

Dr. inż. W. KRUKOWSKI
 Profesor Politechniki Lwowskiej

NOWE METODY POMIARU OPORU OGNIW, W SZCZEGÓLNOŚCI OGNIW NORMALNYCH I AKUMULATORÓW

Streszczenie. Przy pracach nad ustaleniem polskich podstawowych wzorców siły elektromotorycznej w Laboratorium Elektrotechnicznym Politechniki Lwowskiej wyłoniło się zagadnienie pomiaru oporu ogni normalnych. Żadna ze znanych dotychczas metod nie nadaje się do pomiaru oporu ogni normalnych. Z tego powodu zostały przez autora opracowane nowe metody, polegające na zasadzie następującej.

Mierzy się różnice między napięciem ogniwa badanego, przy różnych jego obciążeniach, i niezmiennym napięciem pomocniczym, możliwie zbliżonym do tego napięcia. Zasada ta nadaje się zarówno do pomiaru oporu ogni o wysokim oporze i bardzo małej obciążalności, jakimi są ogniwa normalne, jak i do pomiaru ogni o bardzo małym oporze, jakimi są akumulatory. Dokładne omówienie nowych metod poprzedza krótki przegląd i krytyka znanych metod pomiaru oporu ogni.

I. Uwagi wstępne.

DLA uniknięcia nieporozumień, jest może wskazane podkreślić odrazu na wstępie, że pod „oporem ogniwa” w niniejszej pracy jest zawsze rozumiana wielkość, nazywana przeważnie „oporem wewnętrznym” ogniwa. Ten tradycyjny „opór wewnętrzny” pochodzi jeszcze z czasów, kiedy się dyskutowało nad najkorzystniejszym oporem „zewnątrznym” i podobnymi zagadnieniami, nie mającymi dzisiaj już żadnego praktycznego znaczenia. Nazwa „opór wewnętrzny” nie ma logicznego uzasadnienia, gdyż jasnym jest, że jeżeli mówi się o oporze jakiegoś obiektu, w danym przypadku ogniwa, to nie ulega, zdaje się, wątpliwości, że ma się na myśli tylko ten opór, a nie naprzykład jakiś inny, przyłączony do jego zacisków. Zresztą jeżeli jest mowa o oporach transformatorów, galwanometrów i t. p., to także nie mówi się nigdy o oporach wewnętrznych. Z analogicznych względów dalej będzie również zawsze mowa o spadku napięcia ogniwa, a nie o „wewnętrznym” spadku napięcia. Omawiane dalej metody pomiaru oporu ogni zostały opracowane przez autora niniejszej pracy w Laboratorium Elektrotechnicznym Politechniki Lwowskiej, w związku z

pracami nad ustaleniem polskiej jednostki siły elektromotorycznej i jej wzorców, to znaczy ogni normalnych¹⁾.

Opór ogniwa normalnego jest jedną z wielkości, charakteryzujących stan ogniwa i pomiar oporu, wykonywany w pewnych odstępach czasu, może dać cenne wskazówki co do zmian, zachodzących w ogniwie. W nader obszernej literaturze, poświęconej ogniwo normalnym, sprawa oporu ogni normalnych nie jest jednak prawie zupełnie poruszana, a to przypuszczalnie dlatego, że żadna ze znanych dotychczas metod pomiaru oporu ogni normalnych nie nadaje się do pomiaru oporu ogni normalnych. Przy opracowaniu nowych metod okazało się, że zasada, na której te metody zostały oparte, daje się w nieco odmiennej formie zastosować do wszelkiego rodzaju ogni, nie wyłączając akumulatorów, przy których znane metody również zawodzą. Pomiar oporu może jednak i przy akumulatorach mieć duże znaczenie, jeżeli metoda pomiaru jest prosta i pewna. Pomiar oporu akumulatorów, wykonywany w pewnych odstępach czasu, może mieć jeszcze większe znaczenie praktyczne, niż pomiar oporu ogni normalnych. W dalszym ciągu niniejszej pracy będą omawiane tylko zasady poszczególnych metod pomiaru, czysto praktyczne szczegóły natomiast będą naogół pominięte.

II. Dawne metody pomiaru oporu ogni i ich krytyka.

Pomiary oporu ogni galwanicznych są w starszych dziełach, traktujących o pomiarach elektrycznych, omawiane stosunkowo obszernie²⁾. Metody, opisywane w tych dziełach,

¹⁾ Zasady opisanych niżej metod pomiaru oporu ogni zostały podane przez autora na posiedzeniu Oddziału Lwowskiego Polskiego Towarzystwa Fizycznego w dniu 2 marca 1934 r.

Pracom nad ustaleniem polskich jednostek wielkości elektrycznych, wykonywanym wspólnie przez Główny Urząd Miar i Laboratorium Elektrotechniczne Politechniki Lwowskiej, będzie poświęcona oddzielna, będąca w przygotowaniu publikacja.

²⁾ Patrz np. znane angielskie dzieło Kempe'a i podręczniki Kittlera.

pochodzą poczęści jeszcze z czasów, kiedy jedynym źródłem prądu były pierwotne ogniwa galwaniczne, stosowane — prawie wyłącznie — do urządzeń telegraficznych. Elektryczne przyrządy miernicze były w tych czasach jeszcze bardzo niedoskonałe i ograniczały się właściwie do galvanometrów lusterkowych o ruchomych magnesach i do stosunkowo mało dokładnych zespołów oporowych. Galwanometry były przede wszystkim zdadne do metod zerowych, w najlepszym razie jeszcze do określenia stosunku natężeń prądu. Przyrządów do wykonywania w prosty i pewny sposób pomiaru natężenia prądu i napięcia w dokładnie ustalonych jednostkach wtedy jeszcze nie było.

W miarę rozwoju elektrotechniki ogniwa galwaniczne odsuwały się na plan coraz dalszy, i zainteresowanie dla nich coraz bardziej malało. Jest więc zrozumiałe, że w nowszych podręcznikach z dziedziny pomiarów elektrycznych pomiary oporu ogniów galwanicznych są traktowane nader powierzchownie albo nawet zupełnie pomijane. Mniej zrozumiałe jest natomiast, że tam, gdzie się mówi o tych pomiarach³⁾, znajdujemy te same metody, które są opisywane w najstarszych prawie dziełach, chociaż przy obecnym stanie techniki pomiary te można wykonać w sposób znacznie prostszy i dokładniejszy.

