

# WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA

## ĆWICZENIA LABORATORYJNE Z FIZYKI 1

prowadząc(a/y) .....

grupa ..... podgrupa ..... zespół ..... semestr **letni** roku akademickiego 202...../202.....

student(ka) .....

### SPRAWOZDANIE Z PRACY LABORATORYJNEJ nr 48

#### PRAWA KIRCHHOFFA I PRAWO OHMA

pomiary wykonano dnia ..... jako ćwiczenie ..... z obowiązujących 5.....

<b>OCENA ZA TEORIĘ</b>				
<i>data</i>				
<b>Podejście</b> (ostateczny termin)	<b>1</b> (zasadnicze, przed następnymi zajęciami)	<b>2</b> (poprawa, tydzień przed sesją zasad.)	<b>3</b> (poprawa, tydzień przed końcem sesji zas.)	<b>4</b> (poprawa, tydzień przed końcem sesji popr.)
<b>OCENA KOŃCOWA</b>				
<i>data</i>				

Po wykonaniu sprawozdania wypełnij poniższy **Arkusz Samokontroli** sprawdzając czy wszystkie wymagane czynności zostały wykonane wpisując znak **x** w odpowiednie kwadraty.

<b>1. Dane informacyjne</b> <input type="checkbox"/> <b>czy na karcie tytułowej znajdują się:</b> a. dane wykonawcy, b. numer grupy, c. tytuł ćwiczenia laboratoryjnego, d. data wykonania sprawozdania, e. oraz czy wszystkie strony są ponumerowane.	<b>2. Kompletność sprawozdania</b> <input type="checkbox"/> <b>czy sprawozdanie zawiera:</b> a. wstęp teoretyczny z celem ćwiczenia i krótkim opisem zagadnienia fizycznego, którego dotyczy ćwiczenie, b. kartę pomiarową z podpisem prowadzącego, c. obliczenia opatrzone wyjaśniającym opisem, d. komplet ponumerowanych i opatrzonych pełnym tytułem wykresów i tabel, e. wyniki wszystkich poleceń wymienionych w pkt. 4 instrukcji do ćwiczenia (Opracowanie wyników pomiarów).  <b>3. Poprawność obliczeń</b> <input type="checkbox"/> <b>czy w sprawozdaniu:</b> a. podano przykłady obliczeń wraz z rachunkiem jednostek, b. wstawione do wzoru liczby sprowadzono do tych samych jednostek (np. m, s, itp.), c. określono wszystkie wymagane niepewności pomiarowe, d. wyznaczono niepewności obliczonych wielkości, w tym składowe niepewności złożonych, e. podano wynik i jego niepewności dbając o właściwą liczbę cyfr znaczących.	<b>4. Poprawność wykresów</b> <input type="checkbox"/> <b>czy wykresy:</b> a. wykonano na papierze milimetrowym, b. skale osi dobrano tak, aby wykres wypełniał większość obszaru arkusza, c. opisano osie wraz z jednostkami np. okres $T$ [s], długość wahadła $L$ [cm], d. naniesiono punkty pomiarowe i ich niepewności jeśli są widoczne w skali rysunku, e. dokonano aproksymacji wyników krzywą (ale nie linią łamaną), dla prostej podano jej równanie. <b>5. Poprawność tabel</b> <input type="checkbox"/> <b>czy w tabelach:</b> a. dane pomiarowe opatrzone są mianem (jednostką) – w nagłówkach kolumn, b. właściwie określono liczbę cyfr znaczących dla danych zawartych w tabelach. <b>6. Podsumowanie</b> <input type="checkbox"/> <b>czy w podsumowaniu i wnioskach:</b> a. podano wynik końcowy wraz z jego niepewnością z właściwą liczbą cyfr znaczących i jednostką, b. oceniono wpływ rodzaju błędów pomiarowych na wynik końcowy, c. zawarto wnioski dotyczące przebiegu i oceny pomiarów (np. porównanie z literaturą).
--	---	--

Pomiary wykonane przez .....

Tab.1. Wyniki pomiarów natężenia prądu, napięcia i rezystancji dla badanych rezystorów.

