

Część I.

**Pomiary wielkości  
elektrotechnicznych.**



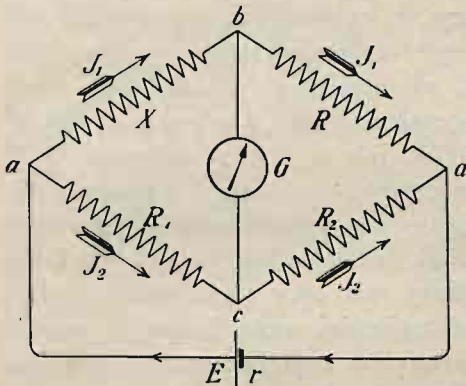
I.

## Pomiary oporu.

### A. Opory średnie.

#### 1. Mostek Wheatstone'a.

Pomiar oporu za pomocą mostku Wheatstone'a polega na, podanym w r. 1843 przez Wheatstone'a, szczególnym sposobie połączenia 4 oporów, z których trzy są znane, a czwarty badany, z galwanometrem i źródłem siły elektromotorycznej. Te 4 opory łączy się w czworobok, w jedną przekątnię wstawia się galwanometr, a w drugą ogniwo (rys. 3). Taki układ nazywa się mostkiem, boki i przekątnie gałęziami.



Rys. 3.

Przez odpowiednie dobór oporów  $X$ ,  $R$ ,  $R_1$  i  $R_2$  można osiągnąć taki stan, że przez galwanometr prąd nie płynie, t. zn. że potencjały w p.  $b$  i  $c$  są równe, a więc i spadki napięcia w gałęziach  $ab$  i  $ac$  są równe. Wtedy przez gałęzie  $ab$  i  $bd$  płynie ten sam prąd  $J_1$ , a przez  $ac$  i  $cd$  prąd  $J_2$ , przeto

$$J_1 X = J_2 R_1$$

$$J_1 R = J_2 R_2$$

z tego

$$\frac{X}{R} = \frac{R_1}{R_2}, \text{ czyli } XR_2 = RR_1,$$

jest to równanie mostku Wheatstone'a, a zarazem warunek równowagi układu, powiadający, że jeżeli iloczyny oporów przeciwległych są równe, to przez galwanometr prąd nie płynie.

Znając trzy opory, można czwarty obrachować

$$X = R \frac{R_1}{R_2}$$

Opór  $R$  nazywa się oporem porównawczym, a  $R_1$  i  $R_2$  stosunkowymi.

Najlepsze warunki pomiaru. — Z powyższego równania i z układu połączeń widać, w jaki sposób należy te 6 gałęzi między sobą połączyć, aby uzyskać najlepsze warunki pomiaru t. j. najdokładniejszy wynik pomiaru. Ponieważ przy pomiarze staramy się osiągnąć stan równowagi przez sprowadzenie igielki galwanometru do 0, trzeba się starać o taki układ, żeby przez galwanometr płynął prąd możliwie największy przy zachowaniu innych wielkości niezmiennych. Można to otrzymać przez przestawienie galwanometru i ogniwa albo oporów między sobą. Opory w czworoboku są zwykle nierówne, może się więc zdarzyć, że opory leżące w upuście do galwanometru n. p.  $X$  i  $R_1$  są mniejsze, niż  $R$  i  $R_2$ , wtedy przez galwanometr będzie płynął mniejszy prąd, niż gdyby był on w upuście do oporów  $X$  i  $R$ , jak to jest z ogniwem. W takim razie trzeba przestawić ogniwo na miejsce galwanometru i na odwrót, przez co osiągnie się większą czułość galwanometru. Wypadek taki zachodzi, jeżeli — jak to jest zwykle — opór galwanometru jest większy, niż opór wewnętrzny ogniwa. Można się o tem przekonać najlepiej przy badaniu czułości układu. Pierwszym więc warunkiem najlepszego pomiaru jest, aby galwanometr znajdował się w gałęzi łączącej punkt połączeń dwu oporów dużych z dwoma małymi.

Ponieważ galwanometr jest najczulszy, jeżeli jego opór wewnętrzny równa się oporowi reszty obwodu zewnętrznego t. j.

$$g = \frac{(X + R_1)(R + R_2)}{X + R + R_1 + R_2},$$

a z drugiej strony prąd, jaki daje ogniwo jest największy, jeżeli jego opór wewnętrzny jest równy oporowi obwodu zewnętrznego t. j.:

$$\rho = \frac{(X+R)(R_1+R_2)}{X+R+R_1+R_2},$$

przeto aby uzyskać te warunki, trzeba się starać, aby opory wszystkich gałęzi były równe,

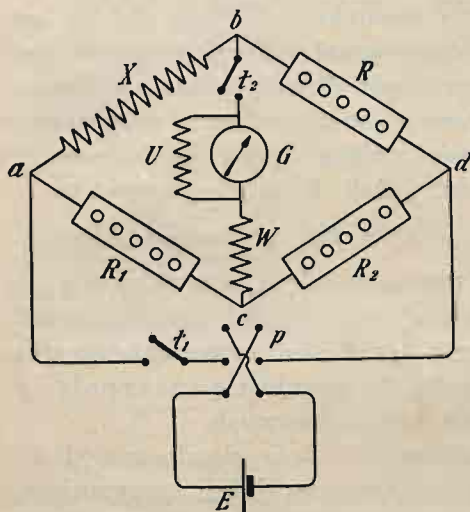
$$X=R=R_1=R_2=G=\rho.$$

To jest w praktyce nie do osiągnięcia, należy więc przy najmniej dążyć do zbliżenia się do tego.

Błąd graniczny. — Przy pomiarze za pomocą mostku Wheatstone'a posługujemy się czterema przyrządami, z których każdy jest obarczony błędem, a mianowicie trzema opornicami i galwanometrem. Największy błąd graniczny wyniku będzie sumą tych poszczególnych błędów. Błąd graniczny względny będzie więc

$$\frac{\Delta_g X}{X} = \frac{\Delta_g R}{R} + \frac{\Delta_g R_1}{R_1} + \frac{\Delta_g R_2}{R_2} + \frac{\delta X}{X},$$

gdzie  $\Delta_g R$ ,  $\Delta_g R_1$  i  $\Delta_g R_2$  są to błędy graniczne opornic, które zakłada się stosownie do dobroci 0,1—0,2%, a  $\delta X$  wyznacza się przez zbadanie czułości układu.



Rys. 4.

Pomiar. — Połączenie wykonuje się według następującego układu (rys. 4.).

Tutaj oznaczają:

- $X$  — opór badany,
- $R, R_1, R_2$  — opornice zatoryczkowe,
- $G$  — galwanometr,
- $E$  — ogniwo,
- $U$  — opór upustowy,
- $W$  — opór dodatkowy,
- $t_1, t_2$  — wyłączniki,
- $p$  — przełącznik.

Opory stosunkowe  $R_1$  i  $R_2$  są umieszczone zwykle w jednej skrzynce i mają jednakowe stopniowanie 1, 10, 100, 1000... $\Omega$ . Opór wewnętrzny galwanometru powinno się dostosować do innych oporów, aby jak najbardziej zbliżyć się do warunku największej czułości. Z tego samego powodu, jako



źródło  $SEM^*)$  nadają się najlepiej ogniwa suche, o dużym oporze wewnętrznym; zwykle jedno ogniwo wystarcza. Jako przełącznik  $p$  służy zwykle kołyska Pogendorffa; za jej pomocą puszcza się prąd w jednym lub w drugim kierunku. Ażeby przy rozpoczynaniu pomiaru nie przepuścić zbyt silnego prądu przez galwanometr należy dać w upuście do niego jakiś mały opór, albo włączyć w szereg z nim duży opór dodatkowy; to drugie jest czasem lepsze, gdyż upust zmniejsza opór gałęzi  $bc$ , co powoduje większy prąd z ogniwa, a więc szybszy spadek  $SEM$ , która powinna być stałą podczas całego pomiaru. Wyłącznik  $t_2$  ma na celu ochronę galwanometru przed nadmiernymi prądami indukcyjnymi, jakie powstają przy załączaniu i wyłączaniu prądu z ogniwa; w tym celu należy przy załączaniu prądu naprzód załączyć wyłącznik  $t_1$ , a potem  $t_2$ , a przy wyłączaniu naprzód wyłączyć  $t_2$ , a potem  $t_1$ .

Pomiar uskutecznia się w ten sposób, że przy stałym stosunku  $R_1$  i  $R_2$  zmienia się opór  $R$  tak długo, aż skazówka galwanometru stanie na zerze. Jeżeli wielkość oporu  $X$  jest mniej więcej znana, to opory stosunkowe dobiera się tak, aby opór porównawczy znalazł się w granicach określonych opornicą zatyczkową  $R$ . Jeżeli zaś opór  $X$  jest zupełnie nie znany, to obiera się opory stosunkowe na razie równe, a galwanometr ochrania się upustem i przez zmianę oporu porównawczego szuka się równowagi układu; jeżeli  $R$  tu nie wystarcza, to zmienia się stosunek  $\frac{R_1}{R_2}$  w jednym lub w drugim kierunku. Kiedy równowaga jest już prawie ustalona, sprawdza się, czy galwanometr i ogniwo znajdują się w odpowiednich gałęziach, wyłącza upust i galwanometr sprowadza ostatecznie do zera. Jeżeli nie można tego osiągnąć, to stosuje się interpolację według sposobu podanego dla metod zerowych.

Metoda mostku Wheatstone'a zalicza się do metod o 3 zmiennych, spostrzeganych jednocześnie; jeżeli utrzymuje się opory stosunkowe stałymi, wtedy można ją uważać za metodę o jednej zmiennej ( $X = C \cdot R$ ).

