

# ĆWICZENIE 1

## Pomiar rezystancji, indukcyjności i pojemności

### Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie podstawowych metod pomiaru rezystancji, indukcyjności i pojemności.

### Program ćwiczenia:

#### 1. Wiadomości ogólne

##### 1.1. Pomiary rezystancji prądem stałym.

##### 1.1.1. Metoda bezpośrednia pomiaru rezystancji.

##### 1.1.2. Metoda mostkowa, przy użyciu technicznego mostka Wheatstone'a.

##### 1.1.3. Metoda mostkowa, przy użyciu technicznego mostka Thomsona.

##### 1.1.4. Metoda techniczna.

##### 1.1.5. Pomiar rezystancji za pomocą megaomomierza induktorowego (induktora)

##### 1.2. Pomiary indukcyjności i pojemności.

##### 1.2.1. Metody mostkowe

##### 1.2.2. Metoda techniczna

#### 2. Badania laboratoryjne.

##### 2.1. Pomiary rezystancji prądem stałym

##### 2.1.1. Metoda bezpośrednia.

##### 2.1.2. Metoda mostkowa.

##### 2.1.3. Metoda techniczna.

##### 2.1.4. Pomiar dużych rezystancji za pomocą megaomomierza.

##### 2.2. Pomiary indukcyjności i pojemności.

##### 2.2.1. Metoda techniczna.

##### 2.2.1. Metoda mostkowa.

#### 3. Dyskusja wyników pomiarów i wnioski.

# 1. Wiadomości ogólne

Podczas przepływu prądu elektrycznego, na skutek zderzeń elektronów swobodnych z cząstkami materiału przewodnika, występuje zjawisko zamiany energii elektrycznej w energię cieplną, która wydzielona jest na zewnątrz obwodu. Powyższe zjawisko charakteryzowane jest istnieniem oporu elektrycznego - rezystancji  $R$ , tego obwodu.

Rezystancja  $R$  obwodu, przy prądzie przemiennym jest zwykle większa niż przy prądzie stałym. Można to szczególnie zauważyć przy wysokich częstotliwościach. Występuje wtedy wypieranie elektronów do powierzchni zewnętrznej przewodu i w wyniku tego, gęstość prądu w przekroju poprzecznym przewodu jest nierównomierna, większa przy powierzchni, a mniejsza w jego środku.

Zjawisko to nazywa się naskórkowością, a konsekwencją jego są straty dodatkowe, które występują w obwodzie elektrycznym.

Z tego powodu w technice wysokich częstotliwości stosuje się przewody miedziane srebrzone lub nawet wykonane w postaci rurek. Przy częstotliwości technicznej 50Hz straty dodatkowe uwzględnia się w zasadzie tylko w torach prądowych o dużych przekrojach i przy kształtach prostokątnych, np. w szynach wiodących prąd w rozdzielni.

Poza zjawiskiem wydzielania się energii cieplnej z przepływem prądu łączy się nierozzerwalnie istnienie pola magnetycznego oraz pola elektrycznego, w otoczeniu przewodu wiodącego prąd. Zjawiska te związane są odpowiednio z indukcyjnością własną  $L$  oraz z pojemnością  $C$  obwodu.

Przy prądzie stałym indukcyjność  $L$  nie odgrywa żadnej roli, gdyż indukcyjny spadek napięcia na niej

$$U_L = L \frac{di}{dt}$$

jest równy zeru (ponieważ  $\frac{di}{dt} = 0$ ). Wobec tego część obwodu zawierająca indukcyjność można uważać za zwartą. Prąd płynący przez kondensator o pojemności  $C$  można określić równaniem:

$$i = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{du}{dt}$$

gdzie  $q$  - ładunek elektryczny.

Wobec tego, że dla prądu stałego  $\frac{du}{dt} = 0$ , pojemność  $C$  stanowi przerwę dla tego prądu.

Przy prądzie przemiennym należy uwzględnić zarówno siłę elektromotoryczną samoindukcji cewki, jak i prądu ładowania oraz rozładowania kondensatora.

Powyższe zjawiska w analizie obwodów prądu przemiennego uwzględnia się przez wprowadzenie dodatkowych oporów nazwanych opornościami biernymi lub reaktancjami.

Występuje zatem reaktancja indukcyjna określona zależnością:

$$X_L = \omega L = 2\pi f \cdot L \text{ [}\Omega\text{]} \quad (1.1)$$

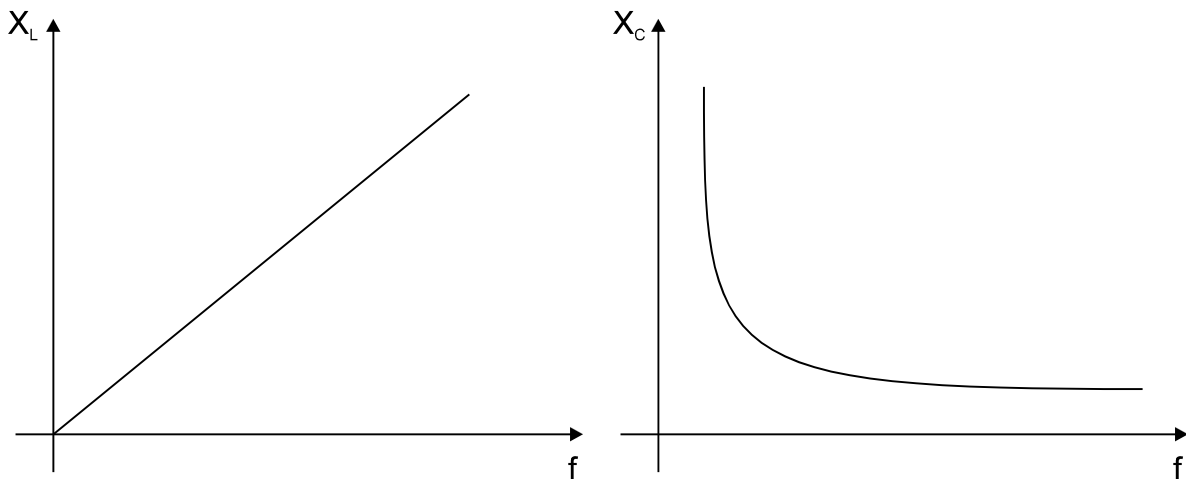
oraz reaktancja pojemnościowa:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (1.2)$$

