

### III.

## Badanie magnetycznych własności materiałów.

Badanie własności magnetycznych żelaza czy innych ciał paramagnetycznych wymaga odpowiedniej próbki tego ciała (pierścień, długi a cienki walec, elipsoid...) zależnie od metody pomiaru. Przy niektórych metodach można użyć kilku rodzajów próbek, przy innych tylko jednego, przepisanego. O ile próbka, skoro się stanie magnezem, ma wolne bieguny magnetyczne, wtedy trzeba stosownie do kształtu próbki wprowadzić pewne poprawki przy pomiarze.

Źródłem tych poprawek jest t. zw. natężenie odmagnesujące, powstające skutkiem tego, że wolne cząsteczki magnetyczne (istniejące przy wolnych biegunach) przeciwdziałają sile magnetycznej pola, tak, że wtedy rzeczywiste natężenie pola  $\mathfrak{H}_r$  jest od wytworzonego przez cewkę  $\mathfrak{H}$  mniejsze o natężenie odmagnesujące  $\mathfrak{H}_i$ , 
$$\mathfrak{H}_r = \mathfrak{H} - \mathfrak{H}_i.$$

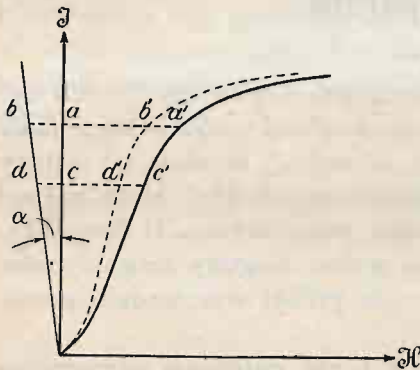
To  $\mathfrak{H}_i$  jest zależne od mocy magnetycznej  $\mathfrak{J}$  danego magnesu. Ponieważ moc magnetyczna nie jest u wszystkich magnesów jednostajna, lecz jest zależna od kształtu magnesu, przeto jest bardzo trudno obliczyć  $\mathfrak{H}_i$ . Tylko moc magnetyczna elipsoidu jest — według teorii — jednostajna, tak, że każda cząsteczka magnetyczna wywiera to samo działanie; dla elipsoidu jest więc  $\mathfrak{H}_i = c\mathfrak{J}$ , gdzie  $c$  jest to t. zw. współczynnik odmagnesujący, w tym wypadku stały. Tylko więc dla elipsoidu można zupełnie ściśle obliczyć rzeczywiste natężenie pola

$$\mathfrak{H}_r = \mathfrak{H} - c\mathfrak{J}.$$

Współczynnik odmagnesujący jest zależny od stosunku długości  $l$  magnesu (elipsoidu) do jego grubości  $d$ . Im większy jest ten stosunek, tem współczynnik mniejszy; wynosi on dla elip-

soidu n. p. przy  $\frac{l}{d}=5$   $c=0,701$ , przy 10  $c=0,255$ , przy 50  $c=0,018$ , przy 100  $c=0,0054$ , przy 300  $c=0,00075$ . Przy większych więc stosunkach  $\frac{l}{d}$  niż 300 można już położyć  $c=0$ .

Długie a cienkie pręty można uważać za elipsoidy o bardzo wielkim stosunku  $\frac{l}{d}$ , dlatego też tam, gdzie trzeba użyć do pomiaru próbki w kształcie pręta, musi on być długi a cienki; wtedy można nie uwzględnić wpływu końców pręta z wolnym magnetyzmem.



Rys. 75.

Ponieważ  $J = \frac{B - \mathfrak{H}}{4\pi}$ , można dla ciał o wielkiem  $\mu$  opuścić  $\mathfrak{H}$  względem  $B$ , a wtedy krzywa magnetyczna przedstawi w innej skali  $\mathfrak{J} = f(\mathfrak{H})$  (rys. 75.). W rzeczywistości krzywa magnetyczna ma inny przebieg z powodu mocy odmagnesującej  $\mathfrak{H}_i = c\mathfrak{J}$ . Obliczywszy więc z wymiarów magnesu stałą odmagnesującą  $c$ , otrzyma się dla każdego  $\mathfrak{J}$  odrazu  $\mathfrak{H}_i$ , bo

$$c = \frac{\mathfrak{H}_i}{\mathfrak{J}} = \operatorname{tg} \alpha;$$

wtedy prosta  $Ob$  przedstawia t. zw. linię ścinającą. Przez zmniejszenie odciętych  $\mathfrak{H}$ , odpowiadających różnym rzędnym  $\mathfrak{J}$ , o każdorazową wartość  $\mathfrak{H}_i = \mathfrak{J} \operatorname{tg} \alpha$ , otrzyma się nową rzeczywistą krzywą magnetyczną ( $ab = a'b'$ ,  $cd = c'd'$  i t. d.). Dla żelaza miękkiego przebieg ścięty bardzo mało się różni od wyznaczonego i do  $B \approx 12000$  jest prawie identyczny; powyżej tej wartości różnice się zwiększają. Stal ma linię ścinającą bardziej wybitną.

W ten sam sposób można zastosować ścinanie do hysterezy. O ile jednak idzie nie o sam przebieg hysterezy, lecz o obliczenie n. p. strat skutkiem hysterezy, to pamiętać należy, że powierzchnia objęta krzywą hysterezy się nie zmienia przy ścinaniu, jest ono zatem w takim wypadku zbyteczne.

Ścinanie należy stosować zawsze przy pomiarach, przy których próbki mają wolne bieguny. Zwykle odpowiednie przyrządy posiadają stałe linie ścinające, obliczone dla próbek o wymiarach wymaganych przez dane przyrządy.

## A. Wyznaczanie krzywych magnetycznych i hysterezy.

### Sposób postępowania.

Próbkę żelaza umieszcza się w uzwojeniu wzbudzającym, przez które przepuszcza się prąd, wytwarzający natężenie pola  $\mathfrak{H}$ , skutkiem tego próbka się nasycy; zależnie od metody wyznacza się przy zmianie  $\mathfrak{H}$  indukcyę  $\mathfrak{B}$  (lub moc magnetyczną  $\mathfrak{J}$ ) odpowiadającą danemu nasyceniu. Przeważnej większości metod używa się do wyznaczania zarówno krzywych magnetycznych, jak i hysterezy.

Przy krzywej magnetycznej zaczyna się od 0 i stopniowo zwiększając natężenie pola  $\mathfrak{H}$ , otrzymuje się odpowiednie wartości  $\mathfrak{B}$  lub  $\mathfrak{J}$ .

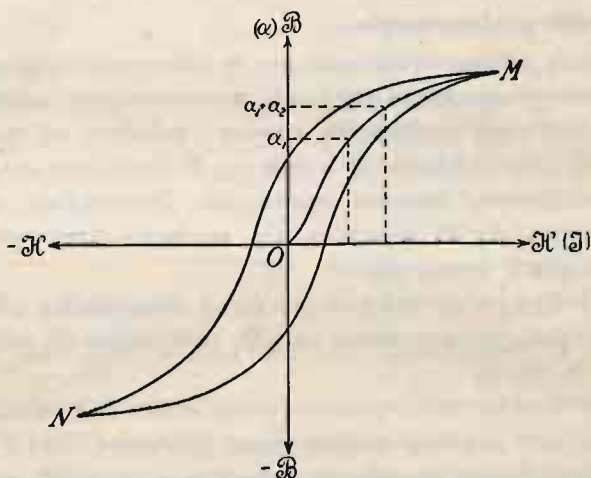
Przy hysterezie postępuje się zrazu tak samo, przez co otrzymuje się krzywą magnetyczną  $OM$  (rys. 76.); następnie przy odpowiednim nasyceniu żelaza n. p. w p.  $M$ , zaczyna się zmniejszać natężenie pola, przyczem otrzymuje się wartości inne niż na krzywej magnetycznej, mianowicie większe, a to skutkiem hysterezy. Po powrocie do  $\mathfrak{H}=0$ , przełącza się prąd i postępuje tak samo aż do p.  $N$ , który musi odpowiadać ściśle p.  $M$ . Następnie zmniejsza się  $-\mathfrak{H}$ , przechodzi przez 0 i znowu zwiększa  $+\mathfrak{H}$  aż do zamknięcia całego przebiegu w p.  $M$ .

Przy wykonywaniu pomiaru należy zachować następujące środki ostrożności:

1. Pomiar należy zaczynać od p. 0, t. j.  $\mathfrak{H}=0$  i  $\mathfrak{B}=0$  czyli, że próbka nie może być magnesem w chwili rozpoczęcia pomiaru. Dlatego trzeba przed pomiarem przekonać się, czy tak jest, wzgl. ją o d m a g n e s o w a ć. Najlepiej robi się to przepuszcza-

jąc przez cewkę wzbudzającą prąd przemienny i zmniejszając jego natężenie do 0. Jeżeli ma się do dyspozycji tylko prąd stały, to należy go przy zmniejszaniu ciągle komutować. O odmagnesowaniu próbki można się przekonać, badając odchylenia przyrządu mierniczego, odpowiadające danemu nasyceniu, przy puszczeniu w obu kierunkach. W ogóle są te odchylenia nierówne; przez komutowanie żelazo się odmagnesowuje, różnice wychyleń dostaje się coraz mniejsze, aż będą równe sobie; wtedy próbka jest odmagnesowana.

2. Przy zwiększaniu natężenia prądu zapomocą regulowania (zmniejszania) oporu obwodu wzbudzającego, należy opór stale zmniejszać; cofanie się t. j. chwilowe zmniejszanie prądu



Rys. 76.

jest niedopuszczalne, gdyż wtedy występuje działanie hysterezy i popełniony błąd odbija się na całym dalszym przebiegu.

Krzywą magnetyczną można także wyznaczyć zapomocą całego szeregu coraz większych przebiegów hysterezy, dokonanych na tej samej próbce. Wtedy krzywa łącząca punkty zwrotne wszystkich przebiegów będzie krzywą magnetyczną. Praktyczne znaczenie tego wyniku z obu uwag poprzednich.

