III.

Pomiary siły elektromotorycznej.

— Pomiar siły elektromotorycznej E na krańcach jakiegoś źródła *SEM*, odróżnić należy od pomiaru napięcia V, panującego na tych krańcach, w razie gdy są połączone oporem R, tak że przez źródło *SEM* — o oporze wewnętrznym ϱ — przepływa prąd J. Wtedy

$$E = JR + J\varrho = V + J\varrho.$$

Widać stąd, że:

a) napięcie można mierzyć, mierząc spadek napięcia JR, spowodowany przepływaniem prądu J przez opór R, i

b) do pomiaru *SEM* wystarczyłoby znać — prócz napięcia V, panującego w danej chwili na krańcach — opór wewnętrzny ϱ źródła prądu i sam prąd J, który przez nie przepływa.

Na zasadzie a) zbudowane są woltmetry, za pomocą których mierzymy prąd — mały — przepływający przez znany — bardzo duży — opór, czyli spadek napięcia na tym oporze, a więc i na całym oporze zewnętrznym, załączonym między tymi samymi krańcami co woltmetr (metody pośrednie).

Zasady b) nie można używać do dokładnych pomiarów *SEM*, gdyż skutkiem przepływania prądu przez źródło *SEM* występują, prócz spadku napięcia, także inne zjawiska uboczne (n. p. elektroliza i polaryzacya w ogniwach, oddziaływanie twornika w maszynach i t. p.). W tym wypadku należy zastosować metody takie, przy których prąd nie przepływa przez źródło *SEM*; są to metody elektrometryczne i kompenzacyjne, przy których porównuje się badaną *SEM* ze znaną, normalną (metody bezpośrednie). Źródłem *SEM* normalnej są t. zw. ogniwa normalne, dające zawsze stałą *SEM*, ale tylko przy bardzo małym prądzie; ogniw normalnych nie powinno się używać bez oporu dodatkowego, mniejszego niż 100000 Ω).

W praktyce zadowolić się często można pomiarami pośrednimi, jeżeli tylko prąd przepływający przez źródło *SEM* jest dostatecznie mały, aby można go było nie uwzględnić; robi się to za pomocą voltmetrów o bardzo dużym oporze, załączonych na krańcach źródła; wtedy

$$V = JR = E - J\varrho,$$

gdzie V jest to wskazanie voltmetru, jeżeli $J\varrho$ jest bardzo małe, to można je opuścić i

$$V = E.$$

Normalne ogniwo Westona (międzynarodowe) ma *SEM* w dużych granicach (0—40° C) prawie niezależną od temperatury i wynoszącą 1,0184—0,0000406 (t—20°) V.

Ogniwo Clarka jest więcej zależne od temperatury, jego *SEM* wynosi przy temperaturach 0—30° 1,4292—0,00123 (t—18°) V. Ogniwo to jest również bardziej polaryzacyjne niż Westona; przy prądach mniejszych niż $0{,}5 . 10^{-6}$ amp. można uważać, że polaryzacya nie występuje.

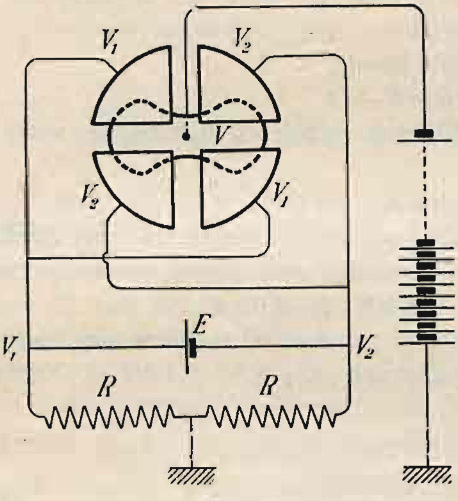
SEM ogniw normalnych można przyjąć z dokładnością do 0,01% w granicach podanych temperatur, przyczem jednak trzeba przy ogniwie Clarka pomierzyć temperaturę z dokładnością do 0,1°. Bez uwzględnienia temperatury można przyjąć przy wyznaczaniu błędu granicznego 0,05%, jako dokładność ogniw.

1. Elektrometr.

Elektrometry, używane w praktyce, polegają głównie na zasadzie elektrometru kwadrantowego Thomsona, składającego się z 4 kwadrantów metalowych, zupełnie równych, dobrze od siebie izolowanych, z których po 2 przeciwległe są ze sobą połączone; między kwadrantami wisi igła aluminiowa z lusterkiem. Całość jest osłonięta płaszczem metalowym uziemionym, aby zniweczyć działania elektrostatyczne i elektromagnetyczne ciał obcych.

a) Połączenie kwadrantowe. (Pomiar małych *SEM*).

Jedną parę kwadrantów łączymy *(rys. 27.)* z jednym biegunem ogniwa, którego *SEM* mamy oznaczyć, drugą z drugim; igłę łączymy z bateryą ogniw lub akumulatorów (100 i więcej voltów), której drugi koniec jest uziemiony. Równolegle do ogniwa załącza się duży opór RR w środku uziemiony. Przed pomiarem należy odprowadzić wszystkie możliwe ładunki do ziemi, a igiełkę nastawić symetrycznie do obu par kwadrantów. Wtedy ten układ przedstawia nam 2 kondenzatory, utworzone przez igłę i jedną parę kwadrantów z jednej strony, a igłę i drugą parę z drugiej strony; pojemność obu kondenzatorów będzie równa C. Jeżeli załączymy bateryę i ogniwo, to kondenzatory dostaną ładunki



Rys. 27.

$$Q_1 = C(V - V_1)$$

i

$$Q_2 = C(V - V_2).$$

Skutkiem tych ładunków powstaną momenty skręcające przeciwne, proporcyonalne do różnicy potencyałów, a igła przesunie się w stronę tej pary kwadrantów, z którą wykazuje większą różnicę potencyałów, a więc w stronę potencyału mniejszego.

Momenty będą więc:

$$M_1 = c(V - V_1)^2 \text{ i } M_2 = c(V - V_2)^2,$$

gdzie c jest to stała zawierająca w sobie pojemność, którą można przyjąć za stałą, jeżeli przesunięcie jest małe, siłę przeciwdziałającą skręceniu nitki itp.; a moment wypadkowy

$$M = c(V - V_1)^2 - c(V - V_2)^2,$$

czyli

$$c(2V - V_1 - V_2)(-V_1 + V_2),$$

albo

$$M = c(V_2 - V_1)\left(V - \frac{V_1 + V_2}{2}\right) = \alpha,$$

gdzie α jest to wychylenie się igły, odczytane na podziałce za pomocą lusterka.

Ponieważ potencyały V_1 i V_2 są równe i przeciwne, $V_1 = -V_2$ — przez połączenie ich oporem R uziemionym w środku — będzie:

$$\alpha = 2cVV_1 = 2cVV_2.$$

Jeżeli V_1 i V_2 są bardzo małe wobec V, to

$$\alpha = cV(V_2 - V_1) = cVE,$$

odchylenie igły jest więc proporcyonalne do różnicy potencyałów, czyli do *SEM* $E = V_2 - V_1$.

Jeżeli więc dla *SEM* E_n ogniwa normalnego otrzymano odchylenie $\alpha_n = cVE_n$,

a dla *SEM* E ogniwa badanego przy tych samych warunkach

$$\alpha = cVE,$$

to $$E = E_n \frac{\alpha}{\alpha_n}.$$

Warunki pomiaru zostaną te same, jeżeli małą *SEM* połączy się z igłą i ziemią, a dużą baterye — o parzystej liczbie ogniw — załączy się na oba kwadranty i jej środek uziemi; wtedy opory R mogą odpaść, lepiej jednak je zatrzymać dla pewności, aby potencyały były równe lecz przeciwne.

Powyższa metoda posiada 3 zmienne, z których E_n zwykle jest stałe, a α i α_n są spostrzegane niejednocześnie.

Błąd graniczny wyznacza się według:

$$\frac{\Delta_g E}{E} = \frac{\Delta_g E_n}{E_n} + \frac{\Delta_g \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta_g \alpha_n}{\alpha_n},$$

gdzie $\Delta_g E_n$ przyjmuje się przy ogniwach normalnych 0,05%, a $\Delta_g \alpha$ i $\Delta_g \alpha_n$ 0,25—0,5 podziałki.

Protokół pomiaru dla α:

L. p.	α	$\alpha_{śr}$	$\Delta\alpha$	$(\Delta\alpha)^2$

Podobnie dla α_n.

Wynik oblicza się ze średnich wartości α i α_n, a błąd wyniku badając wpływ błędów $\Delta\alpha$ i $\Delta\alpha_n$ na E, t. j. wyznaczając błędy $\Delta E'$ i $\Delta E''$, wtedy błąd wyniku będzie

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

O ile nie chodzi o wyznaczenie poszczególnych błędów $\Delta\alpha$ i $\Delta\alpha_n$ i ich wpływu na wynik pomiaru, to można każdorazowe wartości α i α_n wstawić do wzoru na E i w ten sposób otrzymać szereg pomiarów wielkości E, z których bierze się średnią i oblicza średni błąd. Wtedy będzie protokół pomiaru:

L. p.	E_n	α	α_n	E	$E_{śr}$	ΔE	$(\Delta E)^2$

Najlepiej jest zastosować wtedy przełącznik do E i E_n i spostrzegać naprzemian α i α_n.

b) Połączenie podwójne. (Pomiar wielkich *SEM*).

Igłę łączy się *(rys. 28.)* z jedną parą kwadrantów, n. p. o potencyale V_2, a jeden koniec bateryi, o potencyale przeciwnym niż igła n. p. V_1, uziemia się.

Wtedy we wzorach poprzednich $V = V_2$, czyli

$$\alpha = c(V_2 - V_1)^2 = cE^2.$$

Jeżeli więc dla ogniwa normalnego

$$\alpha_n = cE^2_n,$$

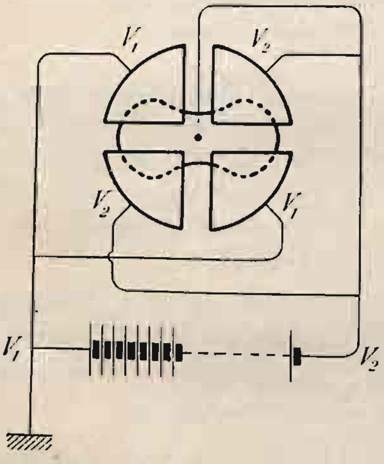
a dla badanego

$$\alpha = kE^2,$$

to

$$E = E_n \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha_n}}.$$

Ponieważ różnica potencyałów przychodzi tu w kwadracie, przeto α jest niezależne od znaku; tego sposobu używa się więc przy pomiarach *SEM* prądu przemiennego, wtedy E przedstawia skuteczną wartość *SEM*.



Rys. 28.

Typ metody jest ten sam co poprzedni.

