

## Ćwiczenie 2

## POMIARY REZYSTANCJI, INDUKCYJNOŚCI I POJEMNOŚCI

## 1. Wiadomości ogólne

## 1.1. Rezystancja

Zasadniczą rolę w obwodach elektrycznych odgrywają przewodniki metalowe, z których wykonuje się przesyłowe linie energetyczne, instalacje elektryczne, elementy grzejne w odbiornikach, uzwojenia w maszynach i urządzeniach, itp.

Rezystancja przewodnika metalowego w zależności od wymiarów geometrycznych i rodzaju materiału wynosi:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S}; \quad \rho = \frac{1}{\gamma} \quad (2.1)$$

gdzie:  $l$  - długość przewodnika, m,

$S$  - pole przekroju poprzecznego przewodnika,  $\text{mm}^2$ ,

$\rho$  - rezystywność (opór właściwy),  $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ ,

$\gamma$  - konduktywność (przewodność właściwa),  $\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$ .

Rezystywność jest to cecha materiału z którego wykonany jest przewodnik. Zgodnie z (2.1), rezystywność jest to rezystancja w  $\Omega$  przewodnika o długości 1 m i przekroju  $1 \text{ mm}^2$ . Właściwości elektryczne przewodników metalowych powszechnie stosowanych w technice przedstawia tabela 2.1.

Tabela 2.1.

Materiał	$\rho$	$\gamma$	$\alpha$
	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	$\frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$	$\frac{1}{^\circ\text{C}}$
Srebro	0,016	62,5	0,0036
Miedź	0,0178	56	0,0039
Aluminium	0,0285	35	0,0041
Stal przewodowa	0,1÷0,15	10÷6,7	0,0046
Wolfram	0,055	18,2	0,0046
Chromonikielina	1,10	0,91	0,00015
Kanthal A <sub>1</sub>	1,49	0,672	0,000064
Manganin	0,44	2,30	0,00008
Konstantan	0,50	2,0	0,00003

Rezystancja przewodników metalowych wraz ze wzrostem temperatury rośnie;

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (2.2)$$

gdzie:  $R_t$  - rezystancja przewodnika w temperaturze  $t$ ,  
 $R_0$  - rezystancja przewodnika w temperaturze początkowej  $t_0$ ,  
 $\alpha$  - temperaturowy współczynnik rezystancji (tab. 2.1).

Temperaturowy współczynnik rezystancji określa względną zmianę rezystancji przewodnika przy zmianie temperatury o  $1^\circ\text{C}$ .

Zależność (2.2) pozwala określić temperaturę na przykład nagrzanego uzwojenia w maszynie, z przyrostu rezystancji:

$$t = \frac{R_t - R_0}{\alpha R_0} + t_0 \quad (2.3)$$

W obwodach elektrycznych można wyróżnić trzy poziomy rezystancji:

- rezystancja mała,  $R < 1\Omega$ , (przewody),
- rezystancja duża,  $R > 1\Omega$ , (odbiorniki),
- rezystancja bardzo duża (izolacja przewodów).

Izolacja przewodów stanowi podstawową ochronę od porażień elektrycznych.

Ogólne kryterium dobroci izolacji;

$$R_i \geq 1000 \frac{\Omega}{V} \quad (2.4)$$

Oznacza to, że w instalacji o napięciu 220 V, rezystancja izolacji powinna wynosić co najmniej 220 k $\Omega$ .

Do pomiarów poszczególnych rezystancji stosuje się:

- rezystancje małe: metoda techniczna z poprawnie mierzonym napięciem, techniczny mostek Thomsona, miernik RLC z odczytem cyfrowym,
- rezystancje duże: metoda techniczna z poprawnie mierzonym prądem, techniczny mostek Wheatstone'a, omomierz, miernik RLC,
- rezystancje bardzo duże: mierniki izolacji.

## 1.2. Indukcyjność

Indukcyjność własną cewki określa zależność;

$$L = \frac{z^2}{R_\mu} \quad (2.5)$$

gdzie:  $L$  - indukcyjność własna cewki, H ( $1\text{H} = 1\Omega \cdot 1\text{s}$ ),  
 $z$  - liczba zwojów cewki,

$R_\mu$  - reluktancja obwodu magnetycznego,  $\frac{1}{\text{H}}$ .

Reluktancja obwodu magnetycznego jednorodnego:

$$R_{\mu} = \frac{l_{sr}}{\mu \cdot S'} \quad (2.6)$$

gdzie:

$l_{sr}$  - średnia długość rdzenia magnetycznego, m,

$S'$  - powierzchnia przekroju rdzenia, m<sup>2</sup>,

$\mu$  - przenikalność magnetyczna materiału rdzenia,  $\frac{H}{m}$ .

