

ROZDZIAŁ XXXI.

Wyznaczenie jednostek bezwzględnych.

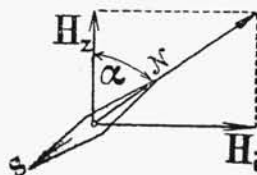
1. Wyznaczenie bezwzględnej jednostki elektromagnetycznej natężenia prądu. Mamy dwa sposoby wyznaczenia wartości bezwzględnej jednostki elektromagnetycznej natężenia prądu.

Pierwszy polega na zastosowaniu wzoru, podanego w rozdziale I:

$$i = \frac{H_i \cdot R}{2\pi}, \dots \dots \dots (a)$$

który określa natężenie prądu, przepływającego po przewodniku kołowym o promieniu R , gdy w środku koła, utworzonego przez przewodnik, natężenie pola magnetycznego wynosi H_i .

Natężenie pola H_i wyznacza się przez porównanie z poziomą składową natężenia pola magnetycznego ziemskiego¹⁾. W środku przewodnika kołowego, po którym przebiega prąd, umieszcza się zawieszoną na włókienku jedwabnym, lub też podpartą na ostrzu igłę magnesową. Gdy prąd nie płynie, igła ustawia się swoją osią magnetyczną w kierunku poziomej składowej natężenia pola ziemskiego. Płaszczyznę koła, stanowiącego przewodnik, ustawiamy równoległe do kierunku natężenia pola ziemskiego, a więc równoległe do osi magnetycznej igły przy prądzie równym zeru. Pod wpływem prądu, igła magnesowa odchyła się o kąt α (rys. 310) w ten sposób, że w nowym położeniu równowagi igły wypadkowa natężeń pól: H_z od ziemi i H_i ²⁾ od prądu przechodzi wzdłuż osi magnetycznej igły. Wtedy z trójkąta prostokątnego, wskazanego na rysunku, będzie:



Rys. 310.

$$H_i = H_z \cdot \operatorname{tg} \alpha \dots \dots \dots (b)$$

Podstawiając wyraz dla H_i z równania (b) we wzór (a), otrzymamy:

$$i = \frac{H_z \cdot R}{2\pi} \cdot \operatorname{tg} \alpha \dots \dots \dots (c)$$

¹⁾ Patrz prof. A. Witkowskiego „Zasady fizyki” t. III, str. 481.

²⁾ H_i jest prostopadłe do płaszczyzny przewodnika kołowego, a więc i do H_z .

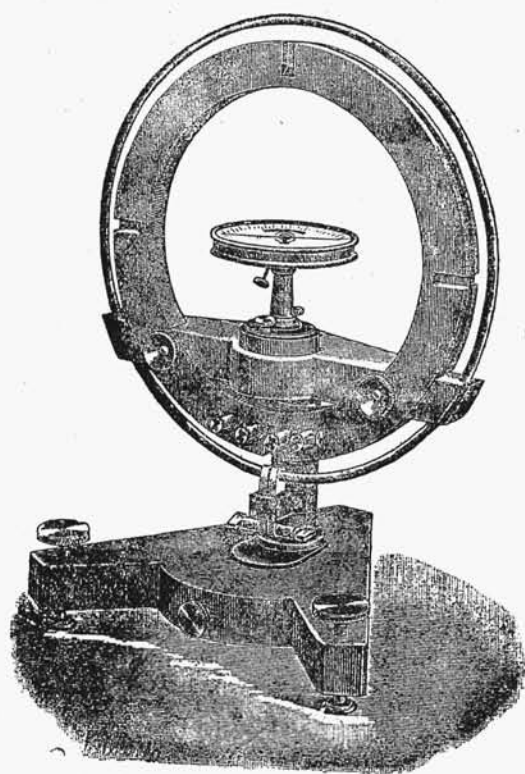
Pozioma składowa magnetyzmu ziemskiego H_z wyznacza się np. sposobem Gauss'a¹⁾ przez mierzenie odległości pomiędzy magnesami, kąta odchylenia igły magnesowej i okresu wahań magnesu swobodnie zawieszonego. Ze wzoru, w którym wszystkie te wielkości są wyrażone w jednostkach zasadniczych, centymetrach, gramach i sekundach, oblicza się natężenie pola H_z . Tym sposobem wzór (c) pozwala obliczyć prąd w bezwzględnych j jednostkach elektromagnetycznych.

