

PODSTAWOWE JEDNOSTKI ELEKTRYCZNE I ICH WZORCE

Napisał:
Dr. inż. W. Krukowski
Profesor Politechniki Lwowskiej

Odbitka z „Przeglądu Elektrotechnicznego” 1933 r. Nr. 22, 23 i 24

1
107

Praca niniejsza¹⁾ ma na celu zobrazowanie zagadnienia podstawowych jednostek elektrycznych i ich wzorców przede wszystkim z punktu widzenia techniki pomiarowej²⁾. Jako podstawowe jednostki są na tem miejscu uważane w pierwszym rzędzie jednostki oporu, natężenia prądu i siły elektromotorycznej względnie napięcia. Wzorce, któremi posługujemy się przy pomiarach, są niejako materialnem odtworzeniem jednostek, czyli pojęć poniekąd oderwanych³⁾. W ramach niniejszego artykułu nie jest oczywiście możliwe poruszenie szczegółów, mających znaczenie tylko dla tych, którzy specjalnie pracują w dziedzinie jednostek i wzorców. O ile pewne szczegóły będą poniżej wymienione, to są one potraktowane tylko jako przykłady, mające uwydatnić specjalny charakter prac nad jednostkami i wzorcami i wykazać, na jakie trudności się przy tego rodzaju pracach napotyka.

Niniejsza praca składa się z następujących części: I. Podstawy układu metrycznego. II. Zarys historyczny rozwoju jednostek elektrycznych i ich wzorców. III. Obecny stan zagadnienia. IV. Przewidywane zmiany i konsekwencje, jakie te zmiany za sobą pociągają.

I. Podstawy układu metrycznego.

Zarówno obecnie miarodajne jednostki elektryczne, jak również — i to w większym stopniu —

¹⁾ Część odczytu, wygłoszonego przez autora na posiedzeniu Oddziału Warszawskiego SEP w dn. 12 października 1933 r. i Oddz. Lwowskiego w dniu 27 października 1933 r. Praca zawiera niektóre szczegóły, na odczyt z braku czasu pominięte, natomiast nie zawiera obszerniej omawianych na odczyt wspólnych prac Głównego Urzędu Miar i Laboratorium Elektrotechnicznego Politechniki Lwowskiej, które będą oddzielnie opublikowane. Praca niniejsza miała się już ukazać jako jeden z referatów na Walne Zgromadzenie SEP w czerwcu 1933 r.

²⁾ Zagadnienie jednostek z punktu widzenia teoretycznego jest bardzo obszernie potraktowane w pracy: St. Fryze „Jednostki fizyczne i techniczne” Przegl. Elektrotechn. 15. (1933), str. 417, 603, 623, 643 i 663. (Oddzielna odbitka ukazała się już w czerwcu 1933 r.)

³⁾ Z. Rauszer w pracy „Błędy i poprawki narzędzi mierniczych” Przegl. Techn. 72, (1933), str. 435 i 464 nazywa „wzorcem miary” ciało fizyczne, którego pewna własność pod względem wielkości przedstawia tę miarę z określoną dokładnością, i dodaje w odnośniku, że wyrazu „wzorzec” używa się w nauce także w znaczeniu inkorporacji miary, wykonanej z wysoką dokładnością i służącej wyłącznie do porównania z nią wzorców, używanych bezpośrednio do mierzenia. W niniejszej pracy będziemy rozumieli wzorzec przede wszystkim w tym ostatnim sensie.

jednostki, których wprowadzenie jest przewidziane w przyszłości, są oparte na bezwzględnych jednostkach CGS. Z tego powodu pożytecznym jest zaznajomienie się z podstawami, na których opierają się jednostki metryczne. Ułatwi to również zrozumienie pewnych dalej omawianych zagadnień.

Podstawą metrycznego układu i tem samym bezwzględnego układu CGS jest metr jako jednostka długości, gram jako jednostka masy i sekunda jako jednostka czasu. Sekunda jest definowana jako $\frac{1}{86\,400}$ część średniej doby słonecznej. Definicja ta nie wymaga na tem miejscu dokładniejszego omówienia. Jednostki metr i kilogram zostały w zasadzie ustalone we Francji za czasów wielkiej rewolucji.

Z inicjatywy kilku miast biskup Tayllerand-Périgord postawił na posiedzeniu Konstytuanty w roku 1790 wniosek o ustalenie i ujednostajnienie miar długości i masy. Wniosek ten został przez Konstytuantę przyjęty 8 maja 1790 r., przyczem zostało postanowione, że jednostka długości ma się opierać na miarze naturalnej, która się da każdej chwili odtworzyć. Początkowo taką miarą miała być długość sekundowego wahadła pod 45° szerokości geograficznej. Jednostka taka byłaby zależna od jednostki czasu. W celu uniknięcia tej zależności komisja, do której należeli Borda, Lagrange i Laplace, zaproponowała w dniu 19 marca 1791 r. jako naturalną miarę długości jedną dziesięciomilionową część ćwierci południka, przechodzącego przez obserwatorium astronomiczne w Paryżu. Oprócz tego dla dalszego ugruntowania nowej jednostki miała być również ustalona długość wahadła sekundowego.

Jako jednostka masy został zaproponowany kilogram, definowany również jako jednostka naturalna, mianowicie masa jednego decymetra sześciennego wody przy temperaturze, odpowiadającej największej gęstości wody (+ 4 C).

Po przyjęciu przez Konstytuantę i króla wniosku komisji zostały w latach 1792 do 1798 wykonane pomiary geodezyjne, wynikiem których było, że nowa jednostka, nazwana zgodnie z propozycją Bordy „Mètre”, równa się $36''\ 11,296'''$, użytej przy pomiarach jednostki „Toise du Pérou” przy 13° R. Na tej podstawie został wykonany platynowy wzorzec końcowy metra o przekroju prostokątnym (25×4,05 mm). Ten wzorzec, zwany „mètre des archives”, został uznany prawnie jako wzorzec metra.

Został również wykonany platynowy wzorzec kilograma, odpowiadający wyżej wymienionej definicji („kilogramme des archives”).

Późniejsze pomiary wykazały, że długość wzorca metra stosunkowo znacznie odbiega od

etalon metra — wzorzec poborowy

wielkości, którą miałby mieć na podstawie wyżej wymienionej definicji⁴⁾). Ponieważ pozatem każdy nowy pomiar długości południka dawałby nieco odmienną długość metra, pierwotna definicja została zarzucona i metr został uznany jako długość, reprezentowana przez jego wzorzec podstawowy.

Okazało się również, że masa wzorca kilograma nie odpowiada dokładnie pierwotnej definicji i dlatego później kilogram został zdefiniowany jako masa wzorca podstawowego⁵⁾. Z biegiem czasu system metryczny został przyjęty w różnych państwach i dlatego zaszła potrzeba dokładnego ugruntowania tego systemu i stworzenia w tym celu międzynarodowej organizacji. 20 maja 1875 r. na Conférence diplomatique du mètre została zawarta Międzynarodowa Konwencja Metryczna (la convention du mètre). Na podstawie tej konwencji należące do niej państwa utrzymują wspólnie instytucję do badań przede wszystkim metrologicznych, Bureau International des Poids et Mesures (skrót BIPM). Instytucja, mająca nadzór nad BIPM, jest Comité International des Poids et Mesures. Komitet ten, zbierający się co dwa lata, jest zależny od najwyższej instytucji konwencji metrycznej Conférence Générale des Poids et Mesures, która zbiera się mniej więcej co sześć lat i rozstrzyga o wszystkich zasadniczych sprawach, objętych przez konwencję międzynarodową.

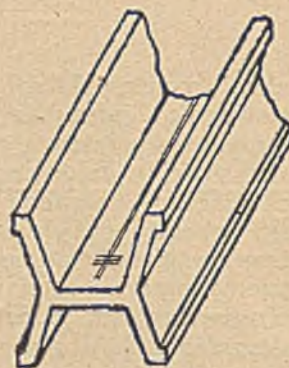
Bureau International des Poids et Mesures mieści się w Pavillon de Breteuil w Sèvres pod Paryżem. Najważniejszymi pracami BIPM było ustalenie nowych międzynarodowych wzorców podstawowych metra i kilograma, gdyż pierwotne wzorce mètre des archives i kilogramme des archives nie mogły być uważane za dostatecznie pewne. Te nowe, do dziś dnia miarodajne wzorce zostały tak wykonane, żeby możliwie dokładnie równały się pierwotnie ustalonym wzorcom. Zarówno podstawowy wzorzec metra jak i kilograma są wykonane ze stopu 90% Pt i 10% Ir (ciężar gatunkowy stopu 21,55).

Międzynarodowy wzorzec metra jest wzorcem kreskowym o przekroju, zbliżonym do litery H (rys. 1). Miarodajne kreski znajdują się na płaszczyźnie, położenie której odpowiada warstwie obojętnej. Na każdym końcu wzorca znajduje się jedna główna kreska i dwie pomocnicze. Długość metra jest definiowana jako odległość między osiami obu miarodajnych kresek przy 0°. Szerokość tych kresek wynosi około 7 μ . Położenie osi kresek daje się określić przy pomiarze komparatorem z dokładnością mniej więcej 0,2 μ . Ze względu jednak na możliwe zmiany długości wzorca i t. p. należy uważać obecnie metr za ustalony z dokładnością „tylko” około 0,5 μ , czyli $0,5 \times 10^{-6}$.

Prototyp kilograma ma kształt cylindra, o wysokości równej średnicy (około 4 cm, objętości

około 46,6 cm³). Wielkość kilograma może być uważana dzisiaj za ustaloną z dokładnością około 0,01 mg czyli z dokładnością 10^{-8} .

Dokładność pomiaru czasu zależy w wysokim stopniu od długości mierzonego okresu. Współczesne zegary astronomiczne pozwalają określać czas (moment) z bardzo dużą dokładnością, dochodzącą mniej więcej do 0,01 sek., z czego wynika, że dokładność pomiaru dłuższych okresów czasu, na przykład kilku dni, jest bardzo wielką.



Rys. 1. Międzynarodowy wzorzec metra. (Przekrój w wielkości naturalnej).

Jednocześnie z międzynarodowym wzorcem metra i międzynarodowym wzorcem kilograma zostały zupełnie w ten sam sposób wykonane dalsze wzorce, z których niektóre są używane jako wzorce wtórne w BIPM, a większa część znajduje się w posiadaniu różnych państw jako wzorce narodowe. Te wtórne wzorce zostały dokładnie porównane ze wzorcami międzynarodowymi i dla każdego wzorca określona jego poprawka, która przy pomiarach zostaje uwzględniona.

System metryczny został wprowadzony w Polsce ustawowo w roku 1919. Należy tu szczególnie podkreślić, że ten ważny krok zawdzięczamy przede wszystkim Dyrektorowi Głównego Urzędu Miar Inż. Z. Rauszerowi. Do konwencji metrycznej Polska przystąpiła w roku 1925.

Dokładność, z którą są obecnie ustalone jednostki długości, masy i czasu, przewyższa znacznie dokładność, osiągalną dzisiaj przy „bezwzględnych” pomiarach elektrycznych. Także z punktu widzenia tych pomiarów ani obecnie, ani nawet w dalszej przyszłości, nie zajdzie prawdopodobnie potrzeba dążenia do dokładniejszego ustalenia jednostek podstawowych. Również i w większości innych pomiarów najwyższej precyzji obecną dokładność ustalenia jednostek podstawowych należy uznać za zupełnie wystarczającą. Wyjątek stanowią tylko pomiary długości najwyższej precyzji, którymi są na przykład pomiary długości szczególnie dokładnych wzorców końcowych (bruskowych) Johanssona. Dla pomiarów tego rodzaju dokładność i pewność, z jaką obecnie jest ustalony metr, jest już zupełnie wystarczającą. Zrozumiałem jest więc dążenie do dokładniejszego ustalenia jednostki długości. Możliwość tego rodzaju ustalenia leży w wyrażeniu metra jako liczby długości fali zupełnie określonego rodzaju światła i należy się liczyć z tem, że tego rodzaju definicja metra zostanie w najbliższym czasie przyjęta. Byłoby to powrotem

⁴⁾ Na podstawie najnowszych pomiarów długość ćwierci południka wynosi 10 001 868 m, czyli metr jest mniej więcej o 0,2 mm, to znaczy o $0,2 \cdot 10^{-3}$ krótszy, niż miał być.

⁵⁾ Na podstawie miarodajnych pomiarów objętość jednego kilograma wody przy 4° (dokładnie 3,98°) przy ciśnieniu 760 mm słupa rtęci wynosi 1,000 028 dcm³. Objętość ta stanowi jeden litr. W większości wypadków można jednak przyjąć, że 1 l = 1 dcm³.

do definicji metra jako jednostki naturalnej i niezależnieniem się przy niektórych pomiarach najwyższej precyzji wogóle od wzorców materialnych, porównanych (pośrednio) z międzynarodowym wzorcem metra. Już dzisiaj mierzy się czasami długość wymienionych płytek Johanssona przez porównanie z długością fali określonego światła, przyczem zazwyczaj przyjmuje się na podstawie pomiarów Benoit, Fabry i Perot, że metr równa się 1 553 164,13 długości fali czerwonego prądku kadmu w suchym powietrzu o ciśnieniu 760 mm słupa rtęci i temperaturze 15° skali wodorowej. Pomiary interferencyjne, które umożliwiają wymiarzenie długości w liczbie długości fali światła, są stosunkowo proste i przeznaczone do tego rodzaju pomiarów przyrządy już dzisiaj znajdują się w sprzedaży (Interferometr Köstersa).

Co się tyczy kilograma, to przynajmniej dotychczas nie zachodzi potrzeba zmiany jego definicji, chociaż przy obecnym stanie techniki pomiarowej byłoby przyuszczalnie możliwym znaleźć definicję „naturalną”, która się da dostatecznie dokładnie urzeczywistnić⁶⁾.

II. Zarys historyczny rozwoju jednostek elektrycznych i ich wzorców.

Niniejszy przegląd historyczny nie ma na celu dokładniejszego omówienia poszczególnych faktów, lecz ma wykazać w ogólnych zarysach, jakimi drogami doszło się do obecnego stanu na polu jednostek i wzorców elektrycznych. Historia jednostek i wzorców elektrycznych była niejednokrotnie obszernie omawiana w literaturze. Na uwagę zasługują przede wszystkim prace A. Boltzmanna⁷⁾, H. Steinwehra⁸⁾, szereg prac W. Jaegera⁹⁾ i kilka referatów, zgłoszonych na Międzynarodowy Kongres Elektryczny w Paryżu, w roku 1932¹⁰⁾. Szczególnie zasługuje na uwagę książka W. Jaegera, specjalnie poświęcona historii jednostek elektrycznych¹¹⁾.

⁶⁾ Blizsze dane, dotyczące metra, kilograma i t. p., patrz np. Guillaume Ch. Ed. La Convention du Mètre et le BIPM. Paris 1902. Guillaume Ch. Ed. La Création du BIPM et son Oeuvre, Paris, 1927.

Pomiary długości są obszernie potraktowane w książce Berndt G. „Grundlagen und Geräte technischer Längenmessungen” 2 wyd. Berlin 1929 (Springer), gdzie znajduje się również obszerny wykaz odnośnej literatury.

⁷⁾ A. Boltzmann „Die elektrischen Masse und Einheiten in historischer Erörterung”, Wien 1913.

⁸⁾ Steinwehr, H. v. „Ueber die geschichtliche Entwicklung der elektrischen Einheiten”. Z. Instrumentenkde 50 (1930) str. 19.

⁹⁾ W. Jaeger, Handbuch der Physik, tom XVI, rozdział 1. „Die elektrischen Masssysteme und Normalien”, Berlin 1927, (Springer). W. Jaeger, „Elektrische Messtechnik” 3 wyd., Leipzig 1928 (Johann Ambrosius Barth), str. 162, rozdział III „Einheiten und Normale”.

¹⁰⁾ Congrès International d'Electricité Paris, 2e Section, Rapport Nr. 1., L. Joly „L'Etat Actuel de la Question des Unités Electriques et Magnétiques”, jak również niektóre inne referaty, które będą wymienione później.

¹¹⁾ W. Jaeger, „Die Entstehung der internationalen Masse der Elektrotechnik” (Geschichtliche Einzeldarstellungen aus der Elektrotechnik, tom czwarty) Berlin 1932. (Springer).

Potrzeba posiadania określonych jednostek wielkości elektrycznych, a właściwie ich wzorców, przede wszystkim wzorców oporu, wypłynęła już około połowy zeszłego stulecia i była spowodowana głównie rozwojem techniki telegraficznej; technika prądów silnych wtedy jeszcze nie istniała.

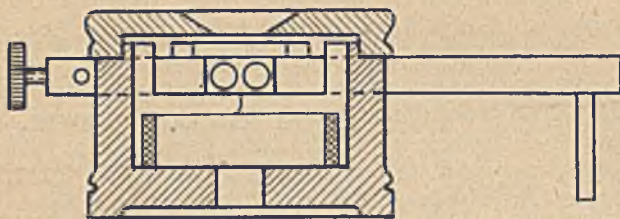
Około roku 1840 Jacobi zaproponował przyjęcie jako jednostki oporu oporu drutu z czystej miedzi o długości 1 m i przekroju 1 mm². Ta jednostka była więc zupełnie dowolnie obrana, ale miała być jednostką, dającą się reprodukować, to znaczy zbudować na podstawie pewnych określonych przepisów bez posiadania innego wzorca oporu. Okazało się jednak, że odtworzenie tej jednostki nie jest możliwe z dostateczną dokładnością, gdyż opór drutu miedzianego, jak zresztą każdego innego ciała stałego, jest w wielkim stopniu zależny nie tylko od chemicznej czystości materiału, lecz również od jego struktury wewnętrznej, uwarunkowanej rodzajem mechanicznej i termicznej obróbki. Druga propozycja Jacobi szła w kierunku stworzenia dowolnych, między sobą porównanych, wzorców, nie dających się reprodukować. Takimi wzorcami miały być cewki z drutu miedzianego, nawinięte na serpentynowe cylindry. Jacobi sporządził szereg tego rodzaju wzorców i przesłał je różnym fizykom, chcąc w ten sposób ujednostajnić pomiary oporu. Wzorce te miały opór około 0,7 terażniejszych ohmów. Jednakowoż i te drugie wzorce, zbudowane przez Jacobi, nie odpowiadały pod względem dokładności nawet skromnym wymaganiom, stawianym w połowie zeszłego stulecia. Oprócz dużej zależności od temperatury zmieniały się one również znacznie w czasie.