Błąd graniczny wyznacza się według:

$$\frac{\Delta_g E}{E} = \frac{\Delta_g E_n}{E_n} + \frac{\Delta_g \alpha}{2\alpha} + \frac{\Delta_g \alpha_n}{2\alpha_n},$$

jak poprzednio.

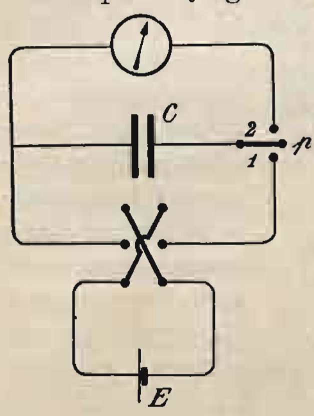
W obu wypadkach najlepszy warunek pomiaru jest przy największych odchyleniach α i α_n.

Przy wszystkich pomiarach elektrometrem należy uważać, aby przy rozpoczęciu pomiaru elektrometr był zupełnie wyładowany i dobrze uziemiony, a igła wisiała symetrycznie do kwadrantów i w równej od nich odległości. Wprawdzie przez przesunięcie pionowe igły czułość jej się zwiększa, ale za to gdy znajduje się w pośrodku, nie mają wpływu możliwe nierówności i zagięcia igły. Ustawienie elektrometru polega na tem, że najpierw sprowadza się obie pary kwadrantów i igłę do potencyału zero, a potem ładuje się tylko igłę do wielkiego potencyału; w obu wypadkach musi igła znajdować się w położeniu zerowem. Osiąga się to przez przesuwanie igły w górę lub w dół, lub przez skręcanie nitki, na której wisi igła.

Elektrometr jest to przyrząd mało czuły z powodu małego natężenia sił elektrostatycznych; z tego powodu błąd graniczny odchyleń można założyć dość znaczny, chociażby się z wszelką dokładnością odczytywało. Elektrometru używa się głównie do pomiaru dużych sił elektromotorycznych, do których nie nadają się następne, dokładniejsze metody.

2. Metoda porównawcza.

Ten sposób polega na porównywaniu ładunków kondenzatora, naładowanego raz za pomocą ogniwa normalnego, drugi raz za pomocą ogniwa badanego.



Rys. 29.

Kondenzator C *(rys. 29.)* ładuje się za pomocą ogniwa E (położenie przełącznika na 1) i wyładowuje się go (przełącznik na 2) przez galwanometr balistyczny (por. część II. rodz. 1.), wtedy

$$Q = E\,C = c_b \alpha_1 \left(1 + \frac{\Lambda}{2}\right),$$

gdzie c_b = stała balistyczna.

To samo robi się z ogniwem normalnem, wtedy

$$Q_n = E_n C = c_b \alpha_{n_1} \left(1 + \frac{\Lambda}{2}\right), \text{ z tego } E = E_n \frac{\alpha_1}{\alpha_{n_1}}.$$

Dobrze jest ładować kondenzator w obu kierunkach, przyczem trzeba z obu przełącznikami tak postępować, aby kondenzator nie wyładował się przez kołyskę. Czas ładowania powinien być przy obu ogniwach ten sam, aby dielektryk mógł pochłonąć odpowiednie ładunki.

Ponieważ przy tej metodzie ogniwo nie daje prądu, stosuje się ją przy ogniwach silnie polaryzujących.

Powyższa metoda posiada 3 zmienne, z których E_n jest zwykle stałe, a α_1 i α_{n_1} spostrzega się niejednocześnie.

Pomiar będzie najdokładniejszy, jeżeli α_1 i α_{n_1} będą największe; do tego można się zbliżyć przez odpowiedni dobór pojemności kondenzatora.

Błąd graniczny wyznacza się według

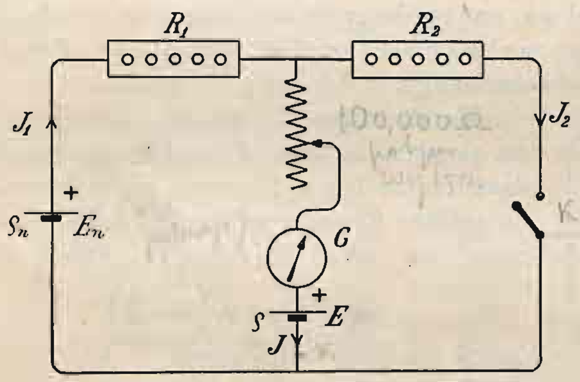
$$\frac{\Delta_g E}{E} = \frac{\Delta_g E_n}{E_n} + \frac{\Delta_g \alpha_1}{\alpha_1} + \frac{\Delta_g \alpha_{n1}}{\alpha_{n1}},$$

gdzie $\Delta_g E_n$ przyjmuje się 0,05% (jeżeli to jest ogniwo normalne), a $\Delta_g \alpha_1$ i $\Delta_g \alpha_{n1}$ 0,25 podziałki.

Obliczenie wyniku, wyznaczanie błędów średnich i protokoły pomiaru są te same, co przy pomiarze *SEM* za pomocą elektrometru (p. str. 55).

3. Metoda Poggendorffa.

Jest to t. zw. metoda kompenzacyjna — podana po raz pierwszy przez Poggendorffa (1841) — polegająca na tem, że badane źródło *SEM* załącza się przeciw drugiemu o znanej *SEM* tak, że prądu nie może wydawać; wtedy działanie jego się znosi, kompenzuje. Stan równowagi kompenzacyjnej bada się galwanometrem, przez który wtedy prąd nie płynie; jest to więc metoda zerowa, dająca tu takie same dogodności, jak przy pomiarach oporów.



Rys. 30.

Dwa ogniwa E i E_n o oporach wewnętrznych ϱ i ϱ_n, łączy się z dwiema opornicami zatyczkowemi R_1 i R_2 i galwanometrem G według podanego układu *(rys. 30.)*.

Wtedy według prawa Kirchhoffa:

$$E_n = J_1(R_1 + \varrho_n) + J_2 R_2$$
$$E = J_2 R_2 - J(G + \varrho).$$

Po podstawieniu $J_1 = J + J_2$ i po podzieleniu E_n przez E otrzymamy

$$\frac{E_n}{E} = \frac{J_2(R_1 + R_2 + \varrho_n) + J(R_1 + \varrho_n)}{J_2 R_2 - J(G + \varrho)}.$$

Przez odpowiedni dobór oporów R_1 i R_2 kompenzujemy ogniwo E, wtedy $J=0$ czyli galwanometr musi stać na zerze,

a
$$\frac{E_n}{E}=\frac{R_1+R_2+\varrho_n}{R_2};$$
jest to warunek równowagi kompenzacyjnej. Ażeby ten warunek był spełniony musi być $E_n > E$. Jeżeli E_n znane, to
$$E=E_n\frac{R_2}{R_1+R_2+\varrho_n}.$$

Można również skompenzować *SEM* E_n; wtedy galwanometr wstawia się w gałąź E_n, a w gałąź E opornicę zatyczkową n. p. R. Łatwo się przekonać, że wtedy warunek równowagi będzie
$$\frac{E_n}{E}=\frac{R_2}{R+R_2+\varrho};$$
aby tak było, musi $E > E_n$. Zależnie więc od wielkości porównywanych *SEM* używa się jednego lub drugiego połączenia. Kierować tu należy się tem, że z jednej strony z ogniwa nie wolno brać za dużego prądu, a z drugiej, że ogniwo badane, mające znaczną polaryzacyę, daje błędne wyniki.

Metoda Poggendorffa należy do metod o 3 zmiennych, z których E_n jest zwykle stałe, a R_1 i R_2 spostrzega się jednocześnie.

Do wyznaczenia najlepszych warunków pomiaru szukamy pochodnej z $\frac{E}{E_n}$ zakładając np. $R_1=\text{const.}$ i $\varrho_n=\text{const.}$
$$\frac{E}{E_n}=\frac{R_2}{R_1+R_2+\varrho_n}$$
$$d\left(\frac{E}{E_n}\right)=\frac{(R_1+\varrho_n)dR_2}{(R_1+R_2+\varrho_n)^2}$$
a
$$\frac{d\left(\frac{E}{E_n}\right)}{\frac{E}{E_n}}=\frac{(R_1+\varrho_n)}{R_1+R_2+\varrho_n}\,\frac{dR_2}{R_2}.$$

Ta wartość będzie minimum, jeżeli R_1 i R_2 będą największe, t. zn. że opory R_1 i R_2 trzeba obierać możliwie największe; wtedy ϱ_n jako bardzo małe można opuścić.

W razie gdy ogniwo E jest skłonne do polaryzacyi, trzeba włączyć przed nie duży opór, który się powoli wyłącza, aż układ znajdzie się w równowadze; wtedy trzeba chwilę poczekać aż ogniwo orzeźwi się i na nowo zbadać równowagę.

R_2 małe ; $\frac{E}{E} = 1$.

Błąd graniczny będzie sumą poszczególnych błędów granicznych cząstkowych, które się otrzymuje zakładając jedne wielkości stałe, a względem drugich różniczkując daną funkcyę.

Jeżeli R_1 i R_2 stałe, to

$$(dE)' = \frac{R_2}{R_1+R_2} dE_n;$$

jeżeli E_n i R_1 stałe, to

$$(dE)'' = E_n \frac{(R_1+R_2)dR_2 - R_2 dR_2}{(R_1+R_2)^2} = E_n \frac{R_1 dR_2}{(R_1+R_2)^2};$$

jeżeli zaś E_n i R_2 stałe, to

$$(dE)''' = -E_n \frac{R_2 dR_1}{(R_1+R_2)^2}.$$

Błędy dR_1 i dR_2 możemy położyć równe, wtedy ostatnie równanie będzie

$$(dE)''' = -E_n \frac{R_2 dR_2}{(R_1+R_2)^2}.$$

Aby otrzymać błąd graniczny dodajemy poszczególne błędy, zakładając, że wszystkie są dodatnie i pisząc w wartościach skończonych

$$\Delta_g E = (\Delta_g E)' + (\Delta_g E)'' + \Delta_g E)'''$$

$$\Delta_g E = \frac{R_2}{R_1+R_2} \Delta_g E_n + E_n \frac{R_1}{(R_1+R_2)^2} \Delta_g R_2 + E_n \frac{R_2}{(R_1+R_2)^2} \Delta_g R_2$$

$$\Delta_g E = \frac{R_2}{R_1+R_2} \Delta_g E_n + \frac{E_n}{R_1+R_2} \Delta_g R_2;$$

błąd graniczny względny otrzymamy przez podzielenie ostatniego równania przez $E = E_n \frac{R_2}{R_1+R_2}$,

$$\frac{\Delta_g E}{E} = \frac{\Delta_g E_n}{E_n'} + \frac{\Delta_g R_2}{R_2} + \frac{\delta E}{E}$$

gdzie $\Delta_g E_n$ przyjmuje się 0,05% (jeżeli to jest ogniwo normalne), a $\Delta_g R_2$ 0,1—0,2%, a $\frac{\delta E}{E}$ jest miarą czułości układu.