	I [....]	U [....]	R <sub>zmierzone</sub> [....]
dla R <sub>1</sub>			
dla R <sub>2</sub>			
dla R <sub>3</sub>			
dla R <sub>4</sub>			
dla R <sub>zs</sub> (...,...) <i>szeregowo</i>			
dla R <sub>zr</sub> (...,...) <i>równolegle</i>			

Tab. 2. Wyniki pomiarów natężenia prądu i napięcia dla szeregowego połączenia rezystora z ogniwem.

R [kΩ]	I [.....]	U [.....]
R <sub>1</sub>		
R <sub>2</sub>		
R <sub>3</sub>		
R <sub>4</sub>		

Oszacowanie niepewności narzędzi pomiarowych:

Przyjąć klasę miernika 0,5 (czyli 0,5%). Niepewność mierzonej wielkości to iloczyn klasy miernika i ustawionego na nim zakresu pomiarowego.

zakres pomiaru rezystancji ..... niepewność  $\Delta R =$  .....

zakres pomiaru natężenia ..... niepewność  $\Delta I =$  .....

zakres pomiaru napięcia ..... niepewność  $\Delta U =$  .....

wartość znamionowa SEM baterii .....

Data i podpis osoby prowadzącej .....

# PRAWA KIRCHHOFFA I PRAWO OHMA

## 1. Opis teoretyczny

Od roku 1825 Georg Simon Ohm (wówczas nauczyciel matematyki w gimnazjum) badał zależność prądu elektrycznego od wymiarów przewodnika i przyłożonego napięcia. W 1826 Ohm stwierdził, iż prąd płynący w przewodniku jest proporcjonalny do przyłożonego napięcia.

### Prawo Ohma

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

gdzie  $R$  nazywamy *rezystancją* lub oporem elektrycznym.

Natomiast odwrotność rezystancji  $G=1/R$  nazywamy *konduktancją*

Obecnie wiadomo, że wiele materiałów zachowuje się inaczej i proporcjonalność napięcia i prądu nie jest zachowana (prawo Ohma nie jest spełnione). Nawet w samych rezystorach przepływ prądu powoduje wzrost ich temperatury (ciepło Joule'a-Lenza  $Q=U \cdot I \cdot t$ ), a co za tym idzie i rezystancji. Zmiana ta jednak w praktyce jest na tyle nieistotna, iż zwykle się ją pomija. Gdybyśmy jednak chcieli tę cechę wykorzystać, wówczas szuka się materiałów, gdzie ta zależność jest znacząca. Materiały i elementy elektroniczne, dla których spełnione jest prawo Ohma nazywa się liniowymi (lub omowymi, np. rezystory, przewody metalowe), a dla których nie jest – nieliniowymi (lub nieomowymi, np. diody półprzewodnikowe).

### Zależność oporu od rozmiaru przewodnika.

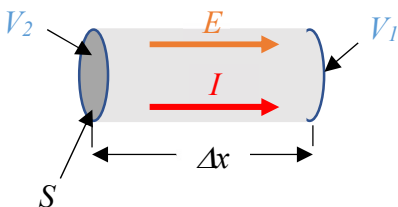
Opór przewodnika o stałym przekroju poprzecznym jest proporcjonalny do jego długości  $l$  i odwrotnie proporcjonalny do jego pola przekroju  $S$

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

Zależność ta została określona doświadczalnie przez Davego, a wyjaśniona teoretycznie przez Drudego w oparciu o jego model elektronów swobodnych. Stała  $\rho$  nazywa się rezystywnością lub oporem właściwym (rezystancja materiału o długości 1 m i polu przekroju 1 m<sup>2</sup>) i jest to wielkość charakterystyczna dla danego materiału. Odwrotność rezystywności nazywa się konduktywnością lub przewodnictwem właściwym i oznaczana się przez:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

### Prawo Ohma w postaci różniczkowej



Prawo Ohma dla elementu materiału z rys. obok, można zapisać:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (4)$$

gdzie  $\Delta V=(V_2 - V_1)$ , oznacza zmianę potencjału na końcach elementu czyli napięcie  $U$ ;  $l=\Delta x$ ;

$S$  - powierzchnia;  $\Delta x$  - długość;  $I$  – natężenie prądu;  $E$  - natężenie pola elektrycznego.

