

Ćw. 25. Pomiary siły elektromotorycznej ogniwa metodą kompensacji

Wprowadzenie

Prądem nazywamy uporządkowany ruch ładunku elektrycznego. Najczęściej spotykanym prądem jest tzw. prąd przewodzony, który powstaje w przewodnikach pod wpływem pola elektrycznego, a nośnikami prądu są elektrony. Jest on charakteryzowany przez natężenie prądu, które jest zdefiniowane jako całkowity ładunek dQ przepływający przez dowolny przekrój poprzeczny przewodnika w przedziale czasu dt :

$$I = \frac{dQ}{dt}, \quad (1)$$

Jednostką natężenia jest amper, który odpowiada przepływowi ładunku o wartości 1 C (kulomba) w czasie jednej sekundy. Podstawowymi prawami przepływu prądu są prawa: Ohma i Joule'a-Lenza. Ohm stwierdził, że jeżeli weźmiemy jednorodny przewodnik o długości l i polu przekroju poprzecznego S , to natężenie prądu płynącego przez niego jest proporcjonalne do przyłożonej różnicy potencjałów ΔV (oznaczonego jako napięcie U) na końcach tego przewodnika. Oznacza to, że stosunek przyłożonego napięcia do końców przewodnika i płynącego przez niego prądu jest wartością stałą, którą nazywamy oporem elektrycznym przewodnika:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (2)$$

Jednostką oporu elektrycznego w układzie SI jest om [Ω], gdzie $1 \Omega = 1V/1A$.

Ładunek elektryczny przenoszony przez powierzchnię może mieć różną wartość w różnych częściach powierzchni. Ta właściwość może być uwzględniona poprzez wektor gęstości natężenia prądu elektrycznego \vec{j} , którego wartość definiujemy jako pochodną natężenia prądu po powierzchni:

$$j = \frac{dI}{dS}, \quad (3)$$

Uwzględniając powyższe oraz, że $U = \Delta V = El$, gdzie E jest natężeniem pola elektrycznego w przewodniku otrzymujemy:

$$R = \frac{l}{jS} E, \quad (4)$$

Po prostych przekształceniach otrzymamy prawo Ohma w postaci różniczkowej:

$$j = \frac{l}{RS} E = \sigma E, \quad (5)$$

gdzie $\sigma = l/RS$ nazywamy przewodnością elektryczną właściwą przewodnika, której odwrotność nazywamy oporem właściwym przewodnika ρ .

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{RS}{l}, \quad (6)$$

Na podstawie tego wyrażenia możemy napisać, że opór elektryczny przewodnika jest zdefiniowany przez jego rozmiary oraz materiał z jakiego został wykonany:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (7)$$

Wzór (7) jest słuszny dla wszystkich przewodników jednorodnych o jednakowym przekroju S na całej długości l .

Prawo Joule'a-Lenza określa energię wydzielaną przy przepływie prądu elektrycznego. Praca potrzebna na przeniesienie ładunku dQ przez różnicę potencjałów jest równa $dW = UdQ$. Dla prądu o natężeniu I w czasie dt przeniesiony będzie ładunek $dQ = Idt$, wobec czego praca wykonana przez źródło pola elektrycznego będzie wynosić:

$$dW = UI dt = IR^2 dt, \quad (8)$$

A moc wydzielona w przewodniku wynosi:

$$P = \frac{dW}{dt} = UI = IR^2, \quad (9)$$

Bezpośrednie zastosowanie prawa Ohma do obliczania natężeń prądów w obwodach złożonych ze znacznej ilości przewodów byłoby bardzo żmudną pracą. Zadanie znacznie upraszczają prawa Kirchhoffa. Pierwsze prawo Kirchhoffa jest prawem zachowania ładunku elektrycznego i dotyczy tzw. węzłów obwodu. Prawo to mówi, że suma natężeń prądów schodzących się w węzle jest równa zero:

$$\sum_{i=1}^K I_i = 0, \quad (10)$$

gdzie K – jest liczbą przewodów schodzących się w węzle. Prawo to obowiązuje w każdym węzle obwodu, co oznacza, że dla każdego obwodu możemy napisać tyle takich równań, ile jest węzłów w obwodzie.