gdzie:  $\omega$  - pulsacja prądu w obwodzie

$f$  - częstotliwość prądu w obwodzie

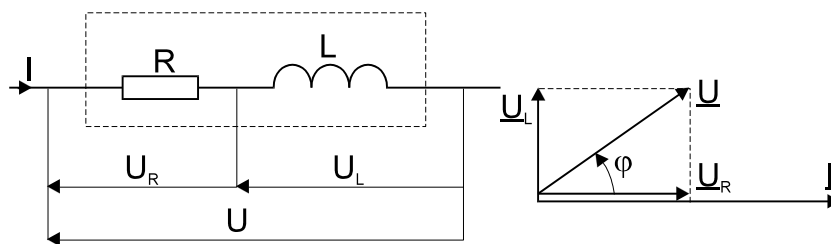
Zależność zmian reaktancji od częstotliwości podano na *rys.1.1*.



Rys.1.1. Przebiegi zmian reaktancji  $X_L$  i  $X_C$  w zależności od częstotliwości.

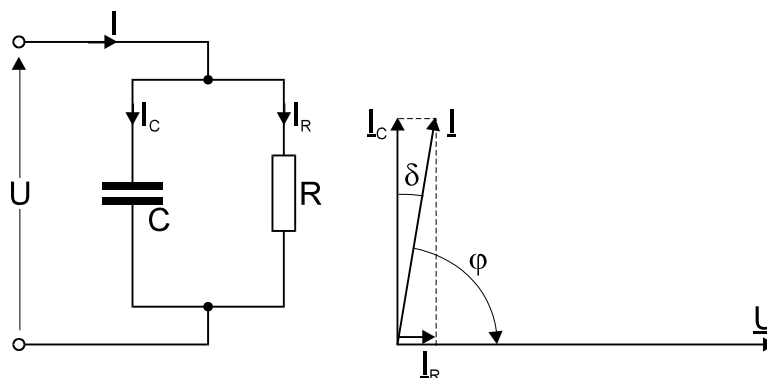
Elementy obwodu, w których występuje tylko jedna z omawianych powyżej wielkości  $R$  lub  $L$  lub  $C$ , nazywa się elementami idealnymi. W rzeczywistości wymienione wielkości występują zawsze jednocześnie, są nierozdzielnie związane z przepływem prądu. Elementy rzeczywiste można przedstawić na schemacie zastępczym, jako połączenie elementów idealnych. Metoda ta jest stosowana w elektrotechnice i umożliwia analizę właściwości obwodów elektrycznych.

Na przykład, rzeczywistą cewkę indukcyjną najczęściej przedstawia się jako szeregowe połączenie idealnej cewki  $L$  i idealnego rezystora  $R$  (rys.1.2a).



Rys.1.2a. Schemat zastępczy i wykres wskazowy rzeczywistej cewki indukcyjnej.

Rzeczywisty kondensator na schemacie zastępczym najczęściej przedstawia się jako równoległe połączenie idealnego kondensatora  $C$  i idealnego rezystora  $R$  (rys.1.2b).



Rys.1.2b. Schemat zastępczy i wykres wskazowy kondensatora rzeczywistego.

W celu scharakteryzowania strat energii w rzeczywistym kondensatorze podaje się kąt stratności  $\delta$  lub częściej stratność kondensatora.

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_R}{I_C}$$

Moc czynna tracona w kondensatorze wydziela się w postaci ciepła w złej jakości dielektryku tego kondensatora. Straty mocy w kondensatorze powinny być jak najmniejsze, a więc dobry kondensator powinien mieć mały kąt stratności (od ułamka stopnia do kilku stopni). Stratność kondensatora  $\operatorname{tg} \delta$  jest ważnym parametrem (poza pojemnością C) i dlatego istnieją specjalne automatyczne układy mostkowe do jej pomiaru.

Oporność zastępcza układu przedstawionego na *rys.1.2.* nazywa się opornością pozorną lub impedancją. Oznaczono ją literą Z. Moduł impedancji układu z *rys.1.2.* obliczamy ze wzoru

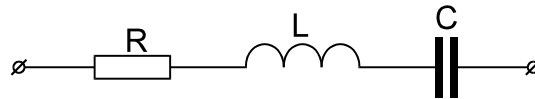
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad [\Omega] \quad (1.3.)$$

Schematy zastępcze elementów rzeczywistych zależą od częstotliwości przy której dane elementy pracują. W zależności od częstotliwości poszczególne elementy R, L, C będą odgrywać w tym schemacie mniejszą lub większą rolę.

Dla różnych częstotliwości można narysować odpowiednie schematy zastępcze stanowiące w ogólności połączenia szeregowe, równoległe lub szeregowo-równoległe elementów idealnych R, L, C.

Dla układu szeregowego R, L, C, podanego na *rys.1.3.* Moduł impedancji Z obliczamy z zależności:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad [\Omega] \quad (1.4.)$$



Rys.1.3. Szeregowe połączenie elementów R, L, C.