Przenikalność magnetyczna próżni (powietrza) wynosi:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$

Indukcyjność własna cewki decyduje:

– o energii gromadzonej w cewce,

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2, \quad (2.7)$$

gdzie:  $W_m$  - energia gromadzona w cewce, J,

$I$  - natężenie prądu, A,

$L$  - indukcyjność własna cewki, H,

– o wartości siły elektromotorycznej samoindukcji,

$$e_s = -L \frac{di}{dt}, \quad (2.8)$$

gdzie:  $\frac{di}{dt}$  - szybkość zmian prądu w czasie,

– o reaktancji cewki,

$$X_L = 2\pi f L, \quad (2.9)$$

gdzie:  $X_L$  - reaktancja cewki,  $\Omega$ ,

$f$  - częstotliwość prądu płynącego przez cewkę, Hz,

– o stanach nieustalonych,

$$i = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2.10)$$

gdzie:  $i$  - prąd narastający w cewce włączony do źródła prądu stałego o napięciu  $U$ ,

$R$  - rezystancja cewki,

$T = \frac{L}{R}$  - stała czasowa cewki, sek,

– o częstotliwości rezonansowej  $f_r$  w połączeniu szeregowym z kondensatorem o pojemności  $C$ ,

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.11)$$

Dla cewki bez rdzenia ferromagnetycznego (cewka powietrzna) jej indukcyjność jest stała.

Dla cewki z rdzeniem ferromagnetycznym, indukcyjność jej jest zmienna i zależy: od rodzaju ferromagnetyka, indukcji magnetycznej w rdzeniu jak też od wykonania obwodu magnetycznego (rdzeń ze szczeliną powietrzną).

Indukcyjność własna cewki może być zmierzona bezpośrednio lub wyznaczona metodami pośrednimi.

Do pomiaru bezpośredniego stosuje się miernik RLC z odczytem cyfrowym.

Z metod pośrednich najczęściej stosuje się metodę techniczną pozwalającą określić reaktancję cewki  $X_L$  a tym samym i jej indukcyjność własną  $L$  (2.9).

W tym celu cewkę zasilają się ze źródła prądu przemiennego o znanej częstotliwości  $f$  i mierzy się napięcie  $U$  na cewce, prąd  $I$  płynący przez cewkę oraz moc czynną  $P$  pobieraną przez cewkę.

$$Z = \frac{U}{I}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}; \quad X_L = Z \cdot \sin \varphi; \quad L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2.12)$$

Dla cewki powietrznej, rezystancja wynikająca z zależności:

$$R = Z \cos \varphi = \frac{P}{I^2} \quad (2.13)$$

jest praktycznie rezystancją przewodu uzwojenia cewki.

Dla cewki z rdzeniem ferromagnetycznym, rezystancja wyznaczona z zależności (2.13) charakteryzuje straty mocy czynnej w uzwojeniu cewki jak też w rdzeniu.

### 1.3. Pojemność

Kondensator jest to urządzenie elektryczne składające się z dwóch przewodników metalowych (najczęściej folia aluminiowa) odizolowanych dielektrykiem.

Kondensator ma zdolność gromadzenia ładunków elektrycznych.

Napięcie zasilające  $U$ , ładunek  $Q$  i pojemność kondensatora  $C$  powiązane są zależnością:

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (2.14)$$

Podstawowa jednostka pojemności elektrycznej:

$$1\text{F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}}.$$

Mniejsze jednostki:

$$1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}; \quad 1\text{nF} = 10^{-9}\text{F}; \quad 1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}.$$

Pojemność kondensatora płaskiego:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S'}{d}, \quad (2.15)$$

gdzie:  $S'$  - powierzchnia jednej okładziny,  $m^2$ ,

$d$  - grubość dielektryka,  $m$ ,

$\varepsilon$  - stała elektryczna dielektryka,  $\frac{F}{m}$ .

Przenikalność elektryczna próżni:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{9} \frac{1}{4\pi} \cdot 10^{-9} \frac{F}{m}.$$

Jak wynika z zależności (2.15), znaczący wpływ na pojemność kondensatora ma rodzaj zastosowanego dielektryka (tab. 2.2).

Tabela 2.2.

Materiał	Powietrze	Szkło	Porcelana	Mikanit	Marmur	Woda
$\varepsilon_w$	1	3÷8	4,5÷5	5÷7	6÷8	80

gdzie:  $\varepsilon_w = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$  - przenikalność elektryczna względna dielektryka.

Ze względu na budowę wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje kondensatorów: blokowe, które mogą pracować zarówno w obwodach prądu stałego i przemiennego oraz elektrolityczne, które mogą pracować tylko w obwodach prądu stałego.