Natomiast drugie prawo Kirchhoffa głosi, że w dowolnym zamkniętym obwodzie (tzw. oczku) suma spadków napięć (iloczynów natężeń prądu i oporów odpowiednich odcinków obwodu) jest równa sumie sił elektromotorycznych w tym obwodzie.

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^n E_i, \quad (11)$$

gdzie n jest liczbą odcinków przewodów, na jakie dzielimy oczko obwodu. Podobnie jak w przypadku pierwszego prawa, drugie również obowiązuje dla każdego oczka w rozważanym obwodzie. Dlatego możemy napisać tyle równań ile jest oczek obwodu.

Siły kulombowskie działające na ładunki swobodne w polu elektrycznym przesuując je dążą do wyrównania potencjałów w przewodniku. Tak więc utrzymanie stałej różnicy potencjałów na końcach przewodnika wymaga działania sił elektrycznych, pochodzących z zewnątrz. Te siły zewnętrzne można opisać poprzez pracę wykonaną przy przemieszczaniu ładunków w przewodniku. Pracę sił zewnętrznych przypadającą na jednostkę ładunku dodatniego nazywamy siłą elektromotoryczną (SEM).

$$E = \frac{W}{Q}, \quad (12)$$

Jednostką siły elektromotorycznej jest wolt.

Źródłami siły elektromotorycznej są zwykle ogniwa galwaniczne, czyli urządzenia pozwalające na bezpośrednie przekształcenie energii chemicznej w elektryczną. Zwykle ogniwo składa się z dwóch elektrod zanurzonych w elektrolicie. W wyniku reakcji chemicznych zachodzących na granicy metal-elektrolit powstaje różnica potencjałów, którą właśnie nazywamy siłą elektromotoryczną. Wartość potencjału elektrody względem roztworu jest określona wzorem Nersta:

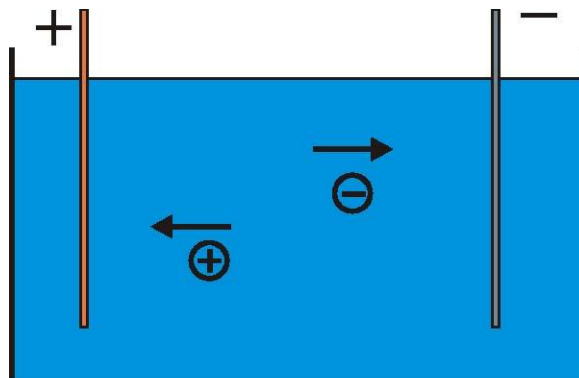
$$V = V_0 + \frac{kT}{Ze} \ln c, \quad (13)$$

gdzie k jest stałą Boltzmana, T jest temperaturą w kelwinach, c jest stężeniem elektrolitu, Ze jest ładunkiem jonu w roztworze oraz V_0 jest tzw. potencjałem normalnym elektrody (tzn. potencjałem w

roztworze o $1 \text{ mol}/10^{-3} \text{ m}^3$). W ogniwie składającym się z dwóch elektrod zanurzonych w roztworach zawierających jony tych metali różnica potencjałów jest równa:

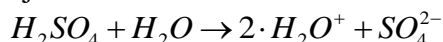
$$E = V_{01} - V_{02} + \frac{kT}{Ze} \ln \frac{c_1}{c_2} \quad (14)$$

Wartość siły elektromotorycznej, jak wynika z powyższego wzoru, zależy od potencjałów normalnych elektrod oraz od stężeń jonów w roztworach.

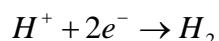
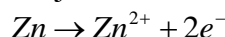


Rys. 1. Schemat ogniwa Volty.