Zależność między potencjałem a natężeniem pola elektrycznego wyraża związek:

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}V \quad (5)$$

Natężenie pola elektrycznego jest skierowane w kierunku malejącego potencjału. W prawie Ohma  $U$  oznacza moduł  $dV$ , dlatego nie będziemy tutaj uwzględniać znaku „-” (zwrot wektora). Wówczas wartość natężenia pola elektrycznego przyjmie prostą postać:

$$E = \frac{\Delta V}{\Delta x} \quad (6)$$

Korzystając z definicji gęstości prądu  $j$

$$j = \frac{I}{S} \quad (7)$$

wykorzystując równania 4, 6 i 7, otrzymujemy:

$$R = \frac{E \Delta x}{j S}$$

Wstawiając do równania 2 mamy:

$$\varrho \frac{\Delta x}{S} = \frac{E \Delta x}{j S}$$

stąd

$$\varrho = \frac{E}{j} = \frac{1}{\sigma}$$

Przekształcając to wyrażenie otrzymujemy tzw. prawo Ohma w postaci różniczkowej, które w zapisie wektorowej ma postać:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (8)$$

W ogólnym przypadku w kryształach anizotropowych wektory gęstości prądu i natężenia pola elektrycznego nie mają tych samych kierunków, wtedy konduktywność nie może być zapisana jako wielkość skalarna. Jest ona wtedy tzw. tensorem drugiego rzędu o 9 składowych. W naszym przypadku konduktywność jest wielkością skalarną.

#### I prawo Kirchhoffa:

**Suma natężeń prądów wpływających do węzła jest równa sumie natężeń prądów wypływających z tego węzła.**

Zakładając, że prądy, które wpływają mają znak „+”, a te co wypływają znak „-” możemy zapisać:

$$\sum I_i = 0$$

Jest to łatwe do wytłumaczenia prawo. Ponieważ prąd jest to przepływ ładunku w czasie ( $I = dq/dt$ ), w związku z tym ilość ładunku wpływającego do danego węzła obwodu musi się równać ilości ładunku wypływającego. W przeciwnym wypadku następowałoby gromadzenie ładunku w tym punkcie (prąd wpływający byłby większy od wypływającego) lub punkt ten musiałby generować ładunki (prąd wypływający większy od wpływającego).

#### II prawo Kirchhoffa:

**W dowolnym oczku obwodu, suma napięć (zmian potencjału) na wszystkich elementach elektrycznych tego oczka jest równa sumie sił elektromotorycznych w nim występujących.**

$$\sum U_i = \sum \mathcal{E}_i$$

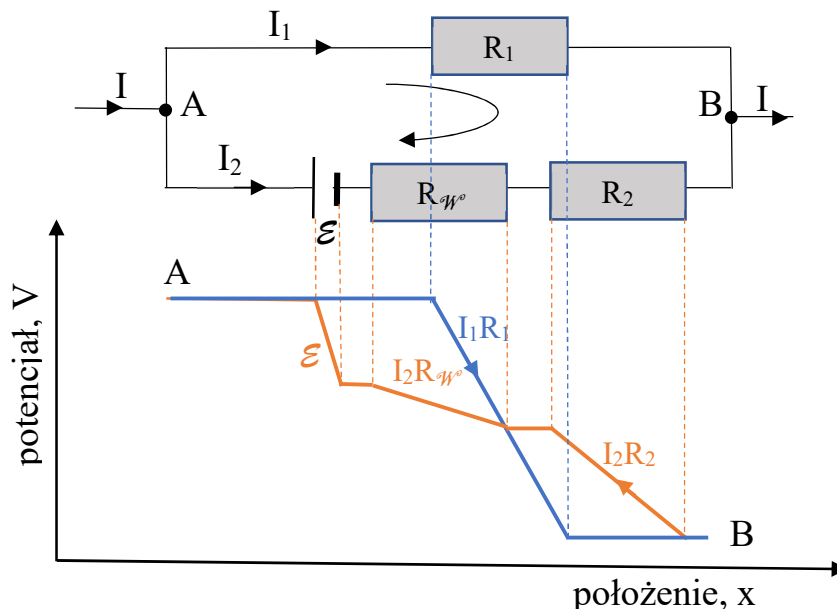
Ponieważ siła elektromotoryczna też jest formą napięcia, a jej znak zależy od tego jak ją podłączymy, to w skrócie możemy zapisać

$$\sum U_i = 0$$

czyli suma napięć w oczku jest równa zero.

