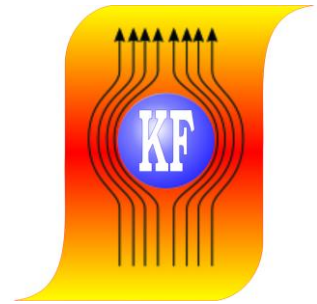


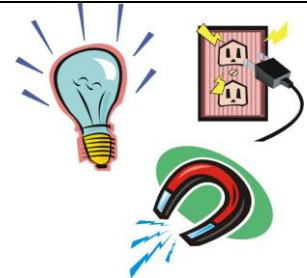
***KATEDRA FIZYKI***

***WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI  
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW***

***POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA***



***PRACOWNIA  
ELEKTRYCZNOŚCI I MAGNETYZMU***



***ĆWICZENIE NR E-4***

***POMIAR SIŁY ELEKTROMOTORYCZNEJ  
I OPORU WEWNĘTRZNEGO AKUMULATORÓW  
METODĄ KOMPENSACJI***

## I. Zagadnienia do przestudiowania

1. Prawa przepływu prądu stałego.
2. Ogniwa elektryczne. Siła elektromotoryczna ogniwa elektrycznego.
3. Akumulatory niklowo-wodorkowe i litowo-jonowe.
4. Prawo Ohma dla całego obwodu.
5. Opór wewnętrzny ogniwa. Prąd zwarcia.
6. Wyznaczanie siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego ogniwa metodą kompensacji.

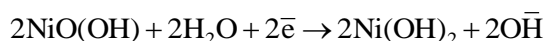
## II. Wprowadzenie teoretyczne

Aby utrzymać przepływ prądu w obwodzie, konieczne jest urządzenie (źródło), które wytwarzałoby różnicę potencjałów na jego biegunach. Źródłami napięcia są urządzenia, w których energia chemiczna, mechaniczna lub inne jej rodzaje są przekształcane w energię elektryczną. Na przykład energia chemiczna dostarczana przez ogniwo jest przekształcana na energię pola elektrycznego i magnetycznego, które otaczają obwód. Duże zastosowanie znalazły ogniwa wielokrotnego użytku - akumulatory. Są to baterie, które można ponownie naładować poprzez odwrócenie przebiegu reakcji chemicznych, jakie zachodzą podczas rozładowania. Możliwość ładowania odróżnia akumulatory od pierwotnych ogniw galwanicznych, których zasada działania jest taka sama, tylko że swą funkcję spełniają jednorazowo.

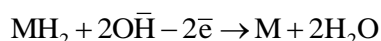
Obecnie najbardziej rozpowszechnionymi akumulatorami są akumulatory niklowe (NiCd, NiMH) i litowo-jonowe (Li-Ion). Stosowane od dawna akumulatory niklowo- -kadmowe (NiCd) ze względu na obecność silnie trującego kadmu zastępowane są przez akumulatory niklowo-metalowo-wodorkowe NiMH. Zaletą tych ogniw jest duża ilość zmagazynowanej energii przypadającej na jednostkę masy oraz prawie niezauważalny efekt pamięciowy. Katodą jest nadwodorotlenek niklu NiO(OH). Anodę stanowi siatka ze stopu metalu przejściowego (np. Ni, Co, Fe), mająca zdolność magazynowania wodoru, elektrolitem jest roztwór wodorotlenku potasu KOH.

W czasie pracy akumulatora zachodzą następujące reakcje:

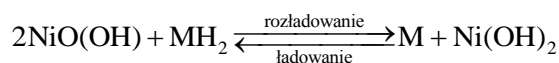
- na elektrodzie dodatniej



- na elektrodzie ujemnej



Reakcja sumaryczna

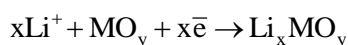


Ćwiczenie E-4: Pomiar siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego akumulatorów metodą kompensacji

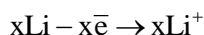
Siła elektromotoryczna naładowanego ogniwa wynosi 1,2÷1,3 V. Akumulatory wodorkowe charakteryzują się dużą szybkością samorozładowania (np. 20% na miesiąc). Dlatego producenci zalecają ładowanie ich przed użyciem.