Ażeby wyznaczyć średni błąd pomiaru, należy go powtórzyć kilkakrotnie. Celem zaś usunięcia możliwych błędów stałych (n. p. z powodu nierówności przewodów łączących)

\*)  $SEM$  = siła elektromotoryczna.

trzeba każdy pomiar uskutecznić dwukrotnie, puszczać zapomocą przełącznika prąd raz w jednym, drugi raz w drugim kierunku i sprowadzając każdorazowo równowagę układu; średnia z obu pomiarów da wartość właściwą, z której oblicza się później błąd średni.

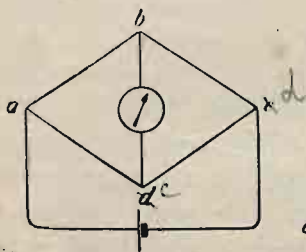
Protokół pomiaru prowadzi się w następujący sposób:

L. p.	$R_1$	$R_2$	$R_{pr}$	$R_{lew}$	$R_{sr}$	$X$	$X_{sr}$	$\Delta X$	$(\Delta X)^2$

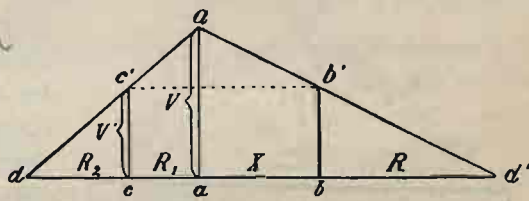
Tutaj oznacza L. p. — liczbę porządkową pomiaru;  $R_{pr}$  — wartość oporu  $R$ , jaką się dostaje przy puszczeniu prądu w prawo, a  $R_{lew}$  w lewo, po sprowadzeniu układu do równowagi;  $R_{sr}$  wartość średnią z obu  $X$  oblicza się według  $X = R_{sr} \frac{R_1}{R_2}$ , a  $X_{sr}$  z wszystkich wartości  $X$ ;  $\Delta X$  są to różnice między  $X_{sr}$ , a poszczególnymi  $X$ .

### Graficzne wyprowadzenie równania Wheatstone'a.

Weźmy pod uwagę chwilę gdy przez galwanometr prąd nie płynie, t. zn. w p.  $b$  i  $c$  są te same potencjały (rys. 5a i 5b). Wyobraźmy sobie czworobok rozcięty w p.  $d$  i rozłożony. Na prostej  $dd'$  odcinamy długość  $dc = R_2$  i  $ca = R_1$ . Między p.  $a$  i  $d$



Rys. 5a)



Rys. 5b)

panuje różnica potencjałów  $V$ , przedstawiona rzędną  $aa' = V$ . Ta różnica potencjałów wyrównuje się spadkiem napięcia na drodze  $abd'$  i  $acd$ , spadek ten jest liniowy, t. zn. że rzędna  $cc'$  przedstawia różnicę potencjałów  $V'$  między  $a$  i  $c$ . Ponieważ różnica potencjałów  $ac = ab$ , przeto prosta poprowadzona z p.  $c'$  równolegle do  $dd'$  przetnie  $ad'$  w p.  $b'$ , a pion  $bb'$  odcetnie nam wielkość  $X$  i  $R$ . Wtedy

$$\frac{V - V'}{V} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{X}{R'}$$

czyli

$$X = R \frac{R_1}{R_2}$$

## > 2. Mostek Kirchhoffa.

(Drut mierniczy).

Sposób ten (*rys. 6.*) jest odmianą mostku Wheatstone'a, w którym opory stosunkowe  $R_1$  i  $R_2$  zastąpiono drutem kalibrowanym, t. j. takim, którego jednakowym długościom odpowiadają jednakowe opory; będzie to wtedy, jeżeli jego przekrój jest wszędzie jednakowy. Wtedy mamy:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{q}$$

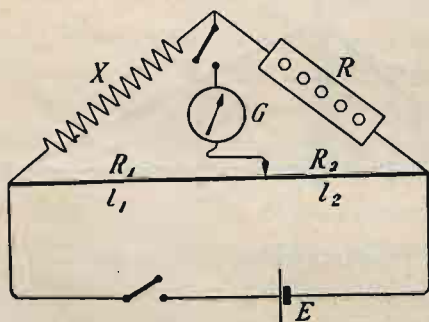
$$R_2 = \rho \frac{l_2}{q}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2},$$

a więc stosunek oporów może być zastąpiony stosunkiem długości. W tym wypadku równanie Wheatstone'a będzie

$$X = R \frac{l_1}{l_2}$$

Drut mierniczy jest zwykle 0,5—1 mm gruby, zrobiony z platyny z domieszką irydium. Długość jego wynosi 1 m, rozpięty jest na podziałce milimetrowej. Zapomocą styku ślizgającego się, połączony jest z nim galwanometr (lub ogniwo w razie potrzeby). Ponieważ jego opór jest mały (0,5 do 2  $\Omega$  na 1 m), przeto nadaje się do mierzenia przede-



Rys. 6.

wszystkiem oporów małych, zwłaszcza jeżeli jako oporu  $R$  używa się oporu normalnego, stałego n. p. 1  $\Omega$ .

Z tego, co powiedziano przy mostku Wheatstone'a, największa czułość układu będzie, jeżeli wszystkie opory będą wiel-



kościami jak najbardziej do siebie zbliżone, a więc jeżeli styk stoi na środku drutu, a opory galwanometru i ogniwa są małe i mniej więcej równe.

Postępowanie przy pomiarze jest nieco odmienne, niż przy mostku Wheatstone'a. Tam się zmieniało opór porównawczy, a tutaj zmienia się opory stosunkowe, przesuując styk wzdłuż drutu mierniczego tak długo, aż igiełka galwanometru stanie na zerze.

Jeżeli opór badany jest mały, to zważać należy, ażeby opory przewodów łączących były małe, albo aby stosunek oporów łączących w gałęziach  $X$  i  $R$  był proporcjonalny do  $\frac{l_1}{l_2}$ . Również dobrze jest puszczać prąd w obu kierunkach i brać średnią z  $\frac{l_1}{l_2}$ .

Także inne uwagi, podane przy opisie metody mostku Wheatstone'a odnoszą się i tutaj.

Mostek Kirchhoffa jest to metoda o 3 zmiennych jednoczesnych, z których jedna t. j.  $R$  może być stała.

Błąd graniczny będzie podobnie jak poprzednio

$$\frac{\Delta_g X}{X} = \frac{\Delta_g R}{R} + \frac{\Delta_g l_1}{l_1} + \frac{\Delta_g l_2}{l_2} + \frac{\delta X}{X},$$

gdzie  $\Delta_g R$  zakłada się 0,1—0,2%,  $\Delta_g l_1$  i  $\Delta_g l_2$  0,2%, a  $\frac{\delta X}{X}$  jest miarą czułości układu, którą się otrzymuje przez zmianę stosunku  $\frac{l_1}{l_2}$ , aż się dostanie założone odchylenie skazówki galwanometru.

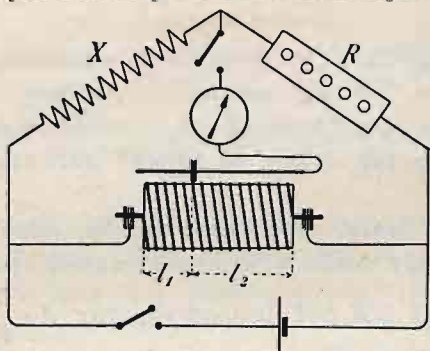
Protokół pomiaru:

L. p.	$R$	$l_{1pr}$	$l_{2pr}$	$\frac{l_1}{l_2}{}_{pr}$	$l_{1lew}$	$l_{2lew}$	$\frac{l_1}{l_2}{}_{lew}$	$\frac{l_1}{l_2}{}_{śr}$	$X$	$X_{śr}$	$\Delta X$	$(\Delta X)^2$

### 3. Mostek Kohlrauscha.

Jest to odmiana mostku Kirchhoffa; drut mierniczy jest tutaj nawinięty na walec marmurowy, a opór porównawczy jest w tej samej skrzynce co i walec umieszczony, skutkiem

tego cała budowa jest prostsza (rys. 7.). Po drucie ślizga się styk ruchomy. Ponieważ zwojów drutu jest 10 i każdy zwoj



Rys. 7.

jest podzielony na 100 części, a oprócz tego jest zastosowany nonius, przeto można z zupełną dokładnością odczytywać dziesięciotysięczne części drutu. Jest więc skutkiem tego dokładniejszy od mostku Kirchhoffa.

Postępowanie przy pomiarze jest podobne do poprzedniego; przesuwając

styk przez obracanie walca sprowadzamy układ do równowagi, wtedy

$$X = R \frac{l_1}{l_2}.$$

Błąd graniczny i protokół pomiaru są takie same, jak przy poprzedniej metodzie.

Sposób ten jest używany często do pomiaru oporu cieczy, o czym później.

#### 4. Galwanometr różnicowy.

Galwanometr różnicowy (syst. Wiedemanna) posiada dwie równoległe do siebie ustawione cewki, złożone z drutu o jednakowej długości, jednakowej liczbie zwojów i jednakowym oporze ohmowym. Te cewki mogą wywierać jednakowe działanie na igłę magnetyczną umieszczoną między niemi, jeżeli przez nie przepływa ten sam prąd; wtedy momenty skręcające znoszą się i igielka pozostaje w spoczynku. Aby więc igielka nie doznała wychylenia, muszą być spełnione pewne warunki, które trzeba sprawdzić przed pomiarem. Jest to t. zw.

