trwały moment dipolowy (dielektryki polarne), niezależnie od istnienia zewnętrznego pola elektrycznego. Istnienie trwałych momentów dipolowych wynika z niesymetrycznej budowy cząstek (drobin) materiału, np. wody. Przyłożenie zewnętrznego pola elektrycznego spowoduje orientowanie (ustawianie) się dipoli zgodnie z kierunkiem pola elektrycznego (rys. 2.2), dlatego też polaryzacja dipolowa nazywana jest także polaryzacją orientacyjną. Zjawisko polaryzacji dipolowej zachodzi w czasie $10^{-10} \div 10^{-2}$ s i wiąże się ze stratami energii.

Dielektryki, w których istnieją trwałe momenty dipolowe, nazywa się dielektrykami polarnymi.



Rys. 2.2. Dipole w nieobecności zewnętrznego pola elektrycznego (a) i po przyłożeniu pola E_0 (b)

Polaryzacja makroskopowa

Polaryzacja makroskopowa (ładunku przestrzennego) polega na przemieszczeniu w objętości dielektryku pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego elektronów lub (i) jonów, pułpkowania ich na niejednorodnościach materiału lub w pułpkach objętościowych. Zjawisko zachodzi w szerokim przedziale czasowym od 10^{-2} s do $2 \div 3$ lat.

2.1. Przygotowanie i wykonanie próbek

Badane próbki powinny mieć prosty kształt geometryczny, umożliwiającą zastosowanie okrągłych lub cylindrycznych elektrod, wykonanych:

- z ciekłego metalu,
- z grafitu koloidalnego,
- z folii metalowej,
- metalizacją natryskową,
- napyłaniem w próżni lub katodowo,
- wypalaniem.

Przed nałożeniem elektrod zaleca się przemywanie powierzchni próbek cieczą, która nie wpływa na właściwości badanego materiału i na wyniki badań. Gdy próbki poddawane są działaniu wilgoci, pomiary należy wykonać nie później niż po 5 minutach od wyjęcia próbek z danego środowiska.

2.2. Urządzenia pomiarowe

Pomiar pojemności elektrycznej wykonuje się za pomocą układu składającego się z następujących elementów:

- źródła napięcia,
- urządzenia pomiarowego (mostka),
- wskaźnika.

Mostek powinien być zasilany generatorem wytwarzającym napięcie sinusoidalne o zawartości harmonicznych nieprzekraczającej 5%. Błąd określenia częstotliwości nie może przekraczać $\pm 1\%$, a wahania amplitudy napięcia nie mogą być większe niż $\pm 3\%$.

Podczas pomiarów mostkowych można zastosować dowolny typ selektywnego wskaźnika równowagi, przy czym wzmocnienie podstawowej częstotliwości powinno być o 35 dB większe niż drugiej harmonicznej.

2.3. Elektrody pomiarowe

Elektrody z pierścieniem ochronnym (układ trójelektrodowy)

Układ taki składa się z:

- elektrody pomiarowej,
- elektrody wysokonapięciowej,
- elektrody ochronnej.

Rozmieszczenie elektrod na badanej próbce powinno być zgodne z pokazanym w tabeli 2.1.

Zastosowanie elektrody ochronnej obniża wpływ pojemności brzegowej i wyklucza wpływ pojemności powierzchniowej. Efektywność pierścienia ochronnego jest tym większa, im mniejsza jest szczelina pomiędzy elektrodą pomiarową i ochronną oraz im mniejsza jest różnica potencjałów pomiędzy elektrodą pomiarową i ochronną oraz im mniejsza jest grubość badanej próbki.

Układ trójelektrodowy stosuje się przede wszystkim do pomiarów metodami mostkowymi przy częstotliwościach do 100 kHz.

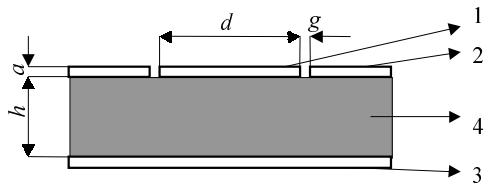
Dla próbek o grubości $< 0,5$ mm dopuszcza się pomiary bez pierścienia ochronnego pod warunkiem, że badany materiał jest jednorodny.

W przypadku elektrod okrągłych średnicę elektrody pomiarowej należy wybrać z szeregu 10, 25, 50, 75, 100 mm.

Szerokość elektrody ochronnej powinna wynosić co najmniej 10 mm, a odstęp pomiędzy elektrodą pomiarową i ochronną powinien być nie mniejszy niż 1 mm i nie większy od dwukrotnej grubości próbki.

Średnica elektrody wysokonapięciowej nie powinna być mniejsza niż zewnętrzna średnica pierścienia ochronnego.

Tabela 2.1. Układ trójelektrodowy i wzór do obliczania pojemności w powietrzu

Rozmieszczenie elektrod na próbkach	Pojemność w powietrzu, F
<p>Elektrody okrągłe</p> 	$C_0 = 6,95 \cdot 10^{-12} \frac{(d + Bg)^2}{h}$

1 – elektroda pomiarowa,

2 – elektroda ochronna,

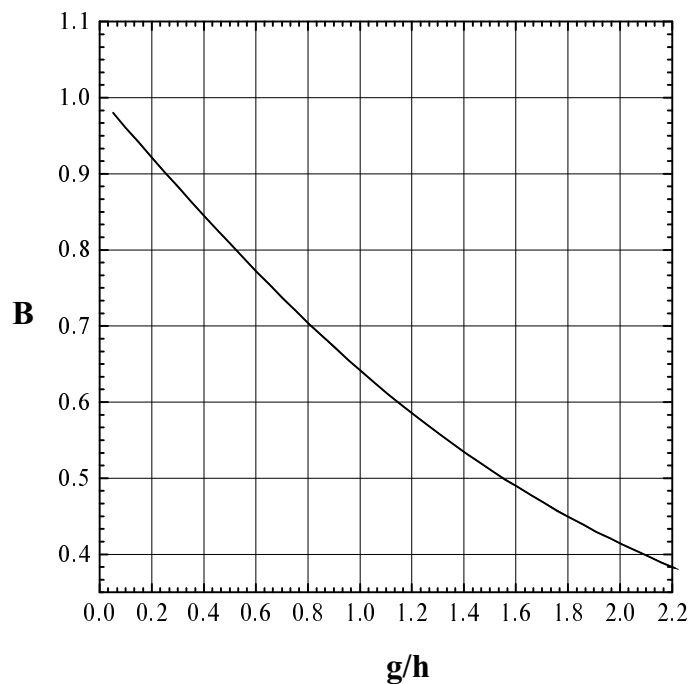
3 – elektroda wysokonapięciowa,

d – średnica elektrody, m,

g – szerokość szczeliny pomiędzy elektrodą a pierścieniem ochronnym, m,

h – grubość próbki, m.

Współczynnik B wyznaczamy w zależności od stosunku g/h według rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Zależność współczynnika B od stosunku g/h

Elektrody bez pierścienia ochronnego (układ dwuelektrodowy)

Stosuje się je przy częstotliwościach większych niż 10 kHz, kiedy zastosowane metody pomiarowe uniemożliwiają przyłączenie elektrod ochronnych, a upływność powierzchniową można pominąć. Podczas obliczania przenikalności elektrycznej trzeba uwzględnić pojemność brzegową C_b oraz pojemność rozproszoną C_r , zmierzoną w stosunku do ziemi.

Wzory empiryczne do obliczania pojemności brzegowej w zależności od konfiguracji elektrod podano w tabeli 2.2.

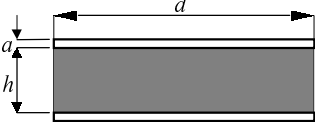
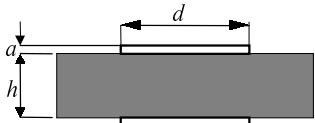
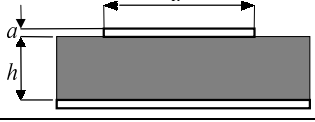
Pojemność rozproszoną do otoczenia C_r należy wyznaczyć za pomocą wzoru empirycznego

$$C_r = 0,177d \cdot 10^{-10}, \text{ F}, \quad (2.6)$$

w którym d – średnica górnej elektrody, m.

Pojemność C_r można przyjąć równą zero, jeśli jej pominięcie nie spowoduje podczas obliczania przenikalności elektrycznej błędu większego niż 1%.

Tabela 2.2. Układy elektrod i wzory do obliczania pojemności w powietrzu oraz pojemności brzegowej

Rodzaj elektrod	Pojemność w powietrzu C_0 , F	Pojemność brzegowa C_b , F
<p>Elektrody płaskie, okrągłe o jednakowych wymiarach, równych wymiarom próbki</p> 	$C_0 = 6,95 \cdot 10^{-12} \frac{d^2}{h}$	$C_b = \pi d(-5,8 \log h - 8,7) \cdot 10^{-12}$
<p>Elektrody płaskie, o jednakowych wymiarach, mniejszych od wymiarów próbki</p> 		$C_b = \pi d(1,9\varepsilon_p - 10,6 - 5,8 \log h) \cdot 10^{-12}$ <p>gdzie ε_p – określona w przybliżeniu względna przenikalność elektryczna próbki</p>
<p>Elektrody płaskie, okrągłe, o niejednakowych wymiarach</p> 		$C_b = \pi d(4,1\varepsilon_p - 10,9 - 7,7 \log h) \cdot 10^{-12}$

Elektrody naklejane z folii

Można je stosować wyłącznie w przypadku badania materiałów nienasiąkających olejem oraz o przenikalności nieprzekraczającej wartość 10. Elektrody należy przykleić do próbki za pomocą cienkiej warstwy wolnego od zanieczyszczeń oleju parafinowego, wazelinowego lub silikonowego.

Nadmiar oleju należy wycisnąć za pomocą wałka gumowego i usunąć z próbki przez wytarcie czystą bibułą.

Kondensator pomiarowy dla dielektryków ciekłych

Przenikalność elektryczną cieczy izolacyjnych mierzy się w specjalnie wykonanych kondensatorach pomiarowych dwu- i trójelektrodowych. Zaleca się stosowanie kondensatorów trójelektrodowych.

Szczegółowy opis konstrukcyjny kondensatora pomiarowego przedstawiono w normie PN-84/E-04409.

2.4. Wyznaczenie przenikalności elektrycznej względnej dla różnych układów elektrod

W układzie trójelektrodowym przenikalność elektryczną względną ε_r wyznacza się ze wzoru

$$\varepsilon_r = \frac{C_{xd}}{C_{xp}}, \quad (2.7)$$

gdzie:

C_{xd} – nieznaną pojemność kondensatora z badanym materiałem jako dielektrykiem,

C_{xp} – nieznaną pojemność geometryczną kondensatora z powietrzem jako dielektrykiem.

W układzie dwuelektrodowym przenikalność elektryczną względną wyznacza się ze wzoru

$$\varepsilon_r = \frac{C_{xd} - C_{bd} - C_r}{C_{xp}}, \quad (2.8)$$

w którym:

C_{bd} – pojemność brzegowa kondensatora z badanym materiałem jako dielektrykiem,

C_r – pojemność rozproszona do otoczenia.

Uwaga

C_{xd} należy zmierzyć mostkiem, C_{xp} należy obliczyć ze wzoru dla płaskiego kondensatora powietrznego, dla elektrod okrągłych $C_{xp} = C_0 = 6,95 \times 10^{-12} \cdot d^2/h$ (F) (według tabeli 2.2), wszystkie wymiary w metrach.

2.5. Układy pomiarowe

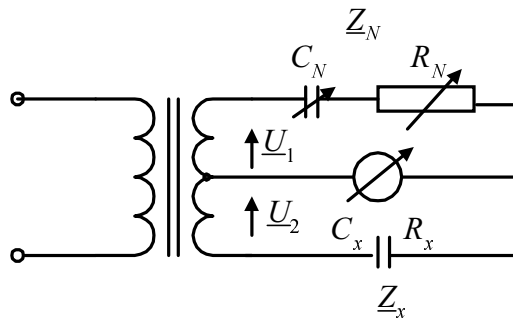
Do pomiaru pojemności (w celu wyznaczenia przenikalności elektrycznej względnej) przy częstotliwościach do 100 kHz stosuje się powszechnie metody mostkowe (mostki różnicowe lub czteroramienne, np. typu Scheringa).

Mostek różnicowy. Zasada działania

W ćwiczeniu zastosowano mostki różnicowe pracujące przy częstotliwości $f = 1$ kHz (automatyczny oraz nastawiany ręcznie). Schemat mostka pokazano na rysunku 2.4.

Zasada działania mostka różnicowego jest następująca: symetryczny transformator z odczepem w środku wytwarza dwa równe, co do wielkości, lecz przesunięte w fazie o 180° , napięcia \underline{U}_1 i \underline{U}_2 . Pod wpływem tych napięć, w każdym oczku płynie prąd

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_N}, \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_x}. \quad (2.9)$$



Rys. 2.4. Schemat mostka różnicowego

Wskaźnik równowagi mostka wskaże wartość równą zero, gdy

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2 = 0, \quad \text{czyli} \quad \underline{I}_1 = \underline{I}_2. \quad (2.10)$$

Po podstawieniu do równania (2.9) relacji z równania (2.10) otrzymamy:

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_N} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_x}, \quad (2.11)$$

stąd

$$\underline{Z}_N = \underline{Z}_x \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1}, \quad (2.12)$$

jeżeli

$$|\underline{U}_1| = |\underline{U}_2|, \quad (2.13)$$

to

$$\underline{Z}_x = \underline{Z}_N. \quad (2.14)$$

Jeśli próbkę rzeczywistego dielektryku przedstawi się za pomocą szeregowego układu zastępczego, to relację (2.14) można zapisać następująco:

$$C_x = C_N, \quad (2.15)$$

$$R_x = R_N. \quad (2.16)$$

Najczęściej rezystor wzorcowy można wyskalować w skali $\tan \delta$ i dlatego z mostka można odczytać bezpośrednio wartości C_x i $\tan \delta_x$.

2.6. Program ćwiczenia

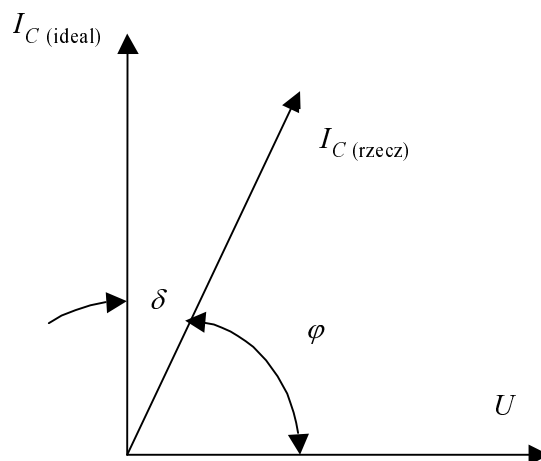
1. Zmierzyć pojemność próbek w różnych układach elektrod.
2. Obliczyć pojemność geometryczną badanych próbek C_{xp} .
3. Wyznaczyć przenikalność elektryczną względną ε_r badanych próbek dla dwóch przypadków:
 - a) pominąć pojemność brzegową C_{bd} i rozproszenia C_r ,
 - b) uwzględnić pojemności C_{bd} i C_r .
4. Obliczyć błąd względny i bezwzględny, jaki popełnia się podczas wyznaczania wartości ε_r , jeśli pomija się pojemności pasożytnicze C_{bd} i C_r .
5. Wyznaczyć charakterystykę przenikalności względnej ε_r cieczy polarnej i niepolarnej w funkcji temperatury.
6. Wykonać wykresy krzywych $\varepsilon_r = f(T)$ otrzymanych w p. 5.

Literatura

1. Siciński Z., *Badanie materiałów elektroizolacyjnych*, WNT, Warszawa 1968.
2. Polskie Normy:
 - PN-86/E-04403 *Materiały elektroizolacyjne stałe. Metody pomiaru przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych.*
 - PN-84/E-04409 *Materiały elektroizolacyjne ciekłe. Pomiary współczynnika strat dielektrycznych, przenikalności elektrycznej względnej i rezystywości.*

3. POMIARY WSPÓŁCZYNNIKA STRAT DIELEKTRYCZNYCH

Prąd płynący przez idealny kondensator wyprzedza w fazie napięcie na tym kondensatorze o kąt 90° . W kondensatorach rzeczywistych obserwuje się odstępstwo od tej zależności, tzn. przesunięcie fazowe między prądem a napięciem jest zwykle mniejsze niż 90° (rys. 3.1).



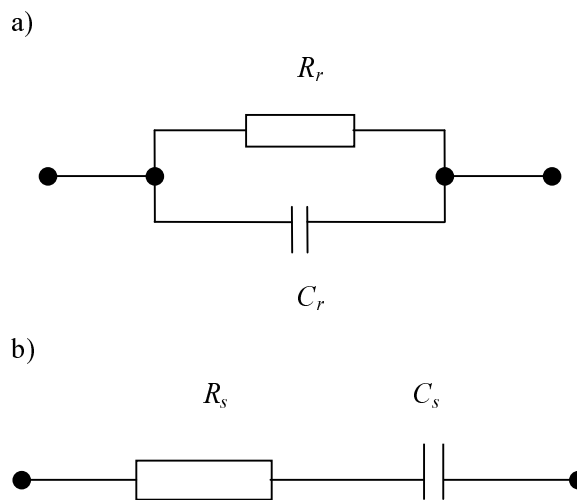
Rys. 3.1. Wykres wskazowy dla kondensatora rzeczywistego oraz idealnego

Kąt δ , zwany **kątem strat dielektrycznych**, jest kątem dopełniającym do wartości $\pi/2$ kąt przesunięcia fazowego pomiędzy sinusoidalnym napięciem U doprowadzonym do badanego materiału a prądem płynącym przez ten materiał (rys. 3.1).

Współczynnikiem strat dielektrycznych $\tan \delta$ nazywa się tangens kąta strat dielektrycznych. Z definicji ten parametr materiałowy określa, jaka część energii pola elektromagnetycznego ulega przemianie na ciepło w jednostce objętości danego materiału.

Współczynnik strat dielektrycznych jest liczbą (nie ma jednostki), a jego wartość w dielektrykach zawiera się w przedziale $0 \div 1$. Jeśli wartość $\operatorname{tg} \delta$ przekracza jeden, to mamy do czynienia z półprzewodnikiem. Najmniej stratne dielektryki stałe mają wartości $\operatorname{tg} \delta$ rzędu $(1 \div 4) \cdot 10^{-4}$.

Kondensator o pojemności C_x , utworzony przez układ elektrod i badany materiał, można przedstawić jako kondensator bezstratny połączony szeregowo lub równoległe z rezystorem wzorcowym (rys. 3.2).



Rys. 3.2. Schematy zastępcze kondensatora rzeczywistego:
a) układ równoległy, b) układ szeregowy

Zasada pomiaru $\operatorname{tg} \delta$ polega na zmierzeniu składowych szeregowego (C_s , R_s) lub równoległego (C_r , R_r) układu zastępczego kondensatora z dielektrykiem ze stratami dielektrycznymi, stanowiącego badaną próbkę, a następnie obliczeniu $\operatorname{tg} \delta$ według następujących wzorów:

➤ dla układu równoległego

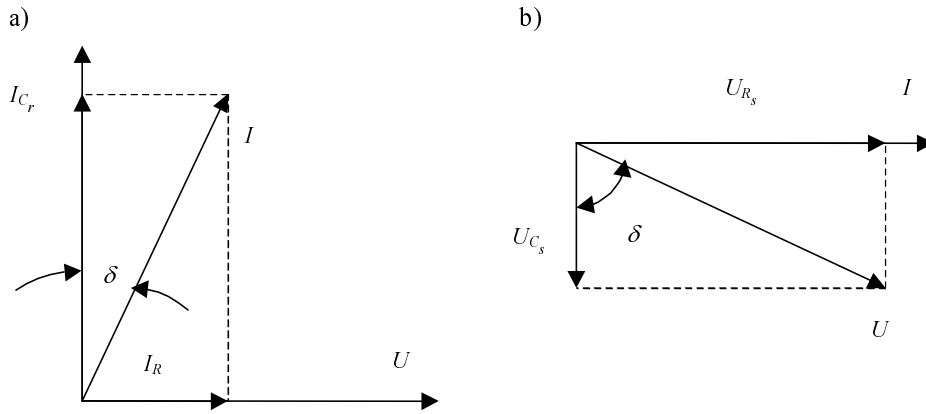
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_r C_r}, \quad (3.1)$$

➤ dla układu szeregowego

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_s C_s, \quad (3.2)$$

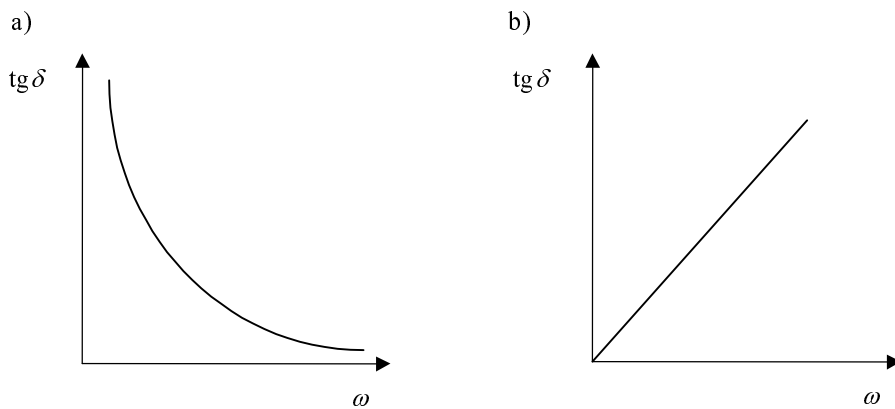
w których $\omega = 2\pi f$ – pulsacja kątowna.

Wzory (3.1) i (3.2) można łatwo wyprowadzić z definicji $\operatorname{tg} \delta$ jako funkcji matematycznej, na podstawie wykresów wskazowych dla schematów zastępczych kondensatora rzeczywistego (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Wykresy wskazowe dla schematów zastępczych kondensatora rzeczywistego:
a) układ równoległy, b) układ szeregowy

Jak wynika z wzorów (3.1) i (3.2) współczynnik strat $\text{tg } \delta$ zależy od częstotliwości w różny sposób w obu układach zastępczych (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Zależność $\text{tg } \delta$ od częstotliwości dla układów zastępczych:
a) równoległego, b) szeregowego

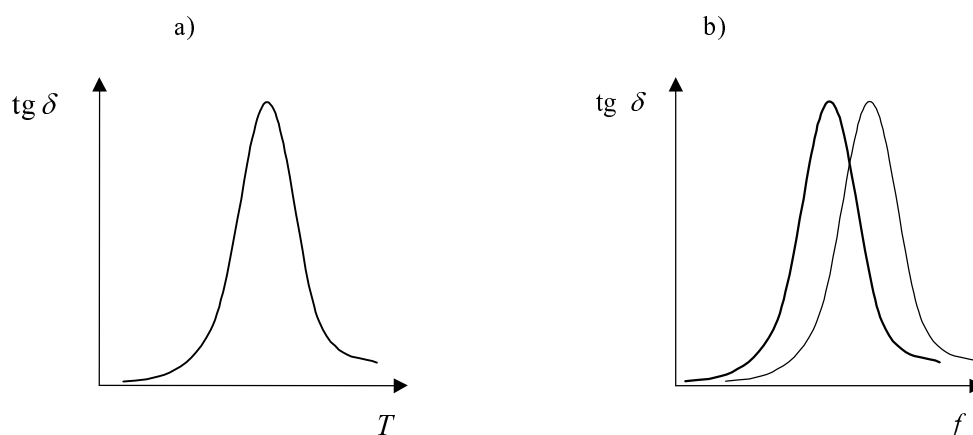
Można pokazać, że pomiędzy składnikami szeregowego i równoległego układu zastępczego występują następujące zależności:

$$C_r = \frac{C_s}{1 + \text{tg}^2 \delta}, \quad (3.3)$$

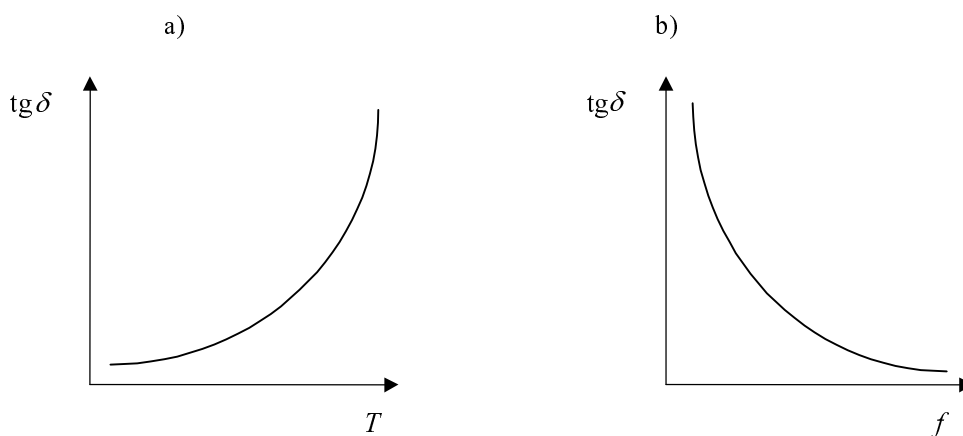
$$R_r = \frac{1 + \text{tg}^2 \delta}{\text{tg}^2 \delta} R_s. \quad (3.4)$$

3.1. Mechanizmy strat w dielektrykach

Przebieg współczynnika strat w funkcji częstotliwości zależy od zjawisk fizycznych zachodzących w dielektryku. Doświadczalnie otrzymane charakterystyki częstotliwościowe i temperaturowe $\operatorname{tg} \delta$ mogą mieć różny przebieg, w zależności od udziału poszczególnych mechanizmów strat. Na rysunkach 3.5 i 3.6 pokazano dwa, najczęściej występujące, rodzaje strat dielektrycznych, a mianowicie straty relaksacyjne i straty przewodnościowe.



Rys. 3.5. Przebieg $\operatorname{tg} \delta$ dla strat typu relaksacyjnego:
a) w funkcji temperatury, b) w funkcji częstotliwości



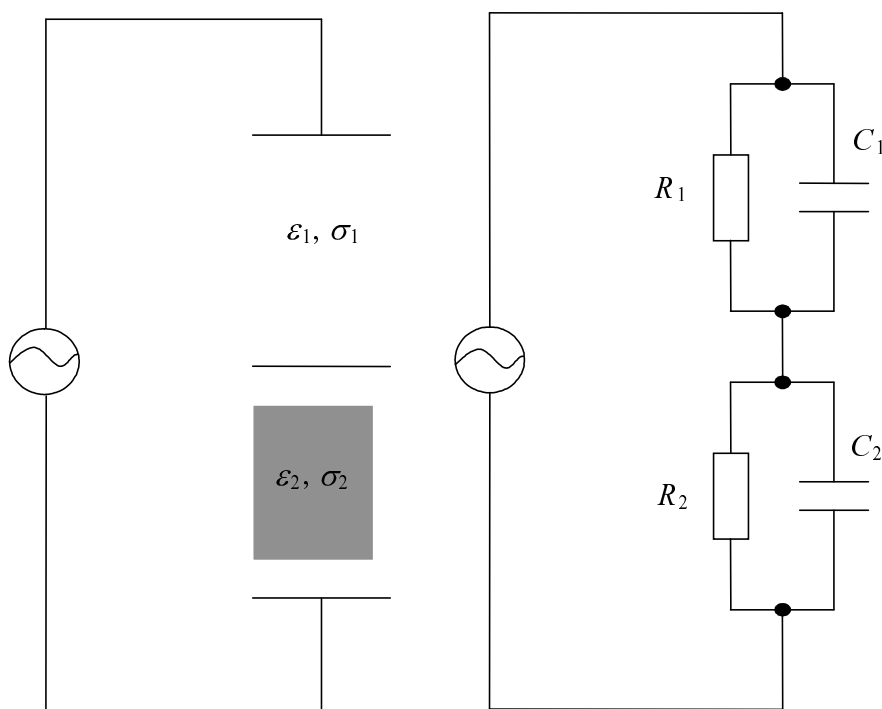
Rys. 3.6. Przebieg $\operatorname{tg} \delta$ dla strat typu przewodnościowego:
a) w funkcji temperatury, b) w funkcji częstotliwości

Straty relaksacyjne wiążą się z ruchem nośników, których zdolność do przemieszczania w dielektryku jest ograniczona, występują one tylko wtedy, gdy $\omega > 0$.

Straty przewodnościowe wiążą się z ruchem nośników swobodnych i występują w całym zakresie częstotliwości. Jak wynika z rysunku 3.6b największy wpływ strat przewodnościowych na charakterystykę częstotliwościową $\tan \delta$ obserwuje się przy niskich częstotliwościach.

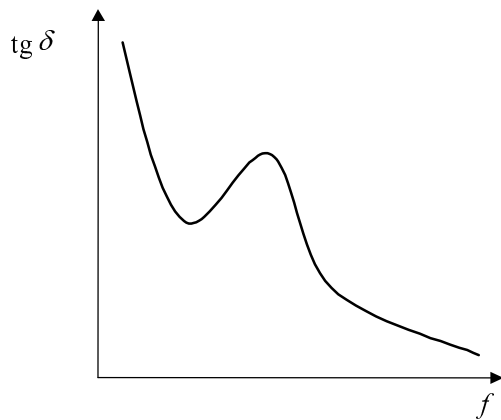
W rzeczywistości istnieje wiele innych mechanizmów strat w dielektrykach. Najczęściej występuje kilka mechanizmów strat jednocześnie, w związku z czym w praktyce przebiegi $\tan \delta = f(\omega)$ jak i $\tan \delta = f(T)$ mogą być dla rzeczywistych dielektryków bardzo skomplikowane.

Przykład bardziej złożonego układu zastępczego pokazano na rysunku 3.7 dla dwuwarstwowego kondensatora Maxwella–Wagnera.



Rys. 3.7. Dwuwarstwowy kondensator Maxwella–Wagnera i jego obwód zastępczy

Układ ten umożliwia interpretację przebiegów dyspersyjnych niejednorodnych materiałów elektroizolacyjnych. Przebieg $\tan \delta$ w funkcji częstotliwości dla kondensatora dwuwarstwowego pokazano na rysunku 3.8.



3.2. Układy pomiarowe

Wszystkie metody pomiarowe stosowane do badania stratności dielektryków można podzielić na dwie kategorie, w zależności od tego, czy próbka może być scharakteryzowana przez parametry skupione czy rozłożone.

Do pierwszej kategorii należą techniki pomiarowe z zakresu bardzo małych częstotliwości ($10^{-6} \div 10^{-1}$ Hz) oraz od częstotliwości Rys. 3.8. Zależność $\text{tg } \delta$ od częstotliwości dla kondensatora Maxwella–Wagnera

Druą kategorią obejmuje układy pracujące w obszarze częstotliwości mikrofalowych oraz częstotliwości optycznych, gdzie elementów układu pomiarowego nie można już traktować jako parametrów skupionych.

