

ROZDZIAŁ XXVIII.

Wzorce stosowane przy pomiarach elektrotechnicznych.

W miernictwie elektrotechnicznym są dwie jednostki określone ściśle przez prawa państwowe: amper i om.

Amper międzynarodowy jest to jednostka siły prądu określona w sposób następujący: siłę jednego ampera ma prąd stały, który w ciągu jednej sekundy wydziela 0,001118 *gr* srebra z roztworu azotanu srebra w najdogodniejszych warunkach rozkładu.

Om międzynarodowy jest to jednostka oporu określona w sposób następujący: opór jednego oma ma słup rtęci w temperaturze 0° C., którego długość przy jednostajnym przekroju wynosi 106,3 *cm*, a masa 14,4521 *gr*, w tych warunkach przekrój mało różni się od 1 *mm*².

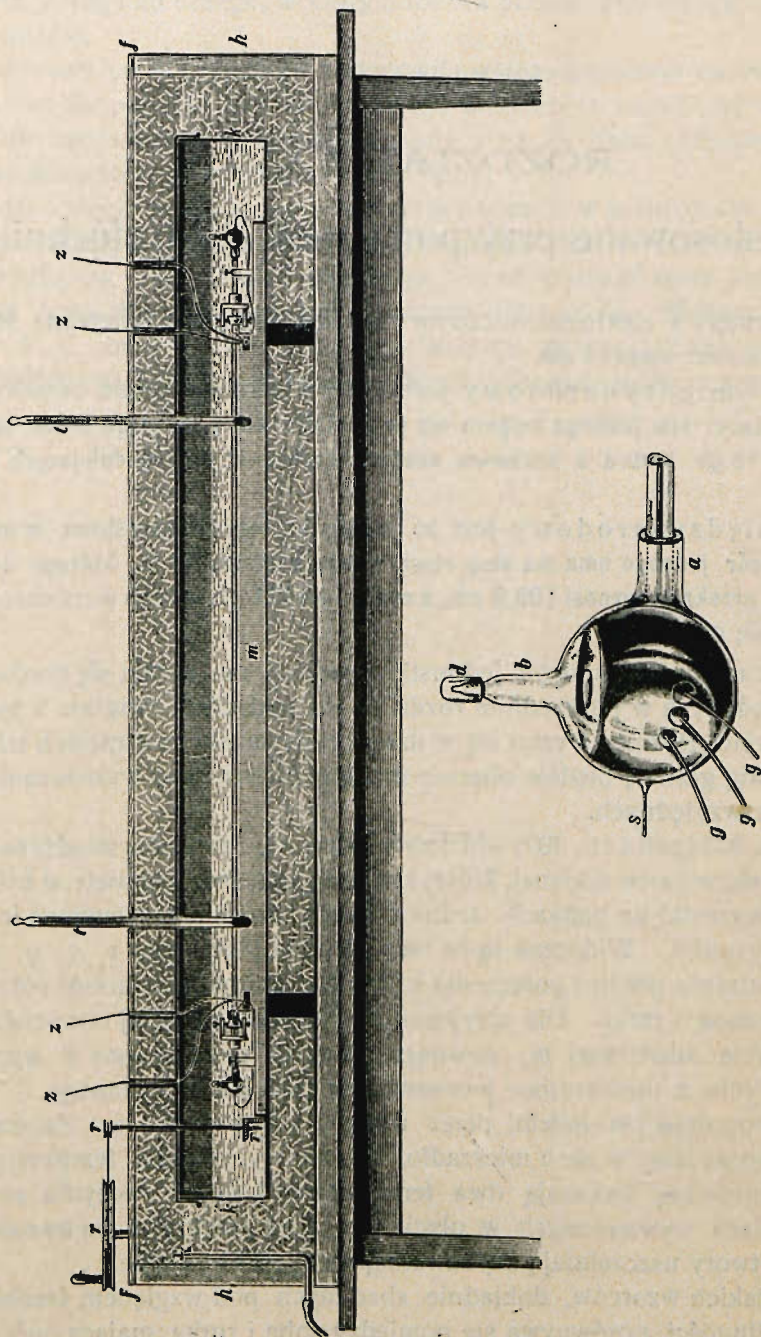
Określone w ten sposób jednostki: amper i om różnią się bardzo mało od jednostek podanych w poprzednim rozdziale na podstawie związku z jednostkami bezwzględными. Różnica wyrazi się w dziesięciotysięcznych częściach ich wartości, które stanowią granicę błędów obecnie nieuniknionych przy wyznaczaniu wartości jednostek bezwzględnych.

Na rys. 303 (patrz str. 302) widzimy wzorec rtęciowy oma międzynarodowego. Rtęć mieści się w rurce szklanej, której końce są szczelnie wsunięte w rurki szersze, stanowiące wyrostki na bańkach. Jedna z takich baniek przedstawiona jest oddzielnie u dołu rysunku. Widoczne są tu także druciki platynowe *s*, *g*, *g*, *g*, służące dla doprowadzenia prądu i połączenia z przyrządami, wskazującymi różnicę potencjałów na końcach rurki. Dla utrzymania odpowiedniej stałej temperatury, rurka leży na płycie miedzianej *m*, wewnątrz naczynia miedzianego *k* wypełnionego naftą. Naczynie *k* umieszczone jest wewnątrz pudełka drewnianego *h*, które wypełnia się topniejącym lodem; przez rurkę *x* odpływa woda. Zapomocą krążków *r*, *r* wprawiamy w ruch mieszało, w celu wyrównania temperatury wzdłuż rurki. Temperaturę wskazują dwa termometry, których naczynia znajdują się w zagłębieniach wywierconych w płycie *m*. Lód przykrywa się kawałkiem filcu. Wszystkie otwory uszczelniają się bawełną, umaczaną w naftcie.

Kilka takich wzorców, dokładnie zbadanych pod względem średnicy otworu rurek i ich długości, porównywa się pomiędzy sobą i rurka, mająca opór najbliższy przeciętnego, uważa się za normalną.

Przyrządem wzorcowym dla wyznaczenia ampera jest odpowiednio zbudowany przyrząd elektrolityczny, służący do elektrolizy azotanu srebra.

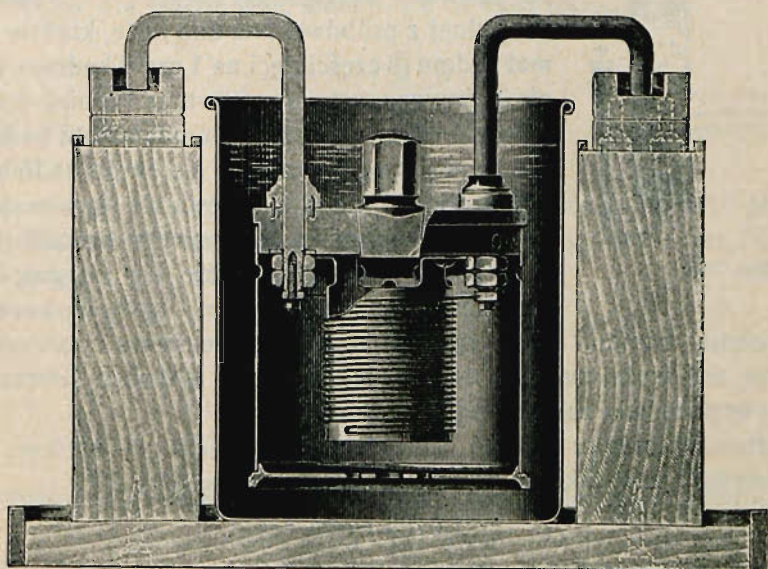
Wzorce zasadnicze ampera i oma są używane do pomiarów prawie wyłącznie w centralnych izbach państwowych miar i wag. W innych zaś pracowniach,