Przykładem ogniwa galwanicznego jest ogniwo Volty (Rys. 1). Składa się ono z elektrody miedzianej i cynkowej zanurzonych w wodnym roztworze kwasu siarkowego. Siła elektromotoryczna tego ogniwa wynosi około 1.1 V. W ogniwie Volty kwas siarkowy występuje w roztworze w formie zdysocjowanej



W ogniwie Volty transport ładunku elektrycznego odbywa się za pośrednictwem reakcji chemicznych: redukcji (przyłączanie elektronów) lub utleniania (oddawania elektronów). Na elektrodzie cynkowej zachodzi utlenianie atomów jej materiału do kationów Zn^{2+} , które przechodzą do roztworu, gdzie przeciwjonami dla nich są aniony siarczanowe SO_4^{2-} . Natomiast na elektrodzie miedzianej zachodzi reakcja redukcji w wyniku której dochodzi do wydzielania się gazowego wodoru. Procesy te opisują następujące reakcje chemiczne:



Podłączenie elektrod ogniwa przewodnikiem spowoduje przepływ elektronów od elektrody cynkowej (-) do miedzianej (+), czyli od katody do anody. Za kierunek prądu przyjmujemy jednak zawsze kierunek nośników dodatnich i będzie miał on zwrot od anody do katody.

Metoda pomiaru

W metodzie kompensacyjnej pomiaru siły elektromotorycznej mamy dwa źródła prądu: jedno o znanej sile elektromotorycznej E i drugie o nieznannej E_x , które podlega badaniu, połączone w sposób przedstawiony na rysunku 2. Jak przedstawiono na rysunku, oprócz źródeł prądu obwód składa się z dwóch oporników zewnętrznych R i R_s , a opory wewnętrzne źródeł zostały pominięte. Oporu R_s o zmiennej wartości został włączony do obwodu aby uzyskać możliwość zmian natężenia prądu w obwodzie przy zastosowaniu źródła prądu stałego o stałym napięciu zasilania E . Opornik zewnętrzny R to opornik dekadowy, który umożliwia podział na opory R_{AC} i R_{CB} , gdzie $R_{AC} + R_{CB} = R$.

Jeśli kierunki prądów płynących w obwodzie przyjmujemy jak na rysunku 2, to równania Kirchhoffa dla tego obwodu przyjmują następującą postać:

$$I_2 = I + I_1 \quad (15)$$

$$E = I(R_S + R_{CB}) + I_2 R_{AC} \quad (16)$$

$$E_x = I_2 R_{AC} \quad (17)$$

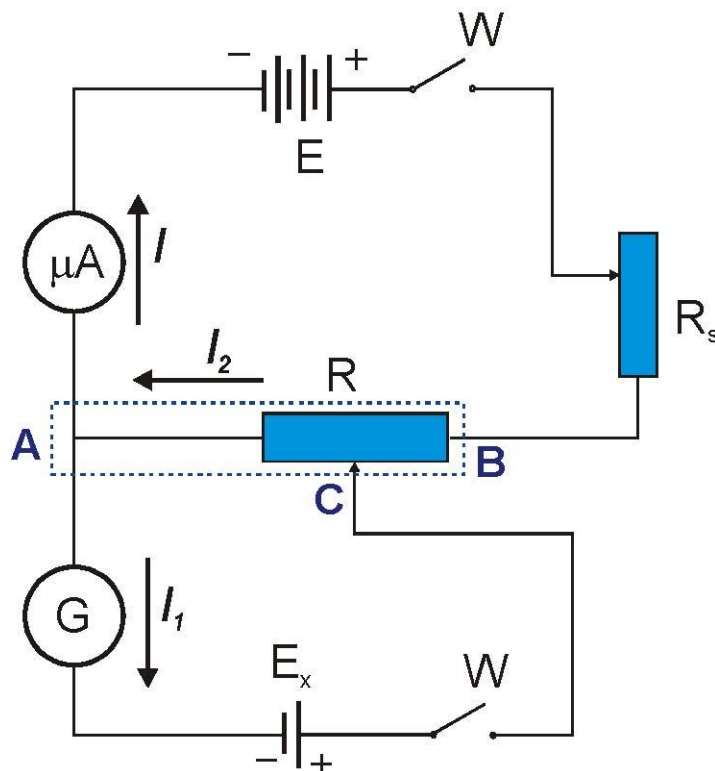
W ogólnym przypadku, powyższe równania przy znanych wartościach sił elektromotorycznych i oporach występujących w obwodzie, pozwalają na wyznaczenie wartości prądów I , I_1 oraz I_2 . W szczególnym przypadku możemy przyjąć $I_1=0$, co oznacza, że w części obwodu zawierającego źródło E_x nie płynie prąd. Wówczas powyższy układ równań Kirchhoffa przyjmie postać:

$$I_2 = I \quad (16)$$

$$E = I(R_S + R_{CB}) + I_2 R_{AC} \quad (19)$$

$$E_x = I \cdot R_{AC} \quad (20)$$

Z równania (20) widzimy, że w takim przypadku wartość siły elektromotorycznej badanego ogniwa jest równa iloczynowi oporu R_{AC} i natężenia prądu I płynącego w głównym obwodzie. Realizacja sytuacji gdy $I_1=0$ (galwanometr wskazuje brak przepływu prądu), jest możliwe poprzez odpowiedni dobór wartości oporów R_{AC} i R_{CB} . Jest to przypadek kompensacji wzajemnej prądów pochodzących od źródła o znanym SEM i od źródła badanego w części obwodu zawierającego źródło E_x . Dobór wartości oporów R_{AC} i R_{CB} jest możliwe tylko w przypadku, **gdy wartość SEM źródła zasilającego jest większa od SEM źródła badanego**.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego. E – źródło prądu stałego; W – włączniki; R_S – opór z możliwością zmiany jego wartości; ABC – opornik dekadowy; G – galwanometr; μA – mikroamperomierz; E_x – źródło badane.

Wykonanie ćwiczenia

1. Połączyć obwód elektryczny według schematu przedstawionego na rysunku 2.
2. Po zamknięciu włącznika w obwodzie ze źródłem o znanej sile elektromotorycznej potencjometrem R_S ustalamy dowolną wartość prądu I . Następnie na oporniku dekadowym R ustawić wartość maksymalną, a następnie minimalną oporu i odczytać odpowiednie wskazania galwanometru. Jeżeli wskazówka na galwanometrze dla tych ustawień wychyła

się w różne strony, to możemy przystąpić do dalszych pomiarów. Jeśli nie, to należy zwiększyć napięcie źródła zasilającego.

- Przy zamkniętych włącznikach W, dla różnych wartości prądu w obwodzie ze źródłem o znanej sile elektromotorycznej, tak dobierać opór na oporniku dekadowym R_x aby galwanometr wskazywał zero. Odczytać wartość oporu R_x i natężenie prądu I_x oraz zapisać w odpowiedniej tabeli. Wszystkie pomiary powinny być zapisywane bez obróbki. Przed zapisaniem odczytanej wartości nie należy przeprowadzać w pamięci żadnych, nawet trywialnych obliczeń.

L.p.	I_x [μA]	R_x [Ω]
1.		
2.		
3.		
....		

- Siłę elektromotoryczną obliczamy ze wzoru,:

$$E_x = I_x \cdot R_x$$

dla każdego pomiaru. Wartość siły elektromotorycznej wyliczamy dla każdego pomiaru oddzielnie, a ostateczny wynik pomiaru SEM badanego źródła jest średnią z wszystkich pomiarów.

- Niepewność pomiaru szacujemy tzw. metodą różniczkową.

Zagadnienia do kolokwium:

- Prawo Ohma i Joule'a-Lenza.
- Siła elektromotoryczna (SEM) ogniwa.
- Prawa Kirchhoffa przepływu prądu.
- Prawa Faradaya przepływu prądu przez elektrolit.
- Ogniwo Volty, Leclanchégo i Daniella.

Literatura:

- D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003. Tom 3.
- A. K. Wróblewski, J. A. Zakrzewski, *Wstęp do fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1991 Tom 2, Część 2
- E.M. Purcell, *Elektryczność i magnetyzm*, PWN, Warszawa 1974.
- J. Taylor, *Wstęp do analizy błęd pomiarowego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999.
- G.L. Squires, *Praktyczna Fizyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1992.