Pomiary stratności w zakresie bardzo małych częstotliwości polegają na przyłożeniu do próbki napięcia skokowego i rejestrowaniu prądu ładowania i rozładowania w funkcji czasu. Po zastosowaniu transformaty Fouriera do prądowych przebiegów czasowych uzyskuje się przebiegi częstotliwościowe współczynnika strat oraz przenikalności elektrycznej.

Najbardziej rozpowszechnione w praktyce inżynierskiej są pomiary stratności w zakresie częstotliwości akustycznych za pomocą mostków rezystancyjno-pojemnościowych. Z tego powodu metody mostkowe omówiono bardziej szczegółowo.

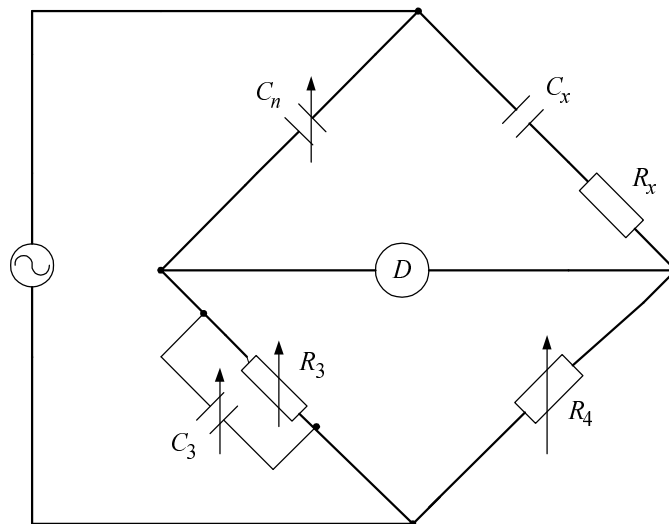
Przy częstotliwości powyżej 1 MHz żadne metody mostkowe nie mogą być stosowane, ze względu na występowanie efektów indukcyjnych. Powszechnie stosowane są wówczas metody rezonansowe (100 kHz \div 200 MHz).

Przy częstotliwościach powyżej 300 MHz, gdzie próbka dielektryczna musi być rozpatrywana jako system o parametrach rozłożonych, istnieje wiele metod pomiarowych, które mogą być zastosowane. W metodach mikrofalowych stosuje się równania Maxwella do opisu fali elektromagnetycznej rozchodzącej się w badanym dielektryku. Stratność i przenikalność dielektryku zmienia takie parametry fali, jak: współczynnik tłumienia, stałą fazową, głębokość wnikania i jej długość. W wyniku pomiaru tych paramertów można obliczyć przenikalność i stratność dielektryku.

Przy częstotliwościach gigahercowych bada się właściwości dielektryczne w otwartej przestrzeni. Metody te są podobne do badań w paśmie optycznym. Polegają one na badaniu przepuszczania i odbicia fali elektromagnetycznej. Metody optyczne umożliwiają pomiary współczynnika strat przy częstotliwości od 300 do 3000 GHz, z wykorzystaniem rezonatorów optycznych.

Metody mostkowe

Podstawowym mostkiem stosowanym do pomiarów zarówno współczynnika strat, jak i przenikalności elektrycznej w paśmie od 20 Hz do 1 MHz jest mostek typu Scheringa, którego schemat pokazano na rysunku 3.9. W układzie tym próbka jest przedstawiona za pomocą szeregowego układu zastępczego (R_x , C_x), natomiast C_n przedstawia bezstratny kondensator wzorcowy.



Rys. 3.9. Podstawowy schemat mostka Scheringa

Warunek równowagi mostka Scheringa jest następujący

$$\underline{Z}_n \underline{Z}_4 = \underline{Z}_x \underline{Z}_3, \quad (3.5)$$

tzn. iloczyn impedancji ramion mostka leżących naprzeciw siebie mają być sobie równe.

Po podstawieniu do wzoru (3.5) odpowiednich impedancji otrzymujemy

$$\frac{1}{j\omega C_n} R_4 = \left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) \left(\frac{1}{R_3} + j\omega C_3 \right). \quad (3.6)$$

Po porównaniu ze sobą części rzeczywistych i urojonych otrzymujemy relacje:

$$R_x = R_4 \frac{C_3}{C_n} \quad (3.7)$$

oraz

$$C_x = C_n \frac{R_3}{R_4}. \quad (3.8)$$

Współczynnik strat próbki wynosi

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_x R_x = \omega R_3 C_3. \quad (3.9)$$

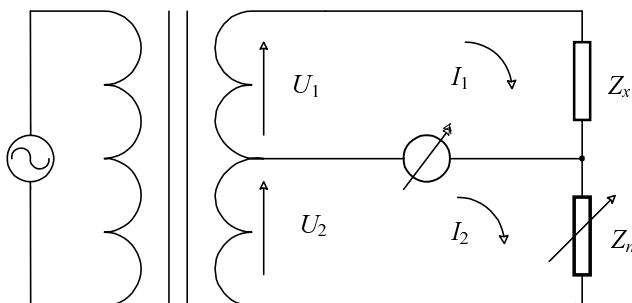
Niepewność pomiarów mostkami prądu przemiennego wynika z dokładności elementów mostka, wpływu szkodliwych sprzężeń, czułości wskaźnika równowagi, wartości napięcia zasilającego. Napięcie progowe wskaźnika równowagi powinno być jak najmniejsze, rzędu $\mu\text{V} \div \text{mV}$, wskaźnik powinien być selektywny, tzn. pracujący na wybranej częstotliwości. Generator zasilający mostek nie powinien zawierać wyższych harmonicznych.

Dokładność precyzyjnych mostków Scheringa sięga $\pm 0,01\%$. Mostki te są budowane jako niskonapięciowe, pracujące w przedziale częstotliwości od 20 Hz do 300 kHz. Można także spotkać specjalne wykonania mostków tego typu pracujące aż do częstotliwości 1 MHz, ale z obniżoną dokładnością. Napięcia zasilające takich mostków wynoszą kilkadziesiąt woltów.

Inną odmianą mostka Scheringa jest mostek wysokonapięciowy, pracujący przy napięciach rzędu setek kilowoltów, ale przy jednej częstotliwości, najczęściej 50 lub 60 Hz.

W układach mostków prądu przemiennego duży wpływ na dokładność pomiaru mają pojemności pasożytnicze. Częściowo ich szkodliwy wpływ można ograniczyć przez ekranowanie gałęzi mostka. Całkowita eliminacja pojemności pasożytniczych jest możliwa w bardzo skomplikowanej wersji mostka, zawierającego dodatkowe gałęzie kompensujące (tzw. mostek ośmioramienny).

Inną odmianą mostków są **mostki transformatorowe (różnicowe)**. Mostki te pracują w zakresie od 20 Hz do 1 MHz. Schemat takiego mostka przedstawiono na rysunku 3.10.



W jedną gałąź mostka włączamy badaną próbkę, w drugą wzorec pojemności oraz rezystancji połączone szeregowo ze sobą. Regulując wzorcami, doprowadzamy mostek do stanu równowagi, która polega na zrównaniu prądów płynących przez wskaźnik. Warunek równowagi mostka różnicowego jest następujący

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2, \quad (3.10)$$

gdzie:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_x}, \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_n}. \quad (3.11)$$

Po wstawieniu do równania (3.10) relacji (3.11) otrzymujemy

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_x} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_n}. \quad (3.12)$$

Najczęściej przyjmuje się, że $\underline{U}_1 = \underline{U}_2$, wtedy

$$\underline{Z}_x = \underline{Z}_n, \quad (3.13)$$

z czego wynika, że

$$\underline{C}_x = \underline{C}_n, \quad (3.14)$$

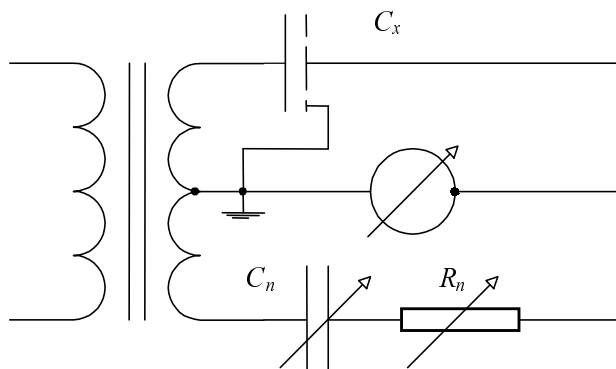
$$\underline{R}_x = \underline{R}_n \quad (3.15)$$

oraz

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_x R_x = \omega C_n R_n. \quad (3.16)$$

Zaletą mostków tego typu jest duża dokładność pomiaru oraz mały wpływ pojemności pasożytniczych.

Przy precyzyjnych pomiarach stosuje się układ trójelektrodowy, umożliwiający eliminację pojemności pasożytniczych (brzegowej i rozproszonej). Schemat poprawnego podłączenia próbki w układzie trójelektrodowym do mostka różnicowego pokazano na rysunku 3.11.



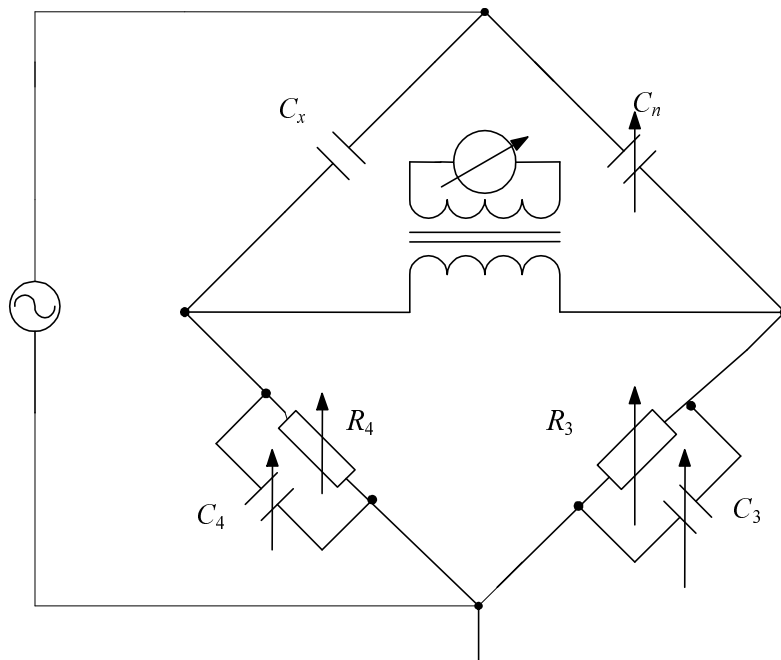
3.3. Układy pomiarowe stosowane w ćwiczeniu

Pomiary należy wykonać w układzie pomiarowym wskazanym przez prowadzącego ćwiczenie. Przed rozpoczęciem pomiarów należy zapoznać się z instrukcją obsługi mostka, na którym będą wykonywane pomiary.

Mostek Scheringa MS-50

Schemat mostka przedstawiono na rysunku 3.12. W skład układu pomiarowego mostka wchodzi:

- generator sinusoidalny GMS-51,
- mostek czteroramienny z układem wzorców oraz włączoną próbką,
- selektywny wskaźnik równowagi WMS-52.



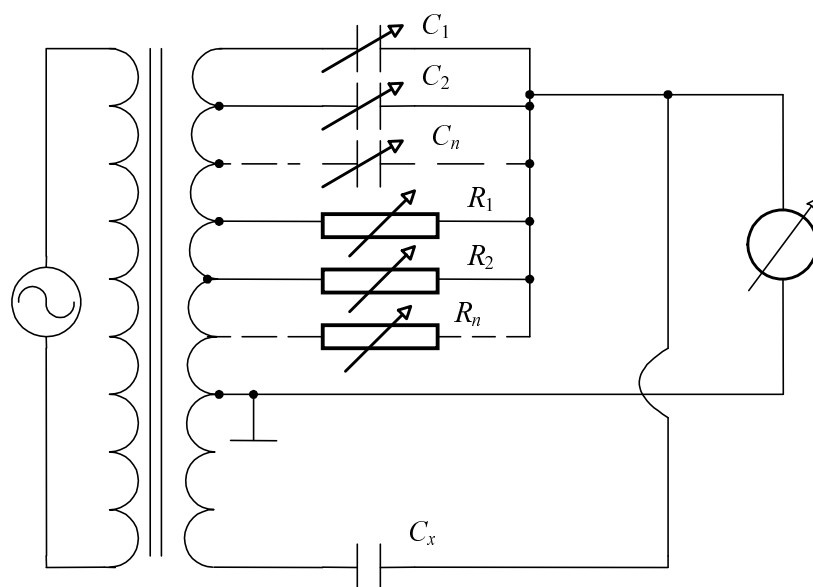
Rys. 3.12. Schemat układu pomiarowego z mostkiem MS-50

Wyrażenia (3.14) i (3.16) podają warunki równowagi przy założeniu braku pojemności pasożytniczych. W rzeczywistości one występują i podczas bardzo dokładnych pomiarów należałoby je uwzględnić w warunkach równowagi mostka (patrz instrukcja obsługi mostka).

Mostek różnicowy 1620-A

Zestaw pomiarowy 1620-A (rys. 3.13) składa się z następujących elementów:

- a) mostka pojemnościowego typu 1615-A,
- b) generatora typu 1311-A,
- c) wskaźnika równowagi typu 1232-A.



Rys. 3.13. Uproszczony schemat zestawu pomiarowego 1620-A

3.4. Pomiary dielektryków ciekłych

Do pomiaru stratności dielektryków ciekłych stosuje się specjalny kondensator pomiarowy. Badaną ciecz należy wlewać do kondensatora pomiarowego i dołączyć go do mostka w miejsce próbki pomiarowej.

Kolejność czynności przy badaniach stratności w funkcji temperatury jest następująca:

1. Puste i czyste naczynie pomiarowe umieścić w suszarce i nagrzewać nie krócej niż 30 minut.
2. Wyjąć naczynie i szybko napęlić badanym olejem.
3. Przez poruszanie naczyniem należy spowodować szybsze wymieszanie się oleju i wyrównanie temperatury.
4. Do odpowiedniego otworu (z boku naczynia pomiarowego) włożyć czujnik termometru oporowego i zmierzyć temperaturę.
5. Naczynie podłączyć do mostka i wykonać pomiar.

Sposób wykonania pomiarów szczegółowo opisano w normie PN-84/E-04409.

Po zakończeniu pomiarów naczynie pomiarowe rozkręcić i starannie umyć.

3.5. Program ćwiczenia

1. Nałożyć elektrody z folii aluminiowej na dostarczone próbki dielektryków stałych.
2. Wykonać pomiary współczynnika strat $\tan \delta$ w funkcji częstotliwości na przygotowanych próbkach dielektryków stałych i układach modelowych.
3. Wykonać pomiary współczynnika strat $\tan \delta$ oleju transformatorowego w funkcji temperatury.

Literatura

1. Celiński Z., *Materialoznawstwo elektrotechniczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
2. Bartnikas R., *Engineering dielectrics*, Vol. II B, *Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Measurement Techniques*, ASTM, Philadelphia 1987.
3. Siciński Z., *Badanie materiałów elektroizolacyjnych*, WNT, Warszawa 1968.
4. Polskie Normy:
PN-86/E-04403 *Materiały elektroizolacyjne stałe. Metody pomiaru przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych.*
PN-84/E-04409 *Materiały elektroizolacyjne ciekłe. Pomiary współczynnika strat dielektrycznych, przenikalności elektrycznej względnej i rezystywności.*

4. BADANIE WYTRZYMAŁOŚCI ELEKTRYCZNEJ

Przebiecie elektryczne, zgodnie z obowiązującą normą PN-IEC 243-1 dotyczącą badań przy częstotliwości sieciowej, jest definiowane jako: *utrata, przynajmniej chwilowa, właściwości elektroizolacyjnych ośrodka pod wpływem natężenia pola elektrycznego.*

Iloraz napięcia przebicia (napięcie, przy którym następuje przebiecie w znormalizowanych warunkach badania lub w trakcie użytkowania) i odległości między częściami przewodzącymi (elektrodami), do których doprowadzone jest napięcie, jest definiowany jako **wytrzymałość elektryczna** [PN-IEC 243-1].

Na wyznaczaną wartość wytrzymałości elektrycznej materiału mogą między innymi mieć wpływ następujące czynniki:

- Rodzaj stosowanego napięcia probierczego: stałe, przemienne, impulsowe. Sposób i prędkość podnoszenia napięcia oraz czas przyłożenia napięcia.

- Układ (geometria), wymiary, powierzchnie graniczne, przewodność cieplna elektrod probierczych. Powierzchnia lub objętość pomiędzy elektrodami poddana oddziaływaniu maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego – tzw. efekt rozmiarowy.

- Defekty struktury, jednorodność materiału, wstępne naprężenia mechaniczne oraz zanieczyszczenia, wtrąciny gazowe i wilgoć.

- Warunki otoczenia: temperatura, ciśnienie i wilgotność. Właściwości elektryczne i cieplne otaczającego środowiska.

Wytrzymałość elektryczna większości materiałów może być w trakcie pomiaru obniżona przez wyładowania powierzchniowe, wyładowania drzewiaste, a w przypadku napięcia stałego – przez efekty elektrochemiczne.

Wpływ wszystkich wymienionych czynników należy uwzględnić podczas badań materiałów lub układów izolacyjnych, co do których nie ma się doświadczenia.

W przypadku układów elektrod zapewniających przebiecie w miejscu równomiernego rozkładu pola elektrycznego (układ płaski lub specjalnie przygotowywane układy do wyznaczania tzw. wytrzymałości elektrycznej wewnętrznej) do wyznaczenia wartości wytrzymałości elektrycznej E_p korzysta się ze wzoru

$$E_p = \frac{U_p}{a}, \quad (4.1)$$

w którym:

U_p – napięcie przebicia,

a – odstęp elektrod.

Przy przebiciu wyróżnia się następujące etapy przebicia:

- a) procesy przedprzebiciowe,
- b) rozwój wyładowania do powstania kanału przewodzącego zwierającego elektrody,
- c) wyładowanie główne, wynikające z neutralizacji ładunku elektrycznego kanału zwierającego elektrody.

Wartość napięcia przebicia dla tego samego materiału zależy od mechanizmu prowadzącego do przebicia. W przypadku dielektryków stałych wyróżnia się następujące mechanizmy przebicia:

1. Procesy elektronowe (w literaturze technicznej często nazywane mechanizmem elektrycznym).
2. Ciepłne.
3. Elektromechaniczne.
4. Jonizacyjne.
5. Starzeniowe.

Ad 1. Mechanizm elektryczny przebicia polega na zniszczeniu materiału procesami elektronowymi (elektronowa jonizacja zderzeniowa, procesy emisji polowej, przebicia wolnych przestrzeni – wnęk gazowych) zachodzącymi w bardzo krótkim czasie, kiedy inne mechanizmy nie mogą się rozwinąć.

Ad 2. Mechanizm ciepłny przebicia jest powodowany zachwianiem równowagi cieplnej pomiędzy ciepłem wydzielanym w materiale wskutek strat dielektrycznych a zdolnością pochłaniania ciepła przez materiał i oddawania go do otoczenia. Oddziaływania ciepłne mogą mieć charakter impulsowy lub zachodzić w czasie dłuższym (kilku godzin).

Ad 3. Istnieje wiele charakterystyk wiążących właściwości mechaniczne i elektryczne materiałów. Wysokie pole elektryczne powoduje powstanie bardzo dużych sił elektrostatycznych deformujących materiał.

Ad 4. Mechanizm jonizacyjny powstaje wówczas, gdy występują wyładowania niepełne w szczelinach gazowych lub miejscach znacznie zwiększonego natężenia pola elektrycznego (niejednorodności, zanieczyszczenia) w objętości materiału. Czas potrzebny do przebicia materiałów wynosi od około jednej do kilkudziesięciu sekund.

Ad 5. Starzeniowy mechanizm przebicia powstaje również w wyniku wyładowań niepełnych, ale przy mniejszych wartościach pola elektrycznego, dlatego wymaga znacznie dłuższego czasu (godziny, lata) oddziaływania napięcia oraz dodatkowych narażeń z powodu podwyższonej temperatury i oddziaływania środowiska.

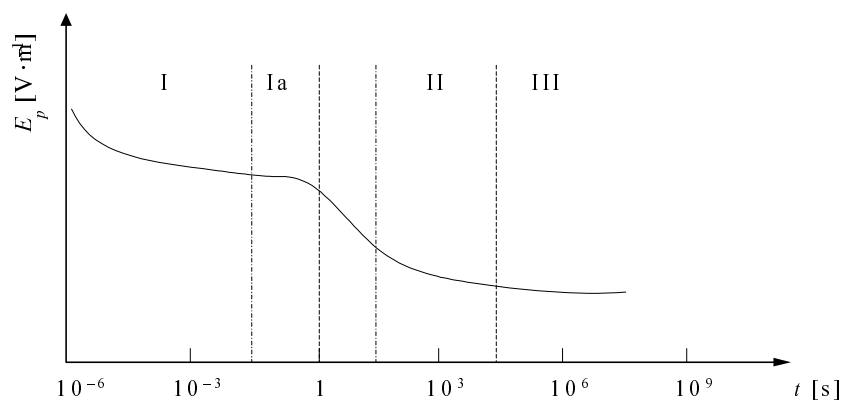
W praktyce niszczenie ciała stałego jest procesem bardzo skomplikowanym, który często jest wynikiem zachodzenia kilku mechanizmów, chociaż w danych warunkach zawsze dominuje któryś z procesów niszczenia.

Czas oddziaływania narażenia napięciowego do chwili przebicia materiału izolacyjnego może być orientacyjnym wskaźnikiem informującym o mechanizmie przebicia (rys. 4.1).

Od czasu działania napięcia, a więc i mechanizmu prowadzącego do przebicia, zależy wartość wytrzymałości elektrycznej – najwyższa dla przebicia elektrycznego, najniższa dla cieplnego w warunkach ustalonych i starzeniowego.

Na wartość wytrzymałości elektrycznej dielektryków stałych bardzo istotny wpływ ma również ich budowa chemiczna i struktura makroskopowa. Największą wytrzymałość wykazują materiały jednorodne, najmniejszą niejednorodne lub porowate.

Wytrzymałość elektryczna większości materiałów zależy od intensywności i czasu trwania wyładowań powierzchniowych poprzedzających przebicie. W przypadku konstrukcji wolnych od wyładowań niepełnych aż do osiągnięcia wartości napięcia probierczego bardzo ważna jest znajomość wytrzymałości elektrycznej bez wyładowań poprzedzających przebicie. Materiały o wysokiej wytrzymałości elektrycznej nie zawsze są odporne na długotrwałe procesy niszczenia, powodowane działaniem ciepła, erozji lub degradacji chemicznej wskutek wyładowań niepełnych albo degradacją elektrochemiczną w obecności wilgoci. Wszystkie te procesy w trakcie eksploatacji mogą powodować przypadkowe uszkodzenia przy znacznie niższych napięciach elektrycznych.



Rys. 4.1. Wytrzymałość elektryczna materiałów, o stosunkowo wysokiej wartości $\text{tg } \delta$, w zależności od czasu oddziaływania pola elektrycznego: I – mechanizm elektryczny (elektronowy i jonizacyjny – I_a), II – mechanizm cieplny, III – mechanizm starzeniowy

Wytrzymałość elektryczna technicznych cieczy izolacyjnych (np. olejów izolacyjnych) bardzo silnie zależy od ich stanu czystości. Wpływ zanieczyszczeń, do których należą rozpuszczone w olejach gazy, występująca w rozmaitej postaci woda oraz zanieczyszczenia mechaniczne, jest tak silny, że wytrzymałość tych cieczy praktycznie nie zależy od ich składu chemicznego.

Pomiar wytrzymałości elektrycznej sprowadza się zawsze do pomiaru napięcia przebicia próbki materiału (istotny jest rodzaj napięcia probierczego: przemienne o częstotliwości sieciowej, stałe, udarowe), dokładnego pomiaru grubości próbki

w miejscu przebicia i obliczenia wartości natężenia pola elektrycznego z uwzględnieniem jego rozkładu (wzory (4.1) i (4.2)). W pewnych przypadkach obliczenie wytrzymałości elektrycznej jest trudne lub wręcz niemożliwe. Wyznacza się wówczas napięcie przebicia w ściśle zdefiniowanych warunkach pomiaru, takich jak np. kształt i odstęp elektrod, specjalnie ukształtowana próbka. Wyniki uzyskiwane różnymi metodami nie są bezpośrednio porównywalne, ale mogą dostarczać informacji o **względnej wytrzymałości elektrycznej materiałów**. Należy zauważyć, że wytrzymałość elektryczna większości materiałów maleje, gdy wzrasta grubość próbki pomiędzy elektrodami i gdy zwiększa się czas przyłożenia napięcia.

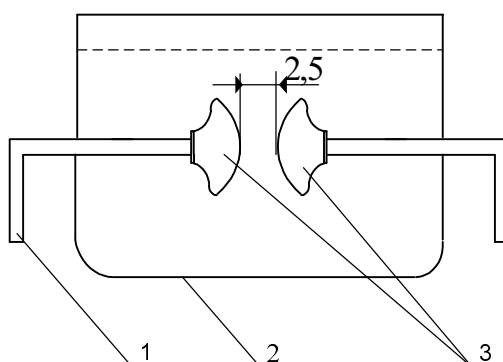
Materiały organiczne, o dobrych właściwościach elektroizolacyjnych w stanie suchym i czystym, w atmosferze wilgotnej, a zwłaszcza po zanieczyszczeniu ich powierzchni, są podatne na działanie wyładowań powierzchniowych lub prądów pełznych. W wyniku ich termicznego, chemicznego lub erozyjnego działania powstaje trwałe uszkodzenie powierzchni materiału w postaci śladu pełznego. W przypadku materiałów mniej odpornych ślad ten ma postać zwęglonej ścieżki rozciągniętej w kierunku linii sił pola elektrycznego, w przypadku bardziej odpornych – ma postać zagłębień, ułożonych prostopadle do linii pola. Prądy pełzające stanowią poważne niebezpieczeństwo w eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych. Wynika stąd potrzeba badania odporności materiałów na te narażenia i na tej podstawie właściwego ich doboru do poszczególnych zastosowań praktycznych. Należy podkreślić, że metody badania odporności materiałów na prądy pełzające modelują znacznie ostrzejsze warunki środowiska niż warunki rzeczywiste, a uzyskane wyniki pozwalają jedynie na porównywanie materiałów między sobą.

4.1. Pomiar napięcia przebicia oleju transformatorowego

Warunki wykonania pomiaru napięcia przebicia cieczy izolacyjnych ujmuje Polska Norma PN-77/E-04408 *Materiały elektroizolacyjne ciekłe. Pomiary napięcia przebicia*, zgodnie z którą pomiar napięcia przebicia powinien być wykonany za pomocą iskiernika kulistego lub czasowego, w temperaturze otoczenia, napięciem przemiennym o częstotliwości 50 Hz. Wyniki pomiarów z obu iskierników są **nieporównywalne**. Norma zaleca stosowanie iskiernika kulistego (wycinki kul) z odstępem 2,5 mm do oceny wytrzymałości elektrycznej cieczy elektroizolacyjnych, używanych w przemyśle elektrotechnicznym i energetyce.

Elektrody są umieszczone w naczyniu porcelanowym wypełnionym badaną cieczą (rys. 4.2). Elektrody oraz iskiernik muszą być odpowiednio przygotowane do pomiaru (oczyszczone, umyte odpowiednimi odczynnikami chemicznymi i wysuszone). Należy niewielką ilością badanej cieczy opłukać elektrody i naczynie pomiarowe, a następnie napełnić naczynie badaną cieczą, wlewając ją po ścianie naczynia w taki sposób, aby nie tworzyły się pęcherzyki powietrza. Przed przystąpieniem do badań ciecz w naczyniu należy pozostawić w spokoju przez 10 min, po tym czasie należy włączyć napięcie

probiercze i podnosić je płynnie z szybkością 2 kV/s aż do wystąpienia przebiecia (nowoczesne urządzenia pomiarowe podnoszą napięcie automatycznie i rejestrują jego wartość w momencie przebiecia). Na rysunku 4.3 pokazano schemat układu probierczego do pomiaru napięć przebiecia cieczy izolacyjnych. Na jednej próbce badanej cieczy wykonuje się sześć kolejnych pomiarów, po każdym pomiarze należy ciecz wymieszać szklanym pręcikiem zwracając szczególną uwagę na to, aby nie tworzyły się pęcherzyki powietrza, po czym po 5 minutach wykonać następny pomiar.



Rys. 4.2. Iskiernik kulisty: 1 – doprowadzenie napięcia probierczego, 2 – naczynie pomiarowe, 3 – układ elektrod pomiarowych

Za wynik pomiaru napięcia przebiecia cieczy U_p należy przyjąć średnią arytmetyczną wyników sześciu pomiarów oraz względne odchylenie standardowe V w procentach, obliczane według wzorów:

$$U_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{pi}, \quad (4.2)$$

$$V = \frac{s}{U_p} 100\%, \quad (4.3)$$

w których:

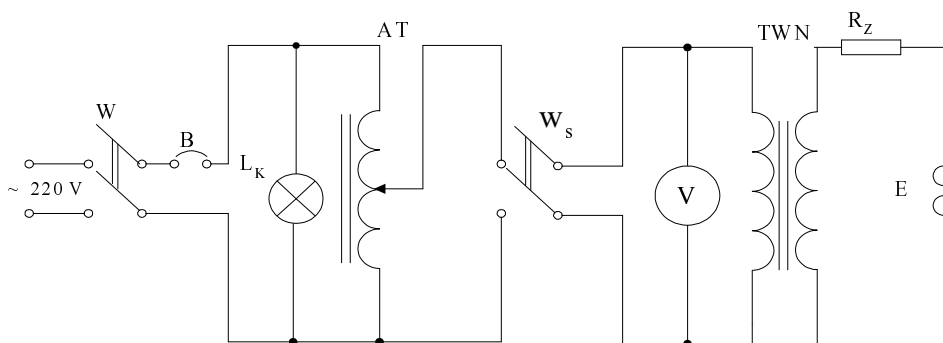
U_{pi} – wartości napięcia przebicia otrzymane w kolejnych pomiarach,

n – liczba pomiarów,

s – średnie odchylenie standardowe obliczone według wzoru

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{pi} - U_p)^2}{n - 1}}. \quad (4.4)$$

Oceny badanego oleju pod względem jego wytrzymałości elektrycznej należy dokonać, porównując otrzymany wynik z wymaganiami normy PN-90/C-96058 *Olej elektroizolacyjny do transformatorów i aparatury łączeniowej*.