Pierwszą jednostką oporu, dokładnie zdefiniowaną, była jednostka Siemensa. W roku 1860 Werner Siemens¹²⁾ zaproponował, aby przyjęć jako jednostkę oporu opór słupa czystej rtęci o długości 1 m i przekroju 1 mm² przy temperaturze topnienia lodu w normalnych warunkach, to znaczy przy 0°. Słup ten tworzy zawartość odpowiedniej rurki szklanej. Jednostka, Siemensa (SE) była więc jednostką, dającą się odtworzyć, podobnie jak to miała być jednostka, pierwotnie zaproponowana przez Jacobi. Zasadnicza różnica propozycji Siemensa polega jednak na wyborze rtęci w stanie płynnym jako materiału oporowego. Niezależniło to opór właściwy materiału od wpływu obróbki mechanicznej i termicznej. Wielką zaletą rtęci jest również możliwość otrzymania jej w stosunkowo łatwy sposób, jako produktu praktycznie zupełnie czystego. Dalszą zaletą zastosowania cieczy jest możliwość dokładnego ustalenia miarodajnego dla obliczenia oporu „średniego” przekroju zapomocą ważenia cieczy, wypełniającej rurkę szklaną, i kalibrowania tej rurki. Dla określenia przekroju słupa rtęci przez określenie jego masy musi być znany ciężar gatunkowy rtęci przy 0°. Wartość ta daje się z dużą dokładnością określić.

Jako wzorce użytkowe, reprezentujące jednostkę Siemensa, były używane opory normalne, porównane pośrednio lub bezpośrednio z jednostką rtęciową. Takie opory normalne (rys. 2) były wyrabiane przez firmę Siemens & Halske jako cew-

¹²⁾ W. Siemens, Pogg. Ann. 110. (1860) str. 1.

ki z drutu nikielinowego, znajdującego się w osłonie drewnianej i zaopatrzone w odpowiednie doprowadzenia. Na oporach tych była podawana temperatura (około 15°), przy której opór równał się dokładnie 1 SE. Jednostka Siemens'a była dłuższy czas w użyciu w szeregu państw, przedewsz-



Rys. 2. Wzorzec jednostki Siemens'a.

stkiem w Niemczech, Austrii i Rosji. Odgrywa ona pośrednio do dziś dnia rolę, gdyż właściwie na niej jest oparta definicja ohma międzynarodowego. Z przytoczonej oryginalnej pracy Siemens'a wynika niedwuznacznie, że uczony ten bynajmniej nie miał, jak się to czasami przypuszcza, zamiaru stworzenia jednostki, zbliżonej do ohma, lecz zaproponował jedynie ustalenie przekroju i długości słupa rtęci w okrągłych wartościach w jednostkach układu metrycznego.

Ustalenie jednostek zapomocą dowolnych niezmiennych wzorców lub wzorców, dających się reprodukowac — o ile wogóle budowa wzorców danej jednostki jest wykonalna — nie jest jedyną możliwą drogą do osiągnięcia celu. Możliwym jest również ustalenie jednostek na podstawie różnych zjawisk fizycznych w zależności od pewnej niewielkiej ilości jednostek podstawowych. Takie układy jednostek są zwane układami bezwzględnymi. Drogę tę wskazał wielki Gauss, który stworzył tego rodzaju układ dla jednostek magnetycznych¹³⁾, przyjmując za jednostki podstawowe jednostki długości, masy i czasu. Należy jednak podkreślić, że wprowadzona przez Gaussa nazwa jednostek bezwzględnych nie ma bynajmniej jakiegoś głębszego znaczenia, które jej się częstokroć przypisuje. Gauss nazwał zaproponowane przez siebie jednostki „bezwzględniemi” w odróżnieniu od przedtem przy pomiarach magnetycznych używanych jednostek. Tak naprzykład za jednostkę natężenia poziomej składowej pola magnetycznego ziemi było przyjmowane natężenie tego pola w pewnym określonym miejscu w Anglii. Opierając się na pracach Gaussa, jego współpracownik Wilhelm Weber¹⁴⁾ stworzył jednostki bezwzględne dla wielkości elektrycznych. Jako jednostki podstawowe Weber stosował milimetr, miligram i sekundę. Z tego wynika, że jednostka natężenia prądu równała się 0,1 (bezwzględnego) ampera. Jednostka ta była pod nazwą „Weber” stosowana przez fizyków niemieckich.

Mniejwięcej w tym samym czasie, kiedy w Niemczech powstała jednostka oporu Siemens'a, zostały również i w Anglii podjęte prace nad ustale-

niem jednostek elektrycznych i ich wzorców. W tym celu została przez Board of Trade utworzona specjalna komisja — British Association Committee on Practical Standards for Electrical Measurements (BA). Komitet ten postanowił przyjąć jednostki, oparte na jednostkach bezwzględnych, stworzonych przez Gaussa i Webera, które stosował również przy swoich pracach Wm. Thomson (Lord Kelvin). Zasady przyjęte przez BA zostały ogłoszone w roku 1863¹⁵⁾. Jednostki zostały oparte na jednostkach bezwzględnego układu elektromagnetycznego, przyczem za podstawowe jednostki zostały do praktycznego użytku ustalone „praktyczny przyjęto elektromagnetyczny układ CGS.

Ze względu na to, że te jednostki posiadają wielkości rzędu mało spotykanego w praktyce, zostały do praktycznego użytku ustalone „praktyczne jednostki”, będące pewnymi wielokrotnymi wymienionych jednostek CGS. Jako praktyczna jednostka oporu została ustalona jednostka 10^9 jednostki CGS. Jako praktyczna jednostka natężenia prądu 10^{-1} jednostki CGS, jako jednostka napięcia, względnie siły elektromotorycznej, 10^8 jednostki CGS.

Jako właściwa praktyczna jednostka oporu miała jednak służyć nie definjowana w ten sposób jednostka, lecz jednostka, reprezentowana przez szereg wzorców metalowych, których opór miał być możliwie zbliżony do wynikającego z teoretycznej definicji. Te wzorce, reprezentujące „British Association Unit” (BAU), były różnie wykonane; jako materiał oporowy były zastosowane różne stopy, przedewszystkiem stop platyny ze srebrem.

Widzimy więc, że BA poszło podobną drogą, jaka została obrana dla metra, który miał być początkowo jednostką naturalną, obecnie jest jednak definjowany jako długość określonego wzorca.

Dla praktycznych jednostek elektrycznych zostały w Anglii również ustalone pewne nazwy, oparte na nazwiskach uczonych, szczególnie zasłużonych na polu elektryczności. Jednostka oporu BAU była nazwana Ohm a d albo Ohm, jednostka napięcia Volt, jednostka natężenia prądu Weber.

Nadzieje, pokładane na wzorcach, reprezentujących BAU, nie ziściły się. Pomijając mniej ważny fakt, że dokładniejsze pomiary wykazały, że BAU dosyć znacznie odbiega od początkowej definicji ($1 \text{ BAU} \approx 0,988 \Omega$), okazało się, że opory wzorców są w znacznym stopniu niestałe.

Stan, który się wytworzył przez stosowanie w różnych państwach różnego rodzaju jednostek, z których w dodatku nie wszystkie były dostatecznie dokładnie definjowane (BAU), był oczywiście bardzo szkodliwy. Niewygodnym było, że dwie używane jednostki oporu BAU i SE różniły się zaledwie o parę procent (mniejwięcej 5%). Jeszcze gorzej przedstawiała się sprawa jednostek natężenia prądu, gdyż dwie używane jednostki,

¹³⁾ C. F. Gauss, *Intensitas vis magneticae terrestis ad mensuram absolutam revocata*. Göttingen, 1832.

¹⁴⁾ Gauss und Weber, *Elektrodynamische, Massbestimmungen* Leipzig, 1846.

¹⁵⁾ British Association Reports on Electrical Measurements; A Record of the History of „Absolute Units” and of Lord Kelvin's work in connection with these. Reprinted by the Association, 1912, Cambridge, University Press.

niemiecka i angielska, nosiły tę samą nazwę Weber, chociaż jednostka niemiecka była dziesięć razy mniejszą od jednostki angielskiej. Powodowało to różne nieporozumienia, na przykład wtedy, jeżeli prace angielskie były cytowane albo tłumaczone w Niemczech i odwrotnie. Międzynarodowe uregulowanie kwestji jednostek elektrycznych było więc ważną i palącą sprawą.

Pierwsze oficjalne kroki w tym kierunku były poczynione na Międzynarodowym Kongresie Elektryków w roku 1881 w Paryżu. Rezultatem tych pertraktacji było wytknięcie drogi, która dziś jeszcze jest miarodajną. Właściwym formalnym zakończeniem prac zapoczątkowanych w roku 1881 były postanowienia Międzynarodowej Konferencji Londyńskiej w roku 1908.

Uchwały Kongresu paryskiego brzmią w tłumaczeniu polskim przy zachowaniu oryginalnej pisowni jednostek jak następuje ¹⁶⁾:

1. Jako podstawowe jednostki przy pomiarach elektrycznych należy przyjąć: centymetr, gram-masę, sekundę (CGS).

2. Praktyczne jednostki *Ohm* i *Volt* zachowują swe obecnie używane definicje: 10^9 dla Ohma i 10^8 dla Volta.

3. Jednostka oporu (*Ohm*) ma być reprezentowana przez słupek rtęci o przekroju jednego milimetra kwadratowego, przy temperaturze zero stopni studzielnnej skali.

4. Komisja międzynarodowa ma na podstawie nowych pomiarów ustalić dla celów praktycznych długość słupa rtęci o przekroju jednego milimetra kwadratowego, przy temperaturze zero stopni skali studzielnnej, który ma reprezentować wartość Ohma.

5. Nazywa się *Ampère* prąd wywołany przez jeden Volt w jednym Ohmie.

6. Nazywa się *Coulomb* ilość elektryczności, która odpowiada definicji, że jeden Ampère daje jeden Coulomb na sekundę.

7. Nazywa się *Farad* pojemność odpowiadająca definicji, że jeden Coulomb daje w jednym Faradzie jeden Volt.

Przytoczona rezolucja Kongresu Paryskiego z roku 1881 była kompromisem między punktem widzenia angielskim i niemieckim. Utrwała ona w głównych zarysach stosowane już w Anglii jednostki, zachowując również dla praktycznych jednostek oporu i napięcia przyjęte w Anglii nazwy. Dla celów praktycznych postanowiono jednak definiować ohm jako opór wzorca rtęciowego, czyli jako pewną wielokrotną jednostki Siemens. Wielokrotna ta, jak również sposób definicji jednostki natężenia prądu, zostają jeszcze otwarte. Powodem tego było, że w roku 1881 nie było jeszcze dostatecznie dokładnych wyników prac doświadczalnych, któreby pozwoliły na rozstrzygnięcie tych kwestyj. Dla praktycznej jednostki natężenia prądu została ustalona nazwa *Ampère*, a to z jednej strony w celu uniknięcia nieporozumień, które wynikały z powodu dawnej niejednolitej jednostki *Weber*, z drugiej strony, żeby jedna z najważniejszych jednostek była nazwana imieniem wielkiego fizyka francuskiego. Widzimy również, że zostały

wprowadzone nowe nazwy Coulomb i Farad dla jednostek ilości elektryczności i pojemności.

W roku 1882 odbył się drugi kongres elektryków w Paryżu, który do sprawy jednostek nie wniósł nic nowego. Większe znaczenie miały natomiast postanowienia kongresu, który się odbył w roku 1884 w Paryżu. Wtedy ustalono, by przyjąć prowizorycznie, że wymieniona wyżej długość słupa rtęci, odpowiadająca jednemu ohmowi, równa się 1,06 m. Tak zdefiniowana jednostka otrzymała w celu odróżnienia jej od dawniej stosowanego ohma, to znaczy BAU, nazwę legalny Ohm i była praktycznie używana około dziesięciu lat. Ważnym było również postanowienie, że dla celów praktycznych *Ampère* ma być definiowany jako pewna ilość srebra, strącana w jednostce czasu w woltametrze srebrowym.

W roku 1889 odbył się w Paryżu kongres, który nie miał charakteru oficjalnego. Na tym kongresie zostały ustalone jednostki *Joule*, *Watt* i *Quadrant* (obecnie *Henry*). Postanowiono również, że mbc mechaniczna maszyn ma być wyrażana nie w koniach mechanicznych, lecz w kilowatach.

Około roku 1890 Board of Trade w Anglii i Physikalisch - Technische Reichsanstalt (PTR) w Niemczech pracowały nad przygotowaniem ustaw o jednostkach elektrycznych, które miały w tych krajach obowiązywać. Dla skoordynowania tych prac i przygotowania uchwał, które miały być przyjęte na przewidzianym na rok 1893 kongresie w Chicago, została odbyta konferencja w sierpniu 1892 r. w Edynburgu. W konferencji tej brali udział przedstawiciele Board of Trade, PTR, Stanów Zjednoczonych i BIPM. Na konferencji tej zostały przyjęte propozycje PTR, dotyczące ustalenia ilości srebra, strącanego przez jeden Ampère, i długości słupa rtęci, reprezentującego jeden Ohm. Ta ostatnia liczba została ustalona na podstawie znanej krytycznej pracy Dorna ¹⁷⁾.

Kongres, który się odbył w roku 1893 w Chicago, przyjął w zasadzie propozycje, opracowane na konferencji w Edynburgu, dotyczące praktycznej definicji ohma i ampera ¹⁸⁾. Definicje te są w zasadzie identyczne z definicjami, ponieważ tylko potwierdzonymi na konferencji w Londynie (patrz dalej). Odpowiadające nowej definicji jednostki zostały w Chicago nazwane jednostkami międzynarodowymi. Oprócz definicji międzynarodowego ampera (int. ampère), międzynarodowego ohma (int. ohm) i międzynarodowego volta (int. volt), wynikających z dwóch pierwszych definicji, Kongres w Chicago ustalił jeszcze zgodnie z projektem angielskiej ustawy o jednostkach elektrycznych z roku 1891 drugą definicję volta, opartą na sile elektromotorycznej normalnego ogniwa Clarka. Przyjęto, że ta siła elektromotoryczna przy 15° równa się 1,434 int. V. Specjalna komisja, w skład której weszli Helmholtz, Ayrton i Carhart, miała ustalić dokładne przepisy budowy ogniwa Clarka.

Podwójna definicja międzynarodowego volta by-

¹⁷⁾ Dorn, E. Wiss. Abh. d. PTR tom 2 (1895), str. 257.

¹⁸⁾ Proceedings of the International Electrical Congress held in The City of Chicago, 1893. New York. 1894, str. 20.

¹⁶⁾ Congrès International des Electriciens, Paris 1881, Comptes Rendus des Travaux, Paris 1882, str. 249.

ła, jak to zresztą prędko się okazało, krokiem bardzo niefortunnym. Wielkości volta, które wynikały z obu definicji, różniły się mniej więcej o 1/1 000. Różnica ta uwydatniała się nawet już przy pomiarach niebardzo precyzyjnych. Postanowienie Kongresu w Chicago, dotyczące definicji volta na podstawie siły elektromotorycznej ogniwa Clarka, zostało wprowadzone do ustaw o jednostkach elektrycznych w U.S.A., w Anglii i Francji. Natomiast Niemcy, Austria i Belgja pominęły w swoich ustawach drugą, niefortunną definicję volta. W U.S.A. postanowienie, dotyczące siły elektromotorycznej ogniwa Clarka, po dziś dzień jeszcze formalnie obowiązuje. Po Kongresie w Chicago jednostki legalne straciły znaczenie.

Trudności, które wynikły z zastosowania niefortunnych postanowień Kongresu w Chicago, były rozpatrywane na Kongresie Elektryków w St. Louis w roku 1904, gdzie zostało zalecone stworzenie stałej międzynarodowej komisji.

Ostatnim etapem ustalenia dziś miarodajnych jednostek międzynarodowych była konferencja w roku 1908 w Londynie. Konferencję tę poprzedziła konferencja wybitnych fachowców, która się odbyła w październiku 1905 roku w PTR w Charlottenburgu. Należy tu nadmienić, że na okres czasu między kongresem w Chicago i konferencją w Londynie przypadło szereg ważnych prac doświadczalnych, które znacznie posunęły naprzód zagadnienie jednostek i wzorców elektrycznych.

Konferencja w Londynie odbyła się w październiku 1908 r. Na niej było reprezentowanych przez 46 delegatów 26 państw. Prezesem Konferencji był Lord Rayleigh. Fachowe prace zostały wykonane przez Komitet techniczny, w skład którego weszło 22-ch członków konferencji, którzy byli wybitnymi fachowcami. Przewodniczącym tego Komitetu był Glazebrook. Rezolucje Konferencji Londyńskiej zostały zredagowane w trzech oficjalnych językach Konferencji: angielskim, francuskim i niemieckim.

Postanowienia Konferencji Londyńskiej, dotyczące jednostek elektrycznych, brzmia w możliwie dosłownym tłumaczeniu polskim, jak następuje¹⁹⁾:

I. Stosownie do dotychczas przyjętego ustala się, że podstawowe jednostki wielkości elektrycznych mają być definjowane na podstawie elektromagnetycznego układu jednostek, odniesionego do centymetra jako jednostki długości, grama jako jednostki masy i sekundy jako jednostki czasu.

Temi podstawowymi jednostkami są:

1) Ohm, jednostka oporu, która się równa 1 000 000 000 jednostek CGS. (międzyn. M.S.S.)

2) Ampère, jednostka natężenia prądu, która się równa 1/10 jednostki CGS.

3) Volt, jednostka siły elektromotorycznej, która się równa 100 000 000 jednostek CGS. 10⁸

4) Watt, jednostka mocy, która się równa 10 000 000 jednostek CGS. 10⁷ 1/1000

II. Jako układ jednostek z dostatecznym przybliżeniem reprezentujący powyższe jednostki dla celów pomiarów elektrycznych oraz jako podstawę dla celów legalizacyjnych, Konferencja zaleca przyjąć międzynarodowy Ohm, międzynarodowy Ampère i międzynarodowy Volt, które są określone na podstawie następujących definicji:

III. Ohm jest pierwszą podstawową jednostką.

IV. Międzynarodowy Ohm jest definjowany jako opór określonego słupa rtęci.

V. Międzynarodowy Ohm jest to opór, jaki posiada w stosunku do niezmiennego prądu elektrycznego słup rtęci w temperaturze topnienia lodu, o masie 14,4521 g, o stałym przekroju i długości 106,300 cm.