##### Ustawienie galwanometru.

1. Siły działające na igielkę galwanometru muszą pochodzić tylko od momentów skręcających, wytworzonych przez cewki; w szczególności musi być zniweczony wpływ magnetyzmu ziemskiego; aby tak było, płaszczyzny cewek muszą

leżeć w płaszczyźnie południka magnetycznego. Aby się o tem przekonać, łączy się obie cewki tak, aby ich działania na igiełkę się dodawały — połączenie za sobą — i puszcza się przez nie prąd z ogniwa zapomocą przełącznika raz w jednym, drugi raz w drugim kierunku. Jeżeli płaszczyzny cewek nie leżą w płaszczyźnie południka, to wychylenia igiełki nie są jednakowe w obie strony; przez obracanie galwanometru około osi pionowej można wtedy spełnić pierwszy warunek. Dla bezpieczeństwa należy przed galwanometr załączyć duży opór (kilkadziesiąt tysięcy ohmów).

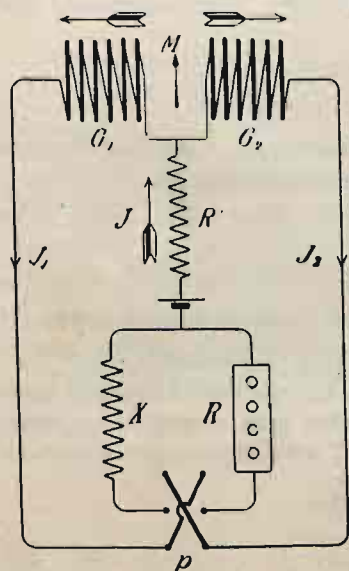
2. Obie cewki muszą wywierać na igiełkę momenty skręcające równe lecz wprost przeciwne. Moment skręcający zależy od prądu w cewce i od odległości cewki od igiełki (przy tej samej liczbie zwojów). Jeżeli momenty są równe, to przy połączeniu cewek przeciw sobie i puszczeniu prądu przez nie, igiełka musi stać na 0. W przeciwnym razie

należy zwiększyć odległość cewki, dającej większy moment, przez odpowiednie przesunięcie jej wzdłuż jej osi poziomej, albo też zmniejszyć jej natężenie prądu przez połączenie równoległe do niej wielkiego oporu. Dla bezpieczeństwa należy przed galwanometr załączyć duży opór.

3. Opory cewek muszą być równe. Celem sprawdzenia łączy się początek jednej cewki z końcem drugiej i w miejscu połączenia wpuszcza się prąd tak, aby cewki wywierały momenty przeciwne. Jeżeli momenty są równe, to igiełka nie odchyli się; w przeciwnym razie

należy w szereg z tą cewką, która daje większe wychylenie, włączyć odpowiedni opór. Układ połączeń jest podobny do rys. 8. (bez oporów  $X$  i  $R$  i przełącznika).

Ustawianie galwanometru powinno się odbywać w wymienionym porządku.



Rys. 8.

Zastosowanie galwanometru różnicowego do pomiaru oporów średnich odbywa się według następujących układów połączeń.

a) *Połączenie szeregowe (rys. 8.)*

Tutaj oznacza:

$G_1, G_2$  — cewki galwanometru o oporach  $G_1$  i  $G_2$

$M$  — igielkę magnetyczną

$X$  — opór badany

$R$  — „ porównawczy

$R'$  — „ dodatkowy

$p$  — przełącznik.

Z układu połączeń widać, że jeżeli  $SEM$  ogniwa jest  $E$ , to

$$J_1 = \frac{E}{X + R' + G_1}$$

$$J_2 = \frac{E}{R + R' + G_2}$$

Jeżeli igielka stoi na 0, a  $G_1 = G_2$  i galwanometr jest „ustawiony“, to

$$J_1 = J_2$$

czyli

$$X = R.$$

Aby więc wyznaczyć opór  $X$ , trzeba opór porównawczy  $R$  regulować tak długo, aż igielka galwanometru stanie na 0.

Najlepsze warunki pomiaru będą, jeżeli średni błąd wyniku będzie najmniejszy t. j.  $\frac{\Delta X}{X} = \text{minim.}$ ; będzie to przy małym oporze galwanometru i małym oporze dodatkowym  $R'$ .

Dojdziemy do tego według następującego rozważania\*):

Warunku, aby  $X = R$  zwykle nie da się osiągnąć, lecz trzeba zastosować interpolację (metod zerowych!). Jeżeli przy oporze  $R$  otrzymamy wychylenie  $\alpha'$  n. p. w prawo, a przy  $R + 1$  wychylenie  $-\alpha''$  w lewo, to

$$X = R + \frac{\alpha'}{\alpha' + \alpha''}$$

a

$$\Delta X = \frac{\alpha'' \Delta \alpha' - \alpha' \Delta \alpha''}{(\alpha' + \alpha'')^2};$$

jeżeli założymy, że  $\Delta \alpha' = -\Delta \alpha'' = \Delta \alpha$ , to

$$\Delta X = \frac{\Delta \alpha}{\alpha' + \alpha''}$$

a

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta \alpha}{(\alpha' + \alpha'')X}$$

\*) Według G é r a r d a op. cit.



Chodzi teraz o to, aby wychylenie zastąpić innemi wielkościami. Te wychylenia  $\alpha'$  i  $\alpha''$  będą miarą prądu przepływającego przez galwanometr, t. j. różnicy prądów  $J_1$  i  $J_2$

$$C\alpha' = \frac{E}{X + R' + G_1} - \frac{E}{R + R' + G_2}$$

podobnie 
$$C\alpha'' = \frac{E}{X + R' + G_1} - \frac{E}{R + 1 + R' + G_2}$$

dotawszy to, otrzymamy

$$C(\alpha' + \alpha'') = \frac{E}{X + R' + G_1} - \frac{E}{R + 1 + R' + G_2}$$

czyli jeżeli  $G_1 = G_2 = G$ , to

$$C(\alpha' + \alpha'') = \frac{E}{(X + R' + G)(R + 1 + R' + G)}$$

Ponieważ  $X + R' + G_1 \approx R + 1 + R' + G_2$ , to

$$\alpha' + \alpha'' = \frac{E}{C(X + R' + G)^2}$$

Podstawivszy to w równanie poprzednio otrzymane, będzie

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{C(X + R' + G)^2 \Delta \alpha}{X \cdot E}$$

Widać ztąd, że  $\frac{\Delta X}{X}$  będzie minimum, jeżeli  $C(X + R' + G)^2$  będzie minimum, t. zn. przy małym oporze galwanometru i małym oporze dodatkowym.

Opory doprowadzeń powinny być równe, gdyż wpływają one na opór obu cewek galwanometru. Widać ztąd, że ten sposób nadaje się przedewszystkiem do pomiaru oporów średnich i dużych, gdzie opory przewodów łączących nie grają wielkiej roli.

Celem wyrównania możliwych niedokładności ustawienia galwanometru należy zawsze puszczać prąd w obu kierunkach.

Pomiar oporu galwanometrem różnicowym należy do metod o jednej zmiennej (por. str. 8).

Błąd graniczny:

$$\frac{\Delta_g X}{X} = \frac{\Delta_g R}{R} + \frac{\delta X}{X}$$

gdzie  $\Delta_g R$  zakłada się 0,1—0,2%, a  $\frac{\delta X}{X}$  jest miarą czułości układu.

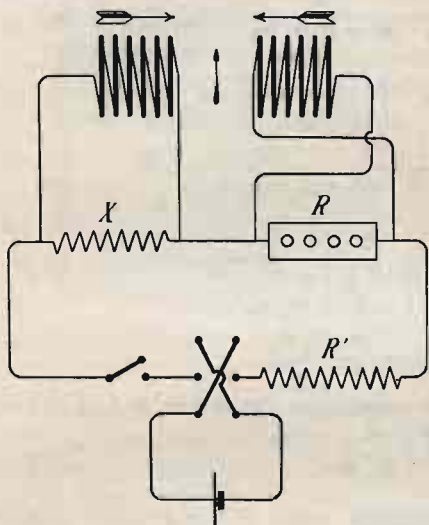
Protokół pomiaru:

L. p.	$R_{pr}$	$R_{lew}$	$R_{śr}$	$X$	$X_{śr}$	$\Delta X$	$(\Delta X)^2$

*Ważniejsze warunki przed rozpoczęciem pomiaru*

*b) Połączenie upustowe zwykłe.*

Jeżeli opór badany jest mniejszy niż opór cewek galwanometru, to lepiej jest zastosować połączenie upustowe (*rys. 9.*), polegające na tem, że cewki galwanometru załącza się w upuszcie do oporu badanego i porównawczego, tak aby przez nie płynął prąd w kierunku przeciwnym. Wtedy opory przewodów łączących, które mogą mieć wpływ na małe opory badane, nie dodają się do niego, lecz do oporu cewek galwanometru, a ten jest zwykle znacznie większy od oporów doprowadzeń.



Rys. 9.

Sposób postępowania przy pomiarze jest taki sam, jak pod *a*).

*c) Połączenie upustowe przełożone.* p. Pomiary oporów małych. str. 39.

## 5. Porównanie spadków napięcia.

Opór badany  $X$  łączy się z oporem porównawczym  $R$  według następującego układu połączeń (*rys. 10.*).