Z pomiędzy licznych metod, używanych przy pomiarach magnetycznych, niektóre mają znaczenie bardziej fizykalne lub historyczne. Takimi są:

Magnetometr, polegający na działaniu próbki żelaza w kształcie pręta, który staje się magnesem skutkiem przepływu prądu przez cewkę otaczającą go, na igłę magnetyczną wolno zawieszoną na nitce kokonowej (magnetometr), opatrzonej lusterkiem; wychylenia igielki są proporcjonalne do momentu magnetycznego  $M$  magnesu (gdyż między momentem  $M$  a składową poziomą natężenia magnetycznego ziemi  $\mathfrak{H}_z$  istnieje ścisły związek, zależny od wychylenia igielki), znając więc  $\mathfrak{H}_z$  w danym miejscu można  $M$  wyznaczyć. Wtedy  $\mathfrak{S} = \frac{M}{V}$ , gdzie  $V$  jest to objętość magnesu.

Permeametr Thomsona, polegający na zasadzie, że między dwoma magnesami istnieje siła przyciągająca  $P$  zależna od indukcji  $P = \frac{\mathfrak{S}^2 q}{8\pi \cdot 981 \cdot 10^3} kg$ , gdzie  $q$  jest to przekrój sztabki magnesu.

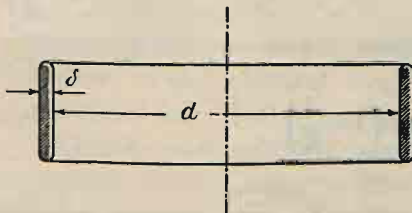
Waga magnetyczna Du Bois, polegająca na poprzedniej zasadzie, tylko bardziej dostosowana do badań praktycznych.

W praktyce używane są najczęściej do wyznaczania krzywych magnetycznych i hysterezy: metoda balistyczna, przyrząd Köppla i spirala bismutowa; w r. 1911 wprowadzono zaś nadzwyczaj dogodną metodę zerową.

Normy Związku niemieckich elektrotechników\*) przepisują tutaj metodę balistyczną albo przyrząd Köppla. Miarodajne wartości indukcji odnoszą się do 2 punktów: do 300 AZ/cm i do jednego z 100, 50 lub 25 AZ/cm.

### 1. Metoda balistyczna.

Próbka ma kształt pierścienia. Ponieważ indukcja magnetyczna na zewnętrznym obwodzie pierścienia jest mniejsza niż na wewnętrznym, powinna



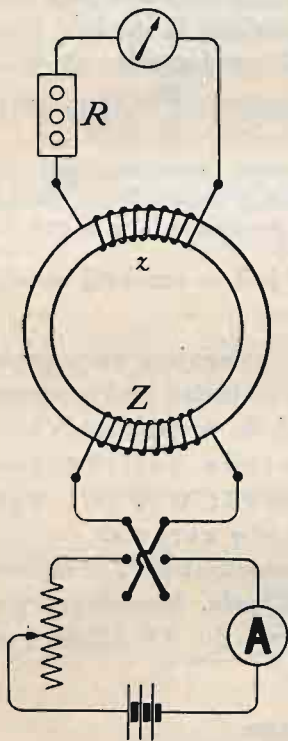
Rys. 77.

być grubość pierścienia mała wobec jego średnicy. Aby przy tym założeniu nie dostać za małego przekroju, najlepiej nadać mu kształt jak na rys. 77., przy czym  $\delta \leq \frac{1}{10} d$ . Pierścień powinien być ile

\*) ETZ 1910, str. 520.

możności jednolity t. j. nie spawany, albo złożony z blach odpowiednio wyciętych.

Pierścień (rys. 78.) owija się równomiernie izolowanym drutem o  $Z$  zwojach, przez który przepuszcza się prąd  $J$ ; natężenie prądu reguluje się oporem. Prócz tego znajduje się na pierścieniu cewka z drutu cienkiego o  $z$  zwojach, połączona z galvanometrem balistycznym; opór obwodu cewki niech będzie  $R$ .



Rys. 78.

Prąd  $J$  płynący przez zwoje  $Z$  wytwarza natężenie pola, jednostajne z powodu braku wolnych biegunów

$$\mathfrak{H} = \frac{0,4\pi JZ}{l},$$

gdzie  $l$  jest to średnia długość linii sił w pierścieniu. O ile natężenie pola  $\mathfrak{H}$  się zmieni, musi się zmienić i ciek  $\Phi = q\mathfrak{B}$ , którego zmiana powoduje powstanie  $SEM$  w cewce

$$e = -z \frac{d\Phi}{dt},$$

albo  $\int_{t_1}^{t_2} e dt = -z(\Phi_2 - \Phi_1) = -zq(\mathfrak{B}_2 - \mathfrak{B}_1)$ , gdzie  $\mathfrak{B}_2$  odpowiada indukcji w czasie  $t_2$  a  $\mathfrak{B}_1$  w czasie  $t_1$ .

$SEM$   $e$  powoduje w obwodzie cewki prąd  $iR$ , czyli

$$R \int_{t_1}^{t_2} i dt = -zq(\mathfrak{B}_2 - \mathfrak{B}_1),$$

gdzie  $\int_{t_1}^{t_2} i dt$  jest to ilość elektrycz-

ności mierzona galvanometrem balistycznym  $Q = c_b \alpha \left(1 + \frac{\Delta}{2}\right)$ .

Wobec tego będzie po opuszczeniu znaku  $-$ , (który oznacza tylko kierunek  $SEM$ ),

$$\mathfrak{B}_2 - \mathfrak{B}_1 = \frac{R c_b \alpha \left(1 + \frac{\Delta}{2}\right)}{zq}.$$

Widać ztąd, że zmiana indukcji, spowodowana zmianą prądu  $J$ , jest proporcjonalna do odchyżeń galvanometru balistycznego; jest więc możliwość wykreślenia krzywej magne-

tycznej (p. *rys. 76.*); przez zmianę skali dostać można odrazu  $\mathfrak{B}=f(\mathfrak{I})$ . Przy tem uważać należy, że  $\mathfrak{B}$  jest proporcjonalne do sumy poszczególnych odchyień  $\alpha$ .

Ażeby można było otrzymać odchylenia galwanometru proporcjonalne do indukcji odpowiadającej danemu prądowi (a nie do różnicy  $\mathfrak{B}_2-\mathfrak{B}_1$ ), czyli wprost  $\alpha=\alpha_1+\alpha_2$ , a że z powodu hysterezy nie można zaczynać stale od  $\mathfrak{I}=0$ , trzeba zastosować komutację za pomocą przełącznika\*). Wtedy dostaje się odchylenia proporcjonalne do zmiany prądu z  $+\mathfrak{I}$  do  $-\mathfrak{I}$ , a więc do  $2\mathfrak{I}$ , czyli  $2\alpha$ ; z tego można oczywiście tylko  $\alpha$  uwzględnić, dzieląc otrzymane odchylenia przez 2. Przy twardych materiałach (stal) nie otrzymuje się równych odchyień po przełączeniu prądu, co jednak w praktyce nie odgrywa zwykle większej roli.

Przy przełączaniu prądu mogą wystąpić dość duże iskry, skutkiem samoindukcji; można temu zapobiec przez włączenie równoległe oporu przed przełącznikiem (od strony pierścienia), przez który prądy przy przełączaniu mogą się wyrównywać. Do tego celu używa się także osobnych przełączników\*\*), które nie przerywają całkowicie prądu.

Przy zwykłej metodzie balistycznej trzeba uwzględnić poprawki ze względu na ciek rozproszony.

Jarzmo Hopkinsona.

Metoda balistyczna, w poprzedniej formie stosowana, jest niewygodna z tego względu, że próbce należy nadać przedtem odpowiedni kształt, a potem owinać ją drutem. Temu ostatniemu można zaradzić przez zastosowanie osobnej cewki rozcinanej i złączanej za pomocą zatyczek.

Hopkinson wprowadził tu ulepszenie, polegające na tem, że próbce nadaje się kształt pręta, który się wsuwa do jarzma magnetycznego, w ten sposób, iż cewka otacza pręt i wywołuje w nim ciek, zamykający się za pomocą jarzma. W środku cewki głównej znajduje się druga, którą łączy się z galwanometrem balistycznym.

Sposób postępowania przy pomiarze jest taki sam, jak poprzednio, tylko należy tu jeszcze zastosować ścinanie, ponieważ próbka ma wolne bieguny.

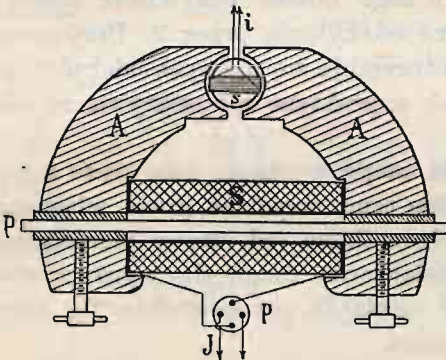
\*) Przełączanie jest zalecane przez Normy niem. elektr.

\*\*) Brion, Leitfaden, str. 176.

Powyższa metoda, w swoim czasie bardzo wygodna, nie może się obecnie ostać wobec metody zerowej, o której będzie mowa poniżej (p. str. 157.).

## 2. Przyrząd Köpsla.

Przyrząd Köpsla, wyrabiany przez firmę Siemens i Halske\*), polega na odwróconej zasadzie galwanometru Deprez-d'Arsonvala: jeżeli przez cewkę ruchomą galwanometru przepuszczać się będzie prąd o natężeniu stałym, to odchylenia cewki będą proporcjonalne do zmiennego pola magnetycznego. Tę zmianę pola magnetycznego wywołuje się właśnie przez zmianę prądu w cewce, otaczającej próbkę. Odchylenia więc galwanometru będą proporcjonalne do indukcji w próbce.



Rys. 79.

Przyrząd Köpsla składa się (rys. 79.) z jarzma magnetycznego  $A$  w kształcie półkola, obejmującego

końce próbki  $P$ . Cewka wzbudzająca  $S$  jest tak dobrana, że pole  $\mathfrak{H}$  przez nią wytworzone wynosi (w CGS) 100 razy natężenie prądu magnetyzującego  $m$  (w amp.)

$$\mathfrak{H} \text{ (CGS)} = 100 m \text{ (amp.)}$$

Opór cewki wynosi ok.  $1,8 \Omega$ . Działanie tej cewki na jarzmo jest zrównoważone dwiema cewkami dodatkowymi na jarzmie.