Przyrząd służący do wykonania odpowiednich pomiarów nazywa się busołą stycznych (tangensbusołą) (rys. 311). Mamy tu dwa układy zwojów. Obręcz zewnętrzna stanowi przewodnik miedziany dla prądów silnych. Na wewnętrznej obręczy drewnianej są nawinięte zwoje z cieńszego drutu dla prądów słabszych. W środku widzimy tarczę z podziałkami dla odczytywania kątów i cienką wskazówkę, przymocowaną do krótkiego magnesu, opartego na ostrzu w środku tarczy.

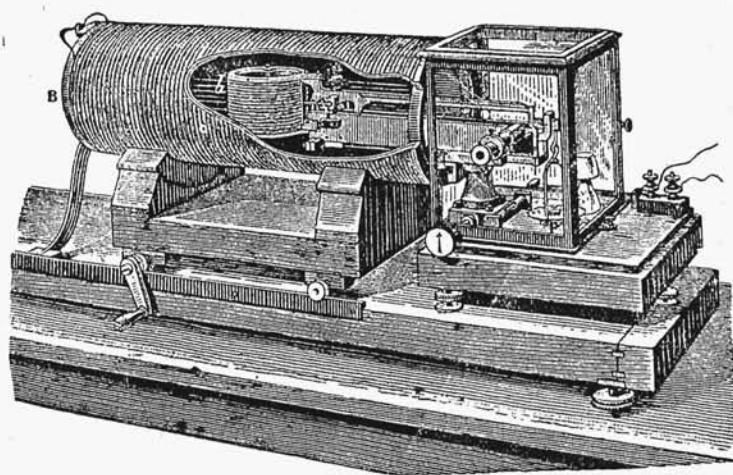
Drugi, odrębny sposób, tak zwany dynamometryczny, wyznaczania bezwzględnej jednostki prądu polega na zastosowaniu wzorów, wyrażających działanie prądów na prądy. W celu wykonania odpowiednich doświadczeń używano rozmaitych układów zwojnic. Zwykle są dwie zwojnice jedna zwojnica jest nieruchoma, a druga ruchoma. Na rys. 312 widzimy przyrząd stosowany przez Pellat'a; przyrząd ten nazywa się elektrodynamometrem bezwzględnym. Zwojnica B jest nieruchoma, a zwojnica b ruchoma, umocowana na belce wagi, zaopatrzonej w szalkę p . Za pomocą mikroskopu, umieszczonego w szklanej ściance pudełka, obserwujemy położenie wagi. Nieruchoma zwojnica wywołuje wewnątrz pole magnetyczne, którego linje sił w środku są poziome, a natężenie pola prawie jednostajne. Zwojnica ruchoma ustawia się, jak widzimy na rysunku, w ten sposób, że płaszczyzny jej zwojów są poziome. Korzystając z reguły pamięciowej trzech palców lewej ręki, łatwo spostrzec, że pole zwojnicy nieruchomej wywiera na zwojnicę ruchomą pewien moment obrotowy, który przechyla wagę. Ten moment obrotowy równoważymy zapomocą ciężarków, umieszczanych na szalce. Przez obie zwojnice przepuszczamy jeden i ten sam prąd. Oznaczmy przez M moment obrotowy działający na ruchomą zwojnicę, przez H — natężenie pola, wywołanego przez zwojnicę nieruchomą, przez i — prąd w każdej ze zwojnic, przez z_1 — liczbę zwojów zwojnicy nieruchomej, przypadającą na jednostkę długości tej zwojnicy, przez Z — liczbę wszystkich zwojów zwojnicy ruchomej b i wreszcie przez R — promień zwojów zwojnicy ruchomej.

Założmy, że zwojnica b poprzednio pozioma, przechyliła się o kąt nieskończenie mały $d\alpha$. Moment obrotowy wykona wtedy pracę, która

¹⁾ Szczegóły znajdzie czytelnik w tomie III „Zasad fizyki“ prof. A. Witkowskiego str. 479.



Rys. 311.



Rys. 312.

będzie się równała, według praw wyprowadzonych w rozdziale XXI, przyrostowi strumienia magnetycznego, objętego zwojami tej zwojnicy pomnożonemu przez natężenie prądu. Praca momentu M będzie:

$$M \cdot d\alpha.$$

Przyrost strumienia magnetycznego będzie:

$$\pi R^2 \cdot H \cdot \sin d\alpha \cdot Z.$$

Stosownie do wspomnianego prawa:

$$M \cdot d\alpha = \pi R^2 \cdot H \cdot \sin d\alpha \cdot Z \cdot i$$

Gdy $d\alpha$ jest wielkością nieskończenie małą, możemy napisać, że $d\alpha = \sin d\alpha$, przeto