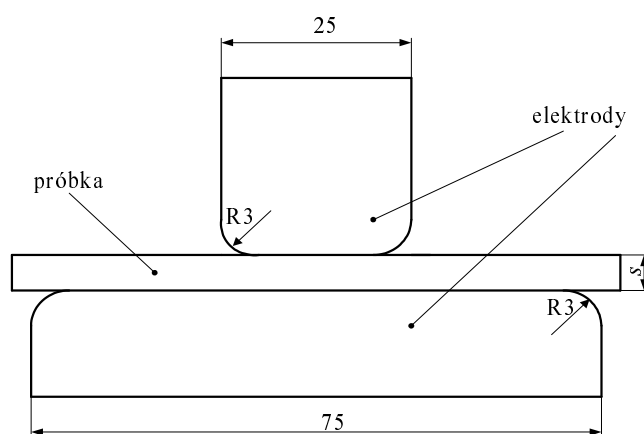


Rys. 4.3. Schemat ideowy układu probierczego aparatu do pomiaru wytrzymałości elektrycznej oleju transformatorowego: W – wyłącznik, B – blokada, L_K – lampka sygnalizacyjna, AT – autotransformator, W_s – wyłącznik samoczynny, TWN – transformator wysokiego napięcia, R_z – opornik ograniczający, E – elektrody pomiarowe

4.2. Pomiar wytrzymałości elektrycznej papieru kablowego

Pomiaru wytrzymałości elektrycznej papieru należy dokonać zgodnie z normą PN-IEC 243-1 *Metody badania wytrzymałości elektrycznej materiałów elektroizolacyjnych stałych. Badania przy częstotliwości sieciowej*. Elektrody używane do badań powinny stanowić dwa metalowe walce o zaokrąglonych brzegach (rys. 4.4). Elektrody te powinny być umieszczone współosiowo, jak pokazano na rysunku 4.4. Układ elektrod jest zasilany z wysokonapięciowego układu probierczego zgodnie z wymaganiami normy PN-92/E-04060 [idt IEC 60-1]. Podstawą układu laboratoryjnego jest transformator probierczy wysokiego napięcia TP-60 o przekładni znamionowej

30000 V/220 V lub 60000 V/220 V, w zależności od połączenia uzwojeń niskiego napięcia transformatora. Schemat ideowy układu probierczego jest analogiczny do układu używanego do badania wytrzymałości elektrycznej oleju (rys. 4.3) z tą różnicą, że jeden z biegunów wysokiego napięcia jest uziemiony (układ napięciowo niesymetryczny). Dlatego dolną elektrodę walcową należy uziemić, a do górnej podłączyć wysokie napięcie.



Rys. 4.4. Układ elektrod o niejednakowych średnicach stosowany do badania płyt, materiałów arkuszowych w tym preszpanów, papierów, tkanin i folii wg normy PN-IEC 243-1

Powierzchnie badanej próbki, stykające się z elektrodami, powinny być równoległe i na tyle płaskie i gładkie, na ile jest to możliwe. Podczas badań wykonywanych prostopadle do powierzchni materiału próbki powinny mieć wystarczającą powierzchnię, aby zapobiec występowaniu przeskoków powierzchniowych w trakcie próby. Dlatego podczas badania papieru kablowego należy użyć kwadratowych próbek o wymiarach 100×100 mm. Próbka powinna składać się co najmniej z kilku ($m = 5 \div 10$) warstw papieru. Na jednej próbce należy wykonać pięć przebić, tak ustawiając elektrody, aby nie pokrywały przebitych miejsc. Taką samą próbkę złożoną z m warstw papieru należy nasycić w kuwecie z materiału elektroizolacyjnego olejem transformatorowym – czas nasycania 3÷5 min – i wykonać ponownie pięć pomiarów napięć przebicia. Wytrzymałość elektryczną albo napięcie przebicia z obu badań należy określić jako wartość środkową wyników.

Uwaga

Po uporządkowaniu wyników według rosnącej wartości, wartością środkową jest wynik środkowy przy nieparzystej liczbie prób, natomiast przy parzystej liczbie prób – jest to średnia z dwóch środkowych wyników.

Wytrzymałość elektryczną dla papieru suchego E_{ps} i E_{pm} dla papieru nasyczonego olejem należy obliczyć według wzoru

$$E_{ps(pn)} = \frac{U_{sr}}{m g}, \quad \text{kV/mm}, \quad (4.5)$$

w którym:

U_{sr} – wartość środkowa napięć przebiccia,

m – liczba warstw papieru,

g – grubość jednej warstwy papieru zmierzona grubościomierzem.

Po obliczeniu obu wytrzymałości elektrycznych należy wyznaczyć krotność wzrostu wytrzymałości elektrycznej papieru po jego nasyceniu jako stosunek E_{pn}/E_{ps} .

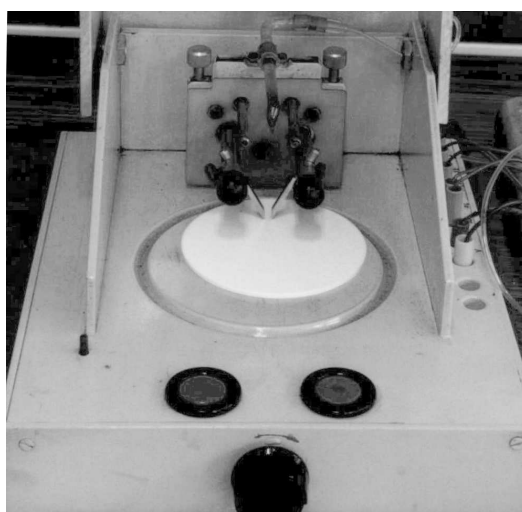
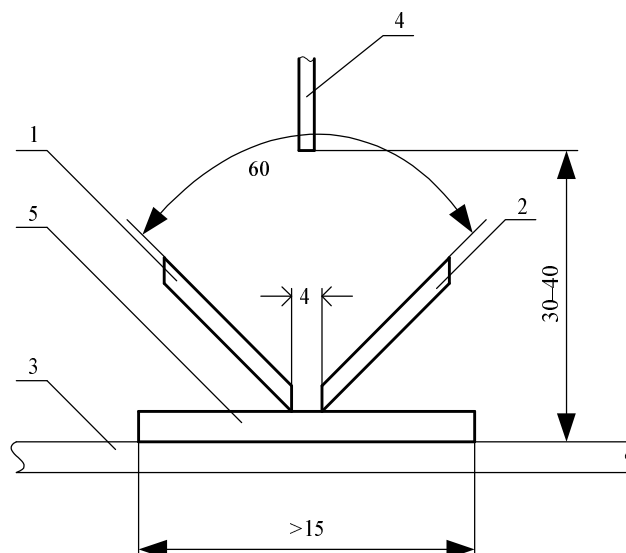
4.3. Badanie odporności na prądy pełzające metodą kropłową

Odporność materiału elektroizolacyjnego na prądy pełzające wyznacza się metodą kropłową zgodnie z normą PN-86/E-04415 *Materiały elektroizolacyjne stałe. Metoda wyznaczania wskaźników porównawczych i wskaźników odporności na prądy pełzające w warunkach zawilgocenia*. Metodę tę stosuje się do badań materiałów przeznaczonych do pracy w urządzeniach niskonapięciowych w środowisku o zwiększonej wilgotności i zawierającym substancje przewodzące prąd elektryczny. Polega ona na sztucznym zanieczyszczeniu powierzchni badanego materiału między elektrodami zasilanymi odpowiednią wartością napięcia, kroplami elektrolitu, które spadają w określonych odstępach czasu. Celem takiej próby jest wyznaczenie liczby spadających kropli roztworu niezbędnych do spowodowania uszkodzenia materiału – przepływu prądu pełzającego¹.

Próbkę materiału stanowi płaska płytka grubości co najmniej 3 mm i wymiarach nie mniejszych niż 15×15 mm. Dwie elektrody wykonane z platyny są ustawione w odległości 4 mm od siebie i powinny przylegać swoimi krawędziami do powierzchni badanego materiału. Budowę elektrod i sposób ich ustawienia pokazano na rysunku 4.5.

Roztworem zwilżającym próbkę jest 0,1% roztwór chlorku amonowego (NH_4Cl) w wodzie destylowanej lub dejonizowanej. W temperaturze 23 ± 1 °C rezystywność roztworu powinna wynosić 395 ± 5 Ωcm . Krople roztworu powinny spadać między elektrody co 30 ± 5 s. Badanie wykonuje się napięciem przemiennym o częstotliwości sieciowej i wartości regulowanej od 100 do 500 V. Układ pomiarowy powinien umożliwiać regulację napięcia oraz jego pomiar i automatyczne wyłączenie napięcia po wystąpieniu zwarcia elektrod.

¹ Prąd pełzający jest to prąd będący wynikiem postępującego tworzenia się ścieżek przewodzących na powierzchni stałego materiału izolacyjnego pod łącznym wpływem pola elektrycznego oraz elektrolitycznego zanieczyszczenia tej powierzchni.



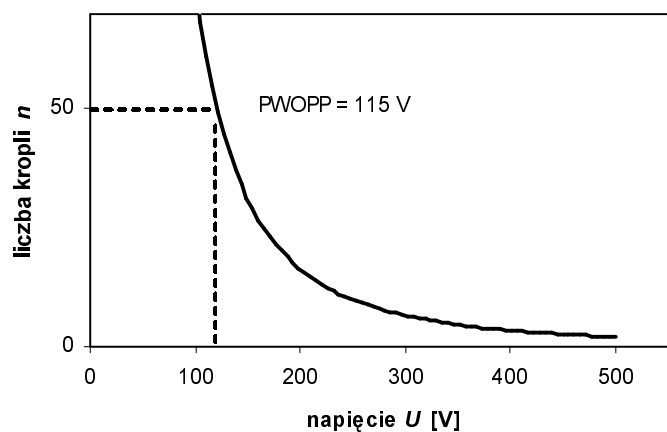
Rys. 4.5. Sposób ustawienia elektrod na próbce badanego materiału:
1, 2 – elektrody platynowe, 3 – podstawa,
4 – końcówka urządzenia do wytwarzania spadających kropeł,
5 – próbka badanego materiału

Schemat układu spełniającego podane warunki przedstawiono na rysunku 4.3 w normie PN-86/E-04415. Po ustawieniu elektrod na powierzchni próbki (rys. 4.5) i wyregulowaniu czasu opadania kropeł roztworu należy wykonać pomiary kolejno przy różnych napięciach, począwszy od 500 V, zapisując dla każdej wartości napięcia liczbę kropeł do zwarcia elektrod. Zaleca się wykonanie badań na pięciu próbkach,

w szczególnych przypadkach można dopuścić mniejszą liczbę próbek. W warunkach laboratorium dydaktycznego należy wykonać wykres $n = f(U)$. Z otrzymanego wykresu wyznacza się porównawczy wskaźnik odporności na prąd pełzający – PWOPP, jest to liczbowa wartość maksymalnego napięcia w voltach, przy którym materiał wytrzymuje nawilżenie 50 kroplami bez pojawienia się prądu pełzającego (norma międzynarodowa IEC stosuje oznaczenie CTI – *comparative tracking index*) (rys. 4.6).

Uwaga

Należy zaznaczyć, że wyznaczenie PWOPP w ramach czasu przewidzianego na ćwiczenia studenckie odbiega od procedury i ścisłych definicji normy.



Rys. 4.6. Przykładowy wykres $n = f(U)$ do wyznaczenia PWOPP

4.4. Badanie odporności materiału na łuk elektryczny o małym natężeniu prądu

Odporność na łuk elektryczny materiałów elektroizolacyjnych (z wyjątkiem materiałów ceramicznych) bada się metodą wysokonapięciową. Jest to metoda niszcząca, w której trwała utrata właściwości elektroizolacyjnych materiału występuje w postaci ścieżki przewodzącej, erozji, topienia lub nawet zapalenia się materiału poddanego działaniu łuku. Próbkę materiałów muszą być przygotowane zgodnie z PN-74/E-04441 (odpowiadającej normie IEC 61621). Pomiary wykonuje się na próbkach płaskich o grubości większej niż 3 mm, o wymiarach na tyle dużych, aby odległość elektrod od brzegu próbki była większa niż 8 mm. Układ pomiarowy składa się ze źródła wysokiego napięcia, układu regulacji prądu i napięcia, układu czasowo-impulsowego oraz obwodu elektrod z próbką. Wynikiem badania odporności na łuk elektryczny jest czas w sekundach, liczony od początku badania do powstania ścieżki przewodzącej lub

zapalenia się materiału. W przypadku erozji lub topienia się materiału wynikiem badania jest maksymalna głębokość ubytku materiału podana w milimetrach po 240 sekundach badania.

Wynik należy opracować według wymagań normy PN-74/E-04441.

4.5. Program ćwiczenia

1. Zmierzyć napięcie przebicia oleju transformatorowego.
2. Wyznaczyć wytrzymałość elektryczną papieru kablowego suchego i papieru nasyczonego olejem izolacyjnym.
3. Wyznaczyć metodą kropłową porównywalny wskaźnik odporności na prąd pełzający PWOPP dla dwóch różnych materiałów elektroizolacyjnych.
4. Wyznaczyć odporność na łuk elektryczny dwóch wybranych materiałów elektroizolacyjnych.

Literatura

1. Celiński Z., *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
2. Kędzia J., *Laboratorium materiałoznawstwa elektrycznego*, skrypt nr 211, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 1998.
3. Polskie Normy:
PN-IEC 243-1 *Metody badania wytrzymałości elektrycznej materiałów elektroizolacyjnych stałych*.
PN-77/E-04408 *Materiały elektroizolacyjne ciekłe – Pomiary napięcia przebicia*.
PN-86/E-04415 *Materiały elektroizolacyjne stałe – Metoda wyznaczania wskaźników porównawczych i wskaźników odporności na prądy pełzające w warunkach zawilgocenia*.
PN-90/C-96058 *Przetwory naftowe – Olej elektroizolacyjny do transformatorów i aparatury łączeniowej*.

5. BADANIE WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNYCH PRÓBEK BLACH ELEKTROTECHNICZNYCH

Zastosowanie materiałów magnetycznych jest od dawna na tyle powszechne, że wiele dziedzin techniki nie mogłoby się bez nich obejść. Wystarczy wspomnieć o takich urządzeniach, jak transformatory, elektromagnesy, magnesy trwałe oraz inne urządzenia elektroniczne. Największy postęp notuje się w zakresie zastosowań magnetyków jako elementów pamięciowych w elektronicznych maszynach cyfrowych.

Szybki rozwój dotyczy również magnetycznych materiałów amorficznych, otrzymywanych w postaci taśm magnetycznych. Cechują się one dużą odpornością na korozję, dużą wytrzymałością na złamanie, bardzo wysoką granicą sprężystości. W większości taśm amorficznych straty wskutek prądów wirowych i innych są małe. Przewiduje się ich stosowanie w urządzeniach elektronicznych, pracujących przy częstotliwościach powyżej 50 Hz. Obiecująco również wyglądają możliwości zastosowania ich w urządzeniach dużej mocy. Istotny postęp można zaobserwować w zakresie magnetycznego zapisu i odczytu o dużej gęstości. Wspomniane materiały amorficzne powodują, że w produkcji głowic magnetofonowych notuje się nowe rozwiązania oparte na zastosowaniu taśm amorficznych.

5.1. Magnetyczne właściwości materii

Każde ciało umieszczone w polu magnetycznym magnesuje się. Za miarę stopnia namagnesowania przyjmuje się magnetyzację (zwaną też często namagnesowaniem). Magnetyzacja M jest to moment magnetyczny, przypadający na jednostkę objętości. Zależność magnetyzacji M od pola zewnętrznego H można zapisać w postaci

$$M = \chi H, \quad (5.1)$$

przy czym χ – podatność magnetyczna (liczba bezwymiarowa) charakteryzuje reakcję ośrodka na zewnętrzne pole magnetyczne H .

Jeżeli magnetyzacja M jest różna od zera, o ciele mówi się, że jest namagnesowane. Jednostką magnetyzacji jest $A \cdot m^{-1}$.

Tradycyjnie wszystkie ciała dzieli się, w zależności od wartości podatności magnetycznej χ , na trzy grupy:

- diamagnetyki ($\chi < 0$),
- paramagnetyki ($0 < \chi < 1$),
- ferromagnetyki ($\chi > 1$).

Podział ten, wystarczający z punktu widzenia zastosowań, nie uwzględnia w pełni zachodzących zjawisk. Współczesna nauka rozróżnia pięć najważniejszych zjawisk, prowadzących do magnesowania ciał w polu magnetycznym. Są to:

- diamagnetyzm,
- paramagnetyzm,
- ferromagnetyzm,
- antyferromagnetyzm,
- ferrimagnetyzm.

Pierwotną przyczyną wszystkich tych zjawisk są magnetyczne właściwości elementarnych cząstek materii, wchodzących w skład atomów i cząsteczek. Decydujące znaczenie mają przede wszystkim elektrony.

Podatność magnetyczna diamagnetyków nie zależy od temperatury i ma małą wartość ujemną rzędu $-(0,1 \div 10) \cdot 10^{-6}$. Do diamagnetyków należą wszystkie gazy szlachetne, niektóre metale (np. cynk, złoto, rtęć), niektóre niemetale (np. krzem, fosfor, siarka) oraz wiele związków organicznych (np. alkohol).

Podatność magnetyczna paramagnetyków zależy od temperatury. Zależność tę, znaną jako prawo Curie, można zapisać w postaci

$$\chi = \frac{\text{const}}{T}. \quad (5.2)$$

Z równania (5.2) wynika, że przy takim samym natężeniu pola w wyższej temperaturze silniejsze jest oddziaływanie cieplne, a mniej skuteczne porządkujące działanie pola, a więc mniejsza podatność magnetyczna. Przykładami paramagnetyków mogą być niektóre pierwiastki (np. glin, platyna, pallad, chrom) oraz ich sole (np. chlorek żelaza), powietrze, gazowy tlenek azotu NO, ciekły i stały tlen itd.

Największe znaczenie w elektrotechnice mają ferromagnetyki, których podatności magnetyczne są bardzo duże, najczęściej rzędu $600 \div 10\,000$, a największe wartości, które udało się uzyskać dla bardzo starannie przygotowanego materiału **wynoszą kilka milionów!** Do ferromagnetyków należą metale przejściowe: żelazo, kobalt, nikiel, gadolin oraz wiele stopów tych metali między sobą oraz z innymi pierwiastkami, a także niektóre stopy niezawierające żadnego z tych metali (stopy manganu i niektóre stopy chromu).

Dla temperatury $T > T_c$ ferromagnetyk traci swoje właściwości ferromagnetyczne, stając się paramagnetykiem. Zależność podatności magnetycznej od temperatury określa w tym stanie prawo Curie–Weissa

$$\chi = \frac{\text{const}}{T - T_c}, \quad (T > T_c), \quad (5.3)$$

w którym T_c – temperatura Curie.

Cechą charakterystyczną ferromagnetyków jest także silnie nieliniowa zależność $M = f(H)$.

5.2. Ferromagnetyk w polu magnetycznym

W ogólnym przypadku właściwości magnetyczne ferromagnetyku mogą być różne w różnych jego punktach (niejednorodność) i różne dla różnych kierunków pola magnetycznego (anizotropia). Przedmiotem naszych rozważań będą ferromagnetyki jednorodne i izotropowe, tzn. o jednakowych właściwościach w każdym miejscu i w każdym kierunku.

Właściwości magnetyczne ferromagnetyka jednorodnego izotropowego określa rzeczywista krzywa magnesowania, czyli krzywa zależności indukcji magnetycznej od natężenia pola.

W teorii pola elektromagnetycznego definiuje się indukcję magnetyczną B jako

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M, \quad (5.4)$$

gdzie $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ – przenikalność magnetyczna próżni.

Jednostką indukcji magnetycznej jest 1 tesla (1 T), równa weberowi na metr kwadratowy ($1 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2}$).

Po podstawieniu we wzorze (5.4) za M relacji (5.1), otrzymujemy

$$B = \mu_0 H + \mu_0 \chi H = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu_w H = \mu H, \quad (5.5)$$

gdzie:

$\mu_w = 1 + \chi$ – przenikalność magnetyczna względna,

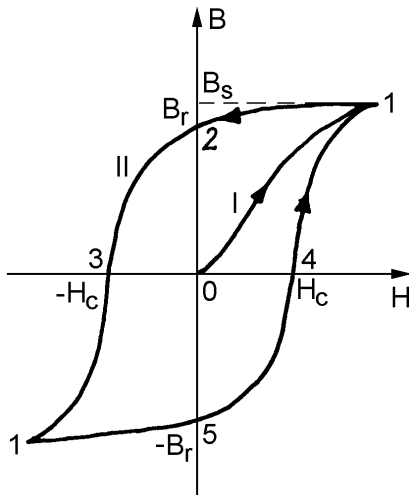
$\mu_0 \mu_w = \mu$ – przenikalność magnetyczna bezwzględna.

W celu wyznaczenia krzywej magnesowania należy mierzyć indukcję B i natężenie pola H w tym samym punkcie i w tej samej chwili.

W zależności od czasowej zmienności pola magnetycznego wyróżnia się właściwości statyczne (w polach stałych) i właściwości dynamiczne (w polach zmiennych).

5.2.1. Pętla histerezy $B(H)$

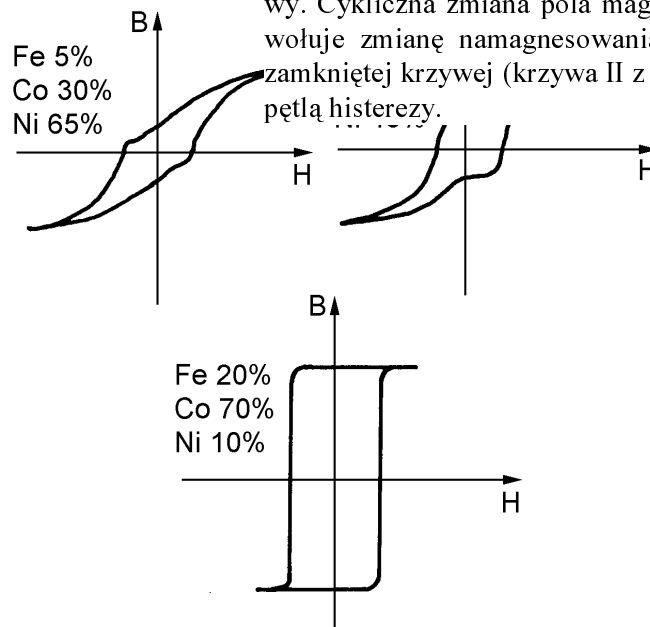
Jak już wspomniano, przenikalność (podatność) magnetyczna materiałów ferromagnetycznych nie jest stała, lecz zależy od natężenia pola magnetycznego H . W związku z tym również indukcja magnetyczna $B = \mu H$ zależy nieliniowo od wymuszenia H oraz od tego, czy natężenie H się zwiększa czy maleje, ogólnie od tego, jaki był uprzedni stan namagnesowania danego materiału, czyli tzw. przeszłość magnetyczna. Zależność tę przedstawia się w postaci krzywej magnesowania, tzw. pętli histerezy $B(H)$ (rys. 5.1). Odcinek 0–1 nazywa się pierwotną krzywą magnesowania. W punkcie 1 materiał osiąga stan nasycenia.



Rys. 5.1. Pętla histerezy indukcji magnetycznej:
 B_s – indukcja nasycenia, B_r – indukcja szczątkowa,
 H_c – pole koercji

Z wymienionych parametrów B_s , B_r i H_c dalsze zwiększenie H praktycznie nie zmienia indukcji B ($B = B_s$). Punkty 2 i 5 określają pozostałość magnetyczną B_r materiału, od rodzaju i rozkładu defektów, na więc je zmieniać. Podstawowe zadanie (magnetyzm szczątkowy), a punkty 3 i 4 natężenia zrozumienu mechanizmów determinujące powstające H_c (pole koercji), czyli mają istotne znaczenie w praktycznym

zrozumieniu mechanizmów determinujące powstające H_c (pole koercji), czyli mają istotne znaczenie w praktycznym takim, jakie trzeba wymusić w przeciwnym kierunku, aby zlikwidować magnetyzm szczątkowy. Cykliczna zmiana pola magnetycznego wywołuje zmianę namagnesowania i indukcji po zamkniętej krzywej (krzywa II z rys. 5.1), zwaną pętlą histerezy.

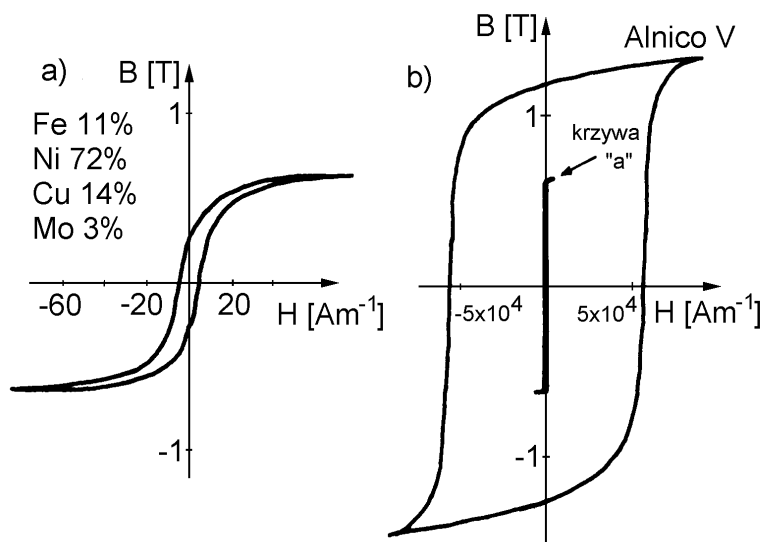


Rys. 5.2. Przykładowe pętla histerezy dla różnych składów stopu Fe-Co-Ni

Kształt pętli histerezy, jaki pokazano na rysunku 5.1, nie jest typowy dla wszystkich ferromagnetyków, w niektórych przypadkach kształt pętli histerezy różni się znacznie od podanego (rys. 5.2). Z praktycznego punktu widzenia jest to bardzo korzystna okoliczność – pozwala na dobór ferromagnetyka o optymalnej dla danego zastosowania zależności $B(H)$.

5.2.2. Materiały magnetyczne miękkie i twarde

Szczególnie duże różnice między krzywymi magnesowania występują w wielkościach natężenia powściągającego H_c . Ilustrują to pętle histerezy z rysunku 5.3 (zwracamy uwagę na różne skale dla H na rysunkach (a) i (b)).



Rys. 5.3. Pętla histerezy $B(H)$ dla materiału:
a) magnetycznie miękkiego, b) magnetycznie twardego

Krzywa na rysunku 5.3a ma bardzo małe natężenie powściągające H_c , rzędu paru $A \cdot m^{-1}$; krzywa na rysunku 5.3b ma bardzo duże natężenie powściągające H_c , około $50\,000\, A \cdot m^{-1}$, a więc ok. 10^4 razy większe niż dla stopu z rysunku 5.3a. Dla lepszego uwidocznienia różnicy narysowano na rysunku 5.3b krzywą a w skali rysunku b – w tej skali szerokość pętli histerezy a jest znacznie mniejsza niż grubość kreski rysunku!

Przemagnesowywanie materiału typu a o wąskiej pętli histerezy (tzn. o małym H_c) jest bardzo łatwe. Materiały takie, nazywane z tego powodu **magnetycznie miękkimi**, dobrze nadają się do pracy z **przemiennymi polami magnetycznymi**, gdyż łatwo przemagnesowują się przy zmianach kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. Do podstawowych materiałów tej grupy należą: żelazo, stale krzemowe, stopy żelaza z niklem, niektóre ferryty.

Do przemagnesowania materiału o szerokiej pętli histerezy (rys. 5.3b) potrzebne są bardzo silne zewnętrzne pola magnetyczne. Są one stosowane najczęściej do wytwarzania magnesów trwałych, gdyż z dużą stabilnością i niewrażliwością na zewnętrzne wpływy zachowują duże namagnesowanie. Z tego powodu materiały takie nazywamy **magnetycznie twardymi**. Mają one dużą wartość indukcji szczątkowej oraz duże natężenie powściągające. Do tej grupy materiałów należą stale: węglowa, wolframowa, chromowa, kobaltowa i inne oraz stopy (Fe–Ni–Al) i związki tlenkowe (np. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CoO}$). W ostatnich latach w tej grupie materiałów odkryto nowe bardzo obiecujące materiały do wytwarzania magnesów trwałych. Są to związki międzymetaliczne typu $M\text{Co}_5$ (M – lantanowiec, najczęściej Sm, Pr, La, Nd). Związki te swoimi parametrami znacznie przewyższają stosowane dotychczas materiały do wytwarzania magnesów trwałych, na przykład dla SmCo_5 natężenie powściągające $H_c = 800 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$, a $B_s = 1 \text{ T}$. Omawianych związków używa się do wyrobu miniaturowych magnesów trwałych, koniecznych do radykalnego zminiaturyzowania sprzętu radiotechnicznego, elektrotechnicznego itp.

5.2.3. Przenikalność magnetyczna

Nieliniowość krzywej magnesowania sprawia, że związek między indukcją magnetyczną a natężeniem pola magnetycznego można scharakteryzować kilkoma wielkościami odpowiadającymi przenikalności magnetycznej μ .

1. **Przenikalność normalna**, zwana czasem szczytową, jest równa stosunkowi indukcji do odpowiadającego jej natężenia pola magnetycznego, podzielonego przez μ_0

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B}{H}. \quad (5.6)$$

Przenikalność normalną określa się zwykle tylko na krzywej pierwotnego magnesowania.

2. **Przenikalność różniczkowa** jest równa pochodnej indukcji względem natężenia podzielonej przez μ_0

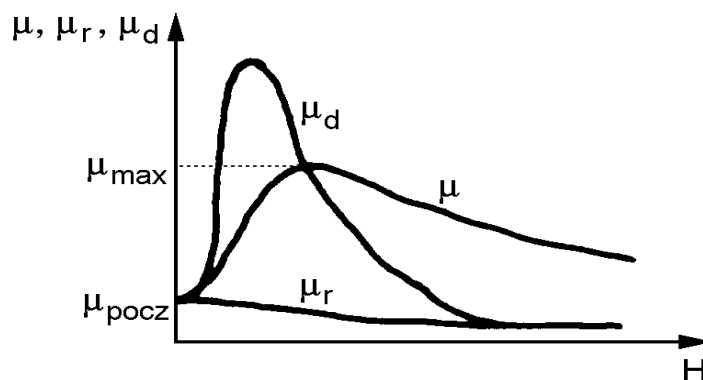
$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}. \quad (5.7)$$

Przenikalność różniczkową można interpretować wykreślnie jako nachylenie stycznej do krzywej magnesowania. Przenikalność różniczkową określa się na krzywej pierwotnego magnesowania i na obu gałęziach pętli histerezy.

3. **Przenikalność rewersyjna** jest wielkością analogiczną do przenikalności różniczkowej, lecz liczoną dla przyrostów indukcji i natężenia przeciwnych niż kierunek krzywej pierwotnego magnesowania i pętli histerezy. Definiuje się ją następująco

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H}. \quad (5.8)$$

Przenikalność normalna, przenikalność różniczkowa i przenikalność rewersyjna zależą od współrzędnych (B, H) punktu krzywej magnesowania, dla którego są one liczone. Na rysunku 5.4 pokazano krzywe przenikalności magnetycznej odpowiadające krzywej magnesowania pierwotnego.