Metody pomiaru oporu ogniów można podzielić na dwie grupy: 1) pomiar spadku napięcia w ogniwie; 2) metody mostkowe. Podział ten zresztą jest nieściśły, gdyż i przy metodach mostkowych pomiar jest właściwie oparty na porównywaniu spadków napięcia. Istotniejszy jest może podział metod w zależności od tego, czy do pomiaru jest użyty prąd stały, czy prąd zmienny. Czy należy uważać za miarodajniejsze wyniki, otrzymane prądem stałym czy prądem zmiennym, to jest zagadnieniem specjalnym, które nie będzie na tem miejscu obszerniej poruszane. Nie ulega jednak, zdaje się, wątpliwości, że większe praktyczne znaczenie posiadają wyniki, otrzymane przy pomiarach prądem stałym. Takie wartości oporu charakteryzują ogniwo pod względem jego spadku napięcia, który występuje przy jego pracy. Często możnaby się wogóle ograniczyć do określenia spadku napięcia przy określonym obciążeniu, np. przy nominalnym natężeniu prądu danego ogniwa.

Normalnie pomiary oporu ogniów, przy zastosowaniu prądu stałego, są wykonywane przy kierunku prądu w ogniwie odpowiadającym „wyładowaniu” ogniwa. W pewnych przypadkach, przede wszystkim przy akumulatorach i ogniwach normalnych, jest jednak pożądane, żeby pomiar był wykonany i przy odwrotnym kierunku prądu, t. zn. przy kierunku „ładowania” ogniwa.

1. *Metody pomiaru spadku napięcia.* Do tej grupy należą metody, polegające na pomiarze napięcia na zaciskach ogniwa przy dwóch różnych obciążeniach. Wychodzi się przytem z założenia, że siła elektromotoryczna w czasie wykonywania całego pomiaru posiada wartość stałą.

Napięcie U na zaciskach ogniwa, jego siła elektromotoryczna E , opór (mierzony) R_x i natężenie prądu I , przepływającego przez ogniwo, są związane równaniem następującym

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

I jest dodatnie, jeżeli ogniwo się „wyładowuje”, ujemne — jeżeli ogniwo jest „ładowane”.

Jeżeli U_1 i U_2 oznaczają napięcia ogniwa przy dwóch różnych natężeniach prądu I_1 i I_2 , to otrzymujemy dwa równania:

$$U_1 = E - R_x I_1 \quad (2a)$$

$$U_2 = E - R_x I_2 \quad (2b)$$

Z równań (2) wynika:

$$R_x = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} \quad (3)$$

W praktyce pomiar jest wykonywany prawie zawsze w ten sposób, że mierzy się siłę elektromotoryczną E , czyli napięcie na zaciskach nieobciążonego ogniwa ($U_1 = E$, $I_1 = 0$) i napięcie U ogniwa ($U_2 = U$) przy jakimś natężeniu prądu $I = I_2$, otrzymanem przez przyłączenie do zacisków ogniwa jakiegoś oporu. Otrzymuje się wtedy na podstawie wzoru (1) albo (3).

$$R_x = \frac{E - U}{I} \quad (4)$$

E i U , względnie ogólnie U_1 i U_2 , można najdokładniej zmierzyć zapomocą przyrządu kompensacyjnego. Wynik, otrzymany z tego rodzaju pomiaru, będzie jednak tylko pozornie bardzo dokładny i dlatego zastosowanie przyrządu kompensacyjnego jest tylko niepotrzebną komplikacją. Zmienność siły elektromotorycznej i oporu ogniwa jest prawie zawsze tak znaczna, że dążenie do wykonania bardzo „dokładnego” pomiaru jest zupełnie bezcelowe. Przy pomiarze oporu pierwotnych ogniów galwanicznych jest zupełnie wystarczający pomiar napięcia zapomocą dobrego przyrządu ze stałym magnesem i ruchomą cewką o oporze co najmniej około 100 Ω na 1 V zakresu pomiaru, czyli o maksymalnym poborze prądu, nieprzekraczającym 10 mA. Opory ogniów pierwotnych suchych i mokrych są rzędu kilku dziesiętnych do kilku ohmów i dlatego przy zastosowaniu przyrządów tego rodzaju można bez zastosowania jakiejkolwiek poprawki uważać, że napięcie, zmierzone przy ogniwie nieobciążonym równa się sile elektromotorycznej. Dobre współczesne przyrządy, przeznaczone specjalnie do pomiaru napięć przy prądzie stałym, posiadają zresztą opory przeważnie znacznie większe, normalnie co najmniej 200 Ω/V (I max. 5 mA), a w przyrządach specjalnych nawet do 10 000 Ω/V i wyżej (I max. 0,1 mA i nawet mniej)⁴⁾.

W literaturze spotyka się różne, poczęści bardzo skomplikowane, nieprzejrzyste i zupełnie przestarzałe metody pomiaru oporu ogniów. Wystarczy tu wspomnieć np. o metodach *Ohma* i *Waltenhofena - Beetza*⁵⁾. W zasadzie wszystkie te metody, o ile nie są metodami mostkowymi, nie są niczem innym, jak odmianami metody pomiaru spadku napięcia, nie mającymi jednak przy obecnym stanie techniki pomiarów elektrycznych najmniejszej racji bytu.

2. *Metody mostkowe.* Metody te polegają na zasadzie mostku *Wheatstone'a*; spotyka się zarówno metody prądu stałego, jak i zmiennego. Do pierwszego rodzaju metod należy naprzykład spotykana często w literaturze metoda *Mance'a*. W tym układzie badane ogniwo jest włączone w mostek, podobnie jak się włącza inne opory, które mają być mierzone w mostku; jest ono jedynym źródłem siły elektromotorycznej w układzie. Przy wykonaniu pomiaru dobiera się opory w innych gałęziach mostku tak, aby znajdujący się w jednej przekątnej galvanometr nie zmieniał odchylenia przy zamykaniu i otwieraniu wyłącznika w przewodzie, tworzącym drugą przekątną. Metoda *Mance'a* nie ma obecnie już żadnego praktycznego znaczenia, jak zresztą wszystkie podobne metody.