Przy określeniu oporu słupa rtęci w międzynarodowych ohmach miarodajne są postanowienia załączonej specyfikacji I.

VI. Ampère jest drugą podstawową.

VII. Międzynarodowy ampère jest to natężenie takiego niezmiennego prądu, który, przepływając przez roztwór azotanu srebra w wodzie, w warunkach, ustalonych załączoną przy niniejszym specyfikacją II, strąca 0,001 118 00 gramów srebra na sekundę.

VIII. Międzynarodowy volt jest to napięcie elektryczne, które, załączone na przewodnik o oporze 1 międzynarodowego ohma, powoduje prąd o natężeniu jednego międzynarodowego ampera.

IX. Międzynarodowy Watt jest to ilość energii, wytwarzana na sekundę przez niezmienny prąd elektryczny o natężeniu jednego międzynarodowego ampera przy napięciu jednego międzynarodowego volta.

Przytoczone postanowienia Konferencji Londyńskiej są w zasadzie identyczne z postanowieniami Kongresu w Chicago. Usuniętą została jednakowoż niefortunna podwójna definicja Volta.

Ze względu jednak na to, że ogniwo normalne jest nader ważnym wzorcem praktycznym, ważniejszym od woltametry srebrowego, Konferencja Londyńska zaleciła dodatkowo stosowanie ogniwa normalnego Westona z nasyconym roztworem siarczanu kadmu, ustalając skład tego ogniwa i prowizoryczną wartość 1,0184 int. V dla jego siły elektromotorycznej przy 20°. Konferencja Londyńska przyjęła również jako miarodajny wzór, wyrażający zależność siły elektromotorycznej ogniwa Westona od temperatury, opracowany w Bureau of Standards.

Pod względem organizacyjnym uchwalono w Londynie stworzenie Stałej Międzynarodowej Komisji dla spraw jednostek elektrycznych. Jako organ przejściowy Konferencja utworzyła Komitet Naukowy, tak zwany Komitet Rayleigh, pod przewodnictwem Warburga. Zadaniem tego Komitetu miało być zorganizowanie wymienionej komisji międzynarodowej, porównywanie jednostek różnych państw i t. p.

Dalszym ważnym krokiem było ustalenie dokładnej wartości siły elektromotorycznej ogniwa Westona w międzynarodowych voltach. Praca ta

¹⁹⁾ International Conference on Electrical Units and Standards 1908 printed for his Majesty's Stationary Office by Darling & Son, London 1909.

Patrz np. Dictionary of Applied Physics, tom 2. London 1932, str. 242 i 949. ETZ 30 (1909), str. 344.

została wykonana na wiosnę 1910 roku w Bureau of Standards w Washingtonie przez Międzynarodowy Komitet Techniczny w składzie: Rosa i Wolff (BSt), Smith (NPL), Laporte (LCE) i Jaeger (PTR). Komitet ten doszedł na podstawie wykonanych pomiarów do wniosku, że siła elektromotoryczna ogniwa Westona przy 20° wynosi 1,018 30 int. V. Wartość ta została uznana przez Komitet Rayleigh jako miarodajna, poczynając od 1 stycznia 1911 r. Wojna przerwała dalsze prace Komitetu Rayleigh i Komitet ten przestał istnieć.

Należy jeszcze nadmienić, że podczas pomiarów w Washingtonie została przyjęta jako wartość ohma międzynarodowego średnia wartość ohmów angielskiego i niemieckiego. Wartość ta jest znana pod nazwą jednostki Washingtonskiej i była przez dłuższy czas uważana jako właściwa wartość ohma międzynarodowego.

III. Obecny stan zagadnienia jednostek i wzorców elektrycznych.

1. Instytucje, pracujące nad wzorcami elektrycznymi.

Przed omówieniem obecnego stanu na polu jednostek i wzorców elektrycznych warto przynajmniej krótko omówić, jakie instytucje przede wszystkim pracują obecnie w tej dziedzinie.

Najstarszą i po dziś dzień jedną z najwięcej miarodajnych instytucji jest Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR) w Charlottenburgu. PTR zostało założone w roku 1887, pierwszym prezydentem był Helmholtz. Na polu jednostek i wzorców elektrycznych został w PTR wykonany szereg bardzo ważnych prac. Tak na przykład zostały zbudowane pierwsze dokładne rtęciowe wzorce międzynarodowego ohma, opracowana do dziś dnia wzorowa konstrukcja oporów normalnych i dokładnie opracowane ogniwo normalne Westona. Oprócz tego wykonano tam jedną z najdokładniejszych prac dla określenia wielkości bezwzględnego ohma.

Następną również bardzo poważną instytucją jest angielskie National Physical Laboratory (NPL) w Teddington pod Londynem, założone w roku 1902. Z prac NPL na polu jednostek elektrycznych zasługują przede wszystkim na uwagę określenia bezwzględnego ohma i bezwzględnego ampera. NPL opracowało również miarodajne wzorce rtęciowe ohma.

Wielkie znaczenie ma również amerykańska instytucja Bureau of Standards (BSt.) w Washingtonie, założona w roku 1904. Z prac BSt. na polu jednostek elektrycznych zasługują na szczególną uwagę prace, dotyczące bezwzględnych jednostek, i prace, dotyczące udoskonalenia konstrukcji oporów normalnych.

Francuskie Laboratoire Central d'Electricité (LCE) w Paryżu nie odegrało dotychczas większej roli na polu jednostek i wzorców elektrycznych. Powodem tego było, zdaje się, to, że instytucja ta zajmuje się przede wszystkim zadaniami o charakterze praktyczno-technicznym. W ostatnich czasach daje się jednak zauwa-

żyć we Francji tendencja do rozwinięcia prac nad jednostkami elektrycznymi. Dział, poświęcony tym pracom, został przed paroma miesiącami przeniesiony z LCE do laboratorium Ecole Supérieure d'Electricité w Malakoff pod Paryżem. W tym laboratorium są obecnie robione przygotowania do prac nad ogniwami normalnymi, do prac woltametrycznych i innych.

Dosyć poważnie pracują na polu jednostek i wzorców elektrycznych instytucje japońskie i rosyjskie.

Mniej więcej przed rokiem prace nad wzorcami zostały podjęte również w Bureau International des Poids et Mesures. Instytucja ta pracowała dotychczas głównie na polu metrologji, to znaczy pomiarów długości i masy, jak również w dziedzinie termometrii; w przyszłości odegra jednak przypuszczalnie znacznie większą rolę w dziedzinie wzorców elektrycznych, o czym będzie jeszcze mowa poniżej.

Oprócz wymienionych zajmują się sprawą wzorców i inne instytucje, które nie odgrywają jednak na polu międzynarodowym tak wielkiej roli, jak wymienione wyżej. Tak np. pracują nad wzorcami elektrycznymi Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen w Wiedniu i Eidg. Amt für Mass und Gewicht w Bernie. Szereg miarodajnych prac został wykonany w laboratorjach wyższych uczelni.

W Polsce do niedawna nie zajmowano się właściwie zupełnie wzorcami elektrycznymi. Były oczywiście czasami wykonywane porównania oporów i ogniw normalnych między sobą, ale tych pomiarów nie można zaliczyć do poważniejszych prac nad wzorcami. Zawsze, kiedy chodziło o dokładniejsze ustalenie wartości wzorców, prace te były przekazywane do instytucji zagranicznych, w większości przypadków do PTR. Dopiero mniej więcej rok temu podjęło Laboratorium Elektrotechniczne Politechniki Lwowskiej poważniejsze prace nad wzorcami elektrycznymi i to przede wszystkim oporami i ogniwami normalnymi. Prace te są prowadzone wspólnie z Głównym Urzędem Miar i już dzisiaj posunęły się tak daleko, że nie zachodzi już potrzeba wysyłania oporów i ogniw normalnych dla sprawdzenia do instytucji zagranicznych. Została również już podjęta współpraca w dziedzinie wzorców elektrycznych z miarodajnymi instytucjami zagranicznymi, BIPM, NPL i PTR, a poczęści nawiązane stosunki z BSt i LCE.²⁰⁾

Powyżej była mowa o instytucjach, pracujących nad sprawą jednostek i wzorców z punktu widzenia naukowego. Prace tego rodzaju często są podstawą do ustaw i t. p., wydanie których należy oczywiście do kompetencji czynników ustawodawczych danego państwa. Tak na przykład przygotowany przez PTR projekt niemieckiej ustawy o jednostkach elektrycznych musiał swego czasu uzyskać aprobatę Reichstagu niemieckiego, wydanie ustaw angielskich należy oczywiście nie do kompetencji NPL, a Board of Trade, względnie Parlamentu angielskiego i t. p.

²⁰⁾ Patrz również odnośnik 1.

2. Obecny stan zagadnienia jednostek elektrycznych.

Jako obecnie obowiązujące na terenie międzynarodowym jednostki wielkości elektrycznych należy uważać jednostki, ustalone przez Konferencję Londyńską w 1908 r. Z tego wynika, że jednostkami elektrycznymi są w zasadzie jednostki praktyczne, będące określonymi wielokrotnymi bezwzględnych jednostek elektromagnetycznych CGS, czyli, dokładniej mówiąc, bezwzględne jednostki Ohm, Ampère, Volt i t.d. Dla celów praktycznych miarodajne są jednak międzynarodowe jednostki, to znaczy międzynarodowy Ohm, Volt i t.p., oparte na dającym się reprodukcować rtęciowym wzorcu ohma międzynarodowego i międzynarodowym amperze, reprezentowanym przez woltometr srebrowy. Te jednostki międzynarodowe są ogólnie używane zarówno przy pomiarach naukowych i technicznych, jak i do celów legalizacyjnych. W niektórych państwach sprawa jednostek jest oficjalnie uregulowana przez odpowiednie ustawy, których brzmienie części niezupełnie jest zgodne z postanowieniami Konferencji Londyńskiej. W Polsce nie mamy jeszcze ustawy, dotyczącej jednostek elektrycznych, i należy przypuszczać, że ustawa taka, o ile zostanie wydana, uwzględni zmiany, przewidziane na terenie międzynarodowym (patrz rozdział IV). Znajdujemy tylko w „Przepisach o Warunkach Legalizowania Liczników Energii Elektrycznej i Transformatorów Mierniczych”, wydanych przez Dyrektora Głównego Urzędu Miar w dniu 14 maja 1925 (POM 2,953/0,2), następujące postanowienie (§ 6): „Wskazania liczników powinny być wyrażone w jednostkach, przyjętych przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną”²¹⁾.

Przy pomiarach praktycznych, nawet najdokładniejszych, na przykład ustalaniu wielkości wzorców użytkowych, nie stosuje się jednak nigdy bezpośrednio ani rtęciowych wzorców ohma międzynarodowego, ani woltometrów srebrowych. Używa się zawsze jako wzorców oporu normalnych oporów w kształcie cewek z odpowiedniego materiału oporowego, których opór w ohmach międzynarodowych został ustalony przez porównanie tych oporów z wzorcami rtęciowymi. Drugą podstawową jednostką w praktyce jest zawsze Volt międzynarodowy, którego wzorcami są ogniwa normalne Westona, których siłę elektromotoryczną w voltach międzynarodowych ustala się zapomocą oporów normalnych i woltometrów srebrowych.

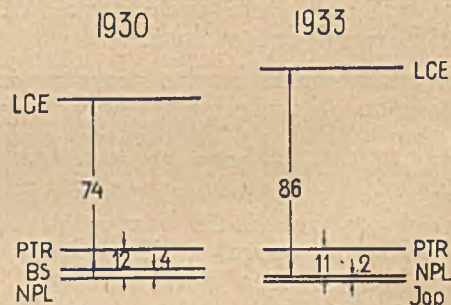
W zasadzie w każdym państwie, a nawet w różnych odpowiednio urządzonych laboratorjach

jednego państwa, możnaby zapomocą wzorców rtęciowych i woltometrów srebrowych stworzyć miarodajne wzorce. W rzeczywistości jednak zarówno odtworzenie wzorców rtęciowych jak i prace woltametryczne są związane z bardzo wielkimi trudnościami, i dlatego tylko niewiele instytucyj prace tego rodzaju wykonuje, a inne ustalają wielkości swoich wzorców — a temsamem swoje jednostki — przez porównanie z wzorcami instytucyj, które wykonują pomiary nad wzorcami rtęciowymi i pomiary woltametryczne.

Przez długi czas miarodajne wzorce rtęciowe posiadało tylko PTR (poczynając od roku 1892). Dopiero znacznie później (około 1905 roku) zostały zbudowane również wzorce rtęciowe w NPL. Jak już zostało wyżej powiedziane, przy pomiarach woltametrycznych w Washingtonie w 1910 roku została przyjęta jako wartość ohma międzynarodowego wartość średnia ohma niemieckiego i angielskiego (jednostka washingtonska). Mniej więcej w roku 1916 zostały wykonane prace nad wzorcami rtęciowymi w BSt, później w innych krajach, przede wszystkim w Rosji i w Japonii.

Jako właściwą wartość ohma międzynarodowego należy może uznać wartość średnią jednostek, używanych w BSt, NPL i PTR, przyczem należy uwzględnić, że niektóre z tych instytucyj do różnych celów używają nieco odmiennych jednostek. Tak na przykład NPL używa części jednostki, która ma być jednostką washingtonską, części jednostki, opartej tylko na własnych wzorcach rtęciowych. Jednostki te różnią się o $30 \mu\Omega$. Wynika z tego, że przy bardzo dokładnych pomiarach należy zawsze uwzględnić, z jakimi jednostkami ma się właściwie do czynienia.

Uwzględniając tylko najpewniejsze wzorce, można uważać, że ohm międzynarodowy jest obecnie ustalony z dokładnością od 10 do $20 \mu\Omega$ czyli jednej do dwóch stutysięcznych. Porównanie jednostek poszczególnych państw jest od czasu do czasu wykonywane. Dla przykładu zostały na rysunku 3 uwidocznione rezultaty porównań niektórych



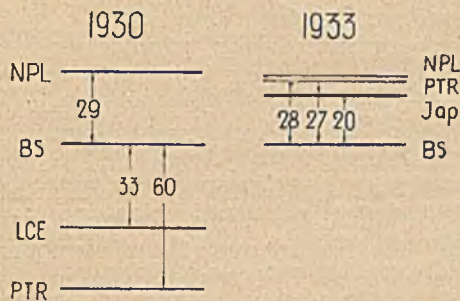
Rys. 3. Różnice jednostek oporu (int. Ω) różnych instytucyj w $\mu\Omega$.

ohmów międzynarodowych różnych państw w latach 1930 i 1933. Na rysunku są uwidocznione różnice poszczególnych jednostek w $\mu\Omega$. Pierwsze z przytoczonych rezultatów zostały otrzymane przy porównaniach, wykonanych z okazji międzynarodowych pomiarów woltametrycznych w PTR, drugie — przy porównaniach w BIPM.

Jednostki napięcia różnych państw są reprezentowane przez większe grupy ogniwa normalnych Westona. Wielkość napięcia tych ogniwa jest ustalana bądźto zapomocą pomiarów woltametrycznych,

²¹⁾ Bardziej jednoznacznie byłoby może określenie miarodajnych jednostek jako jednostek „międzynarodowych” i powołanie się na postanowienia Konferencji Londyńskiej z 1908 r.

bądź też przez porównanie z ogniwami innych instytucyj. Jak już zostało wyżej wymienione, za miarodajną wartość siły elektromotorycznej ogniwa Westona przy 20° jest od 1 stycznia 1911 roku uważana wartość 1,018 30 int. V.



Rys. 4. Różnice jednostek napięcia (int.V) różnych instytucyj w μV .

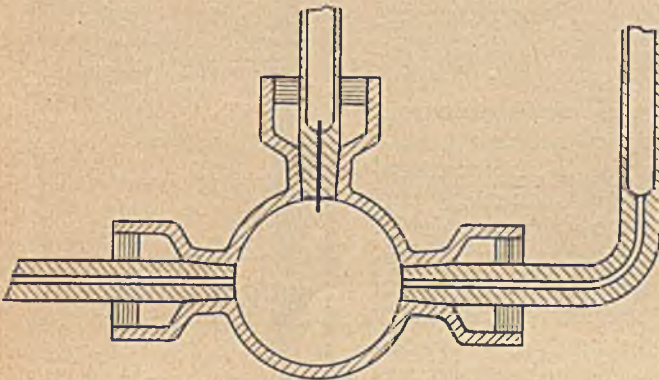
Można przyjąć, że dokładność, z którą obecnie jest ustalony Volt międzynarodowy, jest mniej więcej ta sama, co przy ohmie międzynarodowym, to znaczy 1 do 2-ch stutysięcznych. W pewnych wypadkach różnice są jednak znacznie większe. Na rysunku 4 są uwidocznione rezultaty porównań jednostek napięcia, wykonanych w tym samym czasie, jak wyżej przytoczone porównania jednostek oporu. Różnice poszczególnych jednostek są wyrażone w μV .

3. Wzorce elektryczne i ich porównanie.

Na tem miejscu nie mogą być oczywiście potraktowane wyczerpująco wzorce i metody ich porównań, co stanowi specjalny, bardzo obszerny dział miernictwa elektrycznego, lecz ma być tylko dany krótki przegląd tych zagadnień.

a) Wzorce rtęciowe ohma międzynarodowego²²⁾.

Wzorcami takimi są rurki szklane, napełnione rtęcią i zaopatrzone na końcach w kuliste naczynia (rys. 5). Te naczynia końcowe są zaopatrzone w elektrody dla doprowadzenia prądu pomiarowego i odbioru napięcia. Na podstawie określenia wymiarów geometrycznych rurki i po-



Rys. 5. Zakończenie oporu rtęciowego.

miaru masy wypełniającej ją rtęcią oblicza się opór wzorca w ohmach międzynarodowych. Przez porównanie oporu wzorca rtęciowego z manganinowymi (albo podobnymi) oporami normalnymi usta-

la się opór tych ostatnich w ohmach międzynarodowych. Opór R wzorca rtęciowego przy 0° oblicza się według wzoru:

$$R = \frac{14,4521}{(1,063)^2} \cdot \frac{l^2}{m} \cdot K = 12,78982 \frac{l^2}{m} \cdot K \text{ int. } \Omega.$$

We wzorze powyższym oznaczają: l — długość rurki przy 0° w metrach, m — masa zawartej rtęci przy 0° w gramach i K — współczynnik kalibrowy, przez który uwzględnia się odchylenia przekroju rurki od przekroju dokładnie cylindrycznego.