Z tego widać również, że aby błąd był najmniejszy, musi być R_2 największe, a co za tem idzie i R_1, gdyż R_1 i R_2 są związane równaniem

$$R_1 = \left(\frac{E_n}{E} - 1\right) R_2.$$

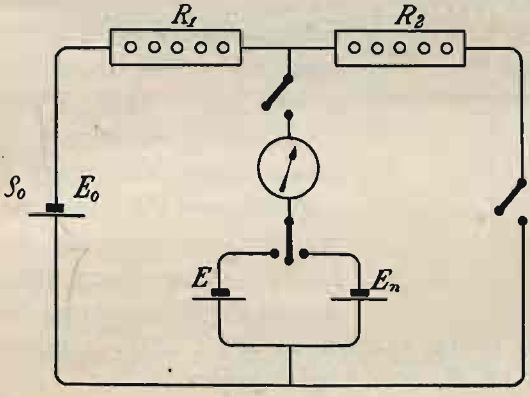
Protokół pomiaru:

L. p.	E_n	R_1	R_2	E	$E_{śr}$	ΔE	$(\Delta E)^2$

Wynik oblicza się z każdorazowych spostrzeżeń E_n, R_1 i R_2 i z kilku pomiarów bierze się $E_{śr}$ i wyznacza średni błąd.

4. Metoda Du Bois-Reymond'a.

Jest to odmiana metody Poggendorffa. Ogniwo badane E i ogniwo normalne E_n kompenzuje się każde z osobna, względem ogniwa pomocniczego E_0 o oporze wewnętrznym ϱ_0, które w tym wypadku musi mieć *SEM* większą niż tamte (najlepiej akumulator).



Rys. 31.

Układ połączeń przedstawia *rys. 31.*

Naprzód kompenzuje się E względem E_0 według metody Poggendorffa. Równowaga układu niech będzie przy oporach R'_1 i R'_2, wtedy

$$E = E_0 \frac{R'_2}{R'_1 + R'_2 + \varrho_0};$$

następnie kompenzuje się E_n względem E_0

$$E_n = E_0 \frac{R_2''}{R''_1 + R_2'' + \varrho_0}.$$

Z tych obu równań otrzymamy

$$\frac{E}{E_n} = \frac{R'_2(R''_1 + R''_2 + \varrho_0)}{R''_2(R'_1 + R'_2 + \varrho_0)}.$$

Jeżeli opory R_1 i R_2 tak dobierzemy, że ogniwo E_0 wydaje ten sam prąd, t. zn. że ich suma będzie w obu wypadkach równa, a tylko ich wzajemny stosunek się zmieni, to

$$R'_1 + R'_2 + \varrho_0 = R''_1 + R''_2 + \varrho_0;$$

stąd

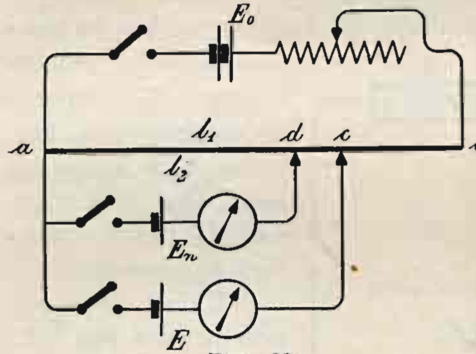
$$\boldsymbol{E = E_n \frac{R'_2}{R''_2}}.$$

Powyższa metoda należy do metod o 3 zmiennych, z których E_n jest zwykle stałe, a R'_2 i R''_2 spostrzega się niejednocześnie.

Błąd graniczny oblicza się według

$$\frac{\Delta_g E}{E} = \frac{\Delta_g E_n}{E_n} + \frac{\Delta_g R'_2}{R'_2} + \frac{\Delta_g R''_2}{R''_2} + \frac{\delta E}{E} + \frac{\delta E_n}{E_n},$$

gdzie $\Delta_g E_n$ można przyjąć (dla ogniwa normalnego) 0,05%, $\Delta_g R_2$ 0,1—0,2%, a δE i δE_n otrzymuje się badając czułość układu raz przy kompenzowaniu E, a drugi raz przy E_n. Jeżeli E i E_n nie wiele się od siebie różnią, to można założyć, że $\Delta_g R'_2$ i $\Delta_g R''_2$ oraz δE i δE_n są równe i wziąć n. p. $2\Delta_g R'_2$ i $2\delta E$.



Rys. 32.

Pomiar uskutecznia się kompenzując kilka razy E i kilka razy E_n i obliczając średnie wartości R'_2 i R''_2, które potem wstawia się do głównego wzoru. Naprzód wyznacza się błędy zmiennych R'_2 i R''_2, a potem wpływ każdego z nich na E, oraz błąd wyniku.

Wtedy protokół pomiaru będzie:

L. p.	R'_2	$R'_{2śr}$	$\Delta R'_2$	$(\Delta R'_2)^2$

Podobnie dla R''_2.

Można także, o ile nie chodzi o wyznaczenie błędów poszczególnych zmiennych i ich wpływu na wynik, spostrzegać naprzemian R'_2 i R''_2 i obliczać odrazu E, a z szeregu wartości E wziąć średnią jako wynik i wyznaczyć średni błąd wyniku, według następującego protokołu:

L. p.	E_n	R'_2	R''_2	E	$E_{śr}$	ΔE	$(\Delta E)^2$

Metoda Du Bois-Reymond'a wymaga wprawdzie podwójnego pomiaru, ale jest pewniejsza niż Poggendorffa, gdyż ogniwo skompenzowane nie polaryzuje się. Jednakowoż jak widać z błędów granicznych, błąd przy tej metodzie jest większy niż przy tamtej.

Na zasadzie powyższej metody polegają kompenzatory, t. j. przyrządy służące do precyzyjnego pomiaru sił elektromotorycznych, cechowania precyzyjnych przyrządów mierniczych i t. p.

5. Metoda Clarka.

Przy tej metodzie porównuje się siły elektromotoryczne z długościami drutu kalibrowanego, zamiast z oporami.

Ogniwo pomocnicze E_0 załącza się *(rys. 32.)* przez opór do regulowania stale na drut mierniczy, a ogniwa E i E_n za pomocą styków ruchomych przez galwanometry. Przy tem musi być $E_0 > E > E_n$. Przez przesuwanie styków kompenzuje się E i E_n względem E_0. Wtedy na podstawie metody poprzedniej

$$E = E_n \frac{l_1}{l_2},$$

jeżeli l_1 jest to długość *ac* a l_2 *ad*.

Sposób postępowania przy pomiarze i obliczaniu błędów i wyniku jest podobny do poprzedniej metody.

IV.

Pomiary indukcyi.

A. Pomiary spółczynnika samoindukcyi.

Pomiar spółczynnika samoindukcyi ($\mathfrak{L}$) jakiejś cewki zależy od warunków, w jakich się dana cewka znajduje.

Jak wiadomo bowiem

$$\mathfrak{L}=\frac{\Phi}{J},$$

gdzie Φ jest to ciek objęty przez cewkę, a J natężenie prądu w cewce. Ponieważ $\Phi=\frac{4\pi\mu n^2 Jq}{l}$, gdzie n jest to liczba zwojów cewki, q jej przekrój, a l jej długość, przeto

$$\mathfrak{L}=\frac{4\pi\mu n^2 q}{l},$$

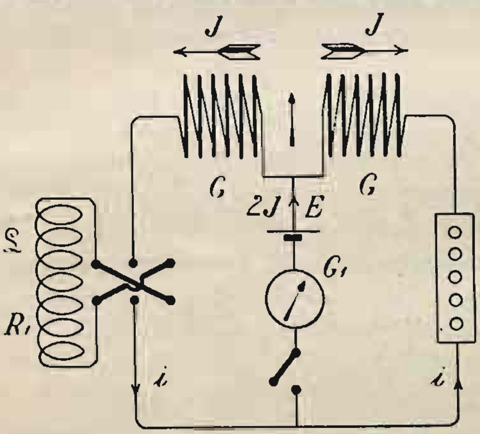
jest więc zależne od przenikliwości μ.

Jeżeli więc to jest cewka bez żelaza, to $\mu=1$ i wtedy jej spółczynnik samoindukcyi jest stały i można go pomierzyć niezależnie od prądu mierniczego. W razie cewki z rdzeniem żelaznym pomiar odbywać się musi wśród warunków, w jakich cewka ma pracować t. j. przy normalnem natężeniu prądu, gdyż spółczynnik samoindukcyi zależny jest w tym wypadku od przenikliwości, a przez to od natężenia pola, a więc i od natężenia prądu wytwarzającego to pole. Można to jednakowoż uskutecznić także przy innym prądzie, ale w takim wypadku należy znać przebieg przenikliwości dla danego żelaza i przerachować znalezioną wartość na normalne natężenie prądu. Robi się tak zwłaszcza przy pomiarach laboratoryjnych, gdzie przyrządy miernicze używane nie znoszą wielkich prądów. Najprostsze w takich wypadkach są sposoby techniczne.

Ponieważ spółczynnik samoindukcyi zależny jest od pola magnetycznego, należy dbać o to, aby przy pomiarze obce pola nie miały wpływu na cewkę. Dobrze jest więc powtórzyć pomiar przy zmienionym kierunku prądu w cewce lub przy obróceniu cewki o 180^0.

1. Metoda balistyczna.

Najlepiej jest użyć g a l w a n o m e t r u b a l i s t y c z n e g o r ó ż n i c o w e g o, który ustawia się jak zwykły (por. str. 28), przyczem przychodzi jeszcze jeden warunek, że samoindukcya obu cewek galwanometru powinna się znosić; sprawdza się to przez załączenie na miejsce $\mathfrak{L}$ (rys. 33.) oporu nieindukcyjnego, wtedy przy otwieraniu i zamykaniu wyłącznika nie powinno się dostać odchylenia skazówki galwanometru.



Rys. 33.

Cewkę, której spółczynnik $\mathfrak{L}$ ma się wyznaczyć, załącza się według układu połączeń (podobnego do *rys. 33.*). Opór porównawczy nieindukcyjny R reguluje się tak długo — przy zamkniętym wyłączniku — aż igiełka galwanometru balistycznego stanie na zerze, wtedy $R_1 = R$, a ogniwo daje prząd $2J$, mierzony przez galwanometr statyczny G_1. Przez otwarcie wyłącznika powstaje skutkiem prądu J *SEM* samoindukcyi

$$E_s = -\mathfrak{L}\frac{dJ}{dt},$$

która wywołuje prąd i przepływający przez obie cewki galwanometru w tym samym kierunku i powodujący odchylenie igiełki galwanometru balistycznego; wtedy musi być

$$E_s = -\mathfrak{L}\frac{dJ}{dt} = i(2R + 2G),$$

a

$$-\mathfrak{L}\int_J^0 dJ = 2(R + G)\int_0^t idt;$$

ponieważ $\int_0^t idt$ jest to ilość elektryczności Q, mierzona galwanometrem balistycznym, przeto

$$\mathfrak{L}J=2(R+G)Q,$$

a

$$\mathfrak{L}=2(R+G)\frac{Q}{J}.$$

Pomiar odbywa się więc przez mierzenie 3 wielkości: oporu R_1 za pomocą galwanometru balistycznego jako różnicowego statycznego $(R_1=R)$, natężenia prądu za pomocą galwanometru statycznego $(J=\frac{1}{2}c\alpha)$ i ilości elektryczności Q za pomocą galwanometru balistycznego $\left[Q=c_b\alpha_1\left(1+\frac{\Lambda}{2}\right)\right]$*). Opór G jest zwykle znany; jeżeli nie, to trzeba go osobno pomierzyć. Jest to więc metoda o 4 zmiennych, z których jedna t. j. G może być stała, J i Q są spostrzegane jednocześnie, a R niejednocześnie z tamtemi.