Najnowszą grupą baterii są akumulatory litowo-jonowe. Pozwalają one zgromadzić trzykrotnie większą energię niż akumulatory niklowo-kadmowe. Nie występuje w nich efekt pamięciowy i można je doładowywać w każdym czasie. Anodą w ogniwach litowych jest metaliczny lit albo stop litu z innym metalem (zwykle z glinem). Katodą może być bardzo wiele związków, np. dwutlenek manganu (MnO<sub>2</sub>), chlorek tionylu (SOCl<sub>2</sub>), dwutlenek siarki (SO<sub>2</sub>) lub jod (I<sub>2</sub>). Na elektrodach przebiegają następujące reakcje:

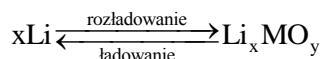
– na elektrodzie dodatniej



– na elektrodzie ujemnej



Reakcja sumaryczna



Siła elektromotoryczna naładowanego ogniwa wynosi 3 V.

Wielkościami charakteryzującymi źródło napięcia są: siła elektromotoryczna  $E$  (skrót SEM) i opór wewnętrzny  $r$ . Idealne źródło napięcia posiada zerowy opór wewnętrzny. Jednakże, wszystkie rzeczywiste źródła SEM wykazują opór wewnętrzny różny od zera.

Siła elektromotoryczna ogniwa jest to maksymalna wartość różnicy potencjałów między zaciskami występująca wtedy, gdy przez ogniwo nie płynie prąd. Prąd, płynący w obwodzie, pokonuje zarówno opór zewnętrzny  $R$ , jak i opór wewnętrzny  $r$  źródła napięcia. Prawo Ohma dla całego obwodu jednooczkowego przyjmuje postać

$$E = IR + Ir \quad (1)$$

oznaczając  $U = IR$  - równe spadkowi potencjału na oporze zewnętrznym, czyli napięciu na biegunach źródła możemy zapisać:

$$E = U + Ir \quad (2)$$

$$U = E - Ir$$

Z powyższego wynika, że różnica potencjałów między zaciskami źródła jest mniejsza od jego siły elektromotorycznej. Napięcie to tym mniej różni się od siły elektromotorycznej, im mniejsze jest

## Ćwiczenie E-4: Pomiar siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego akumulatorów metodą kompensacji

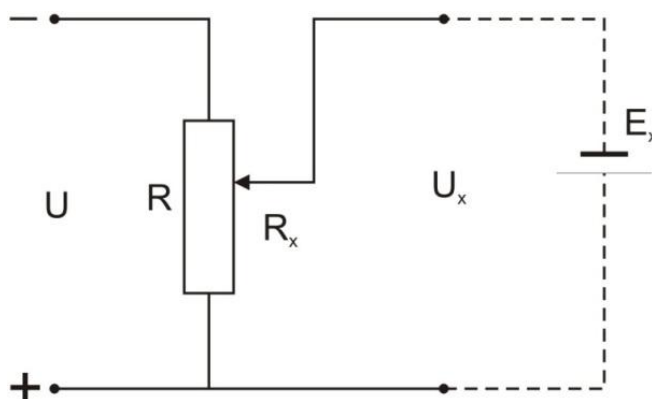
natężenie prądu  $I$  w obwodzie. Różnica potencjałów na biegunach źródła staje się równa jego sile elektromotorycznej, gdy obwód jest otwarty i prąd w nim nie płynie ( $I = 0$ ), czyli gdy źródło jest nieobciążone

$$U = E$$

Z tego określenia SEM wynikają bezpośrednio trudności jej pomiaru. Używając do pomiaru jakiegokolwiek woltomierza (prócz elektrostatycznego), powodujemy przepływ prądu przez ogniwo, w wyniku czego woltomierz wskazuje mniejsze napięcie niż wynosi siła elektromotoryczna ogniwa.