Prawo Ohma dla dowolnego elementu rzeczywistego lub całego obwodu dowolnie połączonego zasilanego napięciem sinusoidalnie przemiennym o wartości skutecznej U, można napisać w postaci

$$U = Z \cdot I \quad (1.5.)$$

gdzie I - wartość skuteczna prądu

Z – moduł impedancji obwodu

W przypadku połączenia równoległego elementów RLC wygodniej jest wprowadzić pojęcie przewodności obwodu, tzn. admitancji

$$Y = \frac{1}{Z}$$

Część rzeczywistą admitancji nazywamy konduktancją G lub przewodnością czynną, a część urojona, tzn. przewodność B nazywamy susceptancją. Moduł admitancji wyraża się wzorem

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}$$

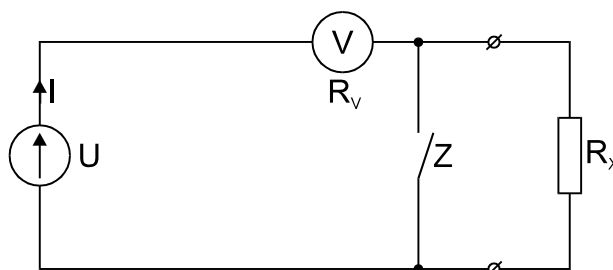
Prawo Ohma, dla połączenia równoległego można zapisać wzorem

$$I = Y \cdot U$$

## 1.1. Pomiary rezystancji prądem stałym

### 1.1.1. Metoda bezpośrednia pomiaru rezystancji

Pomiaru bezpośredniego wartości rezystancji można dokonać omomierzem. Układ omomierza szeregowego przedstawiono na rys.1.4.



Rys.1.4. Schemat omomierza woltmierzowego typu szeregowego.

V - woltmierz magnetoelektryczny o rezystancji  $R_v$  wyskalowany w omach

$R_x$  - rezystancja mierzona,

U - źródło zasilające,

Z - zwierak (w praktyce przewód zwierający zaciski pomiarowe).

Jeżeli rezystancję  $R_x$  zewrzymy zwierakiem Z, wówczas woltmierz wskaże napięcie źródła U, natomiast po otwarciu Z, woltmierz wskaże napięcie  $U_x$  (mniejsze od napięcia U o spadek napięcia na oporności  $R_x$ ).

Natężenie prądu płynącego w obwodzie przy otwartym zwieraku można określić wzorem:

$$I = \frac{U}{R_v + R_x} = \frac{U_x}{R_v}$$

czyli

$$U_x = U \cdot \frac{R_v}{R_v + R_x} \quad (1.6.)$$

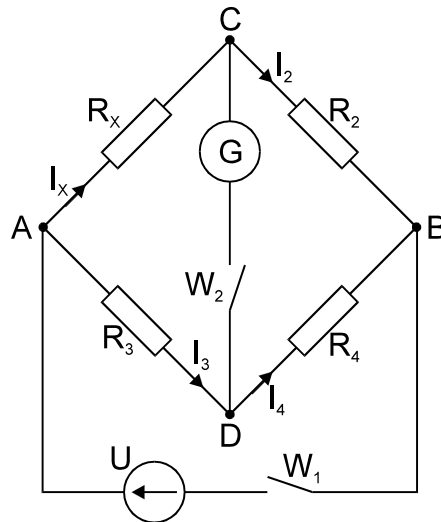
Wychylenie wskazówki miernika zależy od rezystancji mierzonej. Miernik jest wyskalowany w ten sposób, że maksymalne wychylenie organu ruchomego (końcowa wartość skali woltmierza) odpowiada zwarceniu rezystancji mierzonej, czyli  $R_x=0$ . Rozwarcie zacisków miernika, ( $R_x = \infty$ ) odpowiada zeru na skali woltmierza. Podziałka omomierza nie jest równomierna, zagęszcza się w kierunku rezystancji rosnących.

Jak wynika z zależności (1.6.) wskazania omomierza zależą od napięcia źródła zasilającego. Napięcie to w miarę upływu czasu maleje. W celu kompensacji wpływu zmiany napięcia źródła na wynik pomiaru, stosuje się przed każdym pomiarem zerowanie omomierza, na odpowiednim zakresie pomiarowym. Uzyskuje się je przez zmianę rezystancji dodatkowej w obwodzie zasilania lub przez zmianę położenia bocznika magnetycznego w mierniku czyli przez zmianę indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej przyrządu.

### 1.1.2. Metoda mostkowa przy użyciu technicznego mostka Wheatstone'a

Schemat mostka Wheatstone'a przedstawiony jest na rys.1.5.

Zawiera on cztery ramiona, w które włączone są trzy znane oporniki regulowane  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ , oraz rezystancja mierzona  $R_x$ .



Rys.1.5. Mostek Wheatstone'a

Pomiar rezystancji  $R_X$  polega na doprowadzeniu mostka do stanu równowagi, w którym przez galwanometr  $G$  nie płynie prąd ( $I_q=0$ ). Oznacza to, że potencjały punktów  $C$  i  $D$  są jednakowe, czyli  $U_{CD}=0$ . W stanie równowagi obowiązują zależności:

$$I_X=I_2 \qquad I_3=I_4 \qquad (1.7)$$

oraz

$$I_X R_X = I_3 R_3 \qquad R_2 I_2 = I_4 R_4 \qquad (1.8)$$

Dzieląc stronami wyrażenia (1.8) oraz uwzględniając (1.7) otrzymamy:

$$\frac{R_X}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \qquad (1.9)$$

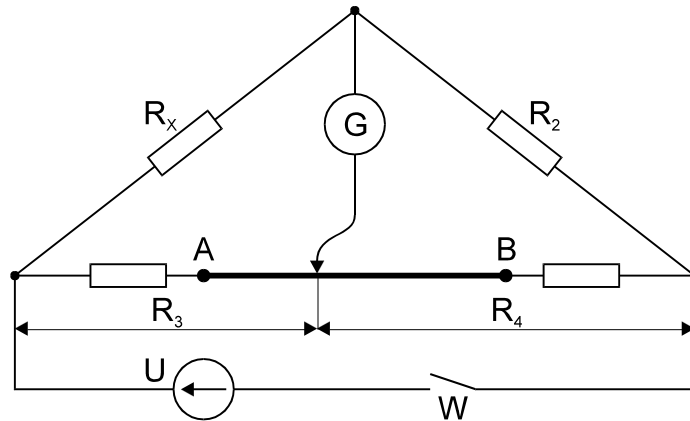
czyli

$$R_X = \frac{R_3}{R_4} \cdot R_2 \qquad (1.10)$$

W mostkach technicznych rezystancje  $R_3$  i  $R_4$  zastąpione są oporowym drutem ślizgowym, po którym przesuwa się ruchomy styk. Styk ten zaopatrzone jest w tarczę z podziałką pozwalającą odczytać wartość stosunku  $\frac{R_3}{R_4}$ . Rezystor  $R_2$  wykonany jest jako dekadowy, umożliwiając nastawienie następujących wartości:  $0,01\Omega$ ;  $0,1\Omega$ ;  $1\Omega$ ;  $0,01\Omega$ ;  $10\Omega$ ;  $100\Omega$ ;  $1000\Omega$ .

Wszystkie elementy układu mostkowego, łącznie ze źródłami zasilającymi w mostkach technicznych umieszczone są we wspólnej obudowie miernika. Możliwe jest również zasilanie mostka ze źródła zewnętrznego.

Zakres pomiarowy mostka Wheatstone'a zawiera się najczęściej w granicach od  $1\Omega$  do  $10^4\Omega$ . Dolna granica wynika z wpływu dodatkowej rezystancji przewodów łączeniowych oraz rezystancji miejsc styku przewodów z badanym rezystorem na rezystancję mierzoną  $R_X$ . Górna granica zakresu pomiarowego jest uzależniona od czułości zastosowanego wskaźnika równowagi mostka (galwanometru), wartości napięcia źródła zasilania oraz rezystancji  $R_2$ ,  $R_3$  i  $R_4$ .



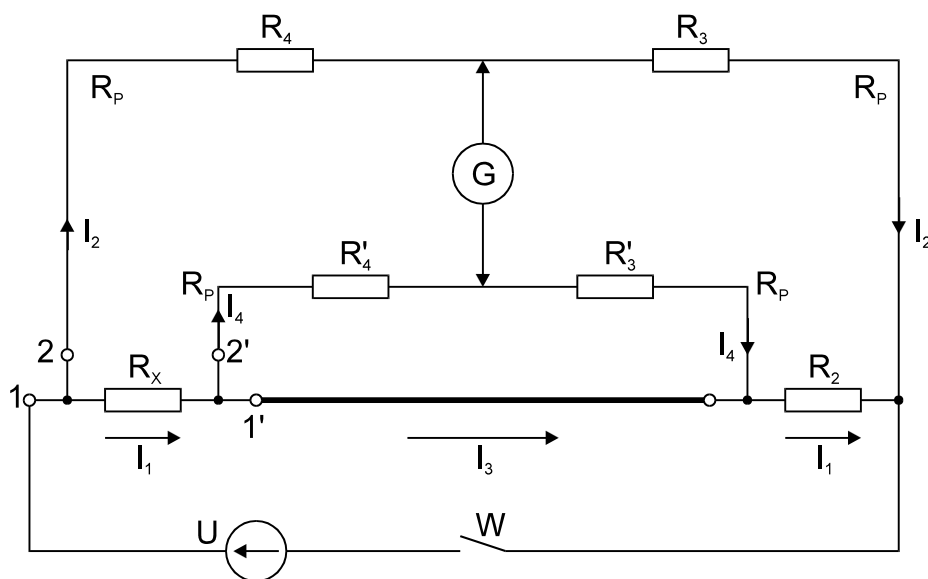
Rys.1.6. Mostek techniczny Wheatstone'a z drutem ślizgowym - AB

Z problemami tymi wiąże się także pojęcie czułości względnej mostka. Można stwierdzić, że czułość względna mostka (miara jego dokładności) jest największa, gdy:

- napięcie zasilające mostek będzie miało wartość maksymalną,
- czułość prądowa galwanometru będzie jak największa,
- rezystancja w gałęzi drugiej będzie równa rezystancji mierzonej, a rezystancja w gałęzi trzeciej będzie zawarta w przedziale  $R_3=(0,01...0,1)R_x$ .

Dokładność pomiaru w mostkach technicznych o drucie ślizgowym jest rzędu kilku procent. Znacznie większą dokładność oraz lepszy zakres pomiarowy zapewnia układ dekadowy mostka Wheatstone'a. W układzie tym rezystory  $R_2, R_3, R_4$  wykonane są jako oporniki dekadowe, czyli oporniki o dużej dokładności i wartościach różniących się dziesięciokrotnie np.  $1\Omega, 10\Omega, 100\Omega, 1000\Omega, 10000\Omega$ . Napięcia zasilania takiego mostka wynosi kilkadziesiąt woltów.

### 1.1.3. Metoda mostkowa przy użyciu technicznego mostka Thomsona



Rys.1.7. Schemat mostka Thomsona

Zakres pomiarowy mostka Thomsona wynosi zwykle od  $10^{-6}\Omega$  do  $1\Omega$ .