Wynik pomiaru obliczać można dwojako: Albo robi się szereg pomiarów wielkości R, a potem wielkości $\frac{Q}{J}$ i z średnich wartości tychże oblicza się $\mathfrak{L}$; z poszczególnych spostrzeżeń R i $\frac{Q}{J}$ można obliczyć średnie błędy ΔR i $\Delta\frac{Q}{J}$ i wpływ tych błędów na $\mathfrak{L}$, a więc błędy $\Delta\mathfrak{L}'$ i $\Delta\mathfrak{L}''$; błąd wyniku będzie wtedy $\sqrt{(\Delta\mathfrak{L}')^2+(\Delta\mathfrak{L}'')^2}$. Albo też, jeżeli nie chodzi o wyznaczenie poszczególnych błędów, to robi się szereg pomiarów R i szereg $\frac{Q}{J}$ i mnoży się przez $R_{śr}$ każdą wartość $\frac{Q}{J}$; z tak otrzymanych wielkości bierzemy wartość średnią jako wynik ostateczny i obliczamy średni błąd.

Najlepsze warunki pomiaru otrzymamy, zakładając $2(R+G)=R'$ i różniczkując logarytmicznie wzór na $\mathfrak{L}$; wtedy

$$\frac{\Delta\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{\Delta R'}{R'}+\frac{\Delta Q}{Q}-\frac{\Delta J}{J};$$

widać ztąd, że R', Q i J powinny być jak największe, aby $\frac{\Delta\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}$ było minimum. Prąd przez cewkę należy puszczać w obu kierunkach, aby uniknąć wpływu obcych pól magnetycznych, i brać średnie wartości Q.

*) Por. Część II., rozdz. I., 2.

Przy wyznaczaniu błędu granicznego trzeba także uwzględnić poszczególne błędy graniczne, a więc $\Delta_g R$ i $\Delta_g G$, które można założyć 0,1—0,2%, czułość układu przy mierzeniu oporu R, a więc $\frac{\delta R}{R}$, zakładając odchylenie 0,2 podziałki, $\Delta_g J$ zakładając dokładność pomiaru do 0,1 podziałki, a $\Delta_g Q$ do 0,25—0,5 podziałki. Błąd graniczny będzie

$$\frac{\Delta_g \mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{\Delta_g R+\Delta_g G}{R+G}+\frac{\Delta_g J}{J}+\frac{\Delta_g Q}{Q}+\frac{\delta R}{R}.$$

Protokół pomiaru:

Mierzymy naprzód R i obliczamy $R_{śr}$ oraz $R'=2(R+G)$.

L. p.	R'	J	Q	$\frac{Q}{J}$	$\mathfrak{L}$	$\mathfrak{L}_{śr}$	$\Delta\mathfrak{L}$	$(\Delta\mathfrak{L})^2$

2. Metoda Maxwella.

Ten sposób polega na porównywaniu spółczynnika samoindukcyi cewki, którego wielkość mamy wyznaczyć, ze znanym spółczynnikiem normali samoindukcyjnej i dwoma oporami ohmowymi, połączonymi według mostku Wheatstone'a. Normala samoindukcyjna może być zmienna lub stała.

a) Przy pomocy zmiennej normali *(rys. 34.)*.

Cewkę badaną, o spółczynniku samoinducyi $\mathfrak{L}_x$ i oporze ohmowym X łączy się z normalą samoindukcyjną ($\mathfrak{L}_n$ i R) i dwiema opornicami zatyczkowemi R_1 i R_2 w czworokąt; w przekątnie wstawia się źródło *SEM* przemiennej (lub przerywanej*) i telefon. — Naprzód puszcza się przez mostek prąd stały i przy pomocy galwanometru szuka się w zwykły sposób równowagi układu; wtedy

$$XR_2=RR_1,$$

czyli

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

*) Lepszy jest prąd przerywany, gdyż normalna częstość okresów prądu przemiennego jest zwykle za mała. Do tych samych wyników można dojść, przy pozostawieniu prądu stałego, przez nagłe przerywanie i zamykanie prądu. Najwygodniej jest zastosować sekometr (p. str. 84).

*

Jeżeli teraz puści się przez mostek prąd przemienny, to stosunek oporów X i R się zmieni, gdyż wchodzi tu teraz w rachubę działanie samoindukcyi. Ażeby sprowadzić układ znowu do równowagi, reguluje się normalę samoindukcyjną tak długo, aż galwanometr stanie na zerze; R_1 i R_2 zostają podczas tego niezmienione. Wtedy zamiast oporów ohmowych X i R, przyjdą zawady:

$$R_2\sqrt{X^2+\omega^2\mathfrak{L}^2_x}=R_1\sqrt{R^2+\omega^2\mathfrak{L}^2_n}$$

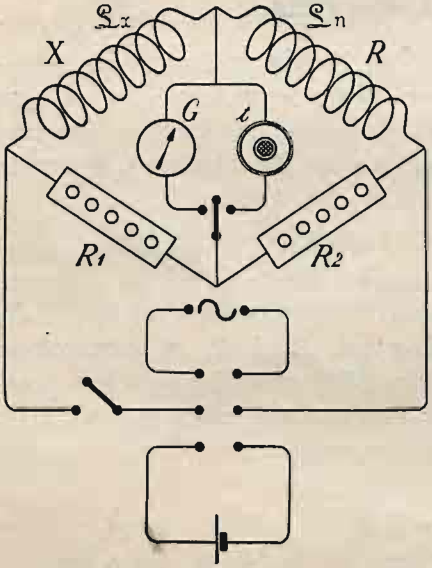
$$X^2R^2_2+\omega^2\mathfrak{L}^2_xR^2_2=R^2R^2_1+\omega^2\mathfrak{L}^2_nR^2_1,$$

ponieważ $$XR_2=RR_1,$$

więc $$\mathfrak{L}_xR_2=\mathfrak{L}_nR_1,$$

z tego $$\mathfrak{L}_x=\mathfrak{L}_n\frac{R_1}{R_2}=\mathfrak{L}_n\frac{X}{R}.$$

Ponieważ zwykle opory ohmowe cewek są małe, lepiej jest używać zamiast oporów R_1 i R_2 drutu mierniczego. Jeżeli opór R jest względem X bardzo mały, należy wstawić w gałęź $\mathfrak{L}_n$ dodatkowy opór ohmowy. W ogóle dążyć trzeba, aby wszystkie opory były do siebie zbliżone, gdyż wtedy jest największa dokładność pomiaru. Jeżeli przy obranym stosunku $\frac{R_1}{R_2}$ (przy pomiarze prądem stałym) okaże się, że regulacya cewki nie wystarcza, aby galwanometr sprowadzić do zera, to należy zmienić ten stosunek, albo stosunek $\frac{X}{R}$, aż odpowie (przy obu pomiarach) warunkom równowagi.



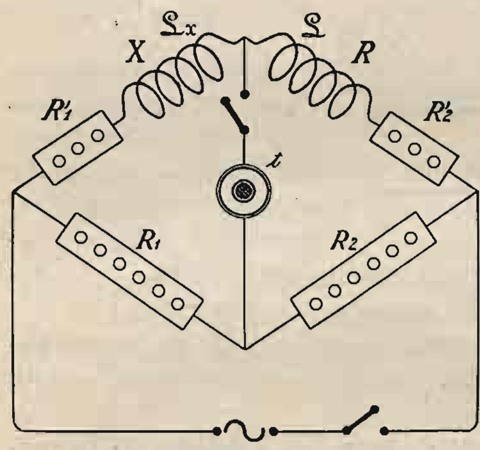
Rys. 34.

Zastosowanie mostku Wheatstone'a do pomiaru spółczynników samoindukcyi daje mniej dokładne wyniki, niż przy pomiarze oporów, ponieważ opory porównawcze mają zwykle pewną samoindukcyę i pojemność, które wpływają ujemnie na wynik pomiaru.

b) Przy pomocy stałej normali *(rys. 35.)*.

Stała normala samoindukcyjna ma tę wyższość nad zmienną, że nie posiada, jak tamta, skali empirycznej, tylko jedną wartość ściśle określoną. Przy pomiarach więc, przy których chodzi o większą dokładność, trzeba używać stałej normali. Układ połączeń robi się podobny do poprzedniego*), z tą tylko różnicą, że w gałęzie $\mathfrak{L}_x$ i $\mathfrak{L}$ wstawia się po jednej opornicy zatyczkowej R'_1 i R'_2. Sposób postępowania jest również podobny do poprzedniego. Równowaga układu przy prądzie stałym będzie, jeżeli

$$\frac{X+R'_1}{R+R'_2}=\frac{R_1}{R_2}.$$



Rys. 35.

Ażeby osiągnąć równowagę i przy prądzie przemiennym, t. j. aby osiągnąć

$$\frac{\mathfrak{L}_x}{\mathfrak{L}}=\frac{R_1}{R_2}=\frac{X+R'_1}{R+R'_2},$$

trzeba — przy stałem $\mathfrak{L}$ — zmieniać stosunek oporów R_1 i R_2, ale tak, aby zawsze była zachowana równowaga przy prądzie stałym t. j. aby zawsze było $R_1=X+R'_1$, a $R_2=R+R'_2$. Robi się to w ten sposób, że w opornicach R_1 i R'_1, oraz R_2 i R'_2 wyjmuje się lub zatyka zawsze tę samą liczbę kołeczków. Jeżeli opory ohmowe cewek nie są znane, to ten sposób wymaga długiego próbowania, nim się ostatecznie znajdzie równowagę dla obu wypadków. Lepiej jest więc naprzód obrachować albo pomierzyć te opory.

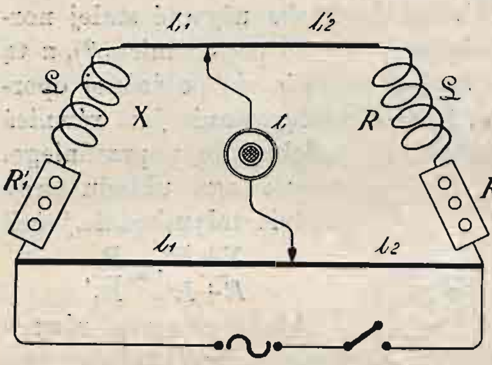
Spółczynnik samoindukcyi będzie więc jak poprzednio

$$\mathfrak{L}_x=\mathfrak{L}\frac{R_1}{R_2}.$$

Zamiast opornic zatyczkowych R_1 i R_2 można zastosować drut mierniczy, a obie gałęzie zawierające samoindukcyę połączyć drugim pomocniczym drutem mierniczym. Wtedy układ połączeń będzie jak na *rys. 36*.