Jarzmo jest w środku wydrążone; tam znajduje się cewka ruchoma  $s$ . Prąd przechodzący przez tę cewkę dobiera się tak, aby można było przyrząd dostosować do każdego przekroju próbki, musi on więc wynosić

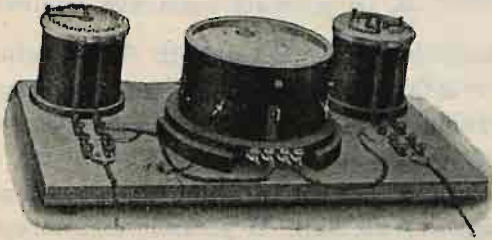
$$h \text{ (amp.)} = \frac{\text{stała przyrządu}}{\text{przekrój próbki}}$$

Odchylenia skazówki pokazują odrazu indukcję w CGS na  $cm^2$  i to w obie strony, a więc  $+\mathfrak{B}$  i  $-\mathfrak{B}$ .

\*) ETZ 1908. Nr. 25.



Natężenie prądu w cewce  $s$  jest stałe podczas całego pomiaru, natężenie prądu wzbudzającego reguluje się za pomocą osobnej opornicy. Przez nastawienie przełącznika można prąd puszczać w obie strony n. p. przy wyznaczaniu hysterezy. Za



Rys. 80.

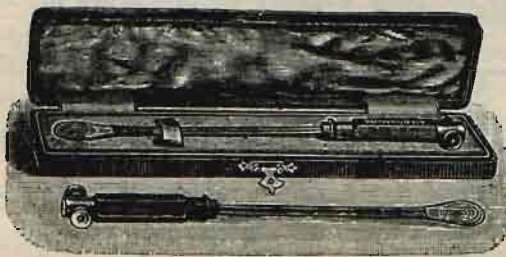
pomocą tego przełącznika i przy zmniejszaniu natężenia prądu wzbudzającego można również bardzo prędko próbkę odmagnesować.

Ponieważ próbka żelaza posiada wolne bieguny, należy zastosować ścinanie. W tym celu do przyrządu dołączone są linie ścinające. Z powodu jednak bardzo małej poprawki, można ścinania często nie uwzględniać.

Zestawienie przyrządu Köpsla z opornicami pokazuje *rys. 80.*

### 3. Spirala bismutowa.

Ten sposób polega na zjawisku, które odkrył Righi, że bismut zmienia swój opór w zmiennem polu magnetycznym. Tej zasady użyto do dwóch rodzajów przyrządów, zwykłej spirali bismutowej i spirali bismutowej w jarzmie magnetycznym.



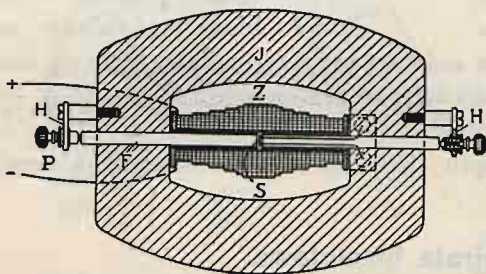
Rys. 81.

Spirala bismutowa. — Drucik bismutowy, mniej niż  $0,5\text{ mm}$  gruby, zwija się w kształcie dwunitkowej spirali, którą się umieszcza między płytkami miki. Końce drucika przylutowuje się do płaskich drucików miedzianych. Takiej spirali używa się n. p. do pomiarów indukcji w szczelinie maszyn elektrycznych, mierząc jej opór najlepiej w mostku Wheatstone'a. Ponieważ tu miarodajny jest przyrost oporu, trzeba przedtem pomierzyć jej opór

ponieważ próbka żelaza posiada wolne bieguny, należy zastosować ścinanie. W tym celu do przyrządu dołączone są linie ścinające. Z powodu jednak bardzo małej poprawki, można ścinania często nie uwzględniać.

poza polem magnetycznym, przy tej samej temperaturze, n. p.  $R_0$ . Następnie wsuwa się ją do szczeliny, nie zmieniając nic w połączeniach i mierzy się opór n. p.  $R$ . Do każdej spirali dodana jest krzywa cechowania, przedstawiająca zależność stosunku  $f = \frac{R - R_0}{R_0}$  od indukcji  $B$ , co pozwala oznaczyć wielkość indukcji, panującej w szczelinie w danej chwili. Tutaj odpowiada zmianie indukcji o 1000 CGS średnio 5% zmiany oporu spirali. W tej formie wyrabia takie spirale Hartmann & Braun (rys. 81.).

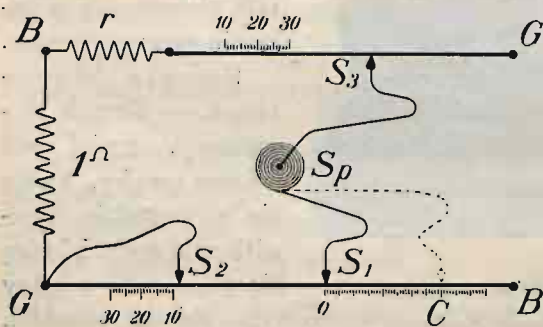
Spirala bismutowa w jarzmie służy do wyznaczania krzywych magnetycznych (rys. 82.). W jarzmie magnetycznym  $J$  znajduje się cewka  $Z$  otaczająca 2 próbki  $P$  w kształcie prętów.



Rys. 82.

Oba pręty przytykają do spirali bismutowej  $S$ , umieszczonej w środku cewki, tak, że przestrzeń wolna od żelaza (interfericum) jest zawsze ta sama (grubość spirali).

W ten sposób cały ciek przechodzący przez próbkę, przechodzi i przez spiralę. Przekrój jarzma jest przynajmniej 100 razy większy od przekroju próbki,



Rys. 83.

W ten sposób cały ciek przechodzący przez próbkę, przechodzi i przez spiralę. Przekrój jarzma jest przynajmniej 100 razy większy od przekroju próbki, tak, że można go nie uwzględniać. Sposób postępowania przy pomiarze jest podobny do poprzedniego.

Firma Hartmann & Braun, wyrabiająca tego rodzaju jarzma, dostarcza od razu całe urządzenie do pomiaru oporu spirali (rys. 83.). W jednej gałęzi jest wstawiony opór  $1 \Omega$ , w drugiej opór  $r$ , odpowiadający oporowi cewki przy niskiej temperaturze otoczenia ( $10^\circ \text{C}$ ) i drut mierniczy, po którym

ślizga się styk  $S_3$ ; trzecią stanowi drut mierniczy, mający na jednym końcu podziałkę, odpowiadającą temperatury podczas pomiaru i na tą temperaturę nastawia się styk  $S_2$ , na drugim końcu jest podziałka, dająca od razu procentowy przyrost oporu, a mianowicie  $f = \frac{R - R_0}{R_0}$ . Między stykami  $S_1$  i  $S_3$  jest umieszczona spirala. W p.  $BB$  przyłącza się baterię z kilku ogniw, w p.  $GG$  galwanometr. Najpierw znajduje się  $R_0$  za pomocą przesuwania  $S_3$  ( $S_1$  na 0), potem, po puszczeniu prądu przez cewkę wzbudzającą,  $R$  za pomocą przesuwania styku  $S_1$  (n. p. do p.  $C$ ).

Znając liczbę zwojów  $Z$ , prąd płynący przez nie i długość szczeliny między próbkami, można obliczyć  $H$ ; a z przyrostu oporu przy pomocy krzywej cechowanie indukcyję, a więc  $B = f(H)$ .

Ten sposób, jako polegający na przyjęciu, że ta sama indukcyja panuje w próbce co w spirali, nie może być tak ścisły, jak n. p. metoda balistyczna, choć dla celów technicznych jest dostatecznie dokładny. Jest on w praktyce dosyć niewygodny.

#### 4. Metoda zerowa.

Metoda zerowa została wprowadzona przez firmę Siemens i Halske\*) w miejsce balistycznej, która jest niedogodna z powodu żmudnego przeliczania i poprawek (ciek rozproszony!).

Metoda zerowa polega na zasadzie podobnej do pomiaru współczynnika indukcji wzajemnej przez porównanie (por. str. 80.), a mianowicie porównuje się próbkę badaną  $X$  z próbką normalną  $N$  (rys. 84.). Obie próbki umieszcza się w jednakowych cewkach  $Z_x$  i  $Z_n$ ; pola wytworzone przez nie są więc jednakowe. Cewki wtórne,  $z_x$  i  $z_n$  także jednakowe, łączy się z galwanometrem zwykłym i dwoma oporami do regulowania według układu połączeń. Prąd z baterji, którego natężenie mierzone ampermetrem  $A$  można regulować opornicą dodatkową, wytwarza pole w cewkach. Przez przełączanie prądu powstają w cewkach wtórnych  $SEM$ -e indukcji wzajemnej, powodujące prądy i odchylenia galwanometru. Przez dobór oporów  $R_x$  i  $R_n$  można sprowadzić galwanometr do 0.

\*) Lonkhuyzen, ETZ. 1911. Nr. 45.