Pomiar długości rurki, a właściwie kanału rurki, wykonuje się możliwie dokładnie przy 0° (odchylenia od tej temperatury oczywiście się uwzględnia) z dokładnością mniej więcej 0,01 mm.

Określenie masy rtęci m , wypełniającej rurkę przy 0°, wykonuje się mniej więcej z dokładnością 0,01‰. Masa rtęci zazwyczaj wynosi około 10 g, z czego wynika, że ważenie musi być wykonane z dokładnością około 0,01 mg.

Wykonanie ważenia z potrzebną dokładnością nie nastręcza szczególnych trudności. Trudnym jest natomiast prawidłowe napełnienie rurki rtęcią i wylanie rtęci z rurki tak, żeby nie zostało małych kropelek na ściankach rurki. Współczynnik kalibrowy K określa się w zasadzie podobną metodą, jaka jest stosowana przy kalibrowaniu termometru. Przy dobrych rurkach współczynnik K , który przy idealnie cylindrycznej rurce równałby się 1, nie przekracza 1,0001.

Przy obliczaniu oporu wzorca musi być uwzględniony jeszcze dodatkowy opór, jaki stanowią niezbędne przy pomiarze elektrycznym naczynia końcowe. Naczynia te (rys. 5) mają średnicę około 3 do 4 cm. Opór tych naczyń oblicza się według wzoru:

$$A = \frac{0,80}{1063 \pi} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \text{ int. } \Omega.$$

We wzorze powyższym r_1 i r_2 oznaczają promienie końców słupa rtęci, wypełniającej rurkę. W normalnych warunkach dodatkowy opór A wynosi około 1‰ oporu rurki.

Porównanie oporu wzorca rtęciowego z oporem normalnym wykonuje się metodą mostka Thomsona albo metodą galwanometru różnicowego w modyfikacji Kohlrauscha. Ważnym jest, żeby czułość metody była tak duża, żeby można było zastosować natężenia prądu, nie powodujące większego nagrzania słupa rtęci. Przy natężeniu prądu 10 mA nagrzanie to nie przekracza 1/1000°. Podczas pomiaru oporu rurka znajduje się w topniejącym lodzie lub kąpeli, chłodzonej lodem.

Przeprowadzenie dokładnych pomiarów na wzorcach rtęciowych jest nader trudne i otrzymanie dokładnych rezultatów jest możliwe tylko przy zastosowaniu kilku rurek i wielokrotnem powtórzeniu pomiarów każdej rurki.

Z tego powodu pomiary tego rodzaju są wykonywane stosunkowo bardzo rzadko. Niemożliwe jest również przechowywanie rurek, napełnionych rtęcią, przez czas dłuższy, gdyż opory takie czasami się zmieniają. Zmiany są przypuszczalnie spowodowane zmianami wymiarów rurek. W ostatnich czasach są robione próby z rurkami z kwarcu. Wydaje się, jak gdyby tego rodzaju wzorce były bardzo niezmiennie, brak jednak dotychczas pod tym względem ostatecznych wyników.

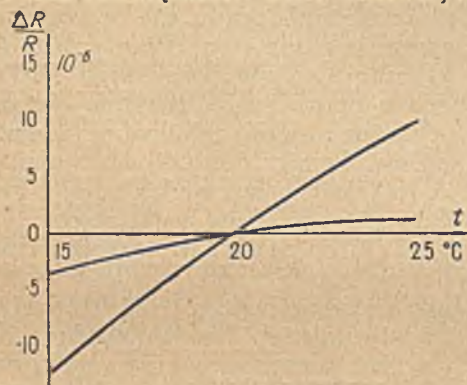
²²⁾ Patrz na przykład Smith: Dictionary of Applied Physics, tom 2. London 1922.

b) Opory normalne.

Opory normalne, będące właściwymi praktycznymi wzorcami oporu, są budowane z manganinu lub stopów podobnych²³⁾. Skład manganinu jest mniej więcej: 84% Cu, 12% Mn i 4% Ni. Oprócz tego materiał zawiera małe domieszki innych metali, przede wszystkim żelaza. Propozycja zastosowania jako materiału oporowego stopu Cu i Mn wyszła od E. Westona. Systematyczne próby zostały przeprowadzone w PTR przez Feussnera i Lindecka z udziałem Heuslera (Isabellenhütte). Rezultatem tych doświadczeń był manganin. Manganin posiada mały współczynnik temperatury, główną zaletą jego w porównaniu do innych materiałów oporowych jest jednak mała siła termoelektryczna w stosunku do miedzi i mosiądzu. Własność ta jest ważna ze względu na to, że przy pomiarach oporu ma się zawsze do czynienia z obwodami, w skład których wchodzi oprócz właściwych materiałów oporowych zaciski i przewody łączące z mosiądzu i miedzi. Gdyby materiał oporowy posiadał w stosunku do tych materiałów dużą siłę termoelektryczną, to wskutek nieuniknionych różnic temperatur w obwodzie powstawałyby znaczne siły termoelektryczne, któreby utrudniały albo nawet uniemożliwiały otrzymanie dokładnych wyników. Siła termoelektryczna manganinu w stosunku do miedzi wynosi zaledwie około 2 μV albo nawet mniej na jeden stopień różnicy temperatur. Dawniej używane do budowy oporów normalnych stopy miedzi i niklu (konstantan itp.) posiadają natomiast siłę termoelektryczną około 40 μV na 1° C.

Współczynnik temperatury manganinu przy temperaturze pokojowej nie przekracza zazwyczaj + 20 milionowych. Wartość ta waha jednak i przebieg oporu przy zmianach temperatury odbiega często dosyć znacznie od linii prostej, gdyż krzywa posiada przy temperaturze od 20 do 40° maksimum. Przy dokładnych pomiarach musi być określone dokładnie równanie temperatury wzorców. Na rysunku 6 jest przedstawiona dla przykładu zmiana oporu dwóch podstawowych wzorców Laboratorium Elektrotechnicznego Politechniki Lwowskiej w zależności od temperatury.

Opory normalne są przeważnie wykonywane w wartościach od 1/100 000 do 100 000 ohmów w stopniowaniu dziesiętnym. Jako właściwych wzor-



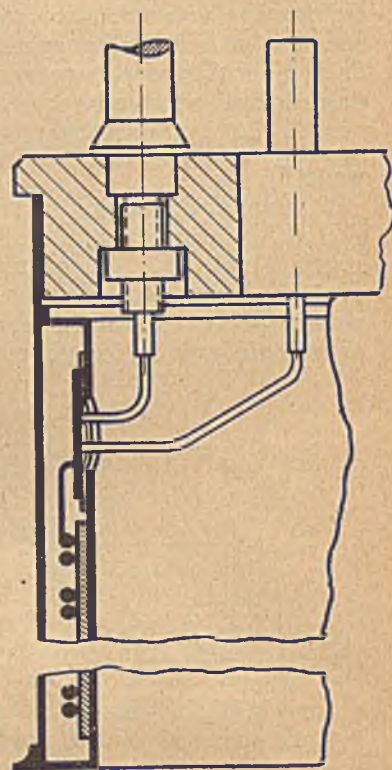
Rys. 6. Zmiana oporu wzorców manganinowych w zależności od temperatury.

²³⁾ Nazwa manganin przysługuje właściwie tylko materiałowi, wyrabianemu przez Isabellenhütte. Podobnym do manganinu materiałem jest „Therlo”. Stop ten nie zawiera niklu, lecz stosunkowo dużo aluminium.

ców miarodajnych używa się przede wszystkim oporów 1 ohmowych, czasami oporów 0,1 i 10 Ω . Konstrukcja obecnie stosowanych oporów normalnych jest oparta na konstrukcji, opracowanej swego czasu w PTR przez Feussnera i Lindecka. Uczeń ci opracowali przede wszystkim sposób sztucznego starzenia oporów, mający zapobiec późniejszym zmianom oporu. Metoda ta polega na nagrzewaniu opornika, po wykonaniu uzwojenia i po polakierowaniu go szlakiem, przez kilkanaście godzin przy temperaturze 140°. Pożądanym byłoby zastosowanie wyższej temperatury, co jednak ze względu na szelak i jedwabną izolację jest przy normalnej konstrukcji oporników niemożliwe. Dopiero niedawno w BSt został opracowany nowy typ jednoohmowego oporu normalnego²⁴⁾, w którym uzwojenie jest w celu sztucznego starzenia wyżarzane przy temperaturze około 550°. Temperatura ta ma być szczególnie korzystna. Budowa tych nowych oporów odbywa się w zasadzie jak następuje.

Goły drut manganinowy²⁵⁾ odpowiedniej długości nawija się na metalowy cylinder równolegle z gołym drutem miedzianym, który daje odpowiednie odstępy między poszczególnymi zwojami drutu manganinowego. Tak przygotowane uzwojenia zostają wyżarzone przy temperaturze około 550° w piecu próżniowym. Po wyżarzeniu uzwojenie manganinowe razem z drutem miedzianym zostaje ostrożnie przesunięte na mosiężny cylinder (rurka mosiężna), izolowany jedwabiem, o tej samej średnicy, jaką posiada cylinder, na którym cewka była nawinięta i została wyżarzona. Następnie pomocniczy drut miedziany zostaje usunięty i zastąpiony nitką lnianą. W ten sposób przygotowane uzwojenie pokrywa się szlakiem i suszy przy temperaturze 80°.

Całe uzwojenie jest w gotowym oporze hermetycznie zamknięte. Rys. 7 pokazuje część przekroju oporu razem z prądowym i napięciowym doprowadzeniem jednego końca uzwojenia. Dotychczasowe doświadczenia z nowymi oporami BSt okazały się bardzo dobre, nie są jednak wystarczające, żeby wydać ostateczną ocenę tej konstrukcji.



Rys. 7. Opór normalny konstrukcji BSt.

²⁴⁾ Thomas J. L. „A New Design of Precision Resistance Standard” Bur. Stand. J. Res. Vol. 5. August 1930.

²⁵⁾ Bureau of Standards stosowało materiał Driver-Harris Co.

Dobre jednoohmowe opory normalne zmieniają się wogóle bardzo mało. Zmiany leżą zazwyczaj w granicach najwyżej paru milionowych na rok, niekiedy jednak zachodzą i większe zmiany. Niedawno były robione próby oceny oporów co do ich stałości przez dokładny pomiar oporów w przeciągu stosunkowo krótkiego czasu. Prób takich jednak nie można uznać za miarodajne.

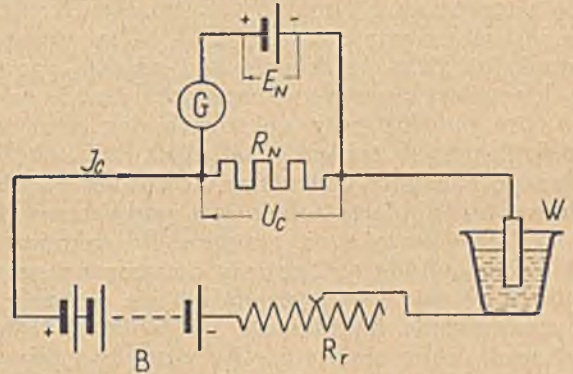
Swego czasu stwierdzono w BSt²⁶⁾, że opory konstrukcji PTR, szczególnie opory wysokoohmowe, to znaczy nawinięte z cienkiego drutu, nieco się zmieniają pod wpływem wilgoci. Zjawisko to jest przypuszczalnie spowodowane pewną higroskopijnością szelaku, która powoduje małe zmiany jego objętości i wywołuje zmienne naprężenia drutu. Dla uniknięcia tych zmian Rosa skonstruował opory, w których uzwojenie znajduje się w szczególnie zamkniętej osłonie, napełnionej czystym olejem. Tęgo rodzaju opory mają jednak tę wadę, że trudno jest przy pomiarach najwyższej precyzji dostatecznie dokładnie określić temperaturę uzwojenia. Z tego powodu Otto Wolff wprowadził osłonę oporów wysokoohmowych zapomocą cienkościennej, hermetycznie uszczelnionej rurki mosiężnej. Metoda ta została w ostatnich czasach zastosowana również w oporach BSt, o których była mowa wyżej. Dla uniknięcia wpływów zmian wilgotności PTR przechowuje opory w pomieszczeniu o stałej wilgotności powietrza. W naszym klimacie opory do 10 albo nawet 100 ohmów nie wymagają zastosowania szczególnych środków ostrożności ze względu na wpływ wilgoci powietrza.

Porównywanie normalnych oporów między sobą skutecznia się zależnie od wielkości oporów i innych okoliczności zapomocą metod mostkowych Wheatstone'a i Thomsona (Kelvina) i metody kompensacyjnej. Przy pomiarach o tak wysokiej precyzji, jakimi są porównywania oporów normalnych, winny być oczywiście zachowane odpowiednie środki ostrożności w celu uniknięcia błędów. W szczególności opory porównywane powinny posiadać zupełnie określoną temperaturę i w tym celu są umieszczane w kąpielach płynnych. W zasadzie pomiary są dosyć proste, ale osiągnięcie wyników faktycznie pewnych nie jest bynajmniej łatwe. O osiągniętej dokładności bynajmniej nie można jeszcze sądzić na podstawie czułości zastosowanej metody²⁷⁾.

c) Woltametr srebrowy.

Woltametr srebrowy, zapomocą którego jest definiowany międzynarodowy ampère, nie jest właściwie wzorcem w normalnym znaczeniu tego słowa. Służy on tylko do określenia wartości siły elektromotorycznej ogniów normalnych. Rysunek 8 przedstawia zasadę takiego pomiaru. Prąd, dostarczany przez baterję akumulatorów B, przepływa przez woltametr srebrowy W i normalny opór R_N . Do zacisków normalnego oporu jest przyłączo-

ny obwód kompensacyjny, składający się z normalnego ogniwa o sile elektromotorycznej E_N i galwanometru G. Natężenie prądu I_c , przepływającego przez woltametr i opór normalny, jest tak regulowane zapomocą oporu regulacyjnego R_r , że galwanometr nie wykazuje odchylenia, to znaczy prąd w obwodzie kompensacyjnym jest zero. Wtedy spadek napięcia U_c w oporze normalnym równa się sile elektromotorycznej ogniwa normalnego, czyli:



Rys. 8. Określenie SEM ogniwa normalnego.

$U_c = I_c \cdot R_N = E_N \cdot R_N$ jest znane w ohmach międzynarodowych. I_c określa się w amperach międzynarodowych z pomiaru masy strąconego w woltametrze srebra i czasu elektrolizy. Jeżeli masa strąconego srebra w gramach wynosi m , a czas trwania elektrolizy w sekundach jest t , to natężenie prądu I_c w międzynarodowych amperach wynosi: $m/0,001\ 118\ 00 \cdot t$, czyli siła elektromotoryczna normalnego ogniwa oblicza się według wzoru:

$$E_N = \frac{R_N \cdot m}{0,001\ 118\ 00 \cdot t} \text{ int. V.}$$

Dla osiągnięcia potrzebnej dokładności przy pomiarze musi być zastosowany szereg pomocniczych przyrządów, i układ w rzeczywistości jest znacznie więcej skomplikowany, niż wyżej omówiony układ zasadniczy. Przeważnie stosuje się kilka woltametrów, połączonych w szereg. Czas jest mierzony zapomocą chronografu. Spadek napięcia na oporze normalnym jest często mierzony pośrednio zapomocą specjalnych aparatów kompensacyjnych. Normalnie stosuje się prąd I_c o natężeniu około 0,5 A. Czas trwania elektrolizy wynosi około 2 godzin. Dla osiągnięcia wymaganej dokładności masa strąconego srebra, która wynosi parę gramów, musi być określona z dokładnością paru setnych miligrama, a czas trwania elektrolizy z dokładnością kilku setnych sekundy.

Woltametr składa się z naczynia platynowego o pojemności około 100 cm³, w którym znajduje się anoda z czystego srebra. Elektrolitem jest 20 do 40% -wy roztwór czystego azotanu srebra (AgNO₃). Dokładne określenie masy strąconego srebra nastęrcza duże trudności. Z jednej strony łatwo jest nieuwzględnić małych cząsteczek osadu, które mogą zaginać przy płukaniu osadzonego na tyglu srebra, z drugiej strony mogą przy rozpuszczaniu się anody dostać się do osadu cząsteczki anody, nie będące właściwym osadem elektrolitycznym. Żeby zapobiec opadaniu takich cząsteczek do naczynia platynowego, między anodą i katodą są umieszczane specjalne przegródki.

²⁶⁾ Rosa i Babcock, Electrician 1907, p. 339.

²⁷⁾ W Laboratorium Elektrotechnicznym Politechniki Lwowskiej zostało zbudowane urządzenie nowej konstrukcji do bardzo dokładnego porównywania oporów normalnych. Co do tego urządzenia ukaże się w krótkim czasie specjalna publikacja.

Rysunki 9, 10 i 11 przedstawiają niektóre, najczęściej używane konstrukcje woltametrów srebrnych. Na wszystkich rysunkach K oznacza platynową katodę, A srebrną anodę, a P wymienioną przegrodę.

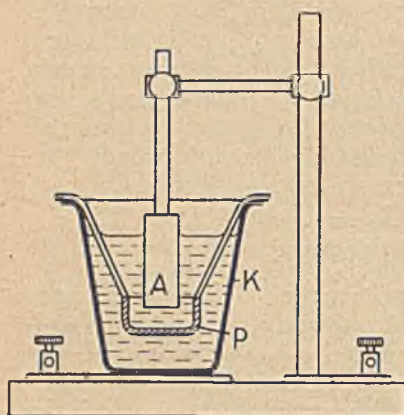
Rysunek 9 wyobraża woltametr Kohlrauscha (PTR). Przy tej konstrukcji przegrodą P jest płaskie, otwarte zgóry szklane naczynko, zawieszone za pomocą trzech szklanych ramion na brzegu platynowego naczynia K. Odmianą woltametru Kohlrauscha jest woltametr Smitha (NPL), który wyobraża rysunek 10. Przy tej konstrukcji płaskie naczynko szklane jest umocowane za pomocą drążka szklanego, przytwierdzonego do środka dna naczynia. Poniekąd przedłużeniem bocznych ścianek tego szklanego naczynia jest szklany cylinder P₁, który podczas trwania elektrolizy jest podniesiony tak, jak to jest pokazane na rysunku. Po zakończeniu elektrolizy cylinder P₁ zostaje opuszczony na naczynek W ten sposób zapobiega się dostaniu się na powierzchnię katodowego naczynia K lekkich cząsteczek, które się wydzieliły z anody i pływają na powierzchni elektrolitu wewnątrz cylindra P₁. W woltametrze Richards'a (rysunek 11) przegrodą jest cylinder z porowatej, czystej porcelany.