*) Dla uproszczenia podano tylko układ połączeń przy prądzie przemiennym.

Opornice R'_1 i R'_2 służą do regulowania z grubsza, a l'_1 i l'_2 do dokładnego ustalenia równowagi. Równowagi układu przy prądzie przemiennym szuka się, przesuwając styki ruchome o tę samą długość po obu drutach mierniczych tak, aby



Rys. 36.

$$\frac{l_1}{l_2}=\frac{X+R'_1+l'_1}{R+R'_2+l'_2}.$$

W razie równowagi przy obu rodzajach prądu

$$\mathfrak{L}_x=\mathfrak{L}\frac{l_1}{l_2}.$$

Jeżeli $\mathfrak{L}_x$ i $\mathfrak{L}$ bardzo się od siebie różnią, oraz przy małych wartościach $\mathfrak{L}_x$ (poniżej 1 H) należy w powyższym układzie przestawić telefon i induktor. Przy małych wartościach samoindukcyi dobrze jest używać prądu o wielkiej częstości okresów lub przerywań.

Jeżeli zamiast prądu przemiennego używa się przerywanego, to dla lepszej pewności należy puszczać prąd w obu kierunkach.

Metoda Maxwella należy do metod o 3 zmiennych jednoczesnych, z których pod *a)* R_1 i R_2 mogą być stałe, a pod *b)* $\mathfrak{L}$ może być stałe.

Przy wyznaczaniu b ł ę d u g r a n i c z n e g o trzeba wziąć pod uwagę także czułość układu przy prądzie stałym, t. zn. dokładność, z jaką się dostało stosunek $\frac{R_1}{R_2}$ wzgl. $\frac{l_1}{l_2}$; tę czułość bada się zmieniając n. p. R tak długo, aż otrzyma się założone (0,1—0,2) odchylenie podziałki galwanometru; miarę czułości oznaczymy przez $\dfrac{\delta\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\frac{R_1}{R_2}}$. Prócz tego przychodzi jeszcze druga czułość przy prądzie przemiennym $\frac{\delta\mathfrak{L}_x}{\mathfrak{L}_x}$, którą się oblicza, zmieniając przy stałej normali $\mathfrak{L}_n$ stosunek $\frac{R_1}{R_2}$ wzgl. $\frac{l_1}{l_2}$, przyczem trzeba zważać na warunki równowagi, tak długo, aż się usłyszy w telefonie zmianę tonu. Błąd graniczny będzie:

$$\frac{\Delta_g \mathfrak{L}}{\mathfrak{L}} = \frac{\Delta_g \mathfrak{L}_n}{\mathfrak{L}_n} + \frac{\Delta_g R_1}{R_1} + \frac{\Delta_g R_2}{R_2} + \frac{\delta \frac{R_1}{R_2}}{\frac{R_1}{R_2}} + \frac{\delta \mathfrak{L}_x}{\mathfrak{L}_x}.$$

gdzie $\Delta_g \mathfrak{L}_x$ przyjmuje się 0,2—0,3%, a $\Delta_g R_1$ i $\Delta_g R_2$ 0,1—0,2%.

Protokół pomiaru dla *a)*:

L. p.	$\mathfrak{L}_n$	R_1	R_2	$\mathfrak{L}_x$	$\mathfrak{L}_{x śr}$	$\Delta\mathfrak{L}$	$(\Delta\mathfrak{L})^2$

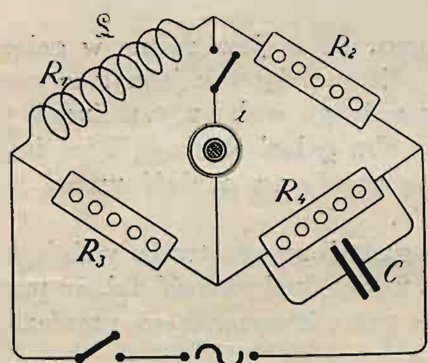
Podobnie będzie dla *b)*.

3. Metody kompenzacyjne.

Pomiar spółczynnika samoindukcyi za pomocą tych metod polega na tem, że działanie samoindukcyi cewki, umieszczonej wraz z trzema oporami nieindukcyjnymi w mostku Wheatstone'a, równoważy się działaniem pojemności kondenzatora. Zależnie od umieszczenia tego kondenzatora jest możliwych kilka układów połączeń. Najczęściej używane są następujące:

a) Metoda Maxwella:

Kondenzator załącza się równolegle do oporu nieindukcyjnego, leżącego naprzeciw cewki.



Rys. 37.

Układ połączeń wskazuje *rys. 37.*, przyczem celem uproszczenia podane są przyrządy odnoszące się tylko do pomiaru przy prądzie przemiennym, a więc telefon i źródło prądu przemiennego.

Pomiar polega, podobnie jak przy poprzedniej metodzie, na dwu pomiarach: przy prądzie stałym i przy prądzie przemiennym.

Naprzód szuka się równowagi przy prądzie stałym; wtedy będzie

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \qquad 1)$$

Przy prądzie przemiennym przyjdą w miejsce oporów R_1 i R_4 zawady Z_1 i Z_4; warunek równowagi, który się otrzymuje przez regulowanie oporu R_4, będzie więc

$$Z_1 Z_4 = R_2 R_3, \tag{2}$$

gdzie zawada $$Z_1 = \sqrt{R_1{}^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2},$$

a Z_4 jest to zawada zastępcza, złożona z oporu ohmowego R_4 i oporu kondenzatora $\frac{1}{\omega C}$, t. zn.

$$\frac{1}{Z_4} = \sqrt{\frac{1}{R^2_4} + \omega^2 C^2} = \frac{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2_4}}{R_4},$$

a $$Z_4 = \frac{R_4}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2_4}}.$$

Podstawmy te wartości w równanie 2),

$$\sqrt{R^2_1 + \omega^2 \mathfrak{L}^2} \frac{R_4}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}} = R_2 R_3.$$

$$R^2_1 R^2_4 + R^2_4 \omega^2 \mathfrak{L}^2 = R^2_2 R^2_3 + R^2_2 R^2_3 R^2_4 \omega^2 C^2,$$

ponieważ $$R_1 R_4 = R_2 R_3,$$

przeto $$\mathfrak{L} = C R_2 R_3.$$

Jeżeli C wyrazi się w faradach, R_2 i R_3 w ohmach, to $\mathfrak{L}$ otrzyma się w henrych.

Powyższa metoda posiada 3 zmienne, z których C jest zwykle stałe, a R_2 i R_3 spostrzega się jednocześnie.

Aby osiągnąć najlepsze warunki pomiaru trzeba utrzymywać duże C, R_2 i R_3.

Przy tej metodzie założono, że ω jest równe w gałęzi z samoindukcyą i w gałęzi z pojemnością; tak jednak zawsze nie jest, gdyż z powodu różnorodnego wpływu samoindukcyi i pojemności, krzywe prądu w obu gałęziach mogą mieć inne spółczynniki przebiegu. Zresztą należy tu odnieść uwagi podane przy mostku Wheatstone'a.

Przy wyznaczaniu błędu granicznego trzeba wziąć pod uwagę podwójny pomiar, t. zn. uwzględnić czułość układu przy prądzie stałym i przy prądzie przemiennym. Błąd graniczny będzie

$$\frac{\Delta_g \mathfrak{L}}{\mathfrak{L}} = \frac{\Delta_g C}{C} + \frac{\Delta_g R_2}{R_2} + \frac{\Delta_g R_3}{R_3} + \frac{\delta(R_2 R_3)}{R_2 R_3} + \frac{\delta \mathfrak{L}}{\mathfrak{L}},$$

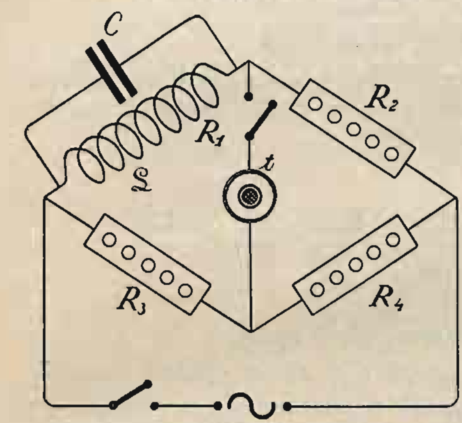
gdzie $\Delta_g C$ przyjmuje się 0,1—0,2%, $\Delta_g R_2$ i $\Delta_g R_3$ 0,1—0,2%, $\delta(R_2 R_3)$ otrzymuje się, badając czułość układu przy prądzie stałym ze względu na iloczyn oporów R_2 i R_3; $\frac{\delta(R_2R_3)}{R_2R_3}$ będzie więc tym błędem względnym, jaki popełnia się przez niedokładne nastawienie równowagi przy prądzie stałym; otrzymuje się go zmieniając jeden z oporów tak długo, aż dostanie się założone odchylenie skazówki galwanometru; $\frac{\delta\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}$ jest miarą czułości układu przy prądzie przemiennym ze względu na $\mathfrak{L}$; tę ostatnią czułość otrzymuje się zmieniając opór R_2 lub R_3, aż się usłyszy zmianę tonu w telefonie.

Protokół pomiaru:

L. p.	C	R_2	R_3	$\mathfrak{L}$	$\mathfrak{L}_{śr}$	$\Delta\mathfrak{L}$	$(\Delta\mathfrak{L})^2$

b) Metoda Remingtona:

Kondenzator załącza się równolegle do cewki.



Rys. 38.

Układ połączeń wskazuje *rys. 38.*

Postępowanie przy pomiarze jest podobne do poprzedniego.

Najpierw szuka się równowagi przy prądzie stałym

$$R_1R_4 = R_2R_3. \qquad 1)$$

Potem przy prądzie przemiennym przez regulowanie oporu R_4 i przy niezmienionych oporach R_2 i R_3

$$Z_1R_4 = R_2R_3, \qquad 2)$$

gdzie Z_1 jest to opór zastępczy cewki i kondenzatora, t. j.

$$\frac{1}{Z_1} = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{R_1^2+\omega^2\mathfrak{L}^2}}\right)^2 + \omega^2C^2} = \sqrt{\frac{1+(R_1^2+\omega^2\mathfrak{L}^2)\omega C}{R_1^2+\omega^2\mathfrak{L}^2}},$$

z tego $Z = \frac{\sqrt{R_1^2+\omega^2\mathfrak{L}^2}}{\sqrt{1+(R_1^2+\omega^2\mathfrak{L}^2)\omega^2C^2}}$.