$$M = \pi R^2 \cdot H \cdot Z \cdot i.$$

Z rozdziału VIII wiemy, że natężenie pola w środku długiej zwojnicy można wyrazić wzorem:

$$H = 4 \pi \cdot z_1 \cdot i.$$

Przeto:

$$M = 4 \pi^2 \cdot R^2 z_1 Z \cdot i^2.$$

Stąd:

$$i = \frac{\sqrt{M}}{2 \pi \cdot R \cdot \sqrt{z_1 \cdot Z}}.$$

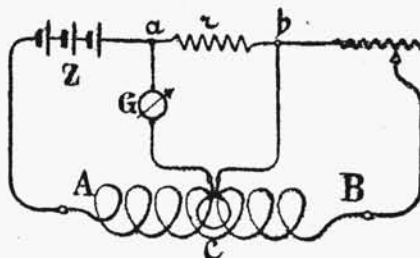
Z tego wzoru można obliczyć prąd, znając promień zwojów ruchomej zwojnicy, liczbę zwojów dużej zwojnicy, przypadającą na jednostkę jej długości i całą liczbę zwojów zwojnicy ruchomej, zmierzwszy moment obrotowy M zapomocą ciężarków. Podstawiając wszystkie wielkości w jednostkach bezwzględnych, otrzymamy natężenie prądu w jednostkach bezwzględnych elektromagnetycznych.

Przy dokładnych obliczeniach w powyższym wzorze wprowadzamy jeszcze poprawkę dla usunięcia niedokładności, którą popełniamy zakładając, że nieruchoma zwojnica jest nieskończenie długa ¹⁾).

P. p. Potier i Pellat przepuszczali prąd elektryczny, mierzony za pomocą powyższego przyrządu, przez roztwór azotanu srebra i wyznaczyli w ten sposób równoważnik elektrochemiczny srebra; według tych pomiarów prąd o natężeniu jednego ampera ($1 \text{ A} = 10^{-1} \text{ c. g. s. E. M.}$) w ciągu jednej sekundy wydziela 0,0011192 gr srebra. Inni badacze otrzymali liczby, różniące się niewiele od powyższej. Według książki Dr. A. Winkelmann'a, p. t. „Handbuch der Physik“, Rayleigh i Sindgewick otrzymali sposobem dynamometrycznym 0,0011179, tym samym sposobem Kahle otrzymał 0,0011183, a Petterson i Guthe 0,0011192; F. i W. Kohlrausch otrzymali zapomocą busoli stycznych 0,0011183. Dla ampera międzynarodowego przyjęto 0,00111800 patrz str. 352.

¹⁾ Sposób wprowadzania tej poprawki może być taki sam, jaki się stosuje przy pomiarze oporu, opisanym w paragrafie następnym.

2. Wyznaczenie bezwzględnej jednostki elektromagnetycznej oporności przewodników. Jest kilka sposobów. Na wyróżnienie zasługuje sposób Lorenz'a udoskonalony przez M. Lippmann'a. Wewnątrz długiej zwojnicy AB , rys. 313, obraca się płaska zwojnica C około osi prostopadłej do osi zwojnicy AB . Zwojnica C jest połączona z punktami a i b przez galwanometr G ¹⁾ a i b stanowią końcówki oporu r , przez który płynie ze źródła Z ten sam prąd co i w zwojach długiej zwojnicy AB . Zwojnica C jest zaopatrzona w przerywacz, który ją wprowadza w obwód galwanometru tylko na chwilę, gdy płaszczyzna zwojnicy jest równoległa do linii sił magnetycznych, wywołanych przez prąd w zwojnicy AB . Przy obracaniu zwojnicy C powstaje w niej siła elektromotoryczna indukcji; wyżej wspomniany przełącznik ustawia się w ten sposób, aby łączył zwojnicę z obwodem w chwili gdy ta siła elektromotoryczna jest skierowana przeciw napięciu pomiędzy punktami a i b ; przez zmianę prędkości ruchu obrotowego zwojnicy C możemy osiągnąć równowagę pomiędzy napięciem na końcach oporu r i siłą elektromotoryczną w zwojnicy C . Gdy to nastąpi, prąd w galwanometrze płynąć nie będzie, wtedy odchylenie galwanometru stanie się równe zero. Utrzymując w obwodzie $ZabBAZ$ pewien stały prąd i , należy dobrać taką prędkość ruchu zwojnicy C , aby odchylenie galwanometru stało się równe zero, możemy wówczas twierdzić, że siła elektromotoryczna, powstająca w zwojnicy C , równa się napięciu na końcówkach ab .



Rys. 313.