Rys. 5.4. Przenikalność szczytowa, różniczkowa i rewersyjna na krzywej magnesowania pierwotnego

Dla $H = 0$ przenikalność szczytowa jest równa przenikalności różniczkowej, a wartość przez nie przyjmowana, określona równaniem

$$\mu_{\text{pocz}} = \frac{1}{\mu_0} \left. \frac{dB}{dH} \right|_{H=0}, \quad (5.9)$$

nazywa się przenikalnością początkową.

4. **Przenikalność dynamiczna.** W przypadku zmiennych pól magnetycznych nie można używać definicji przenikalności szczytowej, ponieważ wartość tak określonej przenikalności w ciągu jednego okresu zmieniałaby się od $+\infty$ do $-\infty$. Stosuje się zatem pojęcie przenikalności średniej, zwanej dynamiczną, pozorną lub amplitudową, którą stanowi stosunek maksymalnej wartości indukcji B_m do maksymalnej wartości natężenia pola magnetycznego H_m , podzielony przez μ_0

$$\sim \mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_m}{H_m}. \quad (5.10)$$

5.2.4. Dynamiczna pętla histerezy

Ponieważ zmienne pole magnetyczne w ferromagnetyku, nawet w przypadku magnesowania go zewnętrznym polem jednorodnym, jest niejednorodne, nie można wyznaczyć jednorodnej rzeczywistej dynamicznej krzywej magnesowania, rozumianej jako zależność między wartościami indukcji i natężenia w tej samej chwili i w tym

samym punkcie. Krzywa taka w zakresie pól wolnozmiennych byłaby zresztą identyczna z rzeczywistą statyczną krzywą magnesowania.

Znacznie bardziej interesująca i możliwa do wyznaczenia jest **dynamiczna krzywa magnesowania**, będąca zależnością między średnią wartością indukcji w przekroju blachy $\bar{B}(t)$ a wartością natężenia pola na powierzchni blachy $H_b(t)$, gdzie

$$\bar{B}(t) = \frac{1}{S} \int_S B(t) dS = \frac{\Phi_b}{S}, \quad (5.11)$$

przy czym Φ_b – strumień magnetyczny przez przekrój blachy S .

Warunkiem jednoznaczności tak określonej krzywej jest jednorodność pola $H_b(t)$ na całym obwodzie przekroju S . Dla paska nieskończenie długiego natężenie pola na powierzchni $H_b(t)$ jest równe natężeniu pola magnesującego $H(t)$.

Dynamiczna krzywa magnesowania ma kształt pętli histerezy, dlatego będzie dalej nazywana **dynamiczną pętlą histerezy**. Należy jednak pamiętać, że – w odróżnieniu od statycznej pętli histerezy – pętla dynamiczna jest krzywą średnią (wartość średnia indukcji w przekroju blachy).

Podczas jednego przemagnesowania jednostki objętości ferromagnetyka jest przetwarzana na ciepło energia W , składająca się z energii W_0 , potrzebnej na statyczne przemagnesowanie ferromagnetyka (straty na histerezę), i z ciepła Joule'a, wydzielonego przez prądy wirowe (straty na prądy wirowe).

Można wykazać, że zachodzi związek

$$W = S \int_l \left[\oint H_b dB_b \right] dl = \int_V w dV, \quad (5.12)$$

z którego wynika, że pole objęte przez dynamiczną pętlę histerezy (w) jest równe całkowitej energii przetwarzanej na ciepło w jednostce objętości blachy podczas pełnego przemagnesowania, czyli

$$w = \oint H_b d\bar{B}_b = \int_{B(0)}^{B(T)} H_b(t) d\bar{B}_b(t). \quad (5.13)$$

Kształt dynamicznej pętli histerezy zależy od częstotliwości pola magnetycznego, od zawartości harmonicznych w przebiegach indukcji i natężenia oraz od grubości blachy. Wraz ze wzrostem tych wielkości zwiększa się powierzchnia pętli (pętla poszerza się) i zmniejsza się maksymalna wartość indukcji przy utrzymywaniu takiej samej wartości natężenia H_{bm} . Pierwsze jest spowodowane zwiększeniem strat na prądy wirowe wraz ze wzrostem częstotliwości i grubości, drugie – zmniejszaniem się indukcji średniej w przekroju ze wzrostem częstotliwości i grubości blachy. Dla małych częstotliwości dynamiczna pętla histerezy jest podobna do pętli statycznej, przy dużych – do elipsy.

Dynamiczna krzywa magnesowania jest krzywą mniej uniwersalną niż pętla statyczna. Rodzina dynamicznych pętli histerezy charakteryzuje ferromagnetyk tylko przy danej częstotliwości, danym widmie indukcji i natężenia oraz przy danej grubości blachy.

5.3. Badanie właściwości dynamicznych materiałów ferromagnetycznych

Właściwości statyczne ferromagnetyków są istotne w badaniach materiałów magnetycznie twardych, stosowanych w postaci magnesów trwałych jako źródła stałego pola magnetycznego w różnych obwodach. Przedmiotem naszego zainteresowania będą charakterystyki dynamiczne ferromagnetyków. Główną domeną zastosowań ferromagnetyków w polach zmiennych są dławiki, maszyny elektryczne i transformatory. Stosuje się tam ferromagnetyki miękkie, w celu zwiększania strumienia magnetycznego i w efekcie napięcia indukowanego przez pole magnetyczne. Typowym zagadnieniem, z którym styka się konstruktor, jest analiza i synteza obwodów elektrycznych z rdzeniami ferromagnetycznymi pakietowanymi z blach. Do rozwiązania takiego zagadnienia konieczna jest znajomość zależności strumienia od natężenia pola magnesującego (wytworzonego przez prądy elektryczne). Ponieważ strumień w rdzeniu jest sumą strumieni w blachach, a pole magnetyczne niezniekształcone przez prądy wirowe można obserwować tylko na powierzchni blach, interesującą konstruktora charakterystyką jest dynamiczna krzywa magnesowania, określona w p. 5.3.4 jako zależność średniej indukcji w blasze od natężenia pola na powierzchni blachy.

Wyznaczenie dynamicznej pętli histerezy wymaga równoczesnych pomiarów wartości chwilowych indukcji i natężenia pola w próbce. Indukcję w próbce można mierzyć przetwornikiem indukcyjnym nawiniętym na próbce albo dowolnym innym przetwornikiem pola zmiennego, umieszczonym w szczelinie wyciętej w próbce. Napięcie wyjściowe cewki jest proporcjonalne do pochodnej indukcji, więc z jego przebiegu można wyznaczyć przebieg czasowy indukcji $B = f(t)$, całkując napięcie wyjściowe. Natężenie pola magnetycznego w próbce wyznacza się natomiast najczęściej metodą pośrednią z prądu magnesującego.

5.3.1. Przegląd metod

Metody stosowane do pomiaru charakterystyk dynamicznych można podzielić na trzy grupy, w zależności od typu wyznaczonej charakterystyki:

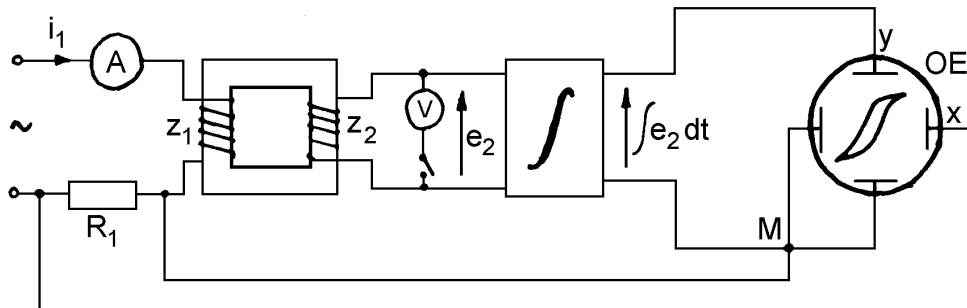
1. **Metoda techniczna** – za pomocą woltomierza, amperomierza i watomierza umożliwia wyznaczenie całkowitej stratności oraz dynamicznych charakterystyk $B_m = f(H_m)$ lub $B_m = f(H_{sk})$.

2. **Metody kompensacyjna i mostkowa** służą do wyznaczenia charakterystyk podstawowych harmonicznych $B_{1m} = f(H_{1m})$ przez pomiar kompensatorem amplitu-

dy podstawowych harmonicznych napięcia w cewce pomiarowej i prądu magnesującego.

3. **Metody ferrometryczna i oscylograficzna** prowadzą do wyznaczenia dynamicznych pętli histerezy, pierwsza pośrednio przez pomiar wartości chwilowych indukcji i natężenia pola, druga bezpośrednio przez kreślenie pętli histerezy na ekranie oscylografu.

W metodzie oscylograficznej pętlę histerezy badanej próbki otrzymuje się na ekranie oscylografu, doprowadzając do jego płytek poziomych sygnał napięciowy proporcjonalny do natężenia pola, a do płytek pionowych – sygnał proporcjonalny do indukcji. Schemat ideowy układu pomiarowego metodą oscylograficzną pokazano na rysunku 5.5.



Rys. 5.5. Schemat ideowy układu do wyznaczenia pętli histerezy metodą oscylograficzną

Badana próbka pierścieniowa ma dwa uzwojenia: pierwotne (z_1) – magnesujące i wtórne (z_2) – przetwarzające indukcję na sygnał napięcia.

Napięcie proporcjonalne do natężenia pola magnetycznego w próbce otrzymuje się z opornika R_1 , połączonego szeregowo z uzwojeniem magnesującym. Wynika to z prostych relacji, a mianowicie z prawa Ohma

$$u_R(t) = R_1 i_1(t) \quad (5.14)$$

oraz z prawa przepływu (Ampere'a)

$$H(t)l = i_1(t)z_1, \quad (5.15)$$

w których:

l – średnia długość linii pola w próbce,

$i_1(t)$ – prąd magnesujący,

z_1 – liczba zwojów cewki magnesującej.

Po wyznaczeniu $i_1(t)$ ze wzoru (5.15) i podstawieniu do (5.14) otrzymujemy zależność

$$u_{R_1}(t) = R_1 \frac{l}{z_1} H(t) = c_1 H(t), \quad (5.16)$$

w której c_1 jest współczynnikiem proporcjonalności.

Strumień magnetyczny Φ definiuje się jako iloczyn indukcji magnetycznej B i przekroju czynnego próbki S , przez który ten strumień przenika

$$\Phi = BS. \quad (5.17)$$

Zgodnie z prawem Faradaya indukcji magnetycznej, siła elektromotoryczna, indukująca się w uzwojeniu wtórnym o liczbie zwojów z_2 , jest równa wziętej ze znakiem ujemnym szybkości zmian strumienia magnetycznego Φ_m , skojarzonego z powierzchnią S

$$e_2(t) = -z_2 \frac{d\Phi_m(t)}{dt}. \quad (5.18)$$

Ponieważ $S = \text{const}$, więc

$$e_2(t) = -z_2 S \frac{dB(t)}{dt}. \quad (5.19)$$

Aby otrzymać sygnał proporcjonalny do chwilowych wartości indukcji magnetycznej, przebieg siły elektromotorycznej z uzwojenia wtórnego podaje się na układ całkujący. Napięcie na wyjściu tego układu wynosi

$$u_2(t) = k \int e_2(t) dt = -z_2 S k \int dB(t) = c_2 B(t), \quad (5.20)$$

gdzie k , c_2 są współczynnikami proporcjonalności.

Metodą oscylograficzną bada się zwykle próbki pierścieniowe, chociaż budowane są również układy do badania próbek otwartych. Metodę oscylograficzną można stosować do badania materiałów magnetycznych w polach zmiennych o częstotliwości do 5 MHz. Uchyb pomiaru jest rzędu kilku procent.

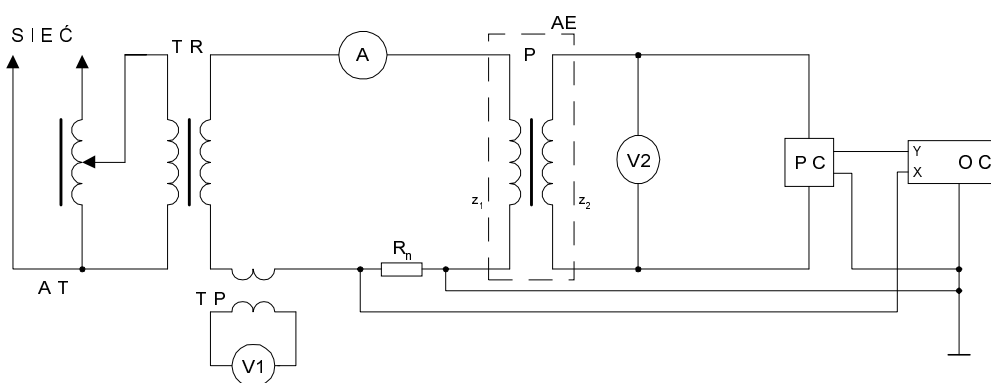
5.4. Układ pomiarowy

Zestaw przyrządów umożliwia badanie próbek w postaci pasków blach o szerokości $30 \pm 0,2$ mm i długości od 280 do 500 mm, umieszczonych w ramie Epsteina 25 cm. Uzwojenie magnesujące jest zasilane regulowanym napięciem sieciowym o częstotliwości $f = 50$ Hz.

Schemat układu pomiarowego do badania dynamicznych krzywych magnesowania przedstawiono na rysunku 5.6. Rezystory wzorcowe R_n powinny być klasy nie gorszej niż 1%. Przetwornik całkujący charakteryzuje się małym błędem operacyjnym; przy częstotliwości sieciowej błąd ten wynosi 0,1%. Można więc pominąć zniekształcenie fazowe w torze przetwarzania indukcji magnetycznej.

Podstawowym elementem układu pomiarowego jest aparat Epsteina 25 cm, składający się z czterech jednakowych cewek, do których wkłada się badane próbki, formując z nich zamknięty obwód magnetyczny w kształcie czworoboku.

Istotną sprawą jest sposób zamocowania próbek w aparacie Epsteina. Paski blach powinny być wkładane w taki sposób, aby utworzyły kwadrat o boku wewnętrznym 220 mm i zewnętrznym 280 mm. Narożniki o powierzchni $30 \times 30 \text{ mm}^2$ powinny być ułożone na podwójną zakładkę. Układanie próbki należy rozpocząć od włożenia po jednym pasku do każdej z dwóch przeciwległych cewek, a następnie do dwóch pozostałych tak, aby te ostatnie pokryły poprzednie dwie w czterech narożnikach aparatu. Tak samo należy układać kolejne warstwy. Liczba pasków w każdej cewce powinna być jednakowa, a próbka złożona z co najmniej 12 pasków o masie równej lub większej niż $400 \pm 0,1 \text{ g}$.



Rys. 5.6. Układ pomiarowy do badania właściwości magnetycznych próbek blach elektrotechnicznych:
 AT – autotransformator do regulacji napięcia, TR – transformator separujący i obniżający napięcie,
 TP – transformator powietrzny, R_n – rezystor wzorcowy, A – amperomierz, P – badana próbka,
 PC – przetwornik całkujący, OS – oscyloskop, V1, V2 – woltomierze cyfrowe z przetwornikami wartości
 średniej napięcia, z_1 – uzwojenie magnesujące, z_2 – uzwojenie pomiarowe, AE – aparat Epsteina

5.5. Wykonanie pomiarów

5.5.1. Obliczenia wstępne

Przed wykonaniem właściwych pomiarów należy określić następujące parametry:

- gęstość materiału ρ , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
- całkowitą masę pasków wchodzących w skład próbki pomiarowej m , kg,
- efektywną powierzchnię przekroju czynnego próbki S , m^2

$$S = \frac{m}{4l\rho}, \quad (5.21)$$

gdzie:

m – całkowita masa pasków wchodzących w skład próbki, kg,

l – długość paska, m,

ρ – gęstość materiału próbki, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

➤ wartości napięcia na woltomierzu V_2 , odpowiadającej indukcji magnetycznej $B_m = 1$ T.

Wartości maksymalne natężenia pola magnetycznego na powierzchni próbki oraz indukcji magnetycznej (średnia w przekroju poprzecznym próbki) są określone wzorami:

$$H_m = \frac{U_1 z_1}{4,44 f M l_{sr}}, \quad (5.22)$$

$$B_m = \frac{U_2}{4,44 f z_2 S}, \quad (5.23)$$

w których:

- $z_1 = z_2 = 700$ – liczba zwojów uzwojenia magnesującego i pomiarowego aparatu Epsteina 25 cm,
- f – częstotliwość źródła zasilania, Hz,
- l_{sr} – długość średniej drogi magnetycznej, m (dla aparatu Epsteina 25 cm $l_{sr} = 0,94$ m),
- M – wartość współczynnika indukcyjności wzajemnej transformatora powietrznego H (w zestawionym układzie pomiarowym $M = 175$ mH),
- S – powierzchnia przekroju poprzecznego próbki, m² (liczona według wzoru (5.21)),
- U_1, U_2 – wskazania woltomierzy cyfrowych z przetwornikami wartości średniej, V.

W celu wyznaczenia napięcia U_2 przy $B_m = 1$ T należy skorzystać ze wzoru (5.23), wstawiając za B_m wartość 1 T.

5.5.2. Pomiar charakterystyki $B_m = f(H_m)$

Przez zwiększanie autotransformatorem wartości prądu magnesującego należy doprowadzić do stanu nasycenia próbki. Wyznaczyć wartości B_s , B_r i H_c przez pomiar odpowiednich napięć, wyskalowanie osi X , Y oscyloskopu i odczyt wartości B_r dla $x = 0$ oraz H_c dla $y = 0$. Odrysować otrzymaną pętlę histerezy na siatce milimetrowej (nie zapomnieć o naniesieniu skali na osiach X , Y).

Zmniejszając stopniowo wartość prądu magnesującego, aż do zera, należy uzyskać co najmniej 10 par punktów pomiarowych (B_m , H_m) w celu wykonania wykresu $B_m = f(H_m)$.

5.5.3. Wyznaczenie zależności przenikalności dynamicznej od natężenia pola magnetycznego $\sim \mu = f(H_m)$

Na podstawie pomiarów wykonanych w punkcie 5.2.3 obliczyć wartości przenikalności dynamicznej według wzoru (5.10). Obliczeń dokonać dla wszystkich par punktów pomiarowych i wykonać wykres $\sim\mu = f(H_m)$.

5.5.4. Wyznaczenie strat na histerezę dla $B_m = 1 \text{ T}$ za pomocą planimetrowania krzywej

Ustawić na woltomierzu V_2 obliczoną wcześniej wartość napięcia, odpowiadającą indukcji równej 1 T.

Przerysować z ekranu oscyloskopu uzyskaną pętlę histerezy na siatkę milimetrową, wyskalować osie X, Y oscyloskopu i odczytać wartości napięć U_1 i U_2 , odpowiadające wartościom B_m i H_m .

Na podstawie wzoru

$$p = \frac{\alpha \beta \sigma}{\rho} f, \quad (5.24)$$

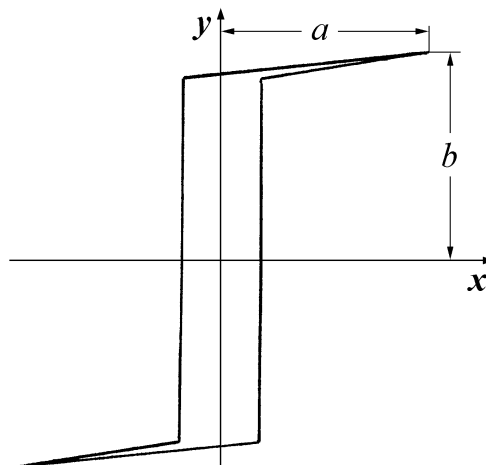
w którym:

f – częstotliwość napięcia zasilającego,

ρ – gęstość materiału próbki,

σ – powierzchnia pętli histerezy, mm^2 ,

wyznaczyć straty magnetyczne na histerezę p , $\text{W} \cdot \text{kg}^{-1}$, zdefiniowane jako strata mocy pola elektromagnetycznego w jednostce masy próbki.



Rys. 5.7. Położenie wierzchołka pętli histerezy

We wzorze (5.25) wielkości α i β wyznacza się ze wzorów

$$\alpha = \frac{H_m}{a}, \quad (5.25)$$

$$\beta = \frac{B_m}{b}, \quad (5.26)$$

w których liczby a i b (rys. 5.7) wyznaczają w milimetrach położenie wierzchołka pętli histerezy.

5.6. Program ćwiczenia

1. Wyznaczyć dynamiczną pętlę histerezy badanych próbek.
2. Wyznaczyć przebieg charakterystyki magnesowania $B_m = f(H_m)$.
3. Wyznaczyć przebieg przenikalności dynamicznej w funkcji natężenia pola magnetycznego $\sim \mu = f(H_m)$.
4. Wyznaczyć stratność magnetyczną poprzez planimetrowanie odrysowanej z ekranu oscyloskopu pętli histerezy przy $B_m = 1$ T.

Uwagi do wykonania pomiarów

Przed włączeniem napięcia zasilającego próbkę należy uruchomić przetwornik całkujący. Rezystory R_n dobiera się w zależności od wartości prądu magnesującego próbkę. Dopuszczalne wartości prądu dla poszczególnych rezystorów są podane na ich obudowie. Przekroczenie dopuszczalnego prądu spowoduje przepalenie wkładki bezpiecznikowej.

Stany namagnesowania próbki nastawiamy, poczynając od największego prądu. Po zmianie rezystora R_n należy najpierw nastawić prąd dopuszczalny, a następnie możemy monotonicznie zmniejszać jego wartość. Unika się w ten sposób potrzeby roznamagnesowywania próbki.

Wyniki pomiarów zależą głównie od wskazań woltomierzy V_1 i V_2 . Podczas pomiaru charakterystyki magnesowania należy, dla każdego nastawionego namagnesowania próbki, odczytać wskazania woltomierzy możliwie równocześnie i zarejestrować wyniki. Jeśli występują wahania napięcia sieciowego, to dla każdego nastawionego namagnesowania należy odczytać kilkakrotnie wskazania woltomierzy i obliczyć wskazania średnie.

W celu określenia stratności próbki przy ustawionym jej namagnesowaniu trzeba odrysować na kalce milimetrowej pętlę histerezy z ekranu oscyloskopu i w tym czasie ciągle notować wskazania woltomierzy. Czułości torów oscyloskopu należy tak dobrać, aby obraz pętli histerezy ustawiony centralnie według współrzędnych zajmował całą wyskalowaną część ekranu.

Literatura

1. Kuryłowicz J., *Badanie materiałów magnetycznych*, WNT, Warszawa 1962.
2. Nałęcz M., Jaworski J., *Miernictwo magnetyczne*, WNT, Warszawa 1968.
3. Stryżowski S., *Materialoznawstwo elektryczne*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1995.
4. Celiński Z., *Materialoznawstwo elektrotechniczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
5. Praca zbiorowa (red. J. Kędzia), *Laboratorium materialoznawstwa elektrycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 1998.
6. PN-84/H-04450 *Materiały magnetycznie miękkie. Pomiar stratności magnetycznej oraz wyznaczenie dynamicznych krzywych magnesowania przy użyciu aparatu Epsteina 25 cm.*

6. BADANIE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH MATERIAŁÓW IZOLACYJNYCH

Przemysł elektrotechniczny stawia coraz większe wymagania jakościowe stosowanym materiałom i to nie tylko w zakresie dużej odporności termicznej, ale również i stabilności ich właściwości w podwyższonej temperaturze.

Materiały izolacyjne są stosowane w różnych warunkach i często oprócz swojego podstawowego zadania, czyli izolacji, służą także jako materiał konstrukcyjny. Elementy konstrukcji pracy są narażone na różnorodne obciążenia mechaniczne. Z tego powodu niezbędna jest znajomość takich właściwości, jak: wytrzymałość na rozciąganie, ściskanie, zginanie, zmęczenie, udarność, twardość, ścieralność.

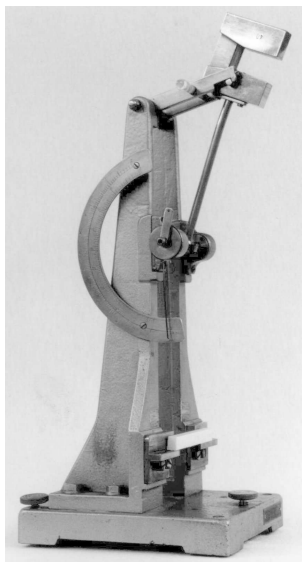
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z praktycznymi sposobami wykonywania wybranych prób, zgodnie z obowiązującymi normami, użytymi do tego celu próbkami i urządzeniami oraz interpretacją wyników.

6.1. Badanie udarności młotem Charpy'ego

Udarnością nazywamy stosunek pracy zużytej na udarowe zniszczenie próbki do jej przekroju poprzecznego. Pracę tę określa się m.in. za pomocą młota Charpy'ego (rys. 6.1). Badanie ma na celu określenie zachowania się materiału przy naprężeniach udarowych. Pozwala ono również na wnioskowanie o strukturze materiału, wadach technologicznych, istnieniu rozwarstwień, pęknięć itp.

Do próby udarności używa się próbek w kształcie prostopadłościanów o wymiarach $10\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 120\text{ mm}$. Dla materiałów o stosunkowo wysokiej udarności często używa się próbek z karbem, który powoduje zmniejszenie udarności, a także rozrzutu wyników. Próbki nie powinny wykazywać zwichrowania i powinny mieć wzajemnie prostopadłe pary równoległych do siebie powierzchni, bez rys, zapadnięć, pęcherzy itp. defektów. Jakość próbek ocenia się nieuzbrojonym okiem, za pomocą liniału traserskiego, węgelnicy, płaskich płyt lub śruby mikrometrycznej. Próbki niepełniające tych wymagań należy odrzucić i zastąpić nowymi.

Pomiar wykonuje się zgodnie z PN-81/C-89029. Przed przystąpieniem do badań należy sprawdzić ustawienie przyrządu, a następnie go wyzerować (po jałowym prze-



ściu młota wskazówka powinna przyjąć położenie zerowe), po czym podnieść ponownie młot do położenia wyjściowego, ustawić na podporach próbkę i zwolnić zaczep młota. Spadający młot natrafia na próbkę, łamie ją i przechodzi na drugą stronę podpór. Maksymalna wysokość, na jaką wzniesie się młot po zniszczeniu próbki, zostaje zarejestrowana przez wskazówkę. W ten sposób określa się zasób energii potencjalnej młota po zniszczeniu próbki w stosunku do położenia minimalnego, jakie może on przyjmować. Jest ona proporcjonalna do różnicy wysokości, jaką przyjmuje młot po przebiegu jałowym i roboczym, wycechowanej bezpośrednio w jednostkach pracy. Należy wybrać młot wahadłowy o odpowiednim zapasie energii, aby na złamanie próbki zużyć nie mniej niż 10% i nie więcej niż 80% zapasu energii młota.

Rys. 6.1. Młot Charpy'ego

Udarność obliczamy ze wzoru

$$U = \frac{A}{bh}, \quad (6.1)$$

w którym:

A – praca zużyta na złamanie próbki, odczytana ze skali przyrządu,

b, h – szerokość i wysokość próbki.

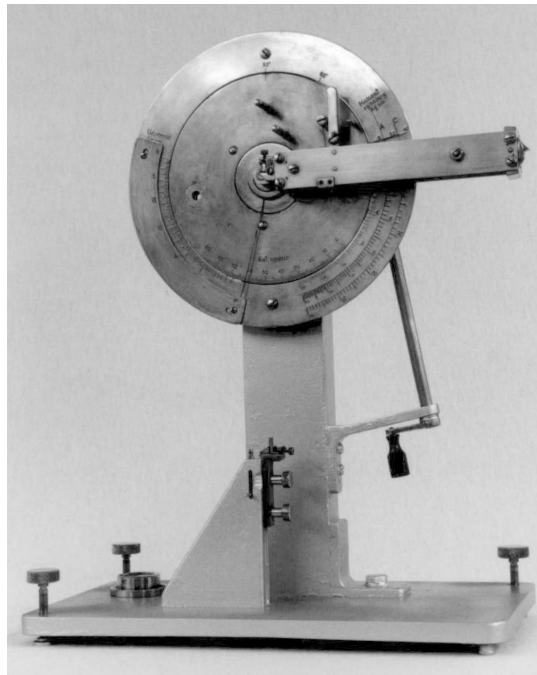
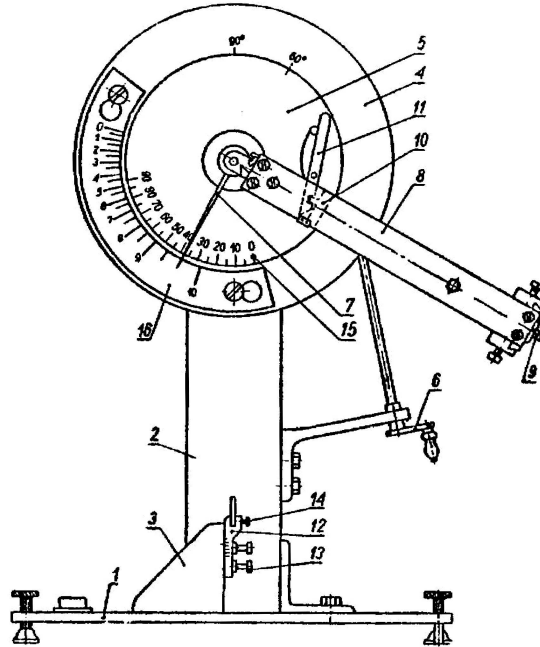
Jako wynik należy przyjąć średnią arytmetyczną wyników z co najmniej dziesięciu pomiarów oraz – jeżeli jest to wymagane – obliczyć odchylenie średnie i współczynnik wariancji, a następnie porównać z wymaganiami dla danego materiału.

6.2. Badanie udarności mikropróbek na dynstacie

Z wyrobów gotowych trudno jest wyciąć próbki o dużych wymiarach, dlatego też badanie wykonuje się na tzw. mikropróbkach o wymiarach $l = 15 \pm 1$ mm, $b = 10 \pm 0,5$ mm, $h = 1,5 \div 4$ mm na przyrządzie zwanym dynstatem. Zasada pomiaru jest taka sama jak dla młota Charpy'ego, z tą tylko różnicą, że mikropróbka jest mocowana na jednym końcu, a w drugi uderzana jest spadającym wahadłem. Wyniki otrzymane z pomiarów udarności na dynstacie i młotem Charpy'ego są nieporównywalne.

Pomiary wykonuje się według PN-68/C-89028.

Do oznaczania należy stosować aparat typu dynstat przedstawiony na rysunku 6.2.