Podstawmy to w równanie 2)

$$\frac{R_4\sqrt{R_1^2+\omega^2\mathfrak{L}^2}}{\sqrt{1+(R_1^2+\omega^2\mathfrak{L}^2)\omega^2C^2}} = R_2R_3 = R_1R_4.$$

Przez R_4 uprościć, podnieść do kwadratu i rozmnożyć

$$R^2_1+\omega^2\mathfrak{L}^2=R^2_1+R^4_1\omega^2C^2+R^2_1\omega^4\mathfrak{L}^2C^2$$

$$\mathfrak{L}^2=R^4_1C^2+R^2_1\omega^2\mathfrak{L}^2C^2,$$

z tego $$\mathfrak{L}=\frac{R^2_1C}{\sqrt{1-R^2_1\omega^2C^2}}.$$

Jeżeli człon $R^2_1\omega^2C^2$ jest bardzo mały wobec 1, co może zajść przy ω nie większem niż 70—80, to można go opuścić i wtedy będzie

$$\mathfrak{L}=R^2_1C.$$

Powyższa metoda posiada dwie zmienne jednoczesne, z których C jest zwykle stałe. Jak widać ze wzoru błąd zmiennej R_1 podwaja błąd wyniku; z tego względu należy R_1 odczytywać, względnie nastawiać z tem większą dokładnością. Błędy względne obu zmiennych będą tem mniejsze, im R_1 i C będą większe.

Błąd graniczny będzie podobnie jak poprzednio:

$$\frac{\Delta_g\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{2\Delta_gR_1}{R_1}+\frac{\Delta_gC}{C}+\frac{\delta(R_2R_3)}{R_2R_3}+\frac{\delta\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}},$$

gdzie ΔR_1 przyjmuje się 0,1—0,2%, Δ_gC 0,1—0,2%, $\delta(R_2R_3)$ otrzymuje się badając czułość układu przy prądzie stałym, a $\delta\mathfrak{L}$ przy prądzie przemiennym.

Protokół pomiaru:

L. p.	C	R_1	$\mathfrak{L}$	$\mathfrak{L}_{śr}$	$\Delta\mathfrak{L}$	$(\Delta\mathfrak{L})^2$

Uwagi podane pod a) odnoszą się i tutaj.

W obu metodach a) i b) można w razie, jeżeli opór R_1 jest bardzo mały, wstawić w gałęź z samoindukcyą dodatkowy opór nieindukcyjny. Pojemność C może być albo zmienna, wtedy opory utrzymuje się stałe, albo stała, wtedy trzeba zmieniać stosunek oporów. W ogóle odnieść tu można sposoby postępowania i ułatwienia, podane przy metodzie Maxwella.

c) Metoda Andersona:

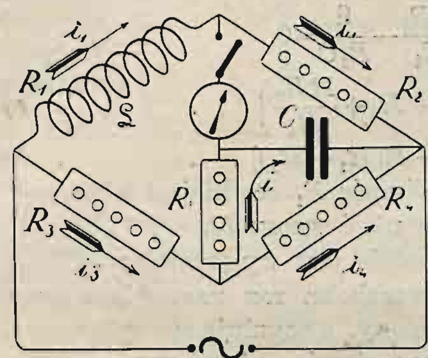
Kondenzator załącza się między punktem połączenia oporów ohmowych a gałęzią galwanometru.

Układ połączeń wskazuje *rys. 39.*

W gałęzi galwanometru znajduje się dodatkowy opór nieindukcyjny R (opornica zatyczkowa).

Sposób postępowania jest podobny do poprzednich. Naprzód szuka się równowagi układu przy prądzie stałym, lecz bez kondenzatora C i oporu R; warunkiem tejże będzie

$$R_1R_4=R_2R_3.$$



Rys. 39.

Następnie załącza się kondenzator C i opornicę R według podanego układu i sprowadza się układ do równowagi przy prądzie przemiennym przez regulowanie tylko oporu R. Jeżeli przez galwanometr prąd nie płynie, to w danej chwili rozkład prądów jest uwidoczniony na układzie; jak widać $i_3=i+i_4$. Według praw Kirchhoffa będzie

dla obwodu R_1GRR_3 $\quad i_1R_1-iR-i_3R_3=-\mathfrak{L}\frac{di_1}{dt}$,

„ „ GR_2C $\quad i_1R_2=-\frac{1}{C}\int idt$,

„ „ RCR_4 $\quad iR-i_4R_4=-\frac{1}{C}\int idt$.

Z tego pochodne:

$$R_1\frac{di_1}{dt}-R\frac{di}{dt}-R_3\frac{di}{dt}-R_3\frac{di_4}{dt}=-\mathfrak{L}\frac{d^2i_1}{dt^2} \qquad 1)$$

$$R_2\frac{di_1}{dt}=\frac{1}{C}i \qquad 2)$$

$$R\frac{di}{dt}-R_4\frac{di_4}{dt}=-\frac{1}{C}i \qquad 3)$$

Obliczywszy z 2) i 3)

$$\frac{di_1}{dt}=\frac{i}{R_2C} \quad \text{i} \quad \frac{di_4}{dt}=\frac{i}{R_4C}+\frac{R}{R_4}\frac{di}{dt}$$

i podstawiwszy w 1) otrzymamy

$$\frac{R_1}{R_2}\frac{i}{C}-R\frac{di}{dt}-R_3\frac{di}{dt}-\frac{R_3}{R_4}\frac{i}{C}-\frac{RR_3}{R_4}\frac{di}{dt}=-\frac{\mathfrak{L}}{R_2C}\frac{di}{dt}.$$

Zmienić znaki i uporządkować

$$\left(R+R_3+\frac{RR_3}{R_4}-\frac{\mathfrak{L}}{R_2C}\right)\frac{di}{dt}=\left(\frac{R_1}{R_2}-\frac{R_3}{R_4}\right)\frac{i}{C};$$

ponieważ
$$\frac{R_1}{R_2}=\frac{R_3}{R_4},$$
przeto
$$R+R_3+\frac{RR_3}{R_4}-\frac{\mathfrak{L}}{R_2 C}=0,$$
$$\mathfrak{L}=CR_2\left(R+R_3+\frac{RR_3}{R_4}\right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad a)$$
albo
$$\mathfrak{L}=C[R_2R_3+R(R_1+R_2)] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad b)$$

Wzoru *a)* używa się, jeżeli opór R_1 cewki jest nieznany; jeżeli zaś jest znany, to można użyć wzoru *b)*.

Postępowanie przy tej metodzie jest wygodniejsze niż poprzednio, gdyż opornice w czworoboku raz nastawione przy prądzie stałym pozostają bez zmiany, a reguluje się tylko opornicę R. Natomiast posiada ona więcej zmiennych; przez co błąd graniczny na ogół jest większy; zmiennych jest 5 spostrzeganych jednocześnie; z nich C i R_1 zwykle są stałe.

Błąd graniczny wyznacza się przez różniczkowanie cząstkowe wzorów *a)* lub *b)*.

Błąd graniczny *a)*:
$$\mathfrak{L}=CR_2\left(R_1+R_3+\frac{RR_3}{R_4}\right),$$
(względem C)
$$\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{dC}{C},$$
(względem R)
$$\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{(R_3+R_4)R}{RR_3+RR_4+R_3R_4}\,\frac{dR}{R},$$
(względem R_2)
$$\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{dR_2}{R_2},$$
(względem R_3)
$$\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{(R+R_4)R_3}{RR_3+RR_4+R_3R_4}\,\frac{dR_3}{R_3},$$
(względem R_4)
$$\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{RR_3}{RR_3+RR_4+R_3R_4}\,\frac{dR_4}{R_4}.$$

Jeżeli założymy, że procentowe błędy graniczne opornic są równe i że wszystkie się dodają to będzie w wartościach skończonych
$$\frac{\Delta_g R}{R}=\frac{\Delta_g R_2}{R_2}=\frac{\Delta_g R_3}{R_3}=\frac{\Delta_g R_4}{R_4},$$
a więc błąd graniczny wzoru *a)*
$$\frac{\Delta_g\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{\Delta_g C}{C}+2\left(1+\frac{RR_3}{RR_3+RR_4+R_3R_4}\right)\frac{\Delta_g R}{R}+\frac{\delta(R_2R_3)}{R_2R_3}+\frac{\delta\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}.$$

Błąd graniczny *b)*:
$$\mathfrak{L}=C[R_2R_3+R(R_1+R_2)],$$
(względem C)
$$\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{dC}{C},$$
(względem R)
$$\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{(R_1+R_2)R}{R_2R_3+R(R_1+R_2)}\,\frac{dR}{R}$$

(względem R_1) $$\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{RR_1}{R_2R_3+R(R_1+R_2)}\frac{dR_1}{R_1},$$

(względem R_2) $$\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{(R+R_3)R_2}{R_2R_3+R(R_1+R_2)}\frac{dR_2}{R_2},$$

(względem R_3) $$\frac{d\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{R_2R_3}{R_2R_3+R(R_1+R_2)}\frac{dR_3}{R_3}.$$

Tutaj nie zawsze można założyć, że błędy wszystkich oporów są równe, lecz tylko, że błędy opornic R, R_2 i R_3 są równe; błąd dR_1 jest zwykle większy niż tamte, bo wyznacza się go za pomocą oporów R_2, R_3 i R_4. Jeżeli jednak opór ohmowy cewki pomierzono w inny sposób z dokładnością większą niż błąd graniczny opornicy, to można go przyjąć jako równy tamtym, t. zn.

$$\frac{\Delta_g R}{R}=\frac{\Delta_g R_1}{R_1}=\frac{\Delta_g R_2}{R_2}=\frac{\Delta_g R_3}{R_3}$$

i wtedy błąd graniczny wzoru *b)* będzie

$$\frac{\Delta_g\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}=\frac{\Delta_g C}{C}+\frac{2\Delta_g R}{R}+\frac{\delta(R_2R_3)}{R_2R_3}+\frac{\delta\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}}.$$

W obu wzorach $\Delta_g C$ przyjmuje się 0,1—0,2%, $\Delta_g R$ 0,1—0,2%, a $\delta(R_2R_3)$ otrzymuje się badając czułość układu przy prądzie stałym, a $\delta\mathfrak{L}$ przy prądzie przemiennym.

Z powyższych wzorów można również wyprowadzić najlepsze warunki pomiaru.

Pojemność kondenzatora zależy do pewnego stopnia od częstości okresów, przeto należy przy pomiarach precyzyjnych wyznaczyć pojemność C właśnie przy tej częstości okresów, z jaką ma się później do czynienia przy pomiarze spółczynnika samoindukcyi.

Protokół pomiaru:

L. p.	C	R_1	R_2	R_3	R	$\mathfrak{L}$	$\Delta\mathfrak{L}$	$\mathfrak{L}_{śr}$	$(\Delta\mathfrak{L})^2$

Pomiar — przy prądzie przemiennym — odbywa się przez kilkakrotne spostrzeganie R przy stałych C, R_1, R_2, R_3 i każdorazowe obliczanie $\mathfrak{L}$.