Zapomocą galwanometru o oporze  $G$  i przełącznika  $p$  mierzy się raz spadek napięcia  $E_x$  na oporze  $X$ , a drugi raz spadek napięcia  $E_r$  na oporze  $R$ . Wtedy

$$E_x = JR_x,$$

a

$$E_r = JR_r,$$

gdzie  $R_x$  jest to opór zastępczy oporów  $X$  i  $G$  i  $= \frac{XG}{X+G}$ , a  $R_r$

jest to opór zastępczy oporów  $R$  i  $G$  i  $= \frac{RG}{R+G}$

czyli

$$\frac{E_x}{E_r} = \frac{X(R+G)}{R(X+G)},$$

z tego

$$X = \frac{E_x R G}{E_r R + E_r G - E_x R}$$

albo

$$X = \frac{E_x R}{E_r + \frac{E_r R}{G} - \frac{E_x R}{G}}$$

Jeżeli opór wewnętrzny galwanometru jest bardzo duży, a  $X \approx R$  to można opuścić człony, w których  $G$  przychodzi i wtedy

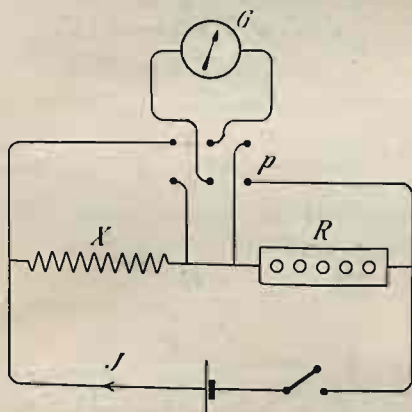
$$X = \frac{E_x}{E_r} R.$$

Przy użyciu woltmetru statycznego jako galwanometru, wzór ten jest ważny bez poprawek.

Przy pomiarze oporów małych można użyć tylko galwanometru; ponieważ wychylenia jego są proporcjonalne do napięcia przy tym samym oporze wewnętrznym, przeto zamiast  $E_x$  i  $E_r$  można podstawić odpowiednie wychylenia  $\alpha_x$  i  $\alpha_r$  i wzór przybierze formę:

$$X = R \frac{\alpha_x}{\alpha_r}.$$

Jest to więc metoda o 3 zmiennych niezależnych, obserwowanych jednocześnie, z których jedna t. j.  $R$  jest zwykle stałą; błędów poszczególnych zmiennych nie wyznacza się oddzielnie, lecz odrazu błąd wyniku.



Rys. 10.

znacza się oddzielnie, lecz odrazu błąd wyniku.

Błąd graniczny:

$$\frac{\Delta_g X}{X} = \frac{\Delta_g R}{R} + \frac{\Delta_g \alpha_x}{\alpha_x} + \frac{\Delta_g \alpha_r}{\alpha_r}$$

gdzie  $\Delta_g R$  zakłada się 0,1–0,2%, a  $\Delta_g \alpha_x$  i  $\Delta_g \alpha_r$  0,1–0,25 podziałki przyrządu.

Najlepsze warunki pomiaru będą, jeżeli  $\alpha_x$  i  $\alpha_r$  będą równe i największe w granicach podziałki przyrządu.

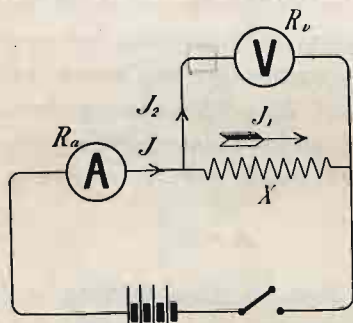
Protokół pomiaru:

L. p.	$R$	$\alpha_x$	$\alpha_r$	$X$	$X_{gr}$	$\Delta X$	$(\Delta X)^2$

## 6. Sposoby techniczne.

W praktyce nie zawsze można posługiwać się galwanometrami i opornicami; najczęściej ma się do czynienia z woltmetrami i ampermetrami, wtedy można do pomiaru oporów (średnich) zastosować prawo Ohma, a więc pomierzyć spadek napięcia, wywołany przez znany prąd na badanym oporze. Tu są możliwe dwa sposoby połączeń.

a) Ampermetr  $A$  (rys. 11.) mierzy prąd  $J$ , który jest sumą prądu  $J_1$  płynącego przez opór badany  $X$  i prądu  $J_2$  płynącego przez woltmetr  $V$  o oporze wewnętrznym  $R_v$ ; woltmetr mierzy spadek napięcia na oporze  $X$ .



Rys. 11.

$$J = J_1 + J_2$$

$$J_1 X = J_2 R_v = (J - J_2) X$$

$$X = \frac{J_2 \cdot R_v}{J - J_2}$$

Ponieważ  $J_2 = \frac{E}{R_v}$ , gdzie  $E$  jest

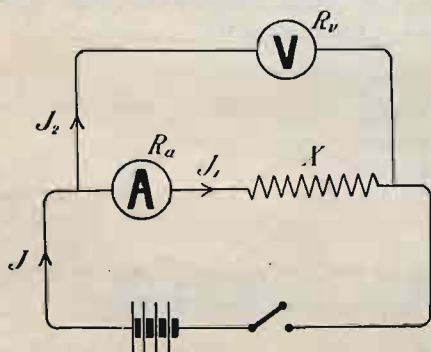
to napięcie wskazane przez woltmetr, przeto

$$X = \frac{E}{J - \frac{E}{R_v}}$$

czyli od prądu wskazanego przez ampermetr, należy odjąć prąd przechodzący przez woltmetr. Jeżeli  $R_v$  jest wobec  $E$  bardzo

duże, to można człon  $\frac{E}{R_v}$  opuścić.

Tego układu połączeń używa się przy dużych prądach a małych napięciach.



Rys. 12.

b) Ampermetr  $A$  (rys. 12.) mierzy prąd  $J_1$  płynący przez opór  $X$ , a woltmetr  $V$  mierzy spadek napięcia wywołany prądem  $J_1$  na oporze ba-

danym  $X$  i oporze wewnętrznym ampermetru  $R_a$

$$J_1 (X + R_a) = J_2 R_v,$$



z tego po podstawieniu

$$J_2 = \frac{E}{R_v}$$

$$X = \frac{E - J_1 R_a}{J_1}$$

czyli: od napięcia wskazanego przez woltmetr należy odjąć spadek napięcia na oporze wewnętrznym ampermetru. Jeżeli  $R_v$  jest bardzo małe wobec  $J_1$ , to można człon  $J_1 R_a$  opuścić.

Tego układu połączeń używa się przy dużych napięciach a małych prądach.

Oba sposoby należą do metod o dwu zmiennych jednoczesnych. Człony  $\frac{E}{R_v}$  i  $J_1 R_a$  są to poprawki wynikające z układu połączeń, trzeba więc je zawsze wyznaczyć i ewent. uwzględnić; przy obliczaniu błędów mogą jednak nie wchodzić w rachubę (p. str. 2).

Błąd graniczny w obu wypadkach:

$$\frac{\Delta_j X}{X} = \frac{\Delta_j E}{E} + \frac{\Delta_j J}{J}$$

gdzie  $\Delta_j E$  i  $\Delta_j J$  przyjmuje się 0,2—0,5%, albo nawet więcej, jeżeli się ma do czynienia z przyrządami technicznymi.

Najlepsze warunki pomiaru będą przy  $E$  i  $J$  maksimum w granicach podziałki przyrządu.

Protokół pomiaru:

L. p.	$J$	$E$	$X$	$X_{sr}$	$\Delta X$	$(\Delta X)^2$

## B. Opory małe

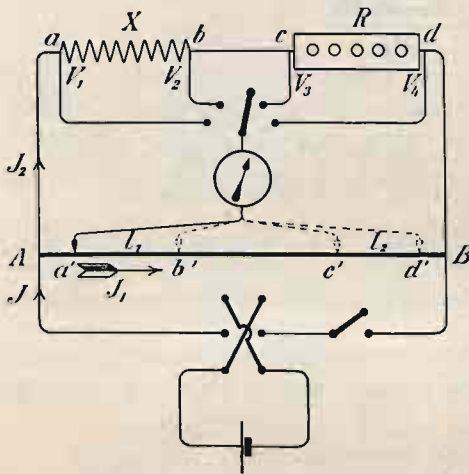
(niżej 0,1  $\Omega$ ).

Metody pomiarów oporów średnich nie uwzględniają oporów doprowadzeń i przewodów łączących, a opór otrzymany z pomiaru zawiera już w sobie te opory. Przy pomiarze oporów małych jest to niedopuszczalne; tam trzeba zastosować inne metody.

### 1. Metoda Matthiessena i Hockina.

Układ połączeń jest podobny do mostku Kirchhoffa (*rys. 13.*); sposób postępowania przy pomiarze jest natomiast nieco inny: zamiast pojedynczego, robi się tu poczwórne spostrzeżenie.

Opór  $X$  załącza się w szereg z oporem porównawczym  $R$ , a równolegle do nich drut mierniczy  $AB$  jako opory stosunkowe. Najpierw załącza się



Rys. 13.

w drucie mierniczym. Tego szukamy właśnie za pomocą galwanometru. Podobnie szukamy równych potencjałów w p.  $b$  i  $b'$ ,  $c$  i  $c'$ ,  $d$  i  $d'$ , będą to  $V_2, V_3, V_4$ .

Wtedy będzie, jeżeli przez  $r$  oznaczymy opór drutu na jedną podziałkę:

$$V_1 - V_2 = J_1 r l_1 = J_2 X$$

$$V_3 - V_4 = J_1 r l_2 = J_2 R$$

z tego

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{X}{R}$$

czyli

$$X = R \frac{l_1}{l_2}$$

Jest to więc równanie mostku Kirchhoffa; uwagi tam odnoszące się stosuje się i tutaj.