Jeżeli przekroje próbek są  $Q_x$  i  $Q_n$ , to *SEM*-e indukowane w cewkach wtórnych mają się jak ciekli wzbudzające

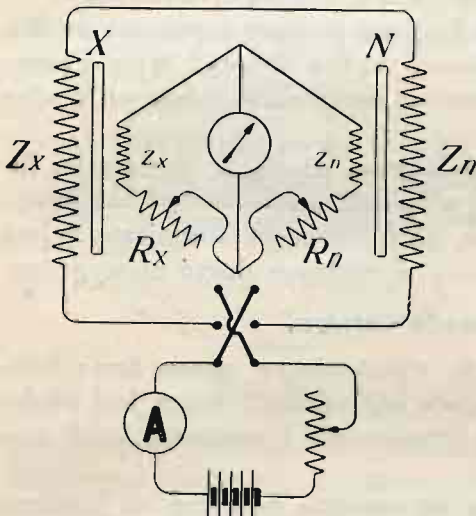
$$\frac{f e_x dt}{f e_n dt} = \frac{R_x f i dt}{R_n f i dt} = \frac{B_x Q_x}{B_n Q_n},$$

gdzie  $i$  jest to prąd powstający w obwodzie wtórnym. Jeżeli

$$Q_x = Q_n, \text{ to } B_x = B_n \frac{R_n}{R_x}.$$

Przez zastosowanie przy tej porównawczej metodzie jednakowych cewek i próbek niweczy się wpływ cieków rozproszonych, wolnych biegunów, temperatury, obcych pól magnetycznych itp., tak, że przez

proste odczytanie wartości oporów  $R_x$  i  $R_n$  oblicza się łatwo szukaną indukcję. Możliwe tu są jeszcze następujące uproszczenia. Jeżeli skala ampermetru podaje od razu natężenie pola w  $AZ/cm$ , a skala opornicy  $R_n$  indukcję  $B_n$ , to wtedy  $B_n = R_n$ , czyli, że przez zastosowanie odpowiedniej skali na opornicy  $R_x$ , można od razu odczytać wielkość indukcji w próbce przy danym natężeniu pola w  $AZ/cm$ . Jest to więc nad-



Rys. 84.

zwyczaj dogodna metoda, a badania okazały, że różnice w porównaniu z metodą balistyczną znajdują się w granicach błędów spostrzeżenia.

Na tej zasadzie wyrabia Siemens i Halske dwójakiego rodzaju przyrządy.

1. Do badania próbek (*rys. 85.*) w pojedynczych sztabkach 500  $m/m$  długich a 30  $m/m$  szerokich; kilka sztabek razem złożonych ma grubość 4  $m/m$ . Ciężar próbki jest przeszło 10 razy większy niż przy metodach jarzmowych, a że szerokość próbki jest przeszło 7 razy większa niż grubość, przeto wpływ stwardzonych przy cięciu krawędzi blach jest minimalny. Do wytworzenia 300  $AZ/cm$  trzeba przy 110  $V$  6 amp.

2. Do badania próbek ułożonych w czworoboku w przyrządzie Epstein'a (p. niżej). Za pomocą tego przyrządu można także badać próbki ze względu na stratność, o czym będzie mowa pod B.

## B. Pomiary strat w żelazie.

Żelazo, poddane działaniu pola magnetycznego przemiennego, powoduje dwojakiego rodzaju straty energii, wytwarzającej to pole, a mianowicie: 1. skutkiem hysterezy i 2. skutkiem prądów wirowych.

Według Steinmetza strata w  $1\text{ cm}^3$  żelaza skutkiem hysterezy wynosi  $p_h = \eta n B_{max}^{1,6} 10^{-7}$  watów,

gdzie  $B_{max}$  jest to największa wartość indukcji, osiągnięta przy przebiegu przemagnesowania,  $n$  częstość okresów,  $\eta$  stały współczynnik, zależny od rodzaju żelaza i wynoszący 0,001—0,005.

Strata w  $1\text{ cm}^3$  żelaza skutkiem prądów wirowych wynosi

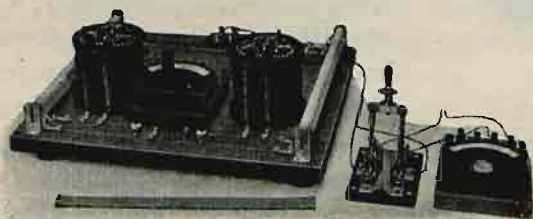
$$p_w = \beta f n^2 B_{max}^2 10^{-7} \text{ watów,}$$

gdzie  $\beta$  jest to współczynnik wprost proporcjonalny do grubości blachy a odwrotnie do jej oporu właściwego; wynosi on n. p. dla blach 0,5 mm grubych 2—6;  $f$  jest to współczynnik przebiegu krzywej napięcia (dla sinusoidy  $f=1,11$ ).

Te obie straty razem dają straty w żelazie

$$p_z = p_h + p_w.$$

Znajomość strat w żelazie jest rzeczą bardzo ważną przy obliczaniu maszyn elektrycznych i transformatorów. Normy



Rys. 85.

Związku niemieckich elektrotechników\*) wprowadzają w tej mierze pojęcie stratności (Verlustziffer); jest to całkowita strata w jednym kg żelaza, pomierzona

wattmetrem, przy indukcji  $B_{max} = 10000\text{ CGS}$  i  $15000\text{ CGS}$  i częstości  $n=50$ , przy temperaturze  $20^\circ\text{C}$ ; przebieg krzywej napięcia ma być sinusowy. Jako ciężar gatunkowy żelaza należy przyjąć

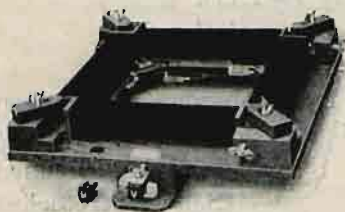
\*) ETZ. 1910. str. 520.

przy zwykłych blachach twornikowych 7,7, a przy aliażowych 7,5. Grubość blach ma być normalnie 0,3, 0,5 i 0,8 mm z dokładnością do  $\pm 10\%$ . Obwód magnetyczny ma być cały zamknięty badanem żelazem. Jako przyrząd najlepiej nadający się do pomiarów podany jest przyrząd Epsteina. Próbkę zastosowaną do tego przyrządu mają być 500 mm długie i 30 mm szerokie; połowa z nich ma być ostro krajana w kierunku zgodnym z kierunkiem walcowania a druga połowa prostopadle do niego.

Jako określenie starzenia się żelaza podana jest procentowa zmiana stratności przy  $B=10000$  CGS, po 600 godzinach ogrzewania przy 100°C.

### 1. Przyrząd Epsteina.

Przyrząd Epsteina \*) (*rys. 86.*) wynaleziony w r. 1900 i ulepszony przez niego samego w 1911\*\*) składa się z 4 jednakowych cewek ułożonych w czworobok i połączonych ze sobą. Do tych cewek wsuwa się pakiety blach o wymiarach podanych przez „Normy Z. N. E.” W porównaniu do starej konstrukcji różni się nowa tem, że cewka pierwotna w każdym z boków jest podzielona na kilka równoległe ze sobą połączonych części;



Rys. 86.

skutkiem tego w częściach pokrytych zwojami zapobiega się ciekowi rozproszonemu. Prócz tego zastosowano drugą cewkę, wtórną, umieszczoną wewnątrz pierwotnej; ma ona 100 m długości a 40 mm średnicy. Cewka pierwotna jest 1500 mm długa i ma 42 mm średnicy wewnętrznej. Przez tego rodzaju urządzenie można użyć tego przyrządu do wyznaczenia krzywych magnetycznych.

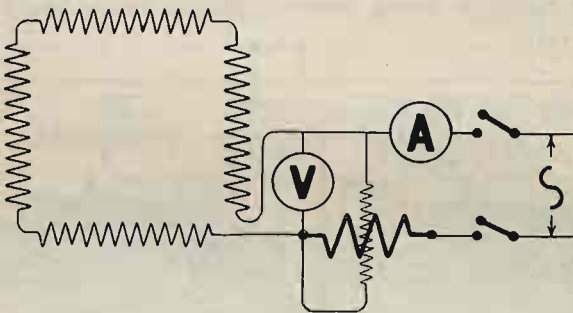
Zaletami przyrządu Epsteina są: Badanie większej ilości blach odrazu; próbki można łatwo umieścić w przyrządzie; obróbka próbek bardzo łatwa; obwód magnetyczny ciągły i z badanego materiału.

\*) ETZ. 1900. str. 303. i n. i 1905. str. 403. i n.

\*\*\*) ETZ. 1911. str. 334.; 1912. str. 262. i n.; 1912. str. 1180. i n.; 1913. str. 146. i n.

Przy wyznaczaniu strat w żelazie robi się następujące połączenie (*rys 87.*):

Cewki przyrządu łączy się z wattmetrem, voltmetrem i ampermetrem. Wtedy moc mierzona wattmetrem przy indukcji  $B=10000$  i  $15000$  CGS daje stratność; przy tem należy uwzględ-



Rys. 87.

nić moc straconą w przyrządach mierniczych. Indukcję  $B$  wyznacza się ze wzoru na napięcie na cewce, mierzone voltmetrem  $V$ ,

$$V = (4n f Z Q B \cdot 10^{-8} - JR) \text{ voltów,}$$

gdzie  $n$  jest to częstość okresów,  $f$  współczynnik przebiegu krzywej napięcia,  $Z$  liczba zwojów w 4 cewkach przyrządu,  $Q$  przekrój próbki żelaza (oblicza się go z średniej długości, ciężaru i ciężaru gat.),  $J$  prąd w cewce, a  $R$  jej opór.

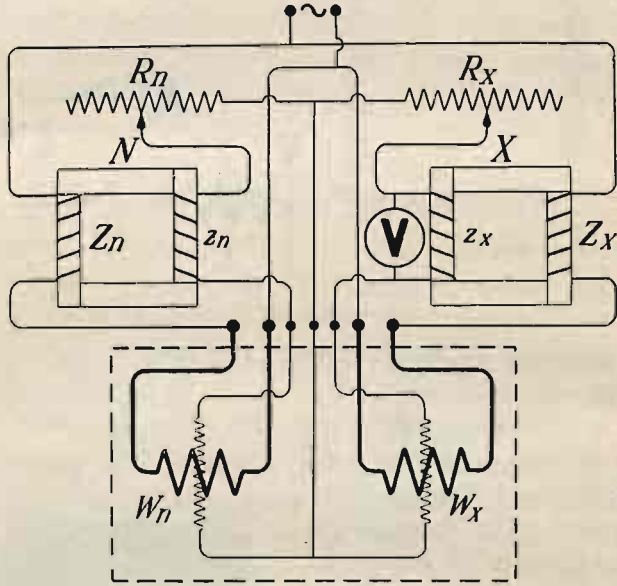
## 2. Metoda zerowa.

Wyznaczenie stratności za pomocą metody zerowej\*) polega na tej samej zasadzie co wyznaczanie krzywych magnetycznych, taką samą metodą.

