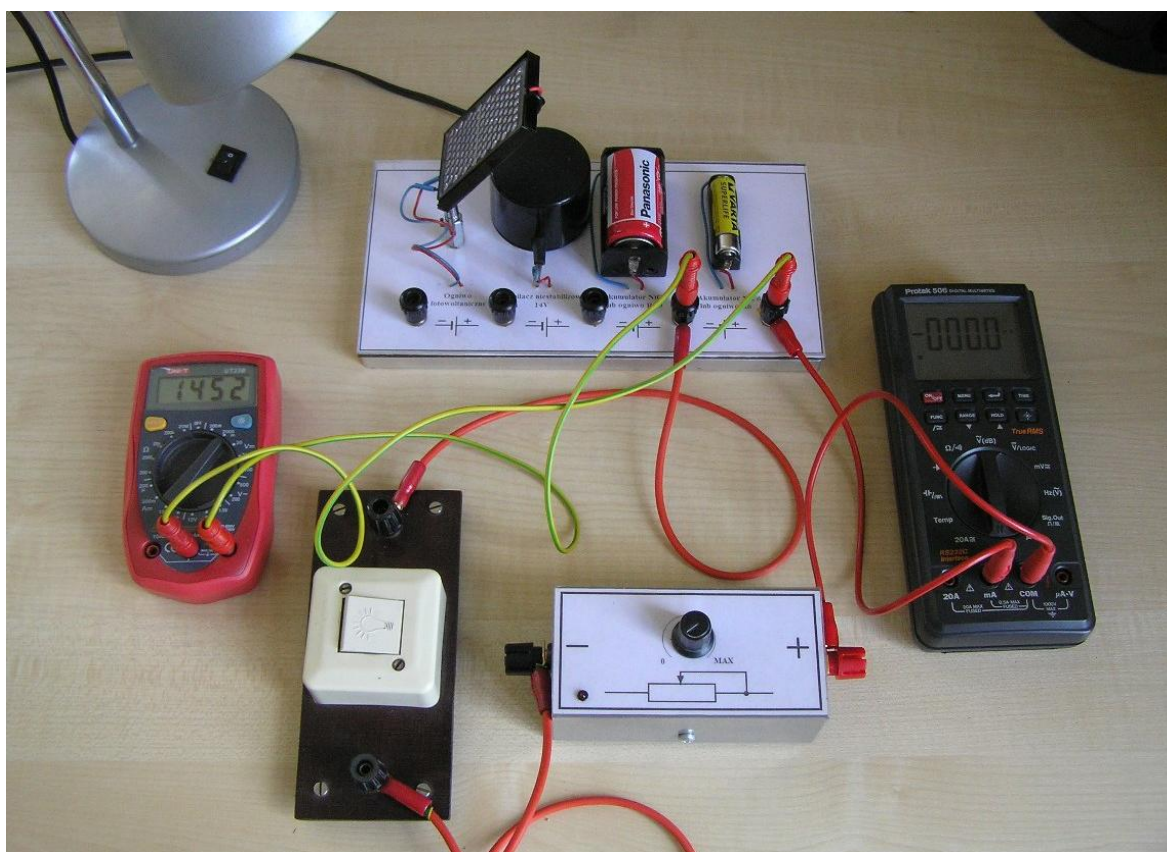


Paweł Turkowski
Zakład Fizyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

ĆWICZENIE 32

WYZNACZANIE OPORU WEWNĘTRZNEGO I SIŁY ELEKTROMOTORYCZNEJ ŹRÓDŁA NAPIĘCIA STAŁEGO

Kraków, 28.06.2019



**Modyfikacja ćwiczeń z przedmiotu Fizyka w ramach projektu
pn. „Innowacyjny program strategicznego rozwoju Uczelni”
o numerze POWR.03.05.00-00-Z20/18**



SPIS TREŚCI

CZEŚĆ TEORETYCZNA

1. Ogniwa
2. Wybrane parametry ogniw
3. Model ogniwa
4. Prawa Kirchhoffa
5. Pomiar parametrów: E i R_w
6. Chemiczne wzorce napięcia

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA INSTRUKCJA DO WYKONANIA ĆWICZENIA

ZAKRES WYMAGANYCH WIADOMOŚCI

Prąd elektryczny. Natężenie prądu, napięcie – definicje i jednostki. Źródła siły elektromotorycznej. Model ogniwa. Parametry ogniwa: siła elektromotoryczna, opór wewnętrzny, pojemność. Pierwsze prawo Kirchhoffa. Drugie prawo Kirchhoffa dla ogniwa obciążonego zewnętrzną rezystancją. Metody pomiaru parametrów ogniwa. Natężenie prądu przy zwarciu elektrod ogniwa. Chemiczne wzorce napięcia: ich zastosowanie i cechy.