Wpływ konstrukcji woltametrów na wyniki.

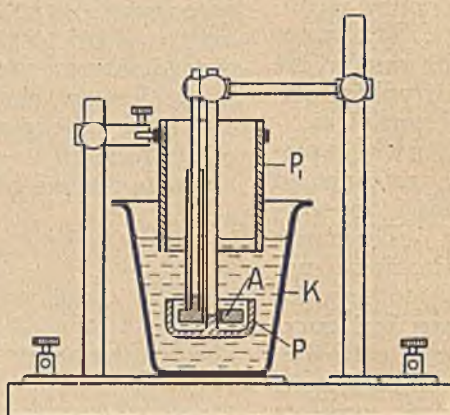
Ilość pomiarów	Konstrukcja woltametrów	Wartość siły elektromotorycznej normalnego ogniwa
32	Smith, duży model	1,018 26 ₃
21	Smith, średni model	1,018 27 ₃
2	Smith, mały model	1,018 30 ₄
47	Richards, duży model	1,018 26 ₉
22	Richards, średni model	1,018 24 ₄
87	Richards, mały model	1,018 26 ₀
6	Syfonowy model	1,018 32 ₄
7	inny syfonowy model	1,018 29 ₇
9	Kohlrauscha	1,018 29 ₇

d) Ogniwa normalne²⁸⁾.

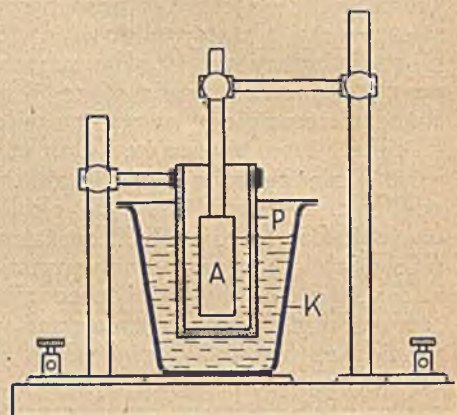
Ogniwo normalne jest w praktyce obok normalnych oporów wzorcem najważniejszym. Głównymi warunkami, jakim ma odpowiadać dobre ogniwo normalne, są: 1) niezmiennosc siły elektromotorycznej w czasie; 2) mała zależność siły elektromotorycznej od temperatury. Ważnym jest również, żeby ogniwo, które było obciążone prądem, możliwie natychmiast po zaniknięciu prądu miało znow sw-



Rys. 9. Woltametr Kohlrauscha.



Rys. 10. Woltametr Smith'a.



Rys. 11. Woltametr Richards'a.

Niekiedy było stosowane jako przegroda owijanie anody papierem do filtrowania i t. p. Okazało się jednak, że obecność tego rodzaju organicznych substancji powoduje znaczne zwiększenie osadu srebra. Z tego powodu nie stosuje się obecnie takich przegród. Wydaje się, że jedynie bardzo czysty jedwab może być stosowany do owijania anody.

Wpływ konstrukcji woltametrów na wyniki pomiaru był niejednokrotnie badany. Dla pokazania, ile pracy poświęcono tego rodzaju badaniom, są poniżej przytoczone rezultaty wykonanych w roku 1910 przez Rosa, Vinal i McDaniel w BSt pomiarów z woltametrami różnej konstrukcji.

Dla uniknięcia nieporozumień wydaje się pożytecznym podkreślenie i na tem miejscu, że woltametr srebrny, używany obecnie wyłącznie do określania wartości siły elektromotorycznej ogniwa normalnego, nie wchodzi w rachubę bezpośrednio do pomiaru natężenia prądu.

ją normalną wartość siły elektromotorycznej, czyli żeby ogniwo możliwie mało się polaryzowało. Dawniej jako podstawowy warunek była uważana możliwość odtwarzania ogniwa, t. zn. zbudowania ogniwa o zupełnie określonej sile elektromotorycznej na podstawie określonych przepisów. Dziś ten warunek właściwie nie odgrywa większej roli. Ogniwa Westona dają się jednak zbudować według określonych przepisów tak, że ich siła elektromotoryczna z dokładnością kilku milionowych odpowiada wartości normalnej. Z tego powodu podczas Konferencji Londyńskiej w 1908 r. było nawet proponowane, aby jako drugi podstawowy wzorec dla jednostek

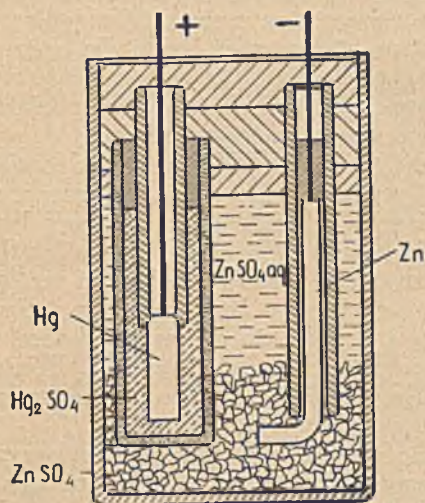
²⁸⁾ Jaeger, W. „Die Normalelemente und ihre Anwendung in der elektrischen Messtechnik“ Halle a S. 1902 (Wilh. Knapp).

Smith, F. E., Dictionary of Applied Physics, 2, str. 260.

Steinwehr, H. v., „Piles Étalons“, Congrès International d'Electricité Paris 1932, 2 Section, Rapport Nr. 7.

międzynarodowych przyjęć zamiast woltamtru srebrowego ogniwo normalne Westona. Ze względu na stosunkowo skomplikowane przebiegi chemiczne w ogniwie normalnym propozycja ta nie została jednak przyjęta.

Za dawnych czasów były robione próby zastosowania różnego rodzaju ogniw jako ogniw normalnych. Pierwszym ogniwem, które się okazało zdolne jako normalne ogniwo przy dokładnych pomiarach, było cynkowe ogniwo Clarka. Ogniwo to w pewnych warunkach odpowiada dosyć wysokim wymaganiom. Posiada ono jednak szereg wad, z których główną jest stosunkowo duża zależność siły elektro-



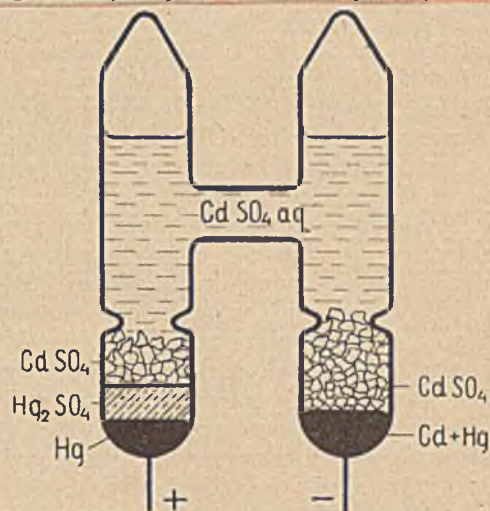
Rys. 12. Ogniwo normalne Clarka, model Feussnera.

motorycznej od temperatury. Spółczynnik temperatury wynosi około $-0,8\text{‰}$ (siła elektromotoryczna wynosi przy temperaturze pokojowej około 1,43 V i spada mniej więcej o 1,2 mV czyli 1200 μV przy podniesieniu się temperatury o 1°).

Dalszą wadą ogniwa Clarka, związaną ponieważ z wysokim współczynnikiem temperatury, jest rodzaj histerezy termicznej (Anglicy nazywają zjawisko to *lag*). Ujawnia się ona w ten sposób, że przy zmianach temperatury siła elektromotoryczna bardzo powoli osiąga wartość, odpowiadającą stanowi ustalonemu przy nowej wartości temperatury.

Skład ogniwa Clarka jest w zasadzie następujący: Dodatnią elektrodę tworzy rtęć, którą otacza jako depolaryzator siarczan rtęci (Hg_2SO_4). Ujemną elektrodą jest cynk względnie amalgamat cynku. Elektrolitem jest nasycony roztwór siarczanu cynku (ZnSO_4). W praktyce były używane różne modele ogniw Clarka. Bardzo rozpowszechnioną była konstrukcja Feussnera, którą schematycznie przedstawia rys. 12-ty. W tym wykonaniu był wbudowany w ogniwo na stałe termometr, który w ogniwie Clarka odgrywa dużą rolę. Rozpowszechniony był również nadany ogniwo przez lorda Rayleigh kształt litery H. Ten kształt jest obecnie stosowany prawie jedynie przy ogniwie Westona (rys. 13). Obecnie ogniwo Clarka prawie zupełnie nie jest używane i zostało zastąpione ogniwem Westona. Nie jest jednak wykluczone, że w pewnych warunkach i ogniwo Clarka będzie miało jeszcze praktyczne znaczenie.

Ogniwo Westona jest w zasadzie zbudowane tak samo, jak ogniwo Clarka, jednak z tą różnicą, że cynk i jego sole są zastąpione kadmem i jego solami. Propozycja zastąpienia cynku kadmem, zrobiona przez E. Westona, jest nader ważną i zrozumiałą jest więc, że ogniwo kadmowe jest ogólnie nazywane ogniwem Westona. Do wysokiej perfekcji, którą posiada obecnie ogniwo Westona, zostało ono doprowadzone przede wszystkim przez prace Jaegera i innych uczonych, wykonane w PTR (około roku 1893). Główną zaletą ogniwa Westona w porównaniu z ogniwem Clarka jest mały współczynnik temperatury siły elektromotorycznej, który wy-



Rys. 13. Ogniwo normalne Westona.

nosi około $-0,04\text{‰}$ (siła elektromotoryczna wynosi przy temperaturze pokojowej około 1,02 V i spada mniej więcej o 0,04 mV, czyli 40 μV przy podniesieniu się temperatury o 1°). Spółczynnik temperatury ogniwa Westona jest więc dwadzieścia razy mniejszy od tegoż współczynnika ogniwa Clarka.

Na rys. 13-ym jest schematycznie pokazana obecnie najczęściej używana budowa ogniwa Westona. Szklane naczynie składa się z dwóch pionowych rurek, połączonych poziomą poprzeczką. Jako doprowadzenia do elektrod służą wlotowane w dna rurek druciki platynowe. Elektrodę dodatnią tworzy rtęć, nad którą znajduje się jako depolaryzator siarczan rtęci Hg_2SO_4 w formie „pasty”, która się składa z rozdrobnionych kryształów Hg_2SO_4 i siarczanu kadmu $\text{CdSO}_4 + 8/3 \text{H}_2\text{O}$. Elektrodę ujemną tworzy kadm w postaci amalgamatu kadmu. Nad nią znajduje się warstwa kryształów $\text{CdSO}_4 + 8/3 \text{H}_2\text{O}$. Elektrolitem jest roztwór CdSO_4 , który jest stale nasycony, gdyż ogniwo zawiera nadmiar kryształów CdSO_4 . Górne końce obu rurek są zatopione, t. zn. ogniwo jest zupełnie hermetycznie zamknięte.

Zbudowane w należyty sposób ogniwo Westona posiada przy 20° , jak już było wyżej powiedziane, siłę elektromotoryczną $E_{20} = 1,01830 \text{ int. V}$. Jednak poszczególne egzemplarze nawet bardzo starannie wykonanych ogniw są zawsze nieco różne i dlatego dla otrzymania zupełnie pewnych wartości siły elektromotorycznej należy rozporządzać dużą ilością ogniw. Dopiero średnia wartość siły elektromotorycznej poszczególnych ogniw

takiej większej grupy może być uważana za miarodajną. Zresztą praktycznie sprawa przedstawia się w ten sposób, że mniej ważnym jest, żeby ogniwa posiadały zupełnie określoną wartość siły elektromotorycznej, niż to, żeby siła elektromotoryczna w pewnych określonych warunkach (temperatura) była wartością możliwie stałą. W każdym razie jednak siła elektromotoryczna miarodajnych ogniw musi być od czasu do czasu kontrolowana, gdyż nigdy nie jest wykluczone, że uległa ona zmianie. Tak na przykład siła elektromotoryczna (średnia wartość) miarodajnych ogniw PTR okazała się w r. 1930 ok. $80 \mu\text{V}$ mniejszą od wartości normalnej (rys. 3). Należy również uwzględnić, że obecnie często są stosowane ogniwa o składzie nieco odmiennym, niż został ustalony na Konferencji w Londynie. Według specyfikacji londyńskiej elektrolit w ogniwie ma być obojętny. Obecnie często jest jednak stosowany elektrolit słabo zakwaszony kwasem siarkowym (dodaje się do $10 \text{ g H}_2\text{SO}_4$ na liter elektrolitu). Takie kwaśne ogniwa mają nieco mniejszą siłę elektromotoryczną (E_{20} przy maksymalnym używaniu zakwaszeniu wynosi mniej więcej $1,0182 \text{ int.V}$ t. zn. o $100 \mu\text{V}$ mniej, niż w ogniwie obojętnym). Zależność siły elektromotorycznej ogniwa Westona od temperatury jest tak mała, że nawet przy stosunkowo dokładnych pomiarach temperatury ogniwa albo zupełnie nie potrzeba uwzględniać, albo tylko stosunkowo niedokładnie. Przy pomiarach najwyższej precyzji zależność siły elektromotorycznej ogniwa od temperatury uwzględnia się według dokładnych wzorów²⁹⁾. Najczęściej jest używany wzór, opracowany w BSt i przyjęty jako miarodajny przez Konferencję Londyńską. Według tego wzoru siła elektromotoryczna E_t przy temperaturze t wynosi:

$$E_t = E_{20} - 40,6 \cdot 10^{-6} (t - 20) - 0,95 \cdot 10^{-6} (t - 20)^2 + 0,1 \cdot 10^{-6} (t - 20)^3.$$

Za mało jest uwzględniany przy pomiarach fakt, że mały współczynnik temperatury ogniwa Westona nie wyklucza jednak powstania większych błędów, zależnych od temperatury ogniwa. Małym jest tylko współczynnik temperatury całego ogniwa, każda z elektrod posiada natomiast stosunkowo bardzo duży współczynnik temperatury. Współczynnik ten wynosi dla elektrody dodatniej około $+310 \mu\text{V}$ na 1° , dla elektrody ujemnej około $-350 \mu\text{V}$ na 1° . Suma obu współczynników jest współczynnikiem całego ogniwa (około $-40 \mu\text{V}$). Z tego wynika, że $0,1^\circ$ różnicy w temperaturze obu elektrod wywołuje zmianę siły elektromotorycznej prawie taką samą, jak zmiana temperatury całego ogniwa o 1° , i zmiana ta może zależnie od tego, która elektroda ma wyższą temperaturę, być zarówno dodatnia, jak i ujemna. Z tego widać, że dokładny pomiar temperatury całego ogniwa może być zupełnie iluzoryczny. Nader ważnym jest więc, żeby obie elektrody miały temperaturę jednakową. Z tego powodu, jak również wogóle dla dokładnego ustalenia temperatury, ogniwa, używane przy pomiarach wysokiej precyzji, są umieszczane w kąpielach płynnych. Ogniwa, używane przy normalnych po-

miarach laboratoryjnych i wyrabiane przez różne firmy, naogół nie dają dostatecznej gwarancji, że w warunkach, w których są używane, nie mogą w nich powstać różnice temperatur obu elektrod. Drugim zjawiskiem, również zamało uwzględnianym i dotychczas niedokładnie wyjaśnionym, jest zjawisko histerezy siły elektromotorycznej, występujące w ogniwach Westona przy zmianach temperatury, co prawda w znacznie mniejszym stopniu, niż w ogniwie Clarka. W każdym razie dla osiągnięcia najwyższej dokładności jest niezbędnym, żeby temperatura ogniw zmieniała się nader powoli. Warunkowi temu naogół nie odpowiadają nawet najlepsze używane urządzenia. Zagadnienie to zostało rozwiązane zarówno dla ogniw, będących wzorcami podstawowymi, jak i dla ogniw użytkowych w Laboratorium Elektrotechnicznym Politechniki Lwowskiej w sposób zupełnie specjalny, o którym będzie mowa na innym miejscu.

Budowa ogniw Westona, odpowiadających wszelkim wymaganiom, jest połączona z dużymi trudnościami. W szczególności winny być stosowane składniki chemiczne, które nie tylko muszą być bardzo czyste, lecz i pod innymi względami odpowiadać specjalnym wymaganiom. Przykładem tego może być fakt, że stosowany kadm nie powinien zawierać nawet $0,01\%$ cynku. Również i gątowniki szkła, z którego są zbudowane naczynia, nie może być dowolny³⁰⁾.

Niekiedy ogniwa Westona są wykonywane nieco odmiennie, niż wyżej zostało opisane. Tak np. firma Weston stosuje specjalne urządzenia do utrzymania poszczególnych składników ogniwa w określonej pozycji. Ma to na celu zmniejszenie niebezpieczeństwa uszkodzenia ogniw podczas transportu. Ogniwa firmy Weston są oprócz tego niezatopione, lecz zamknięte korkiem i zalane. Doświadczenie pokazuje jednak, że w ogniwach tego rodzaju siła elektromotoryczna czasem dosyć silnie się zmienia.

Oprócz „międzynarodowych” ogniw Westona, o których była mowa dotychczas, firma Weston wprowadziła w użycie pod nazwą „Weston Standard Element” ogniwa, nie zawierające kryształów CdSO_4 . Z tego powodu zawartość CdSO_4 w elektrolicie przy temperaturach użytkowych się nie zmienia i siła elektromotoryczna ogniwa jest praktycznie zupełnie niezależna od temperatury. Ogniwa te są jednak pod innymi względami mniej pewne od ogniw „międzynarodowych”. Z wymienionych powodów lepiej jest stosować w praktyce ogniwa podobnej budowy, jaka jest stosowana przez BSt, NPL, PTR i inne podobne instytucje.