Ważniejsze zastosowania kondensatorów:

- energetyka - poprawa współczynnika mocy  $\cos \varphi$ ,
- prostowniki - wygładzanie napięcia wyjściowego,
- elektronika - układy rezonansowe (2.11),
- urządzenia iskrzące - zmniejszenie zakłóceń radiowych,
- elektronika przemysłowa - np. przekaźniki czasowe,

$$u_c = U \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (2.16)$$

gdzie:  $u_c$  - napięcie narastające na kondensatorze po włączeniu go przez rezystor  $R$  do źródła napięcia stałego  $U$ ,

$T = R \cdot C$  - stała czasowa, sek.

Pojemność kondensatora może być zmierzona bezpośrednio lub wyznaczona metodami pośrednimi.

Do pomiarów bezpośrednich stosuje się miernik RLC, natomiast pośrednio, na podstawie pomiarów napięcia przemiennego o znanej częstotliwości i natężenia prądu płynącego przez kondensator:

$$X_c = \frac{U}{I}; \quad X_c = \frac{1}{2\pi fC}. \quad (2.17)$$

## 2. Wykonanie ćwiczenia

Część praktyczna ćwiczenia obejmuje:

- pomiary rezystancji małych,
- pomiary rezystancji dużych,
- wyznaczenie temperatury cewki nagrzanej z przyrostu rezystancji,
- pomiary indukcyjności,
- pomiary pojemności.

### 2.1. Pomiary rezystancji małych

Dla dwóch przewodników uformowanych w postaci dwóch cewek jednowarstwowych o danej liczbie zwojów, średnicy cewki i średnicy drutu, pomierzyć ich rezystancje mostkiem Thomsona i porównać z rezystancjami obliczonymi w/g (2.1).

Dane cewek zestawień w tabeli 2.3.

Tabela 2.3.

Cewka	Liczba zwojów	Średnica cewki	Średnica drutu	Materiał
	-	mm	mm	-
C1				
C2				

Dla wyeliminowania rezystancji przewodów łączeniowych, badaną rezystancję przyłącza się do mostka czterema przewodami.

Dane mostka zamieścić w sprawozdaniu.

Dla obu cewek C1 i C2 dokonać po trzy odczyty.

Wyniki pomiarów i obliczeń zestawień w tabeli 2.4.

Tabela 2.4.

Cewka	Wyniki pomiarów			Wartość średnia	Obliczona z danych
	I	II	III		
	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
C1					
C2					

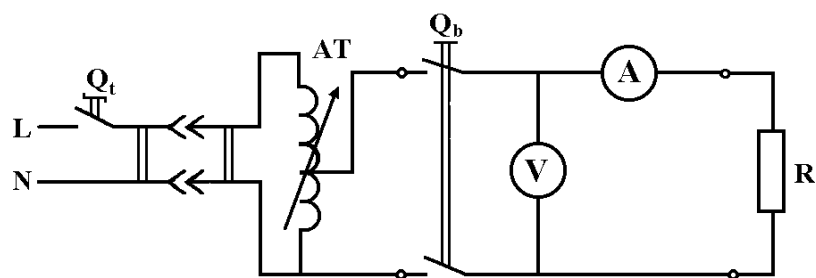
### 2.2. Pomiary rezystancji dużych

Pomiarów rezystancji jednego opornika dokonać metodami:

- miernikiem RLC z odczytem cyfrowym,

- technicznym mostkiem Wheatstone'a,
- metodą techniczną.

Do metody technicznej zastosować układ przedstawiony na rys.2.1.



Rys. 2.1. Schemat układu pomiarowego

Pomiary wykonać dla trzech wartości napięcia zasilającego badany opornik  $R_x$ , nastawianych autotransformatorem AT. Prąd płynący przez opornik  $R_x$  nie może przekroczyć jego prądu znamionowego. Dane mostka i mierników zamieścić w sprawozdaniu.

Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabeli 2.5.

Tabela 2.5.

Miernik RLC	Mostek Wheatstone'a	Metoda techniczna			
		U	I	$R_x$	$R_{x\text{śr}}$
$R_x$	$R_x$	V	A	$\Omega$	$\Omega$
$\Omega$	$\Omega$				

Oceń stosowane w pomiarach metody pomiarów rezystancji dużych pod względem pracochłonności.

### 2.3. Wyznaczenie temperatury cewki nagrzanej z przyrostu rezystancji

Do próby wykorzystać cewkę bez rdzenia uzwojoną drutem miedzianym. Wykorzystać układ pomiarowy z rys. 2.2. Autotransformatorem nastawić prąd w obwodzie około  $1,2 I_n$  ( $I_n$  - prąd znamionowy cewki) i nagrzewać cewkę około 10 minut. Wskazania mierników z początku i końca grzania zestawić w tabeli 2.6.

Tabela 2.6.