Rys. 303.

sprawdzających przyrządy miernicze i wykonywujących dokładne pomiary, używane są zwykle wzorce wtórne. Wzorce te są następujące:

Wzorzec oma. Sporządza się on najczęściej ze stopu miedzi z manganem, tak zwanego manganinu ¹⁾ przez porównanie ze wzorcem zasadniczym. Widzimy go częściowo w przekroju na rys. 304. Drut manganinowy izolo-



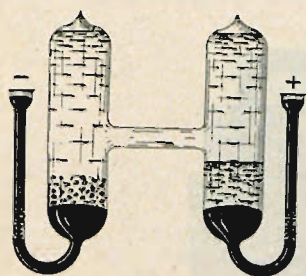
Rys. 304.

wany nawinięty jest na cylinder z cienkiej blachy, a końce tego drutu przymocowane do dwóch grubych haków miedzianych. Prąd doprowadzamy przez miseczki z rtęcią, w których zanurzone są końce haków. Cały opornik pogrąża się w nafcie, ażeby ułatwić jego ochładzanie się. Wyjawszy korek w środku, można wstawić termometr. Opory wzorcowe są sporządzane różnych wielkości. Najczęściej od 100000 Ω do 0,0001 Ω . Budowa ich jest zwykle taka, że w nafcie wytrzymują one następujące obciążenie prądem bez obawy o ich uszkodzenie i bez ujmy dla dokładności pomiarów:

O p ó r:	P r ą d:	
	przy pomiarach bardzo dokładnych:	przy pomiarach technicznych:
100000 Ω	0,003 A.	0,01 A.
10000 "	0,01 "	0,03 "
1000 "	0,03 "	0,1 "
100 "	0,1 "	0,3 "
10 "	0,3 "	1 "
1 "	1 "	3 "
0,1 "	3 "	10 "
0,01 "	10 "	100 "
0,001 "	30 "	300 "
0,0001 "	100 "	1000 "

¹⁾ Metal o bardzo małym współczynniku cieplnym zmiany oporu.

Wzorzec siły elektromotorycznej stanowi ogniwo normalne Westona (rys. 305) sporządzone w sposób następujący. W dna dwóch próbek, połączonych rurką poprzeczną, wtopione są rurki z drucikami platynowymi amalgamowanymi ($\approx 0,4$ mm grubości).



Rys. 305.

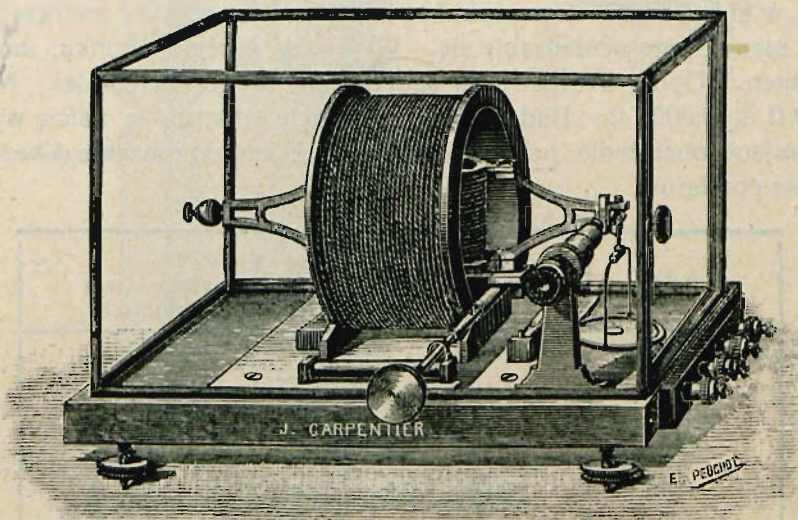
Do jednej z próbek, na dno tejże, kładzie się amalgamat kadmu (6 części rtęci na 1 część kadmu), który zupełnie pokrywa wystający wewnątrz koniec drucika platynowego. Na powierzchni amalgamatu kadmu umieszcza się warstwę kryształów siarczanu kadmu. Do drugiej próbki na dno nalewa się rtęci w ten sposób, ażeby koniec drucika platynowego był całkowicie w niej zanurzony. Na rtęć kładzie się warstwę mieszaniny siarczanu rtęciowego drobno sproszkowanego, kryształów siarczanu kadmu, nieco rtęci i stężonego roztworu siarczanu kadmu. Na wskazane zaś wyżej warstwy nalewa się stężonego roztworu siarczanu kadmu. Wreszcie obie próbki zamyka się szczelnie.

Rtęć stanowi biegun dodatni, amalgamat zaś kadmu — ujemny. Wielkość siły elektromotorycznej takiego ogniwa Westona wynosi przy 20° :

1,0186 wolta.

Przy zmianie temperatury od 0° do 25° siła elektromotoryczna zmienia się od 1,0191 do 1,0184 wolta.

Wzorzec ampera. Zamiast jednego z powyższych wzorców, stosowane są niekiedy elektrodynamiczne wzorce ampera, sporządzone przez Lorda Kelvina



Rys. 306

w Anglii i Pellat'a we Francji. Wzorzec Pellat'a (rys. 306) składa się z dwóch zwojnic, połączonych w szereg, tak, że przez obie zwojnice przebiega ten sam prąd.

Zewnętrzna zwojnica jest nieruchoma, a wewnętrzna umocowana na belce wagi. Siła działania elektrodynamicznego zwojnicy nieruchomej na ruchomą ¹⁾ równoważy się ciężarkami, umieszczonemi na szalce. Ponieważ siła ta jest proporcjonalna do kwadratu siły prądu, więc stosuje się tu wzór następujący:

$$i = A \cdot \sqrt{p \cdot g}.$$

A — stały współczynnik, p — masa ciężarków na szalce, g — przyspieszenie wywołane przez siłę ciężkości.

Współczynnik A wyznaczymy dokładnie, przepuszczając prąd, płynący po zwojnicach, przez roztwór azotanu srebra w ciągu określonego czasu i oznaczając ilość wydzielonego w tym czasie srebra.

¹⁾ Siły działają tu podobne, jak w przyrządzie p. Pellat'a, opisanym w rozdziale XXVII § 12.

ROZDZIAŁ XXIX.

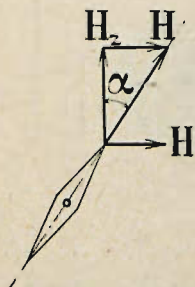
Mierzenie siły prądu.

Do mierzenia siły prądu, zależnie od wielkości i rodzaju samego prądu, a także zależnie od wymaganej ścisłości pomiarów, stosowane są rozmaite przyrządy zwane galwanoskopami, galwanometrami i amperomierzami; nadto przy pomiarach najbardziej ścisłych stosowana jest metoda pośrednia mierzenia siły prądu przez wyznaczenie napięcia na końcach znanego oporu.

1. **Galwanoskopy.** Przyrządy niedokładne, za pomocą których zwykle spostrzegamy tylko obecność prądu, noszą nazwę galwanoskopów.