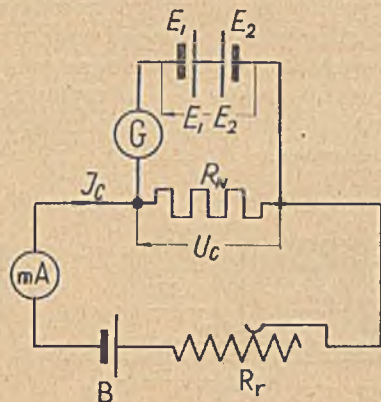
Ogniwa normalne o zwykle używanej konstrukcji mogą być obciążane tylko bardzo słabym prądem. Z tego powodu stosuje się w praktyce pomiarowej ogniwa normalne jedynie w układach kompensacyjnych. Zastosowanie w innych układach nie ma chociażby dlatego naogół racji bytu, że opór wewnętrzny ogniwa normalnych jest bardzo duży (100 do 2000 ohmów) i dlatego już przy bardzo małych natężeniach prądu napięcie znacznie różni się od siły elektromotorycznej.

²⁹⁾ Wolff, F., Bull. Bur. Stand. 5, (1908) 309.

Vigoureux, P. i Watts, S. Proceedings of the Physical Society 45, (1933), p. 172.

³⁰⁾ W BSt były niedawno przeprowadzone specjalne badania, dotyczące tej kwestji: Vinal, G. W. i Langhorne Howard, M. Bur. Stand. J. Res. t. 11. August 1933. Nr. 2. str. 255.

Porównanie ogniw normalnych wykonuje się albo zapomocą znanych przyrządów kompensacyjnych, albo w specjalnych do tego celu dostosowanych układach. Najlepszą metodą jest bezwzględne łączenie dwóch ogniw przeciwko sobie i mierzenie różnicy sił elektromotorycznych. Najwygodniej jest przy bardzo dokładnych porównaniach mierzyć te różnice w układzie, schematycznie przedstawionym na rys. 14.



Rys. 14.

Różnica sił elektromotorycznych $E_1 - E_2$, porównywanych między sobą ogniw, jest skompensowana przez spadek napięcia U_c na zaciskach oporu normalnego R_N , przez który przepływa prąd kompensacyjny I_c , regulowany przez opór R_r . Natężenie I_c prądu kompensacyjnego mierzy się zapomocą dokładnego amperomierza na prąd stały. Opisana metoda jest stosowana przez autora niniejszej pracy od przeszło 15 lat, jest jednak widocznie mało znana, gdyż dopiero niedawno została ogłoszona jako nowa przez P. Vigoureux NPL³¹⁾. Należy jednak zaznaczyć, że dla osiągnięcia pewnych wyników musi być zastosowany szereg środków ostrożności, o których będzie mowa w innej pracy autora.

e) Określenie wielkości bezwzględnych jednostek elektrycznych³²⁾.

Obok prac nad ustaleniem międzynarodowych jednostek elektrycznych nader ważnymi są prace nad ustaleniem wartości bezwzględnych jednostek. Prace te, zapoczątkowane przez Webera, są kontynuowane dotychczas. Do roku 1908, to znaczy czasu ostatecznego ustalenia definicji jednostek międzynarodowych, prace nad jednostkami bezwzględnymi miały przede wszystkim służyć za podstawę do ustalenia wielkości jednostek międzynarodowych, to znaczy długości słupa rtęci, odpowiadającej 1 int. Ω , i ilości strąconego w woltametrze srebrnym przez 1 int. A srebra. Obecnie prace nad jednostkami bezwzględnymi nabrały szczególnego znaczenia ze względu na prze-

widziane zastąpienie jednostek międzynarodowych przez jednostki bezwzględne.

Z pomiarów z dziedziny jednostek bezwzględnych najważniejszymi są określenia wielkości bezwzględnego ohma i bezwzględnego ampera. W zasadzie jest możliwym wyznaczenie zapomocą bezwzględnych elektrometrów bezwzględnej jednostki napięcia. Pomiaru tego rodzaju nie mogą być jednak obecnie wykonane z taką dokładnością, jaka jest wymagana przy określaniu wielkości jednostek podstawowych. Znaczenie więcej teoretyczne ma określenie stałej c czyli krytycznej szybkości, która według teorii Maxwella równa się szybkości światła i może być określona zarówno ze stosunku wielkości jednostek bezwzględnych układu elektrostatycznego i elektromagnetycznego, jak również zapomocą metod optycznych.

Dokładne „pomiaru bezwzględne” są nader trudne i wymagają bardzo kosztownych przyrządów i urządzeń oraz dużego nakładu pracy. Są one dlatego wykonywane tylko stosunkowo rzadko i tylko w pierwszorzędnie urządzonych laboratorjach. Na tem miejscu będą tylko zupełnie krótko podane zasady różnych metod, które były stosowane do określenia wielkości bezwzględnego ohma (abs. Ω) i bezwzględnego ampera (abs. A).

Określenie wartości bezwzględnego ohma było wykonywane w pierwszym rzędzie według następujących metod, stosowanych w różnych odmianach.³³⁾

Pierwsza metoda Webera. Cewka, której płaszczyzna znajduje się w położeniu prostokątnym do południka magnetycznego, zostaje obrócona około osi pionowej o 180° . Indukowana przy tym ruchu cewki przez poziomą składową natężenia magnetycznego pola ziemskiego siła elektromotoryczna wywołuje odchylenie galwanometru, przyłączonego do cewki. Odchylenie to jest zależne od geometrycznych wymiarów cewki obracanej, stałej balistycznej galwanometru, obliczonej z wymiarów jego cewki, czasu wahanania igły magnetycznej i t. p., specjalnie oznaczonego stosunku składowych poziomych natężenia pola ziemskiego w miejscu ustawienia cewki i galwanometru, wreszcie oporu cewki i galwanometru. Wyznaczwszy pierwsze z tych wielkości, można obliczyć w bezwzględnych ohmach opór obwodu, w którym się znajdują cewka obracana i cewka galwanometru. Dane, potrzebne do tego obliczenia, nie dają się jednak określić z taką dokładnością, jaka byłaby potrzebna do otrzymania dostatecznie dokładnych wyników.

Druga metoda Webera. Metoda ta różni się od wyżej wymienionej tem, że cewka obraca się w polu magnetycznym ziemi ze stałą szybkością. Indukowany przytem prąd zmienny o przebiegu sinusoidalnym powoduje odchylenie igły magnetycznej, umieszczonej w środku cewki. Odchylenie to zależy jedynie od wymiarów cewki

³¹⁾ Podobna metoda jest zresztą opisana w broszurze firmy Weston z r. 1915.

Urządzenie BSt, w którym jest zastosowana ta sama zasada, zostało niedawno ogłoszone: Brooks, H. B. Bur. Stand. J. Res. 11 Nr. 2 (1933) str. 211.

³²⁾ Smith F. E. Dictionary of Applied Physics, t. 2, str. 214.

Jaeger, W., prace wymienione w odnośnikach 9 i 11.

³³⁾ Patrz prace wymienione w odnośnikach 9, 11, 32, a w szczególności 17, jak również: Giebe M. E. „Détermination de l'ohm en valeur absolue”, Congrès International d'Electricité Paris 1932, 2 Section, Rapport Nr. 3.

i jej oporu. Pomimo swej prostoty i ta metoda nie może dać dostatecznie dokładnych wyników ze względu na trudności techniczne, ma jednak historyczne znaczenie, gdyż była swego czasu użyta do określenia wielkości BAU i stąd jest również znana jako metoda British Association.

Trzecia metoda Webera. Polega ona na określeniu tłumienia igły magnetycznej galwanometru, które jest zależne od oporu obwodu cewki galwanometru. Trudność tej metody polega na tym, że cewka musi być w celu uzyskania wystarczającego tłumienia mała i dlatego dokładne obliczenie stałej galwanometru z geometrycznych danych cewki jest niemożliwe; trzeba ją zatem wyznaczyć doświadczalnie np. przy pomocy busoli stycznych. Ponadto trzeba — jak zresztą również w innych metodach — wprowadzić szereg poprawek, uwzględniających czynniki wtórne.

Metoda Kirchhoffa. Stosuje się dwie spłosowe cewki, z których wewnętrzna jest połączona z galwanometrem balistycznym. Przez cewkę zewnętrzną przepuszcza się prąd, którego natężenie mierzy się drugim galwanometrem. Powstające przy przerywaniu tego prądu odchylenie jest zależne od współczynnika indukcji wzajemnej cewek, stosunku stałych galwanometrów i oporu obwodu wtórnego. Współczynnik indukcji wzajemnej oblicza się z wymiarów cewek.

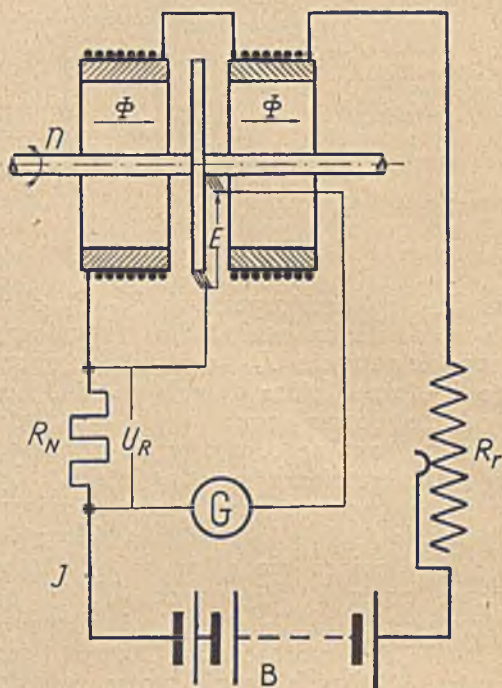
Jak wynika już z powyższego, żadną z tych metod nie można otrzymać dokładnych wyników. Pomijając inne trudności, mierzony opór, który stanowią opory cewek, nie jest z dostateczną dokładnością zdefiniowany. Oprócz tego wogóle żadna metoda odchyłowa nie może dać większej dokładności, niż najwyżej około 1‰ , ponieważ określenie odchylenia galwanometru lub t. p. nie może być dokładniej wykonane. Obecnie jest jednak wymagana dokładność rzędu $0,01\text{‰}$ (jedna stutysięczna), pożądanym byłoby osiągnięcie jeszcze większej dokładności. Duże dokładności dają się jednak tylko osiągnąć przy zastosowaniu metod zerowych. Do metod zerowych należą przede wszystkim metody Lippmanna i Lorenza.

Metoda Lippmanna. Polega na kompensacji siły elektromotorycznej, indukowanej w cewce, obracającej się w polu drugiej cewki, spadkiem napięcia na oporze mierzonym, przez który przepływa prąd, wytwarzający pole w pierwszej cewce. Metoda jest pozatem analogiczna do metody Lorenza.

Metoda Lorenza. Rys. 15 przedstawia zasadę metody Lorenza w modyfikacji NPL. W polu cewki albo cewek, przez które przepływa stały prąd I , dostarczony przez baterję B, obraca się z dokładnie mierzoną, stałą liczbą obrotów n tarcza metalowa. W tarczy tej, podobnie jak w maszynie unipolarnej, powstaje siła elektromotoryczna E . Ta siła elektromotoryczna jest zapomocą szczotek doprowadzona do oporu normalnego R_N , włączonego w szereg z cewką. Natężenie prądu I daje się zapomocą oporu regulacyjnego R_r , tak wyregulować, że spadek napięcia U_R na oporze R_N równa się sile elektromotorycznej E , co się konstatuje zapomocą galwanometru G. Siła elektromotoryczna E jest proporcjonalna do strumienia magnetycznego Φ cewek, czy-

li do natężenia prądu I , i do liczby obrotów n , t. zn. $E = CnI$. Z drugiej strony spadek napięcia na oporze normalnym jest $U_R = R_N I$. W momencie osiągnięcia kompensacji $U_R = E$, czyli $R_N I = CnI$, z czego wynika, że $R = Cn$.

Stała C , która w najprostszym przypadku równa się indukcji wzajemnej M między obwodem tarczy i cewkami wzbudzającymi, daje się obliczyć z wymiarów geometrycznych cewek i tarczy oraz ich wzajemnego położenia. Jeżeli wielkość zastosowanego oporu normalnego jest znana w ohmach międzynarodowych, to jako ostateczny wynik pomiarów otrzymuje się stosunek wielkości ohma bezwzględnego do ohma międzynarodowego. Aparatura, zbudowana w



Rys. 15. Zasada metody Lorenza.

NPL, składa się w zasadzie z dwóch tarcz i czterech cewek wzbudzających. Szczotki przylegają do obwodów obydwóch tarcz. Smith otrzymał na tej aparaturze jako wynik swoich pomiarów³⁴⁾ $1 \text{ int. } \Omega = 1,000\,52 \text{ abs. } \Omega$.

Metoda PTR. Grüneisen i Giebe³⁵⁾ opracowali w PTR metodę, polegającą na wymierzeniu samoindukcji cewki L w międzynarodowych jednostkach (int. H) przez porównanie jej w mostku na prąd zmienny z pojemnością C , zmierzoną w międzynarodowych jednostkach (int. F) również w układzie mostkowym przez porównanie z oporem (metoda Maxwella), wielkość którego jest znana w int. Ω . Z drugiej strony samoindukcja cewki w bezwzględnych jednostkach została obliczona z geometrycznych wymiarów cewki. Stosunek samoindukcji, wyrażonych w bezwzględnych i międzynarodowych jednostkach, równa się stosunkowi bezwzględnej i międzynarodowej jednostki oporu.

³⁴⁾ Smith, F. E.: Philos. Trans. Roy. Soc. Lond. t. 214 (1914) str. 27; i Nat. Phys. Lab. Coll. Res. t. 11, str. 209.

³⁵⁾ Grüneisen, E. i Giebe, E. Ann. d. Phys. t. 63 (1920) str. 179.

Grüneisen i Giebe otrzymali jako wynik swoich pomiarów 1 int. $\Omega = 1,000\ 51$ abs. Ω .

Tę samą metodę zastosowali w BSt Curtis i Moon, którzy otrzymali jako wynik: 1 int. $\Omega = 1,000\ 52$ abs. Ω .

Metoda Campbella.³⁶⁾ Jest ona analogiczną do metody PTR, od której różni się zastosowaniem zamiast samoindukcji indukacji wzajemnej. Ostateczne wyniki, otrzymane tą metodą, nie są jeszcze ogłoszone.

Dla zobrazowania, jak trudnym jest wykonanie pomiarów bezwzględnego ohma z dostateczną dokładnością, mogą służyć następujące dane, dotyczące jednej z cewek indukcyjnych, zastosowanych przy pomiarach w PTR. Rdzeń cewki stanowi cylinder marmurowy o średnicy 35,5 cm i długości 18 cm, zaopatrzony w śrubowo nacięty rowek dla utrzymania uzwojenia w określonym położeniu. Uzwojenie jest wykonane z gołego drutu miedzianego o średnicy 0,5 mm. Liczba zwojów cewki wynosi 162 przy wzajemnym odstępnie zwojów (skoku) 1 mm. Samoindukcja cewki wynosi około 0,01 H.

Dla otrzymania wartości samoindukcji z dokładnością jednej stutysięcznej muszą być osiągnięte następujące dokładności przy określeniu poszczególnych wymiarów:

przy pomiarze średnicy drutu 3‰ czyli $1,5\ \mu$;

przy pomiarze skoku uzwojenia 15 miljonowych czyli $0,015\ \mu$;

przy pomiarze średnicy uzwojenia 6 miljonowych czyli $2\ \mu$.

Dla osiągnięcia tak wysokiej dokładności musiały być części skonstruowane zupełnie specjalne przyrządy miernicze.

Nawet najdokładniejsze z dotychczasowych wyników nie pozwalają na ustalenie z dostateczną dokładnością wielkości ohma bezwzględnego, względnie stosunku ohma bezwzględnego do ohma międzynarodowego. Pomijając już inne niepewności, wyciągnięcie miarodajnych wniosków jest niemożliwym ze względu na niewystarczającą dokładność, z którą są znane wielkości stosowanych oporów w ohmach międzynarodowych. Jaeger i Giebe zgodnie wypowiadają zdanie, że tymczasem należy przyjąć jako ostateczny wynik dotychczasowych prac:

$$1 \text{ int. } \Omega = 1,000\ 50 \text{ abs. } \Omega$$

przyczem można uważać, że dokładność tego wyniku wynosi około ± 2 stutysięczne, czyli jest niewątpliwie taka sama, z jaką obecnie można uważać za ustaloną wielkość ohma międzynarodowego.

Ohm międzynarodowy jest więc niewątpliwie o $0,5\text{‰}$ większy od ohma bezwzględnego. Długość słupa rtęci tego samego przekroju i t. d., jaki jest przyjęty dla ohma międzynarodowego, odpowiadająca ohmowi bezwzględnemu, wynosi odpowiednio 106,247 cm (przy 0° i masie 14,444 9 g).

Obecnie w różnych instytucjach, przede wszystkim w NPL i PTR są wykonywane nowe określenia wielkości bezwzględnego ohma i należy spodziewać się, że wyniki tych pomiarów

będą dokładniejsze, niż pomiarów dotychczasowych.

Ciekawe jest stwierdzenie, jak w miarę udoskonalenia metod pomiarowych podniosła się dokładność określenia wielkości ohma bezwzględnego. W tym celu w tablicy niżej umieszczonej są zestawione rezultaty pomiarów, wykonanych przez różnych autorów. W ostatniej rubryce tablicy jest uwidoczony błąd wyniku w stutysięcznych, obliczony przy założeniu, że wartość przyjęta wyżej jako najprawdopodobniejsza, t. zn. 106,247, jest wartością poprawną. Należy jeszcze nadmienić, że ustalenie tego, co należy uważać za ostateczny rezultat pomiarów poszczególnych autorów, jest dosyć trudne. W przytoczonej tablicy są naogół umieszczone rezultaty, podane przez samych autorów.

Zestawienie wyników określenia wielkości bezwzględnego ohma.