### III. Metoda pomiaru

Najdokładniejszym sposobem pomiaru siły elektromotorycznej ogniwa jest metoda kompensacji. Metoda ta polega na porównywaniu dwóch przeciwnie działających napięć w jednym oczku. Jeśli zrównoważymy siłę elektromotoryczną badanego źródła zewnętrzną różnicą potencjałów, to natężenie prądu płynącego przez źródło będzie równe zero. Wówczas napięcie zmierzone będzie równe sile elektromotorycznej ogniwa.



Rys. 1. Schemat układu do pomiaru SEM metodą kompensacji

Schemat układu służącego do pomiaru SEM metodą kompensacji przedstawiono na rysunku 1. Dzięki zastosowaniu dzielnika napięć uzyskano regulowane źródło napięcia. Zasilacz (o sile elektromotorycznej większej od badanego ogniwa) jest źródłem prądu płynącego przez dzielnik napięcia. Prąd dostarczany z zasilacza płynie przez dzielnik napięcia, do którego włączone jest badane ogniwo  $E_x$  w ten sposób, że jego SEM przeciwstawiona jest napięciu na wejściu dzielnika.

W obwodzie zewnętrznym badane ogniwo połączono szeregowo z mikroamperomierzem, z wyłącznikiem (W) i oporami zabezpieczającymi ( $R_Z$ ). Opory zabezpieczające stosuje się w celu zabezpieczenia mikroamperomierza przed zbyt dużym prądem w momencie zamknięcia obwodu wyłącznikiem W.

Ćwiczenie E-4: Pomiar siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego akumulatorów  
metodą kompensacji

Za pomocą pokręteł oporników dekadowych ustawiamy taki opór  $R_x$  na dzielniku napięć, przy którym w obwodzie zewnętrznym nie płynie prąd. Wówczas napięcie  $U_x$  na wyjściu dzielnika jest skompensowane częścią napięcia  $U$

$$\frac{U_x}{R_x} = \frac{U}{R}, \text{ skąd } U_x = U \frac{R_x}{R}$$

ponieważ przez badane źródło prąd nie płynie,  $U_x$  na biegunach jest równe jego sile elektromotorycznej  $E_x$

$$U_x = E_x$$

$$E_x = U \frac{R_x}{R} \quad (3)$$

Aby uniknąć mierzenia napięcia na wejściu dzielnika, możemy zastosować źródło wzorcowe o stałej i znanej sile elektromotorycznej  $E_n$  - w naszym przypadku jest nim ogniwo normalne Westona  $E_n = 1,019 \text{ V}$ .

Jeżeli za pomocą przełącznika włączymy w obwód zamiast badanego ogniwa  $E_x$  ogniwo wzorcowe  $E_n$ , to zerowe wskazanie mikroamperomierza uzyskamy dla innej wartości oporu  $R_n$  na dzielniku napięć. Możemy więc zapisać

$$E_n = U \frac{R_n}{R} \quad (4)$$

Dzieląc stronami (3) przez (4), otrzymujemy wzór na szukaną siłę elektromotoryczną  $E_x$

$$E_x = E_n \frac{R_x}{R_n} \quad (5)$$

### ***Pomiar oporu wewnętrznego ogniwa***

Jeśli znamy siłę elektromotoryczną ogniwa, możemy wyznaczyć jego opór wewnętrzny. W tym celu bieguny ogniwa łączymy zewnętrznym opornikiem o znanym oporze, w naszym przypadku  $R_{100} = 100 \Omega$ . Oznaczmy przez  $E_1$  siłę elektromotoryczną ogniwa,  $U_0$  - napięcie tego ogniwa, kiedy bieguny jego połączono zewnętrznym opornikiem  $R_{100}$ . Przez opornik ten popłynie prąd o natężeniu  $I$