⁴⁾ Przepisy VDE (VDE 0807/1928 i VDE 0808/1928) przewidują np. zastosowanie przyrządów o oporze nie mniejszym, niż 100 Ω/V .

⁵⁾ *Waltenhofen*, v. *Pogg. Annalen* 134 (1868) p. 218 *ETZ* 12 (1891) p. 243 i *Beetz*, v. *Pogg. Annalen* 142 (1871) p. 573 jak również *Kittler*, *E. Handbuch der Elektrotechnik*, wyd. 2, t. I. Stuttgart 1892 p. 357.

³⁾ Patrz np. *Kohlrausch F. Lehrbuch der praktischen Physik*, wyd. 16. Leipzig — Berlin 1930, p. 555 i *Linker, A. Elektrotechnische Messkunde*, wyd. 4. Berlin 1932 p. 27.

Mostki prądu zmiennego w zastosowaniu do pomiaru oporu ogni w są znane w różnych odmianach. Najprostszym układem jest znany układ Kohlrauscha do pomiaru oporu elektrolitów. Wadą tego układu, przy włączeniu jako nieznanego opór jednego ogniwa, jest to, że w mostku płyną oprócz prądów zmiennych jeszcze prądy stałe, których źródłem jest badane ogniwo. Prądami temi jest obciążone zarówno to ogniwo, jak i przyrząd zerowy (na przykład telefon). Wady te można usunąć albo przynajmniej znacznie zmniejszyć, mierząc jednocześnie opór dwóch włączonych przeciw sobie, możliwie identycznych ogni w. Inną doskonalszą metodą, zapobiegającą powstaniu prądów stałych, jest włączenie w odpowiednich gałęziach mostka kondensatorów. Jako najlepszą w zasadzie formą tego rodzaju mostka należy uważać układ Nernsta i Haag na. Ta metoda jest jednak nader skomplikowana i nie ma większego praktycznego zastosowania, jak zresztą wszystkie metody mostkowe pomiaru oporu ogni w.

Na zakończenie tego krótkiego przeglądu znanych metod pomiaru oporu ogni w należy stwierdzić, że jedyną stosowaną na szerszą skalę metodą jest pomiar napięcia nieobciążonego i obciążonego ogniwa zapomocą odpowiedniego przyrządu wskazówkowego. Prąd „obciążenia” jest albo mierzony zapomocą amperomierza, albo obliczany z wielkości znanego oporu, użytego jako obciążenie. Nie stoi zresztą nic na przeszkodzie do wykonywania tego rodzaju pomiarów i przy „ujemnym” natężeniu prądu. Jeżeli tego rodzaju pomiary nie są normalnie wykonywane i jeżeli niema, zdaje się, nigdzie w literaturze wzmianek o tego rodzaju pomiarach, to przypuszczalnie dlatego, że pomiar „przy ładowaniu” ma większe praktyczne znaczenie tylko przy akumulatorach, gdzie jednak metoda pomiaru spadku napięcia tak, jak ona normalnie jest wykonywana, wogóle zawodzi.

Nowoczesne metody pomiaru napięć przy prądzie zmiennym pozwalają na bezpośredni pomiar spadku napięcia, wywołanego w ogni w prądem zmiennym. Dla uniknięcia prądów stałych należy przy takim pomiarze włączyć w szereg z badanym ogni wem kondensator o większej pojemności. Zależnie od wielkości spadku napięcia wchodzi w rachubę różne metody pomiaru. Przy małych spadkach napięcia można użyć przyrządów na prąd stały, przyłączonych zapomocą prostowników, np. sterowanych prostowników mechanicznych, albo zastosować metodę kompensacyjną. Obie te metody mają tę zaletę, że pozwalają określić przesunięcie fazy między prądem i napięciem, co może być pozytywne przy wyjaśnieniu niektórych zagadnień specjalnych. W każdym razie zastosowanie prądu zmiennego przy metodach pomiaru spadku napięcia wydaje się bardziej celowe, niż stosowanie mostków na prąd zmienny.

Jak już było powiedziane na wstępie, żadna ze znanych metod pomiaru oporu ogni w nie nadaje się właściwie do pomiaru oporu ogni w normalnych i akumulatorów. Powody są w obu wypadkach pozornie różne.

Przy ogni wach normalnych trudność polega na tem, że obciążalność tych ogni w jest bardzo mała. Jakie obciążenie ogniwa normalnego można w poszczególnych przypadkach dopuścić, zależy zarówno od konstrukcji ogniwa, czasu obciążenia, jak przedewszystkiem od tego, do jakiej klasy dane ogniwo należy. W każdym razie przy ogni wach, przeznaczonych do pomiarów najwyższej precyzji, unika się możliwie każdego niepotrzebnego obciążenia. Wystarczy może przytoczyć jako przykład, że przy porównaniach siły elektromotorycznej ogni w, wchodzących w skład podstawowego wzorca siły elektromotorycznej, w Laboratorium Elektrotechnicznym Politechniki Lwowskiej dopuszcza się chwilowo obciążenie ogniwa prądem o natężeniu najwyżej 5×10^{-8} A.

a w niektórych przypadkach nawet tylko 5×10^{-10} A. Jako najwyższe dopuszczalne obciążenie ogniwa przy pomiarze oporu można może przyjąć 5×10^{-8} do 1×10^{-7} A. Przy tych natężeniach prądu spadek napięcia przy oporze ogniwa rzędu 100 do 1000 Ω wynosiłby więc tylko około 5×10^{-6} do 1×10^{-4} V. Z tego wynika, że nawet przy zastosowaniu pierwszorzędного urządzenia kompensacyjnego, a tylko układy kompensacyjne wchodzi w rachubę, pomiar spadku napięcia jest właściwie niewykonalny. Pomijając zresztą trudności, związane z osiągnięciem dostatecznej dokładności pomiaru spadku napięcia, duże trudności sprawia jeszcze odpowiednie obciążenie ogniwa, gdyż potrzebne są ku temu opory rzędu 10 M Ω , których wielkość jest znana z dokładnością paru procentów. Wykonanie pomiaru przy ujemnym prądzie nastęrcza trudności jeszcze większe. Zastosowanie do pomiaru oporu ogni w normalnych mostka na prąd zmienny wydaje się jeszcze bardziej ryzykowne. Przy tej metodzie można coprawda uniknąć zupełnie obciążenia ogniwa prądem stałym, ale zato obciąża się ogniwo prądem zmiennym i to w sposób, którego wpływ trudno określić. Obciążenie prądem zmiennym musi w każdym razie być dosyć znaczne, gdyż czułość przyrządów zerowych na prąd zmienny (telefon albo galwanometr wibracyjny) jest stosunkowo mała. Zastosowanie układów wzmacniających byłoby dalszą znaczną komplikacją.