Rok	A u t o r	Metoda	Wynik	Błąd w stutysięcznych
1863	British Association	Weber II	104,93	— 1240
1866	Joule	Kalorymetr	106,13	— 110
1873	Lorenz	Lorenz	107,10	+ 800
1874	F. Kohlrausch	Weber I	105,91	— 320
1878	Rowland	Kirchhoff	106,16	— 85
1881	Rayleigh i Schuster	Weber II	105,98	— 254
1882	H. Weber	Weber II	106,15	— 94
1882	Rayleigh	Weber II	106,280	+ 31
1883	Glazebrook, Dodds i Sar-gant	Kirchhoff	106,265	+ 17
1883	Rayleigh i Sidgwick	Lorenz	106,214	— 31
1883	Kimball	Kirchhoff	106,25	+ 3
1884	Wild	Weber III	106,027	— 207
1884	Röiti	Kirchhoff	105,896	— 331
1884	Mascart, de Nerville i Benoit	Kirchhoff	106,30	+ 50
1884	Rowland, Kimball i Duncan	Lorenz	106,29	+ 40
1884	Rowland i Kimball	Kirchhoff	106,31	+ 59
1885	G. Wiedemann	Weber I	106,265	+ 17
1885	Lorenz	Lorenz	105,93	— 301
1886	Himstedt	Kirchhoff	106,08	— 157
1887	Rowland	Lorenz	106,32	+ 69
1888	F. Kohlrausch	Weber III	106,32	+ 69
1889	Dorn	Weber III	106,243	— 4
1889	Duncan, Wilkes i Hutchinsonson	Lorenz	106,34	+ 88
1890	Jones	Lorenz	106,307	+ 56
1890	Wuilleumier	Lippmann	106,267	+ 19
1894	Himstedt	Kirchhoff	106,282	+ 33
1912	Campbell	Campbell	106,273	+ 25
1913	Smith — NPL.	Lorenz	106,245	— 2
1920	Grüneisen i Giebe PTR	Grüneisen i Giebe	106,246	— 1
1925	Campbell	Campbell	106,243	— 4
1930	Curtis i Moon BSt.	Grüneisen i Giebe	106,245	— 2
1930	Vigoureux (?) NPL	Lorenz	106,245	— 2

Dokładność pierwszych czterech przytoczonych wyników jest stosunkowo bardzo mała, i wyniki te nie były brane przy późniejszych rozważaniach pod uwagę. Następne przytoczone wyniki prac, wykonanych w latach 1878 do 1894, zostały uwzględnione przez Dorna w jego wyżej już wymienionej pracy krytycznej³⁷⁾, na podstawie któ-

³⁶⁾ Campbell, A.: Proc. Roy. Soc. Lond., (A) t. 87 (1912) str. 391 i t. 107 (1925) str. 1310.

³⁷⁾ Dorn, który był profesorem Uniwersytetu w Halle, wykonał swoją pracę na prośbę prezydenta PTR Helmholtza.

rej została ustalona definicja ohma międzynarodowego. Dorn wprowadzał, o ile to było możliwe, do wyników poszczególnych autorów poprawki, i przy określeniu ostatecznej wartości uwzględniał ważkość poszczególnych wyników. Dorn doszedł w swojej pracy do wniosku, że na podstawie wszystkich uwzględnionych wyników należy za najprawdopodobniejszą wartość ohma, wyrażonego jako długość słupa rtęci, uważać 106,285 cm (czyli 1,06285 SE). Wartość ta różni się od podanej wyżej jako obecnie najwięcej prawdopodobnej tylko mniej więcej o 0,3‰. Jako zaokrągloną wartość zaproponował Dorn 106,3, przyjętą później przy definicji ohma międzynarodowego.

Określenie wartości bezwzględnego ampera³⁸⁾. Zasadniczą trudnością przy tego rodzaju pomiarach jest niemożliwość stworzenia bezpośredniego wzorca natężenia prądu, jeżeli się nie uważa za wzorzec aparatury, użytej do pomiaru bezwzględnego. Należy więc w inny sposób utrwalić wyniki pomiarów bezwzględnych. W pierwszym rzędzie możliwe jest określenie elektrochemicznego równoważnika jakiegos pierwiastka, przede wszystkim srebra. Wynikiem tego rodzaju pomiaru jest więc również określenie stosunku bezwzględnego ampera do ampera międzynarodowego. Właściwym „wzorcem” pozostaje w tym przypadku woltametr srebrowy. Drugą metodą najczęściej stosowaną jest określenie siły elektromotorycznej normalnego ogniwa metodą analogiczną, jaką się tę siłę elektromotoryczną określa zapomocą woltametu srebrowego. W tym przypadku dokładność „przechowania” wielkości bezwzględnego ampera zależy od niezmienności ogniw normalnych i dokładności, z którą są znane wartości zastosowanych przy pomiarze oporów.

Co się tyczy samego pomiaru natężenia prądu w jednostkach bezwzględnych, to stosowane w tym celu metody mogą być podzielone na dwie grupy. Do pierwszej grupy należą metody, które się sprowadzają do określenia momentu obrotowego, działającego na igłę magnetyczną, znajdującą się z jednej strony w polu magnetycznym ziemi, z drugiej strony pod wpływem cewki, przez którą przepływa prąd, natężenie którego ma być mierzone. Do drugiej grupy należą metody, w których jest mierzona siła albo moment, wywierany na ruchomą cewkę (lub cewki) w polu cewki (lub cewek) nieruchomej.

Klasycznym przyrządem do pomiaru natężenia prądu na podstawie pierwszej zasady jest busola stycznych, która za dawnych czasów wogóle odgrywała dużą rolę przy pomiarze natężenia prądu. Jak wiadomo, przyrząd ten składa się w zasadzie z dużej, płaskiej cewki (płaszczyzna cewki znajduje się w południku magnetycznym ziemi), w środku której znajduje się krótka igła magnetyczna. Jeżeli przez cewkę przepływa prąd o natężeniu I abs. A, to igła magnetyczna odchy-

la się o kąt α . Z tego odchylenia natężenie prądu I w abs. A oblicza się według wzoru $I = C \operatorname{tg} \alpha$. Wartość stałej C daje się obliczyć z wartości poziomej składowej pola ziemskiego H w miejscu pomiaru i danych cewki. W pierwszym przybliżeniu wynosi:

$$C = \frac{10rH}{2\pi z}$$
, gdzie r jest to średni promień uzwojenia cewki, z liczba zwojów. H daje się określić metodą magnetometryczną. Jako odmianę busoli stycznych należy uważać galwanometr sinusowy, który również był stosowany do określania bezwzględnych jednostek natężenia prądu. Żadną metodą galwanometryczną nie daje się jednak osiągnąć dokładności pomiaru, która dziś jest wymagana zresztą z powodów analogicznych, jak przy pomiarze ohma bezwzględnego.

Do pomiarów dokładniejszych nadają się tylko niektóre metody drugiej kategorii, to znaczy metody elektrodynamiczne, które mogą być podzielone ze swej strony na dwie grupy, a mianowicie:

1. Zastosowanie elektrodynamometru, zapomocą którego mierzy się w zasadzie moment obrotowy, wywierany przez cewkę nieruchomą na cewkę ruchomą.

2. Zastosowanie wag prądowych. Dostatecznie dokładne wyniki dają się osiągnąć właśnie tylko zapomocą tych ostatnich.

Wagi prądowe były w różnych wykonaniach wielokrotnie stosowane do bezwzględnych pomiarów natężenia prądu. Pomiar wagą prądową polega w zasadzie na określeniu zapomocą ważenia siły przyciągania (albo odpychania) między cewką przymocowaną do szalki wagi lub zawieszoną zamiast takiej szalki a cewką (lub cewkami) nieruchomą, przez którą przepływa ten sam prąd, co przez cewkę ruchomą. Jeżeli dla zrównoważenia siły działającej między ruchomą i nieruchomą cewką potrzebne jest dodanie względnie odjęcie odważników o masie m , a przyspieszenie ziemskie w miejscu wykonania pomiaru jest g , to $CI = mg$ czyli $I = \frac{mg}{C}$, gdzie C jest stałą, dającą się określić z geometrycznych wymiarów cewek i ich wzajemnego położenia lub zapomocą pomocniczego pomiaru elektrycznego. Na rysunku 16 wyobrażone są cewki wagi prądowej w układzie, jaki zaproponował Lord Rayleigh. Przez obie cewki nieruchome przepływa prąd w różnym kierunku; w ten sposób działanie każdej z tych cewek na cewkę zawieszoną na wadze się dodaje.

Z pomiarów, wykonanych zapomocą wagi prądowej, zasługują szczególnie na uwagę pomiary, wykonane w NPL i w BSt.

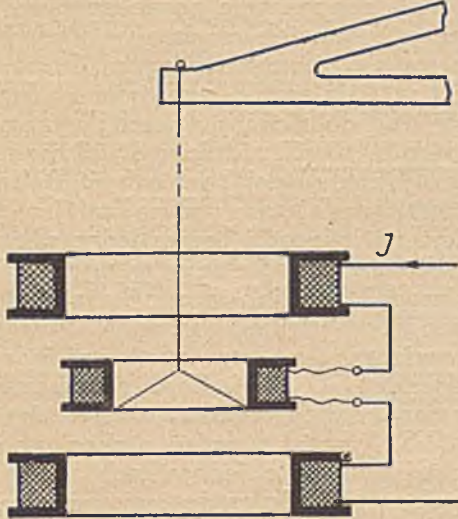
Ayrton, Mather i Smith³⁹⁾ wykonali w NPL pomiary wagą Rayleigh w modyfikacji Lorda Kelvina. Jako ostateczny wynik tych pomiarów nale-

³⁸⁾ Patrz prace wymienione w odnośnikach 9, 11, 32, jak również Curtis, H. L. „Mesure Absolue du Courant Electrique”. Congrès International d'Electricité Paris 1932, 2 section. Rapport Nr. 4.

³⁹⁾ Ayrton, W. E., Mather, T. i Smith, F. E., Phil. Trans. t. 207 (1908) str. 463; Nat. Phys. Lab. Coll. Res. t. 4 (1908) str. 1; Smith, F. E. i Mather, T. Phil. Trans. t. 207, (1908) str. 545.

zy uważać: 1 abs. A odpowiada 1,118 27 mg srebra na sekundę, czyli 1 abs. A = 1,000 24 int. A.

Jako najdokładniejsze z dotychczasowych pomiarów należy uważać pomiary, wykonane w BSt zapomocą szczególnie dobrze skonstruowanej wagi Rayleigh przez Rosa, Dorsey i Miller⁴⁰⁾. Wielką zaletą wagi zastosowanej w BSt w porównaniu do wagi NPL jest, że cewki znajdują się



Rys. 16. Waga prądowa Rayleigh.

pod szafką właściwej wagi i w dodatku cewki nieruchome są chłodzone wodą, przez co unika się błędów, spowodowanych przez nagrzanie wagi przez cewki. Jako ostateczny wynik pomiarów w BSt należy uważać: 1 abs. A odpowiada 1,118 05 mg srebra na sekundę czyli: 1 abs. A = 1,000 05 int. A. Jest to jedyny wynik, który dotychczas może być uważany za dokładny. Okazuje się więc, że ustalona na podstawie stosunkowo mało pewnych pomiarów wielkość międzynarodowego ampera przypadkowo bardzo dokładnie równa się wielkości bezwzględnej ampera. W swoich krytykach wyników różnych prac Jaeger dochodzi jednak do wniosku, że obecnie nie pozostaje niż innego, jak uważać, że 1 int. A = 1,0000 abs. A i że dokładność tego wyniku jest mniejszą od 0,1‰.

BSt jest natomiast zdania, że należy przyjąć, że⁴¹⁾: 1 abs. A = 1,0001 int. A. Do takiego samego wniosku dochodzi Smith⁴²⁾. Wydaje się słusznym, żeby przyjąć obecnie jako najprawdopodobniejszą wartość:

$$1 \text{ abs. A} = 1,000 05 \text{ int. A}$$

albo, że 1 abs. A odpowiada 1,11805 mg srebra na sekundę.

W poniżej umieszczonej tablicy są podane wyniki bezwzględnych pomiarów natężenia prądu różnych autorów, wyrażone jako ilość srebra, wydzielanego w woltametrze srebrowym przez

⁴⁰⁾ Rosa, E. B., Dorsey, N. E., Miller, J. M., Bull. Bur. Stand. t. 8 (1912) str. 269 i t. 10 (1913) str. 477.

⁴¹⁾ Circular of the BSt, Nr. 60 (Second Ed.) 1920 str. 37.

⁴²⁾ Dictionary of Applied Physics tom 2, str. 240.

1 abs. A w jednej sekundzie. Należy tu zaznaczyć, że przeliczenie wyników, podawanych przez poszczególnych autorów tak, żeby je można było między sobą porównać, jest w wielu wypadkach bardzo niepewne. Najstarsze rezultaty Bunsena, Joule'a i Kohlrauscha dotyczą pomiarów woltametrzem wodnym. Wyniki niektórych pomiarów, robionych woltametrzem srebrowym, muszą być poprawione ze względu na zastosowanie w woltametrze przegrody z ciała organicznego. Wreszcie w szeregu pomiarów została określona nie ilość straconego srebra, lecz siła elektromotoryczna ogniwi normalnych. W tych wypadkach zachodzą wątpliwości przy przeliczeniu szczególnie ze względu na niepewność wielkości jednostki oporu, będącej podstawą pomiaru. Warto jeszcze zaznaczyć, że przy tego rodzaju pomiarach jako jednostka napięcia zostaje często przyjęty iloczyn int. ohm. \times abs. amp. Jednostkę tę Amerykanie nazywają semiabsolutnym voltem. Wyniki pomiarów Rayleigh i Sidgwick z r. 1884 oraz pomiarów F. i W. Kohlrauschów z r. 1886 były swego czasu wzięte za podstawę dla definicji ohma międzynarodowego.

W ostatniej rubryce tablicy są podane błędy poszczególnych wyników w stutysięcznych w założeniu, że poprawną wartością jest wyżej podana 1,118 05.

Obecnie są wykonywane nowe bezwzględne pomiary natężenia prądu w PTR i BSt i należy się spodziewać, że wyniki tych pomiarów będą dokładniejsze, niż dotychczasowych pomiarów.

Zestawienie wyników określenia wielkości ampera bezwzględnego.

Rok	A u t o r	Metoda	Wynik	Błąd w stutysięcznych
—	Bunsen	—	1,110	— 720
—	Joule	—	1,107	— 990
1873	F. Kohlrausch	Busola stycznych	1,136	+1600
1882	Mascart	Waga	1,1156	— 219
1884	Rayleigh i Sidgwick	Waga	1,11794	— 10
1886	F. i W. Kohlrausch	Busola stycznych	1,11826	+ 19
1886	T. Gray	Sinus-galwanometr	1,118	— 5
1890	Pellat i Potier	Waga	1,1192	+ 103
1898	Patterson i Guthe	Dynamometr	1,1192	+ 103
1904	Van Dijk i Kunst	Busola stycznych	1,1180	— 5
1906	Guthe	Dynamometr	1,11773	— 29
1908	Ayrton, Mather i Smith	Waga	1,11827	+ 20
1908	Janet, Laporte i Jouast	Waga	1,11821	+ 14
1910	Haga i Boerema	Busola stycznych	1,11802	— 3
1910	Smith	Waga	1,11815	+ 9
1911	Rosa, Dorsey i Miller	Waga	1,11805	0

IV. Przewidywane zmiany i konsekwencje, jakie te zmiany za sobą pociągną.

W ostatnich latach stało się aktualne zreformowanie sprawy jednostek elektrycznych. Zagadnieniem tem zainteresowały się organy konwencji metrycznej, przedewszystkiem Bureau International des Poids et Mesures, które doniedawna stało zdala od spraw jednostek elektrycznych.

Dokładniejsze przedstawienie na tem miejscu przebiegu odbytych w ostatnich latach konferencji i t. p.¹³⁾ wydaje się przedwczesne, gdyż taki historyczny przegląd będzie dopiero ciekawy po pewnym zakończeniu prac. W ogólnych zarysach kwestja przedstawia się obecnie, jak następuje. Sprawą jednostek elektrycznych zajmowała się Conférence générale des Poids et Mesures na szóstym posiedzeniu w roku 1921, na siódmym w r. 1927 i na ósmym w r. 1933. Przez Konferencję tę został w r. 1927 utworzony specjalny Komitet doradczy — Comité consultatif d'électricité de la Commission internationale des Poids et Mesures, który poczynając od roku 1928 odbył parę posiedzeń. W BIPM zostało urządzone laboratorium do prac nad wzorcami elektrycznymi, które jest wyposażone w urządzenia do porównywania jedno-ohmowych oporów normalnych i normalnych ogni.

W zasadzie zostało już postanowione zarzucenie używanych obecnie przy pomiarach jednostek międzynarodowych i zastąpienie ich jednostkami bezwzględными. Jest przewidziane, że miarodajne instytucje różnych krajów dostarczą do roku 1935 wyników nowych pomiarów bezwzględnych i że w roku 1938 ma nastąpić zarzucenie jednostek międzynarodowych, t. zn. poniekąd przekreślenie części postanowień Konferencji Londyńskiej. Podczas tegorocznego posiedzenia Generalnej Konferencji Konferencja ta uznała się następczynią względnie dalszym ciągiem Konferencji Londyńskiej. Ma to tylko pewne znaczenie formalne.

Wykonywanie pomiarów bezwzględnych przez BIPM nie jest przewidziane. Przez BIPM będą tylko przez porównanie dostarczonych przez poszczególne instytucje normalnych oporów i ogni normalnych uzgadniane jednostki oporu i siły elektromotorycznej poszczególnych państw. Z początkiem bieżącego roku BIPM wykonało szereg porównań oporów normalnych i ogni normalnych. Najważniejsze rezultaty tych pomiarów były wyżej przedstawione na rysunkach 3 i 4. W lipcu b. r. były przez autora niniejszej pracy jak również przez pp. Pérard i Roux wykonane pomiary nad wzorcami polskimi. Obecnie w BIPM wykonują się dalsze porównania jednostek różnych państw, przyczem mają być również uwzględnione jednostki polskie.