$$U_0 = IR_{100} \quad (6)$$

$$E_1 = (R_{100} + r)I = U_0 + Ir \quad (7)$$

## Ćwiczenie E-4: Pomiar siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego akumulatorów metodą kompensacji

Należy wyznaczyć opór wewnętrzny  $r$ . Wartość siły elektromotorycznej ogniwa znana jest z pomiaru przeprowadzonego wcześniej. W naszym ćwiczeniu nie używamy amperomierza, którym moglibyśmy zmierzyć natężenie prądu  $I$ . Wyznaczamy wartość  $I$  ze wzoru (6)

$$I = \frac{U_0}{R_{100}}$$

i podstawiamy do (7)

$$E_1 = U_0 + \frac{U_0}{R_{100}} r \quad (8)$$

Po przekształceniu równania (8) otrzymujemy wyrażenie na szukaną wartość oporu wewnętrznego  $r$

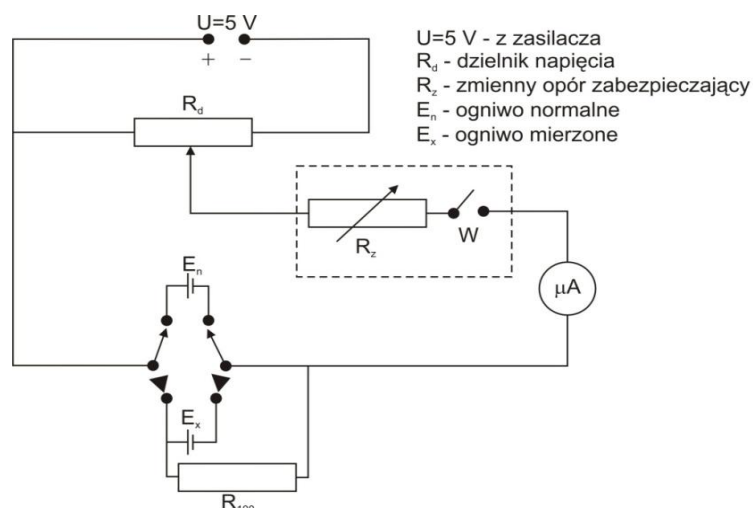
$$r = \frac{E_1 - U_0}{U_0} R_{100} \quad (9)$$

Wartość napięcia  $U_0$  wyznacza się również metodą kompensacyjną opisaną wcześniej.

## IV. Zestaw pomiarowy

Zasilacz, dzielnik napięcia, zmienny opór zabezpieczający, ogniwo Westona, akumulatory mierzone, mikroamperomierz, przełącznik.

## V. Schemat układu pomiarowego



## VI. Przebieg ćwiczenia

1. Połączyć obwód według schematu.
2. Przełącznik opornika zabezpieczającego  $R_z$  ustawić na największym oporze.

## Ćwiczenie E-4: Pomiar siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego akumulatorów metodą kompensacji

3. Pierwszy pomiar przeprowadzić dla ogniwa normalnego (Westona)  $E_n$ .
4. Wcisnąć przełącznik W i znaleźć takie położenie na dzielniku napięć, przy którym wskazówka mikroamperomierza nie wychyla się z położenia zerowego. Czynność powtarzamy dla coraz mniejszych wartości oporu zabezpieczającego  $R_z$ .
5. Odczytać wartość oporu  $R_n$  na dzielniku.
6. Wymienić ogniwo Westona na jeden z akumulatorów  $E_x$ . Wyznaczyć wartość oporu  $R_x$  dla warunku równowagi tak jak opisano w punkcie 4.
7. Doświadczalnie wyznaczyć błąd odczytu wskazań ustalonych i położenia przełącznika dzielnika.
8. Pomiar przeprowadzić dla dwóch różnych akumulatorów.
9. Wyniki wpisać do tabeli pomiarów.
10. W celu wyznaczenia oporu wewnętrznego akumulatora jego bieguny łączymy opornikiem o znanym oporze  $R_{100} = 100 \Omega$ . Pomiar przeprowadzamy metodą kompensacji tak jak opisano wyżej.
11. Wyniki wpisać do tabeli.