Układ połączeń tego mostka (rys. 1.7.) zmniejsza skutecznie wpływ rezystancji przewodów łączących oraz rezystancji styków. Rezystancje  $R_3$  i  $R'_3$  mają zawsze jednakowe wartości i są regulowane jednocześnie. Podobnie rezystancje  $R_4$  i  $R'_4$  regulowane są jednocześnie i mają wartości jednakowe. W przypadku równowagi mostka można napisać:

$$(R_4 + R_p)I_2 = (R'_4 + R_p)I_4 + R_X I_1 \quad (1.11)$$

$$(R_3 + R_p)I_2 = (R'_3 + R_p)I_4 + R_2 I_1 \quad (1.12)$$

Po podzieleniu stronami równań (1.11) i (1.12) oraz uwzględnieniu zależności  $R_3 = R'_3$  oraz  $R_4 = R'_4$  otrzymamy

$$(R_4 + R_p)(R_3 + R_p)I_4 + (R_4 + R_p)I_1 R_2 = (R_4 + R_p)(R_3 + R_p)I_4 + (R_3 + R_p)R_X I_1$$

czyli

$$R_X = R_2 \cdot \frac{R_4 + R_p}{R_3 + R_p} \quad (1.13)$$

Jeżeli rezystancje  $R_3$  i  $R_4$  będą miały dostatecznie duże wartości (nie mniejsze od  $10\Omega$ ), to można przyjąć, że wpływ rezystancji przewodów łączących  $R_p$  jest pomijalnie mały. Równanie (1.13) przyjmie wtedy postać:

$$R_X = R_2 \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (1.13)$$

W praktyce pomiarowej często stosuje się techniczny mostek Thomsona typu TMT - 2, którego zakres pomiarowy wynosi od  $0,4m\Omega$  do  $6\Omega$ . Jako źródło zasilania stosujemy zewnętrzne źródło napięcia stałego o wartości  $2V$ .

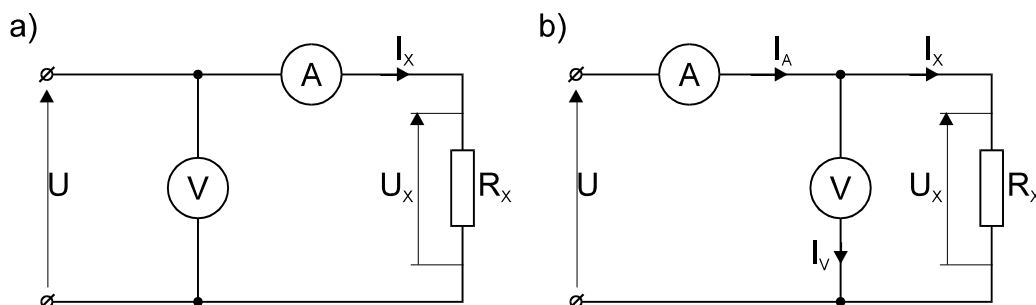
Przed pomiarem rezystancji  $R_X$  dokonujemy jej połączenia z mostkiem, czterema przewodami - dwoma z zaciskami napięciowymi 2-2' i dwoma z zaciskami prądowymi 1-1' mostka (rys. 1.7). Połączenie to zmniejsza wpływ przewodów łączących rezystancję mierzoną z mostkiem na wartość wyniku pomiaru.

#### 1.1.4. Metoda techniczna

Pomiaru rezystancji metodą techniczną dokonuje się za pomocą woltomierza i amperomierza. Należy zmierzyć spadek napięcia  $U_X$  na rezystancji badanej i prąd  $I_X$  przepływający przez tę rezystancję. Wówczas rezystancja mierzona

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} \quad (1.15)$$

Możliwe są dwa układy pomiarowe, podano je na rys. 1.8.



Rys.1.8. Schematy metody technicznej pomiaru rezystancji

a) układ do pomiaru rezystancji dużych

b) układ do pomiaru rezystancji małych



### UKŁAD DO POMIARU REZYSTANCJI DUŻYCH, WIĘKSZYCH OD $1\Omega$ .

W układzie jak na rys 1.8a amperomierz mierzy prąd przepływający przez rezystancję  $R_X$ , czyli:  $I_A=I_X$ , natomiast woltomierz mierzy sumę spadków napięć na rezystancji  $R_X$  oraz na amperomierzu, czyli

$$U_V = U_X + R_A I_A \quad (1.16)$$

gdzie:  $R_A$  – rezystancja wewnętrzna amperomierza.

Rezystancja obliczona na podstawie wskazań przyrządów wyraża się wzorem

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_X + R_A I_A}{I_A} = R_X + R_A \quad (1.17)$$

Zatem błąd metody pomiaru wynosi

$$\Delta R_X = R'_X - R_X = R_A \quad (1.18)$$

Rezystancja wewnętrzna amperomierza  $R_A$  jest niewielka zazwyczaj rzędu ułamka oma. Błąd metody będzie zatem tym mniejszy, im większa będzie rezystancja mierzona  $R_X$ . Gdy  $R_X > 100R_A$ , to błąd wynikający z pominięcia poprawki nie przekroczy 1%. Układ z rys.8 należy zatem stosować do pomiaru rezystancji dużych.

### UKŁAD DO POMIARU REZYSTANCJI MAŁYCH, MNIEJSZYCH OD $1\Omega$ .

W układzie jak na rys.1.8b, woltomierz wskazuje spadek napięcia na rezystancji mierzonej, czyli  $U_V=U_X$ , natomiast amperomierz mierzy sumę prądów przepływających przez rezystancję badaną i woltomierz:

$$I_A = I_X + I_V \quad (1.19)$$

przy czym prąd woltomierza:

$$I_V = \frac{U_V}{R_V} \quad (1.20)$$

gdzie:  $R_V$  - rezystancja wewnętrzna woltomierza.

Dla tego układu można napisać:

$$\begin{aligned} R_X &= \frac{U_X}{I_X} = \frac{U_V}{I_A - I_V} = \frac{\frac{U_V}{I_A}}{1 - \frac{U_V}{I_A R_V}} = \frac{R'_X}{1 - \frac{R'_X}{R_V}} = \frac{R'_X R_V}{R_V - R'_X} = \frac{R'_X (R_V - R'_X + R'_X)}{R_V - R'_X} = \\ &= R'_X \left(1 + \frac{R'_X}{R_V - R'_X}\right) = R'_X + \frac{R'^2_X}{R_V - R'_X}, \text{ gdzie } R'_X = \frac{U_V}{I_A} \end{aligned} \quad (1.21)$$

Bezwzględny błąd metody pomiaru wyniesie:

$$\Delta R_X = R'_X - R_X = -\frac{R'^2_X}{R_V - R'_X} \quad (1.22)$$

Rezystancja woltomierza jest na ogół bardzo duża. Błąd metody jest tym mniejszy, im rezystancja mierzona  $R_X$  jest mniejsza od rezystancji woltomierza  $R_V$ .