Najczęściej używane galwanoskopy mają dwie zwojnice: *A* i *B* (rys. 307), połączone w szereg; pomiędzy nimi znajduje się krótki magnes, oparty na ostrzu lub zawieszony na cienkiej niteczce; do tego magnesu przymocowana jest wskazówka, której położenie wyznacza się na skali (nie wskazanej na rysunku). Przy użyciu takiego galwanoskopu, oś *AB* zwojnic należy ustawić prostopadłe do południka magnetycznego, wtedy oś magnetyczna magnesu będzie prostopadła do osi *AB*.

Pod wpływem prądu magnes odchyli się i zajmie takie położenie, w którym oś magnetyczna magnesu będzie skierowana wzdłuż natężenia wypadkowego dwóch pól magnetycznych: poziomej składowej magnetyzmu ziemskiego H_z i pola prądu H (rys. 308). Kąt α odchylenia magnesu będzie tem większy, im większe wypadnie H w porównaniu z H_z .



Rys. 308.

Przy zmianie kierunku prądu zmienia się również kierunek odchylenia magnesu, ponieważ H zwraca się w stronę przeciwną.

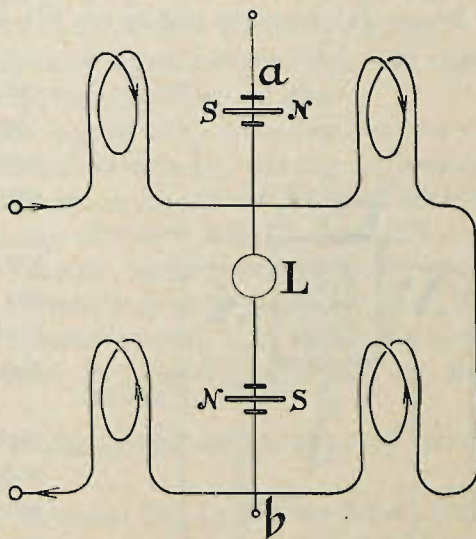
2. **Galwanometry.** Tego samego rodzaju przyrząd, jak opisany wyżej, lecz wykonany starannie i dokładniej, nosi nazwę galwanometru i jest stosowany do mierzenia siły prądów bardzo słabych.

Chcąc używać galwanoskopu lub galwanometru jako amperomierza, wypada przez porównanie z innym przyrządem pomiarowym wyznaczyć wartość każdej podziałki na skali tych przyrzą-

dów. Wyznaczenie wartości każdej podziałki jest rzeczą konieczną ze względu na to, iż trudno jest podać ściśle, wzorem matematycznym wyrażoną zależność pomiędzy siłą prądu a kątem wychylenia. Pamiętać także należy, że wartość podziałek jest zależna od wielkości poziomej składowej magnetyzmu ziemskiego w tym miejscu, gdzie znajduje się przyrząd; wszystkie więc czynniki (żelazo), wpływające na wielkość natężenia pola ziemskiego w danym miejscu, zmieniają wartość wskazań takiego przyrządu. Nadto wskazania te zależą w znacznym stopniu od dokładności ustawienia przyrządu względem południka magnetycznego.

Przy bardzo dokładnych pomiarach prądów nadzwyczaj słabych stosuje się galwanometr astatyczny.

Przyrząd ten (rys. 309) składa się z dwóch par zwojnic, połączonych w szereg w ten sposób, że para górna wytwarza pole magnetyczne w jednym kierunku, para zaś dolna — w odwrotnym. Na sztywnym druciku ab przymocowane są dwa układy cienkich i lekkich magnesów. Magnesy górne zwrócone są biegunami północnymi w jedną stronę, a dolne — w stronę przeciwną. W środku drucika ab , zawieszono na cienkim jedwabnym lub kwarcowym włókienku, przymocowane jest lustro L .



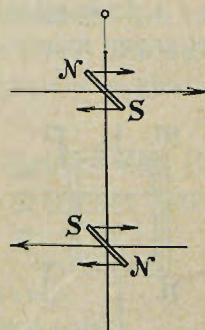
Rys. 309.

Na taki podwójny układ magnesów, zwany astatycznym, pole ziemskie prawie wcale nie działa, ponieważ momenty skręcające, które działają na magnesy dolne i górne, zwrócone są w strony przeciwnie, a więc prawie znoszą się, gdyż są one sobie niemal równe. Wykonanie zupełnie jednakowych magnesów co do długości i co do masy magnetycznej jest oczywiście niemożliwe.

Haczyk, na którym zawieszony jest układ magnesów, można obracać około osi pionowej i ustawiać w ten sposób, by podczas nieobecności prądu osi magnetyczne magnesów stały prostopadłe do osi zwojnic.

Pod wpływem prądu wywołują się tu dwa pola magnetyczne, jedno u góry, drugie u dołu, w kierunkach przeciwnych. Działanie tych pól na magnesy wyraża się dwoma momentami skręcającymi, które obracają ruchomą część galwanometru w jedną stronę, jak to widać z rysunku 310. Temu momentowi skręcającemu przeciwdziała inny moment, powstający wskutek skręcenia włókienka, na którym jest zawieszony drucik ab .

Gdy moment spężystości włókienka zostanie zrównoważony przez moment skręcający prądu, nastąpi równowaga, i układ ruchomy zatrzyma się. Kąt, o który odchylił się układ

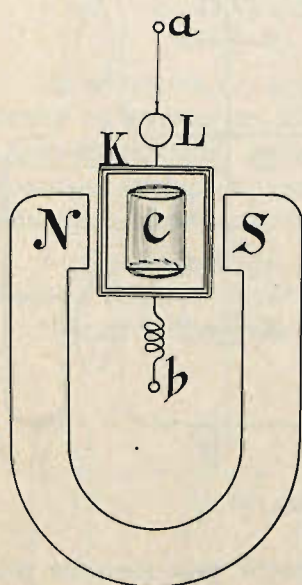


Rys. 310.

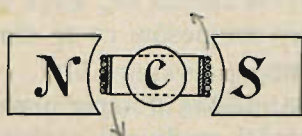
ruchomy, daje się zmierzyć za pomocą promienia świetlnego, odbitego w lusterku L . Na położenie magnesów takiego galwanometru wywiera oczywiście także pewien niewielki wpływ pole magnetyczne ziemskie.

Czułość galwanometrów tego rodzaju jest tak wielką, że prądy, wynoszące zaledwie 10^{-10} część ampera, wywołują odchylenie, dające się łatwo zauważyć za pomocą promienia świetlnego, odbitego w lusterku.

Inny, bardzo często stosowany galwanometr, zbudowany według Deprez-d'Arsonvala, pokazany jest na rys. 311 w rzucie pionowym i na rys. 312 w rzucie poziomym.



Rys. 311.



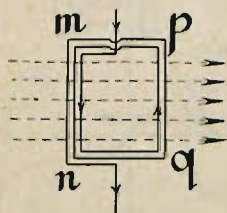
Rys. 312.

Składa się on ze stałego magnesu NS , cylindra żelaznego C , umieszczonego między biegunami tego magnesu i zwojnicy K , zawieszanej na cienkiej wstążeczce metalowej. Lusterko L przymocowane jest do zwojnicy.

Cylinder żelazny C służy do skupienia linii sił magnetycznych i nadania im w szczelinie, znajdującej się pomiędzy biegunami a cylindrem, kierunku zbliżonego do promieni, wychodzących z osi cylindra.