Z rozdziału XX [str. 238]²⁾ wiemy, że w jednym zwoju, obracającym się tak, jak zwojnica C , powstaje siła elektromotoryczna:

$$E_i = H \cdot S \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

Jeżeli zwojnica C ma Z zwojów, połączonych w szereg, to cała siła elektromotoryczna zwojnicy będzie:

$$E_i = Z \cdot H \cdot S \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}.$$

Przełącznik wprowadza w obwód zwojnicę, gdy płaszczyzna zwojów jest równoległa do linii sił magnetycznych pola; wtedy zwojnica przecina

¹⁾ Lippmann używał przyrządu specjalnego, tak zwanego włoskowatego elektrometru rtęciowego własnego pomysłu. Patrz „Zasady fizyki“ pr. A. Witkowskiego T. III, str. 406.

²⁾ Ponieważ w rozważanym tu przypadku zwojnica C obraca się w powietrzu, przeto zamiast B , możemy pisać H w jednostkach bezwzględnych elektromagnetycznych.

w jednostkę czasu najwięcej linii, E_t osiąga więc w tej chwili wartość maksymalną. Zresztą widać to i z powyższego wzoru, gdy bowiem $t = np \cdot \frac{T}{4}$,

$$\sin \frac{2\pi \frac{T}{4}}{T} = \sin \frac{\pi}{2} = 1.$$

Z napięciem na końcówkach ab równoważy się maksymalna wartość siły elektromotorycznej:

$$E_m = Z \cdot H \cdot S \cdot \frac{2\pi}{T}.$$

Oznaczmy prędkość kątową ruchu zwojnicy przez ω , wtedy:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Podstawiając ten wyraz we wzór dla E_m otrzymamy:

$$E_m = Z \cdot H \cdot S \cdot \omega$$

Z rozdziału VIII wiemy, że natężenie pola w środku bardzo długiej zwojnicy wyraża się wzorem:

$$H = 4\pi z_1 i,$$

gdzie z_1 — liczba zwojów na jednym centymetrze długości zwojnicy.

Uwzględniając ten wyraz dla H , otrzymamy:

$$E_m = 4\pi \cdot Z \cdot z_1 \cdot S \cdot i \cdot \omega.$$

Napięcie na końcówkach ab według prawa Ohma wyraża się iloczynem:

$$i \cdot r.$$

Gdy więc nastąpi równowaga pomiędzy E_m i powyższym napięciem, możemy napisać:

$$i \cdot r = 4\pi \cdot Z \cdot z_1 \cdot S \cdot i \cdot \omega,$$

albo:

$$r = 4\pi Z \cdot z_1 \cdot S \cdot \omega.$$

Znając liczbę zwojów zwojnicy C , liczbę zwojów zwojnicy AB , przypadającą na centymetr jej długości, pole zwojów C i prędkość kątową ruchu obrotowego zwojnicy C , znajdziemy z powyższego równania opór r wyrażony w bezwzględnych jednostkach elektromagnetycznych, o ile S i ω są wyrażone w jednostkach bezwzględnych.

Dla otrzymania wyników dokładnych, ze względu na skończoną długość zwojnicy AB , jest rzeczą konieczną wprowadzić poprawkę. P. Lippmann uskutečnił to w ten sposób, że wykonał trzy pomiary. Przedstawmy sobie, że w punkcie C rys. 314 stale znajduje się obracająca się zwojnica, zwojnica zaś AB zajmuje różne położenia. Oznaczmy natężenie pola w punkcie C w 1-ym położeniu zwojnicy przez H_0 , w drugim

położeniu przez H_1 , a w trzecim przez H_3 . Gdyby zwojnica AB była pięć razy dłuższa, to można sobie przedstawić, że do zwojnicy AB w I położeniu dodano jeszcze po dwie takie same zwojnice z lewej i z prawej strony, wtedy całe natężenie pola w punkcie C będzie:

$$H_0 + 2H_1 + 2H_2.$$

P. Lippmann, dobierając odpowiednio wartość oporu r , równoważył napięcie na końcówkach tego oporu z siłą elektromotoryczną, powstającą w obracającej się zwojnicy we wszystkich trzech położeniach zwojnicy AB , wskazanych na rys. 314. Oznaczmy odpowiednio przez r_0 , r_1 i r_2 wartości oporności oporu r otrzymane z trzech powyższych pomiarów.