Układ połączeń przedstawiony jest na *rys. 88.* Składa się on z 2 przyrządów Epstein'a, z których jeden jest normalny ( $N$ ), a drugi ( $X$ ) zawiera próbki badane; stratność próbki normalnej musi być znana i bardzo dokładnie wyznaczona. Oba uzwojenia pierwotne i wtórne obu przyrządów muszą być dokładnie takie same. Cewki pierwotne są połączone w szereg ze sobą i z dwoma jednakowymi wattmetrami  $W_n$  i  $W_x$ , a cewki wtórne i opornice do regulowania z cewkami upustowymi wattmetrów. Oba wattmetry są złączone w jeden przyrząd o 2

\*) ETZ. 1912. str. 231. i n. i 370. i n.

systemach połączeń i wspólnej skazówce. Jeżeli działania obu przyrządów są te same, to skazówka stoi na zerze. Będzie to wtedy, jeżeli opory  $R_x$  i  $R_n$  są równe i straty w obu próbkach te same. Jeżeli straty nie będą te same, to dostaniemy odchylenie woltmetru w jedną stronę, proporcjonalne do zużytej mocy, a więc do straty w danej próbce. Wattmetr można sprowadzić



Rys. 88.

do zera przez regulowanie oporów  $R_x$  lub  $R_n$ , podobnie jak przy wyznaczaniu krzywych magnetycznych. Straty  $p$  są więc proporcjonalne do oporów  $R$

$$\frac{p_x}{p_n} = \frac{R_x}{R_n},$$

z tego

$$p_x = p_n \frac{R_x}{R_n}.$$

Tutaj można także oznaczyć opornicę  $R_n$  jako równą  $p_n$ , a  $R_x$  zcechować według skali stratności i przez proste nastawienie woltmetru na zero odczytywać od razu stratność danej próbki.

Ponieważ jest to metoda różnicowa, przeto błędy wyniku będą tem mniejsze, im próbki będą do siebie bardziej zbliżone



tak wymiarami, jak i rodzajem. Z tego powodu dobrze jest brać, jako normalną, próbkę o średniej stratności.

Do nastawiania przyrządu na odpowiednią indukcję służy voltmetr  $V$ , załączony na krańcach cewki wtórnej przyrządu badanego; po nastawieniu odłącza się go, aby nie zużywał prądu. Można także mierzyć napięcie po stronie pierwotnej, ponieważ opór cewki jest bardzo mały; przeto odłączanie voltmetru może czasem odpaść.

Przyrząd na tej zasadzie polegający (*rys. 89.*) wprowadziła firma Siemens i Halske. Połączenia tego przyrządu



Rys. 89.

są tego rodzaju, że można go używać także do pomiaru stratności (cewki pierwotne połączone równolegle) jak i do wyznaczania krzywych magnetycznych (cewki w szeregu); cewki wtórne pozostają połączone szeregowo przy obu pomiarach.

Doświadczenia robione z tym przyrządem okazały ogromną jego praktyczność i dokładność. Wpływ temperatury podczas pomiaru, częstości okresów, współczynnika przebiegu krzywej napięcia i t. p. daje się odczuć tylko w minimalnym stopniu przez to, że równocześnie obie próbki podlegają tym zmianom, a działanie ich jest różnicowe.

Podczas pomiaru dobrze jest ustawić oba przyrządy nad sobą w odległości około 70 *cm*, aby na siebie wzajemnie nie wpływały.

Dokładność wattmetru różnicowego S. & H. wynosi około 1% na 1°, skazówkę można więc nastawić z dokładnością 0,1—0,2%.

Prócz przyrządu Epsteina, używa się także przyrządów Möllingera\*), który używa pierścienia jak przy metodzie balistycznej, tylko cewka jest tak zbudowana, że daje się wzdłuż otwierać (każdy zwój jest zakończony zatyczką i gniazdem)

\*) ETZ. 1901. str. 379.

i Richtera\*), który pozwala na badanie całych blach wsuwanych w cewkę w kształcie walca. W praktyce okazał się najlepszym przyrząd Epstein'a.

### 3. Rozdział strat w żelazie.

Straty w żelazie przedstawione równaniem

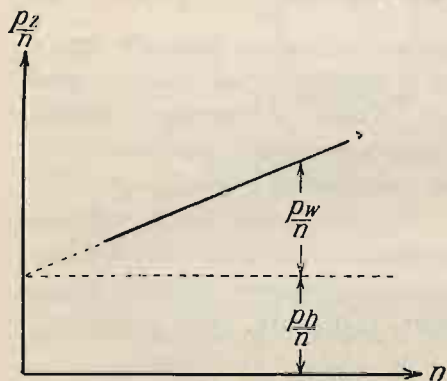
$$p_z = (\eta n B^{1,6} + \beta' n^2 B^2) 10^{-7} \text{ watów,}$$

gdzie  $\beta' = \beta f$ , można rozdzielić na  $p_h$  i  $p_w$  przez pomierzenie ich przy stałej indukcji a zmiennej częstotliwości okresów, gdyż powyższe równanie podzielone przez  $n$  przedstawi równanie prostej

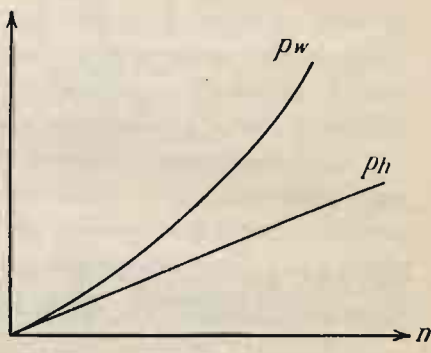
$$\frac{p_z}{n} = \frac{p_h}{n} + \frac{p_w}{n} = \alpha + \gamma n,$$

gdzie  $\alpha = \eta B^{1,6} 10^{-7}$ , a  $\gamma = \beta' B^2 10^{-7}$ .

Ponieważ przy  $n=0$  jest  $p_w=0$ , przeto  $\frac{p_h}{n} = \alpha$  przedstawia (rys. 90.) odcinek na osi rzędnych; jest to więc strata skutkiem



Rys. 90.



Rys. 91.

hysterezy podczas jednego okresu. Prosta równoległa do osi  $n$  w odstępnie  $\frac{p_h}{n}$  przedstawia więc każdorazową stratę skutkiem hysterezy, a reszta rzędnej stratę skutkiem prądów wirowych podczas jednego okresu.

Jeżeli poszczególne wartości  $\frac{p_h}{n}$  i  $\frac{p_z}{n}$  pomnoży się przez  $n$ ,

\*) ETZ. 1903. str. 341.

to otrzyma się (*rys. 91.*) krzywe  $p_h$  i  $p_w$  w zależności od częstości przy stałej indukcji.

Interesującym jest również przebieg krzywych strat przy stałym  $n$  a zmiennym  $B$ , wtedy  $p_h$  rośnie proporcjonalnie do  $B^{1,5}$  a  $p_w$  do  $B^2$ .

Jeżeli zaś utrzymuje się stałe napięcie, a zmienia się częstość, to moc stracona spada z rosnącą częstością okresów.

Znajomość poszczególnych strat w żelazie ma — prócz teoretycznego — także wielkie znaczenie praktyczne przy obliczeniach i pomiarach maszyn, transformatorów i przyrządów. Będzie o tem jeszcze mowa w II. tomie.

---

## IV.

### Badanie stanu izolacji i uziemienia.

Badanie stanu izolacji urządzeń elektrycznych polega na pomiarze oporu izolacji całego urządzenia lub jego poszczególnych części, a więc maszyn, przyrządów, przewodów i t. p., oraz na wyszukaniu ewent. błędu izolacji. Pomiar oporu izolacji maszyn elektrycznych będzie omawiany później, przy badaniach maszyn, tu zajmiemy się tylko sposobami pomiaru izolacji przewodów i całych urządzeń i to tak względem ziemi, jak i przewodów względem siebie, oraz sposobami wyszukania błędu izolacji.

Ze względu na ważność dobrego stanu izolacji na bezpieczeństwo publiczne normują Przepisy bezpieczeństwa urządzeń elektrycznych warunki jakim ma odpowiadać izolacja i w jakich dotyczące pomiary wykonywać należy.

Austryackie Przepisy bezpieczeństwa w następujący sposób określają przepisy co do stanu izolacji urządzeń elektrycznych (§. 104. wyd. 1911).

„Przed pierwszym puszczeniem w ruch każdego urządzenia elektrycznego o prądzie silnym, należy wykonać pomiar izolacji każdej części, o ile możności używając napięcia normalnego ruchu, conajmniej jednak napięcia wynoszącego 100 V. Przepis ten odnosi się również w razie rozszerzenia urządzenia.

Pomiar należy wykonać nie tylko celem wyznaczenia oporu izolacji pomiędzy przewodami a ziemią, ale ma być zmierzony przy tem i opór izolacji dwóch sąsiednich przewodów względem siebie, o ile między tymi przewodami istnieje różnica napięć. Przy pierwszym pomiarze należy bieguny izolowane każdego obwodu połączyć przewodząco ze sobą, przy drugim pomiarze należy oddzielić wszystkie żarówki, lampy łukowe, motory i resztę prąd zużywających przyrządów, natomiast wszystkie świece i istniejące należy przyłączyć, bezpieczniki założyć i wszystkie łączniki załączyć.

Obwody szeregowe wolno jednak przerywać tylko w jednym miejscu, przyczem należy je obrać o ile możności najbliższej takiego punktu,

którego napięcie wynosi połowę napięcia panującego na biegunach dotychczasowego źródła energii elektrycznej.

Przy pomiarach izolacji względem ziemi przy użyciu prądu stałego należy przyłączyć do badanego przewodu biegun ujemny źródła prądu, o ile niema żadnego powodu sprzeciwiającego się temu, a pomiar rozpocząć dopiero wtedy, gdy przewód znajdował się pod napięciem przez przeciąg jednej minuty.

Opór izolacji zmierzony przy tych pomiarach ma wynosić przynajmniej  $5000 \frac{E}{J}$  ohmów, przyczem  $E$  oznacza najwyższą (skuteczną) różnicę napięcia w voltach między dotyczącymi przewodami lub między przewodem a ziemią, a  $J$  natężenie (skuteczne) prądu w amperach, przechodzącego przez odnośne przewody podczas normalnego ruchu.