Co się tyczy ogni w akumulatorowych, to trudność pomiaru oporu polega tu głównie na tem, że mierzony opór jest bardzo mały, wynosi on nawet przy stosunkowo małych przenośnych ogni wach zaledwie 1×10^{-2} Ω , a przy większych ogni wach stacyjnych może być mniejszy, niż 1×10^{-3} Ω . Można przyjąć, że spadek napięcia ogniwa akumulatorowego przy natężeniu prądu, odpowiadającym wyładowaniu ogniwa w ciągu trzech godzin, jest rzędu 0,05 V, czyli rzędu 2% napięcia ogniwa.

Ten mały spadek napięcia jest powodem, że nawet przy korzystnych warunkach pomiaru zwyczajna metoda pomiaru spadku napięcia nie może dać dokładniejszych wyników. Jeżeli np. odchylenie przyrządu przy pomiarze napięcia wynosi około 100 działek, to spadkowi napięcia przy obciążeniu ogniwa prądem nominalnym odpowiada zmiana wychylenia przyrządu o mniejwięcej dwie działki. W tych warunkach pomiar oporu będzie obarczony błędem rzędu 10%. Wykonanie pomiaru przy małym obciążeniu ogniwa albo przy dwóch małych od siebie różniących się obciążeniach nie może być wogóle wykonane. Większą dokładność możnaby osiągnąć, stosując dokładny przyrząd kompensacyjny. Przyrząd tego rodzaju jednak tylko w wyjątkowych wypadkach mógłby być zastosowany do pomiaru przy baterji stacyjnej.

Mostki w układzie Wheatstone'a nie wchodzi w rachubę wogóle w rachubę przy oporach, jakie spotykamy w akumulatorach. W zasadzie możnaby zastosować inną z metod, stosowanych do małych oporów, na przykład mostek Kelvina (Thomsona) albo metodę Hockin-Matthiesena. Zastosowanie tych metod przy prądzie zmiennym byłoby jednak conajmniej bardzo trudne. W literaturze znajdujemy coprawda wzmianki o tego rodzaju i innych metodach, zmierzających do pokonania trudności pomiaru oporu akumulatorów^{*)}. Jedyną metodą na prąd zmienny, która mogłaby doprowadzić do celu, wydaje się wymieniony wyżej bezpośredni pomiar spadku napięcia. Metoda ta nie była jednak, zdaje się, dotychczas jeszcze nigdy zastosowana.

^{*)} Patrz np. Ferraris, L. Corso di Misure Elettriche, wyd. 2, Torino—Genova 1921 p. 118 (wzmianka o metodzie Grassi), Montpellier, J. A. et Alamet, M. Mesures Electriques Industrielles, Paris 1911, p. 252 i Gerard, E. Mesure Electriques, Paris 1896, p. 364.

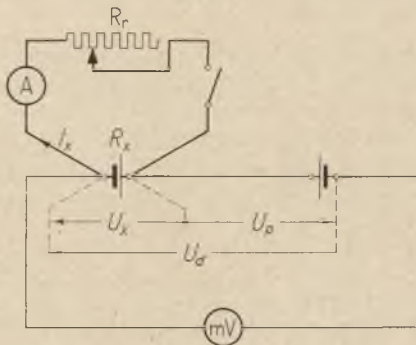
III. Nowe metody pomiaru oporu ogniów.

Z poprzedniego wyniku, że metody pomiaru spadku napięcia zawodzą w wypadku ogniów normalnych i akumulatorów dlatego, że małe spadki napięć są otrzymywane jako różnice dwóch mało od siebie różniących się napięć innego rzędu. Warunki pomiaru byłyby znacznie korzystniejsze, gdyby się udało mierzyć bezpośrednio spadki napięcia albo conajmniej sprowadzić pomiar do pomiaru napięć rzędu tych spadków napięć. Rozumowanie to nasuwa następujące zasadnicze rozwiązanie zagadnienia: należy mierzyć różnice między napięciem ogniwa przy różnych jego obciążeniach i niezmiennym (albo dokładnie znanym) napięciem pomocniczym tego samego rzędu, jak napięcie ogniwa.

Sposób zastosowania tej ogólnej zasady zależy od wielkości oporu i dopuszczalnego obciążenia badanego ogniwa, pożądanej dokładności i t. p. Omawianie wszystkich nasuwających się możliwości wykonania pomiaru wydaje się zbyt trudne. Wystarczy przytoczyć kilka charakterystycznych i celowych odmian metody. Ze względu na różny charakter pomiarów ogniów normalnych i ogniów normalnych oba rodzaje pomiarów będą traktowane oddzielnie. Układy, podane dla akumulatorów, nadają się oczywiście i do innych ogniów o małym oporze. Zresztą granice między poszczególnymi odmianami metody często się zacierają.

1. *Pomiar oporu akumulatorów.* Ze względu na mały opór akumulatorów mogą przy pomiarach tych oporów być zastosowane tylko takie układy, w których spadki napięć w przewodach, przyrządach i t. p. nie dodają się przy pomiarze do napięć na zaciskach akumulatorów.