## VII. Tabele pomiarowe

TABELA 1. Wyznaczanie SEM ogniwa

Nazwa ogniwa	R [ $\Omega$ ]		$\Delta R$ [ $\Omega$ ]	E [V]
Ogniwo Westona	$R_n$			1,019
Ogniwo suche I	$R_1$			
Ogniwo suche II	$R_2$			

TABELA 2. Wyznaczanie oporu wewnętrznego ogniwa

Nazwa ogniwa	R [ $\Omega$ ]		$\Delta R$ [ $\Omega$ ]	$U_0$ [V]		r [ $\Omega$ ]
Ogniwo suche I	$R_{01}$			$U_{01}$		
Ogniwo suche II	$R_{02}$			$U_{02}$		

## VIII. Opracowanie wyników pomiarów

1. Wyznaczyć siły elektromotoryczne mierzonych akumulatorów ze wzoru

$$E_x = E_n \frac{R_x}{R_n}$$

2. W celu wyznaczenia oporu wewnętrznego akumulatora należy ze wzoru

$$U_{0x} = E_n \frac{R_{0x}}{R_n}$$

### Ćwiczenie E-4: Pomiar siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego akumulatorów metodą kompensacji

gdzie  $R_{0x}$  - wartość oporu na dzielniku napięcia, gdy bieguny akumulatora mierzonego są połączone oporem  $R_{100} = 100 \Omega$ , obliczyć wartość napięcia  $U_0$  dla mierzonych akumulatorów.

3. Wartość napięcia  $U_{0x}$  wpisać do tabeli, a następnie obliczyć opory wewnętrzne akumulatorów ze wzoru

$$r = \frac{E_x - U_{0x}}{U_{0x}} R_{100}$$

gdzie  $E_x$  - siła elektromotoryczna akumulatora wyznaczona wcześniej.

4. Wyniki wpisać do tabeli.

## **IX. Rachunek błędu**

1. Przyjąć wartość SEM ogniwa Westona bez niepewności pomiarowej.
2. Błąd odczytu wskazań ustalonych i położenia przełącznika dzielnika określić doświadczalnie.
3. Wykonujemy to w następujący sposób:

Przy najlepszym wg nas położeniu przełącznika dzielnika (dla zerowego położenia wskazówki amperomierza i najmniejszym oporze zabezpieczającym) przesuwamy go nieco w lewo, obserwując jednocześnie wskazówkę miernika. W pewnej chwili wskazówka zaczyna się wychylać. Notujemy końcową wartość na skali dzielnika, przy której wskazówka miernika nie wykazuje przepływu prądu, a następnie przesuwamy przełącznik w prawo i znowu znajdujemy taką wartość, która jest granicą reagowania miernika. Połowa wartości oporu z sumy wartości granicznych reagowania określa nam czułość układu, a zatem błąd  $|\Delta R|$ .

4. Obliczyć błędy względny i bezwzględny siły elektromotorycznej ogniwa  $E_x$  oraz oporu wewnętrznego akumulatora.

## **Literatura**

1. Dryński T., Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, PWN, Warszawa 1978.
2. Jaworski B., Dietlaf A., Kurs fizyki, T. II, Elektryczność i magnetyzm, PWN, Warszawa 1979.
3. Lech J., Opracowanie wyników pomiarów w laboratorium podstaw fizyki, Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej PCz, Częstochowa 2005.
4. Piekara A., Elektryczność i magnetyzm, PWN, Warszawa 1970.
5. Respondowski R., Laboratorium z fizyki, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
6. Szczeniowski S., Fizyka doświadczalna, cz. III, Elektryczność i magnetyzm, PWN, Warszawa 1972.
7. Szydłowski H., Pracownia fizyczna wspomagana komputerem, WN PWN, Warszawa 2003.