4. Sposób techniczny.

Sposób techniczny wyznaczenia spółczynnika samoindukcyi stosuje się głównie przy cewkach z żelazem. Wtedy używa się do pomiaru prądu przemiennego o tej samej częstości okresów i tej samej wartości skutecznej natężenia prądu, przy jakich cewka normalnie pracuje. Prócz tego krzywa prądu mierniczego powinna być jak najbardziej zbliżona do sinusoidy.

Jeżeli prąd J, przepuszczony przez cewkę o oporze ohmowym R, wywołuje na jej krańcach spadek napięcia V, to

$$\frac{V}{J} = \sqrt{R^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2},$$

z tego
$$\mathfrak{L} = \frac{1}{\omega}\sqrt{\left(\frac{V}{J}\right)^2 - R^2}.$$

W razie gdy jest do dyspozycyi opór nieindukcyjny R', który może znieść prąd J, to można obliczyć spółczynnik samoindukcyi cewki, mierząc spadek napięcia na cewce V_s i na oporze V_r, wtedy

$$\frac{V_r}{V_s} = \frac{R'}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \mathfrak{L}^2}}$$

z tego
$$\mathfrak{L} = \frac{1}{\omega}\sqrt{R'^2 \frac{V^2_s}{V^2_r} - R^2}.$$

B. Pomiary spółczynnika indukcyi wzajemnej.

Spółczynnik indukcyi wzajemnej $\mathfrak{M}$ jest określony stosunkiem cieku Φ wywołanego przez prąd J_1 w jednej cewce, a objętego całkowicie przez n_2 zwojów drugiej cewki, do prądu J_1. Jeżeli przyjmiemy, że rozproszenia nie ma, to

$$\mathfrak{M} = \Phi \frac{n_2}{J_1} = \Phi \frac{n_1}{J_2} = \frac{4\pi \mu n_1 n_2 q}{l},$$

gdzie Φ jest to ciek objęty przez jeden zwój cewki, q przekrój wiązki linii sił, a l jej długość.

Podobnie więc jak przy samoindukcyi, jeżeli to są cewki bez żelaza, to $\mu = 1$, a ciek zmienia się proporcyonalnie do prądu wytwarzającego go, wtedy spółczynnik indukcyi wzajemnej jest niezależny od natężenia prądu. Jeżeli zaś cewki mają rdzeń żelazny, wtedy ciek jest zależny także od przenikliwości, a więc spółczynnik indukcyi wzajemnej jest wtedy zależny od prądu.

Stosownie też do tego należy postępować przy pomiarze, t. j. spółczynnik indukcyi wzajemnej cewek z żelazem należy mierzyć przy zastosowaniu prądu o takiem natężeniu i takiej częstości, przy jakich cewka normalnie pracuje.

Inne uwagi porównaj *Pomiary spółczynnika samoindukcyi.*

1. Metoda balistyczna.

Cewkę, której spółczynnik $\mathfrak{M}$ mamy wyznaczyć, o dwu uzwojeniach, pierwotnem *I* i wtórnem *II*, załącza się według podanego *(rys. 40.)* układu. W obwód pierwotny wstawia się źródło prądu, ampermetr *A*, opór *R'* nieindukcyjny do regulowania i przełącznik. W obwód wtórny załącza się galwanometr balistyczny *G* i opornicę zatyczkową nieindukcyjną *R*.

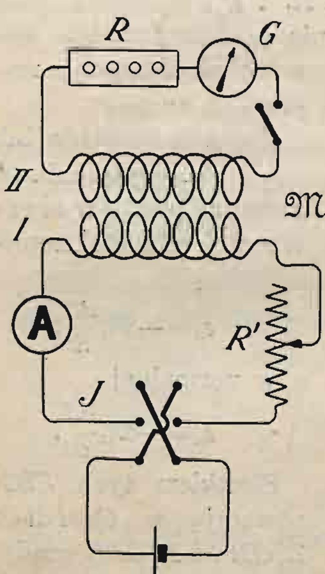
Przez przerwanie prądu *J* w obwodzie pierwotnym wzbudza się w obwodzie wtórnym *SEM* chwilowa

$$e = -\mathfrak{M}\frac{dJ}{dt},$$

powodująca prąd chwilowy *i* w obwodzie złożonym z oporów *R* i *G* i oporu ohmowego cewki, którego zwykle się nie uwzględnia wobec tamtych; tak że

$$e = -\mathfrak{M}\frac{dJ}{dt} = (R+G)i,$$

z tego całka $$\int e dt = \mathfrak{M}J = (R+G)\int i dt,$$



Rys. 40.

ponieważ $\int i dt$ jest to ilość elektryczności *Q*, jaka przepłynie przez obwód wtórny, przeto

$$\mathfrak{M}J = (R+G)Q;$$

z tego $$\mathfrak{M} = (R+G)\frac{Q}{J}.$$

Ilość elektryczności mierzy się galwanometrem balistycznym

$$Q = c_b \alpha_1 \left(1 + \frac{A}{2}\right)^{*)},$$

a natężenie prądu *J* ampermetrem. Obie te wielkości spostrzega się jednocześnie. Jest to więc metoda o 4 zmiennych, z których *R* i *G* są zwykle stałe i ich sumę kładziemy $R + G = R''$, a dwie inne spostrzega się równocześnie.

Opory *R* i *R'* należy tak nastawić, aby *Q* i *J* były największe w granicach podziałki, gdyż wtedy warunki pomiaru są najlepsze.

---

*) por. Część II. rozdz. I, 2.

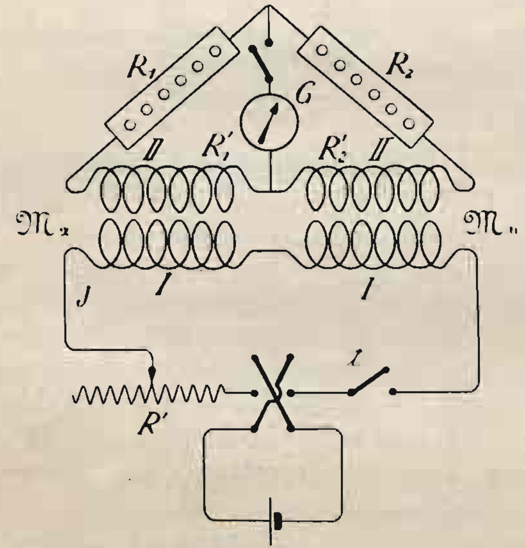
Błąd graniczny, najlepsze warunki pomiaru i protokół są podobne jak przy pomiarze spółczynnika samoindukcyi metodą balistyczną (por. str. 66.).

Jeżeli przerywanie prądu odbywa się za pomocą przełącznika (kołyski Poggendorffa, jak na *rys. 40.)*, to po przerwaniu prądu J następuje natychmiast załączenie go w stronę przeciwną, te dwa impulsy powodują wzbudzenie *SEM* dwa razy większej; wtedy

$$\mathfrak{M} = (R + G)\frac{Q}{2J}.$$

2. Metoda porównawcza.

Do porównywania służy normala indukcyjna o znanym spółczynniku indukcyi wzajemnej $\mathfrak{M}_n$. Obie cewki, badaną i normalną łączy się według podanego układu *(rys. 41.)* tak, że przez ich uzwojenia pierwotne przepływa ten sam prąd J, a ich uzwojenia wtórne są także połączone w szereg ze sobą i z dwiema opornicami zatyczkowemi R_1 i R_2. Opory ohmowe R'_1 i R'_2 są zwykle nie równe i nie można już ich nieuwzględnić, owszem muszą być znane.



Rys. 41.

Przez zamykanie lub otwieranie wyłącznika l, wzbudza prąd J w cewce badanej siłę elektromotoryczną

$$e_x = -\mathfrak{M}_x\frac{dJ}{dt},$$

a w normalnej

$$e_n = -\mathfrak{M}_n\frac{dJ}{dt}.$$

Skutkiem tych *SEM* powstają w obwodach $R_1GR'_1$ i $R_2GR'_2$ prądy, zależne od oporów tych obwodów i powodujące odchylenie galwanometru.

Jeżeli przez odpowiedni dobór oporów R_1 i R_2 otrzyma się taki stan, że galwanometr nie dozna odchylenia, to jest to oznaką, że przez uzwojenia wtórne obu cewek płynie ten sam prąd indukowany i; wtedy

$$\mathfrak{M}_x \frac{dJ}{dt} = i(R_1 + R'_1)$$

$$\mathfrak{M}_n \frac{dJ}{dt} = i(R_2 + R'_2),$$

z tego
$$\frac{\mathfrak{M}_x}{\mathfrak{M}_n} = \frac{R_1 + R'_1}{R_2 + R'_2},$$

a
$$\mathfrak{M}_x = \mathfrak{M}_n \frac{R_1 + R'_1}{R_2 + R'_2}.$$

Do tego samego wyniku możnaby dojść zmieniając $\mathfrak{M}_n$ (zmienna normala), a utrzymując stałe opory R_1 i R_2.

Opornice zatyczkowe R_1 i R_2 można zastąpić drutem mierniczym, zwłaszcza jeżeli opory ohmowe cewek są małe.

Metoda porównawcza należy do rzędu metod o trzech zmiennych, spostrzeganych jednocześnie, z których albo $\mathfrak{M}_n$, albo R_1 i R_2 są stałe; R'_1 i R'_2 mają stałą wartość jako opory ohmowe cewek.

Błąd graniczny wyznacza się według

$$\frac{\Delta_g \mathfrak{M}_x}{\mathfrak{M}_x} = \frac{\Delta_g \mathfrak{M}_n}{\mathfrak{M}_n} + \frac{\Delta_g R_1 + \Delta_g R'_1}{R_1 + R'_1} + \frac{\Delta_g R_2 + \Delta_g R'_2}{R_2 + R'_2} + \frac{\delta \mathfrak{M}_x}{\mathfrak{M}_x},$$

gdzie $\Delta_g \mathfrak{M}_n$ przyjmuje się 0,2%, $\Delta_g R_1$ i $\Delta_g R_2$ 0,1—0,2%, $\Delta_g R'_1$ i $\Delta_g R'_2$ zależą od dokładności, z jaką się opory ohmowe cewek pomierzyło, a $\frac{\delta \mathfrak{M}_x}{\mathfrak{M}_x}$ jest miarą czułości układu, którą się otrzymuje zmieniając R_1 lub R_2 tak długo, aż otrzyma się odchylenie (0,2) podziałki galwanometru.

Protokół pomiaru:

L. p.	$\mathfrak{M}_n$	R'_1	R'_2	R_1	R_2	$\mathfrak{M}_x$	$\mathfrak{M}_{x\,śr}$	$\Delta\mathfrak{M}_x$	$(\Delta\mathfrak{M}_x)^2$

3. Metoda porównawcza z samoindukcyą.

(Według Maxwella).