Badając izolację większej sieci przewodów nie potrzeba badać każdego odgałęzienia na opór izolacji, natomiast wystarczy stwierdzić, że opór izolacji całej sieci odpowiada wyż wymienionemu warunkowi i przenosi  $1000 \cdot E$  ohmów. O ile się okaże, że opór izolacji wynosi w najgorszym razie  $5000 \frac{E}{J}$  ohmów, atoli mniejszym jest niż  $1000 \cdot E$  ohmów, ma się odnośną sieć rozkładać na poddziały tak długo, aż zmierzony opór izolacji każdego osobnego poddziału przewyższa  $1000 \cdot E$  ohmów. Jeżeli wówczas każdy z poddziałów wykaże nadto opór izolacji równy conajmniej  $5000 \frac{E}{J}$  ohmów można przyjąć, że warunki przepisane co do izolacji zostały dotrzymane.

Opór izolacji przewodów powietrznych mierzony w czasie wilgotnym ma wynosić na  $1 \text{ km}$  włączonej podczas pomiaru długości przewodów, przy napięciu normalnem do  $300 \text{ V}$  conajmniej  $24000$  ohmów, przy napięciu między  $300$  i  $20000 \text{ V}$  co najmniej  $80$  ohmów na  $1 \text{ V}$ , a przy napięciu powyżej  $20000 \text{ V}$  conajmniej  $1600000$  ohmów“.

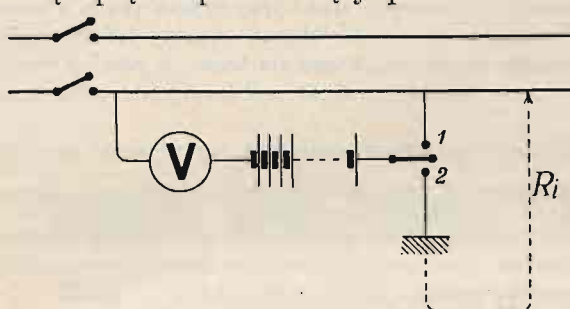
### 1. Pomiar oporu izolacji przewodów wyłączonych.

Jako źródło prądu do pomiaru użyć jest najlepiej baterji akumulatorów, będącej na miejscu lub pomocniczej, przenośnej; napięcie jej nie powinno być mniejsze niż  $100 \text{ V}$ . Zamiast akumulatorów można użyć prądu z generatora (prądu stałego), zasilającego daną sieć, od której odłączono przewody badane.

#### a) Opór przewodów względem ziemi.

Biegun dodatni baterji (*rys. 92.*) uziemienia się za pośrednictwem przełącznika, ujemny przyłącza się do badanego przewodu. W szereg z baterją jest umieszczony voltmetr  $V$  o dużym oporze  $R_v$ . Przy położeniu przełącznika na 1, voltmetr mierzy napięcie baterji  $V_1$ ; przy położeniu 2 odchylenie voltmetru  $V_2$  będzie mniejsze, gdyż wtedy obwód baterji zostanie

zamknięty oporem izolacji  $R_i$  przewodów względem ziemi, a więc prąd  $J$  przechodzący przez voltmetr będzie mniejszy.



Prąd  $J$  określony jest napięciem bateryi i oporem całego obwodu

$$J = \frac{V}{R_i + R_v + \rho'}$$

gdzie  $\rho'$  jest to opór wewnętrzny bateryi; jest on wobec  $R_i$  i  $R_v$  tak mały,

Rys. 92.

że można go zwykle nie uwzględniać. Prąd  $J$ , przechodzący wtedy przez voltmetr, wywołuje spadek napięcia

$$V_2 = JR_v,$$

czyli

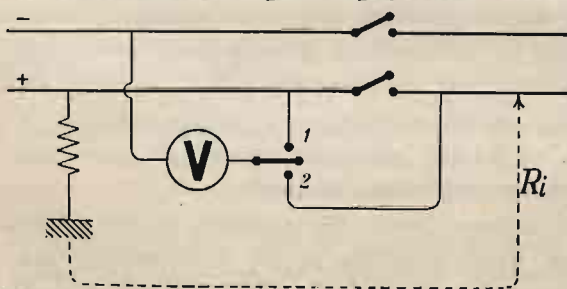
$$V_2 = \frac{V_1}{R_i + R_v} R_v;$$

z tego

$$R_i = R_v \left( \frac{V_1}{V_2} - 1 \right).$$

W ten sam sposób postępuje się z drugim przewodem. O ile idzie o pomiar oporu izolacji obu przewodów razem, albo całej sieci, trzeba połączyć matalicznie oba przewody — wystarczy zrobić to n. p. za pomocą kilku żarówek — a pomiar odbywa się tak samo jak poprzednio.

To samo można wykonać przy pomocy prądu (stałego) z generatora (rys. 93.); stosuje się to zwłaszcza wtedy, kiedy cała instalacja jest pod napięciem, a bada się jedną część odłączoną, np. złącza



Rys. 93.

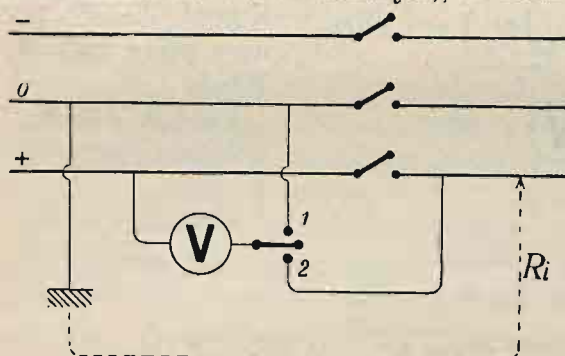
domowy. Wtedy trzeba zwrócić uwagę na to, że albo maszyna albo reszta instalacji może być uziemiona celowo lub przypadkowo. Uważać więc należy, aby nie spowodować zwarcia.

W tym celu uziemia się jeden biegun (dodatni) nie wprost, lecz przez jakiś znaczny opór  $r$  n. p. przez ża-

rówkę, wtedy unika się zwarcia na wypadek gdyby drugi biegun był uziemiony. Sposób postępowania jest taki sam jak poprzednio. Przy położeniu przełącznika na 1 mierzy się  $V_1$ , przy położeniu na 2  $V_2$ ; wtedy

$$R_i = R_v \left( \frac{V_1}{V_2} - 1 \right) - r.$$

Opór  $r$  żarówki jest często tak mały wobec reszty (żarówka metalowa w stanie zimnym), że można go nie uwzględnić.



Rys. 94.

W sieciach trójprzewodowych z uziemionym przewodem zerowym uziemienia osobnego nie potrzeba, a układ połączeń robi się według rys. 94.

Przy prądzie przemiennym postępuje się tak

samo jak przy stałym, przy zastosowaniu baterji pomocniczej.

### b) Opór przewodów względem siebie.

Sposób postępowania jest podobny jak pod a); odpada tylko wtedy uziemienie. Naprzód mierzy się napięcie baterji  $V_1$ , potem załącza się baterję między oba przewody i mierzy napięcie  $V_2$ . Opór izolacji oblicza się według tego samego wzoru, jak pod a).

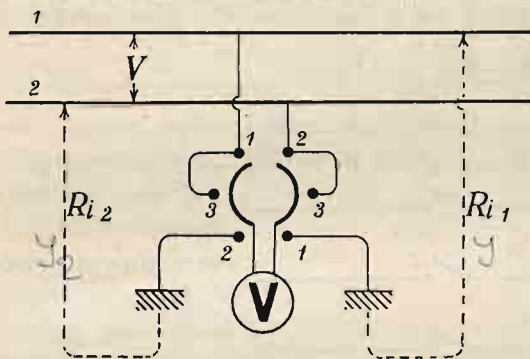
## 2. Pomiar oporu izolacji przewodów załączonych.

(Metoda Frischa).

Gdy się ma pomierzyć opór izolacji całego urządzenia podczas ruchu, a więc sieci przewodów z maszynami, przyrządami, lampami i t. p., to nie można zastosować metod poprzednich, nie pozwalających pomierzyć odrazu oporu całej izolacji względem ziemi, lecz tylko każdego przewodu z osobna.

Voltmetr  $V$  załącza się (rys. 95.) za pomocą przełącznika raz między przewód a ziemię (położenie 1—1), wtedy pokazuje napięcie  $V_1$ , drugi raz między przewód 2 a ziemię (2—2), napięcie  $V_2$ , a wreszcie między oba przewody (3—3), napięcie  $V$ .

W położeniu 1—1 opór woltmetru  $R_v$  jest załączony równolegle do oporu izolacji  $R_{i1}$  przewodu 1; wtedy prąd  $J_2$  płynący z przewodu 2



Rys. 95.

przez opór  $R_{i2}$  do przewodu 1, rozdziela się na prąd  $J'_1$  płynący przez woltmetr i prąd  $J_2 - J'_1$  płynący przez opór  $R_{i1}$ . Wtedy

$$V = J_2 R_{i2} + J'_1 R_v,$$

podobnie przy (przeł. 2—2)

$$V = J_1 R_{i1} + J'_2 R_v;$$

ponieważ wtedy  $J_2 = J'_1 \frac{R_{i1} + R_v}{R_{i1}}$ , a podobnie  $J_1 = J'_2 \frac{R_{i2} + R_v}{R_{i2}}$ ,

przeto

$$V = J'_1 R_{i2} \frac{R_{i1} + R_v}{R_{i1}} + J'_1 R_v,$$

oraz

$$V = J'_2 R_{i1} \frac{R_{i2} + R_v}{R_{i2}} + J'_2 R_v;$$

z tego  $J'_1 \left( R_{i2} \frac{R_{i1} + R_v}{R_{i1}} + R_v \right) = J'_2 \left( R_{i1} \frac{R_{i2} + R_v}{R_{i2}} + R_v \right)$ ,

$$\frac{J'_1}{J'_2} = \frac{\frac{R_{i1} R_{i2} + R_{i2} R_v + R_{i1} R_v}{R_{i1}}}{\frac{R_{i2} + R_v}{R_{i2}} + R_v} = \frac{R_{i1}}{R_{i2}}.$$