Jest to przejaw zachowawczości pola elektrycznego występującego w obwodzie elektrycznym. Oznacza to, iż wyruszając z dowolnego miejsca obwodu elektrycznego o danym potencjale i idąc (rejestrując zmiany potencjału) dowolnie wybraną ścieżką tego obwodu tak, aby wrócić w to samo miejsce, musimy uzyskać ten sam potencjał, z którego wyruszyliśmy. Czyli napotkane po drodze różnice potencjałów (napięcia) w sumie muszą dać zero.

Przeanalizujmy to na poniższym układzie.



Wyruszając z węzła A górną ścieżką do węzła B (linia niebieska) napotykamy rezystor, na którym, zgodnie z prawem Ohma, rejestrujemy zmianę potencjału  $U_1 = I_1 \cdot R_1$ . Wracając teraz z węzła B dolną ścieżką do węzła A (linia brązowa), napotykamy zmiany potencjału na  $R_2$ ,  $R_{\eta^\circ}$  i siłę elektromotoryczną  $\mathcal{E}$ , ale już ze znakiem przeciwnym, uzyskując na końcu potencjał wyjściowy.

Do zapisu prawa Kirchhoffa można założyć dowolny kierunek obiegu w oczku oraz wygodny dla nas kierunek przepływu prądu, a rozwiązanie równań i tak pokaże nam właściwy kierunek prądu (jak prąd wyjdzie ze znakiem „+” to założyliśmy poprawnie, a jak ze znakiem „-” to prąd płynie przeciwnie do założonego).

*I prawo Kirchhoffa* dla węzła A wygląda następująco:

$$I = I_1 + I_2$$

dla węzła B podobnie:

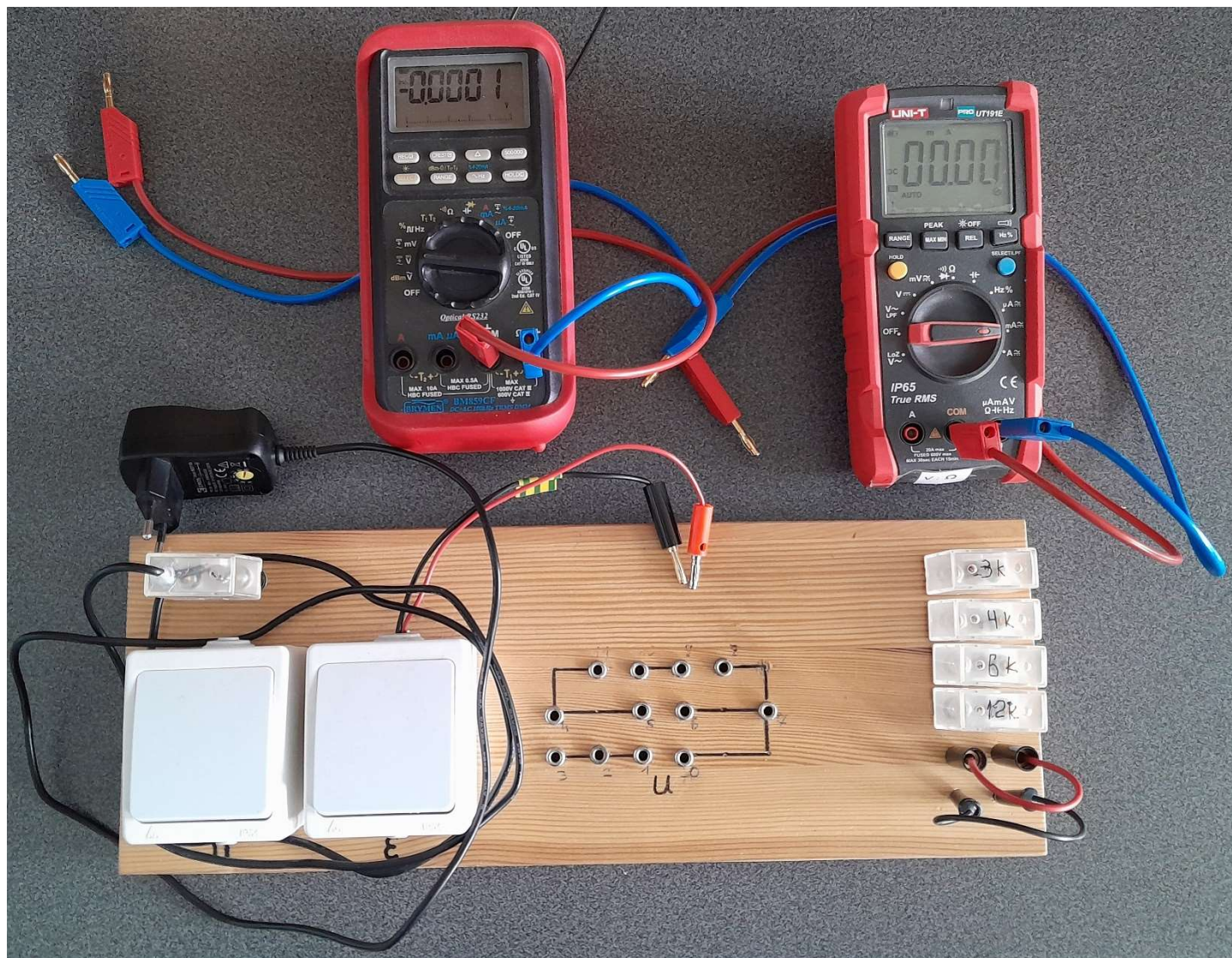
$$I_1 + I_2 = I$$

*II prawo Kirchhoffa* dla oczka:

$$I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_2 R_{\eta^\circ} - \mathcal{E} = 0$$



## 2. Opis układu pomiarowego



W skład zestawu pomiarowego wchodzi:

1. cztery rezystory  $R_i$ , ogniwo o nieznannej sile elektromotorycznej (SEM)  $\mathcal{E}$  i rezystancji wewnętrznej  $R_{w^o}$  oraz zasilacz,
2. multimetry do pomiaru: rezystancji, napięcia i natężenia prądu stałego.

Podstawowym celem ćwiczenia jest:

1. wyznaczenie rezystancji badanych rezystorów z pomiarów bezpośrednich (omomierzem),
2. wyznaczenie rezystancji badanych rezystorów z pomiarów pośrednich (z prawa Ohma),
3. wyznaczanie siły elektromotorycznej (SEM) ogniwa oraz jego rezystancji wewnętrznej z wykorzystaniem praw Kirchhoffa.

### 3. Przebieg pomiarów

#### UWAGA

W czasie łączenia układów, zasilacz musi być bezwzględnie **wyłączony**. Zasilacz włączamy dopiero po zmontowaniu całego układu i tylko na czas przeprowadzania pomiarów.  
(włączony zasilacz grozi porażeniem prądem)

#### Zasady pomiaru miernikiem elektrycznym.

Mierniki elektryczne są wrażliwymi urządzeniami i łatwo je uszkodzić próbując mierzyć wielkości przekraczające ich zakres. Dlatego używając ich, należy zachować szczególną ostrożność. Jeżeli nie wiemy jakiej wartości się spodziewać, wówczas na mierniku **ustawiamy maksymalny zakres** i dopiero montujemy go do badanego układu. Spośród innych elementów układu, **włączamy go** (jeżeli multimetr ma włącznik) dopiero na samym końcu, **po zasilaniu** (czasem przy włączaniu zasilania może popłynąć większy prąd niż nominalnie). Gdyby miernik pokazał przekroczenie zakresu, należy go **natychmiast wyłączyć** (jeżeli miernik nie ma włącznika, należy wyłączyć zasilanie).

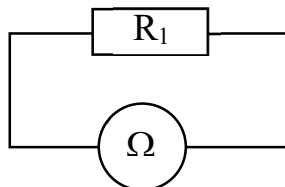
Pomiar: Stopniowo zmniejszamy zakres miernika do momentu, aż będzie można odczytać wartość mierzonej wielkości. Najdokładniejszą wartość uzyskamy na najmniejszym możliwym zakresie, tzn. jest to pierwszy zakres licząc od najmniejszego, większy od mierzonej wielkości.