Cewkę badaną, której uzwojenie wtórne ma opór ohmowy R, a której spółczynnik samoindukcyi $\mathfrak{L}$ jest znany, załącza się w mostek Wheatstone'a w ten sposób, że prąd do mostku przepływa przez jej uzwojenie pierwotne *(rys. 42.)*.

Naprzód sprowadza się układ do równowagi przy prądzie stałym, wtedy

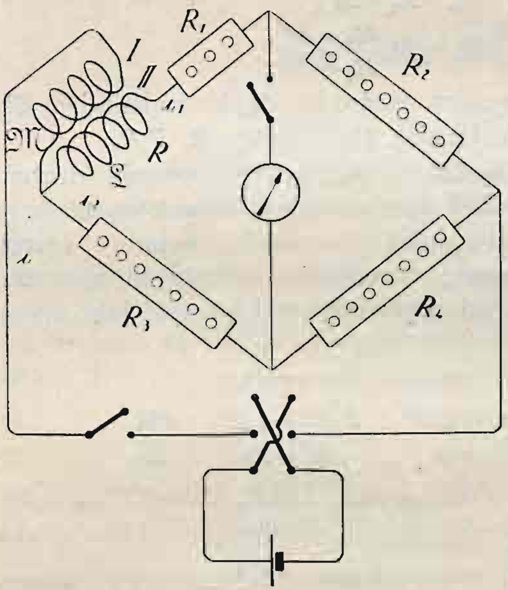
$$(R+R_1)R_4=R_2R_3$$

albo

$$\frac{R+R_1}{R_3}=\frac{R_2}{R_4}.$$

Jeżeli prąd i przerwie się (wyłącznikiem, induktorem lub sekometrem) to w uzwojeniu *II* powstanie *SEM* skutkiem wzajemnej indukcyi

$$e_m=-\mathfrak{M}\frac{di}{dt}.$$



Rys. 42.

Prąd i rozgałęzia się w mostku na i_1 i i_2, z których i_1 wywołuje *SEM* samoindukcyi

$$e_s=-\mathfrak{L}\frac{di_1}{dt},$$

oraz spadek napięcia $i_1(R+R_1)$, a prąd i_2 spadek napięcia i_2R_3.

Jeżeli przez regulowanie oporów sprowadzi się galwanometr do położenia zerowego — przy prądzie przerywanym — jednak tak, aby było zawsze

$$(R+R_1)R_4=R_2R_3,$$

to dla obwodu RR_1GR_3 można ustawić równanie

$$\mathfrak{M}\frac{di}{dt}+\mathfrak{L}\frac{di_1}{dt}=-i_1(R+R_1)+i_2R_3.$$

Ponieważ w razie, gdy przez galwanometr prąd nie płynie

$$i_1(R+R_1)=i_2R_3,$$

przeto

$$\mathfrak{M}\frac{di}{dt}=-\mathfrak{L}\frac{di_1}{dt}.$$

Podstawmy za i i i_2 wartości

$$i=i_1+i_2,\quad i_2=i_1\frac{R+R_1}{R_3},$$

to będzie

$$\mathfrak{M}\frac{di_1}{dt}\left(1+\frac{R+R_1}{R_3}\right)=-\mathfrak{L}\frac{di_1}{dt},$$

z tego
$$\mathfrak{M} = -\frac{\mathfrak{L}}{1+\frac{R+R_1}{R_3}} = -\frac{\mathfrak{L}}{1+\frac{R_2}{R_4}}.$$

Znak — oznacza, że obie cewki tak trzeba połączyć, aby ich *SEM*-e wywołane działaniem indukcyi wzajemnej i samoindukcyi były skierowane przeciw sobie.

Celem wyznaczenia błędu granicznego napiszmy ostatnie równanie w formie
$$\mathfrak{M} = -\frac{\mathfrak{L}R_4}{R_2+R_4}.$$

W ten sposób jest ono podobne do równania Poggendorffa (str. 59 i 60), wyprowadzenie więc tam błędu granicznego, można zastosować tutaj, uwzględniając jednak jeszcze czułość układu przy prądzie stałym, którą się wyznacza ze względu na stosunek $\frac{R_2}{R_4}$, zmieniając go tak długo, aż się otrzyma założone odchylenie galwanometru, oraz czułość układu przy prądzie przemiennym (przerywanym) ze względu na $\mathfrak{M}$. Błąd graniczny będzie więc
$$\frac{\Delta_g\mathfrak{M}}{\mathfrak{M}} = \frac{\Delta_g\mathfrak{L}}{\mathfrak{L}} + \frac{\Delta_g R_4}{R_4} + \frac{\delta\left(\frac{R_2}{R_4}\right)}{\frac{R_2}{R_4}} + \frac{\delta\mathfrak{M}}{\mathfrak{M}},$$
gdzie $\Delta_g\mathfrak{L}$ przyjmuje się, zależnie od dokładności pomiaru spółczynnika samoindukcyi, wzgl. od normali 0,2—0,3%, $\Delta_g R_4$ zakłada się 0,1—0,2, a dwa inne człony są miarą czułości układu przy prądzie stałym wzgl. przemiennym.

Z tego wzoru widać zarazem, że aby otrzymać najlepsze warunki pomiaru, należy obierać duże R_4 i R_2.

Protokół pomiaru:

L. p.	$\mathfrak{L}$	R_2	R_4	$\mathfrak{M}$	$\mathfrak{M}_{śr}$	$\Delta\mathfrak{M}$	$(\Delta\mathfrak{M})^2$

4. Sposób techniczny.

W praktyce ma się do czynienia przeważnie z cewkami pracującemi pod prądem przemiennym; wtedy ich spółczynnik indukcyi wzajemnej $\mathfrak{M}$ odpowiada nasyceniu żelaza, zależnemu od wartości skutecznej natężenia prądu, podczas gdy podane wyżej sposoby pomiarów tego spółczynnika opierały się na maxymalnych wartościach prądu mierniczego (stałego albo przerywanego). Także częstość okresów nie zawsze da się utrzymać w granicach, odpowiadających normalnym warunkom pracy cewek. W takich wypadkach — zwłaszczá przy dużych prądach — należy się uciec do sposobów technicznych.

Wychodzi się tu z zasadniczego równania na spółczynnik indukcyi wzajemnej

$$\mathfrak{M} = \frac{\Phi n_2}{J_1};$$

ponieważ

$$e = \Phi n_2 \omega,$$

przeto

$$\mathfrak{M} = \frac{e_2}{J_1 \omega}.$$

$\phi = M I_m \sin \omega t$

$e_2 = -\frac{d\phi}{dt} = -M I_m \omega \cos \omega t$

$e_{2\,max} = M I_{max} \omega$

$M = \frac{e_2}{I_{max} \omega}$

Tutaj e oznacza *SEM* w voltach, wzbudzoną w cewce drugiej przez prąd J_1 w amp., płynący przez cewkę pierwszą; $\omega = 2\pi n$, gdzie n jest to częstość okresów. Wtedy $\mathfrak{M}$ jest wyrażone w henrych.

Z powyższego równania widać, że cewka druga musi być nieobciążona, t. zn. że — zwłaszcza przy cewkach do małych prądów — nie można używać do pomiaru *SEM* e volmetrów zużywających prąd, tylko elektrostatycznych.

Sekometr.

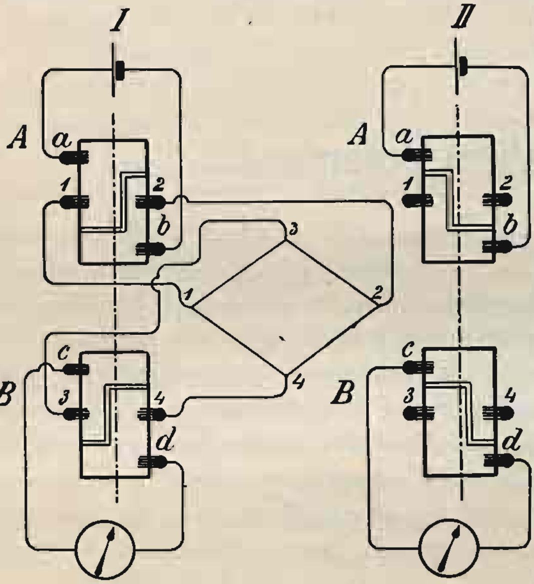
Przy metodach mostkowych pomiaru spółczynnika samoindukcyi i indukcyi wzajemnej można — jak już wspomniano — zastosować zamiast prądu przemiennego, prąd przerywany i to o wielkiej lub małej częstości. Taki prąd przerywany o bardzo małej częstości powstaje n. p. przy zamykaniu lub otwieraniu wyłącznika przy prądzie stałym, a działanie tego prądu można obserwować za pomocą galwanometru balistycznego, lub nawet zwykłego, o ile nie chodzi o pomiar odchylenia. Pewniejsze jednak wyniki można osięgnąć przy większej częstości przerywań n. p. za pomocą induktora lub jeszcze lepiej za pomocą sekometru.

Sekometr jest to przyrząd zbudowany przez Ayrtona i Perryego do pomiarów spółczynnika samoindukcyi z oporu i czasu*). Składa się on z dwuch komutatorów, osadzonych na wspólnym wale; komutatory mają po 2 segmenty metalowe izolowane od siebie paskiem o szerokości kilku *mm*, tak że każdy z nich obejmuje trochę mniej niż połowę obwodu. Oba komutatory są względem siebie przesunięte, tak, że izolujące paski nie leżą

*) Spółczynnik samoindukcyi ma wymiar c; można go także wyrazić przez wymiar scs^{-1}, gdzie s jest wymiarem czasu, a cs^{-1} wymiarem oporu.

w jednej płaszczyźnie. Po bokach każdego komutatora są umieszczone 4 szczotki, ślizgające się po jego powierzchni.

Rys. 43. przedstawia w widoku z góry układ połączeń sekometru Carpentiera w zastosowaniu n. p. do mostku Wheatstone'a. W położeniu *I* komutator *A* wpuszcza prąd z ogniwa do mostku za pomocą szczotek w kierunku *a*1 2*b*; komutator *B* dostarcza prądu do galwanometru z mostka za pomocą szczotek w kierunku 3*cd*4. Po obrocie — za pomocą motorku elektrycznego — o 180^{0} płynie prąd z ogniwa w kierunku *a*2 1*b* przez mostek, do galwanometru w kierunku 4*cd*3 (w drugiem położeniu są połączenia z mostkiem nie oznaczone). W ten więc sposób prąd stały z baterji zmienia się przed mostkiem na przemienny (przerywany) i jako taki przez mostek przepływa, a po wyjściu z mostku zmienia się znowu na stały. Galwanometr dostaje więc uderzenia zawsze jednokierunkowe, tak że przy wielkiej częstości i przy użyciu galwanometru zwykłego, aperyodycznego, otrzymuje się stałe odchylenie zależne od natężenia prądu, płynącego przez gałąź galwanometru.



Rys. 43.

Skutkiem zastosowania galwanometru aperyodycznego zamiast balistycznego, albo zamiast telefonu, zwiększa się znacznie dokładność pomiaru.