We wszystkich doświadczeniach prędkość ruchu obrotowego zwojnicy i natężenie prądu w obwodzie pozostawały niezmiennie, możemy więc napisać wzory następujące:

$$i \cdot r_0 = Z \cdot H_0 \cdot S \cdot \omega,$$

$$i \cdot r_1 = Z \cdot H_1 \cdot S \cdot \omega,$$

$$i \cdot r_2 = Z \cdot H_2 \cdot S \cdot \omega.$$

Pomnożmy drugie i trzecie równanie przez dwa i dodajmy wszystkie trzy równania, otrzymamy wtedy:

$$i(r_0 + 2r_1 + 2r_2) = Z \cdot S \cdot \omega \cdot (H_0 + 2H_1 + 2H_2).$$

Możnaby wprowadzić w podobny sposób wyznaczyć jeszcze r_3 , przy H_3 , gdy zwojnica AB jest odsunięta od punktu C na odległość $3l$ (rys. 314), lecz wtedy r_3 wypadła zbyt mała, aby można było wyznaczyć je dość dokładnie.

Nie wychodząc z granic błędów nieuniknionych przy pomiarach tego rodzaju, możemy przyjąć, że natężenie pola w środku zwojnicy pięć razy dłuższej niż stosowana przy doświadczeniach¹⁾ równa się natężeniu pola w środku zwojnicy nieskończenie długiej, wtedy

$$H_0 + 2H_1 + 2H_2 = 4\pi \cdot z_1 \cdot i,$$

$$i(r_0 + 2r_1 + 2r_2) = Z \cdot S \cdot \omega \cdot 4\pi \cdot z_1 i,$$

a stąd:

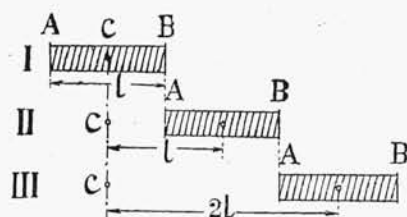
$$r_0 + 2r_1 + 2r_2 = 4\pi \cdot Z \cdot z_1 \cdot S \cdot \omega.$$

Oznaczmy sumę $r_0 + 2r_1 + 2r_2$ przez r , a długości przewodnika, odpowiadające powyższym oporom, przez L_0 , L_1 , L_2 i L , wtedy:

$$L = L_0 + 2L_1 + 2L_2.$$

W ten sposób wyznaczymy oporność przewodnika długości L w jednostkach bezwzględnych elektromagnetycznych. Zaznaczyć należy, że za

¹⁾ Lippmann stosował zwojnicę AB długości 2 m.



Rys. 314

miast przeprowadzenia powyższych trzech pomiarów, można wyprowadzić wzór dokładny, wyrażający natężenie pola w środku zwojnicy AB , określonej długości; wzór ten przedstawia się w postaci szeregu zbieżnego, w którym można przyjąć pod uwagę odpowiednią liczbę składników.

Opór badany przez Lippmann'a stanowiła wstęga metalowa zwinięta częściowo w kilka zwojów pograżonych w naftie dla utrzymania określonej temperatury stałej. Około metra wstęgi wystawało z nafty i na tej części znajdowały się podziałki, zapomocą których wyznaczono odcinki L_1 i L_2 .

Oporność tej wstęgi, wymierzona w powyższy sposób w jednostkach bezwzględnych elektromagnetycznych porównywano z opornością rtęci w rurce szklanej. Według tych pomiarów, słup rtęci o przekroju 1 mm^2 posiada opór jednego oma, ($1\text{ om} = 10^9\text{ c. g. s. E. M.}$), gdy długość tego słupa wynosi $106,27\text{ cm}$ w 0°C . Według innych pomiarów Mr. F. E. Smith'a opór słupa rtęci, którego długość równa się $106,3\text{ cm}$, wynosi $(1,00052 \pm 0,00004) \cdot 10^9$ bezwzględnych jednostek elektromagnetycznych.

Określenie oma międzynarodowego opiera się na dokonaniem przez Dorn'a zestawieniu wyników z 11 pomiarów przeprowadzonych różnymi sposobami przez różnych badaczy. Dorn podaje $106,279\text{ cm}$, jako wartość najmniejszą i $106,290\text{ cm}$ jako największą dla długości słupa rtęci o przekroju 1 mm^2 mającego w temperaturze 0° oporność 10^9 bezwzględnych jednostek elektromagnetycznych¹⁾. Według nowszych badań²⁾ wypada — $106,246\text{ cm}$. Jako oporność wynoszącą jeden om międzynarodowy przyjęto oporność słupa rtęci długości $106,300\text{ cm}$ (patrz str. 352).

¹⁾ Patrz Wilhelm Jaeger. Elektrische Messtechnik — 1917.

²⁾ Ann. d. Phys. 63. 1920. str. 197.