Z układu połączeń widać, że równanie powyższe nie zawiera wielkości oporów doprowadzeń  $Aa, bc$  i  $dB$  o co właśnie chodziło. Sposób ten jest wprawdzie dokładny, wymaga jednak kilkakrotnego spostrzegania.

Metoda Matthiessena i Hockina jest to metoda o 3 zmiennych jednoczesnych, z których jedna t. j.  $R$  może być stała.

Przy wyznaczaniu błędu granicznego trzeba uwzględnić poczwórne spostrzeganie, a więc błąd jaki może powstać przez

niedokładne nastawienie skazówki galwanometru na zero. Skutkiem tego długości  $l_1$  i  $l_2$  mogą być większe lub mniejsze niż rzeczywiste; na  $l_1$  przypadną dwa błędy  $\delta l'_1$  i  $\delta l''_1$ ; podobnie na  $l_2$ . Biorąc najniekorzystniejszy wypadek, przyjmujemy, że w liczniku błędy się dodają, a w mianowniku odejmują się od rzeczywistej wartości; jeżeli błędy są równe, to

$$X' = X + \delta X = R \frac{l_1 + 2\delta l_1}{l_2 - 2\delta l_2},$$

skąd można obliczyć  $\delta X$ .

Wtedy błąd graniczny będzie:

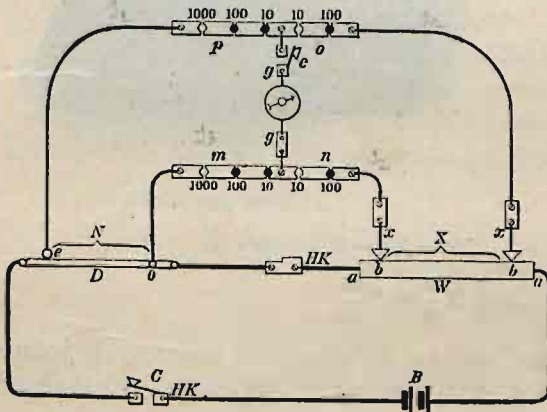
$$\frac{\Delta_g X}{X} = \frac{\Delta_g R}{R} + \frac{\Delta_g l_1}{l_1} + \frac{\Delta_g l_2}{l_2} + \frac{\delta X}{X}$$

Protokół pomiaru:

L. p.	R	$l_{1pr}$	$l_{1lew}$	$l_{1\acute{s}r}$	$l_{2pr}$	$l_{2lew}$	$l_{2\acute{s}r}$	X	$X_{\acute{s}r}$	$\Delta X$	$(\Delta X)^2$

## 2. Mostek Thomsona. *(Kobrina)*

Dogodniejszym sposobem od poprzedniego jest podwójny mostek Thomsona, wymagający tylko pojedynczego spo-



Rys. 14.

strzegania. Polega on na szczególnym układzie połączeń (rys. 14.) sześciu oporów, to jest oporu badanego X, oporu porównawczego N i 4 oporów stosunkowych m, n, o, p. Opór N jest grubym drutem mierniczym, zwinę-  
niętym w krąg na skrzynce, w której

znajdują się 4 opory stosunkowe (rys. 15. i 16., według wykonania firmy Siemens i Halske).

Sposób postępowania przy pomiarze jest podobny, jak przy mostku Kirchhoffa. Opory stosunkowe nastawia się tak, aby

przez przesuwanie styku ruchomego po drucie mierniczym otrzymać równowagę układu; będzie to wtedy, gdy igielka galvanometru stanie na zerze. Wtedy prądy w oporach  $N$  i  $X$ ,  $m$  i  $n$ ,  $p$  i  $o$  będą parami równe. Także spadki napięcia w oporach  $p$  i  $N+m$ , oraz w  $o$  i  $X+n$  będą równe, a więc, jeżeli oznaczymy prąd w  $p$  i  $o$  przez  $J_1$ , w  $N$  i  $X$  przez  $J_2$ , a w  $m$  i  $n$  przez  $J_3$ , to

$$J_1 p = J_2 N + J_3 m,$$

podobnie

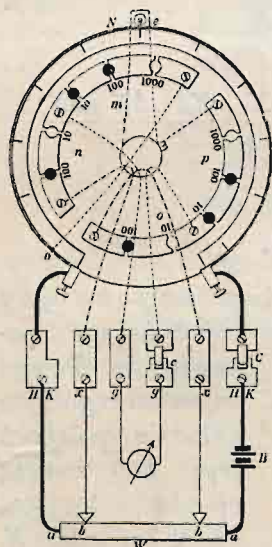
$$J_1 o = J_2 X + J_3 n,$$

po sprowadzeniu obu równań do 1 będzie

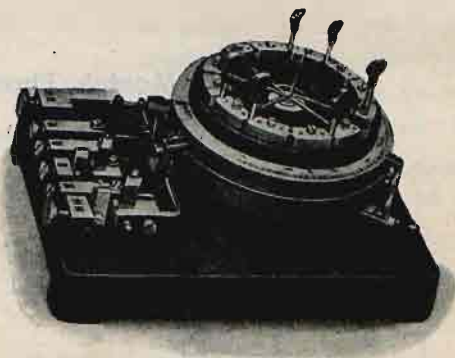
$$\frac{J_2 N}{J_1 p} + \frac{J_3 m}{J_1 p} = \frac{J_2 X}{J_1 o} + \frac{J_3 n}{J_1 o}$$

Jeżeli opory stosunkowo obierzemy tak, żeby  $m=p$ , a  $n=o$ , to

$$\frac{N}{p} = \frac{X}{o}$$



Rys. 15.



Rys. 16.

albo

$$No = Xp$$

czyli

$$X = N \frac{o}{p} = N \frac{n}{m}$$

Mostek Thomsona jest to metoda o 3 zmiennych jednoczesnych, z których 2 t. j.  $o$  i  $p$  lub  $n$  i  $m$  mogą być stałymi.

Błąd graniczny:

$$\frac{\Delta_o X}{X} = \frac{\Delta_o N}{N} + \frac{\Delta_o o}{o} + \frac{\Delta_o p}{p} + \frac{\delta X}{X},$$

lub

$$= \frac{\Delta_o N}{N} + \frac{\Delta_o n}{n} + \frac{\Delta_o m}{m} + \frac{\delta X}{X},$$



gdzie  $\Delta_p N$ ,  $\Delta_o o$ ,  $\Delta_p p$ ,  $\Delta_o m$ ,  $\Delta_o n$  przyjmuje się 0,1%, a  $\frac{\delta N}{X}$  jest miarą czułości układu, którą wyznacza się przesuwając styk ruchomy.

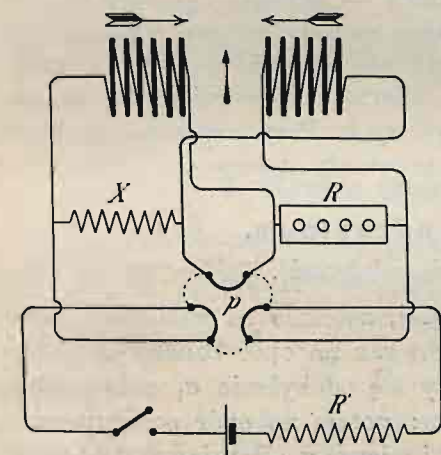
Najlepsze warunki pomiaru. Rozchodzi tu się głównie o to, jak należy włączyć galwanometr, aby dawał największe wychylenie. Galwanometr o oporze  $G$  jest włączony równolegle do oporów  $p+N+m$  i  $o+X+n$ ; wychylenie jego będzie więc największe, jeżeli  $G$  będzie równe oporowi zastępczemu tych obu oporów równoległych. Położywszy  $o=n$ , a  $p=m$

i opuściwszy  $X$  i  $N$  jako bardzo małe względem  $m$  i  $n$ , będzie

$$G = \frac{2mn}{m+n}$$

jako warunek największej czułości układu.

Prąd z ogniw powinien być dość duży (kilka amperów), gdyż nawet bardzo czuły galwanometr przy małym prądzie mógłby nie dać pewnego wychylenia, a to przez wpływ prądów termoelektrycznych, powstających przy styku ruchomym. Opory porównawcze



Rys. 17.

powinny być duże, aby opory przejściowe (stykowe) nie grały większej roli. Dobrze jest puszczać prąd w obu kierunkach.

Protokół pomiaru:

L. p.	$N$	$m=o$	$n=p$	$X$	$X_{sr}$	$\Delta X$	$(\Delta X)^2$

### 3. Galwanometr różnicowy.

Połączenie upustowe przełożone. (Inne połączenia p. str. 30 i n.). Przy tem połączeniu (rys. 17.) przewód łączący opory  $X$  i  $R$  wpływa równocześnie na obie cewki, t. j. spadek napięcia na tym oporze wywołuje tę samą zmianę prądu w jednej cewce co w drugiej. Wpływ więc oporów łączących na

opór badany jest usunięty. Aby można było puszczać prąd w obu kierunkach, służy do tego sześciokontaktowy przełącznik  $p$ ; przy danem położeniu płynie prąd w kierunku oznaczonym strzałkami, przy położeniu kreskowanym — w odwrotnym.

Sposób postępowania przy pomiarze jest podobny do połączenia zwykłego (str. 32).

## C. Opory wielkie

(ponad 100000  $\Omega$ ).