Układ najprostszy i zarazem charakterystyczny jest uwidoczniony na rys. 1. Następne układy są rozwinięciem te-



Rys. 1.

go układu. Przeciwko badanemu ogniwu akumulatorowemu (opór R , napięcie U_x) jest załączone pomocnicze ogniwo akumulatorowe, dowolnej wielkości o napięciu U_p , przy czym $U_p \approx U_x$. Badane ogniwo może być obciążone przez przyłączenie do niego obwodu, składającego się z oporu regulacyjnego R_r i amperomierza do pomiaru prądu obciążenia I_x . Różnica napięć $U_d = U_x - U_p$ obu ogniw jest mierzona za pomocą miliwoltomierza mV w zakresie pomiaru, np. 100 mV.

Jeżeli U_{d1} i U_{d2} oznaczają różnice napięć, odpowiadające napięciom U_{x1} i U_{x2} badanego ogniwa przy obciążeniach I_{x1} i I_{x2} , to wielkości te są związane równaniami:

$$\begin{aligned} U_{d1} &= U_{x1} - U_p \\ U_{d2} &= U_{x2} - U_p \end{aligned}$$

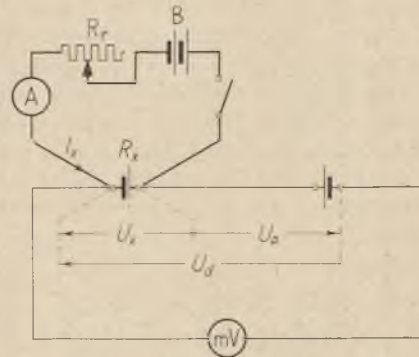
czyli

$$U_{d1} - U_{d2} = U_{x1} - U_{x2}$$

z czego wynika (patrz równanie 3):

$$R_x = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{I_2 - I_1} \dots \dots \dots (5)$$

U_d jest dodatnie, jeżeli $U_x > U_p$ i odwrotnie. Przy zmianie obciążenia badanego ogniwa wielkość U_d może zmieniać swój znak. Jest więc celowe przyłączyć miliwoltomierz za pomocą przełącznika. Określenie znaku U_d nie następuje większych trudności. O ile nie chodzi o jakieś specjalne badania, to najwygodniej jest wykonać jeden z dwóch pomiarów napięcia U_d przy przerwaniu obwodu obciążenia, t. zn. przy $I_x = 0$.



Rys. 2.

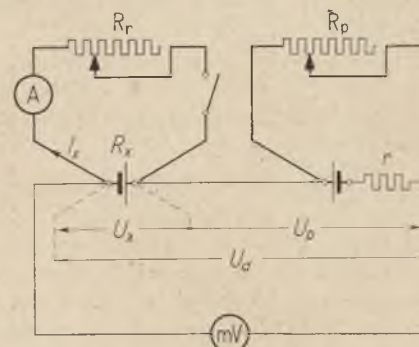
Układ według rys. 2 służy do pomiaru oporu R_x przy ujemnym natężeniu prądu I_x , t. zn. przy ładowaniu ogniwa. Układ ten różni się od układu rys. 1 przez dodanie pomocniczej baterji B do ładowania badanego ogniwa. Łatwo jest oczywiście zrobić układ połączeń, pozwalający na przejście z układu 1 na układ 2.

Obliczenie wyników upraszcza się jeszcze, jeżeli przy jednym z obciążeń badanego ogniwa $U_d = 0$. Jeżeli naprzykład przy $I_x = 0$, $U_d = 0$, to wartość U_d , zmierzona dla jednego obciążenia I_x , jest niczem innym, jak wprost spadkiem napięcia ogniwa badanego przy obciążeniu I_x . Otrzymujemy więc

$$R_x = \frac{U_d}{I_x} \dots \dots \dots (6)$$

Warunek $U_d = 0$ można często z dostateczną dokładnością spełnić dla $I_x = 0$, jeżeli ogniwo pomocnicze jest pod względem stanu naładowania, gęstości kwasu i t. p. zbliżone do ogniwa badanego.

O ile chodzi o wykonanie dużej ilości pomiarów, na przykład pomiar oporu większej ilości ogniw jednej baterji, albo osiągnięcie większej dokładności pomiaru, to celowe jest zastosowanie regulacji napięcia pomocniczego. Bardzo celowym układem, w którym taka regulacja jest zastosowana, jest układ, uwidoczniony na rys. 3. Zastosowane jest po-



Rys. 3.

mocnicze ogniwo o sile elektromotorycznej nieco wyższej od najwyższej wartości napięcia ogniwa badanego. (Siła elektromotoryczna akumulatora daje się, w pewnych granicach, regulować przez zmianę koncentracji kwasu). Opór

tego ogniwa pomocniczego jest sztucznie powiększony przez przyłączenie oporu r rzędu 0,1 do 1 Ω . Oprócz tego ogniwo pomocnicze może być obciążone zapomocą oporu regulacyjnego, np. oporu suwakowego, R_p . Przez odpowiednie obciążenie można dokładnie wyregulować napięcie U_p . Układ pozwala wykonać pomiar oporu R_x przy bardzo małych obciążeniach badanego ogniwa, albo przy dwóch bardzo mało od siebie różniących się obciążeniach. Dokładność pomiaru zależy od dokładności wyregulowania napięcia U_p , zakresu miliwoltomierza. Stosując np. przyrząd na zakres pomiaru 5 mV, można zmierzyć opór akumulatora przy obciążeniach rzędu kilku procentów obciążenia nominalnego. Dalsze zwiększenie dokładności pomiaru, nie mające zresztą większego praktycznego znaczenia, daje się osiągnąć przez takie wyregulowanie napięcia U_p , żeby podczas wykonania pomiaru napięcie U_d było przy jednym obciążeniu ogniwa badanego dodatnie, przy drugim — ujemne. Można w ten sposób zastosować do pomiaru U_d przyrząd o stałej napięciowej mniej więcej dwa razy mniejszej, niż w przypadku, gdy U_d podczas pomiaru nie zmienia swego znaku, a jedna z wartości U_d jest zbliżona do 0. Przy badaniu ogniwa baterji stacyjnej można badane ogniwa obciążać zapomocą odbiorników, normalnie przyłączonych do tej baterji. Wykonanie pomiaru oporu nawet największych spotykanych w praktyce ogniwa akumulatorowych nie sprawia przy zastosowaniu omówionych metod żadnych większych trudności, gdyż może być wykonane nawet przy obciążeniu stosunkowo bardzo małym. Pomiar prądu obciążenia nie potrzebuje być zresztą wykonany z bardzo dużą dokładnością i w wielu przypadkach można do tego pomiaru użyć przyrządów, zmontowanych na tablicy rozdzielczej. O ile chodzi o perjodyczną kontrolę baterji, to najbardziej celowe jest użycie specjalnego urządzenia pomiarowego, składającego się z przyrządu do pomiaru napięcia U_d , ogniwa pomocniczego, potrzebnych oporów i przełączników i t. p. W pewnych specjalnych przypadkach do pomiaru U_d może być celowe zastosowanie prostego urządzenia kompensacyjnego np. w układzie Lindbecka, które daje się bez trudności przenosić z miejsca na miejsce.