CZĘŚĆ TEORETYCZNA

1. Ogniwa

Prąd elektryczny jest uporządkowanym ruchem ładunków elektrycznych. Warunkiem koniecznym jego przepływu w przewodniku jest pojawienie się różnicy potencjałów, czyli napięcia, na końcach tego przewodnika. Różnicę potencjałów pomiędzy dwoma punktami zdolne są wytwarzać urządzenia zwane źródłami siły elektromotorycznej. Należą do nich między innymi: ogniwa galwaniczne, termoogniwa i fotoogniwa, przetwarzające energię chemiczną, cieplną i energię światła na energię elektryczną. Ogniwa galwaniczne podzielić można na klasy: ogniw chemicznych i stężeniowych. Ogniwa chemiczne mogą być: odwracalne lub nieodwracalne.

2. Wybrane parametry ogniw



Rys.1. Ogniwo R10 (1,5V) i bateria 2R10 (3V). Symbol R10 oznacza, że jest to ogniwo w kształcie walca o promieniu podstawy równym w przybliżeniu 10mm. Cyfra 2 poprzedzająca symbol R oznacza, że w drugim przypadku mamy do czynienia z szeregowym połączeniem dwu ogniw R10 czyli, że jest to bateria. Na etykiecie podano datę produkcji 01 1972 oraz okres przechowywania – 6 miesięcy. Na współczesnych ogniwach data produkcji często nie jest podawana.

Wśród szerokiej gamy ogniw chemicznych rozróżniamy między innymi: Leclanchégo (1,5V) - ogniwami tego typu są powszechnie używane ogniwa R6 („paluszkowe” oznaczane także jako AA) i R20, ogniwa alkaliczne (1,5V), rtęciowe (1,35V), srebrowe (1,55V), powietrzno- cynkowe (1,4V) i litowe (3,6V). Napięcia podane przy nazwach

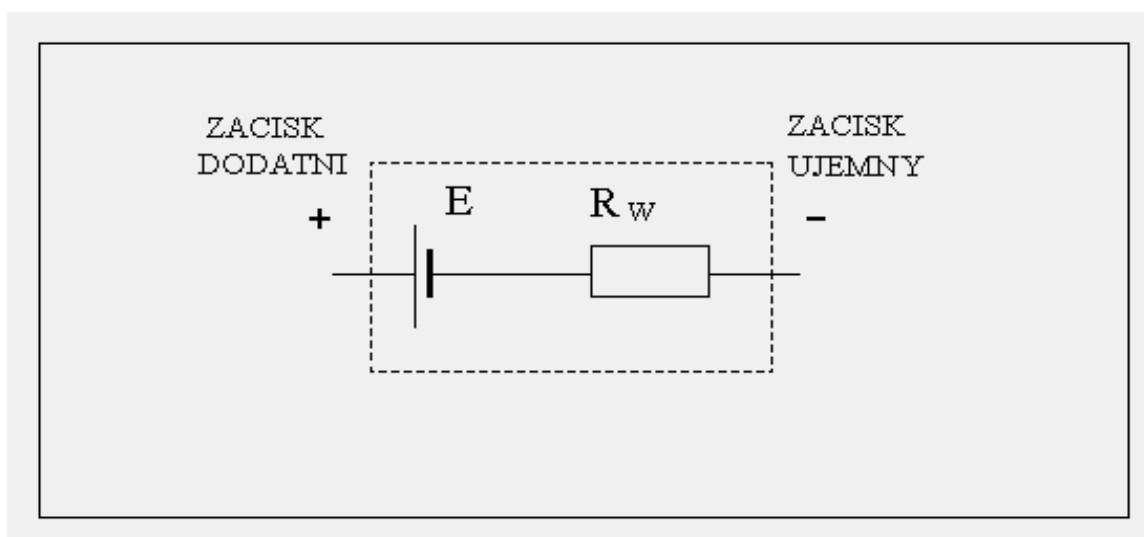
poszczególnych typów informują nas o tym jakie napięcie istnieje pomiędzy elektrodami ogniwa nieobciążonego, tzn. gdy nie czerpiemy z niego prądu. Napięcie to nazywa się **siłą elektromotoryczną** ogniwa (SEM) i oznaczane jest przez E . Kupując ogniwo musimy zadbać o to by było odpowiedniego typu, to znaczy nie tylko dopasowane kształtem do urządzenia ale i wartością siły elektromotorycznej. Powszechnie stosowane akumulatory Ni-MH typu AAA („cienki paluszek”) mają nominalną wartość siły elektromotorycznej 1,2V i nie zawsze można nimi zastąpić nieodwracalne ogniwo 1,5V.