Prąd doprowadza się do zwojnicy w punktach a i b (rys. 311); przepływa on tak, jak to wskazano na rys. 313. Pole magnetyczne, skierowane poziomo na prawo, działa na stronę mn zwojnicy z siłą skierowaną do czytelnika, na stronę zaś pq — odwrotnie; taka para sił obraca zwojnicę w kierunku odwrotnym względem kierunku ruchu wskazówek zegarka, jeżeli widzimy ruch zwojnicy, patrząc na nią z góry. Przy obracaniu się zwojnicy wstążeczka metalowa skręca się, skutkiem czego wywiązuje się moment, skręcający sprężystości tej wstążeczki. Przy pewnym kącie odchylenia zwojnicy następuje równowaga.

Siła działania pola magnetycznego na prąd jest proporcjonalna do siły prądu i i do natężenia pola magnetycznego H , które w wąskiej szczelinie pomiędzy biegunami magnesu a cylindrem żelaznym C jest prawie jednostajne.



Rys. 313.

Oznaczmy przez M moment obrotowy, który powstaje skutkiem działania pola magnetycznego na zwojnicę, a przez C — współczynnik stały, zależny od wymiarów zwojnicy i liczby zwojów, wtedy:

$$M = C \cdot i \cdot H.$$

Moment skręcający, wywołany sprężystością wstążeczki metalowej, na której zawieszona jest zwojnica, oznaczmy przez M' ; jest on proporcjonalny do kąta obrotu zwoj-

nicy. ¹⁾ Przez C' oznaczmy stały czynnik, zależny od własności sprężystych wstążeczki, kąt zaś obrotu zwojnicy przez α , wtedy:

$$M' = C' \cdot \alpha.$$

Jeżeli zaś zwojnica odchylona znajduje się w równowadze, to:

$$M = M'$$

$$C i H = C' \alpha,$$

skąd:

$$i = \frac{C'}{C H} \cdot \alpha = K \cdot \alpha. \text{ } ^2)$$

Z tego wzoru widzimy, że w galwanometrze Deprez-d'Arsonvala siła prądu w zwojnicy jest proporcjonalna do kąta odchylenia zwojnicy.

Jeżeli galwanometr zbudowany jest dla bardzo słabych prądów, to odchylenie zwojnicy obserwuje się za pomocą promienia świetlnego, odbitego w lusterku. Tego rodzaju galwanometry buduje się zwykle w ten sposób, że wyraźne odchylenie może być zauważone przy sile prądu około 10^{-6} , 10^{-8} lub 10^{-10} ampera.

Zamiast lusterka galwanometry tego rodzaju zaopatrywane bywają również częstokroć we wskazówkę i skalę; wtedy czułość jest nieco mniejsza, gdyż 10^{-7} ampera daje odchylenie, wynoszące jedną działkę na skali i to tylko w przyrządach najczulszych; w innych zaś prąd musi być jeszcze silniejszy, by mógł wywołać takie odchylenie.

Wszystkie omawiane dotychczas galwanoskopy i galwanometry mają zastosowanie tylko przy prądzie stałym.

Jeżeli prąd jest zmienny, to zwojnica nie obróci się; będzie ona drgać, ponieważ przy zmianie kierunku prądu zmienia się również kierunek sił, działających na zwojnicę.

Na tej zasadzie oparte są galwanometry wibracyjne, w których pętlica, zrobiona z cienkiego drutu, umieszczona jest w polu magnetycznym magnesu silnego. Pod wpływem przebiegającego po niej prądu pętlica drga. Wychylenia tych drgań zależą od siły prądu. Za pomocą lusterka małego, przymocowanego do pętlicy, można mierzyć amplitudę drgań.

Do mierzenia słabych prądów zmiennych stosuje się jeszcze przyrządy, w których magnes stały zastąpiony jest przez elektromagnes nieruchomy; w zwojnicy tego elektromagnesu przepływa ten sam prąd, co w zwojnicy ruchomej, albo też inny, lecz o tej samej liczbie okresów, co i poprzedni.

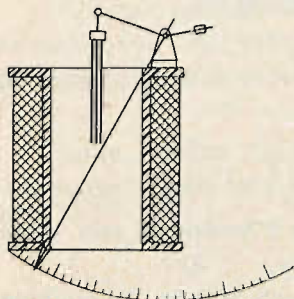
Do urządzenia czułych galwanometrów prądu zmiennego stosowane jest także działanie cieplne prądu zmiennego. Prąd przepuszczamy przez cienki drucik, który ogrzewa ogniwo termoelektryczne; ogniwo to wywołuje prąd stały w obwodzie zwojnicy zwykłego galwanometru Deprez-d'Arsonvala.

3. Amperomierze elektromagnetyczne ze zwojnicą nieruchomą. Przyrządy, wskazujące bezpośrednio na skali siłę prądu w amperach, nazywamy amperomierzami. Istnieje kilka zasad budowy tych przyrządów.

¹⁾ Twierdzenie to jest ściśle, o ile kąt skręcenia wstążeczki jest niewielki.

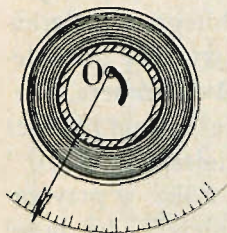
²⁾ Jeżeli H dla wszystkich kątów α jest to samo, to K jest wielkością stałą.

Najprostszy ustrój mają amperomierze t. zw. elektromagnetyczne, składające się ze zwojnicy nieruchomej i z żelaza ruchomego. Najbardziej charakterystyczne rodzaje takich amperomierzy są następujące. Rys. 314 wyobraża zasadę ustroju amperomierza, w którym zwojnica wciąga pęczek drucików żelaznych, zawieszonych na drążku, obracającym się około osi poziomej; do tego drążka przymocowana jest również wskazówka. Siłę działania pola magnetycznego zwojnicy na druty żelazne równoważy ciężarek.



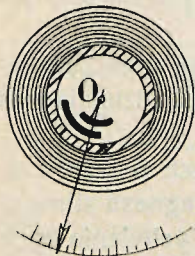
Rys. 314.

Na rys. 315 mamy inny ustrój amperomierza. Wewnątrz zwojnicy umieszcza się kawałek wygiętej blaszki żelaznej, obracającej się około osi O ; wskazówka zaś przymocowana jest do tej samej osi, do której przylutowano blaszkę. Pod wpływem pola magnetycznego, blaszka ta przechyla się na prawo, dążąc do ustawienia się w tym miejscu pola magnetycznego, gdzie jest największa gęstość linii magnetycznych; przeciwdziała temu ciężar blaszki.



Rys. 315.

Na rys. 316 wewnątrz zwojnicy znajduje się jedna blaszka stała, druga zaś ruchoma, obracająca się około osi O ; do blaszki ruchomej przymocowana jest wskazówka. Obie blaszki, ruchoma i stała, magnesują się w polu magnetycznym zwojnicy jednoznacznie i wskutek tego odpychają się; siłę odpychającą równoważy siła ciężkości.



Rys. 316.

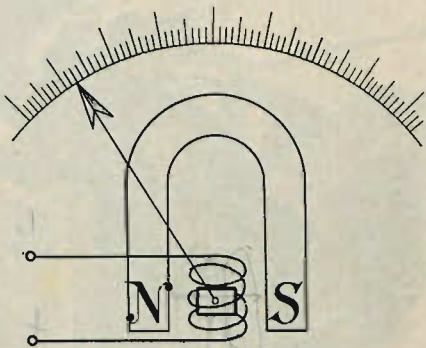
Wszystkie amperomierze elektromagnetyczne zaopatrzone są w tłumiki powietrzne, których celem jest ustawienie się wskazówki bez wahań, czyli, mówiąc językiem naukowym, osiągnięcie odchylen aperiodycznych. Tłumik składa się z pudełeczka i blaszki osadzonej na pręciku, przymocowanym do ruchomej części przyrządu; blaszkę ustawia się w taki sposób, ażeby kierunek jej ruchu był prostopadły do jej powierzchni. W tych warunkach blaszka, poruszając się wewnątrz pudełka, ścisza i rozrzedza powietrze, wobec czego odchylająca się wskazówka nie wykonywa wahań okresowych, lecz od razu staje na podziałce, która odpowiada sile prądu, przepływającego przez zwojnicę.