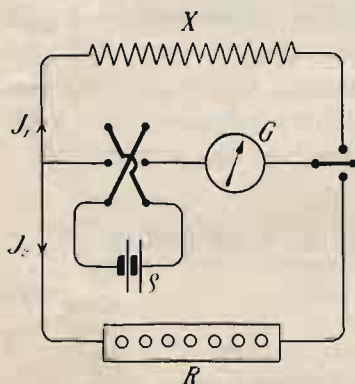
Do pomiaru oporów wielkich — głównie oporów izolacji — nie nadają się zwyczajne metody zerowe, dające najbardziej dokładne wyniki, gdyż nie wyrabia się opornic zatyckowych na tak duże opory (mierzone w megohmach); trzeba się więc uciec do metod odchyłowych. Przy pomiarach izolacji należy wszystkie przyrządy i przewody dobrze odizolować.

### 1. Metoda odchyłowa.

(Porównanie odchyleń).

Ogniwo — jedno lub więcej, zależnie od wielkości oporu badanego — łączy się (*rys. 18.*) raz na opór badany  $X$  i mierzy się odchylenie  $\alpha_1$  galwanometru;

potem na opór porównawczy  $R$  i mierzy  $\alpha_2$ . Przyjąwszy, że  $SEM$  ogniwa  $E$  się nie zmieni (jeżeli  $X$  i  $R$  bardzo duże) będzie



Rys. 18.

$$J_1 = \frac{E}{X + G + \rho} = \alpha_1 C \quad \text{gdzie}$$

$G$  jest to opór galwanometru,  $\rho$  opór wewnętrzny ogniwa, a  $C$  stała galwanometru, podobnie

$$J_2 = \frac{E}{R + G + \rho} = \alpha_2 C \quad \text{z tego}$$

$$\frac{X}{R} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad \text{albo}$$

$$X = R \frac{\alpha_2}{\alpha_1}.$$

Powyższa metoda należy do rzędu metod o trzech zmiennych jednoczesnych, z których jedna t. j.  $R$  może być stała.

Błąd graniczny:

$$\frac{\Delta_g X}{X} = \frac{\Delta_g R}{R} + \frac{\Delta_g \alpha_1}{\alpha_1} + \frac{\Delta_g \alpha_2}{\alpha_2},$$

gdzie  $\Delta_g R$  przyjmuje się 0,1—0,2%, a  $\Delta_g \alpha_1$  i  $\Delta_g \alpha_2$  0,1—0,25 podziałki.

Najlepsze warunki pomiaru będą przy największych odchyleniach wskazówki galwanometru.

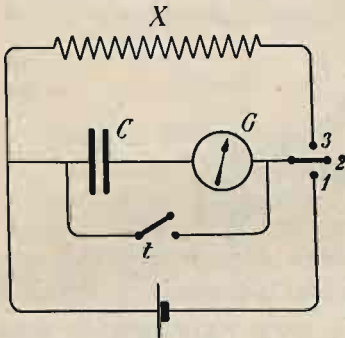
Aby uniknąć możliwych błędów stałych, należy puszczać prąd w obu kierunkach.

Protokół pomiaru:

L. p.	$R$	$\alpha_{1pr}$	$\alpha_{1lew}$	$\alpha_{1\acute{s}r}$	$\alpha_{2pr}$	$\alpha_{2lew}$	$\alpha_{2\acute{s}r}$	$X$	$X_{\acute{s}r}$	$\Delta X$	$(\Delta X)^2$

## 2. Metoda strat ładunków.

Ten sposób nadaje się głównie do pomiaru izolacji. Polega on na porównywaniu spadku ładunków kondensatora o znanej pojemności  $C$ , raz otwartego, drugi raz załączonego na badany opór. SEM ogniwa dającego ładunki musi być w obu wypadkach stałą.



Rys. 19.

Opór  $X$  załącza się według układu połączeń (rys. 19.). Przez nastawienie przełącznika na 1 kondensator  $C$  się ładuje; na 2 jest kondensator otwarty, a na 3 wyładowuje się przez opór  $X$ .

Przy ładowaniu pod napięciem  $E$  ilość elektryczności  $Q$ , jaką dostaje kondensator  $C$  jest

$$Q = C \cdot E.$$

Przy wyładowaniu prąd  $i = -\frac{dQ}{dt} = -C \frac{dE}{dt}$ , gdzie znak  $-$  oznacza zmniejszenie się ładunku; albo

$$i = \frac{E}{R_1},$$

gdzie  $R_1$  jest to opór drogi prądu wyładowania przy położeniu przełącznika na 2, czyli

$$-C \frac{dE}{dt} = \frac{E}{R_1}$$

$$\frac{dE}{E} = -\frac{dt}{CR_1}$$

$$\log_n E = -\frac{t}{CR_1} + k \text{ (stała)}$$

$$E = k_1 e^{-\frac{t}{CR_1}}$$

$E$  przedstawia napięcie na kondensatorze mierzone w czasie  $t$ . W czasach  $t_1$  i  $t_2$  będą odpowiednie napięcia

$$E_1 = k_1 e^{-\frac{t_1}{CR_1}}$$

$$E_2 = k_1 e^{-\frac{t_2}{CR_1}}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = e^{\frac{t_2 - t_1}{CR_1}}$$

$$\log_n \left( \frac{E_1}{E_2} \right) = \frac{t_2 - t_1}{CR_1}$$

Napięcia  $E_1$  i  $E_2$  można mierzyć za pomocą odchyień galwanometru  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$ , bo  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ , czyli

$$\log_n \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) = \frac{t_2 - t_1}{CR_1} \quad \text{z tego}$$

$$R_1 = \frac{t_2 - t_1}{C \log_n \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)} = \frac{1}{2,30} \cdot \frac{t_2 - t_1}{C \log \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)}$$

Opór drogi wyładowania  $R_1$  można więc wyznaczyć, mierząc napięcie  $E_1$  kondensatora podczas ładowania w czasie  $t_1$  (przełącznik na 1), oraz napięcie  $E_2$  przy wyładowaniu przez galwanometr po czasie  $t_2$  (przełącznik na 2, wyłącznik  $\ell$  zamknięty).

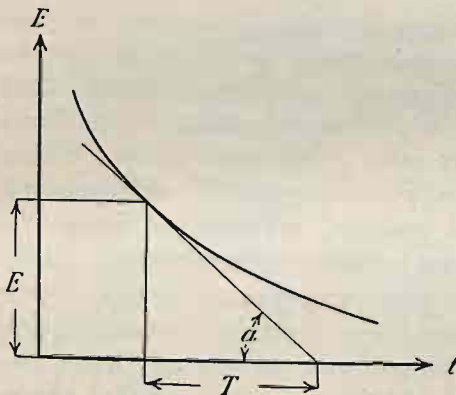
Jeżeli kondensator naładuje się następnie przy tej samej SEM w czasie  $t_3$  (przeł. 1) i załączy na opór  $X$  (przeł. 3), a po czasie  $t_4$  wyładuje (przeł. 2,  $\ell$  zamkn.), to można w podobny sposób jak poprzednio pomierzyć opór drogi wyładowania  $R_2$ , który będzie wtedy oporem zastępczym z  $X$  i  $R_1$ :

$$R_2 = \frac{X \cdot R_1}{X + R_1} = \frac{t_4 - t_3}{C \log_n \left( \frac{\alpha_3}{\alpha_4} \right)}, \quad \text{z tego}$$



$$X = \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2}$$

Przy tym pomiarze lepiej jest używać elektrometrów zamiast galwanometrów do wyznaczenia każdorazowego potencjału kondensatora, gdyż wtedy nie trzeba kondensatora wyładowywać, lecz można w każdej chwili odczytywać wartości potencjału. Można wtedy również łatwiej wyznaczyć całą krzywą wyładowania odnosząc (rys. 20.) różnice potencjałów  $E$



Rys. 20.

w funkcji czasu  $t$ ; jest to krzywa logarytmiczna, której  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{dE}{dt}$ ; ponieważ poprzednio było, że

$$\frac{E}{R} = C \frac{dE}{dt}, \text{ przeto}$$

$$\frac{E}{R} = C \operatorname{tg} \alpha = C \frac{E}{T}$$

$$R = \frac{T}{C},$$

gdzie  $T$  jest to podstyczna.

Ten sposób wyznaczania  $R$  stosuje się wtedy,

gdy chodzi o uwzględnienie wpływu temperatury na opór izolacji, który jest od niej zależny, wtedy nie można całkować równania  $\frac{E}{R} = -C \frac{dE}{dt}$ , przyjmując że  $R$  jest stałe, jak to zrobiono powyżej.

Powyższa metoda należy do metod o dwu zmiennych niejednoczesnych; obie te zmienne  $R_1$  i  $R_2$  mierzy się oddzielnie i wyznacza naprzód ich błędy, a potem błąd  $\Delta X'$  ze względu na  $R_1$ , zakładając, że  $R_2$  jest stałe, podobnie  $\Delta X''$  ze względu na  $R_2$ , zakładając że  $R_1$  jest stałe. Błąd wyniku będzie

$$\Delta X = \sqrt{(\Delta X')^2 + (\Delta X'')^2}.$$

Przy zastosowaniu tej metody do pomiaru oporu izolacji kabla, występują bardzo znaczne błędy stałe, mające swe źródło w tem, że opór izolacji zależy od temperatury i od przyłożonego napięcia; te dwa czynniki a zwłaszcza ostatni różnią się bardzo przy pomiarach i przy normalnym ruchu. Z tego

powodu dokładność pomiaru jest mała i błąd graniczny można przyjąć na 2<sup>o</sup>/<sub>o</sub>.