Stan cewki	U	I	P	R	t
	V	A	W	$\Omega$	$^{\circ}\text{C}$

zimny (temp. otoczenia)					
nagrzany					

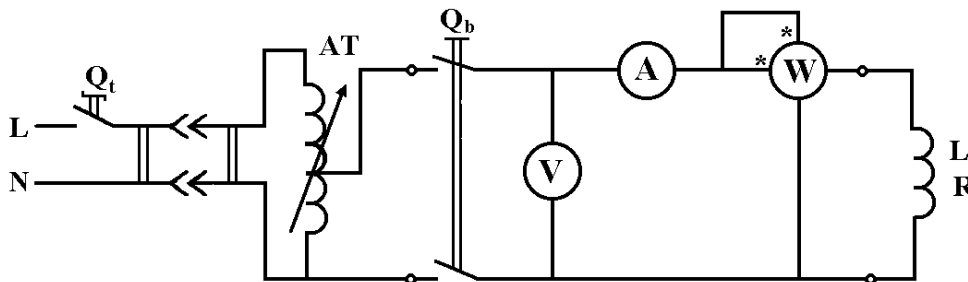
Rezystancje cewki R obliczać z zależności:

$$R = \frac{P}{I^2}$$

Na podstawie wyników uzyskanych z pomiarów i temperatury otoczenia  $t_0$  (temperaturę  $t_0$  odczytać z termometru znajdującego się w sali), określić z zależności (2.3) temperaturę do jakiej nagrzała się cewka.

#### 2.4. Pomiary indukcyjności

Pomiary indukcyjności cewki bez rdzenia wykonać dla trzech różnych liczb zwojów, miernikiem RLC i metodą techniczną.  
Do metody technicznej zastosować układ pomiarowy przedstawiony na rys.2.2.



Rys. 2.2. Układ pomiarowy do badania cewki

W czasie badań, prąd w obwodzie cewki nie może przekroczyć jej prądu znamionowego.  
Dane mierników i cewki zamieścić w sprawozdaniu.  
Wyniki pomiarów i obliczeń zestawić w tabeli 2.7.

Tabela 2.7.

Liczba zw.	Metoda techniczna								Miernik RLC
	U	I	P	$\cos\varphi$	Z	R	$X_L$	L	L
-	V	A	W	-	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	H	H

W obliczeniach korzystać z zależności (2.12) i (2.13).

Na podstawie uzyskanych wyników badań należy:

- sprawdzić zależność (2.5) porównując stosunek indukcyjności uzyskanych z pomiarów metodą techniczną ze stosunkiem liczb zwojów cewki odpowiadających tym indukcyjnościom;



$$L_1 = \frac{z_1^2}{R_\mu}; \quad L_3 = \frac{z_3^2}{R_\mu}; \quad \frac{L_1}{L_3} = \left(\frac{z_1}{z_3}\right)^2$$

- ocenić obie metody pomiaru indukcyjności pod względem dokładności otrzymanych wyników.

## 2.5. Pomiary pojemności

Wykonać pomiary pojemności dwóch kondensatorów miernikiem RLC i metodą techniczną.

Do metody technicznej zastosować układ pomiarowy z rys. 2.2. (bez watomierza).

Wyniki pomiarów (po jednym punkcie pomiarowym dla obu kondensatorów) i obliczeń (2.17) zestawić w tabeli 2.8.

Tabela 2.8.

Kondensator	Metoda techniczna				Miernik RLC	Pojemność dana
	U	I	$X_c$	C	C	C
	V	A	$\Omega$	$\mu F$	$\mu F$	$\mu F$
C1						
C2						

Ocenić obie metody pomiaru pojemności kondensatorów C, oraz porównać wyniki uzyskane z pomiarów z wartościami pojemności podanych na kondensatorach.

## 2.6. Wykaz przyrządów i aparatów

Należy zgodnie z wytycznymi podanymi w części ogólnej skryptu podać wszystkie przyrządy pomiarowe, urządzenia i aparaty wykorzystywane w ćwiczeniu.

### Zagadnienia do samodzielnego opracowania

1. Rezystancja przewodnika metalowego w zależności od wymiarów geometrycznych i rodzaju materiału oraz sens fizyczny rezystywności.
2. Wyznaczanie temperatury z przyrostu rezystancji.
3. Indukcyjność własna cewki: od czego zależy i o czym decyduje w obwodzie elektrycznym.
4. Narastanie prądu w cewce przyłączonej do źródła prądu stałego.: zależność, wykres  $i = f(t)$  oraz stała czasowa T.
5. Pojemność kondensatora: od czego zależy i o czym decyduje w obwodzie elektrycznym.
6. Ważniejsze zastosowania kondensatorów w technice.
7. Metody pomiarów rezystancji małych.
8. Metody pomiarów rezystancji dużych.
9. Metody techniczne pomiarów indukcyjności i pojemności.
10. Rezystancja izolacji: ogólne kryterium dobroci izolacji oraz przyrządy do jej pomiaru.

Literatura: [8, 10, 15, 16]