Zegarki elektroniczne, aparaty fotograficzne, latarki i inne urządzenia wyposażone są w ogniwa o podobnych siłach elektromotorycznych ale o różnych rozmiarach i kształtach. Iloczyn $I \cdot t$ prądu o natężeniu I czerpanego z ogniwa poszczególnych typów i czasu t upływającego do ich wyładowania, zwany **pojemnością ogniwa**, jest różny. Pojemności ogniwa oznakowanych w ten sam sposób, lecz produkowanych przez różne firmy także nie są takie same. Dla przykładu, dla ogniwa typu R6 i LR6 pojemność waha się od 440 mAh do 2600 mAh (miliamperogodziny).

Ogniwa różnych typów posiadają nie tylko niejednakowe pojemności. Gdybyśmy spróbowali czerpać prąd o natężeniu 1A z ogniwa zegarka naręcznego okazałoby się to niemożliwe. Natomiast nowe ogniwo typu R20 jest zdolne do wytworzenia takiego prądu w obwodzie elektrycznym. By opisać tę różnicę pomiędzy ogniwami powinniśmy zatem podać maksymalny prąd, który może być z nich czerpany (I_{MAX}). Prąd I_{MAX} jest wielkością, którą wyznacza się w pomiarze pośrednim a nie bezpośrednim. Przyczyna jest następująca: w obwodzie zasilanym przez ogniwo płynie maksymalny prąd gdy zwieramy wyprowadzenia ogniwa drutem o znikomym oporze. Jednak nawet krótkotrwałe zwarcie elektrod ogniwa może je zniszczyć. Pomiarowi zwykle podlega zatem siła elektromotoryczna i pomocnicza wielkość zwana oporem wewnętrznym (R_W) ogniwa. Pomiar pozwala przewidzieć nie tylko wartość I_{MAX} , lecz także wartość natężenia prądu w przypadku dołączenia do ogniwa opornika lub innego obciążenia o dowolnej, niekoniecznie zerowej, wartości oporu elektrycznego.

3. Model ogniwa

Podstawowe własności ogniw różnych typów można opisać posługując się prostym modelem. W myśl tego modelu ogniwo przypisujemy dwa parametry: wyrażone w woltach napięcie na zaciskach ogniwa nieobciążonego zwane **siłą elektromotoryczną** (SEM) oznaczane jako „E” i wyrażony w omach **opór wewnętrzny** (R_w). Na Rys.2. ogniwo zostało przedstawione w postaci źródła napięcia (SEM) o wartości E połączonego w szereg z oporem wewnętrznym R_w .



Rys.2. Model ogniwa

Wartość siły elektromotorycznej ogniwa zależy od rodzaju elektrod, rodzaju elektrolitu i temperatury, natomiast nie zależy od rozmiarów ogniwa. Wartość oporu wewnętrznego zależy między innymi od stopnia zużycia ogniwa gwałtownie rosnąc w końcowej fazie jego eksploatacji. Opór wewnętrzny ogniwa tego samego typu ale o większych rozmiarach jest zwykle mniejszy. Jego wartość zależy także od temperatury.