Rys. 6.2. Dynstat

Dynstat jest umieszczony na podstawie 1, którą ustawia się poziomo za pomocą trzech śrub i poziomicy. Na podstawie 1 jest umieszczony korpus pionowy 2, zaopatrzone we wspornik 3 oraz w górnej części w tarczę nieruchomą 4 i tarczę ruchomą 5. Przez środek tarczy ruchomej jest przeprowadzona oś pozioma. Ślimak, połączony z korbą 6 za pośrednictwem ślimacznicy, znajdującej się na tylnej ścianie tarczy 5, wprawia ją w ruch obrotowy. Na oś jest nałożona ruchoma wskazówka 7. Przednia część osi jest związana z wahadłem 8, zakończonym w dolnej jego części głowicą z ostrzem 9, w górnej części zaczepem 10, który za pomocą zapadki 11 umożliwia umieszczenie wahadła na wymaganej wysokości. Na tylnej części wahadła znajduje się próg wahadła, popychający wskazówkę 7 podczas jego spadku. Na wsporniku 3 jest umocowany uchwyt 12, którego położenie można regulować za pomocą śrub 13, zaopatrzonych w śrubę 14, mocującą próbkę. Na nieruchomej tarczy, zaopatrzonej w dwie śruby mocujące, są umieszczone – najczęściej używane – cechy kątów 60° i 90° . Przy kącie 90° energia wahadła bez dodatkowych ciężarków wynosi $5 \text{ kG}\cdot\text{cm}$, a przy kącie 60° – o połowę mniej, tj. $2,5 \text{ kG}\cdot\text{cm}$. Tarcza ruchoma ma z lewej strony podziałkę 15. Aparat jest zaopatrzony w pięć dodatkowych skal oraz dwa ciężarki: A i B.

Po umieszczeniu próbki w uchwycie 12 i ustawieniu wahadła w odpowiednim położeniu zwalnia się zapadkę wahadła 11, które – spadając – łamie ostrzem głowicy 9 badaną próbkę i przesuwa wskazówkę po łuku skali. Próbka jest umocowana w uchwycie typu Izoda, odległość uderzenia, tj. odległość od krawędzi uchwytu do krawędzi dolnej uderzającego młota, można zmienić od 3 do 9 mm – zależnie od grubości próbki. Odległość tę nastawia się przez zmianę położenia uchwytu na podporze. Uchwyt ma podziałkę, z której można odczytać nastawioną odległość uderzenia.

Przed wykonaniem badań należy sprawdzić ustawienie przyrządu, a następnie go wyzerować. Po ustawieniu wahadła w pozycji wyjściowej mocujemy próbkę tak, aby odległość (końce wahadła od szczęk) uderzenia wynosiła $1,75$ grubości próbki.

Po zniszczeniu próbki odczytujemy ze skali pracę A zużytą na złamanie i obliczamy udarność

$$U = \frac{A}{bh}, \quad (6.2)$$

gdzie:

A – praca zużyta na złamanie próbki, odczytana ze skali przyrządu,

b, h – szerokość i wysokość próbki.

Jako wynik należy przyjąć średnią z pięciu pomiarów.

6.3. Badanie wytrzymałości mikropróbek na zginanie statyczne

Wytrzymałość na zginanie jest to stosunek momentu zginającego, przy którym następuje złamanie próbki, do jej wskaźnika przekroju poprzecznego. Badania wytrzy-

małości na zginanie statyczne wykonuje się na dynstacie dla próbek o wymiarach $15 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 2 \div 4 \text{ mm}$.

Pomiary wykonuje się według PN-72/C-04243.

W ruchomą tarczę 4 dynstatu wkręcamy dodatkowy uchwyt 8 próbki. Kręcąc korbką 5 ustawiamy tarczę ruchomą względem nieruchomej na 60° , po czym obciążamy zaaretowane wahadło 6. Mocujemy mikropróbkę w szczęcie 7 tarczy ruchomej oraz w szczęcie wahadła tak, aby próbka stanowiła jego przegub. Zwalniamy wahadło. Kręcąc korbką 5 zwiększamy moment gnący aż do krytycznego, którego wartość zaznaczy przesuwana przez wahadło wskazówka 9. Na tarczy nieruchomej są umieszczone trzy skale 11, na których odczytuje się wielkość momentu zginającego dla różnych obciążeń wahadła.

Wytrzymałość na zginanie statyczne liczymy ze wzoru

$$\sigma_{zg} = \frac{6M}{bh^2}, \quad (6.3)$$

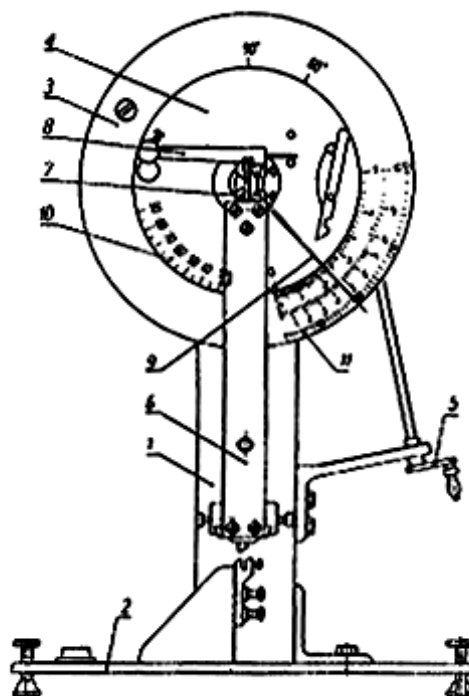
w którym:

M – moment zginający,

$bh^2/6$ – wskaźnik przekroju poprzecznego dla próbki o przekroju prostokątnym,

h – grubość próbki,

b – szerokość próbki.



Rys. 6.3. Dynstat – oznaczenie wytrzymałości tworzyw sztucznych na zginanie

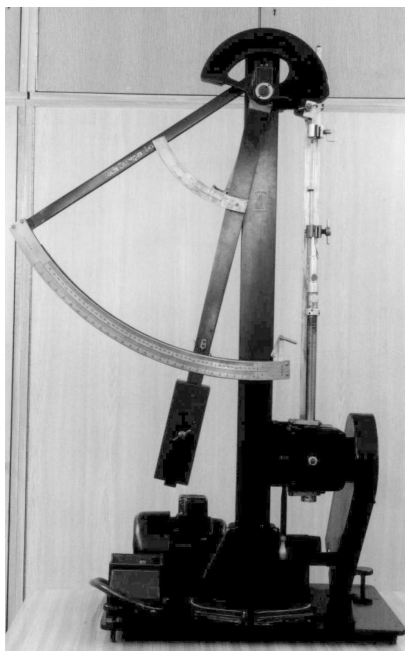
6.4. Badanie wytrzymałości i wydłużalności papieru na rozciąganie w różnych kierunkach

Właściwości mechaniczne papierów silnie zależą od ich zawilgocenia, dlatego próbki przygotowuje się wcześniej i klimatyzuje przy wilgotności względnej $65 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ przez przynajmniej 6 h. Z powodu włóknistej struktury właściwości mechaniczne pa-

pierów zależą także od kierunku ułożenia włókien w stosunku do kierunku działania siły. Próbkę wycina się więc z uwzględnieniem kierunku ułożenia włókien (zgodnie z normą PN-65/P-50128). Wytrzymałość na zerwanie jest to stosunek siły zrywającej do przekroju poprzecznego badanego paska. Wydłużalność względna papieru na rozciąganie (rociągliwość) jest to stosunek przyrostu długości paska w chwili zerwania do długości początkowej wyrażonej w procentach.

Badanie wytrzymałości i rozciągliwości wykonuje się na paskach papieru o szerokości 15 mm i długości czynnej 180 mm.

Pomiary obciążenia zrywającego i wydłużenia dla papierów wykonuje się na zrywarcie, zgodnie z normą PN-93/P-50133, z zakresem sił dobranych odpowiednio do obciążenia zrywającego.



Przed przystąpieniem do pomiarów należy zapoznać się z instrukcją obsługi zrywarki oraz sprawdzić jej ustawienie, rozstaw szczęk itp. Następnie zmierzyć grubość i szerokość pasków papieru zgodnie z normą PN-85/P-50130.

Badany pasek papieru należy tak umocować w szczękach aparatu, aby jego długość między uchwytami wynosiła 180 mm, a pasek był naprężony równomiernie.

Wyniki otrzymane dla pasków zrywających się przy samych uchwytach lub miejscach z widocznymi błędami należy odrzucić, a badania powtórzyć na nowych paskach tak, aby liczba pomiarów wynosiła po 10 dla kierunku poprzecznego i podłużnego.

Rys. 6.4. Zrywarka

Wytrzymałość na zerwanie oblicza się dla każdego kierunku oddzielnie ze wzoru

$$R = \frac{P}{Db}, \quad (6.4)$$

w którym:

P – siła potrzebna do zerwania próbki,

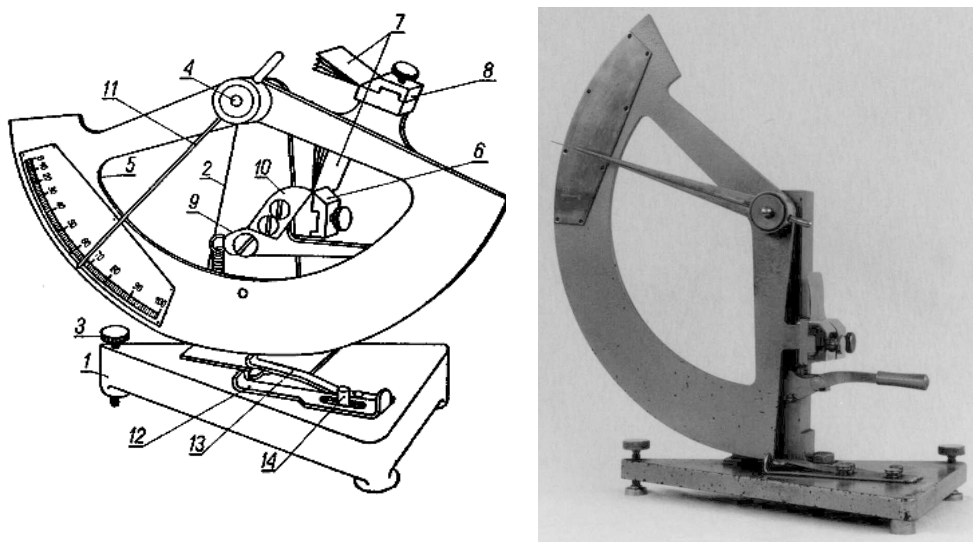
D – grubość paska papieru,

b – szerokość paska papieru.

Jako wyniki należy przyjąć średnią arytmetyczną dla kierunku poprzecznego oraz średnią arytmetyczną dla kierunku podłużnego. Przygotować nowe próbki (po 15 szt. dla każdego kierunku) i umieścić je w eksykatorze (długość ok. 240 mm).

6.5. Pomiar oporu przedarcia papieru

Ze względów użytkowych ważną właściwością mechaniczną papieru jest jego opór przedarcia. Jest to opór, jaki stawia wyrób papierniczy podczas darcia nadciętej próbki. Pomiaru dokonuje się w kierunku poprzecznym i podłużnym na klimatyzowanych próbkach o wymiarach 65 mm × 55 mm. Często przelicza się opór przedarcia na opór, jaki miałby papier, gdyby jego gramatura wynosiła 100 g/m². Jest to wtedy tzw. względny opór przedarcia. Pomiar, według PN-93/P-50131, wykonuje się w aparacie Elmendorfa.



Rys. 6.5. Aparat Elmendorfa

Do oznaczenia oporu przedarcia stosuje się aparat Elmendorfa (rys. 6.5). Na metalowej podstawie 1 jest umieszczony stojak 2. Podstawa jest zaopatrzona w śrubę 3, za pomocą której aparat ustawia się w poziomie. W górnej części stojaka znajduje się czop 4, na którym obraca się wahadło 5 w kształcie wycinka koła. Stojak ma stały uchwyt szczękowy 6 do zamocowania próbki papieru 7. Drugi uchwyt 8 znajduje się w ruchomym wahadle. Między stojakiem a wahadłem znajduje się ruchoma dźwignia 9, do której jest przymocowany nóż 10, służący do nacinania badanych próbek. Na czopie 4 wahadła jest osadzona wskazówka 11, którą wahadło przy ruchu w lewo – wskutek tarcia – zabiera z sobą. Na podstawie 1 znajduje się przesuwana listwa 12, spełniająca rolę ogranicznika dla wskazówki 11, oraz sprężyna 13, służąca do unieruchomienia wahadła

w pozycji wyjściowej. Położenie przesuwnej listwy 12 reguluje się za pomocą śruby 14. Wahadło jest zaopatrzone w podziałkę wyskalowaną w gramach siły (G).

Dla bibulek, papierów, kartonów i tektur należy wykonać po 5 pomiarów dla kierunku podłużnego i poprzecznego.

Wahadło aparatu wychylić aż do oparcia o sprężynę, wskazówkę zaś przenieść w prawo do przesuwnej listwy. Następnie w uchwycie aparatu wpiąć krótszym bokiem (50 mm) badaną próbkę. Potem należy nadciąć arkusiki. Następnie nacisnąć sprężynę, uruchomić wahadło, dopuścić do kilku jego wahań i, zwalniając sprężynę, zatrzymać wahadło. Odczytać na skali uzyskaną wartość liczbową z dokładnością do 0,5 jednostki. Dla każdego badanego kierunku obliczyć średnią wartość odczytów na skali, a następnie odporność na przedarcie i wskaźnik przedarcia według wzorów:

$$F = \frac{\overline{F}p}{n},$$

$$X = \frac{F}{g},$$
(6.5)

w których:

F – odporność na przedarcie, mN,

\overline{F} – wartość średnia odczytu na skali, mN,

p – liczba arkusików przedartych równocześnie, dla których wykalibrowanie skali wahadła umożliwia bezpośredni odczyt odporności na przedarcie, mN, $p = 16$,

n – liczba arkusików przedzieranych równocześnie,

X – wskaźnik przedarcia, mN·m²/g,

g – gramatura, g/m².

Skala umieszczona na obwodzie wahadła jest odpowiednio wykalibrowana do zakresu przyrządu.

6.6. Program ćwiczenia

1. Wyznaczyć udarność próbek młotem Charpy'ego.
2. Wyznaczyć udarność mikropróbek na dynstacie.
3. Wyznaczyć wytrzymałość i wydłużalność papieru na rozciąganie.
4. Obliczyć samozerwalność badanego papieru.
5. Wyznaczyć odporność na przedarcie papieru i wskaźnik przedarcia.

Literatura

1. Siciński Z., *Badanie materiałów elektroizolacyjnych*, WNT, Warszawa 1968.

2. Polskie Normy:

- PN-EN ISO 179-2:2001 *Tworzywa sztuczne – Oznaczenie udarności metodą Charpy'ego – Instrumentalne badanie udarności.*
- PN-68/C-89028 *Tworzywa sztuczne – Oznaczenie udarności za pomocą aparatu – typ Dynstat.*
- PN-72/C-04243 *Tworzywa sztuczne – Oznaczenie wytrzymałości na zginanie za pomocą aparatu – typ Dynstat.*
- PN-65/P-50128 *Produkty przemysłu papirniczego – Metody badań fizycznych – Oznaczanie kierunków oraz strony sitowej wytworów papirniczych.*
- PN-93/P-50131 *Papier – Oznaczanie odporności na przedarcie (metoda Elmendorfa).*
- PN-ISO 534 *Oznaczanie grubości i gęstości pozornej arkusza z pliku lub gęstości pozornej pojedynczego arkusza.*

7. BADANIE WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNYCH MATERIAŁÓW IZOLACYJNYCH

Jedną z istotnych cech materiałów izolacyjnych jest zdolność wytrzymywania podwyższonej temperatury bez szkody dla ich właściwości elektrycznych, mechanicznych i innych. Od tej cechy materiału zależy najwyższa dopuszczalna temperatura pracy izolacji. Podwyższenie dopuszczalnej temperatury pracy umożliwia zmniejszenie wymiarów i masy maszyny lub urządzenia elektrycznego, z zachowaniem niezmięionej ich mocy. Określenie dopuszczalnej temperatury pracy materiału izolacyjnego wymaga długotrwałych badań zmian właściwości elektrycznych, mechanicznych, chemicznych poddanych działaniu temperatury i innych narażeń, jakie mogą wystąpić w eksploatacji. Stosowane w praktyce materiały podzielono na klasy odporności cieplnej, którym odpowiadają wyznaczone dopuszczalne temperatury pracy. Na przykład klasie A odpowiada temperatura pracy 105 °C.

Odporność cieplną materiałów izolacyjnych wyznacza się, zależnie od ich rodzaju, różnymi metodami. Za wskaźnik przyjmuje się przekroczenie wymaganego normą krytycznego poziomu sprawdzanych właściwości, np. elektrycznych (zmniejszenie rezystywności, wzrost współczynnika strat dielektrycznych) lub mechanicznych (zmniejszenie wytrzymałości na zerwanie, zginanie, wystąpienie określonych odkształceń próbki). Odporność tę podaje się na ogół jako temperaturę w stopniach Celsjusza, w której ustalony wskaźnik zmieni się ponad dopuszczalne granice. Dla cieczy izolacyjnych odpornością cieplną będzie temperatura, w której ciecz zapala się przy zbliżeniu płomienia. Należy sobie zdawać sprawę, że na podstawie wyznaczonej odporności cieplnej nie można wnioskować o dopuszczalnej temperaturze pracy materiału, ponieważ czas pomiaru odporności jest krótki, kształt i wymiary próbek oraz rodzaj i wielkość narażeń ustalone dla danej metody pomiaru są wybrane dowolnie. Odporność cieplną materiałów należy więc traktować jako wielkość pozwalającą porównać materiały między sobą pod względem zdolności wytrzymywania podwyższonej temperatury.

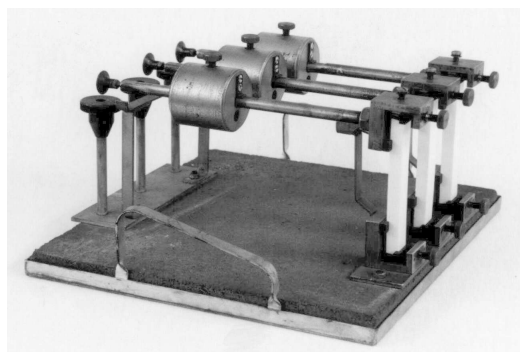
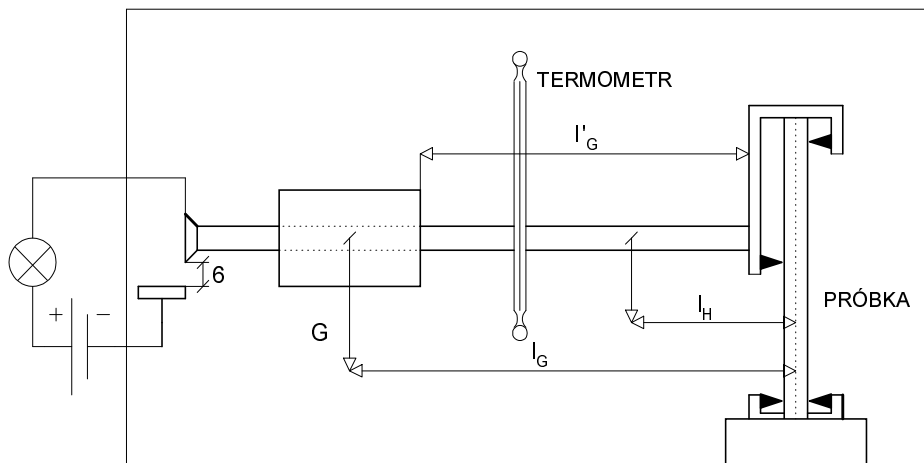
7.1. Badanie wytrzymałości cieplnej według Martensa

Odporność materiału na odkształcenie pod wpływem ciepła i siły można określić różnymi metodami. Wszystkie polegają na pomiarze odkształcenia próbki przy jedno-

czesnym działaniu mechanicznym i termicznym. Najczęściej stosuje się metodę Martensa, ze względu na stałą wartość naprężenia między punktami zamocowania próbki (PN-90/C-89025). Na znormalizowaną beleczkę, zamocowaną dwustronnie w położeniu pionowym, działa stałe naprężenie zginające, przy jednoczesnym ściśle określonym wzroście temperatury. Schemat urządzenia ze sposobem zamocowania próbki pokazano na rysunku 7.1. Badania wykonuje się jednocześnie na trzech próbkach. Naprężenie zginające, działające na środkową część próbki (między uchwytami) powinno wynosić $5 \pm 0,1$ MPa. Próbki umieszcza się w termostacie z automatyczną regulacją zapewniającą stały przyrost temperatury 50 ± 5 °C na godzinę, począwszy od temperatury 23 ± 2 °C.

Wymiary próbki: 120 ± 2 mm \times $15 \pm 0,5$ mm \times $10 \pm 0,5$ mm.

Jako wynik pomiaru przyjmuje się temperaturę, przy której wolne ramie dźwigni obniży się o $6 \pm 0,1$ mm. Naprężenie zginające wewnątrz próbki wywołuje dźwignia pozioma z przesuwanym ciężarkiem G (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Schemat urządzenia do zamocowania i obciążania próbki

Moment zginający

$$M_g = H l_H + G l_G = R_g W, \quad (7.1)$$

gdzie:

H – ciężar dźwigni wraz z uchwytem,

l_H – odległość środka ciężkości dźwigni z uchwytem od osi próbki,

G – ciężar przesuwny,

l_G – odległość środka ciężkości ciężarka przesuwnego od osi próbki,

R_g – naprężenie zginające,

W – wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego próbki.

W przypadku beleczki znormalizowanej tolerancja wynosi:

➤ dla szerokości $\pm 0,5$ (szerokość może wynosić 14,5 do 15,5 mm),

➤ dla wysokości $\pm 0,5$ (wysokość może wynosić 9,5 do 10,5 mm),

$$W = \frac{b h^2}{6} = \frac{14,5(9,5)^2}{6} = 218 \text{ mm}^3, \quad (7.2)$$

$$W = \frac{b h^2}{6} = \frac{15,5(10,5)^2}{6} = 284 \text{ mm}^3. \quad (7.3)$$

Odpowiednio dla tych wymiarów wskaźnik wytrzymałości zmienia się od 218 do 284 mm³. Wobec tego, gdy $R_g = 5$ MPa, moment zginający $M_g = R_g W$ może się zmieniać od 0,109 do 0,142 Nm.

Z przedstawionych rozważań wynika konieczność wprowadzenia zmian wartości momentu zginającego dla każdej próbki w zależności od jej przekroju. Przy doborze odpowiedniego momentu zginającego stosuje się wzory:

$$M_g = H l_H + G l_G = R_g W, \quad (7.4)$$

stąd

$$l_G = \frac{R_g W - H l_H}{G}. \quad (7.5)$$

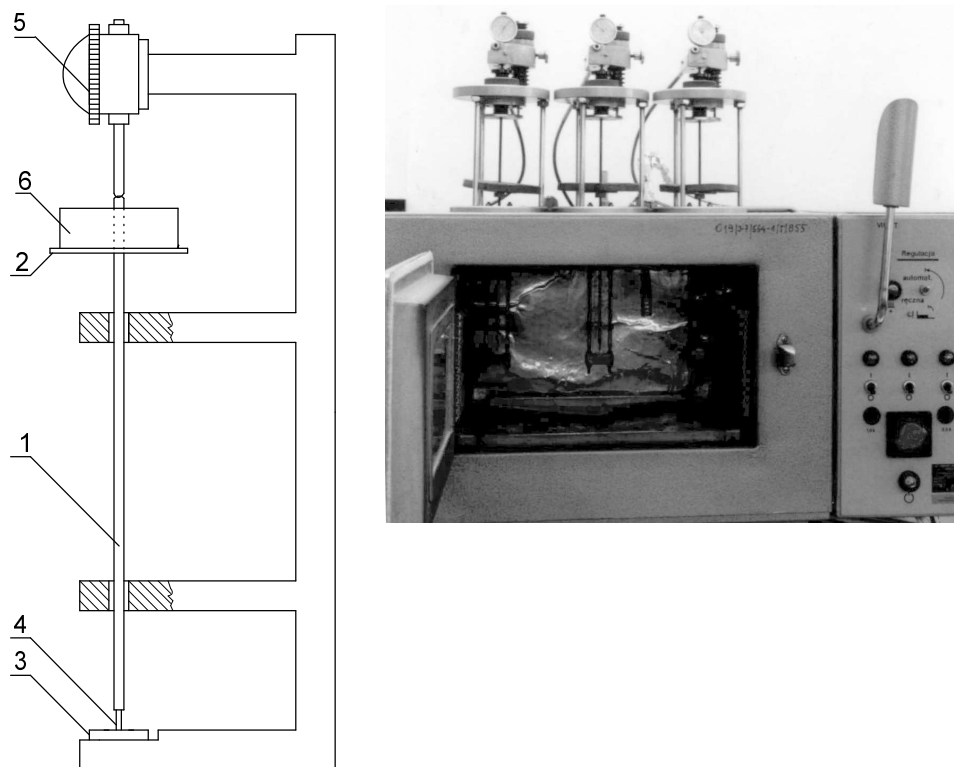
Jako wynik końcowy oznaczania należy przyjąć średnią arytmetyczną wartości temperatury dla co najmniej trzech równocześnie badanych próbek, zaokrągloną do całych stopni Celsjusza. Mierzona temperatura jako stopień Martensa odnosi się do powietrza w pobliżu próbki. Dla lepszego uchwycenia obniżania się wolnego końca dźwigni o 6 mm (koniec pomiaru) stosuje się urządzenie sygnalizujące (rys. 7.1).

7.2. Badanie temperatury mięknięcia tworzyw termoplastycznych metodą Vicata

Temperatura mięknięcia oznaczona według Vicata (VST) jest to temperatura (w °C), w której stalowa igła o kołowym przekroju poprzecznym o powierzchni

1 mm², przy określonej stałej szybkości wzrostu temperatury (PN-93/C-89024) i ustalonym obciążeniu, zagłębi się w powierzchnię badanej próbki na głębokość 1 mm.

Przyrząd do oznaczania temperatury mięknięcia przedstawiono na rysunku 7.2. W skład przyrządu wchodzi następujące elementy: pręt 1 prowadzony pionowo w sztywnej obudowie bez znaczącego tarcia. Do pręta jest przymocowana płytki 2, służąca do umieszczania obciążników. Podstawa obudowy służy jednocześnie do ułożenia próbki badanego tworzywa 3. Igła 4, w kształcie walca długości 3 mm, o przekroju poprzecznym 1 mm², jest wykonana z nierdzewnej hartowanej stali i przymocowana do dolnego końca metalowego pręta. Dolna powierzchnia igły powinna być gładka i prostopadła do osi pionowej pręta. Czujnik 5, o działce elementarnej 0,01 mm, służy do pomiarów zagłębienia igły 4 w próbce badanego tworzywa. Obciążniki 6 powinny być ułożone na płytce w ten sposób, aby ich środek ciężkości znajdował się na osi pręta i aby całkowite obciążenie na badaną próbkę wynosiło 10 ±0,2 N w metodzie A i 50 ±1 N w metodzie B.



Rys. 7.2. Urządzenie do oznaczania temperatury mięknięcia tworzyw termoplastycznych metodą Vicata

Próbki powinny mieć kształt krążków o średnicy co najmniej 10 mm, a grubość 3÷6,5 mm. Dopuszcza się badanie płyt i folii o grubości od 1,5 do 3 mm, przy czym

w tym przypadku należy nałożyć na siebie dwie próbki tak, aby ich łączna grubość znajdowała się w wymaganym zakresie grubości. Do oznaczania należy przygotować co najmniej dwie próbki.

Próbkę badanego tworzywa ułożyć dokładnie w położeniu poziomym na podstawie obudowy przyrządu i centrycznie w stosunku do końca igły przyrządu. Następnie, przez opuszczanie pręta, doprowadzić igłę do zetknięcia z próbką. Przyrząd wraz z próbką umieścić w komorze grzejnej. Termometr powinien być umieszczony obok próbki, a jego dolny koniec powinien znajdować się na poziomie górnej krawędzi próbki. Po upływie 5 minut od chwili umieszczenia próbki w przyrządzie ustawić czujnik w położeniu zerowym. Następnie podnosić temperaturę w komorze grzejnej tak, aby zapewnić stały prostoliniowy wzrost temperatury z szybkością według wariantu I – $50 \pm 0,5$ °C/h lub wg wariantu II – 120 ± 10 °C/h. Gdy czujnik wykaże zagłębienie igły w próbce równe $1 \pm 0,1$ mm, należy odczytać na termometrze temperaturę w komorze grzejnej (temperaturę próbki) i zapisać ją jako temperaturę mięknięcia według Vicata badanej próbki.

7.3. Pomiar temperatury zapłonu oleju

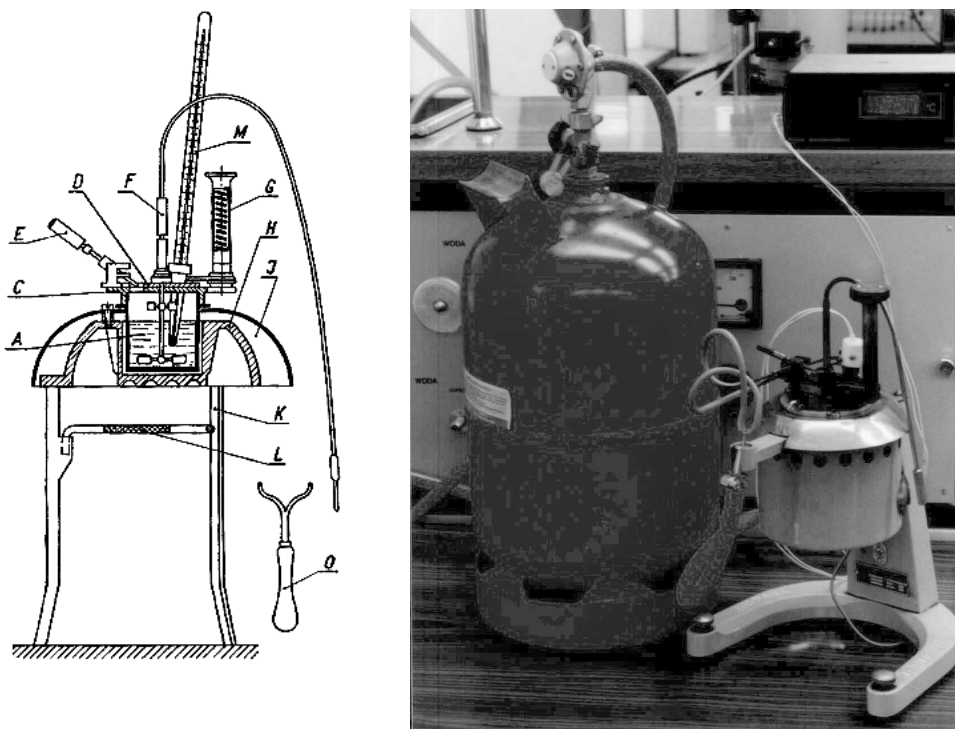
Temperatura zapłonu jest to najniższa temperatura, w jakiej pary badanego produktu, ogrzewane w ściśle określony sposób, tworzą z powietrzem mieszaninę zapalającą się przy zbliżeniu płomienia.