Jako przykład zastosowania omówionej metody może służyć następujący.

Został zmierzony w układzie rys. 1 opór jednego ogniwa starszej małej stacyjnej baterji o pojemności 145 Ah przy trzechgodzinnem wyładowaniu. Ogniwo było obciążane zespołem oporów regulacyjnych; do pomiaru natężenia prądu został użyty amperomierz na 20 A, a różnica napięć U_d była mierzona przyrządem na 100 mV.

Pomiary dały wyniki następujące:

$$\begin{array}{ll} I_x = 0 & U_d = -40 \text{ mV} \\ I_x = 5,0 \text{ A} & U_d = -31 \text{ mV} \\ I_x = 15,0 \text{ A} & U_d = -10 \text{ mV} \end{array}$$

Z tych danych wynika:

Spadek napięcia ogniwa przy 5,0 A wynosi $(-40 + 40) = 9 \text{ mV}$, a z tego opór

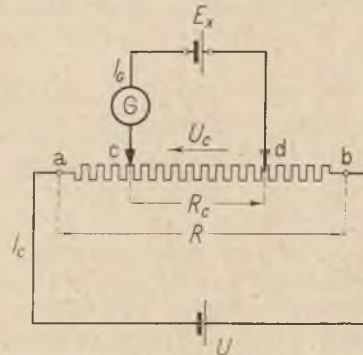
$$R_x = 9 : 5,0 = 1,8 \text{ m}\Omega = 0,0018 \Omega.$$

Spadek napięcia ogniwa przy 15,0 A wynosi $(-10 + 40) = 30 \text{ mV}$, a z tego opór

$$R_x = 30 : 15,0 = 0,0020 \Omega = 2,0 \text{ m}\Omega$$

2. *Pomiar oporu ogniwa normalnych.* Napięcie na zaciskach ogniwa normalnego może być mierzone tylko zapomocą metody kompensacyjnej. Ogólną zasadę pomiaru kompensacyjnego ilustruje rys. 4. Pomocnicze źródło prądu, np.

ogniwo okumulatorowe, (o napięciu U) zasila szereg oporów (włączonych między punkty a i b) o całkowitym oporze R . Do części tych oporów, właściwego oporu kompensacyjnego R_c , jest przyłączona gałąź kompensacyjna, zawierająca ogniwo o sile elektromotorycznej E_x i galwanometr G . Jeżeli spadek napięcia U_c , wytworzony na oporze kompensacyjnym R_c przez pomocniczy prąd I_c ,



Rys. 4.

dokładnie równa się sile elektromotorycznej E_x , to w gałęzi kompensacyjnej nie płynie żaden prąd, czyli prąd w galwanometrze $I_G = 0$.

Otrzymujemy więc równanie:

$$E_x = I_c R_c \dots \dots \dots (7)$$

Jeżeli napięcie kompensacyjne U_c nie równa się sile elektromotorycznej E_x , to w gałęzi kompensacyjnej płynie pewien prąd I_G , którego wielkość określa wzór następujący:

$$I_G = \frac{\Delta U}{R_x + R_G + R_c'} \dots \dots \dots (8)$$

We wzorze tym oznaczają: ΔU zmianę napięcia kompensacyjnego w stosunku do stanu dokładnej kompensacji, $\Delta U = E_x - U_c$; R_x — opór ogniwa w gałęzi kompensacyjnej, R_G — opór galwanometru i R_c' — „zastępczy” opór kompensacyjny.

Stan kompensacji może być osiągnięty różnymi sposobami, np. przy stałej wartości R_c przez odpowiednią regulację prądu kompensacyjnego I_c , albo przez zmianę R_c przy stałej wartości natężenia prądu I_c . Z tego wynikają i dwie możliwości powstania jakiejś „różnicy napięć” ΔU .

ΔU może być obliczone z jednego z następujących wzorów:

$$\Delta U = \Delta R_c I_c \dots \dots \dots (9a)$$

albo

$$\Delta U = R_c \Delta I_c \dots \dots \dots (9b)$$

Wzór (9a) ma zastosowanie wtedy, gdy „naruszenie kompensacji” zostało spowodowane przy niezmiennym I_c przez zmianę oporu kompensacyjnego o wielkości ΔR_c ; wzór (9b) — wtedy, gdy przy niezmiennym oporze R_c prąd kompensacyjny został zmieniony o wielkość ΔI_c .

R_c' może być obliczone według wzoru następującego:

$$R_c' = R_c \left(1 - \frac{R_c}{R}\right) = R_c \left(1 - \frac{U_c}{U}\right) \dots \dots (10)$$

Wyprowadzenie tego wzoru może być na tem miejscu pominięte, gdyż zagadnienie czułości układów kompensacyjnych, a temsamem obliczenia prądu I_G będzie obszernie traktowane przez autora na innem miejscu. Tu wystarczy podkreślić, że inni autorzy niesłusznie wprowadzają do wzoru (8) zamiast R_c' opór kompensacyjny R_c , a te dwie wielkości często się znacznie od siebie różnią. Należy jeszcze zaznaczyć, że wzór (10) nie ma zastosowania w układach, w których opór kompensacyjny składa się z dwóch albo więcej połączonych

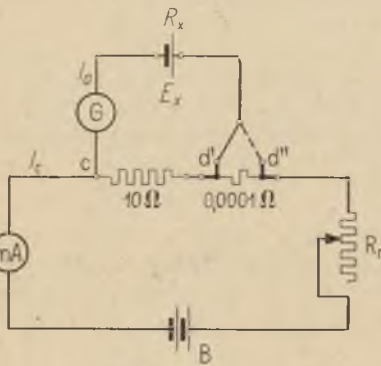
równoległe gałęzi. (Tęgo rodzaju układy spotykamy np. w przyrządach kompensacyjnych, w których są zastosowane korbki Varley'a i w przyrządzie kompensacyjnym Rapsa).