Protokół pomiaru dla  $R_1$  (dla  $R_2$  podobnie):

L. p.	$C$	$t_1$	$\alpha_1$	$t_2$	$\alpha_2$	$R_1$	$R_{1, sr}$	$\Delta R_1$	$(\Delta R_1)^2$

## D. Opory cieczy.

Przy pomiarze oporu cieczy natrafia się na trudność tego rodzaju, że każde przepuszczanie prądu przez jakiś roztwór powoduje elektrolizę, co pociąga za sobą wytworzenie *SEM* polaryzacji, działającej przeciw przyłożonej *SEM*; to działanie objawia się więc na zewnątrz jako zwiększenie oporu. Wobec tego opór cieczy mierzony za pomocą sposobów, odnoszących się do pomiaru oporów ciał stałych, wypada za duży. To dotyczy prądu stałego. Przy prądzie przemiennym następuje wprawdzie polaryzacja przy przepływności prądu w jednym kierunku, ale natychmiast przy zmianie kierunku prądu występuje *SEM* polaryzacji skierowana przeciwnie, która niweczy tamtą, tak że — przy wielkiej częstości okresów prądu przemiennego — można uważać, że tej *SEM* niema. Sposoby posługujące się więc przy pomiarach oporu cieczy prądem przemiennym są dokładniejsze niż przy prądzie stałym.

Pomiary oporów cieczy zachodzą głównie przy wyznaczeniu oporu właściwego cieczy.

### 1. Pomiar prądem stałym.

Ciecz umieszczona jest w naczyniu (*rys. 21.*) o podstawie metalowej, stanowiącej jedną elektrodę, drugą elektrodą (anodą) jest płytka, którą można dowolnie zanurzać w naczyniu. Ciecz wstawiona jest w obwód prądu płynącego ze źródła *SEM E* o oporze  $\rho$ , przez galwanometr  $G$  i opornicę zatyczkową  $R$ . Przy położeniu  $a$  płytki będzie, jeżeli *SEM* polaryzacji jest  $e$

$$E - e = i(X_1 + R_1 + G + \rho).$$

Przy położeniu  $b$  opór cieczy wzrośnie do wartości  $X_2$ ; aby otrzymać ten sam prąd  $i$ , reguluje się opór  $R$  tak długo, aż wychylenie galwanometru będzie to samo (przy  $R_2$ ), wtedy

$$E - e = i(X_2 + R_2 + G + \rho)$$

z tych obu równań

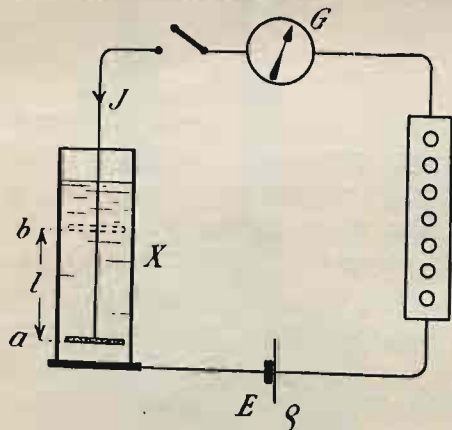
$$X = X_2 - X_1 = R_2 - R_1.$$

Widać stąd, że przez podwójną obserwację można usunąć wpływ *SEM* polaryzacji. Ponieważ opór cieczy bardzo się zmienia z temperaturą, należy utrzymywać podczas pomiaru temperaturę jednostajną (termostaty).

Zamiast metody odchyłowej można tu zastosować metodę zerową, n. p. mostek Wheatstone'a. Lepiej jest jednak używać metody zerowej przy prądzie przemiennym.

## 2. Pomiar prądem przemiennym.

Ten sposób podany jest przez Kohlrauscha, który użył tu swego mostku (p. str. 27), przyczem jako źródło *SEM* służyła cewka wtórna induktora, dająca prąd o znacznej częstotliwości, a zamiast galwanometru, który nadaje się tylko do prądu stałego, telefon.

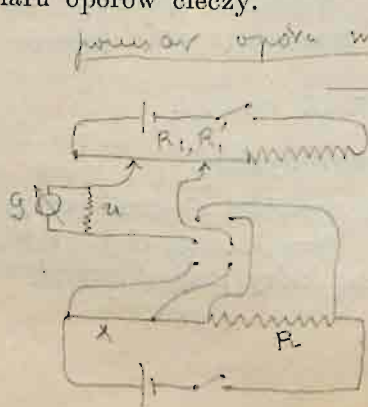


Rys. 21.

Opory stanowiące czworobok muszą być nieindukcyjne. Jeżeli przez telefon przepływa prąd przemienny lub przerywany, to daje się słyszeć szmer; jeżeli szmer ustanie, znaczy to, że układ jest w równowadze.

Inne uwagi podane do mostku Kohlrauscha, można odnieść i tutaj.

Podobnie można użyć i innych metod mostkowych do pomiaru oporów cieczy.



*pomiar oporu met. kompensacji:*

*met. zerowa*

*prąd przemienny*

$$X = R \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

*najlepsze warunki*

*prąd przemienny*

*kompenzacja*

*na drucie*

*R<sub>1</sub> : R<sub>2</sub>*

## II.

### Pomiary natężenia prądu.

Pomiary natężenia prądu sprowadzają się prawie wyłącznie do mierzenia skutków, jakie wywołuje prąd elektryczny. Te skutki mogą być:

elektrolityczne,  
elektromagnetyczne,  
elektrodynamiczne i  
elektrokaloryczne.

Na zasadzie tych różnorodnych działań prądu elektrycznego, są zbudowane odpowiednie przyrządy, za pomocą których mierzy się to działanie, będące zawsze w pewnym stałym stosunku do natężenia prądu. Ten stosunek nazywa się stałą przyrządu. Znając więc stałą przyrządu i znając wynik działania prądu — zwykle przez odczytywanie podziałki (prócz elektrolitycznych) — można oznaczyć wprost wielkość natężenia prądu.

Wobec tego o właściwych metodach pomiarów nie można tu mówić, lecz tylko o sposobach mierzenia prądu i o sposobach wyznaczania stałych przyrządów mierniczych.

Opisywanie sposobów mierzenia sprowadza się właściwie do opisu działania i teorii przyrządów mierniczych, co wykroczyłoby poza ramy niniejszego podręcznika; podane są tutaj tylko niektóre opisy, stosowane przeważnie przy pomiarach laboratoryjnych.

Wyznaczanie stałych p. *Część II., rozdz. 1.*

#### 1. Przyrządy elektrolityczne.

Pomiary prądu za pomocą przyrządów elektrolitycznych, opierają się na prawie Faradaya, według którego ciężar  $P$  strąconego metalu w roztworze, przez który prąd  $J$  przepływa,



jest proporcjonalny do tego prądu, do czasu  $t$  trwania elektrolizy i t. zw. elektrochemicznego równoważnika  $k$ .

$$P = kJt \text{ mg.},$$

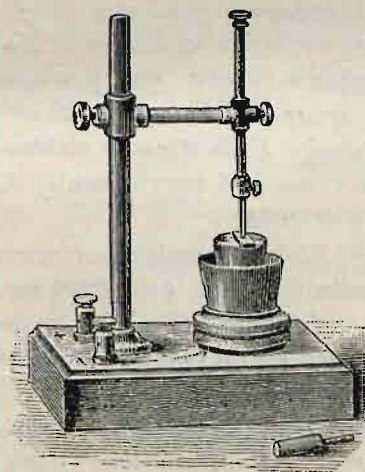
gdzie  $J$  jest w amp.,  $t$  w sek., a  $k$  w miligramach; stąd

$$J = \frac{P}{kt}$$

Przyrządy na tej zasadzie zbudowane nazywają się woltametrami.

#### a) Woltametr srebrowy (rys. 22.).

Pomiar odbywa się przez ważenie strąconego srebra na katodzie platynowej w czasie przynajmniej 30 min. Katoda ma kształt tygielka, anodą jest pałeczka srebrna, elektrolitem roztwór azotanu srebra ( $AgNO_3$ ) w wodzie destylowanej, pozbawionej chlorku (15—20 części azotanu na 100 części wody; ciężar gatunkowy wynosi wtedy 1,12—1,26). Przed pomiarem należy obmyć katodę kwasem azotowym, a później wodą destylowaną, następnie zaś dobrze wysuszyć i zważyć. — Prąd przechodzący przez elektrolit nie powinien przekraczać  $\frac{1}{50}$  amp. na  $cm^2$  katody, a  $\frac{1}{5}$  amp/ $cm^2$  anody. Silniejszy prąd powoduje osadzanie się srebra w formie kryształków, które łatwo mogą odpaść od katody.



Rys. 22.

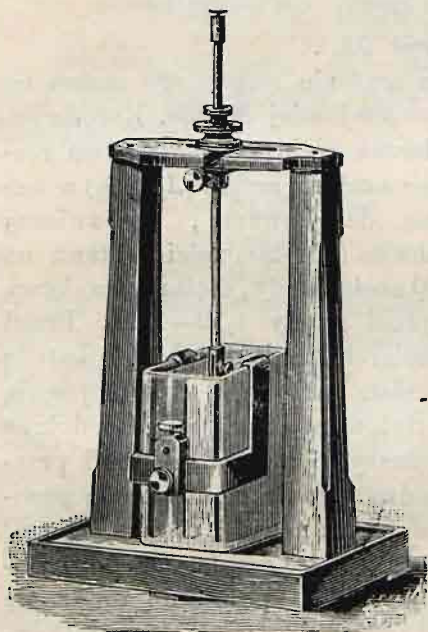
Celem uchronienia się od odpadających cząsteczek srebra od anody, owija się ją papierem do filtrowania lub podstawią pod nią miseczkę szklaną. Prąd powinien być podczas pomiaru stały, co bada się galwanometrem włączonym (w upuście) w obwód prądu. — Po odpowiednim czasie przerywa się prąd, wylewa elektrolit, myje się tygielkę zimną wodą destylowaną, wolną od chlorku (aż woda nie maści się przez dodanie kropli kwasu solnego), następnie taką samą gorącą (70—90°C) i suszy się w powietrzu gorącym. Po ochłodzeniu waży się ją na czulej wadze; różnica między ciężarem poprzednim daje ciężar strąconego srebra.