**Rezystory z przewodami wpinamy w perforowaną podstawkę.**

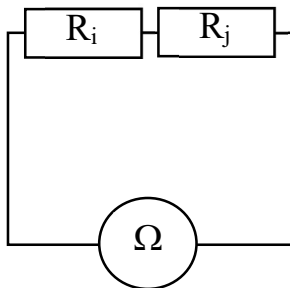
#### 1. Pomiar rezystancji przy użyciu omomierza.

- a) Ustaw multimetr jako omomierz i zmierz dowolnie wybraną rezystancję  $R_1$ , wykonując połączenia według schematów 1.1. Następnie zmierz w ten sposób pozostałe rezystancje, zastępując w układzie rezystor  $R_1$  kolejnymi dostępnymi rezystorami. Dostępne rezystancje to około: 3 k $\Omega$ , 4 k $\Omega$ , 6 k $\Omega$  i 12 k $\Omega$ , ich dokładny pomiar jest celem ćwiczenia.

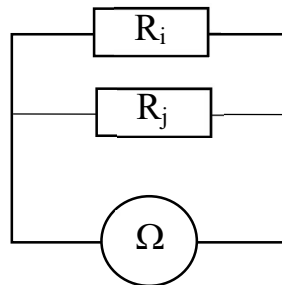
Schemat 1.1



- b) Wybierz dwa dowolne rezystory  $R_i$  i  $R_j$  i zmierz ich rezystancję zastępczą dla połączenia szeregowego  $R_{zs}(i,j)$  i równoległego  $R_{zn}(i,j)$  (w nawiasach wpisz które  $i,j$  wybrałeś -  $i,j=1\dots4$ ), wykonując połączenia według schematów 1.2 – 1.3:



Schemat 1.2



Schemat 1.3

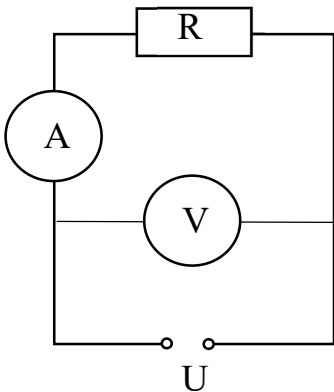
Wyniki pomiarów wpisz do Tabeli 1.

## 2. Wyznaczanie rezystancji przy użyciu prawa Ohma.

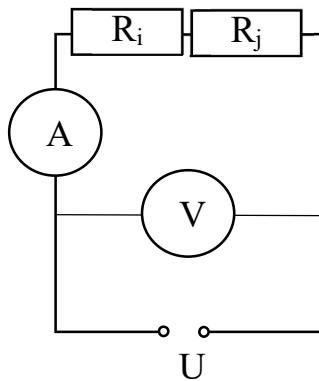
W tym celu zmierz napięcia  $U$  i natężenia  $I$  prądu stałego dla rezystorów jak w punkcie 1, wg schematów 2.1 – 2.3. Omomierz w układach z punktu 1, zastępujemy układem składającym się z:

- amperomierza (użyć multimetra przełączając go początkowo na maksymalny zakres **amperomierza**)
- woltomierza (użyć multimetra przełączając go początkowo na maksymalny zakres **woltomierza**)
- zasilacza

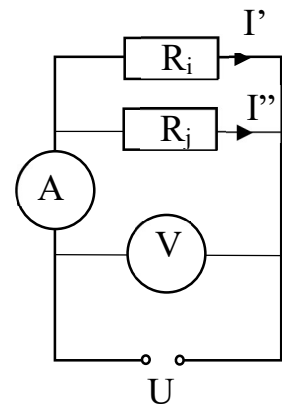
*W dalszej części ćwiczenia dół układu już nie będzie się zmieniał. Zmianie będzie ulegała tylko góra układu, tzn. miejsce podłączenia rezystora.*



Schemat 2.1



Schemat 2.2

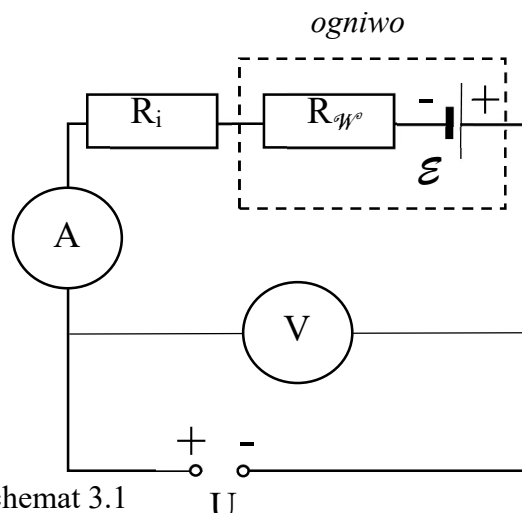


Schemat 2.3

Zmierzone prądy i napięcia wpisz do Tabeli 1.