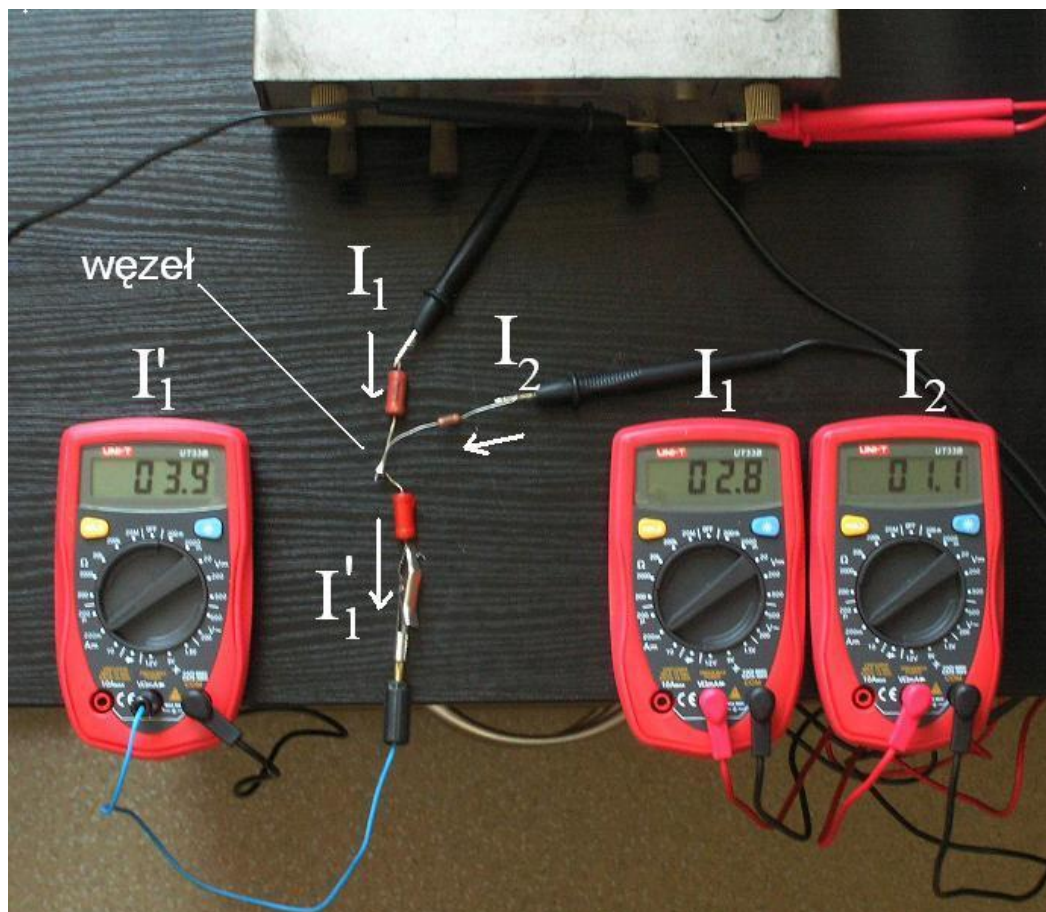
Opór wewnętrzny opisuje tę własność ogniwa, że czerpanie prądu z ogniwa powoduje spadek napięcia U na jego zaciskach w porównaniu z siłą elektromotoryczną (E). Oporze R_w , mimo że nie jest opornikiem w zwykłym tego słowa znaczeniu, zakładamy, że podlega tym samym prawom co zwykłe oporniki a w szczególności zakładamy, że spełnia prawo Ohma. Zatem opór wewnętrzny dwu ogniw połączonych szeregowo sumuje się podobnie jak dla połączenia zwykłych oporników. Jeśli ogniwo elektryczne jest źródłem prądu o natężeniu I , wtedy napięcie U na jego elektrodach można także obliczyć posługując się prawem Ohma. To napięcie jest równe SEM pomniejszonej o "spadek napięcia" na oporze wewnętrznym równy $R_w I$. U jest zatem liniową funkcją natężenia prądu I w obwodzie:

$$U = E - R_w I \quad (1)$$

Zgodnie z tym równaniem zwarcie elektrod ogniwa (wówczas $U=0$) spowodowałoby krótkotrwały przepływ prądu o wartości natężenia równej:

$$I_{MAX} = \frac{E}{R_w} \quad (2)$$

4. Prawa Kirchhoffa

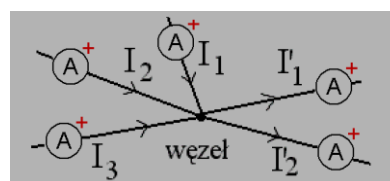


Rys. 3. Ilustracja pierwszego prawa Kirchhoffa: $I_1 + I_2 = I'_1$

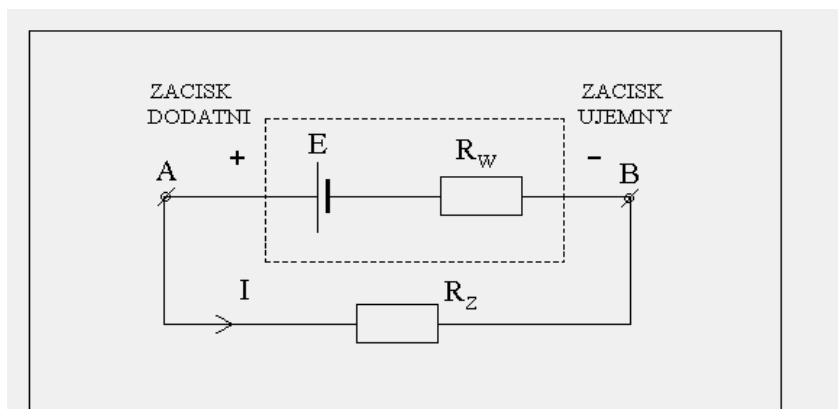
Pierwsze prawo Kirchhoffa dotyczy tzw, **węzłów** czyli miejsc w obwodach elektrycznych, w których zbiegają się przynajmniej trzy przewody.