Temperaturę zapłonu mierzy się w naczyniu zamkniętym metodą Martensa–Pensky’ego (PN-75/C-04009). Schemat naczynia pokazano na rysunku 7.3.

Do czystego tygla A należy wlać, do linii podtoczenia, badany produkt o temperaturze 20 ± 5 °C. Na tygiel nałożyć pokrywę C z termometrem M, palnikiem gazowym E i rozpocząć ogrzewanie oraz mieszanie (mieszadło F). Ogrzewanie należy tak uregulować, aby przyrost temperatury wynosił 5 ± 6 °C/min. Zapalić palnik E i uregulować jego płomień tak, aby miał kształt zbliżony do kulki o średnicy 4 mm. Próbę zapłonu przeprowadzić następująco: przez przekręcenie gałki G palnik z płomieniem wprowadzić w ciągu 0,5 s do wnętrza tygla, pozostawić w nim przez 1 s, po czym szybko podnieść do położenia wyjściowego. Podczas próby mieszanie należy prze-rwać.

Pierwszą próbę temperatury zapłonu należy wykonać w temperaturze o 17 °C niższej od przewidywanej temperatury zapłonu. Następne próby produktów o przewidywanej temperaturze zapłonu niższej niż 104 °C wykonywać przy każdym przyroście temperatury o 1 °C, a produktów o temperaturze wyższej niż 104 °C – po każdym przyroście temperatury o 3 °C.

Za temperaturę zapłonu badanego produktu należy przyjąć temperaturę, w jakiej następuje pierwsze nagłe zapalenie się pary wewnątrz tygla (niebieski płomień nad całą powierzchnią produktu). Zapaleniu towarzyszy zazwyczaj lekki wybuch i zgaśnięcie płomienia palnika.



Rys. 7.3. Aparat Martensa–Pensky’ego

W przypadku badania nieznanego produktu należy wstępnie (orientacyjnie) oznaczyć temperaturę zapłonu, a następnie wykonać oznaczenie w podany wyżej sposób.

Gdy pomiar jest wykonany przy ciśnieniu barometrycznym różnym od 101,3 kPa (1,013 bara), należy obliczyć poprawkę do oznaczonej temperatury zapłonu, w °C według wzorów:

$$\Delta t = \frac{101,3 - p}{3,3} 0,9 \quad (7.6)$$

lub

$$\Delta t = \frac{1,013 - p}{0,033} 0,9, \quad (7.7)$$

w których p – ciśnienie barometryczne, przy którym wykonano oznaczenie, wyrażone w kilopaskalach (wzór (7.6)) lub w barach (wzór (7.7)).

Obliczenia wykonać z dokładnością do 1 °C. Poprawkę dodać do oznaczonej temperatury zapłonu z uwzględnieniem znaku.

Jako wynik należy przyjąć średnią arytmetyczną co najmniej dwóch wyników oznaczeń nie różniących się między sobą więcej niż podano w tabelicy 2 normy PN-75/C-04009.

7.4. Program ćwiczenia

1. Wyznaczyć wytrzymałość cieplną materiałów termoutwardzalnych metodą Martensa.
2. Wyznaczyć temperaturę mięknięcia metodą Vicata.
3. Zmierzyć temperaturę zapłonu oleju.

Literatura

1. Celiński Z., *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
2. Polskie Normy:
 - PN-90/C-89025 *Tworzywa sztuczne – Oznaczenie temperatury ugięcia metodą Martensa.*
 - PN-EN 22719:1999 *Przetwory naftowe i smarowe – Oznaczenie temperatury zapłonu – Pomiar metodą zamkniętego tygla Pensky'ego-Martensa.*
 - PN-EN ISO 306:2002(U) *Tworzywa sztuczne – Tworzywa termoplastyczne – Oznaczenie temperatury mięknięcia według Vicata.*
 - PN-90/C-96058 *Przetwory naftowe – Olej elektroizolacyjny do transformatorów i aparatury łączeniowej.*

8. BADANIE WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH I CHEMICZNYCH DIELEKTRYKÓW CIEKŁYCH

Stosowanymi w elektrotechnice dielektrykami ciekłymi są różnego rodzaju oleje izolacyjne. Można je klasyfikować ze względu na ich pochodzenie lub zastosowanie. Ze względu na pochodzenie oleje izolacyjne można podzielić na:

- mineralne,
- roślinne,
- syntetyczne.

Ze względu na zastosowanie można je podzielić na:

- transformatorowe,
- kondensatorowe,
- kablowe,
- wyłącznikowe.

Od początku istnienia energetyki, mineralne oleje elektroizolacyjne spełniają funkcje izolacyjne i chłodzące w urządzeniach elektroenergetycznych. Olej mineralny jest stosowany w transformatorach, przekładnikach napięciowych, wyłącznikach, kondensatorach i kablach.

O jakości oleju mineralnego decydują jego właściwości elektryczne, fizyczne i chemiczne. Do najważniejszych z nich należą:

- rezystywność,
- przenikalność elektryczna,
- współczynnik strat dielektrycznych,
- wytrzymałość elektryczna,
- gęstość,
- lepkość,
- temperatura zapłonu,
- temperatura krzepnięcia,
- zawartość kwasów, szlamu, wody,
- średni udział grup strukturalnych.

Na właściwości elektryczne olejów mineralnych (rezystywność, współczynnik strat dielektrycznych, wytrzymałość elektryczna) wpływają w istotny sposób zawarte w nim zanieczyszczenia w postaci: wilgoci, zawiesin mechanicznych (włókna bawełny i papieru), pęcherzyków powietrza, produktów utleniania oleju.

8.1. Oznaczanie liczby kwasowej oleju transformatorowego metodą miareczkowania wobec wskaźników

Liczba kwasowa oleju transformatorowego określa zawartość w oleju kwasów oraz kwaśnych produktów jego utleniania. W świeżym oleju charakteryzuje ona jakość procesu jego rafinacji, w używanym – jest natomiast wskaźnikiem stopnia jego zestarzenia w ściśle określonych warunkach utleniania. Liczba kwasowa zwiększa się od setnych części mgKOH/g w przypadku oleju świeżego na początku okresu eksploatacji, do dziesiątych części mgKOH/g w końcowym okresie jego eksploatacji.

Zestarzony olej można regenerować w celu powtórnego użycia. Regeneracja polega na odsączeniu cząstek stałych, neutralizacji kwasów i osuszeniu.

Całkowita liczba kwasowa – liczba miligramów wodorotlenku potasowego potrzebna do zobojętnienia wszystkich kwaśnych składników zawartych w 1g badanego produktu.

Kwasowość – liczba miligramów wodorotlenku potasowego potrzebna do zobojętnienia niezwiązanych kwasów zawartych w 100 ml badanego produktu.

Oznaczanie całkowitej liczby kwasowej polega na rozpuszczeniu badanego produktu w mieszaninie toluenu i alkoholu izopropylowego, zawierającej 25% (V/V) wody destylowanej i zmiareczkowaniu otrzymanego roztworu alkoholowym roztworem wodorotlenku potasowego wobec wskaźnika p-naftolobenzeiny (pomarańczowa barwa w środowisku kwaśnym, zielonobrazowa – w zasadowym).

Liczbę kwasową oznacza się według PN-85/C-04066.

Do kolby stożkowej o pojemności 250 ml odważyć próbkę analityczną oleju o masie 10 g, z dokładnością do 0,01 g, dodać 100 ml rozpuszczalnika do próbek oraz 0,5 ml roztworu p-naftolobenzeiny, po czym zawartość kolby mieszać aż do całkowitego rozpuszczenia próbki. Jeżeli roztwór przybierze barwę żółtopomarańczową, miareczkować go w temperaturze otoczenia, dodając porcjami roztwór wodorotlenku potasowego. W czasie zobojętniania roztwór silnie mieszać, wstrząsając kolbą.

Miareczkowanie wykonywać możliwie szybko (aby uniknąć rozpuszczania się w roztworze większych ilości dwutlenku węgla) i zakończyć, gdy roztwór zmieni barwę z pomarańczowej na zieloną lub zielonobrazową, utrzymującą się przez 15 s.

Równocześnie wykonać ślełą próbę, miareczkując 100 ml rozpuszczalnika do próbek roztworem wodorotlenku potasowego porcjami po 0,05 lub 0,1 ml wobec 0,5 ml roztworu p-naftolobenzeiny.

Całkowitą liczbę kwasową ($LK_{\text{całk}}$) obliczyć w miligramach KOH/g produktu, według wzoru

$$LK_{\text{całk}} = \frac{(V_1 - V_2)c \cdot 56,1}{m}, \quad (8.1)$$

w którym:

V_1 – objętość alkoholowego roztworu wodorotlenku potasowego o $c(\text{KOH}) = 0,1$ mol/l, zużytego do zmiareczkowania próbki produktu, ml,

V_2 – objętość alkoholowego roztworu wodorotlenku potasowego o $c(\text{KOH}) = 0,1$ mol/l, zużytego do zmiareczkowania ślepej próby, ml,

c – stężenie molowe KOH w alkoholowym roztworze wodorotlenku potasowego,

56,1 – masa cząsteczkowa wodorotlenku potasowego,

m – masa próbki pobranej do oznaczania (próbki analitycznej), g.

Jako wynik końcowy należy przyjąć średnią arytmetyczną wyników z co najmniej dwóch oznaczeń, nieróżniących się między sobą więcej niż o 0,05.

8.2. Oznaczanie zawartości wody w oleju

Woda w oleju mineralnym występuje w postaci rozpuszczonej i w postaci emulsji. Rozpuszczalność wody w oleju zależy od temperatury, rodzaju oleju oraz jego stopnia zesterzenia.

Obecność wody w oleju ma bardzo niekorzystny wpływ na jego właściwości elektryczne. Ze wzrostem zawilgocenia oleju gwałtownie spada jego wytrzymałość elektryczna oraz rezystywność. Powstałe wskutek dysocjacji wody jony przyspieszają proces starzenia oleju. Jakościowa próba oznaczania wody w oleju polega na stwierdzeniu, czy badany produkt, ogrzewany do określonej temperatury, nie pieni się i nie wydaje charakterystycznych przy obecności wody trzasków. Ilościowe próby polegają na miareczkowaniu związków chemicznych, powstałych wskutek reakcji z wodą.

Jakościową próbę na zawartość wody w oleju wykonuje się według normy PN-56/C-04085. Czystą i suchą probówkę napełnić do wysokości $80 \div 90$ mm olejem. Zamknąć korkiem, z umieszczonym w nim współosiowo termometrem, i podgrzewać nad palnikiem gazowym. W czasie, gdy temperatura badanego oleju podnosi się od temperatury 100 °C do 150 °C, należy zwracać baczną uwagę na jego zachowanie się.

Należy uznać, że w oleju jest woda, jeżeli badana próbka pieni się i słychać co najmniej dwa trzaski.

Jeśli badany olej tylko się pieni lub jeśli nastąpił tylko jeden trzask, oznaczenie należy powtórzyć. Stwierdzenie pienienia się oleju i jednego trzasku podczas powtórnego oznaczania świadczy o obecności wody.

8.3. Pomiar lepkości oleju transformatorowego

Lepkość, zwana również tarcieniem wewnętrznym w cieczy lub gazie, jest zjawiskiem polegającym na przenoszeniu pędu cząstek cieczy w wyniku zderzeń między nimi, z obszaru o większej prędkości przepływu do obszaru o mniejszej.

Rozróżnia się lepkość dynamiczną i lepkość kinematyczną. Używa się również pojęcia lepkości względnej.

Lepkość dynamiczną (absolutną) η określa siła tarcia wewnętrznego dwu przesuujących się względem siebie warstw cieczy, o małej różnicy prędkości. Jednostką w układzie SI jest paskalosekunda Pa·s, o wymiarze kg/(m·s).

Lepkość kinematyczną ν ustala się na podstawie prawa Stokesa, określającego szybkość ruchu jednostajnego ciała o kształcie kuli, opadającego w cieczy bez wywołania turbulencji. Jednostką w układzie SI jest m²/s.

Zależność lepkości kinematycznej od lepkości dynamicznej wyraża się wzorem

$$\nu = \frac{\eta}{d}; \text{ mm}^2/\text{s}, \quad (8.2)$$

w którym:

η – lepkość dynamiczna badanego produktu, mPa·s,

d – gęstość badanej cieczy w temperaturze pomiaru, oznaczona według normy PN-90/C-04004, g/ml.

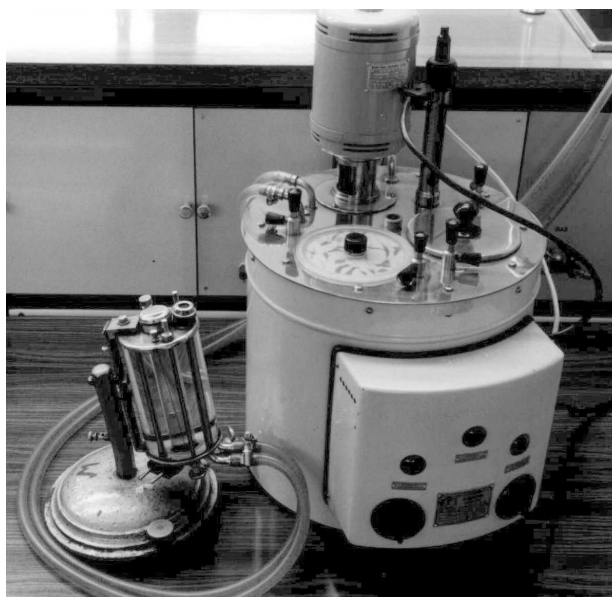
Lepkość względna η_w jest określona stosunkiem czasu wypływu 200 cm³ badanej cieczy w temperaturze t przez znormalizowaną kapilarę do czasu wypływu w tych samych warunkach 200 cm³ destylowanej wody (czas ten nazywa się stałą kapilary) w temperaturze 20 °C. Jednostką lepkości względnej jest stopień Englera (°E).

Pomiary lepkości cieczy dielektrycznych opierają się na zasadzie wpływu tarcia na ruch względny ciała stałego i badanej cieczy. Do wyznaczania lepkości cieczy i gazów służą przyrządy laboratoryjne zwane wiskozymetrami; wśród nich wyróżnia się następujące rodzaje: Englera, Höpplera, kapilarne, rotacyjne, ultradźwiękowe.

8.3.1. Oznaczanie lepkości dynamicznej lepkościomierzem Höpplera

Zgodnie z PN-78/C-04019 oznaczanie lepkości dynamicznej wiskozymetrem Höpplera sprowadza się do pomiaru czasu opadania kulki, o znanej gęstości i znanej stałej K , prowadzonej wzdłuż jednej ścianki rury z badaną cieczą, między dwoma znakami o ściśle ustalonej wzajemnej odległości.

Wiskozymetrem Höpplera można mierzyć lepkość w bardzo szerokim zakresie 10⁻²÷10⁷ mPa·s oraz w zakresie temperatur od -50 do +150 °C. Tak szeroki zakres wartości pomiarowych uzyskuje się przez dobór kulek wykonanych z różnych materiałów i o różnych średnicach.



Rys. 8.1. Lepkościomierz Höpplera

Wiskozymetr jest zbudowany ze szklanej rury, ustawionej pod kątem 80° względem poziomu, którą napelnia się badaną cieczą. Do rury z cieczą wpuszcza się kulkę szklaną lub metalową o określonej średnicy i gęstości. Rura szklana jest osłonięta cylindrem szklanym, który stanowi płaszcz wodny do ogrzewania lub chłodzenia badanej cieczy. Płaszcz wodny łączy się z ultratermostatem.

Pomiaru lepkości dokonuje się, po ustaleniu żądanej temperatury badanej cieczy, mierząc czas przejścia dolnej krawędzi kulki między kreskami, zaznaczonymi na szklanej rurze. Lepkość, w mPa·s, oblicza się według wzoru

$$\eta = \tau (d_k - d_c) K, \quad (8.3)$$

w którym:

τ – czas opadania kulki, będący średnim czasem z pięciu pomiarów, s,

d_k – gęstość materiału kulki, g/cm^3 ,

d_c – gęstość badanej cieczy w temperaturze pomiaru, g/cm^3 ,

K – stała kulki według tabelki:

Oznaczenie kulki	Ciężar kulki G	Średnica mm	Gęstość g/cm^3	Stała K
a	4,9632	15,805	2,401	0,01827
b	4,8013	15,630	2,402	0,1490
c	16,0118	15,658	8,12	0,232
d	14,3618	15,004	8,12	2,32
e	7,6824	12,500	7,71	40,88

Zmierzoną lepkość dynamiczną przeliczyć na lepkość kinematyczną, zgodnie z normą PN-77/C-04014.

8.3.2. Oznaczanie lepkości względnej oleju lepkościomierzem Englera

Lepkość względna η_w jest określona stosunkiem czasu wypływu 200 cm³ badanej cieczy w temperaturze t_0 przez znormalizowaną kapilarę do czasu wypływu, w tych samych warunkach, 200 cm³ wody destylowanej (czas ten nazywa się stałą kapilary) w temperaturze 20 °C. Pomiar lepkości względnej wykonuje się wiskozymetrem Englera (rys. 8.1), a jej jednostką jest stopień Englera (°E).



Rys. 8.2. Lepkościomierz Englera

Zgodnie z PN-77/C-04014 pomiar lepkości względnej wykonuje się wiskozymetrem Englera, którego stała kapilary wynosi 50÷52 s. Wymiary kapilary: $l = 20 \pm 0,1$ mm, $2r = 2,8 \pm 0,2$ mm. Do pionowo ustawionego wiskozymetru, po zamknięciu kapilary, wlewa się olej do poziomu ostrzy trzech haczyków. Pod kapilarą ustawia się kolbę z oznaczoną objętością 200 cm³. Czas wypływu oleju mierzy się stoperem. Lepkość względną η_w w temperaturze pomiaru oblicza się ze wzoru

$$\eta_w = \frac{\tau}{K}, \quad ^\circ\text{E}, \quad (8.4)$$

w którym:

K – stała kapilary, s,

τ – czas wypływu badanego produktu w temperaturze t °C, s.

Jako wynik przyjąć średnią z trzech pomiarów i przeliczyć go za pomocą nomogramu (załącznik normy PN-77/C-04014) na lepkość kinematyczną.

8.4. Oznaczanie gęstości

Oznaczanie gęstości cieczy wykonuje się zgodnie z normą PN-90/C-04004. Norma ta obejmuje trzy metody oznaczania gęstości:

- a) areometrem,
- b) piknometrem,
- c) piknometrem dwukapilarnym.

Metodę oznaczania gęstości areometrem stosuje się do oznaczania gęstości ropy naftowej i produktów naftowych, które w normalnych warunkach są cieczami i których prężność par jest nie większa niż 180 kPa.

Metodę oznaczania gęstości piknometrem stosuje się do oznaczania gęstości ropy naftowej i produktów naftowych, które w temperaturze oznaczania są cieczami lub ciałami stałymi.

Metodę oznaczania gęstości piknometrem dwukapilarnym stosuje się wówczas, gdy jest wymagana większa dokładność oznaczania niż za pomocą areometru lub piknometru, a szczególnie w przypadkach dysponowania małą ilością badanego produktu.

Gęstość (masa właściwa) d – stosunek masy substancji (m) do jej objętości (V), wyznaczonych w tej samej temperaturze, wyrażony wzorem

$$d = \frac{m}{V}. \quad (8.5)$$

Gęstość produktu, np. w g/ml, należy podawać razem z temperaturą, w której została zmierzona, np. 20 °C.

Gęstość względna $d_{t_r}^t$ – stosunek gęstości badanego produktu w temperaturze odniesienia (t) do gęstości innej substancji w temperaturze odniesienia (t_r), np. do gęstości wody w temperaturze 4 °C, wyrażony wzorem

$$d_{t_r}^t = \frac{d_t}{d_{t_r}}. \quad (8.6)$$

Temperatura odniesienia – temperatura, w której należy oznaczać lub do której należy odnosić gęstość badanego produktu, oznaczoną w innej temperaturze. Według normy PN-90/C-04004 temperaturą odniesienia dla gęstości d jest 20 °C.

W ćwiczeniu gęstość jest oznaczana areometrem.

Zasada oznaczania polega na swobodnym zanurzeniu areometru w badanej cieczy i odczytaniu na skali areometru gęstości w temperaturze oznaczania, a następnie przeliczeniu odczytanego wyniku na gęstość w temperaturze 20 °C według tabeli 2 w normie PN-90/C-04004.

Do wykonania pomiaru gęstości potrzebne są następujące przyrządy:

- areometr szklany z podziałką elementarną 0,001 g/ml lub 0,005 g/ml,
- cylinder szklany o wysokości dostosowanej do długości areometru,
- termometr o zakresie pomiarowym do 50 °C z podziałką elementarną 0,5 °C.

Przyrządy powinny być czyste i suche. Do szklanego cylindra wlać po ścianie badaną ciecz i pozostawić do czasu wyrównania się jej temperatury z temperaturą otoczenia (różnica temperatury nie większa niż 0,5 °C). Następnie zanurzyć areometr i – po ustaleniu się jego położenia – odczytać wskazanie według górnego menisku cieczy. Jednocześnie należy zmierzyć temperaturę cieczy w cylindrze.

Jako wynik należy przyjąć średnią arytmetyczną z co najmniej 3 pomiarów nieróżniących się między sobą więcej niż o 0,001 g/ml. Jeżeli pomiar gęstości wykonywano w temperaturze różnej od 20 °C, wynik pomiaru należy sprowadzić do warunków standardowych, tj. 20 °C.

8.5. Pomiar współczynnika załamania światła

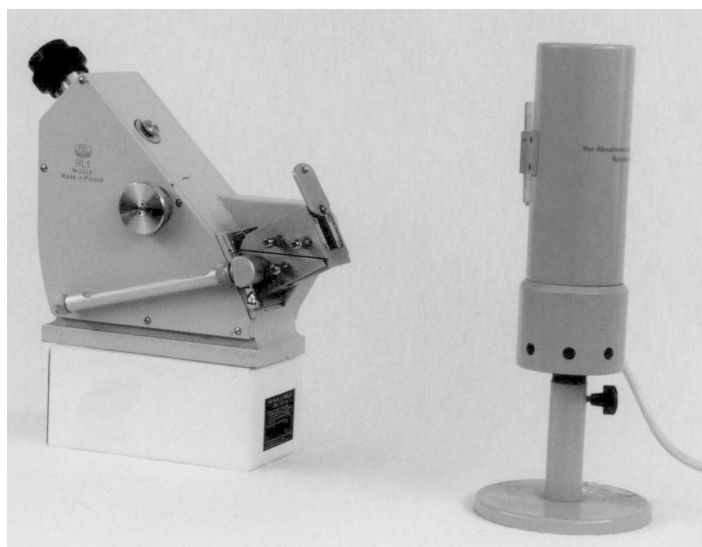
Pomiar współczynnika załamania światła n_D^{20} wykonuje się za pomocą refraktometru Abbego, w którym wykorzystano zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia światła. Zachodzi ono wówczas, gdy promień świetlny biegnie z ośrodka optycznie gęstszego do rzadszego, przy czym pada on na powierzchnię graniczną pod kątem większym od kąta granicznego. Na podstawie pomiaru kąta granicznego wyznacza się współczynnik załamania światła

$$n_{1,2} = \frac{1}{\sin \beta_{gr}}. \quad (8.7)$$

Refraktometr Abbego (rys. 8.3) w najprostszej konstrukcji składa się z dwóch pryzmatów prostokątnych ze szkła o dużym współczynniku załamania. Między te pryzmaty wprowadza się ciecz, która tworzy cienką warstewkę ośrodka optycznie rzadszego. Na tę warstwę cieczy (płasko-równoległą) padają pod różnymi kątami promienie świetlne wychodzące z jednego z pryzmatów. Część promieni ulega całkowitemu odbiciu na powierzchni cieczy, część zaś przechodzi dalej, przenika drugi pryzmat i, nie zmieniając kierunku, wpada do lunetki refraktometru. Dzięki temu pole widzenia lunetki podzielone zostaje na dwie części – jasną i ciemną, oddzielone od siebie ostrą linią graniczną (dla światła monochromatycznego). Po odpowiednim ustawieniu lunetki można zmierzyć kąt graniczny, a następnie wyznaczyć współczynnik załamania. Refraktometry fabryczne mają umieszczoną w polu widzenia lunetki podziałkę wyskalowaną w wartościach współczynnika załamania światła.

W celu wykonania pomiaru współczynnika załamania należy odsłonić okienko oświetlające i odchylić oprawę z pryzmatem nakrywkowym w górę do oporu. Powierzchnie pryzmatów należy oczyścić watą zwilżoną spirytusem. Szklaną pałeczką

nanieść kilka kropeł badanej cieczy na powierzchnię pryzmatu dolnego (refraktometrycznego). Nie należy przy tym dotykać palcami powierzchni pryzmatów. Opuścić pryzmat nakrywkowy i docisnąć do płaszczyzny pomiarowej. Przed pomiarem należy chwilę odczekać, aby zrównała się temperatura cieczy i pryzmatów. Okienko oświetlające pryzmatu nakrywkowego należy skierować na okienko lampy sodowej.



Rys. 8.3. Refraktometr Abbego

Podczas pomiarów w świetle przechodzącym dolne zwierciadło powinno zasłaniać otwór pryzmatu refraktometrycznego. Przez obrót pokrętkami, umieszczonymi po obu stronach refraktometru, należy uzyskać ostre, bezbarwne, wyraźne rozgraniczenie jasnego i ciemnego pola w lunetce. Za pomocą umieszczonego z lewej strony pokrętła naprowadzić linię graniczną dokładnie na środek krzyża widocznego w polu lunetki. Pionowa linia w dolnej części pola lunetki wskaże wynik pomiaru na podziałce współczynnika załamania światła. Po skończonych pomiarach należy oczyścić pryzmaty watą i czystym spirytusem.

8.6. Analiza strukturalno-grupowa oleju mineralnego metodą ndv

Olej mineralny jest produktem destylacji ropy naftowej i stanowi niezwykle skomplikowaną mieszaninę różniących się pod względem budowy ciekłych węglowodorów, głównie naftenowych i parafinowych, z domieszką węglowodorów aromatycznych.

Węglowodory naftenowe są związkami o wzorze ogólnym C_nH_{2n} z pierścieniową budową cząsteczek. Odznaczają się one niską temperaturą krzepnięcia (około $-50\text{ }^\circ\text{C}$) i odpornością na utlenianie. Przykładem jest cykloheksan C_6H_{12} .

Węglowodory parafinowe, o wzorze ogólnym C_nH_{2n+2} , charakteryzują się liniową budową cząsteczek. Są one mniej odporne na utlenianie, a ich temperatura krzepnięcia jest wyższa i wynosi około $-5\text{ }^\circ\text{C}$. Przykładem jest heksan C_6H_{14} .

Węglowodory aromatyczne, o wzorze ogólnym C_nH_n , charakteryzują się pierścieniową budową cząsteczek. Są one mniej odporne na utlenianie. Produktem utleniania jest gęsty szlam. Przykładem jest benzen C_6H_6 .

Węglowodory naftenowe i parafinowe należą do związków nasyconych, odpornych na utlenianie. Węglowodory aromatyczne są związkami nienasyconymi.

Surowy olej mineralny musi być poddany procesowi oczyszczania, w którym usuwana jest siarka, żywice, kwasy i węglowodory nienasycone. Wilgoć usuwa się przez wirowanie i filtrowanie oraz za pomocą absorbentów.

Większa zawartość węglowodorów parafinowych podwyższa temperaturę krzepnięcia oleju. Dobry olej powinien zawierać co najmniej 50% węglowodorów naftenowych. Niewielka domieszka węglowodorów aromatycznych wpływa korzystnie na stabilizację właściwości oleju.

Wyodrębnienie indywidualów chemicznych w oleju mineralnym jest praktycznie niemożliwe. Dlatego też stosuje się metody analizy polegające na określeniu średniego składu grupowego oraz występujących struktur.

W analizie strukturalno-grupowej korzysta się z zależności między właściwościami fizycznymi a strukturą węglowodorów. Zależności między tymi wielkościami otrzymuje się po zbadaniu właściwości dużej liczby frakcji olejowych oraz czystych związków.

W analizie strukturalno-grupowej za składniki oleju uważa się grupy strukturalne, a nie cząsteczki i atomy. Na podstawie średniego udziału grup strukturalnych można wnioskować o właściwościach oleju.

Elementy strukturalne oznacza się w następujący sposób:

R_A – liczba pierścieni aromatycznych,

R_N – liczba pierścieni naftenowych,

R_T – całkowita liczba pierścieni, stanowiąca sumę $R_N + R_A$,

$\%C_A$ – procentowa zawartość atomów węgla w strukturze aromatycznej,

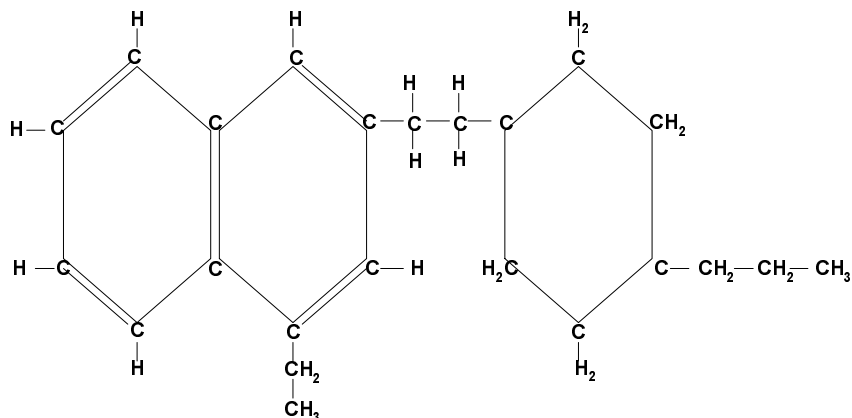
$\%C_N$ – procentowa zawartość atomów węgla w strukturze naftenowej (w stosunku do całkowitej liczby atomów węgla w cząsteczce),

$\%C_R$ – procentowa zawartość atomów węgla w strukturze aromatycznej pierścieniowej, stanowiąca sumę $\%C_N + \%C_A$,

$\%C_P$ – procentowa zawartość atomów węgla w strukturze parafinowej,

przy czym $\%C_A + \%C_N + \%C_P = 100\%$.

Wymienione elementy odnoszą się do średniej cząsteczki, tzn. cząsteczki hipotetycznej, odpowiadającej przeciętnemu charakterowi cząsteczek w mieszaninie. Przykładem może być cząsteczka o budowie



dla której skład grupowy jest następujący:

$R_A = 2$	$C_A = 10$	$\%C_A = 43,5$
$R_N = 1$	$C_N = 6$	$\%C_N = 26,1$
$R_T = 3$	$C_P = 7$	$\%C_P = 30,4$
$C_T = 23$		

W metodzie będącej przedmiotem ćwiczenia dodatkowo wyznacza się średni ciężar cząsteczkowy oleju M .