Wszystkie przyrządy elektromagnetyczne mogą być stosowane do prądów zmiennych i stałych, lecz skale dla obu prądów nie są jednakowe, a to z powodu histerezy, istniejącej w żelazie, oraz prądów wirowych, które zachodzą przy prądzie zmiennym. Wskazania przy prądzie zmiennym zależą od liczby okresów prądu na sekundę i od kształtu krzywej prądu. Różnica wartości wskazań przy prądzie zmiennym i stałym jest w różnych przyrządach dość rozmaita; niekiedy dosięga ona kilku procent.

Wogóle przyrządy elektromagnetyczne, jakkolwiek najprostsze i najwytrzymalsze na przeciążenie prądem, są jednak najmniej dokładne.

Oprócz wyżej opisanych, są jeszcze przyrządy elektromagnetyczne ze stałymi magnesami. Zasada budowy takiego przyrządu wskazana jest na rys. 317.

Pomiędzy biegunami magnesu stałego znajduje się kawałek podłużny żelaza, obracający się około osi poziomej; nadto jest tu jeszcze nieruchoma zwojnica, umieszczona również pomiędzy biegunami magnesu. Jeżeli prądu nie ma, to żelazo ustawia się swoją dłuższą osią wzdłuż linii sił pola magnesu stałego. Prąd w zwojnicy wytwarza pole magnetyczne, którego linie są pionowe i — zależnie od kierunku prądu — skierowane do góry lub na dół. Skoro natężenie pola prądu skieruje się na dół, natężenie wypadkowe będzie takie, jak wskazane na rys. 317.



Rys. 317.

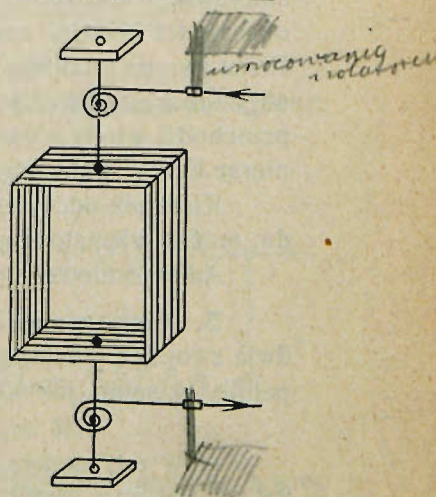
Żelazo ustawia się dłuższą swą osią w kierunku natężenia wypadkowego, wskazówka więc przymocowana do tego kawałka żelaza przesunie się o pewien kąt. Wielkość tego kąta będzie oczywiście zależną od natężenie pola H_i , a więc od siły prądu.

Przyrządy elektromagnetyczne z magnesami stałymi odchylają się w rozmaite strony, zależnie od kierunku prądu, nie mogą więc być stosowane przy prądzie zmiennym.

4. Amperomierze ze zwojnicą ruchomą. Według ustroju Deprez d'Arsonvala¹⁾ urządzają się również amperomierze ze skalą, na której wypisane są liczby, wskazujące ampéry. Zwojnica ruchoma jest tu zawieszona inaczej, niż w galwanometrach.

Zwojnicę taką (rys. 318) wyrabia się zwykle z cienkiego drutu miedzianego, izolowanego jedwabiem. Drut ten nawijamy na ramkę aluminiową, do której przymocowane są dwie osi, u góry i u dołu. Osi te opierają się na twardych kamieniach, oprawionych w płytki mosiężne. Do każdej osi przymocowana jest jednym końcem sprężyna spiralna, której drugi koniec umocowuje się nieruchomo.

Końce zwojnicy przylutowane są do odpowiednich osi, które muszą być od siebie izolowane; przez te osi i sprężyny doprowadza się do zwojnicy prąd. Wskutek

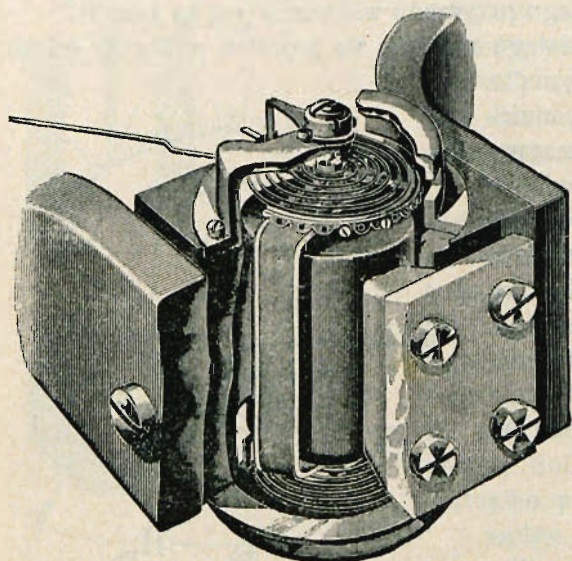


Rys. 318.

¹⁾ Patrz § 2 niniejszego rozdziału.

sprężystości sprężyn, przy obracaniu się zwojnicy powstaje moment skręcający, równoważący się z momentem działania pola magnetycznego na zwojnicę z prądem.

Na rys. 319 widzimy niektóre szczegóły wykonania takiego przyrządu. Są tu



Rys. 319.

bieguny magnesu stałowego,¹⁾ cylinder żelazny nieruchomy i ramka, ze zwojami drutu. U góry i u dołu widoczne są sprężyny spiralne.

Przez nasadki biegunowe odpowiedniego kształtu osiągamy w szczelinie pomiędzy biegunami a cylindrem wewnętrznym pole magnetyczne wszędzie prawie o jednakowym natężeniu, skutkiem czego skala amperomierza jest jednostajna — działki równe. Kąt obrotu zwojnicy jest tu, jak widzieliśmy poprzednio, proporcjonalny do siły prądu.

Ramka aluminiowa odgrywa rolę tłumika, przyszybkim bowiem ruchu zwojnicy w polu magnetycznym powstają w ramce prądy

indukcyjne; według prawa Lenz'a, działanie pola magnetycznego na te prądy hamuje ruch zwojnicy.²⁾

Wskazówka w tych amperomierzach przymocowuje się do osi górnej; przyrządy, stosowane w pracowniach, zaopatrują się we wskazówki z cienkimi blaszkami na końcach, tudzież w skalę z lustrem. Przy odczytywaniu wskazań należy wzrok skierować w ten sposób, aby wskazówka pokrywała swój obraz w lustrze i by obserwator widział najcieńszy rzut blaszki, stanowiącej zakończenie wskazówki. Przez zwojnice takiego przyrządu można przepuszczać tylko słabe prądy; zwykle więc stosują się tu boczniki, włączone równolegle do zwojnicy. Przez zwojnicę przechodzi wtedy niewielka zaledwie część prądu mierzonego³⁾, skala jednak ma nieraz liczby, wskazujące siłę całego prądu przed jego rozgałęzieniem.

Kierunek odchylenia w tych przyrządach zależy, jak wiemy, od kierunku prądu, można więc stosować je tylko do prądu stałego.

Amperomierze zbudowane podług powyższej zasady są najdokładniejsze.