W zasadzie można byłoby wykonać pomiar oporu ogniwa normalnego w układzie analogicznym do układu według rys. 1, wykonując pomiar różnicy napięć U_d za pomocą metody kompensacyjnej. Metoda ta jednak nastrocza praktycznie większe trudności i dlatego dokładniejsze omówienie jej może być pominięte.

Dobre wyniki może natomiast dać metoda, polegająca na pomiarze prądu I_G , powstającego przy pewnej różnicy napięć ΔU . Ze wzoru (8) wynika:

$$R_x = \frac{\Delta U}{I_G} - (R_G + R_c') \dots \dots \dots (11)$$

Dostatecznie dokładny wynik może być jednak osiągnięty tylko wtedy, gdy suma $R_G + R_c'$ jest małą w stosunku do mierzonego oporu ogniwa R . Dlatego do wykonania tego rodzaju pomiarów nie nadają się układy kompensacyjne o większych oporach, jak np. najczęściej rozpowszechnione przyrządy kompensacyjne, w których R_c wynosi $10\,000 \Omega/V$ ($I_c = 0,1 \text{ mA}$). Opor R_c nie powinien przekraczać przy pomiarze oporów ogniw normalnych $100 \Omega/V$. Odpowiedni układ można jednak łatwo zestawić bez zastosowania specjalnych przyrządów kompensacyjnych.



Rys. 5.

Jako przykład może służyć układ według rys. 5. Opor kompensacyjny składa się z połączonych w szereg dwóch oporów normalnych 10Ω i $0,0001 \Omega$. Do regulacji prądu kompensacyjnego służy opór regulacyjny R_r , a dla ułatwienia wyregulowania prądu I_c jest włączony miliamperomierz mA. Natężenie prądu kompensacyjnego wynosi przy pomiarze oporu ogniwa Westona około 100 mA . Pomocniczym źródłem prądu jest bateria B, złożona z dwóch ogniw akumulatorowych.

Początkiem oporu kompensacyjnego (punkt c) jest zawsze początek normalnego oporu 10Ω ; jako koniec (punkt d) może być obrany początkowy albo końcowy zacisk napięciowy (d' albo d'') oporu normalnego $0,0001 \Omega$.

Kompensacja zostaje osiągnięta po przyłączeniu gałęzi kompensacyjnej do punktu d' albo d'' przez odpowiednie wyregulowanie prądu kompensacyjnego I_c . Następnie, nie zmieniając I_c , przełącza się koniec gałęzi kompensacyjnej na drugi zacisk oporu $0,0001 \Omega$, przez co zmienia się napięcie kompensacyjne o $0,01\%$, czyli 1×10^{-5} , t. zn. o $\Delta U = E_x \cdot 10^{-5} \text{ V}$, czyli przy pomiarze oporu ogniwa Westona o $1,02 \times 10^{-5} \text{ V}$. Znając stałą prądową galwanometru, otrzymuje się z odchylenia galwanometru natężenie prądu I_G . Zależnie od tego, czy przy naruszeniu kompensacji napięcie kompensacyjne zostaje podwyższone czy też zmniejszone, prąd w ogniwie badanym jest ujemny albo dodatni. Metoda pozwala więc na pomiar oporu przy obu kierunkach prądu.

Jako przykład może służyć następujący pomiar oporu ogniwa Westona.

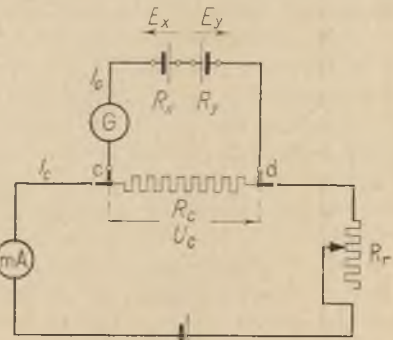
Pomiar został wykonany przy zastosowaniu układu według rys. 5. Opor galwanometru wynosił $R_G = 36 \Omega$. Stała prądowa galwanometru, określona dla odległości skali, przy której został wykonany pomiar, była $C_I = 0,115 \cdot 10^{-9} \text{ A/mm}$. Zmianie napięcia kompensacyjnego o $\Delta U = 1,02 \times 10^{-5} \text{ V}$ odpowiadało odchylenie galwanometru $\alpha = 73,5 \text{ mm}$, czyli $I_G = \alpha C_I = 73,5 \cdot 0,115 \cdot 10^{-9} = 8,47 \cdot 10^{-9} \text{ A}$. Uwzględniając, że napięcia pomocnicze U wynosiło 4 V , otrzymujemy ze wzoru (10) $R_c' = 7 \Omega$.

Mierzony opór ogniwa obliczamy według wzoru (11).

$$R_x = \frac{\Delta U}{I_G} - (R_G + R_c') = \frac{1,02 \cdot 10^{-5}}{8,47 \cdot 10^{-9}} - (36 + 7) = 1205 - 42 \approx 1160 \Omega.$$

Godne uwagi jest, że podczas pomiaru oporu ogniwa normalne było obciążone tylko prądem o natężeniu mniejszym, niż $1 \cdot 10^{-8} \text{ A}$, czyli $0,01 \mu\text{A}$. Omówiony układ pozwala przy odpowiednim doborze przyrządów w sposób nader prosty i pewny mierzyć opory ogniw normalnych. Wadą układu jest, że układ nie pozwala jednocześnie wykonać porównania siły elektromotorycznej dwóch ogniw.