8.6.1. Zasada analizy strukturalno-grupowej oleju mineralnego metodą ndv

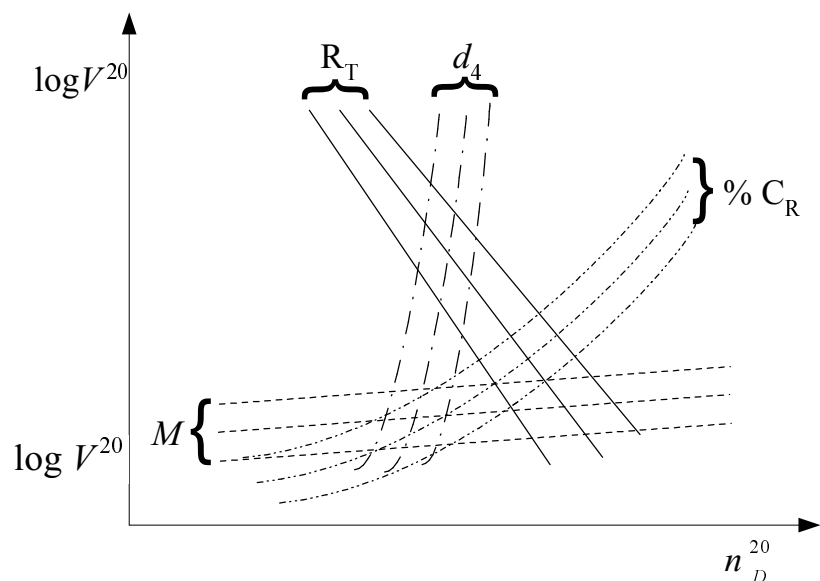
Metoda ta jest stosowana do produktów o lepkości w zakresie $2 \div 320 \text{ mm}^2/\text{s}$ (w temperaturze $20 \text{ }^\circ\text{C}$). W metodzie tej wykorzystuje się zależności, jakie występują między współczynnikiem załamania światła n_D^{20} , gęstością d_4^{20} i lepkością ν^{20} . Podstawą tej metody jest funkcja $\log \nu^{20} = f(n_D^{20})$, w której gęstość, ciężar cząsteczkowy oraz liczba pierścieni są parametrami (rys. 8.4).

Wykres przedstawiony na rysunku 8.4 stosuje się na podstawie następujących rozważań: dla mieszanin węglowodorowych zawierających aromaty zmierzona wartość gęstości wykazuje pewne odchylenie od wartości odczytanej z wykresu dla związków nasyconych (bez aromatów). Różnica Δd między gęstością zmierzoną a odczytaną z wykresu (dla zmierzonych wartości $\log \nu^{20}$ i n_D^{20})

$$\Delta d = d_4 - d_4^{20} \quad (8.8)$$

jest spowodowana obecnością struktur aromatycznych i została zastosowana do wyznaczenia procentowej zawartości atomów węgla w węglowodorach aromatycznych, zgodnie z doświadczalnym wzorem

$$\%C_A = 600 \Delta d - (40 \cdot \Delta d)^2. \quad (8.9)$$



Rys. 8.4. Zależność między niektórymi stałymi fizycznymi nasyconych frakcji olejowych i powiązanie ich ze strukturą cząsteczki

Różnica gęstości Δd pozwala również przeliczyć wartości $\log v^{20}$ i d_4^{20} zmierzone dla oleju zawierającego aromaty na wartości odpowiadające frakcjom nasyconym $\log v^*$ i d^* . Korektę tę wykonuje się według wzorów:

$$d^* = d_4^{20} - 0,62\Delta d - 0,08\% S,$$

$$\log v^* = (1 - 3\Delta d)\log v^{20} + \Delta d,$$

$\% S$ oznacza procentową zawartość siarki w oleju, którą w ćwiczeniu należy przyjąć równą zero.

Dla skorygowanych wartości $\log v^*$ i d^* z wykresu (rys. 8.4.) odczytuje się R_T , która jest równa R_N (frakcje nasycone, bez aromatów), $\% C_R$ oraz M .

Z odczytanej, z wykresu, wartości ciężaru cząsteczkowego M oraz z obliczonej wartości $\% C_A$ oblicza się liczbę pierścieni struktury aromatycznej według wzorów:

dla $R_A \geq 1$

$$(2R_A + 1) = \frac{Mx\% C_A}{2800}, \quad (8.12)$$

dla $R_A \leq 1$

$$3R_A = \frac{Mx\% C_A}{2800}. \quad (8.13)$$

Liczbę pierścieni naftenowych oblicza się ze wzoru

$$R_N = R_T - R_A. \quad (8.14)$$

Procentową zawartość atomów węgla w strukturze parafinowej i naftenowej oblicza się jako:

$$\% C_P = 100 - \% C_R, \quad (8.15)$$

$$\% C_N = \% C_R - \% C_A. \quad (8.16)$$

Przedstawiona metoda analizy strukturalno-grupowej jest jedną z wielu metod. Zaletą jej jest możliwość uzyskania informacji o składzie oleju na podstawie szybko i łatwo mierzalnych wielkości fizycznych.

8.7. Program ćwiczenia

1. Wykonać jakościową próbę na zawartość wody w oleju.
2. Oznaczyć liczbę kwasową oleju transformatorowego.
3. Oznaczyć lepkość względną oleju transformatorowego.
4. Oznaczyć lepkość dynamiczną oleju transformatorowego w zakresie temperatury od 20 do 50 °C.
5. Wyznaczyć lepkość kinematyczną oleju transformatorowego.
6. Oznaczyć gęstość cieczy.
7. Zmierzyć współczynnik załamania światła oleju transformatorowego.
8. Wykonać analizę strukturalno-grupową oleju mineralnego metodą *ndv*.

Literatura

1. Celiński Z., *Materiaoznawstwo elektrotechniczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998.
2. Siciński Z., *Badanie materiałów elektroizolacyjnych*, WNT, Warszawa 1968.
3. Polskie Normy:
 - PN-85/C-04066 *Przetwory naftowe – Oznaczanie liczby kwasowej i zasadowej oraz kwasowości metodą miareczkowania wobec wskaźników.*
 - PN-56/C-04085 *Przetwory naftowe – Jakościowe oznaczanie wody.*
 - PN-78/C-04019 *Oznaczanie lepkości dynamicznej lepkościomierzem Höpplera.*
 - PN-77/C-04014 *Przetwory naftowe – Oznaczanie lepkości względnej lepkościomierzem Englera.*
 - PN-90/C-04004 *Ropa naftowa i przetwory naftowe – Oznaczanie gęstości.*

9. BADANIE ZJAWISK TERMOELEKTRYCZNYCH

Do zjawisk termoelektrycznych zalicza się trzy różne efekty: Peltiera, Seebecka i Thomsona.

Nazwa zjawiska Peltiera pochodzi od nazwiska jego odkrywcy J.C.A. Peltiera (1785–1845), który w roku 1834 zauważył, że temperatura spoin wykonanych z różnych metali zależy od kierunku prądu przepływającego przez te spoiny. W przypadku dwóch spoin, wykonanych z różnych materiałów przewodzących, podczas przepływu prądu stałego jedna z nich ogrzewa się, druga zaś chłodzi. Efekt wydzielania ciepła jest niezależny od ciepła Joule’a–Lentza i ma inną naturę.

Zjawiskiem Seebecka (T.J. Seebeck, 1770–1831, uczony niemiecki) nazywa się powstawanie siły elektromotorycznej w obwodzie zawierającym dwie spoiny lub złącza wykonane przez połączenie dwóch różnych materiałów przewodzących, jeśli złącza te znajdują się w różnej temperaturze.

Zjawisko Thomsona polega na wydzielaniu lub pochłanianiu ciepła, dodatkowo do ciepła Joule’a–Lentza, przy przepływie prądu stałego wzdłuż próbki z jednorodnego materiału (pół)przewodzącego w warunkach występowania na niej różnicy temperatur.

Wymienione zjawiska występują zarówno w metalach, jak i w materiałach półprzewodnikowych. O ile w pierwszych miały znaczenie głównie poznawcze, o tyle w przypadku półprzewodników znalazły zastosowania czysto techniczne. Zjawiska termoelektryczne określa się odpowiednimi współczynnikami.

Współczynnik Peltiera Π określa zależność

$$\Pi = \pm Q/It, \quad (9.1)$$

w której Q jest ilością ciepła wydzielanego do otoczenia (znak +) lub pochłanianego z otoczenia (znak –) przez złącze, jeżeli przepływa przez nie prąd I w czasie t .

Współczynnik Seebecka α jest określony zależnością

$$\alpha = dU/dT, \quad (9.2)$$

w której dU jest różnicą potencjałów powstającą między złączami, między którymi występuje różnica temperatur dT .

Współczynnik Thomsona τ_T jest zdefiniowany zależnością

$$dQ_T = \tau_T I (dT/dx) dx, \quad (9.3)$$

w której dQ_T jest ilością ciepła wydzielającego się na długości próbki dx , jeżeli przepływa przez nią prąd o wartości I i występuje na niej gradient temperatury (dT/dx) .

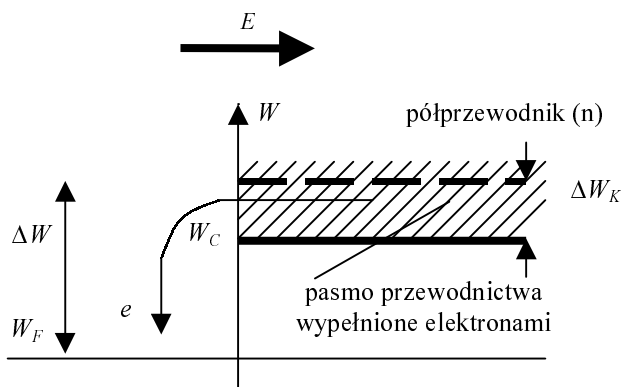
Wymienione współczynniki są ze sobą związane za pomocą tzw. relacji Thomsona

$$\Pi = \alpha T, \quad (9.4)$$

$$\tau_T = T(d\alpha/dT). \quad (9.5)$$

9.1. Natura zjawiska Peltiera

Mechanizm fizyczny prowadzący do wymienionego zjawiska można prześledzić na podstawie modelu przedstawionego na rysunku 9.1.



Rys. 9.1. Uproszczony model złącza metal–półprzewodnik

W modelu przyjęto oznaczenia: W_F – poziom Fermiego, W_C – położenie dna pasma przewodnictwa w półprzewodniku, ΔW_K – średnia wartość energii kinetycznej elektronów w paśmie przewodnictwa. Ponadto założono, że pole elektryczne w półprzewodniku jest bardzo małe (pasma nie są nachylone), a prace wyjścia z metalu i półprzewodnika są sobie równe. W warunkach równowagi termodynamicznej poziom Fermiego jest jednakowy w obu materiałach.

Jeżeli do złącza (rys. 9.1) przyłożymy pole elektryczne w zaznaczonym kierunku, to elektrony będą przechodziły z pasma przewodnictwa półprzewodnika do metalu, przy czym będą zmuszone w sąsiedztwie styku oddać zgromadzoną energię potencjalną o wartości ΔW . Energia ta to ciepło Peltiera, wydzielające się w są-

siedztwie złącza podczas transportu przez nie ładunku równego jednemu elektronowi. Można zatem zapisać

$$\Delta W = Q = \Pi e. \quad (9.6)$$

Jeżeli pole E skierować przeciwnie, to z metalu do półprzewodnika mogą przejść jedynie elektrony o odpowiednio wysokiej energii kinetycznej – tzw. gorące elektrony. Zubożenie obszaru przyległego do złącza w elektrony mające dużą energię prowadzi do zmniejszenia średniej energii elektronów w paśmie i w konsekwencji do obniżenia temperatury sieci, od której tę energię pobierają, dochodząc do równowagi termodynamicznej. Okolice złącza będzie się zatem ochładzać. Wartość wymienianej energii na złączu (wydzielanej lub pochłanianej) określa zależność

$$\Delta W = W_C - W_F + \Delta W_K. \quad (9.7)$$

Zakłada się, że energia kinetyczna elektronów na dnie pasma przewodnictwa jest równa zero. Po przyjęciu, że energię kinetyczną elektronów można określić z zależności

$$\Delta W_K = (r + 2) k T, \quad (9.8)$$

w której:

r – współczynnik, przyjmuje wartości od 0 do 2 – w zależności od mechanizmu rozpraszania nośników ładunku,

k – stała Boltzmanna,

T – temperatura,

z równań (9.6), (9.7) i (9.8) otrzymuje się

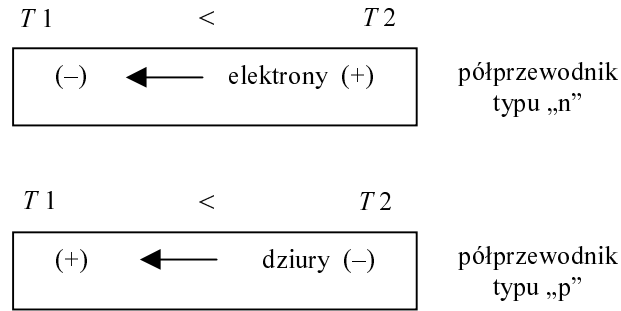
$$Q = \Pi e = W_C - W_F + (r + 2) k T. \quad (9.9)$$

Przy wyprowadzeniu podanych zależności określających wartość współczynnika Peltiera Π nie uwzględniono roli metalu elektrody. Wynikało to z faktu, że efekt Peltiera jest w przypadku materiałów półprzewodnikowych znacznie wyższy niż w przypadku metali (o rząd wielkości). Rolę ostatniego można zatem pominąć.

9.2. Natura zjawiska Seebecka

Uproszczoną analizę zjawiska Seebecka można przeprowadzić na podstawie modelu próbki półprzewodnika, przedstawionego na rysunku 9.2. Jeśli próbkę nagrzać nierównomiernie, to – na skutek różnicy energii i koncentracji nośników ładunku – zacznie się ich ukierunkowany ruch. Jeżeli końce próbki znajdują się w temperaturze $T_1 < T_2$, to na końcu próbki o temperaturze T_2 będzie występowała większa koncentracja nośników ładunku, będą one również miały większą energię. W efekcie wystąpi ich dyfuzja w kierunku zimniejszego końca (T_1). Przepływ prądu dyfuzji prowadzi do pojawienia się rozkładu potencjału oraz wystąpienia prądu unoszenia. W warunkach równowagi obie składowe prądu są sobie równe i na zewnątrz obserwujemy tylko różnicę potencjałów między punktami o różnej temperaturze. Jeżeli no-

śnikami ładunku są elektrony (półprzewodnik typu „n”), to zimniejszy koniec próbki będzie miał w stosunku do cieplejszego potencjał ujemny. Dla półprzewodnika typu „p” – dodatni. Jest to prosty sposób określania typu przewodnictwa (elektronowe–dziu- rowe) w materiałach półprzewodnikowych.



Rys. 9.2. Zjawisko Seebecka w próbkach półprzewodników o przewodnictwie elektronowym

Wartość oraz przebieg współczynnika Seebecka α w funkcji temperatury można określić dla materiału półprzewodnikowego o zadanym typie przewodnictwa, wiążąc różnicę $W_C - W_F$ z równowagową koncentracją nośników ładunku. W przypadku półprzewodnika typu „n” równowagową koncentrację elektronów n określa zależność

$$n = N_C \exp \left[\frac{-W_C - W_F}{kT} \right]. \quad (9.10)$$

Na podstawie zależności (9.4), (9.9) i (9.10) można napisać

$$\alpha_n = -\frac{k}{e} \left[r + 2 + \ln \frac{N_C}{n} \right]. \quad (9.11a)$$

Podobne rozważania prowadzą, dla półprzewodnika typu „p”, do zależności

$$\alpha_p = +\frac{k}{e} \left[r + 2 + \ln \frac{N_V}{p} \right], \quad (9.11b)$$

w której: N_C , n , N_V , p są koncentracjami stanów i nośników w paśmie odpowiednio przewodnictwa i walencyjnym.

W przypadku kilku rodzajów nośników lub mechanizmów przewodnictwa wartość współczynnika α określa wzór

$$\alpha = \frac{\sum_i \alpha_i \sigma_i}{\sum_i \sigma_i}, \quad (9.12)$$

w którym α_i jest parcjalaną siłą termoelektryczną, określoną nośnikami wnoszącymi do ogólnej konduktywności wkład o wartości σ_i .

Zależność (9.12) prowadzi, dla zakresu temperatury, w którym występuje termiczna aktywacja procesu przewodnictwa (zakres niepełnej jonizacji domieszki, zakres przewodnictwa samoistnego), do wyrażenia typu

$$\alpha = (T) = C_1 + \frac{C_2}{T}, \quad (9.13)$$

w którym C_1, C_2 – stałe.

Zależność (9.13) pokazuje, że w zakresie temperatur, w którym występuje termiczna aktywacja przewodnictwa typu

$$\sigma_i(T) = \sigma_0 \exp \frac{-W_\sigma}{kT}, \quad (9.14)$$

gdzie:

σ_0 – stała,

współczynnik α zależy hiperbolicznie od temperatury.

Wartość energii aktywacji procesu przewodnictwa W_σ można wyznaczyć, gdy znane jest C_2 , za pomocą zależności

$$W_\sigma = C_2 e. \quad (9.15)$$

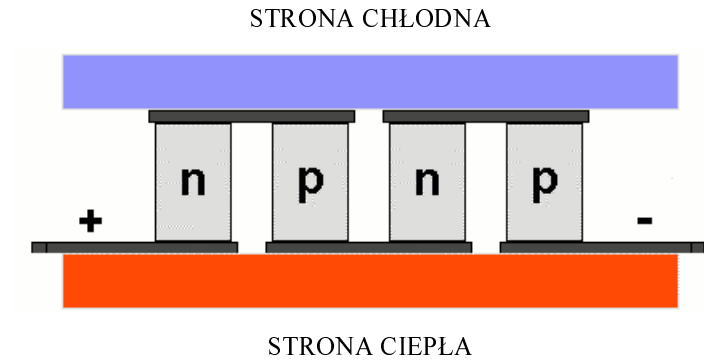
9.3. Natura zjawiska Thomsona

Zjawisko Thomsona ma do chwili obecnej znaczenie tylko teoretyczne. Gradient temperatury prowadzi do wystąpienia gradientu koncentracji nośników i odpowiadającego mu prądu dyfuzji. Ostatni prowadzi do powstania rozkładu ładunku przestrzennego. Jeżeli pole od ładunku w objętości jest skierowane przeciwnie niż pole zewnętrzne, to ostatnie wykonuje pracę przeciwko polu wewnętrznemu, co prowadzi do wydzielenia dodatkowego ciepła. Jeżeli kierunki obu pól są zgodne, to pole wewnętrzne wspomaga dryft nośników kosztem cieplnej energii sieci, co prowadzi do jej ochłodzenia.

9.4. Zastosowania

9.4.1. Zastosowanie zjawiska Peltiera

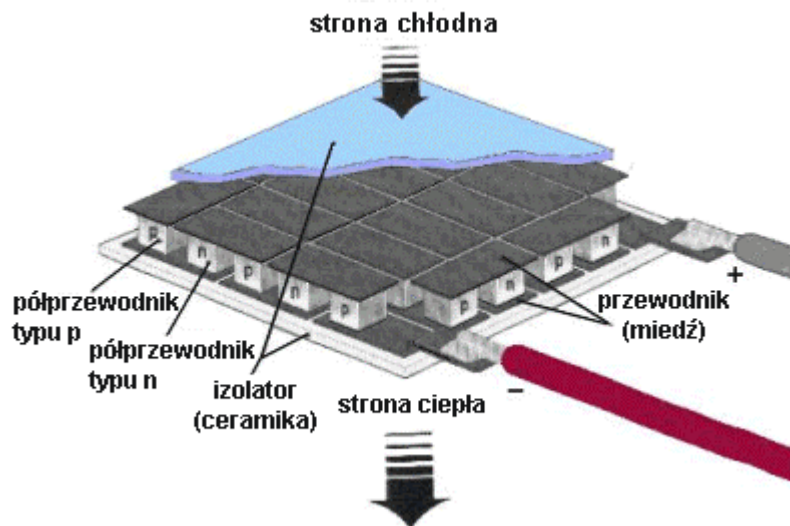
Głównym zastosowaniem zjawiska Peltiera są tzw. pompy cieplne, stosowane zarówno do nagrzewania, jak i do chłodzenia niewielkich obiektów. Pompy takie wykonywane są z materiałów półprzewodnikowych, w których elektrony przechodzące przez złącze zmieniają znacznie energię potencjalną ($W_C - W_F$). Schemat podstawowej struktury pompy przedstawiono na rysunku 9.3, półprzekrój zaś gotowego elementu pompującego – na rysunku 9.4.



Rys. 9.3. Zastosowanie półprzewodników typu „p” i „n” w pompach cieplnych Peltiera.
Kombinacja wielu par styków z półprzewodnikami „p” i „n” umożliwia stworzenie technicznie użytecznej pompy ciepła

Przykładowy element pompujący typu TES1-2725 o wymiarach 30×30 mm, grubości struktury 3,6 mm i budowie przedstawionej na rysunku 9.4 wykazuje następujące właściwości:

- maksymalny prąd 2,5 A,
- maksymalne napięcie na strukturze 14,7 V,
- maksymalna różnica temperatur 67°C ,
- maksymalna wydajność cieplna 26 W.

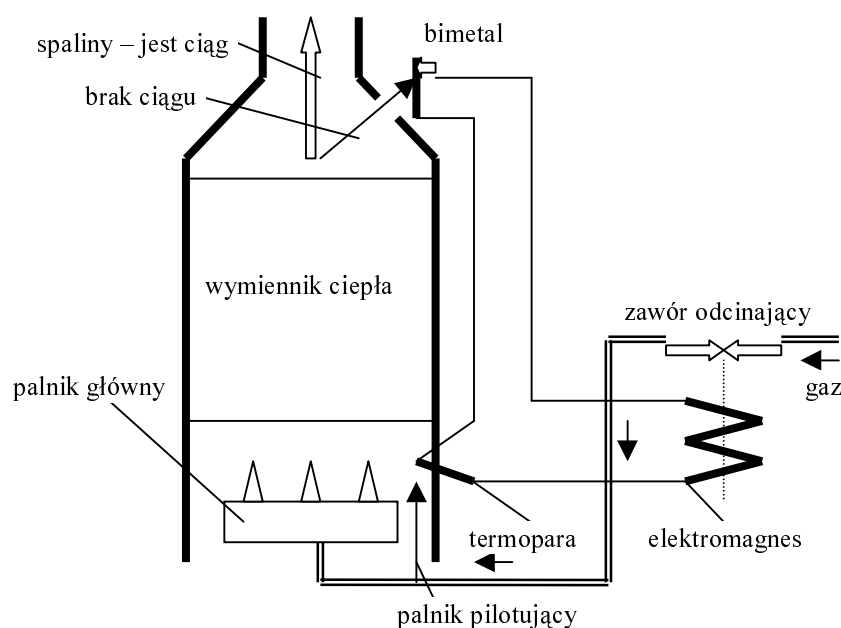


Rys. 9.4. Odsłonięta struktura typowego elementu Peltiera

9.4.2. Zastosowanie zjawiska Seebecka

Zjawisko Seebecka największe zastosowanie znalazło w pomiarach temperatury za pomocą termopar. Układ przeciwsobnie (różnicowo) połączonych termopar wytwarza napięcie zależne do różnicy temperatur, w jakich umieszczono spoiny termopar. Ponieważ zależność napięcia od różnicy temperatur jest na ogół nieliniowa, podaje się ją w postaci charakterystyk lub tabelaryzuje. Wymienione charakterystyki różnią się w zależności od materiałów stosowanych na spoiny.

Pomimo niewielkiej wydajności źródeł energii elektrycznej, jakim jest termopara, bywa ona stosowana do wytwarzania bądź energii zasilającej współczesne energooszczędne układy elektroniczne, bądź też do zasilania prostych układów wykonawczych, stosowanych w automatyce. Przykładem może być przedstawiony na rysunku 9.5 układ zabezpieczenia zaniku gazu, stosowany w typowych piecach centralnego ogrzewania opalanych gazem. W ostatnim przypadku prąd stały, wytwarzany przez termoparę nagrzewaną płomieniem palnika pilotującego, zasila elektromagnes utrzymujący zawór odcinający gaz w położeniu „otwarty”. W razie zaniku gazu palnik pilotujący gaśnie, siła elektromotoryczna spada do zera, zawór się zamyka i nie ma możliwości wypływu gazu przy ponownym wzroście jego ciśnienia.

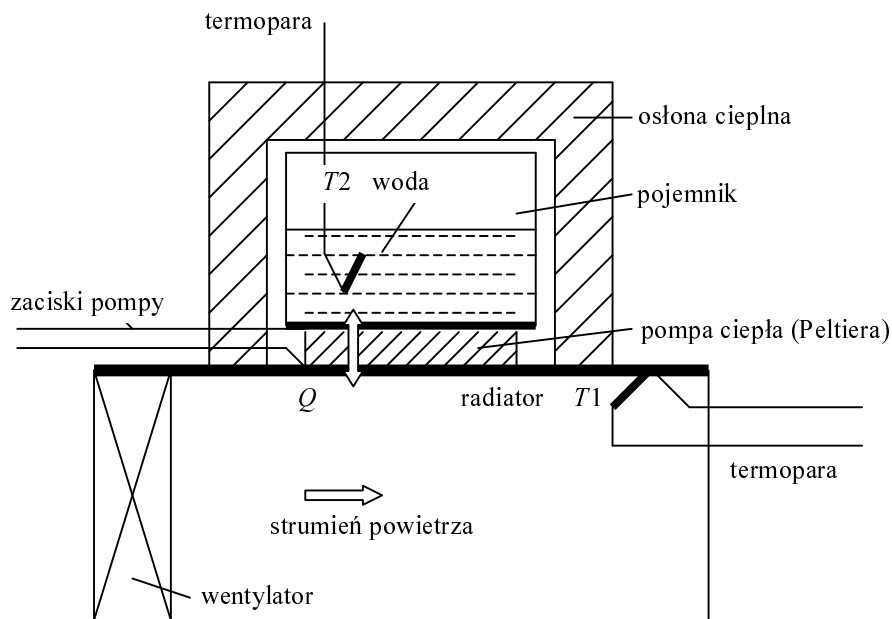


Rys. 9.5. Układ zabezpieczenia zaniku ciśnienia gazu w piecu c.o., w którym zastosowano termoparę

9.5. Układy pomiarowe

9.5.1. Układ do badania zjawiska Peltiera

Przekrój układu cieplnego z elementem (pompą ciepła) Peltiera przedstawiono na rysunku 9.6.



Rys. 9.6. Szkic układu pomiarowego z elementem Peltiera

Pompa zaciśnięta jest pomiędzy radiatorem z wymuszonym obiegiem powietrza a pojemnikiem miedzianym, częściowo wypełnionym wodą. Pojemnik jest izolowany cieplnie od otoczenia. W celu wyznaczenia gradientu temperatury ΔT na pompie mierzy się temperaturę wody T_2 w pojemniku oraz temperaturę radiatora T_1 . Obie temperatury są mierzone za pomocą termopar Cu–konstantan. Schemat elektryczny układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 9.7.

Układ pomiarowy zawiera obwód umożliwiający kontrolę warunków zasilania, pomiar mocy pobieranej przez pompę oraz wspomniany układ różnicowo połączonych termopar do pomiaru temperatury po obu stronach pompy.

Według układu przedstawionego na rysunku 9.6 można wyznaczyć moc cieplną pompy ciepła na podstawie zależności

$$P_p = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{A \Delta T_1}{\Delta t}, \quad (9.16)$$

w której ΔQ jest ilością ciepła przepływającego przez pompę w czasie Δt . Wartość ΔQ można wyznaczyć z zależności

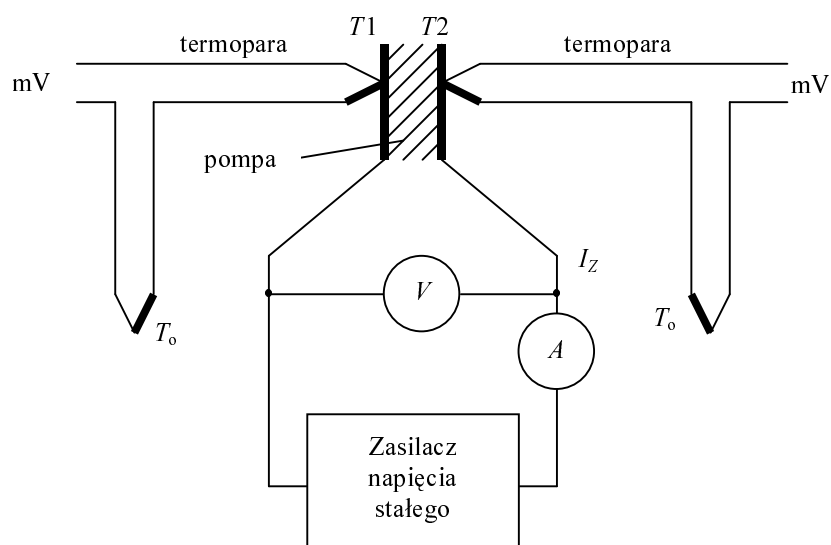
$$\Delta Q = (m_1 C_{W1} + m_2 C_{W2}) \Delta T = A \Delta T, \quad (9.17)$$

w której:

m_1, m_2 – masy, odpowiednio pojemnika i wody,

C_{W1}, C_{W2} – ciepło właściwe materiału pojemnika i wody,

ΔT – przyrost temperatury pojemnika i wody w wyniku dostarczenia do niego ciepła ΔQ .



Rys. 9.7. Schemat układu zasilania pompy i pomiaru temperatury;
 T_0 – temperatura odniesienia

Według zależności (9.16) i (9.17) można wyznaczyć moc pompy na podstawie początkowego narostu charakterystyki nagrzewania pojemnika, jak to pokazano na rysunku 9.8. Z wyrażeń (9.16) i (9.17) otrzymuje się

$$P_p = \frac{A \Delta T}{\Delta t}. \quad (9.18)$$

Sprawność pompy można określić na podstawie zależności

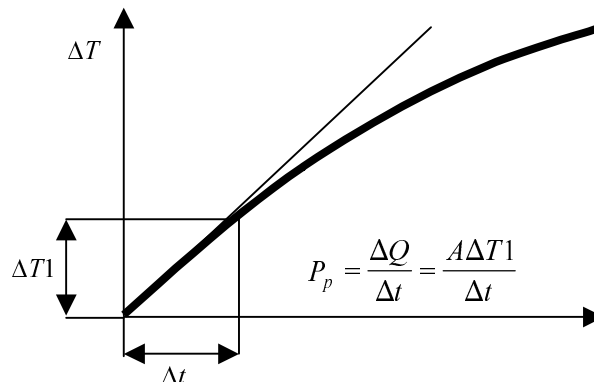
$$\eta = \frac{P_p}{P_z} \cdot 100\%, \quad (9.19)$$

w której $P_z = I_z U_z$,

wartość zaś zastępczego współczynnika Peltiera z wyrażenia

$$\Pi = \frac{P_p}{nI_z}, \quad (9.20)$$

w którym n – liczba struktur podstawowych w pompie.