5. Amperomierze elektrodynamiczne. Amperomierze tego rodzaju mają dwie zwojnice: ruchomą i stałą (rys. 320). Zwojnica ruchoma urządzona jest zupełnie tak samo, jak w przyrządach, opisanych poprzednio. Oś tej zwojnicy opie-

¹⁾ W celu uwidocznienia urządzenia wewnętrznego, część bieguna lewego przedstawiona jest na rysunku — odłamana.

²⁾ Patrz str. 183.

³⁾ Patrz § 8 niniejszego rozdziału.

ra się czopami o twarde kamienie. Do górnej i dolnej części osi przymocowane są sprężyny spiralne, których drugie końce przylutowano do nieruchomych części przyrządu. Zwojnica stała bywa większa albo mniejsza od zwojnicy ruchomej i stosownie do tego umieszcza się zewnątrz lub wewnątrz niej.

Tłumiki w tych przyrządach stosują się powietrzne.

Połączenie zwojnic między sobą bywa różne: obie zwojnice łączą się w szereg (rys. 320), albo też równolegle, jak to wskazuje rys. 321; K i k są to zwojnice, r i r' — opory dodatkowe, służące do odpowiedniego ustosunkowania siły prądów w zwojnicach.

Zwojnice ustawiają się w tych przyrządach zawsze w taki sposób, że płaszczyzny zwojów są względem siebie prostopadłe lub pochylone pod pewnym kątem, o ile prąd przez nie nie przebiega.

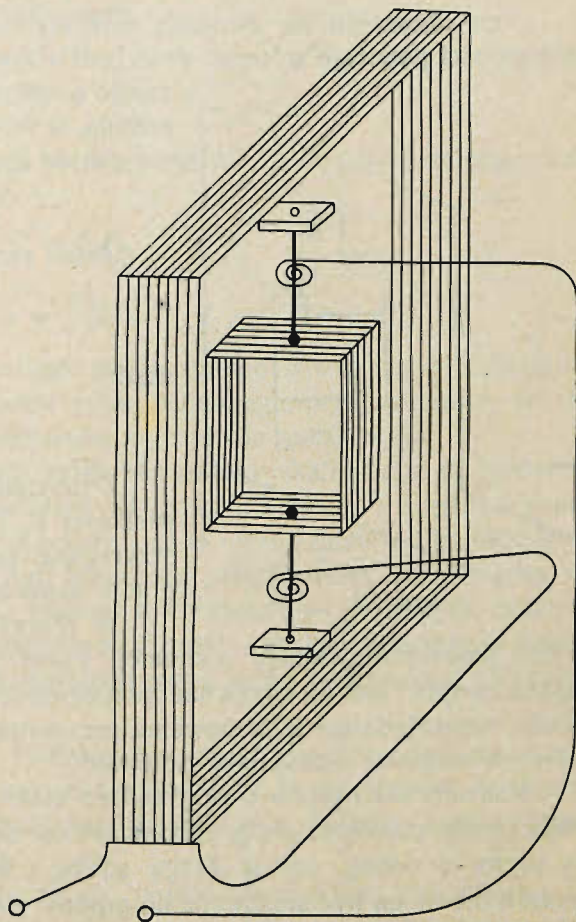
Pod wpływem prądu zwojnica ruchoma przekręca się o kąt, zależny od siły tego prądu.

Moment obracający powstaje tu skutkiem oddziaływania prądów zwojnicy ruchomej na nieruchomą.¹⁾

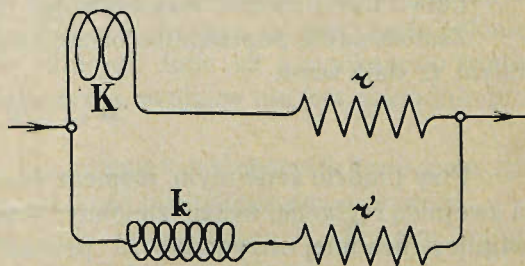
W ten sposób powstają siły ff , wskazane na rys. 322, gdzie dla uproszczenia obrazu zwojnice zastąpiono przez zwoje pojedyncze.

Para sił ff obraca zwojnicę ruchomą w takim kierunku, że dąży ona do zajęcia położenia równoległego względem zwojnicy nieruchomej, przy którym kierunki prądów w obu zwojnicach będą zgodne. Wielkość momentu obrotowego jest tu proporcjonalna do sił prądów w zwojnicy ruchomej i stałej.

Jeżeli założymy, że zwojnice połączone są w szereg, to ten sam prąd i będzie przebiegał przez obie zwojnice, a więc moment obrotowy M będzie proporcjonalny do drugiej potęgi prądu.



Rys. 320.



Rys. 321.

¹⁾ Patrz rozdział XVIII. § 7.

Oznaczmy stałą, zależną od ustroju i wzajemnego położenia zwojnic przez C_1 , wtedy:

$$M = C_1 \cdot i^2.$$

Przy obracaniu się zwojnic skracają się sprężyny (rys. 320) i wskutek ich sprężystości powstaje moment, przeciwdziałający obracaniu się zwojnic. Oznaczmy go przez M' , odchylenie zaś zwojnic od położenia, w którym prądu nie ma, przez α , a stałą, zależną od sprężystości sprężyn, przez C_2 ; wtedy:

$$M' = C_2 \cdot \alpha.$$

Jeżeli zachodzi równowaga, to:

$$M = M',$$

$$C_1 \cdot i^2 = C_2 \cdot \alpha,$$

skąd:

$$i^2 = \frac{C_2}{C_1} \cdot \alpha.$$

Z równania powyższego widzimy, że, o ile wielkości C_2 i C_1 są stałe, to odchylenia w takim przyrządzie są proporcjonalne do drugiej potęgi prądu; skala będzie przeto bardzo nierówna.

W rzeczywistości C_1 zmienia się wraz ze zmianą położenia zwojnic ruchomej, wobec czego, stosując odpowiedni kształt i układ zwojnic, można wyrównać przynajmniej część skali w ten sposób, ażeby działki, odpowiadające jednakowemu przyrostowi prądu, były przy prądach silnych i słabych możliwie jednakowej szerokości.

Kierunek odchylenia w przyrządach elektrodynamicznych nie zależy od kierunku prądu, ponieważ prądy zgodne zawsze się przyciągają niezależnie od tego, czy płyną w jedną, czy w drugą stronę. Wobec tego amperomierze elektrodynamiczne mogą być stosowane do prądów stałych i zmiennych.

Jeżeli do prądu zmiennego zastosujemy tę samą skalę, co dla prądu stałego, to przy prądzie zmiennym wskazania amperomierza będą wyrażały pierwiastek kwadratowy z przeciętnej kwadratów prądu, a więc wielkość czynną prądu.

Łatwo tego dowieść, rozumując jak następuje:

Zastosowanie poprzednich oznaczeń dla pewnego odchylenia α , przy prądzie stałym i , daje wzór:

$$i^2 = \frac{C_2}{C_1} \cdot \alpha. \quad (a)$$

Przy prądzie zmiennym moment obrotowy elektrodynamiczny, który działa na zwojnicę ruchomą, będzie zmienny; jednakże z powodu znacznej bezwładności zwojnicy ruchomej otrzymamy tu pewien kąt odchylenia stały, wywołany przez moment średni.