## 3. Wyznaczanie siły elektromotorycznej (SEM) ogniwa $\mathcal{E}$ oraz jego rezystancji wewnętrznej $R_{w}$ z wykorzystaniem praw Kirchhoffa.

- Wykonaj pomiary prądów  $I$  i napięć  $V$  w układzie wg schematu 3.1, dla wszystkich rezystorów  $R_i$ , wpinając w układ po kolei dostępne przy stanowisku rezystory (ogniwo włącz zgodnie z kierunkiem płynięcia prądu, zgodnie z rysunkiem – sposób sprawdzenia: podłączyć ogniwo raz w jedną stronę raz w drugą stronę, zmieniając kolejność podłączenia kabli do obwodu, wybrać przypadek z większą wartością bezwzględną prądu);
- Wyniki pomiarów wpisz do Tabeli 2.



Schemat 3.1



#### 4. Opracowanie wyników pomiarów

1) Z pomiarów w punkcie 2, korzystając z prawa Ohma, wyznacz wszystkie rezystancje  $R_i$  (napisz jak liczyłeś, zrób bilans jednostek oraz wpisz wyniki do Tab. 3).

2) Różniczkując wyrażenie  $R = U/I$  określ niepewność złożoną względną  $u_{c,r}(R)$ ,

$$u_{c,r}(R) = \frac{1}{R} \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial I} \Delta I\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial U} \Delta U\right)^2} \text{ po zróżniczkowaniu otrzymamy } u_{c,r}(R) = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2}$$

a następnie niepewność bezwzględną  $u_c(R)$ :

$$u_c(R) = u_{c,r}(R) \cdot R$$

(napisz jak liczyłeś oraz wpisz wyniki do Tab. 3).

3) Z wyznaczonych  $R_i$  i  $R_j$  w punkcie 1 opracowania, dla wcześniej wybranej pary  $i, j$  **oblicz** rezystancję  $R_{zs}(i, j)$  dla połączenia szeregowego i  $R_{zr}(i, j)$  dla połączenia równoległego (napisz jak liczyłeś oraz wpisz wyniki do Tab. 3).

Tabela 3. Wyznaczone wartości rezystancji i ich niepewności.

	I [.....]	U [.....]	R zmierzone bezpośrednio [.....]		R obliczone z prawa Ohma [.....]	$u_c(R)$ [.....]	$u_{c,r}(R)$
dla $R_1$							
dla $R_2$							
dla $R_3$							
dla $R_4$							
dla $R_{zs}$							
dla $R_{zr}$							

Porównaj wyznaczone wartości rezystancji zastępczych  $R_{zs}$  i  $R_{zr}$  z rezystancjami składowymi.

4) Z pomiarów  $R_i$  i  $R_j$  w punkcie 1 dla wybranej wcześniej pary  $i, j$  oraz prądu  $I$  i napięcia  $U$  wyznaczonego w punkcie 2 dla połączenia równoległego (schemat 2.3), wyznacz prądy  $I'$  i  $I''$  (z prawa Ohma:  $I' = U/R_1$ ;  $I'' = U/R_2$ ). Sprawdź słuszność pierwszego prawa Kirchhoffa ( $I = I' + I''$ ). Wpisz wyniki do Tab. 4 i przeprowadź analizę wyniku z ostatniej kolumny tej tabeli.

Tabela 4. Sprawdzenie słuszności I prawa Kirchhoffa.

I	I'	I''	I' + I''	$\frac{I}{I' + I''}$

- 5) Z pomiarów  $R_1$ ,  $R_2$ , natężenia  $I$  oraz napięcia  $U$  z Tab. 3 dla połączenia szeregowego (schemat 2.2) sprawdź słuszność II prawa Kirchhoffa ( $U = IR_1 + IR_2$ ). Wpisz wyniki do Tab. 5 i przeprowadź analizę wyniku z ostatniej kolumny tej tabeli.