Jak wynika z powyższego, należy uważać za pewne, że w najbliższym czasie nastąpi w praktyce przejście z jednostek międzynarodowych na jednostki bezwzględne. Zdania co do tego, czy krok ten jest potrzebny i celowy, są podzielone. Za tym krokiem przemawia fakt, że obecnie wielkości jednostek bezwzględnych dają się określić mniej więcej z tą samą dokładnością (abs. ohm z dokładnością mniej więcej 2 stutysięcznych, abs. amp. z dokładnością nieco mniejszą), jak wielkość jednostek międzynarodowych, i tem samem przy-

najmniej na pierwszy rzut oka odpada potrzeba stosowania jednostek międzynarodowych. Powodem wprowadzenia jednostek międzynarodowych była możliwość dokładniejszego odtworzenia tych jednostek, niż jednostek bezwzględnych. Nie jest również wykluczone, że dalsze udoskonalenie metod pomiarów bezwzględnych może pozwolić na osiągnięcie jeszcze pewniejszych rezultatów, niż dziś, natomiast wydaje się wątpliwe, żeby w przyszłości udało się znacznie powiększyć dokładność odtworzenia jednostek międzynarodowych, co do których ma się różne wątpliwości, które do dziś dnia nie są ostatecznie wyjaśnione. Odnosi się to na przykład do różnicy danych fizycznych różnych izotopów rtęci i różnic w ilości osadu srebra w woltametrah różnej konstrukcji. Dalszym powodem, przemawiającym przynajmniej napozór za przejściem na jednostki bezwzględne przy pomiarach, jest to, że jednostki te są w zasadzie jednostkami miarodajnymi, jak to wynika z postanowień Konferencji Londyńskiej, i są w prosty w zasadzie sposób związane z bezwzględnymi jednostkami mechanicznymi i innymi. Chęć zarzucenia jednostek bezwzględnych wynika w niektórych państwach (USA) może również z chęci uporządkowania swoich ustaw o jednostkach elektrycznych, wadliwych ze względu na dostosowanie się do niefortunnych postanowień Kongresu w Chicago w związku z definicją jednostki volt na podstawie siły elektromotorycznej ogniwa Clarka. Przejście na jednostki bezwzględne umożliwia zmianę ustaw bez potrzeby stwierdzenia, że obecnie obowiązująca ustawa jest zredagowana wadliwie.

Przeciwko zarzuceniu jednostek międzynarodowych przemawiają natomiast ważne względy praktyczne. Przy przejściu na inne jednostki zajdzie potrzeba zamiany dużej ilości kosztownych przyrządów, przede wszystkim dokładnych oporów, na nowe, względnie konieczność przeprowadzenia zmian w starszych przyrządach lub uwzględniania korekcji tam, gdzie dziś poprawki są zbyteczne. Jak już pokazało doświadczenie przy przejściu z ohma legalnego na ohm międzynarodowy wszelkie tego rodzaju zmiany łatwo prowadzą do nieporozumień i omyłek, co przy przejściu z jednostek międzynarodowych na bezwzględne będzie miało miejsce często z jednej strony dlatego, że ilość przyrządów oporowych, będących obecnie w użyciu, jest bardzo wielką i niezawsze na tych przyrządach jest wyraźnie zaznaczone, że podane wartości oporów należy rozumieć w ohmach międzynarodowych, z drugiej strony ze względu na małą różnicę (około 0,5%) wielkości jednostki nowej i starej. Nie ulega żadnej wątpliwości, że przy praktycznych pomiarach najważniejszym jest, żeby jednostka była zupełnie określona i pewna, a znacznie mniej ważnym jest, na jakiej podstawie została ustalona.

Nasuwa się pytanie, czy nie byłoby lepiej, o ile pomiary bezwzględne dadzą się w przyszłości dokładniej wykonać, niż bezpośrednio odtworzenie jednostek międzynarodowych, ustalić pewien określony stosunek wielkości jednostek międzynarodowych do jednostek bezwzględnych i odtwarzać jednostki międzynarodowe pośrednio za pomocą metod bezwzględnych z uwzględnieniem

¹³⁾ Joly, L. „L'état actuel de la Question des Unités Electriques et Magnétiques”, Congrès International d'Electricité Paris (1932) 2 Section, Rapport Nr. 1, str. 8.

tych stałych współczynników. Praktycznie i w przyszłości właściwymi miarodajnymi wzorcami będą opory normalne i ogniwa normalne i jednym z najważniejszych zadań w dziedzinie jednostek elektrycznych jest dalsze udoskonalenie tych wzorców, szczególnie w kierunku osiągnięcia jaknajdalej idącej niezmienności ich w czasie.

Autor niniejszej pracy skłania się więcej ku zdaniu, że zarzucenie jednostek międzynarodowych jest krokiem niebardzo szczęśliwym i że lepiej byłoby, utrzymując w zasadzie te jednostki, zmienić ewentualnie ich definicję w sensie już wyżej wspomnianym, o ile przez to jednostki dałyby się ustalić dokładniej, niż dziś.

Ze względu jednak na to, że kwestja wydaje się ostatecznie przesądzoną w kierunku zarzucenia jednostek międzynarodowych, warto się zastanowić, jakie konsekwencje w praktyce pociągnie za sobą przejście na nowe jednostki. To ważne pytanie dotychczas zdaje się wogóle nie było poruszane w literaturze.

O ile chodzi o pomiary mniej dokładne, to przejście na nowe jednostki wogóle nie da się przy takich pomiarach zauważyć.

Przy pomiarach dokładnych, wykonywanych zapomocą precyzyjnych przyrządów wskazówkowych, w większości wypadków to przejście nie będzie miało również żadnych skutków. Przy najdokładniejszych pomiarach takimi przyrządami będzie się zmuszonym stosować nieco inne poprawki, niż dotychczas.

Przy precyzyjnych pomiarach napięcia aparatami kompensacyjnymi naogół nie zajdzie potrzeba żadnej innej zmiany, jak nastawienia aparatu przy regulacji prądu kompensacyjnego na nową wartość napięcia ogniwa normalnego. Przy zastosowaniu ogniwa Westona z nienasyconym elektrolitem mogą zająć trudności przy aparatach z dodatkowym urządzeniem Brooksa, gdyż normalnie aparaty takie pozwalają dostosować się do wartości siły elektromotorycznej ogniwa normalnego tylko w granicach 1,0180 do 1,0190 V. Wymienione ogniwa będą jednak posiadały w abs. V siłę elektromotoryczną około 1,0192. W celu uniknięcia tych trudności pożądanym jest, żeby nowo wykonane aparaty kompensacyjne miały odpowiednie urządzenia. Zgodnie z propozycją autora firma Otto Wolff już obecnie wykonuje tego rodzaju aparaty, i aparat kompensacyjny Laboratorium Elektrotechnicznego Politechniki Lwowskiej jest już w ten sposób zbudowany. Co do wielkości oporów samego aparatu kompensacyjnego, jest oczywiście obojętne, czy opory są zbudowane w ohmach międzynarodowych, czy bezwzględnych, gdyż chodzi tylko o stosunek poszczególnych oporów, a nie o ich bezwzględną wielkość. Z tego powodu przy bardzo dokładnych kontrolach kompensatorów nawet mniej ważnym jest określenie poszczególnych oporów w określonych jednostkach, niż dokładne określenie stosunku wielkości poszczególnych oporów. Z tego powodu Laboratorium Elektrotechniczne Politechniki Lwowskiej określa przy sprawdzaniu aparatów kompensacyjnych nie tylko wielkość poszczególnych oporów, lecz również bezpośrednio ich stosunek.

Przy dokładnych pomiarach natężenia prądu zapomocą przyrządów kompensacyjnych i zastosowaniu oporów normalnych, zbudowanych w ohmach bezwzględnych, przy uwzględnieniu wyżej powiedzianego nie zajdą oczywiście żadne trudności. Przy zastosowaniu starych oporów normalnych trzeba będzie albo wprowadzać do odczytów nastawienia kompensatora odpowiednie poprawki albo, co będzie wygodniejsze, zastosować jedną z następujących metod:

1. Skorygować opór normalny przez przyłączenie odpowiednich boczników albo

2. Tak zmienić odpowiednim nastawieniem oporów przy kompensacji normalnego ogniwa prąd kompensacyjny, żeby odczyt przy pomiarze natężenia prądu dawał odrazu poprawną wielkość. Tak np. gdyby się okazało, że abs. amp. praktycznie równa się int. A, to należałoby w przyszłości regulować przy pomiarach natężenia prądu natężenie prądu kompensacyjnego stosownie do siły elektromotorycznej normalnego ogniwa, wyrażonego w int. V.

Ostatnia z wymienionych metod będzie przyuszczalnie naogół wygodniejszą, gdyż przy niej nie będzie zachodziła potrzeba jakichś specjalnych zmian przy stosowaniu tylko dawnych oporów normalnych.

Najgorzej przedstawia się sprawa precyzyjnych oporów. Przy bardzo dokładnych pomiarach oporów różnica nowej i starej jednostki będzie musiała być oczywiście zależnie od zastosowanej metody odpowiednio uwzględniona. O ile chodzi o normalne opory małych i średnich wartości, to opory takie można będzie stosunkowo łatwo dostosować do nowych jednostek w sposób już wyżej wymieniony t. zn. przez przyłączenie odpowiednich boczników, jak to się zresztą do innych celów już dzisiaj nieraz robi. Trudniej będzie przystosować wysokie opory do nowych jednostek, gdyż w tym wypadku trzeba będzie naogół zastosować opory, włączone w szereg, co niezawsze da się w wygodny sposób zrobić.

Trudniejszym niż przy normalnych oporach lub wogóle oporach pojedynczych będzie uwzględnienie zmiany jednostek przy większych zespołach oporowych jak np. opornicach kołkowych lub korbkowych, mostkach i t. p. Przy tego rodzaju przyrządach najwygodniej będzie przypuszczalnie zastosować odpowiednie poprawki. W wielu wypadkach jednak poprawki będą tak małe, że można będzie je pominąć. Często opory, zbudowane w ohmach międzynarodowych, będą może nawet miały mniejsze korekcje jako opory w ohmach bezwzględnych, niż jako opory w ohmach międzynarodowych, gdyż opór cewek naogół, czasami nawet znacznie, z czasem maleje. Zmiany te często mogą być rzędu 0,5‰ t. zn. odpowiadać różnicy wielkości nowej i dawnej jednostki.

Uwagi końcowe.

Sprawa jednostek i wzorców była wyżej rozpatrywana prawie wyłącznie z punktu widzenia techniki pomiarowej. Wydaje się jednak pożądanym powiedzieć na zakończenie parę słów o tem, jakie znaczenie z punktu widzenia teoretycznego

ma pytanie: czy przejście na jednostki bezwzględne i zarzucenie jednostek międzynarodowych jest potrzebne lub pożądane. Przy pobieżnym zastanowieniu się nad tem pytaniem wydaje się, że odpowiedź może brzmieć tylko twierdząco. Nie ulega wątpliwości, że uwzględnienie we wzorach teoretycznych jednostek międzynarodowych musiałoby wprowadzić w wielu wypadkach wielkie zamieszanie i komplikacje i dlatego pytanie, czy należy stosować jednostki „etalonowe”, które są jednostki międzynarodowe, czy jednostki praktyczne elektromagnetycznego układu, t. zn. jednostki, różniące się od elektromagnetycznych jednostek CGS tylko mnożnikami, będącymi całkowitymi potęgami liczby 10, wydaje się kwestją palącą ze względu na tendencję wprowadzenia jednostek praktycznych tam, gdzie dotychczas były stosowane jednostki bezwzględne. Dotyczy to przede wszystkim jednostek magnetycznych, dla których obecnie niektórzy autorowie stosują voltsekundy i t. p.

Blizsze zastanowienie się nad tą kwestją doprowadza jednak do wniosku, że zachodzi tu pewne nieporozumienie. Autorzy, którzy są zwolennikami zastosowania tego rodzaju nowych jednostek magnetycznych i innych, jak np. Mie, Thomälen i Pohl⁴¹⁾ najwidoczniej niezupełnie uprzytam-

⁴¹⁾ Mie, G. „Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus“ Stuttgart 1910 (Enke); Thomälen, A. „Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik“ 10 wyd. Berlin 1929 (Springer); Pohl, R. W. „Einführung in die Elektrizitätslehre“ 2 wyd., Berlin, 1929 (Springer).

niają sobie różnicę między praktycznymi jednostkami układu elektromagnetycznego, np. voltem bezwzględnym, i jednostkami międzynarodowymi, np. voltem międzynarodowym. Opierają się oni pozornie na jednostkach międzynarodowych, wyprowadzają jednak wzory, które są ważne dla bezwzględnych praktycznych jednostek.

Wydaje się zupełnie jasnym, że we wszystkich wzorach teoretycznych należy stosować zawsze jednostki bezwzględne względnie ich wielokrotne, t. zn. praktyczne jednostki bezwzględne, które w zasadzie są już dziś do tego rodzaju celów jedynie miarodajnymi. Wynika to zresztą niedwuznacznie i z rezolucji Konferencji Londyńskiej. Gdyby było inaczej, to i we wzorach, w których pozornie stosuje się jednostki CGS, należałoby stosować międzynarodowe jednostki odpowiedniej wielkości. Tak na przykład we wzorze dla siły elektromotorycznej, indukowanej przez pewien strumień magnetyczny Φ , należałoby Φ wyrażać w maxwellach międzynarodowych, żeby otrzymać dokładnie napięcie w voltach międzynarodowych, albo należałoby odpowiednio zmienić współczynniki. Tego się jednak nigdy nie robi i we wszelkich praktycznych obliczeniach słusznie się zakłada, że jednostki międzynarodowe równają się jednostkom bezwzględnym.

Jako zakończenie powyższych wywodów jest przedstawione w podanej obok tablicy zestawienie najważniejszych wielkości elektrycznych i magnetycznych i ich jednostek bezwzględnych i międzynarodowych.

nie, ale opisy maja na Δ i π

$$\text{int } V_{\text{rek}} \Rightarrow \Phi$$

$$\text{int } V \Rightarrow$$

$$E = \frac{d\Phi}{dt} 10^{-8}$$

/ /

int V int V_{rek}

Zestawienie jednostek najważniejszych wielkości elektrycznych i magnetycznych.

$c = 3 \cdot 10^{10}$ $c = 2,99796 \cdot 10^{10}$ $0,00207$ 207 km

W i e l k o ś ć	Znak wielkości	Praktyczna jednostka bezwzględna (abs.) lub międzynarodowa (int.)	Znak jednostki	Zależność między bezwzględną jednostką praktyczną i elektromagnetyczną jednostką CGS	Zależność między jednostkami praktycznymi	Przeliczenie jednostek bezwzględnych na międzynarodowe	Przeliczenie jednostek międzynarodowych na bezwzględne
Opór	R	Ohm	Ω	$1 \Omega = 10^9 \text{ CGS}$	ohm = volt/ampère	1 abs. $\Omega = 0,9995_0$ int. Ω	1 int. $\Omega = 1,0005_0$ abs. Ω
Natężenie prądu	I	Ampère	A	$1 \text{ A} = 10^{-1} \text{ CGS}$	ampère = coulomb/sec.	1 abs. A = 1,0000 ₅ int. A	1 int. A = 0,9999 ₅ abs. A
Napięcie	U	Volt	V	$1 \text{ V} = 10^8 \text{ CGS}$	volt = ampère \times ohm	1 abs. V = 0,9995 ₅ int. V	1 int. V = 1,0004 ₅ abs. V
Siła elektromotoryczna	E						
Ilość elektryczności	Q	Coulomb	C	$1 \text{ C} = 10^{-1} \text{ CGS}$	coulomb = ampère \times sec. = volt \times farad	1 abs. C = 1,0030 ₅ int. C	1 int. C = 0,9999 ₅ abs. C
Moc	P	Watt		$1 \text{ W} = 10^7 \text{ CGS}$ = 10^7 erg/sec. = 1 J/sec.	watt = ampère \times volt	1 abs. W = 0,9996 ₀ int. W	1 int. W = 1,0004 ₀ abs. W
Praca	A	Joule	J	$1 \text{ J} = 10^7 \text{ CGS}$ = 10^7 ergów	joule = watt \times sec.	1 abs. J = 0,9996 ₀ int. J	1 int. J = 1,0004 ₀ abs. J
		Kilowattgodzina	kWh	$1 \text{ kWh} = 3600 \times 10^7 \text{ CGS}$		1 abs. kWh = 0,9996 ₀ int. kWh	1 int. kWh = 1,0004 ₀ abs. kWh
Pojemność	C	Farad	F	$1 \text{ F} = 10^{-9} \text{ CGS}$	farad = coulomb/volt	1 abs. F = 1,0005 ₀ int. F	1 int. F = 0,9995 ₀ abs. F
Indukcyjność	LM	Henry	H	$1 \text{ H} = 10^9 \text{ CGS}$	henry = volt sec/ampère	1 abs. H = 0,9995 ₀ int. H	1 int. H = 1,0005 ₀ abs. H
Natężenie pola magnetycznego	H	Oersted		1 oerst. = 1 CGS	oersted = $\frac{1}{0,4\pi}$ ampère/cm	1 abs. oerst. = 1,0000 ₅ int. oerst.	1 int. oerst. = 0,9999 ₅ abs. oerst.
		Ampère/cm	A/cm	$1 \text{ A/cm} = 0,4\pi \text{ CGS}$	1 ampère/cm = $0,4\pi$ oerst.	1 abs. A/cm = 1,0000 ₅ int. A/cm	1 int. A/cm = 0,9999 ₅ abs. A/cm
Indukcja magnetyczna	B	Gauss Volt sec./cm ²	G Vsec/cm ²	$1 \text{ G} = 1 \text{ CGS}$ $1 \text{ V sec/cm}^2 = 10^8 \text{ CGS}$		1 abs. G = 0,9995 ₅ int. G 1 abs. V sec/cm ² = 0,9995 ₅ int. V sec/cm ²	1 int. G = 1,0004 ₅ abs. G 1 int. V sec/cm ² = 1,0004 ₅ abs. V sec. cm ²
Strumień magnetyczny	Φ	Maxwell Pramaxwell Voltsekunda	M Vsec.	$1 \text{ M} = 1 \text{ CGS}$ 1 pram. = 10^8 CGS $1 \text{ V sec.} = 10^8 \text{ CGS}$		1 abs. M = 0,9995 ₅ int. M 1 abs. pram. = 0,9995 ₅ int. pram. 1 abs. V sec. = 0,9995 ₅ int. V sec.	1 int. M = 1,0004 ₅ abs. M 1 int. pram. = 1,0004 ₅ abs. pram. 1 int. V sec. = 1,0004 ₅ abs. V sec.

0,00207
1000
207 km
0,3
0,6