Oznaczmy dalej przez M_s wielkość średniego momentu obrotowego; wtedy:

$$M_s = M',$$

$$M' = C_2 \cdot \alpha,$$

$$M_s = C_1 (i^2)_s,$$

przy zmianie kierunku prądu w zwojnicy ruchomej, zmienia się kierunek momentu obrotowego postronnego i przez to wpływy postronne znoszą się.

Na zasadzie przyciągania się i odpychania prądów budowane są również tak zwane wagi elektrodynamiczne, w których siły działające pomiędzy prądami równoważą się ciężarkami, umieszczonemi na drążku posiadającym podziałkę. Przesuwając ciężarek, osiąga się równowagę; z wielkości zaś i z położenia ciężarka można sądzić o sile prądu. Takie wagi są najdokładniejszymi przyrządami do mierzenia prądów zmiennych. Wzorcują się one prądem stałym.

Amperomierze elektrodynamiczne stosują się często tylko w pracowniach elektrotechnicznych, ze względu na znaczne zużycie mocy prądu i kłopotliwą obsługę.

6. Amperomierze cieplne. Zasada ustroju amperomierzy tego rodzaju polega na zastosowaniu rozszerzalności ciał pod wpływem ogrzewania. Prąd

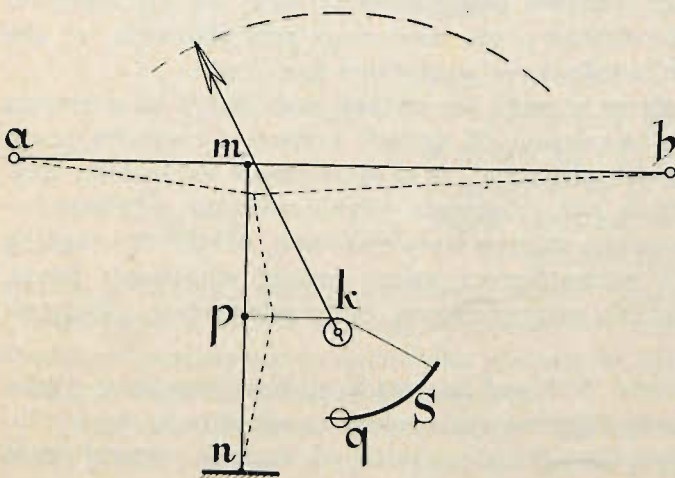
przepuszcza się przez cienki drut ab (rys. 323), sporządzony ze stopu platyny ze srebrem, lub też platyny z irydem.

Do tego drutu w punkcie m przymocowany jest inny cienki drut mn , którego drugi koniec n przyczepia się do nieruchomej części przyrządu. Do drutu mn w punkcie p przyczepiona jest cienka mocna nitka, owinięta koło krążka k i przymocowana drugim końcem do sprężyny S .

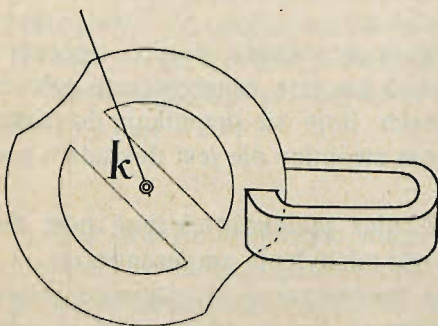
Sprężyna ta końcem q jest przyśrubowana do nieruchomego słupka.

Gdy prąd przepływa przez drut ab , ten ostatni ogrzewa się i wydłuża. Pod wpływem sprężyny S układ drucików po wydłużeniu drutu ab , będzie taki, jak wskazują na rysunku linie przerywane. Krążek k przekręci się przytem, a wraz z nim przesunie się wskazówka przymocowana do niego. Do tłumienia ruchu wskazówki stosuje się tłumik elektromagnetyczny. Na osi krążka k (rys. 324) umocowuje się blaszka aluminiowa, która porusza się w szczelinie pomiędzy biegunami magnesu stałego.

W blaszce, w czasie jej ruchu, powstają prądy indukcyjne wirowe. Działanie hamujące pola magnesu na te prądy tłumi gwałtowne ruchy całego układu ruchomego w tym przyrządzie.



Rys. 323.



Rys. 324.

Podany tu ustrój amperomierza cieplnego może służyć jako przykład wykonania takiego przyrządu. Przyrządy stosowane w praktyce mają również najrozszybsze inne ustroje, zasada jednak pozostaje wszędzie ta sama.

W końcu należy zwrócić uwagę na jeden jeszcze szczegół konstrukcyjny w przyrządach tego rodzaju, szczegół mający na celu zabezpieczenie położenia wskazówki od wpływu zmiany temperatury otaczającego powietrza.

Osiąga się to drogą zastosowania odpowiedniego metalu do sporządzenia płytki, na której przymocowuje się słupki a i b (rys. 323). Metal ten wybiera się z zastrzeżeniem, ażeby współczynnik rozszerzalności jego był taki sam, jak współczynnik rozszerzalności drutu ab .

Zależność odchylenia wskazówki amperomierza cieplnego od siły prądu można znaleźć w przybliżeniu w sposób następujący:

Założmy, że wydłużenie drutu ab jest proporcjonalne do przyrostu jego temperatury; w takim razie i odchylenie wskazówki będzie oczywiście proporcjonalne do przyrostu tej temperatury. Przyrost zaś temperatury drutu, po którym przebiega prąd, jak wiemy z rozdziału XVI § 1, jest proporcjonalny do drugiej potęgi siły prądu. Wypada więc, że kąt odchylenia wskazówki jest proporcjonalny do kwadratu siły prądu:

$$i^2 = C \cdot \alpha.$$

Jeżeli zaś mamy do czynienia z prądem zmiennym, to odchylenie α będzie proporcjonalne do średniej z kwadratów prądu

$$(i_t^2)_s = C \cdot \alpha.$$

Z tych dwóch równań otrzymujemy:

$$i^2 = (i_t^2)_s$$

$$i = \sqrt{(i_t^2)_s}.$$

Równanie to wskazuje, że gdy prąd zmienny wywołuje to samo odchylenie amperomierza co i prąd stały, to pierwiastek kwadratowy z przeciętnej kwadratów takiego prądu równa się sile prądu stałego. Wobec tego skala amperomierzy cieplnych może służyć do prądów o dowolnym kształcie krzywej i o dowolnej częstotliwości zmian na sekundę.

Wielką zaletę tych przyrządów stanowi zupełna niezależność wskazań ich od pól magnetycznych. Ujemne zaś cechy są to: powolność, z jaką przyrząd odczuwa zmiany w sile prądu i mniejsza dokładność wskazań niż w przyrządach elektrodynamicznych. W technice jednak zastosowanie tych amperomierzy do wszelkich prądów nie nastęrcza żadnych wątpliwości. Zwykle są one stosowane do prądów zmiennych, do prądów zaś stałych lepsze są przyrządy z magnesem i zwojnicą ruchomą. Ze względu na proporcjonalność odchylenia do kwadratu prądu, skala amperomierzy cieplnych jest oczywiście niejednostajna.

Przez odpowiednie urządzenie przekładni mechanicznej od rozszerzającego się drucika do wskazówki można osiągnąć względnie równe działki na pewnej części skali; w każdym razie jednak działki w pobliżu zera będą zawsze znikomo drobne.

Przez cienki drucik amperomierza cieplnego można przepuścić, bez jego uszkodzenia, tylko nieznaczny prąd; to też amperomierze zaopatrują się zwykle w boczniki, przygotowane z blachy manganinowej, włączone równolegle do drucika.