Tabela 5. Sprawdzenie słuszności II prawa Kirchhoffa.

U	$IR_1$	$IR_2$	$IR_1 + IR_2$	$\frac{U}{IR_1 + IR_2}$

- 6) Z pomiarów prądów i napięcia w punkcie 3 oraz zmierzonych w punkcie 1 rezystancji  $R_i$ , wyznacz parametry ogniwa  $\mathcal{E}$  i  $R_w$  w następujący sposób:

z II prawa Kirchhoffa, dla schematu 3.1, mamy:

$$U + \mathcal{E} = IR_w + IR_i$$

Ponieważ  $R_i$  i  $I$  są tutaj zmienne, przekształćmy to r-nie w równanie prostej  $y = ax + b$

Dzieląc obustronnie przez  $I$

$$(U + \mathcal{E})/I = R_w + R_i$$

oraz porządkując

$$R_i = (U + \mathcal{E}) \cdot \frac{1}{I} - R_w$$

Otrzymujemy r-nie prostej, gdzie

$$y = R_i$$

$$x = 1/I \text{ (odwrotność prądu)}$$

$$a = U + \mathcal{E}$$

$$b = -R_w$$

- a) z pomiarów z Tab. 2 wyznacz odwrotności natężeń prądów dla kolejnej rezystancji  $R_i$  i wpisz do Tab. 6. Sporządź wykres prostej  $R_i$  w funkcji odwrotności prądu ( $1/I$ ). Zaznacz niepewności  $u_c(R_i)$  na wykresie. Do wyznaczenia parametrów prostej użyj metody najmniejszych kwadratów;
- b) na podstawie wyznaczonych współczynników prostej  $a$  i  $b$  określ  $R_w$  i  $\mathcal{E}$  (do obliczeń  $\mathcal{E}$  użyj wartości  $U_{sr}$  wyznaczonej z wartości zmierzonych napięć zapisanych w Tab.2).

Tabela 6. Dane do wykresu  $R = f(1/I)$ .

$R_i$ [...]				
$1/I$ [...]				

- 7) Na podstawie niepewności współczynników prostej wyznacz niepewności standardowe  $u_c(R_w)$  i  $u_c(\mathcal{E})$  i niepewności względne rezystancji wewnętrznej i siły elektromotorycznej ogniwa.

## 5. Podsumowanie

### Zestawienie:

- 1) Zapisać zgodnie z regułami prezentacji wyników wyznaczone wartości  $\mathcal{E}_r$  i  $R_{\mathcal{H}^o}$  oraz ich niepewności standardowe i względne.

### Analiza:

- 2) Przedyskutować wyniki pomiarów rezystancji zebranych w Tab. 3.
- 3) Ocenic czy wykazano, że spełnione jest pierwsze i drugie prawo Kirchhoffa (pkt. 4 i 5).
- 4) Przedyskutować wyniki otrzymanych wartości  $\mathcal{E}_r$  i  $R_{\mathcal{H}^o}$ .

### Synteza:

- 5) Wyciągnąć wnioski pod kątem występowania błędów grubych, systematycznych i przypadkowych oraz ich przyczyn w całym ćwiczeniu.
- 6) Podać cele ćwiczenia i wyjaśnić, czy zostały osiągnięte.
- 7) Zaproponować działania zmierzające do podniesienia dokładności wykonywanych pomiarów.

## 6. Przykładowe pytania kontrolne

1. Prawo Ohma klasyczne (wzór).
2. Wyprowadzić różniczkowe prawo Ohma.
3. Rezystancja zastępcza dla połączenia szeregowego i równoległego (wzór).
4. Ciepło Joule'a Lenza (wzór).
5. Dwa prawa Kirchhoffa.
6. Ogniw o rezystancji wewnętrznej  $R_w = 1 \, \Omega$  i SEM  $\mathcal{E} = 10 \, \text{V}$  zwarto rezystorem  $R = 100 \, \Omega$ .

Do rezystora podłączono woltomierz o rezystancji  $R_v = 1000 \, \Omega$ .

- a) Narysować schemat ideowy układu.

Obliczyć:

- b) Jakie napięcie wskaże woltomierz?
- c) Jaki prąd popłynie przez woltomierz?
- d) Jaki prąd popłynie przez ogniw?