Ostatnio wymienionemu warunkowi odpowiada układ według rys. 6. Pomiar różnicy sił elektromotorycznych $E_x - E_y$ dwóch ogniw normalnych o oporach R_x i R_y jest



Rys. 6.

wykonywany przez kompensację spadkiem napięcia U_c na znanym oporze R_c (na przykład oporze normalnym⁷⁾). Prąd kompensacyjny I_c jest mierzony dokładnym przyrządem wskazówkowym mA; $U_c = R_c \cdot I_c$. Po osiągnięciu kompensacji prąd I_c zostaje zmieniony o pewną wielkość ΔI_c , co powoduje zmianę U_c o $\Delta U_c = R_c \Delta I_c$.

Zmianie napięcia kompensacyjnego o ΔU_c odpowiada powstanie w gałęzi kompensacyjnej prądu I_G . W sposób zupełnie analogiczny jak ten, który został już opisany wyżej, można więc obliczyć sumę $R_x + R_y$ oporów obu włączonych ogniw normalnych. Jeżeli jeden z tych oporów jest znany, to można otrzymać wartość drugiego oporu. Jeżeli się nie rozporządza ogniwem normalnym, którego opór jest znany, to można wykonać pomiar, stosując trzy ogniwa o oporach R_x , R_y i R_z w kombinacjach: $R_x + R_y$; $R_x + R_z$; $R_y + R_z$. Otrzymujemy trzy równania:

$$R_x + R_y = \frac{\Delta U_1}{I_{G1}} - R_G \dots \dots \dots (12a)$$

$$R_x + R_z = \frac{\Delta U_2}{I_{G2}} - R_G \dots \dots \dots (12b)$$

$$R_y + R_z = \frac{\Delta U_3}{I_{G3}} - R_G \dots \dots \dots (12c)$$

⁷⁾ Patrz również K r u k o w s k i, W., „Podstawowe jednostki elektryczne i ich wzorce”, Przegląd Elektrotechniczny 15 1933, p. 806.

Równania (12) pozwalają na obliczenie oporów poszczególnych ogniw. W równaniach tych jest opuszczony opór R_c' , gdyż opór ten w układzie, o którym mowa, jest zawsze bardzo mały.

Analogicznie, jak w poprzednio omawianym układzie, pomiar oporu może być wykonany przy dowolnym kierunku prądu w ogniwach, który jest zależny od znaku ΔU . Należy przytem uwzględnić, że przy jednym i tym samym pomiarze w jednym z obu ogniw normalnych powstaje prąd dodatni, w drugim ujemny.

Pomiar może być wykonany pozatem w różny sposób. Bardzo celowe jest regulowanie ΔU w ten sposób, żeby wychylenie galwanometru i tem samym I_G było zawsze jednakowe.

Następujący przykład ilustruje bliżej metodę. Pomiaru zostały wykonane w następujących warunkach. Opór R_c był oporem normalnym 0,001 Ω . Zakres przyrządu do pomiaru I_c wynosił 300 mA przy stałej 2 mA na działkę. Z czego wynika, że zmianie odchylenia miliamperomierza o jedną działkę odpowiada zmiana napięcia kompensacyjnego $2 \cdot 10^{-6}$ V. Przy naruszeniu kompensacji odchylenie galwanometru wynosiło 100 mm, czemu przy stałej galwanometru $0,44 \times 10^{-9}$ A odpowiada $I_c = 0,44 \times 10^{-7}$. Opór galwanometru wynosił $R_G = 385 \Omega$.

Przy trzech możliwych kombinacjach badanych ogniw zmiany napięcia kompensacyjnego, odpowiadające odchyleniu galwanometru $\alpha_G = 100$ mm, t. zn. $I_G = 0,44 \times 10^{-7}$, były następujące:

$$\begin{aligned} \text{przy } R_x + R_y & \quad \Delta U_1 = 147 \cdot 10^{-6} \text{ V} \\ \text{przy } R_x + R_z & \quad \Delta U_2 = 142 \cdot 10^{-6} \text{ V} \\ \text{przy } R_y + R_z & \quad \Delta U_3 = 141 \cdot 10^{-6} \text{ V} \end{aligned}$$

Otrzymujemy więc następujące równania (patrz równanie 12).

$$R_x + R_y = \frac{\Delta U_1}{I_{G1}} - R_G = \frac{147 \times 10^{-6}}{0,44 \times 10^{-7}} = 3420 \Omega.$$

Drugie dwa równania są analogiczne; rozwiązując je z uwzględnieniem, że $R_G = 385 \Omega$, otrzymujemy następujące wartości oporów trzech badanych ogniw:

$$R_x = 1500 \Omega, \quad R_y = 1530 \Omega, \quad R_z = 1420 \Omega.$$

Na zakończenie może warto nadmienić, że podana wyżej zasada pomiaru stosunkowo małych zmian napięcia przez użycie napięcia pomocniczego może z pożytkiem być stosowana nie tylko przy pomiarze oporu ogniw, lecz i do wielu innych celów. Metoda ta daje dobre wyniki np. przy dokładnem określaniu przebiegu napięcia akumulatorów przy ładowaniu i wyładowaniu, jak również w wypadkach, kiedy chodzi o dokładne mierzenie albo zapisywanie wahań napięcia sieci i t. p. O ile napięcie, zmiany którego mają być mierzone, jest stosunkowo wysokie i niema możliwości, albo jest conajmniej niewygodne, zastosować stałe napięcie pomocnicze tej samej mniejwięcej wielkości, co napięcie badane, to można zastosować specjalny przyrząd, który pozwalałby użyć niższe napięcie pomocnicze. Przyrząd taki mógłby być zbudowany np. w sposób następujący. Ruchome cewki dwu przyrządów zostają umieszczone na jednej osi; jedna z cewek jest przyłączona przez odpowiedni opór jako woltomierz do badanego napięcia; druga cewka z mniejszym dodatkowym oporem jest przyłączona do jednego, albo dwu ogniw akumulatorowych. Kierunek prądu w obu cewkach jest tak dobrany, że momenty obu cewek mają przeciwny kierunek. Możliwe jest również zastosowanie jednego systemu mierniczego z podzieloną na dwie sekcje cewką. Cewki tego rodzaju są zresztą stosowane np. w galwanometrach przeznaczonych do dwóch różnych celów.