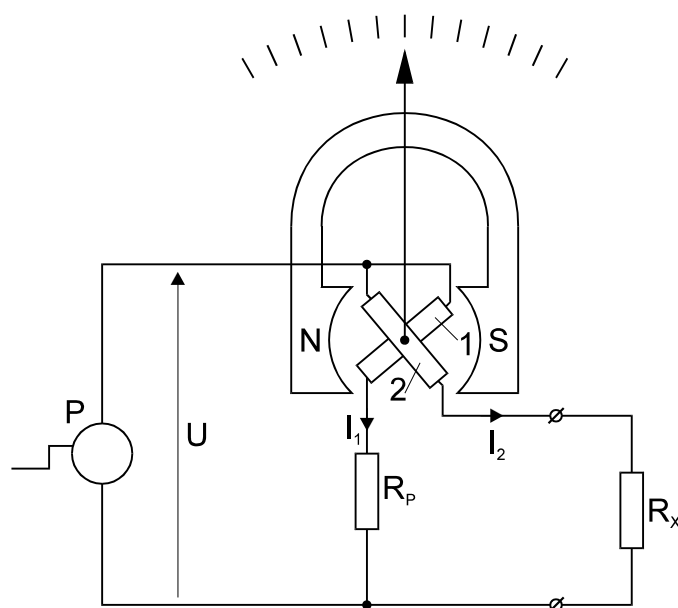
Gdy  $R_X < 100R_V$ , to błąd wynikający z pominięcia poprawki, nie przekroczy 1%. Układ z rys.1.8b należy stosować do pomiaru rezystancji małych.

W praktyce układ z rys.1.8b stosuje się do pomiaru rezystancji mniejszych od  $1\Omega$ , natomiast układ z rys.1.8a, do pomiaru rezystancji większych od  $1\Omega$ . Poprawki wyznacza się przy pomiarach dokładnych i wówczas konieczna jest znajomość rezystancji wewnętrznych zastosowanych przyrządów. W celu oszacowania błędu pomiaru rezystancji, oprócz błędu metody należy uwzględnić błędy systematyczne przyrządów stosowanych w układzie.

Zaletą metody technicznej jest możliwość pomiaru rezystancji urządzeń (elementów) znajdujących się w stanie pracy.

### 1.1.5. Pomiar rezystancji za pomocą megaomomierza induktorowego (induktora)

Schemat ideowy megaomomierza przedstawiono na rys.1.9. Zasadniczym elementem miernika jest ustrój pomiarowy magnetoelektryczny składający się z dwóch skrzyżowanych cewek umieszczonych w polu magnetycznym magnesu stałego. Ta odmiana miernika nosi nazwę miernika magnetoelektrycznego ilorazowego lub logometru magnetoelektrycznego. Szeregowo z cewką 1 włączona jest rezystancja porównawcza  $R_p$ , rezystancja mierzona  $R_x$  połączona jest szeregowo z cewką 2. W wyniku przepływających przez te cewki prądów  $I_1$  i  $I_2$  występują dwa przeciwnie skierowane momenty napędowe. Wartość każdego z momentów zależy od prądów w cewkach, czyli od rezystancji  $R_p$  i  $R_x$ .



Rys.1.9. Schemat megaomomierza, miernika magnetoelektrycznego ilorazowego.

Odchylenie organu ruchomego zależy od stosunku prądów

$$f(\alpha) = \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_x}{R_p}, \quad (1.23)$$

natomiast nie zależy od napięcia zasilającego.

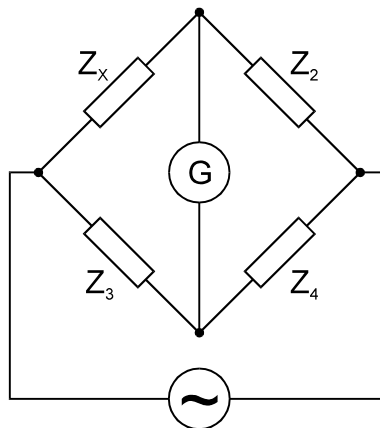
Mierniki typu ilorazowego nie posiadają momentu zwrotnego, czyli w stanie bezprądowym wskazówka zajmuje na skali dowolne położenie. W omiomierzach przeznaczonych do pomiaru rezystancji izolacji źródłem napięcia jest prądnica prądu stałego (P), napędzana ręcznie i wbudowana w obudowę miernika. Przyrządy tego typu nazywają się megaomomierzami induktorowymi, w skrócie - induktorami. Napięcie prądnicy induktora może wynosić 250V, 500V, 1000V, 2000V lub nawet 2500V. Wyboru induktora dokonuje się w zależności od napięcia badanej izolacji sieci lub kabla elektroenergetycznego.

Opór izolacji przewodów stosowanych w instalacjach elektroenergetycznych lub izolacji maszyn elektrycznych nie powinien być mniejszy niż  $1000\Omega$  na 1V napięcia sieci. Przy napięciu międzyprzewodowym 380V wymagana, minimalna wartość rezystancji izolacji wynosi więc 380 k $\Omega$ . W praktyce kontrolując stan izolacji, należy jednak pamiętać że rezystancja izolacji sieci będącej w dobrym stanie, tzn. nie zawilgoconej i nie uszkodzonej mechanicznie, powinna wynosić rzędu kilku lub kilkunastu M $\Omega$ . Dokonując pomiaru rezystancji należy badaną izolację lub maszynę elektryczną odłączyć od sieci zasilającej i

przeprowadzić pomiar rezystancji izolacji poszczególnych przewodów (uzwojeń) względem ziemi (zera) oraz pomiędzy przewodami. Dla jednego trójfazowego urządzenia elektrycznego lub trójfazowej sieci zasilającej wykonuje się więc łącznie sześć pomiarów.