Rys. 9.8. Wyznaczanie mocy pompy ciepła

9.5.2. Układ do badania efektu Seebecka

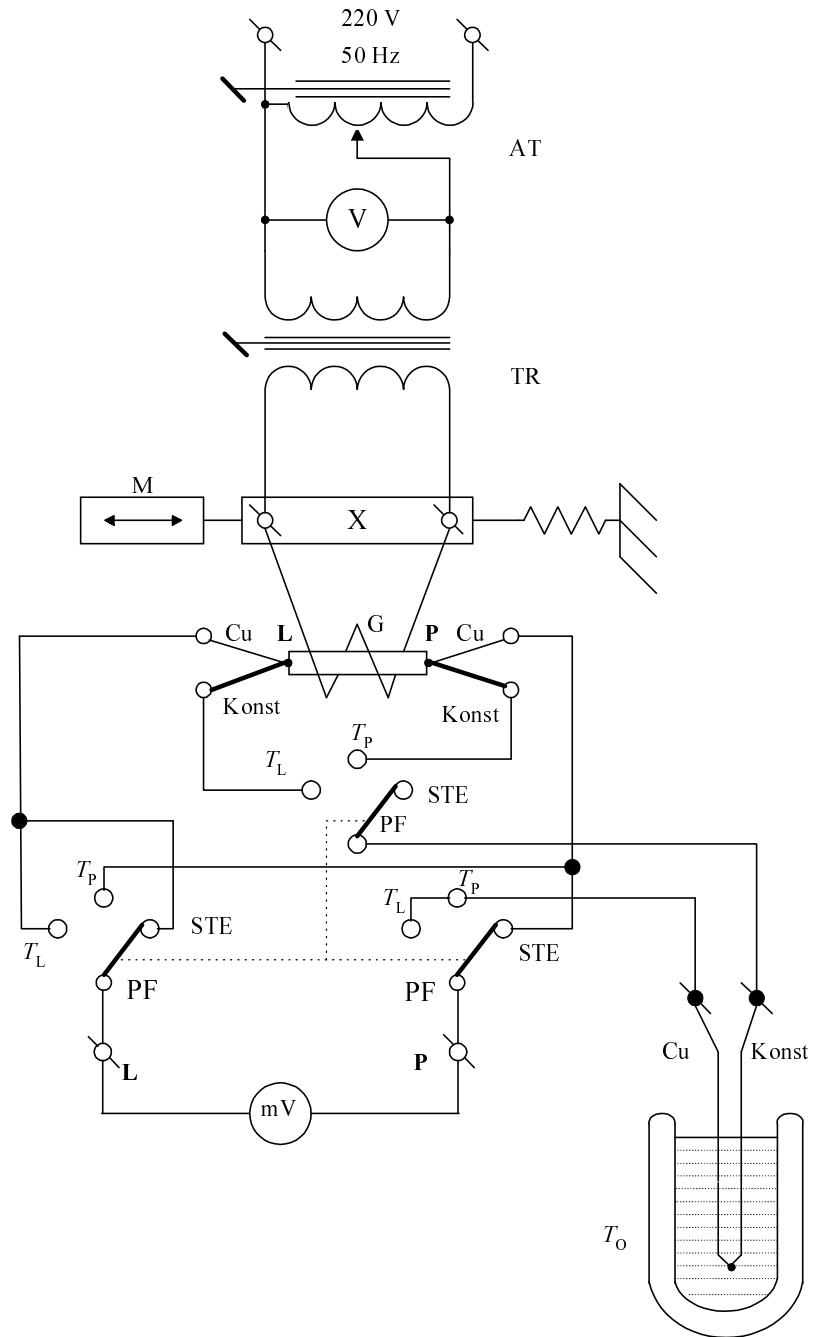
Schemat układu pomiarowego do badania efektu Seebecka przedstawiono na rysunku 9.9. Próbkę badanego materiału X jest umieszczona poziomo wewnątrz cylindrycznego grzejnika G i podtrzymywana za pomocą dwóch termopar Cu–konstantan. Temperaturę średnią próbki T reguluje się za pomocą autotransformatora AT, zasilającego przez transformator izolujący TR, grzejnik G. Gradient temperatury na próbce reguluje się właściwym ustawieniem położenia grzejnika G, przesuwanąc go w lewo lub prawo, wzdłuż osi próbki. Układ pozwala na pomiar temperatury lewego końca próbki – T_L , prawego końca próbki – T_P oraz napięcia termoelektrycznego ΔU . Wszystkie pomiary wykonuje się przy użyciu miliwoltomierza mV. Pomiary pozwalają wyznaczyć gradient temperatury na próbce ΔT

$$\Delta T = T_L - T_P$$

oraz jej temperaturę średnią

$$T = \frac{T_L + T_P}{2}.$$

Temperaturę końca próbki wyznacza się na podstawie napięcia mierzonego na odpowiedniej termoparze, połączonej różnicowo z termoparą odniesienia, umieszczoną w temperaturze T_0 oraz charakterystyki temperaturowej dla właściwego układu termopar.



Rys. 9.9. Schemat układu pomiarowego do badania efektu Seebecka:
 PF – przełącznik funkcyjny, M – mechanizm przesuwania grzejnika

Wartość współczynnika Seebecka α można teoretycznie wyznaczyć na podstawie pomiaru siły termoelektrycznej ΔU (ściślej napięcia termoelektrycznego, mierzonego w warunkach braku obciążenia) powstającej między złączami lub na próbce, na której występuje gradient temperatury ΔT (zależność (9.2)). Ze względu na możliwość popełnienia znacznych błędów, wynikających z występowania wielu czynników towarzyszących, wartość współczynnika Seebecka α wyznacza się z nachylenia charakterystyki $\Delta U = f(\Delta T)$, jak to przedstawiono na rysunku 9.10. Wartość współczynnika wyznacza się z nachylenia prostej, aproksymującej otrzymaną charakterystykę, za pomocą zależności

$$\alpha = \frac{\Delta U_0}{\Delta T_0}. \quad (9.21)$$

Na podstawie kierunku siły termoelektrycznej (patrz rys. 9.2) można określić znak współczynnika α , a tym samym znak podstawowych nośników ładunku. Znajomość wartości współczynnika α pozwala, za pomocą zależności (9.11), wyznaczyć koncentrację nośników podstawowych n lub p . Potrzebną gęstość stanów N_C lub N_V w przypadku krzemu i germanu można wyznaczyć z zależności

$$N_{C,V} = 2 \left(\frac{2\pi m_{n,p} kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (9.22)$$

w której:

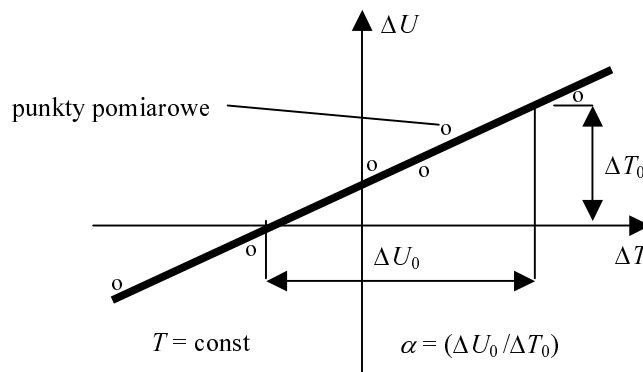
$m_{n,p}$ – masa efektywna nośników,

$h = 4,130 \cdot 10^{-11}$ eV/K – stała Plancka,

$k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ eV/K – stała Boltzmanna,

$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C – ładunek elektronu.

Układ na rysunku 9.9 pozwala wyznaczyć wartość współczynnika Seebecka.



Rys. 9.10. Wyznaczanie współczynnika Seebecka α . Przesunięcie charakterystyki $\Delta U = f(\Delta T)$ względem środka układu współrzędnych wynika z nieidentyczności termopar. Temperatura obu złącz (końców próbki) jest identyczna dla $\Delta U_0 = 0$

9.6. Program ćwiczenia

Badanie właściwości elementu Peltiera

1. Zmierzyć temperaturę na obu końcach pompy w funkcji czasu, przy zasilaniu warunkującym nagrzewanie badanego obiektu (pojemnik z wodą).
2. Wykonać charakterystykę nagrzewania i z nachylenia początkowego krzywej (rys. 9.8) wyznaczyć moc pompy.
3. Określić sprawność pompy, wyznaczając P_z w warunkach początkowych (dla których określono P_p).
4. Pomiary i obliczenia wykonać dla wyższej mocy zasilania pompy P_z .
5. Wyznaczyć wartość zastępczego współczynnika Peltiera i porównać jego wartość z danymi katalogowymi.

Wyznaczanie współczynnika Seebecka i ocena właściwości nośników ładunku

1. Wyznaczyć charakterystykę $\Delta U = f(\Delta T)$ dla średniej temperatury próbki 340 K dla 8 różnych gradientów temperatury (ΔT). Z nachylenia prostej aproksymującej otrzymaną charakterystykę wyznaczyć wartość współczynnika α .
2. Określić znak nośników podstawowych na podstawie kierunku siły termoelektrycznej.
3. Dla podanej masy efektywnej wyznaczyć koncentrację nośników większościowych w badanym materiale (zależności (9.11) i (9.22)) i porównać ją z danymi katalogowymi. W obliczeniach przyjąć $r = 0$.
4. Wartość współczynnika α oraz obliczenia powtórzyć dla średniej temperatury próbki wyższej o 20 K.

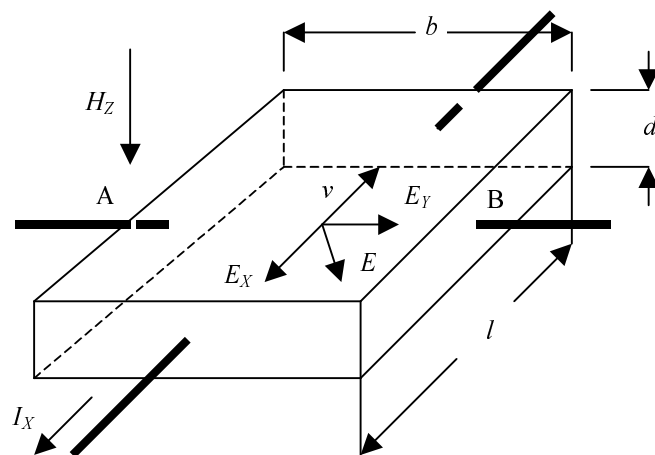
Literatura

1. Oreszkin P. T., *Fizika poluprovodnikov i dielektrikov*, Izd. Vysšaja Škola, Moskva 1977.
2. Tauc J., *Zjawiska fotelektryczne i termoelektryczne w półprzewodnikach*, PWN, Warszawa 1966.
3. Szalimowa K.W., *Fizyka półprzewodników*, PWN, Warszawa 1974.
4. Smith R.A., *Półprzewodniki*, PWN, Warszawa 1966.

10. BADANIE ZJAWISKA HALLA

Zjawisko odkryte w roku 1879 przez E.H. Halla polega na powstawaniu pola elektrycznego w objętości materiału mającego swobodne nośniki ładunku, w kierunku prostopadłym do płaszczyzny określonej wektorami wymuszających pól: magnetycznego oraz elektrycznego. Zjawisko to jest wykorzystywane przede wszystkim w konstrukcji przyrządów półprzewodnikowych, zwanych *hallotronami*. W praktyce zarówno sam efekt Halla, jak i hallotrony znalazły zastosowanie w pomiarach pól magnetycznych oraz we wszelkich układach korzystających z przetwarzania stałych i zmiennych pól magnetycznych na inne wielkości elektryczne.

Efekt Halla zilustrowano na rysunku 10.1. Płaskorównoległa płytkę z materiału przewodzącego (półprzewodzącego) o grubości d , długości l i szerokości b jest umieszczona w polu magnetycznym o natężeniu H_z , skierowanym prostopadle do największej powierzchni płytki. Jeżeli przez płytkę przepływa prąd elektryczny o natężeniu I_x w kierunku oznaczonym na rysunku 10.1, to między elektrodami A i B powstanie wspomniane pole elektryczne E_y i odpowiadająca mu różnica potencjałów U_y .



Rys. 10.1. Zjawisko Halla w płaskorównoległej próbce półprzewodnika

Uproszczoną analizę zjawiska można przeprowadzić przy założeniu, że jedynymi nośnikami ładunku w materiale płytki są elektrony. W polu elektrycznym E_X o kierunku zgodnym z wektorem I_X elektrony poruszają się w płytce w kierunku przeciwnym do zwrotu wektora pola, tzn. w kierunku wektora v , przedstawiającego ich prędkość. Na poruszające się w polu magnetycznym elektrony działa siła Lorentza, którą można zapisać w postaci wyrażenia (reguła lewej dłoni)

$$F_L = -\mu e (v \times H), \quad (10.1)$$

gdzie:

μ – przenikalność magnetyczna,

e – ładunek elektronu,

H – wartość natężenia pola magnetycznego działającego na elektron.

Działanie siły Lorentza prowadzi do odchylenia toru każdego elektronu rozpędzonego w polu E_X w kierunku określonym powyższym wzorem. Na skutek zmiany torów, elektrony gromadzą się na jednej powierzchni próbki (B), a zaczyna ich brakować przy drugiej (A). Proces odchylania elektronów od ich pierwotnego kierunku trwać będzie dopóty, dopóki powstałe poprzeczne pole elektryczne $E_Y = U_Y/b$ nie wytworzy siły Coulomba $F_C = -E_Y e$, przeciwdziałającej dalszemu odchylaniu elektronów i równoważającej siłę Lorentza F_L . W warunkach równowagi i dla geometrii pokazanej na rysunku 10.1 można zapisać

$$e E_Y = e v_X \mu H_Z, \quad (10.2)$$

gdzie:

v_X – składowa wektora prędkości v ,

H_Z – składowa wektora natężenia pola magnetycznego H .

Z zależności (10.2) otrzymuje się

$$E_Y = v_X \mu H_Z. \quad (10.3)$$

Składową prędkości elektronu v_X można w pierwszym przybliżeniu wyznaczyć z zależności

$$-v_X = u_e E_X, \quad (10.4)$$

w której u_e jest ruchliwością elektronów w materiale próbki.

Po połączeniu wyrażeń (10.4) i (10.3) otrzymuje się

$$E_Y = -u_e E_X \mu H_Z. \quad (10.5)$$

Natężenie prądu płynącego przez próbkę można wyznaczyć z prawa Ohma dla znanej konduktywności σ materiału próbki oraz jej wymiarów. Ponieważ

$$I_X = J_X b d = \sigma E_X b d, \quad (10.6)$$

gdzie J_X jest gęstością prądu I_X w płaszczyźnie elektrody o wymiarach $b \times d$, zaś

$$\sigma = e n u_e, \quad (10.7)$$

gdzie n jest koncentracją elektronów w materiale próbki.

Z zależności (10.5), (10.6) i (10.7) otrzymuje się

$$-E_Y = \frac{I_X \mu H_Z}{e n b d} \quad (10.8)$$

i ostatecznie zależność

$$U_Y = U_H = -\frac{I_X \mu H_Z}{e n d} = -R_H \frac{I_X \mu H_Z}{d}, \quad (10.9)$$

w której napięcie U_Y nazywa się najczęściej napięciem Halla – U_H , wyznaczoną zaś z zależności (10.9) wartość R_H

$$R_H = \frac{1}{e n} \quad (10.10)$$

nazywa się współczynnikiem lub stałą Halla.

Wyprowadzone zależności otrzymano przy założeniu, że jedynymi nośnikami ładunku w materiale próbki są elektrony. Można pokazać, że w przypadku nośników niosących ładunek dodatni (np. dziury) napięcie Halla U_H będzie miało znak dodatni.

Jeżeli w materiale za przewodnictwo elektryczne odpowiadają zarówno elektrony, jak i dziury, to składowe napięcia Halla od obu rodzajów nośników będą się wzajemnie kompensować, a wartość współczynnika Halla określa się z zależności

$$R_H = \frac{A}{e} \frac{u_e^2 p - u_h^2 n}{(u_e p + u_h n)^2}, \quad (10.11)$$

w której:

A – współczynnik bezwymiarowy (charakteryzujący mechanizm rozpraszania nośników ładunku, przyjmujący wartości w granicach 1 do 2),
 p i u_h – odpowiednio – koncentracja oraz ruchliwość dziur.

Pomiary napięcia Halla U_H są jedną z technik umożliwiających względnie proste pomiary natężenia pola magnetycznego (wyrażenie (10.9)) lub jego przetwarzanie na sygnał napięciowy. Zjawisko może być również stosowane w badaniach materiałowych, przy czym wyprowadzone zależności wskazują w tym przypadku na pewne istotne aspekty metrologiczne. Pomiary U_H mogą być prowadzone przy zasilaniu próbki (wymuszenie polem E) w warunkach stabilizowanego prądu I_X lub napięcia U_X . Jeżeli pomiar będzie wykonywany w warunkach zmiany temperatury próbki i przy stałej wartości pola H_Z , to w pierwszym przypadku ($I_X = \text{const}$) napięcie Halla będzie funkcją koncentracji nośników (zależność (10.9)), w drugim zaś ($U_X = \text{const}$) – funkcją ruchliwości nośników ładunku (zależność (10.5)).

Ponieważ znak napięcia Halla zależy od znaku nośników ładunku, można na jego podstawie określić typ nośników podstawowych, odpowiadających za przewodnictwo elektryczne w danej temperaturze.

Należy dodać, że zależność (10.4), tzn. $-v_X = u_e E_X$, jest słuszna jedynie dla składowej unoszenia v_D prędkości elektronu $v_X = v_D$, wynikającej z jego przyspieszenia w polu elektrycznym E . We wzorze Lorentza (10.1) występuje jednak całkowita prędkość elektronu $v = v_D + v_T$, na którą składa się, oprócz składowej v_D , wynikającej z uporządkowanego ruchu elektronów w kierunku pola, również składowa termiczna v_T , wynikająca z nieuporządkowanego ich ruchu termicznego. Zakładając $v = v_X = v_D$, pomijamy składową termiczną v_T . Uwzględnienie v_T prowadzi do zmiany wyrażenia na stałą Halla, które ostatecznie przyjmuje postać

$$R_H = \frac{A}{en}, \quad (10.12)$$

gdzie stała A przyjmuje różne wartości w zależności od mechanizmu rozpraszania nośników ładunku:

- $A = 1,17$ – przy rozpraszaniu nośników na atomach sieci podstawowej,
- $A = 1,11$ – przy rozpraszaniu na jonach sieci,
- $A = 1,98$ – przy rozpraszaniu na jonach domieszki,
- $A = 1$ – dla metali i półprzewodników zdegenerowanych.

10.1. Hallotrony i ich zastosowanie

Hallotrony są elementami półprzewodnikowymi o kształcie zbliżonym do przedstawionego na rysunku 10.1. Wykonywane są na bazie materiałów półprzewodnikowych z materiałów litych (Ge) oraz w technologii warstwowej. Ze względu na potrzeby metrologiczne (pomiaru pól w szczelinach), jak i racjonalnej konstrukcji określającej ich wysoką czułość (patrz zależność (10.9)), wykonywane są jako możliwie cienkie.

Techniczne zastosowanie hallotronów wymaga ich właściwego opisu. Na ogół podaje się charakterystyki lub odpowiadające im nachylenia, wiążące napięcie Halla U_H z wymuszającym polem elektrycznym E_X (prądem I_X) oraz polem magnetycznym H_Z lub indukcją $B_Z = \mu H_Z$. Do opisu stosuje się następujące rodzaje charakterystyk:

Rodzina charakterystyk wyjściowych:

$$U_H = f(I_Y) \quad \text{dla } I_X = \text{const}, \quad B_Z = \text{const} \text{ (rys. 10.2a).}$$

Rodzina charakterystyk oddziaływania prądu sterującego:

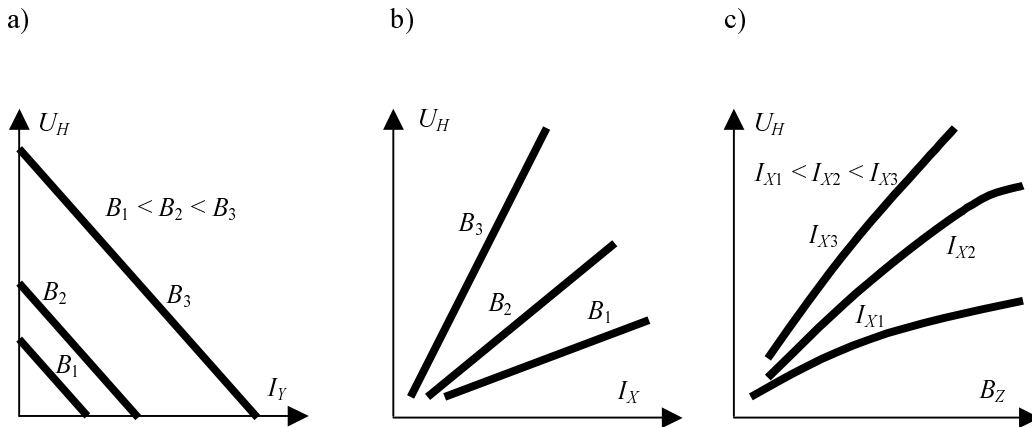
$$U_H = f(I_X) \quad \text{dla } I_Y = \text{const}, \quad B_Z = \text{const} \text{ (rys. 10.2b).}$$

Rodzina oddziaływania pola magnetycznego:

$$U_H = f(B_Z) \quad \text{dla } I_X = \text{const}, \quad I_Y = \text{const} \text{ (rys. 10.2c).}$$

Typowe charakterystyki przedstawiono na rysunku 10.2.

Z wymienionymi charakterystykami wiążą się odpowiednie czułości, określające w jakim stopniu na napięcie wyjściowe U_H (Hall) oddziałuje prąd sterujący I_X oraz indukcja magnetyczna B_Z .



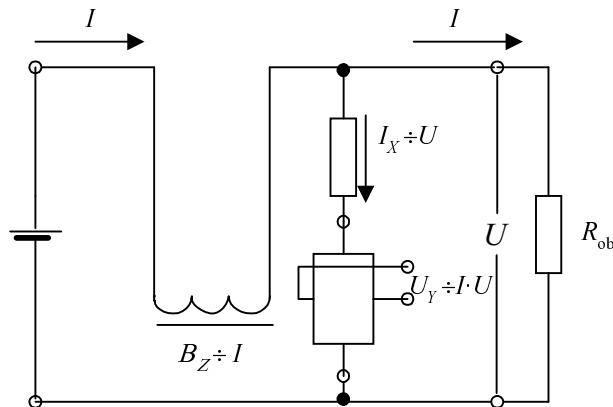
Rys. 10.2. Typowe charakterystyki hallotronu: a – wyjściowe – $U_H = f(I_Y)$,
 b – oddziaływania prądu sterującego – $U_H = f(I_X)$,
 c – oddziaływania pola magnetycznego – $U_H = f(B_Z)$

W przypadku charakterystyk nieliniowych odpowiednie czułości zależą od tzw. punktu pracy. Do najistotniejszych należą przyrostowa czułość polowa

$$\gamma_B = \frac{\Delta U_H}{\Delta B_Z} \Big|_{B_Z, I_X, I_Y} \tag{10.13}$$

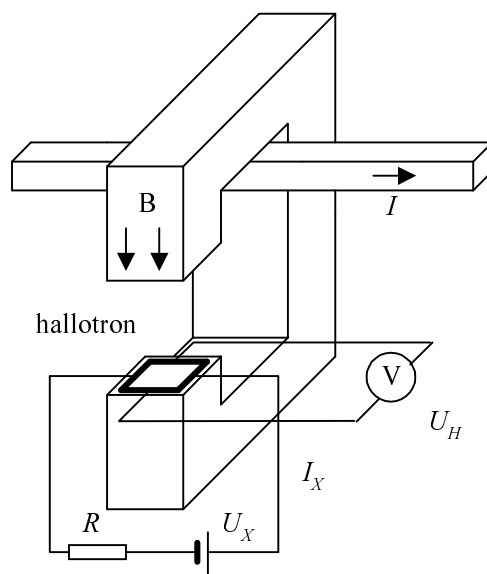
oraz przyrostowa czułość prądowa:

$$\gamma_I = \frac{\Delta U_H}{\Delta I_X} \Big|_{B_Z, I_X, I_Y} \tag{10.14}$$



Rys. 10.3. Zastosowanie hallotronu do pomiaru mocy prądu stałego

Hallotrony znalazły zastosowanie głównie w pomiarach pól magnetycznych stałych oraz zmiennych i to aż do częstotliwości rzędu gigaherców. Stosuje się je również do bezdotykowych pomiarów słabych i silnych prądów stałych i zmiennych, do pomiarów mocy prądu stałego i w innych układach pomiarowych oraz automatyki. Przykład zastosowania hallotronu do pomiaru mocy prądu stałego oraz do pomiaru silnych prądów przedstawiono na rysunkach 10.3 i 10.4.

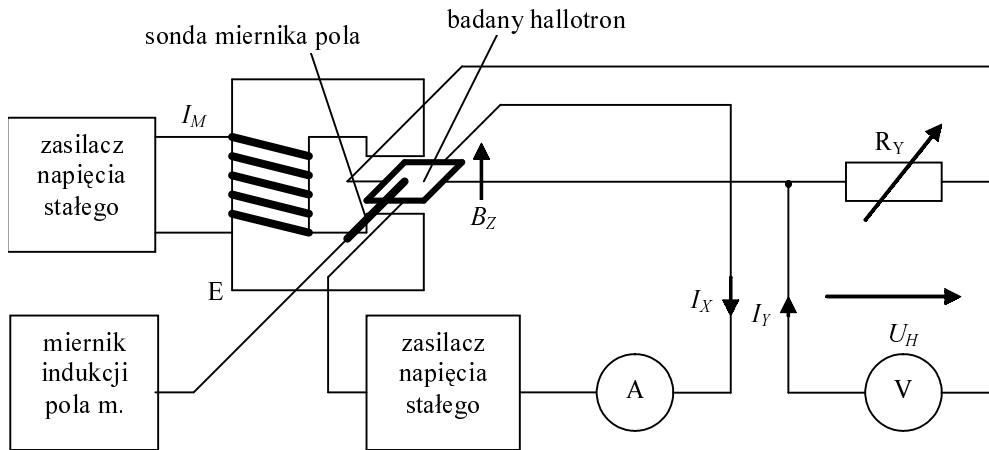


Rys. 10.4. Zastosowanie hallotronu do pomiaru silnych prądów stałych

10.2. Układ pomiarowy

Badanie efektu Halla na próbkach materiałów lub na gotowych hallotronach wykonuje się dla pól stałych i zmiennych. W przypadku badań w polach stałych można stosować układ pomiarowy, którego szkic przedstawiono na rysunku 10.5.

Badany hallotron lub próbka materiału umieszczane są w szczelinie elektromagnesu E , wytwarzającego w niej stałe pole magnetyczne o indukcji B_z . Wartość indukcji jest mierzona za pomocą umieszczonej w szczelinie sondy miernika indukcji, a jej wartość może być zmieniana za pomocą prądu I_M zasilającego elektromagnes. Polaryzację hallotronu polem E_x , wymuszającym przepływ prądu I_x , umożliwia zastosowanie dodatkowego zasilacza prądu stałego. Prąd I_x jest mierzony za pomocą amperomierza A . Efekt Halla jest oceniany na podstawie napięcia Halla U_H , mierzonego za pomocą woltomierza V (miliwoltomierza). Pomiar napięcia U_H , w warunkach różnego obciążenia prądem I_Y , umożliwia regulowany rezystor R_Y .



Rys. 10.5. Szkic układu pomiarowego do badania hallotronów
(objaśnienie w tekście)

10.3. Program ćwiczenia

Ocena parametrów nośników ładunku

1. Wyznaczyć w temperaturze otoczenia stałą Halla R_H (zależność (10.9)) w warunkach określonych przez B_z i I_x . Wyznaczoną wartość R_H porównać z danymi katalogowymi dla danego materiału próbki.
2. Dla znanej geometrii układu pomiarowego oraz kierunku pola magnetycznego określić znak nośników podstawowych na podstawie znaku napięcia U_H lub stałej Halla R_H .
3. Przyjmując $A = 1$ wyznaczyć koncentrację nośników podstawowych n i porównać z danymi katalogowymi (zależność (10.12)).
4. Dla próbki o znanych wymiarach geometrycznych (b , d , l) oraz rezystancji R_x w kierunku pola E_x , wyznaczyć ruchliwość u nośników większościowych (zależności (10.7) i (10.10)).

Badanie właściwości hallotronu

1. Wyznaczyć charakterystykę wyjściową $U_H = f(I_Y)$ dla trzech różnych wartości indukcji pola, przyjmując, jako parametry określające punkt pracy, prądy I_x oraz $I_{Y(H)} = \text{const}$ (określony podaną rezystancją obciążenia R_Y). Wykreślić charakterystykę we współrzędnych liniowych.
2. Wyznaczyć charakterystykę oddziaływania prądu sterującego $U_H = f(I_x)$ dla trzech różnych wartości indukcji pola B_z , przyjmując jako parametry określające

punkt pracy $I_Y = \text{const}$ oraz $I_{Y(H)} = \text{const}$ (określony podaną rezystancją obciążenia R_Y). Wykreślić charakterystykę $U_H = f(I_X)$ oraz wyznaczyć czułość prądową γ_I dla podanego punktu pracy (B_Z, I_X, I_Y).

3. Wyznaczyć charakterystykę oddziaływania pola magnetycznego $U_H = f(B_Z)$ dla trzech różnych wartości prądu I_X , przyjmując jako parametry określające punkt pracy $I_Y = \text{const}$. Wartość indukcji zmieniać w zakresie $0 < B_Z < B_{Z\text{max}}$. Wykreślić charakterystykę $U_H = f(B_Z)$ oraz wyznaczyć czułość polową γ_B dla podanego punktu pracy (B_Z, I_X, I_Y).

Literatura

1. Kucis E.V., *Metody issledowanija efekta Halla*, Izd. Sov. Radio, Moskwa 1974.
2. Świt A., *Przyrządy półprzewodnikowe*, WNT, Warszawa 1968 (oraz wydania późniejsze).
3. Girit W., Rauluszkiewicz J., *Hallotrony – zastosowanie zjawiska Halla w technice*, PWN, Warszawa 1961.
4. Szalimowa K.W., *Fizyka półprzewodników*, PWN, Warszawa 1974.
5. Kowtoniuk N.F., Koncevoj J.A., *Pomiary parametrów materiałów półprzewodnikowych*, PWN, Warszawa 1973.