Suma natężeń prądów I wpływających do węzła sieci jest równa sumie natężeń prądów wpływających I' z węzła

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = I'_1 + I'_2 + \dots + I'_m$$



Drugie prawo Kirchhoffa dotyczy tzw, **oczek** czyli zamkniętych obwodów elektrycznych (pętli) takich jak obwód przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Model ogniwa obciążonego zewnętrzną rezystancją R_z .

Suma sił elektromotorycznych występujących w takim obwodzie jest równa sumie tzw. spadków napięć na opornikach, to znaczy sumie odpowiednich iloczynów natężeń prądów i wartości oporów:

$$E = R_w I + R_z I \quad (3)$$

Równanie (1) jest szczególnym przypadkiem drugiego prawa Kirchhoffa (3), bowiem zgodnie z Rys. 4. napięcie U pomiędzy punktami A i B jest równe $R_z I$.

5. Pomiar parametrów: E i R_w

Istnieje kilka metod pomiaru siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego ogniwa. Siłę elektromotoryczną można zmierzyć bezpośrednio metodą kompensacyjną. W tej metodzie wykorzystuje się kompensator napięcia stałego. Jest to przyrząd do pomiaru napięć stałych bez poboru prądu z obwodu mierzonego.

Obie wielkości, E i R_w , wyznaczyć można pośrednio dokonując pomiaru i wykreślając zależność napięcia U na zaciskach ogniwa w funkcji natężenia prądu I w obwodzie. Pomiary wystarczy wykonać dla kilku stosunkowo niewielkich natężeń prądu, by do wykresu zależności $U(I)$ dopasować prostą opisaną równaniem (1). Punkt przecięcia tej prostej z osią napięcia U , odpowiadający natężeniu prądu $I=0$, wyznacza wartość SEM, ponieważ z definicji $E=U$ dla $I=0$. Natomiast opór wewnętrzny ogniwa związany jest z wartością współczynnika kierunkowego tej prostej.

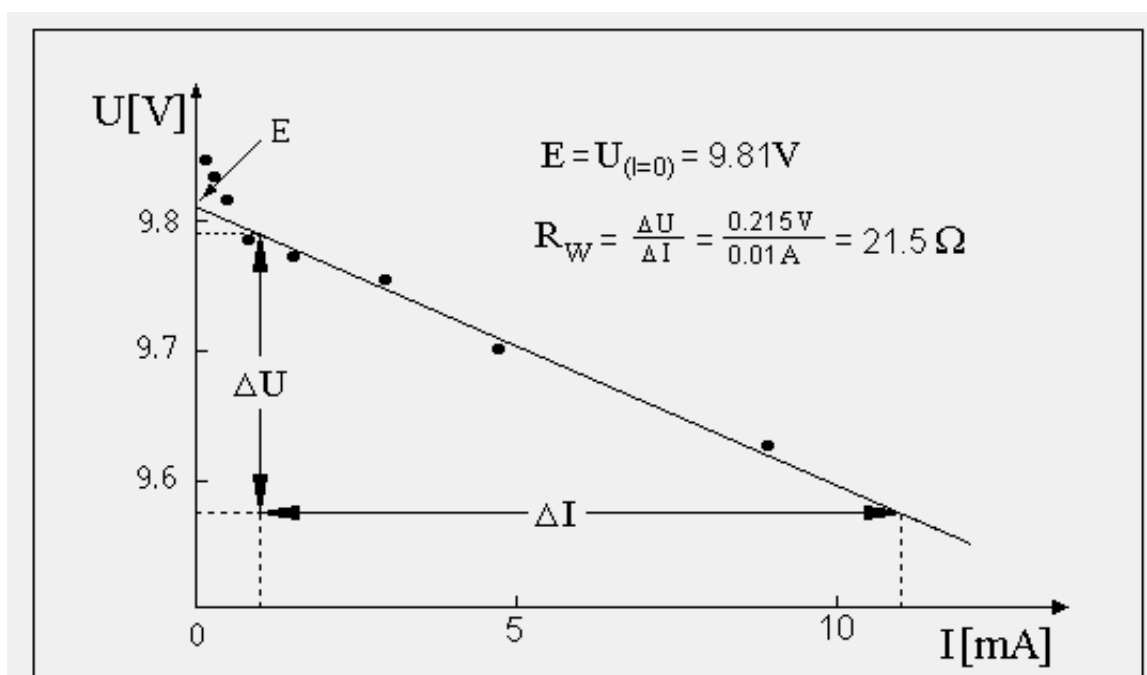
Przykład

Przykładową zależność $U(I)$ otrzymaną dla nowego egzemplarza baterii typu 6F22 (Maxell Super Power ACE) przedstawia Tabela 1. Jako miliamperomierza używano multimetru V561A (klasa (0.5) a woltomierzem był multimetr FINEST 285 (klasa 0.05).