## 1.2. Pomiary indukcyjności i pojemności

Do pomiarów indukcyjności  $L$  lub pojemności  $C$  stosuje się najczęściej mostki prądu przemiennego. W przeciwieństwie do mostków prądu stałego, gdzie mamy do czynienia z dwoma zasadniczymi układami, istnieje bardzo dużo układów mostkowych prądu przemiennego, różniących się między sobą rodzajem elementów umieszczonych w ramionach, przeznaczeniem, zakresem pomiaru itp.



Rys.1.10. Układ mostka prądu przemiennego.

Podstawowy układ mostka prądu przemiennego podano na *rys.1.10*. Ramiona mostka stanowią cztery impedancje  $Z_x$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$ . Mostek zasilany jest napięciem sinusoidalnie przemiennym. Jako wskaźnik równowagi służy galwanometr prądu przemiennego. W stanie równowagi przez galwanometr prąd nie płynie.

Stosując prawa Kirchhoffa dla mostka zrównoważonego, można określić niewiadomą impedancję  $Z_x$  w zależności od pozostałych impedancji  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_4$ , których wartość jest znana. Większość spotykanych mostków w dwu ramionach ma rezystancje, np.  $Z_3=R_3$  oraz  $Z_4=R_4$ . Wyrażenie na impedancję  $Z_x$  może przyjąć postać:

$$Z_x = \sqrt{R_x^2 + (\omega L_x)^2} \quad (1.24)$$

W przypadku pomiaru pojemności wyrażenie (1.24) przyjmuje postać:

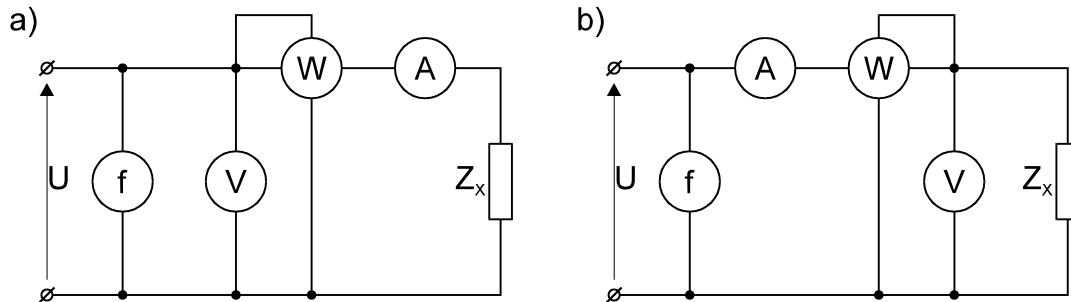
$$Z_x = \sqrt{R_x^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C_x}\right)^2} \quad (1.25)$$

Na podstawie wskazań mostka można określić zarówno  $R_x$  jak również  $L_x$  bądź  $C_x$ . Mostki do pomiaru indukcyjności bądź pojemności wykonywane są jako kompletne przyrządy, najczęściej ze skompensowanym wpływem pojemności i indukcyjności montażowych powodowanych przez przewody łączące. Są to zwykle opatentowane wykonania firmowe. Z najczęściej spotykanych mostków można wymienić mostek Maxwella - do pomiaru indukcyjności oraz mostki Wiena i Scheringa - do pomiaru pojemności.

### 1.2.2. Metoda techniczna

Metoda techniczna pomiaru indukcyjności bądź pojemności prądem przemiennym jest szczególnie przydatna wówczas, kiedy mamy do czynienia z elementami nieliniowymi, np. cewka z rdzeniem ferromagnetycznym. Impedancja takich elementów zależy od wartości przepływającego przez nie prądu, co praktycznie uniemożliwia korzystanie z metod mostkowych.

Podobnie, jak w przypadku pomiarów rezystancji metodą techniczną prądem stałym (patrz p.1.1.4.), do pomiaru impedancji prądem przemiennym można stosować dwa układy pomiarowe (rys.1.11.)



Rys.1.11. Schematy metody technicznej pomiaru impedancji  
 a) układ do pomiaru impedancji dużych  
 b) układ do pomiaru impedancji małych

Ze wskazań woltomierza V i amperomierza A można wyznaczyć wartość modułu impedancji  $Z_X$ .

$$Z_X = \frac{U}{I} \quad (1.26)$$

Moduł impedancji  $Z_X$  jest przy tym określony zależnością (1.24) lub (1.25). W celu wyznaczenia rezystancji  $R_X$  badanego elementu w przypadku, gdy jej wartość nie zależy od częstotliwości, można posłużyć się jedną z metod stosowanych do pomiaru rezystancji przy prądzie stałym.

W przypadku, gdy  $R_X$  zależy od częstotliwości, a więc jest inna przy prądzie stałym niż przy prądzie przemiennym (np. dla cewki z rdzeniem ferromagnetycznym) wyznaczymy ją pośrednio korzystając z pomiaru mocy czynnej P za pomocą watomierza.

Wtedy rezystancję  $R_X$  wylicza się ze wzoru:

$$R_X = \frac{P}{I^2} \quad (1.27)$$

Rezystancja ta, wówczas jest sumą rezystancji przewodów cewki i rezystancji wynikającej ze strat energii w rdzeniu (straty na histerezę i od prądów wirowych).

Jeżeli impedancja mierzona ma charakter indukcyjny, to wartość indukcyjności na podstawie wzoru (1.24) oblicza się ze wzoru:

$$L_X = \frac{\sqrt{Z_X^2 - R_X^2}}{2\pi f} \quad (1.28)$$

gdzie: f - częstotliwość, której wartość odczytuje się na częstościomierzu.