Elektrochemiczny równoważnik srebra  $k = 1,118 \text{ mg.}$

Voltametr srebrowego używa się do małych prądów, zwłaszcza przy cechowaniu przyrządów mierniczych precyzyjnych. Za pomocą niego można pomierzyć prąd 1 amp z dokładnością do 0,08%.

**b) Voltametr miedziowy (rys. 23.).**

Katodą są zwykle dwie płytki miedziane lub platynowe, anodą płytka miedziana, elektrolitem jest roztwór siarczanu miedzi  $CuSO_4$  o ciężarze gat. 1,1 (10 gr. kryst. siarczanu w  $50\text{ cm}^3$  wody). Przyrost ciężaru mierzy się na katodzie, obmytej wodą destylowaną, wysuszonej papierem do filtrowania i w eksikatorze. Natężenie prądu nie powinno przekraczać 1 amp na  $25\text{ cm}^2$  katody. Czas trwania elektrolizy ma być przynajmniej 30 do 60 min.



Rys. 23.

Elektrochemiczny równoważnik miedzi  $k = 0,3294\text{ mg}$ .

Voltametr miedziowego używa się do pomiaru prądów większych, zwłaszcza przy cechowaniu przyrządów mierniczych technicznych, gdzie można się zadowolić mniejszą dokładnością; sam proces zaś jest tańszy. Za pomocą niego można pomierzyć prąd 1 amp z dokładnością do 0,1—0,3%.

Bliższe szczegóły o voltametrach p. Kohlrausch op. cit.

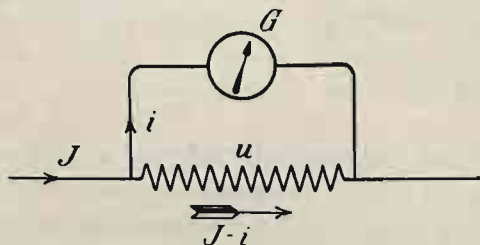
## 2. Przyrządy elektromagnetyczne.

Najbardziej używane są galwanometry o stałym magnesie, a ruchomej cewce. Używa się ich głównie przy pomiarach precyzyjnych bardzo małych prądów. Wtedy ich odchylenie  $\alpha$  jest miarą prądu  $i$  przepływającego przez galwanometr,

$$i = C\alpha,$$

gdzie  $C$  jest to stała galwanometru.

O ile się rozchodzi o pomiar prądu silniejszego, niżby go mógł znieść galwanometr, można rozszerzyć granice używalności galwanometru przez zastosowanie upustu, t. j. załączenia galwanometru



Rys. 24.

plynie tylko bardzo słaby prąd  $i$ . Wtedy

$$\frac{i}{J-i} = \frac{u}{G} \quad \text{z tego}$$

$$i = J \frac{u}{u+G} = ca \quad a$$

$$J = i \frac{u+G}{u} = c \frac{u+G}{u} a = c'a.$$

Przez dodanie upustu zwiększyła się stała — ze względu na  $J$  — z wartości  $c$  na  $c \frac{u+G}{u}$ .

Ażeby upustem można się było łatwo posługiwać, robi się go zawsze w pewnym stosunku do  $G$ , tak aby  $i$  było  $= 0,1, 0,01, 0,001 \dots J$ , to zn. że musi być wtedy  $u = \frac{1}{9}G, \frac{1}{99}G, \frac{1}{999}G, \dots G$ .

Na tej zasadzie są zbudowane prawie wszystkie techniczne amperometry.

Stosunek oporu upustu  $u$  do oporu galwanometru  $G$  powinien być zawsze stały; z tego powodu najlepiej jest, jeżeli są one z jednego metalu i ustawione w pobliżu siebie, gdyż wtedy podlegają jednakowym wpływom temperatury. Z tego też powodu ogrzanie upustu prądem nie powinno być duże.

### 3. Przyrządy elektrodynamiczne.

Z przyrządów polegających na zasadzie działania dwóch prądów na siebie czyli elektrodynamometrów, nadaje się do precyzyjnego pomiaru prądu tylko

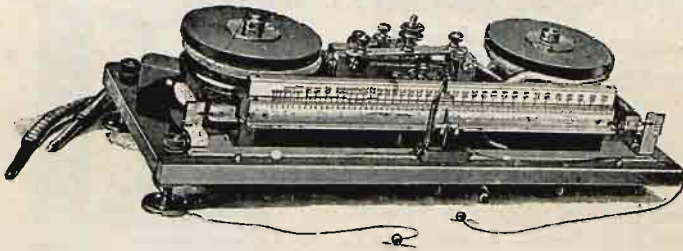
#### Waga Thomsona.

Waga Thomsona polega na zasadzie działania dwóch cewek, z których jedna jest stała, a druga ruchoma, wykonana



w formie belki wagowej. Przez przepływanie prądów przez obie cewki następuje przyciąganie cewki ruchomej przez stałą, a więc zburzenie równowagi, którą się następnie przywraca przez nakładanie i przesuwanie ciężarków na belce ruchomej. Zamiast dwóch cewek mogą być dwa systemy cewek ruchomych i stałych.

Na *rys. 25.* przedstawiona jest waga Thomsona w wykonaniu firmy Kelvin & James White w Glasgowie, która głównie wyrabia tego rodzaju wagi. Układ połączeń tej wagi pokazuje *rys. 26.* Składa się ona z 6 cewek, z których 4 są stałe i leżą po 2 nad sobą, a między nimi znajdują się 2 cewki



Rys. 25.

ruchome, tak że jedna para cewek stałych działa na jedną cewkę ruchomą, a druga para na drugą; te działania mogą być niezależne od siebie, a wyzyskane są do rozszerzenia granic używalności wagi. Cewki ruchome są połączone tak, że prąd przepływa przez nie w kierunkach przeciwnych, przez co niweczy się wpływ obcych pól magnetycznych. Na cewce ruchomej znajduje się skala podzielona linijnie, na drugiej skala podzielona kwadratowo.

Siła z jaką obie cewki działają na siebie jest proporcjonalna do iloczynu z prądów przepływających przez cewki. Działanie tej siły równoważy się przez przesuwanie ciężarków wzdłuż cewki ruchomej, przyczem należy na końcu jednej cewki ruchomej umieścić odpowiedni przeciwcieżarek.

Do pomiaru wielkich prądów używa się cewek *a* i *b*; przez *a* przepuszcza się prąd mierzony *J*, załączony do końcówek *I* i *II*, a przez *b* prąd pomocniczy *i* o stałym natężeniu (zwykle  $i=0,25$  A), załączony do końcówek *III* i *IV*. Przełącznik stoi na *W*. Jeżeli moment skręcający wywarty przez cewki zostanie zrównoważony przez przesunięcie ciężarka *P*



(oznaczonego przez  $WW$ ) na długości  $l'$ , to warunek równowagi będzie

$$Pl' = cJi,$$

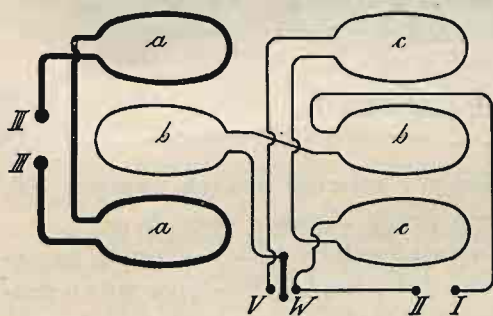
stąd

$$J = \frac{Pl'}{ci} = c_1 l,$$

gdzie  $c$  jest to stała elektrodynamometru,  $c_1$  stała ciężarka, a  $l$  przesunięcie ciężarka o  $l$  podziałek, odczytanych na skali ruchomej.

Prąd pomocniczy  $i$  bierze się z baterji akumulatorów przy mierzeniu prądu stałego, a z tego samego źródła przy prądzie przemiennym.

Do pomiaru małych prądów używa się cewek  $b$  i  $c$ , przez które puszcza się ten sam prąd mierzony  $J$ , załączając go do końcówek  $I$  i  $II$  przy położeniu przełącznika na  $V$ . Postępowanie jest podobne jak



Rys. 26.

poprzednio, tylko używa się ciężarków  $VW$ , a odczytuje na skali stałej. Jeżeli jest równowaga, to

$$Pl' = cJ^2,$$

$$\text{stąd } J = \sqrt{\frac{Pl'}{c}} = c_2 l,$$

gdzie  $c_2$  jest to stała ciężarka.

Wspomniana firma wykonuje wagi w 5 wielkościach do pomiaru centi-, deci-, deka-, hekto- i kiloamperów, w granicach od 0,25 do 2500  $A$ .

Wag, za pomocą których można mierzyć z dokładnością do 0,1%, używa się głównie do cechowania ampermetrów do prądu przemiennego; zauważyć jednak należy, że w ostatnich czasach wyrób ampermetrów elektrodynamicznych tak dalece postąpił, że coraz więcej wchodzi one w użycie jako przyrządy precyzyjne.

Wag można używać także do pomiaru sił elektromotorycznych i mocy.

Przyrządy elektrokaloryczne są mniej dokładne od poprzednich; używa się ich tylko jako przyrządów technicznych, wskazujących wprost mierzoną wielkość.