Podstawmy to w równanie na  $V$ :

$$V = \left[ \frac{J'_2}{J'_1} (R_{i1} + R_v) + R_v \right],$$

$$V = \left[ \frac{J'_1}{J'_2} (R_{i2} + R_v) + R_v \right].$$

Z tego

$$R_{i1} = \frac{V - R_v (J'_1 + J'_2)}{J'_2},$$

$$R_{i2} = \frac{V - R_v (J'_1 + J'_2)}{J'_1}.$$

Ponieważ  $J'_1 R_v = V_1$ , a  $J'_2 R_v = -V_2$ , — znak — jest tu wzięty dla oznaczenia, że odchylenia będą przeciwne, — jeżeli n. p. przewód 1 jest dodatni, a 2 ujemny, to



$$R_{i_1} = R_v \frac{V - V_1 + V_2}{-V_2},$$

$$R_{i_2} = R_v \frac{V - V_1 + V_2}{V_1}.$$

Opór  $R_i$  izolacji obu przewodów razem wziętych obliczy się według  $\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_{i_1}} + \frac{1}{R_{i_2}}$ ,

$$R_i = R_v \frac{V - V_1 + V_2}{V_1 - V_2} = R_v \left( \frac{V}{V_1 - V_2} - 1 \right).$$

Zamiast napięć  $V_1$  i  $V_2$  można wstawić odpowiednie odchylenia w podziałkach. W układach dwuprzewodowych odchylenia będą zawsze w stronę przeciwną, wstawiamy więc je do wzoru ze znakiem dodatnim.

W układach trójprzewodowych z izolowanym przewodem zerowym można również zastosować tę samą metodę. Jeżeli napięcie względem ziemi przewodu pierwszego nazwiemy  $V_1$ , zerowego  $V_0$ , a drugiego  $V_2$ , to opór izolacji całego układu będzie

$$R_i = R_v \left( \frac{V}{V_1 - V_0} - 1 \right) = R_v \left( \frac{V}{V_0 - V_2} - 1 \right).$$

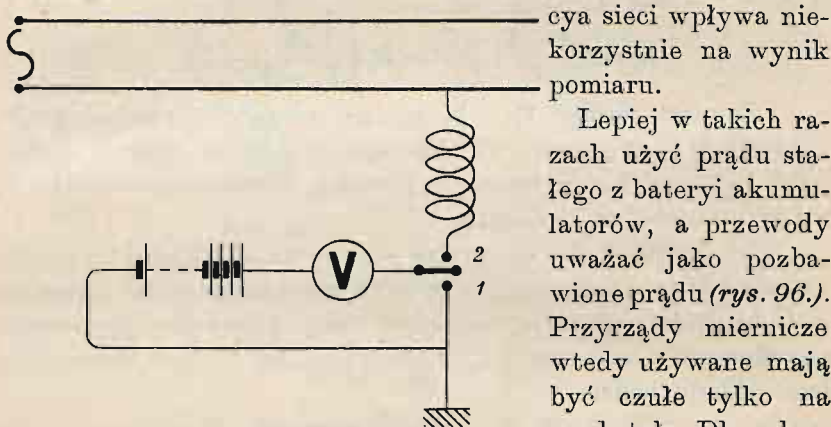
Wyprowadzenie powyższego wzoru odbywa się w sposób podobny do poprzedniego; nie przedstawia ono jednak nic ciekawego, dlatego je pominięto; można to znaleźć w dziełach specjalnych, podanych niżej.

Z powyższych wzorów widać, że opór galwanometru powinien być możliwie mały. Jeżeli  $R_v$  jest wobec  $R_i$  duże, musi być wyraz w nawiasie mały, t. zn.  $\frac{V}{V_1 - V_2}$  nie wiele większy niż 1; skutkiem tego mały błąd spostrzeżenia powoduje duży błąd wyniku.

W układach trójprzewodowych z uziemionym przewodem zerowym, oraz wogóle w sieciach, w których jest jeden przewód uziemiony, nie można, rozumie się, zastosować powyższej metody do pomiaru izolacji. Można tu tylko zbadać stan izolacji zapomocą ampermetru załączonego między przewód zerowy a ziemię. Jeżeli wtedy odchylenie galwanometru jakie sprawia prąd płynący normalnie z przewodu zerowego do ziemi, nazwiemy dodatni, to dodatnie odchylenie

świadczy o lepszym stanie izolacji strony dodatniej sieci, a ujemne o lepszym stanie strony ujemnej.

Przy pomiarze izolacji sieci prądu przemiennego można postępować według metody poprzedniej; jest to jednak bardzo niedokładne, gdyż przyrządy miernicze do prądu przemiennego są mało czułe, a prócz tego pojemność i samoinduk-



Rys. 96.

Lepiej w takich razach użyć prądu stałego z baterji akumulatorów, a przewody uważać jako pozabawione prądu (rys. 96.). Przyrządy miernicze wtedy używane mają być czułe tylko na prąd stały. Dla ochrony voltmetru włącza

się w szereg z nim cewkę indukcyjną o bardzo małym oporze ohmowym, wtedy przechodzi przez niego także prąd przemienny (do ziemi), ale ten jest tak mały, że go nie uszkodzi. Sposób postępowania jest taki sam jak pod 1a).

### 3. Wyznaczenie miejsca błędu izolacji.

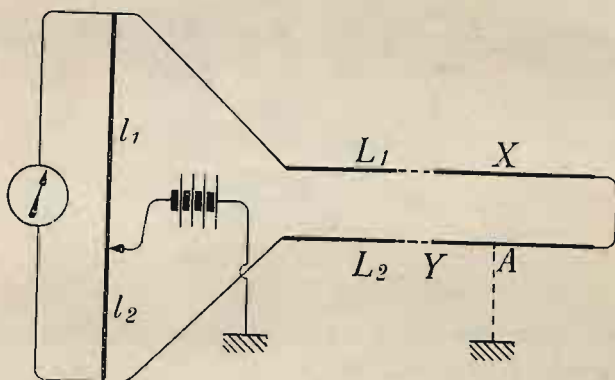
Jeżeli w sieci przewodów elektrycznych powstał błąd, czy to przez zwarcie przewodów ze sobą, czy też przewodu z ziemią — przyczem przez zwarcie rozumieć będziemy nie tylko bezpośrednie zetknięcie się przewodów ze sobą lub z ziemią, ale i niedopuszczalne zmniejszenie się oporu izolacji w jakimś miejscu — należy napróżd błąd zlokalizować, t. j. oznaczyć w którym z przewodów, albo w której z części tegoż ten błąd się znajduje. W tym celu dzieli się sieć na poszczególne części (za pomocą wyjmowania bezpieczników, albo w ostateczności za pomocą przecięcia przewodów) tak długo, aż dostanie się ten kawałek przewodu, w którym jest miejsce błędu. Znajduje się to za pomocą miernika izolacji, załączonego do

rozdzielniczy lub przewodów głównych; w razie gdy wychylenie skazówki miernika zniknie po odłączeniu jakiego przewodu, błąd znajduje się właśnie w tym przewodzie.

Wtedy można przystąpić do szczegółowego obejrzenia i zbadania dotyczącego przewodu lub do rachunkowego wyznaczenia miejsca błędu.

#### a) Zwarcie z ziemią.

Najlepsza jest metoda mostku Wheatstone'a; można ją jednak zastosować tylko wtedy, jeżeli przekrój przewodu jest na całej długości ten sam, a długość jego znana; jeżeli prze-



Rys. 97.

kroje są różne, to trzeba je zredukować do jednego przekroju, t. j. wyznaczyć długości, jakieby te części miały, gdyby były o tym samym przekroju a odpowiednim oporze. Bardzo często przewód doprowadzający i odprowadzający są położone obok siebie, wtedy bierze się oba w rachubę; jeżeli tak nie jest, a oba końce przewodu są od siebie oddalone, to trzeba położyć przewód pomocniczy o znanej długości.

#### Metoda Murray'a.

Końce obu przewodów o długości  $L_1$  i  $L_2$  o przekroju  $q_1$  i  $q_2$  łączy się z jednej strony ze sobą za pomocą grubego drutu, a z drugiej przyłącza do drutu mierniczego według mostku Kirchhoffa (rys. 97.) (lub do dwóch opornic według mostku Wheatstone'a). Galwanometr załącza się w upuście do drutu, a baterię, uziemioną jednym biegunem, — do styku ruchomego. Jeżeli n. p. w p. A jest zwarcie z ziemią, to prąd z baterii przechodzi przez mostek a wraca przez błąd i ziemię

napowrót. Wtedy cały przewód rozpada się na dwie części  $X$  i  $Y$ , tak że  $X+Y=L_1+L_2$ , gdzie  $L_1$  wzgl.  $L_2$  są to długości przewodu doprowadzającego wzgl. odprowadzającego.

Sposób postępowania przy pomiarze jest taki sam, jak przy pomiarze oporu mostkiem Kirchhoffa. Jeżeli galwanometr stoi na 0, to

$$\frac{R_x}{R_y} = \frac{l_1}{l_2},$$

gdzie  $R_x$  i  $R_y$  są to opory poszczególnych gałęzi,

$$R_x = \frac{X}{\lambda q_1},$$

$$R_y = \frac{L_1 - X}{\lambda q_1} + \frac{L_2}{\lambda q_2} = \frac{L_1 q_2 - X q_2 + L_2 q_1}{\lambda q_1 q_2},$$

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{X q_2}{L_1 q_2 - X q_2 + L_2 q_1},$$

z tego

$$X = \frac{l_1 (L_1 q_2 + L_2 q_1)}{q_2 (l_1 + l_2)},$$

$$X = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \frac{L_1 q_2 + L_2 q_1}{q_2}.$$

Jeżeli oba przewody są o tej samej długości i grubości, to  $L_1 = L_2 = L$ ,  $q_1 = q_2 = q$ , wtedy

$$X = 2L \frac{l_1}{l_1 + l_2},$$

gdzie  $L$  jest to pojedyncza długość kabla.

W podobny sposób można obliczyć  $Y$ , i zwykle dla kontroli się oblicza, a z obu wartości bierze się średnią.