Tabela 1. Wyniki pomiarów $U(I)$ baterii typu 6F22 (Maxell)

$I[\text{mA}]$	0.957	1.704	2.90	4.82	9.47
$U[\text{V}]$	9.788	9.770	9.751	9.696	9.612

Wykres, wraz z graficznie dopasowaną prostą i jej parametrami, sporządzony na podstawie Tabeli 1 przedstawiono na Rys.5. Należy zwrócić uwagę na to, że trzy pierwsze punkty wykresu, odpowiadające niewielkim natężeniom prądu, nie układają się wzdłuż prostej. Świadczą one o ograniczonej stosowności przyjętego modelu ogniwa i zostały pominięte zarówno w Tabeli 1 jak i w graficznym dopasowaniu prostej.



Rys.5. Eksperymentalnie otrzymana zależność $U(I)$ dla nowego ogniwa typu 6F22 i sposób graficznego wyznaczenia siły elektromotorycznej E oraz oporu wewnętrznego R_W ogniwa.

Dopasowanie prostych można dokonać także numerycznie metodą najmniejszych kwadratów. $-R_W$ jest współczynnikiem kierunkowym tej prostej natomiast E jest wyrazem wolnym. Tą metodą otrzymano następujące wyniki:

$$R_W = (21 \pm 2)\ \Omega, \quad E = (9.81 \pm 0.01)\text{V}.$$

6. Chemiczne wzorce napięcia

Napięcie stałe jest jedną z podstawowych wielkości mierzonych w praktyce laboratoryjnej. Szereg innych mierzonych wielkości elektrycznych i nieelektrycznych jest często podczas pomiarów przetwarzanych na napięcie za pomocą specjalnych przetworników pomiarowych. Wartość napięcia mierzymy za pomocą woltomierzy a do sprawdzania poprawności ich działania służą tzw. wzorce napięcia.

Typowe ogniwa chemiczne stosowane do zasilania urządzeń elektronicznych nie mogą być wzorcami napięcia. Do tego celu nadaje się tzw. **ogniwo Westona** (ogniwo normalne). Niech E^0 oznacza wartość SEM w temperaturze $+20^{\circ}\text{C}$. Poszczególne egzemplarze ogniw Westona wykazują bardzo mały rozrzut wartości E^0 . Dokładna wartość E^0 podawana jest zresztą przez producenta dla każdego egzemplarza ogniwa oddzielnie. Zaletą ogniw tego typu jest powolny proces ich starzenia się - wartość E^0 zmienia się w czasie o 0,01% a nawet jedynie o 0,0002% w przeciągu 1 roku (zależnie od klasy) przy zachowaniu odpowiednich zasad eksploatacji. Ogniwa Westona cechuje ponadto słaba zależność SEM od temperatury. Wpływ zmian temperatury na SEM wzorców napięcia minimalizuje się przechowując ogniwa w termostatach. Ponadto zależność $SEM(T)$ jest znana i po zmierzeniu temperatury ogniwa możliwe jest uwzględnienie poprawki temperaturowej.



Rys.6. Ogniwo Westona (ZF UR). Otwór w obudowie służy do umieszczenia termometru

Jeszcze stosunkowo niedawno zespoły ogniw Westona używane były w Polsce jako wzorzec napięcia najwyższego rzędu. Ze względu na dokładność przewyższającą możliwości ogniw chemicznych wprowadzono nową definicję wzorca napięcia opartego na działaniu tzw. złącza Josephsona. Dokładność złącza Josephsona okupiona jest koniecznością chłodzenia go za pomocą ciekłego helu.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

- Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A., Metrologia elektryczna, WNT, Warszawa 1994. s.76-84.
- Chyla K., Fizyka dla ZSZ, Wydanie trzecie, WSzIP, Warszawa 1991. s.144-159.
- Dyszyński J., Hagel, R., Miernictwo elektryczne, WSiP, Warszawa 1986. s.21-24.
- Encyklopedia Fizyki, Tom 3, PWN, Warszawa 1974, s.316.
- Gomółka J., Kowalczyk F., Franke A., Współczesne chemiczne źródła prądu, Wydawnictwo MON, Warszawa 1977.
- Glasstone S., Podstawy elektrochemii, PWN, Warszawa 1956.
- Górecki P., Test baterii, Elektronika Praktyczna 3/94. s.42-45.
- Halliday D., Resnick R., Fizyka Tom 2, PWN, Warszawa 1974, s.175-191.
- Hewlett Packard, Test & Measurement Catalog 1995. Products-Systems-Services.
- Jaworski B.M., Piński A.A., Elementy fizyki, T1. PWN, Warszawa 1977.
- Kulka Z., Libura A., Nadachowski M., Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, WKiŁ, Warszawa 1987, s.45-59.
- Nadachowski M., Wzorce napięcia ze złączem Josephsona, Radioelektronik Audio-HiFi-Video 5/95. s.4-5.
- Pazdro K., Poniński M., Miernictwo elektryczne w pytaniach i odpowiedziach, WNT, Warszawa 1986.
- Piech T., Fizyka dla II klasy liceum ogólnokształcącego, technikum i liceum zawodowego. Wyd.V. PZWS, Warszawa 1973, s.175-190.
- Piekara A.H., Elektryczność, materia i promieniowanie, PWN, Warszawa 1986, s.72-86.
- Pigoń K., Ruziewicz Z., Chemia fizyczna, PWN, Warszawa 1980, s.245-260.
- Sawicki M., (red.). Nauczanie fizyki. Część II. Podręcznik dla nauczycieli fizyki klasy II liceum ogólnokształcącego i technikum. WSiP, Warszawa 1978, s.173-177.
- Sobczyk L., i inni, Eksperymentalna chemia fizyczna, PWN, Warszawa 1982, s.299-312.
- Szczeniowski S., Fizyka Doświadczalna, Tom III, PWN, Warszawa 1980, s.184-210.
- Szysko E., Instrumentalne metody analityczne, PZWL, Warszawa 1982, s.2-48.

Modyfikacja ćwiczeń z przedmiotu Fizyka w ramach projektu pn. „Innowacyjny program strategicznego rozwoju Uczelni” o numerze POWR.03.05.00-00-Z020/18

32 WYZNACZANIE OPORU WEWNĘTRZNEGO I SIŁY ELEKTROMOTORYCZNEJ ŹRÓDŁA NAPIĘCIA STAŁEGO

Podstawowe własności ogniów różnych typów można opisać posługując się prostym modelem. W myśl tego modelu ogniwu przypisujemy dwa parametry: wyrażone w voltach napięcie zwane *siłą elektromotoryczną* (E) i wyrażony w omach *opór wewnętrzny* (R_w).

Jeśli do zacisków ogniwa elektrycznego dołączony zostanie zewnętrzny opór R to, zgodnie z II prawem Kirchhoffa, napięcie U na jego zaciskach jest równe sile elektromotorycznej E pomniejszonej o "spadek napięcia" na oporze wewnętrznym równy $R_w I$. U jest zatem liniową funkcją natężenia prądu I w obwodzie:

$$U(I) = E - R_w I \quad (1)$$

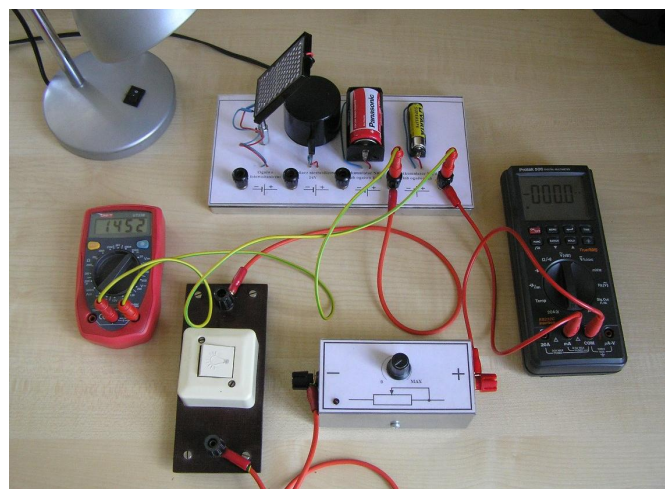
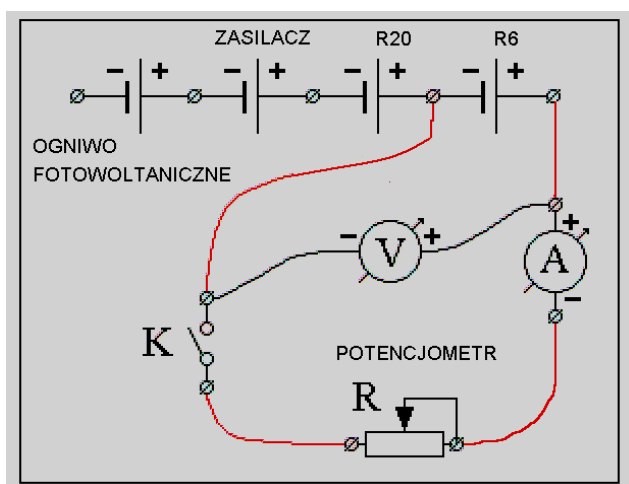
Obie wielkości, E i R_w , wyznaczyć można pośrednio dokonując pomiaru i wykreślając zależność napięcia U na zaciskach ogniwa w funkcji natężenia prądu I w obwodzie.

CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego ogniów różnych typów oraz połączeń szeregowych tych ogniów.

WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Zmontować obwód pomiarowy według schematu przedstawionego na Rys.1 łącząc szeregowo amperomierz A (rolę amperomierza pełni multimetr cyfrowy Protek 506), Potencjometr R , wyłącznik K oraz wybrane ogniwo R_6 , R_{20} , zasilacz niestabilizowany lub ogniwo fotowoltaniczne. Drugi z dostępnych multimetrów cyfrowych łączymy jako woltomierz.
2. Poprosić prowadzącego ćwiczenia o sprawdzenie poprawności połączeń obwodu.



Rys.1. Obwód pomiarowy do wyznaczenia siły elektromotorycznej i oporu wewnętrznego ogniwa i jego realizacja

3. Wybór zakresów mierników. Do pomiaru napięcia na elektrodach pojedynczego ogniwa wybieramy zakres woltomierza 2000mV (2V). Pomiar dotyczy prądu stałego a zatem odpowiedni zakres na skali multimetru oznaczony jest jako „V–”. Przy pomiarach połączeń szeregowych ogniw R6 i R20 konieczne jest użycie zakresu 20V.

Natężenia mierzonych prądów I w układzie nie powinny przekraczać 100 mA. Pomiar dotyczy natężenia prądu stałego i odpowiednia pozycja przełącznika rodzaju pracy multimetru Protek oznaczona jest jako „mA–”.

Ogniwo fotowoltaniczne podczas pracy należy oświetlić z odległości około 15cm lampką, która nie powinna być przesuwana podczas pomiarów.

4. Wyznaczyć zależność U(I). W tym celu należy zmieniać przy pomocy potencjometru R natężenie prądu płynącego w obwodzie i przynajmniej dla sześciu wartości natężenia prądu I zanotować napięcie U. Czas pomiaru przy zwartym przycisku K powinien być krótki.

5. Pomiary przeprowadzić ogniw wskazanych przez prowadzącego ćwiczenia oraz dla połączenia szeregowego dwu wcześniej zbadanych ogniw. Wyniki pomiarów należy umieścić w tabelach:

Typ ogniwa:

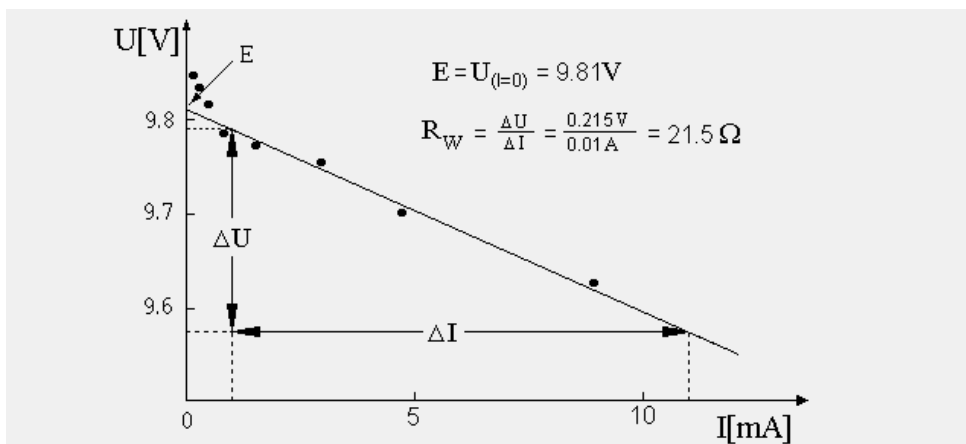
Natężenie prądu I [mA]						
Wskazanie woltomierza U [V]						

OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Wykreślić charakterystykę U(I) dla każdego badanego źródła napięcia oraz ich szeregowych połączeń. W tym celu, na wykresie, sporządzonym dla każdego ogniwa i połączenia ogniw oddzielnie, nanieść punkty pomiarowe. Do punktów dopasować graficznie lub numerycznie prostą, tzn. określić wyraz wolny i współczynnik kierunkowy prostej.

2. Wyniki opracowania zamieścić w tabeli:

TYP OGNIWA/ZASILACZA				
E [V]				
R _w [Ω]				



Rys.2. Eksperymentalnie otrzymana zależność U(I) dla nowego ogniwa typu 6F22.

Sposób graficznego wyznaczenia siły elektromotorycznej E i oporu wewnętrznego R_w ogniwa.