Przy pomiarach impedancji o charakterze pojemnościowym, wartość pojemności na podstawie zależności (1.25) określa się ze wzoru:

$$C_X = \frac{1}{2\pi f \sqrt{Z_X^2 - R_X^2}} \quad (1.29)$$

Należy podkreślić, że kondensatory rzeczywiste dla małych częstotliwości (technicznych) niewiele odbiegają od elementów idealnych, szczególnie nowoczesne kondensatory wykonane z materiałów syntetycznych. Można zatem przy pomiarach pojemności metodą techniczną pominąć rezystancję  $R_X$  kondensatora i wówczas.

$$C_X = \frac{I}{2\pi f U}$$

## 2. Badania laboratoryjne

### 2.1. Pomiar rezystancji prądem stałym

#### 2.1.1. Metoda bezpośrednia

Pomiarów dokonano omomierzem typu .....

Wyniki pomiarów

Symbol badanego rezystora	R
	$\Omega$
$R_1$	
$R_2$	
$R_3$	
$R_4$	
$R_5$	
$R_6$	

#### 2.1.2. Metoda mostkowa

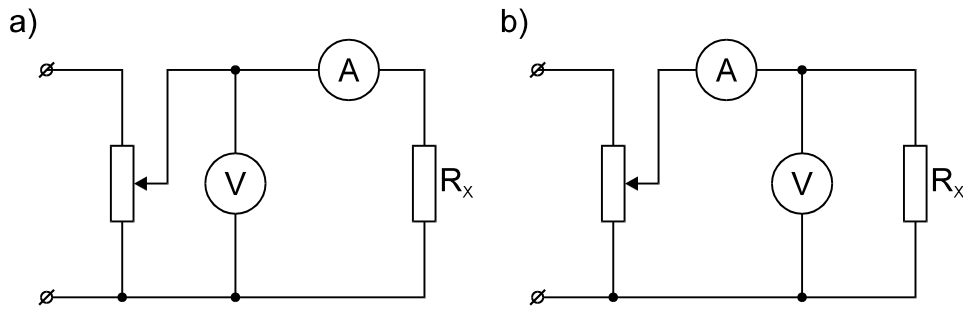
Do pomiarów użyto mostków technicznych o danych:

1. Wheatstone'a .....
2. Thomsona .....

Wyniki pomiarów

Mostek	Rezystor		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$
Wheatstone'a			
Thomsona			

### 2.1.3. Metoda techniczna



Rys.1.12. Metoda techniczna pomiaru rezystancji

- a) pomiar rezystancji dużych  
b) pomiar rezystancji małych

R - opornik suwakowy .....  
A - amperomierz .....  
V - woltomierz .....  
Rx - rezystancja badana .....

#### Wyniki pomiarów

Rezystancja badana	Układ	$I_A$	$U_V$	$R_A$	$R_V$	$R'_X$	$R_X$	$\Delta R_X$	$\frac{\Delta R_X}{R_X}$
		A	V	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	%
	a								
	b								
	a								
	b								

Przykłady obliczeń:

W układzie a:

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A} =$$

$$\Delta R_X = R_A =$$

$$R_X = R'_X - R_A =$$

$$\frac{\Delta R_X}{R_X} =$$

W układzie b:

$$R'_X = \frac{U_V}{I_A} =$$

$$\Delta R_X = R'_X - R_X =$$

$$R_X = R'_X + \frac{R_X'^2}{R_V - R'_X} =$$

$$\frac{\Delta R_X}{R_X} =$$

### 2.1.4. Pomiar rezystancji dużych za pomocą megaomomierza

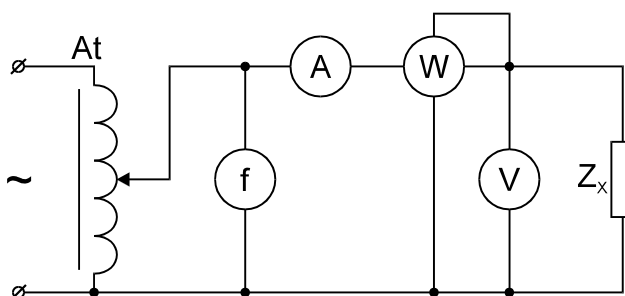
Pomiarów dokonano megaomomierzem .....

## Wyniki pomiarów

Symbol badanego rezystora	R
	MΩ

## 2.2. Pomiary indukcyjności i pojemności

### 2.2.1. Metoda techniczna



Rys.1.13. Metoda techniczna pomiaru impedancji

- At - autotransformator .....
- f - częstotściomierz .....
- W - watomierz .....
- A - amperomierz .....
- V - woltomierz .....
- Z<sub>x</sub> - impedancja badana .....

## Wyniki pomiarów

f=.....Hz

Impedancja badana	I <sub>A</sub>	U <sub>V</sub>	P <sub>W</sub>			Z	R	L	C
	A	V	dz	W/dz	W	Ω	Ω	mH	μF
cewka indukcyjna									
kondensator									

Przykłady obliczeń:

Z=

R=

L=

## 2.2. Metoda mostkowa

Do pomiarów indukcyjności i pojemności użyto mostka uniwersalnego RLC o danych

.....

## Wyniki pomiarów

Impedancja badana			Metoda mostkowa	Metoda techniczna
Cewka indukcyjna	L	mH		
Kondensator	C	$\mu\text{F}$		

### 3. Dyskusja wyników pomiarów i wnioski

Porównać dokładność pomiaru rezystancji poznanymi przyrządami i stosowanymi metodami.

Po obliczeniu pojemności i indukcyjności porównać otrzymane wartości z pomierzonymi metodą mostkową. Porównać wyniki badań indukcyjności cewki powietrznej i cewki z rdzeniem ferromagnetycznym.