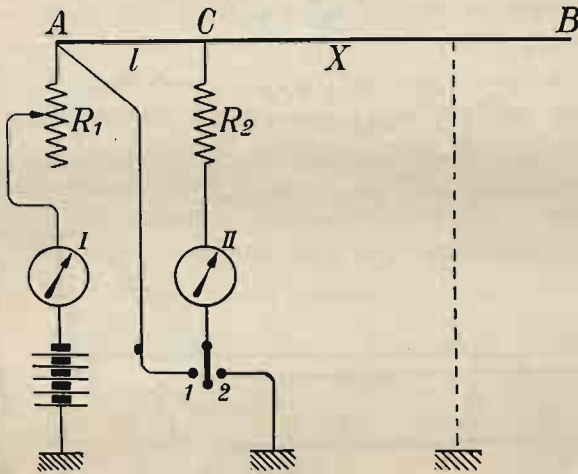
W razie gdy przewodu (albo kabla) powrotnego nie ma, to trudno jest pomierzyć dokładnie miejsce błędu izolacji. Najlepszą metodą wtedy jest następująca (*rys. 98*):

Potrzebne są do tego 2 galwanometry. Jeden (I) załącza się na końcu  $A$  w szereg z uziemioną baterią. Za pomocą oporu  $R_1$  reguluje się na stały prąd. Drugi galwanometr (II) przyłącza się w p.  $C$ , przyczem kawałek kabla  $AC$  o długości  $l$  musi mieć dobrą izolację. Opór gałęzi galwanometru II musi być dosyć duży w porównaniu z obwodem kabla z błędem.

Przez nastawienie przełącznika na 1 dostaniemy odchylenie  $\alpha_1$ , na 2 odchylenie  $\alpha_2$ . Opór  $R_2$  trzeba tak dobrać, aby odchylenie  $\alpha_2$  było największe w granicach skali.

Następnie przenosi się galwanometr II wraz z oporem  $R_2$  na drugi koniec kabla i uziemia. Prąd z baterji musi być ten sam co poprzednio. Jeżeli odchylenie galwanometru II będzie wtedy  $\alpha_3$ , to odległość miejsca błędu od p. C będzie

$$X = l \frac{\alpha_2 - \alpha_3}{\alpha_1}.$$



Rys. 98.

Jeżeli w przewodzie jest nie jeden błąd, lecz dwa lub więcej, to powyższe pomiary dają tylko jakiś punkt pośredni, leżący bliżej większego błędu. Skoro więc nie można znaleźć błędu w wyznaczonym miejscu, to trzeba przewód w tem miejscu przeciąć i pomiar powtórzyć dla obu kawałków.

#### b) Zwarcie dwóch przewodów.

Jeżeli między 2 przewodami jest zwarcie bezpośrednie lub za mały opór izolacji, jednak bez zwarcia z ziemią, to trzeba zastosować podwójną obserwację, aby znaleźć miejsce zwarcia.

Dwa końce obu przewodów (o tej samej długości  $L$  i przekroju  $q$ ) łączy się z drutem mierniczym według *rys. 99*.  $R'$  jest to opór porównawczy; drugie dwa końce mogą być wolne i niepołączone ze sobą. Opór zwarcia niech będzie  $\varrho$ . Wtedy znaleziony opór  $R_1 = R'_1 \frac{l'_1}{l'_2} = 2X + \varrho$ .

Podobnie postępuje się po drugiej stronie z dwoma drugimi końcami; wtedy  $R_2 = R'_2 \frac{l''_1}{l''_2} = 2Y + \varrho$ .

$$R_1 - R_2 = 2X - 2Y = 2X - 2(L - X) = 4x - 2L,$$

$$X = \frac{R_1 - R_2 + 2L}{4} \text{ w ohmach.}$$

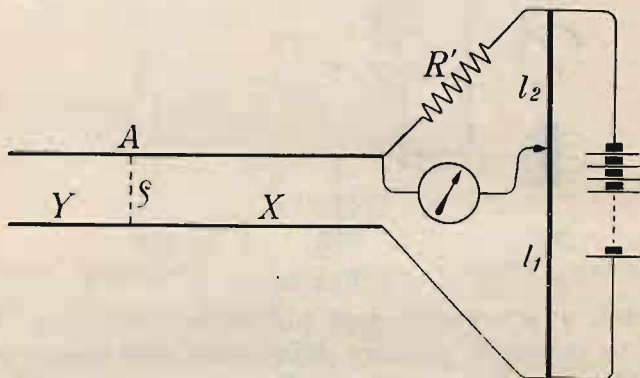
Jeżeli przewody nie są jednakowe, to trzeba to uwzględnić podobnie jak pod a).

Jeżeli przekroje przewodów są te same, to

$$\frac{X^\Omega}{L^\Omega} = \frac{X^m}{L^m},$$

$$X^m = \frac{R_1 - R_2 + 2L^\Omega}{4L^\Omega} L^m \text{ w metrach.}$$

Do wyznaczenia miejsca błędu trzeba więc znać opór jednego przewodu  $L^\Omega$  i jego długość  $L^m$ .



Rys. 99.

Metod służących do pomiarów izolacji sieci jest bardzo wiele; tutaj podane są najważniejsze, przy których używa się przyrządów laboratoryjnych.

W praktyce używa się do tego celu osobnych przyrządów t. zw. mierników izolacji, za pomocą których można w szybki i łatwy sposób dojść do zadowalających wyników.

#### 4. Badanie stanu uziemienia.

Badanie stanu uziemienia urządzeń elektrycznych polega głównie na pomiarze oporu uziemienia.

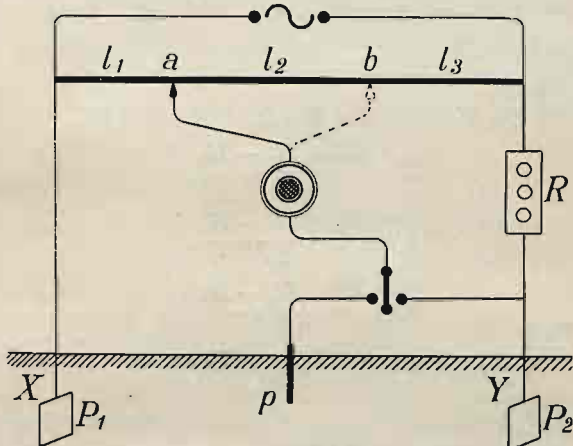
Opór uziemienia jest to opór przejściowy od przewodnika położonego w ziemi, stanowiącego t. zw. uziemienie, do samej ziemi. Uziemienie robi się zwykle z płyt lub rur miedzianych lub żelaznych, umieszczonych w ziemi wilgotnej lub przynaj-

mniej zmieszanej z tłuczonym koksem; najlepsze uziemienie stanowi połączenie przewodów elektrycznych z rurociągami wodnymi lub gazowymi. Z natury rzeczy wynika, że opór uziemienia powinien być jak najmniejszy, aby uziemienie było jak najlepsze; zależny jest on od wielkości płyt uziemiających, stanu ziemi i t. p. i waha się zwykle w granicach 1—100 a nawet więcej ohmów, przyczem mniejszy niż 4—5  $\Omega$  uważa się za dobry.

Do pomiaru oporu uziemienia należy używać prądu przemiennego lub przerywanego; przy prądzie stałym występują zjawiska polaryzacji i elektrolizy, które szkodzą pomiarowi.

Najlepszym sposobem pomiaru oporu uziemienia jest:

a) Metoda Wiecherta. — Dwie płyty uziemiające  $P_1$  i  $P_2$  łączy się z drutem mierniczym w sposób wskazany na rys. 100. W szereg z jedną płyt ( $P_2$ ) umieszcza się opór  $R$



Rys. 100.

(kilkanaście ohmów). Między nimi wbija się do ziemi zawilgoconej pręt żelazny  $p$ .

Za pomocą przełącznika załącza się telefon  $t$  raz do uziemienia pomocniczego  $p$ , drugi raz do płyty  $P_2$  i szuka na drucie mierniczym miejsca równego potencjału ( $a$  z  $p$ ,  $b$  z  $P_2$ ). Jeżeli opór przejściowy płyty  $P_1$  oznaczmy przez  $X$ , a płyty  $P_2$  przez  $Y$ , to po sprowadzeniu układu do równowagi będzie

$$X : Y : R = l_1 : l_2 : l_3,$$

z tego

$$X = R \frac{l_1}{l_3}, \text{ a } Y = R \frac{l_2}{l_3},$$

Opór  $R$  powinien być tak dobrany, aby był zbliżony do oporu płyt. Opory przewodów łączących należy odjąć od wyniku.

W ten sposób otrzymuje się właściwie wartości oporów między płytami a prętem pomocniczym; opór ziemi jest jednak tak mały, że się go nie uwzględnia, a opór prętu nie wchodzi w rachubę, bo przez niego prąd nie płynie.

Jeżeli jest tylko jedna płyta uziemiająca, której opór przejściowy ma się wyznaczyć, to trzeba sporządzić drugie uziemienie pomocnicze, n. p. z taśmy stalowej 25 mm szerokiej i 1 m długiej, zanurzonej w studni, rzece, stawie i t. p. (Bardzo czysta woda jest złym przewodnikiem!).

b) Przy uziemieniu ochronników w sieciach trójprądowych ma się do czynienia zwykle z trzema płytami uziemiającymi, których opory przejściowe  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  trzeba wyznaczyć. Wtedy za pomocą mostku Wheatstone'a lub drutu mierniczego mierzy się opory

$$X + Y = R_1, \quad Y + Z = R_2 \quad \text{i} \quad Z + X = R_3,$$

z ąd |

$$X = \frac{R_1 + R_3 - R_2}{2},$$

$$Y = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2},$$

$$Z = \frac{R_2 + R_3 - R_1}{2},$$

Oporu ziemi i przewodów łączących można nie uwzględniać.

Do badań stanu izolacji i uziemienia służą także osobne przyrządy, pozwalające w krótkim czasie i z łatwością uskutecznić pomiary.

Literatura specjalna:

Raphael Apt: Isolationsmessungen und Fehlerortbestimmungen, wyd. II. 1911.

Fröhlich: Isolations- und Fehlerbestimmungen, 1895.