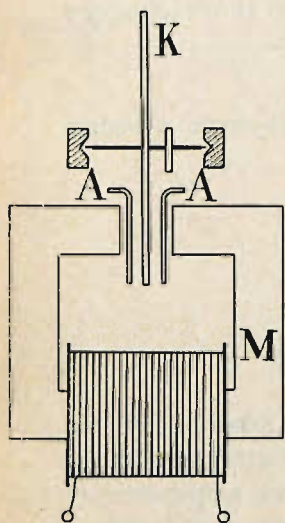
Opór bocznika dobiera się w taki sposób, aby przez niego przechodziła znaczna część prądu, przez drucik zaś — tylko tyle, ile potrzeba do odpowiedniego rozgrzania tegoż.

Przyrządy cieplne zużywają dosyć znaczną moc prądu. Spadek napięcia wewnątrz amperomierza, przy największym wychyleniu wskazówki, wynosi około 0,25 V.

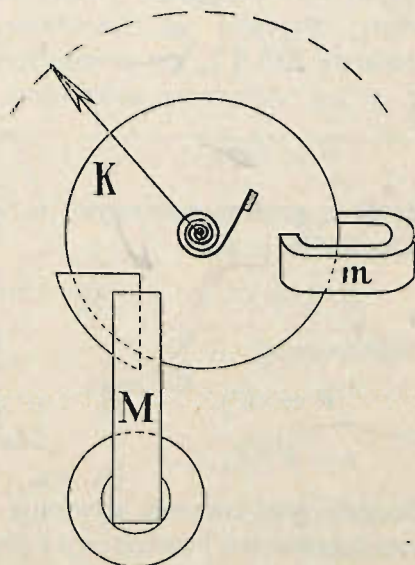
7. Amperomierze indukcyjne. Przy pomiarach prądu zmiennego stosuje się przyrządy, których działanie opiera się na spółdziałaniu prądów indukowanych w blaszkach metalowych przez zmienne pole magnetyczne, albo też na działaniu

mechanicznym zmiennego pola magnetycznego na prądy wywołane przez to pole w blaszce ruchomej. Ustrój przyrządów pierwszego rodzaju jest następujący (rys. 325 i 326). W szczelinie między biegunami elektromagnesu obraca się krążek (aluminjowy) glinowy albo miedziany K , osadzony na osi zaopatrzonej w sprężynę spiralną. Powierzchnie biegunów elektromagnesu są częściowo przykryte płytkami metalowymi A .

Zmienny prąd w zwojnicy wywołuje zmienne pole magnetyczne w szczelinie pomiędzy biegunami. To zmienne pole wzbudza prądy



Rys. 325.



Rys. 326.

dy w krążku K i w płytkach A . Prądy te są w fazie, przyciągają się więc i skutkiem tego krążek obraca się w kierunku ruchu wskazówek zegara, jednocześnie jednak skręca się sprężyna spiralna i w pewnym położeniu krążka moment obrotowy, wywołany przez spółdziałanie prądów indukowanych, równoważy się z momentem skręcającym sprężyny.

Wtedy krążek K jest nieruchomy, a wskazówka przymocowana do osi krążka wskazuje na skali kąt obrotu krążka.

Stały magnes stalowy m służy tu do tłumienia wahań krążka K za pomocą działania tego magnesu na prądy wirowe, wzniecane w krążku w czasie jego ruchu.

Kąt obrotu krążka jest tu w przybliżeniu proporcjonalny do drugiej potęgi prądu w zwojnicy. Wynika to z następującego rozumowania.

Moment obrotowy elektrodynamiczny M , działający na krążek, jest proporcjonalny do prądów wznieconych w krążku — i_1 i do prądów wznieconych w płytkach A — i_2 .

Jeżeli C jest wielkość stała, to:

$$M_t = C \cdot i_{1t} \cdot i_{2t}.$$

Każdy z prądów i_1 i i_2 jest proporcjonalny do prądu, płynącego w zwojnicy i . Jeżeli C_1 i C_2 są wielkościami stałymi, to:

$$i_{1t} = C_1 \cdot i_t, \quad \text{a} \quad i_{2t} = C_2 \cdot i_t,$$

a przeto:

$$M_s = C \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot (i_t^2)_s = C_3 \cdot (i_t^2)_s.$$

Moment, wywołany sprężystością sprężyny, oznaczmy przez M' , kąt obrotu krążka przez α , a wielkość stałą przez K , wtedy:

$$M' = K \cdot \alpha.$$

W chwili równowagi:

$$M_s = M',$$

a więc:

$$C_3 \cdot (i_t^2)_s = K \cdot \alpha,$$

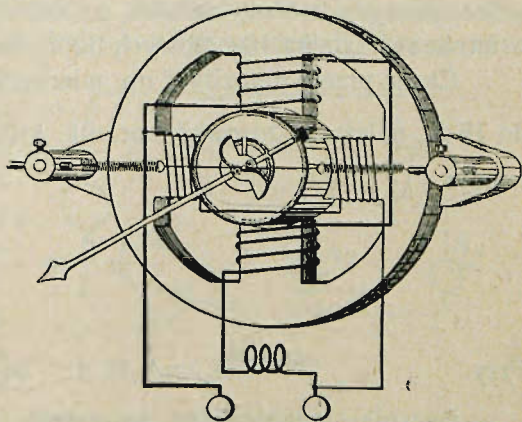
skąd:

$$(i_t^2)_s = C_4 \cdot \alpha.$$

Wzór ten stwierdza, że kąt obrotu krążka jest proporcjonalny do drugiej potęgi siły prądu, przepływającego przez zwojnicę.

Ponieważ prąd jest szybko zmienny, przeto stałe odchylenie przyrządu otrzymuje się pod wpływem średniej wartości kwadratów siły prądu, czyli kwadratu wartości czynnej siły prądu.

Inny przyrząd tego samego rodzaju widzimy na rys. 327. Pierścień żelazny z czterema występami wewnętrznymi jest zrobiony z cienkich blaszek żelaznych. Na dwóch występach nawinięto niewielką liczbę zwojów drutu grubego, przez który przepływa większa część prądu. Na pozostałych występach nawinięto większą ilość zwojów drutu cieńszego, przez który płynie prąd odgałęziony. Prądy w zwojach grubych i cienkich nie są w fazie, skutkiem czego wytwarzają one pole magnetyczne wirujące. W tym polu umieszczony jest pusty walec glinowy, umocowany na osi opartej na dwóch łożyskach. Do osi przytwierdzona jest również wskazówka i końce sprężyn spiralnych, których drugie końce są zamocowane nieruchomo.



Rys. 327.

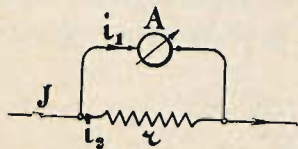
Pole magnetyczne wirujące wytwarza w walcu glinowym prądy indukcyjne. Według prawa Lenza, prądy te mają taki kierunek, że pole pociąga za sobą walec.

Ten moment obrotowy elektromagnetyczny odchyła wskazówkę przyrządu o pewien kąt i równoważy się z momentem skręcającym sprężyn spiralnych.

Zależność odchylenia wskazówki od siły prądu w tym przyrządzie jest taka sama, jak powyżej wyprowadzona dla przyrządu z krążkiem.

Wskazania tych amperomierzy są ściśle tylko dla prądu zmiennego o takiej postaci linii krzywej, wyrażającej zmienność prądu w czasie, i o takiej częstotliwości zmian, jakie miał prąd użyty do wzorcowania.

8. Rozszerzenie skali amperomierzy. W razie potrzeby rozszerzenia skali amperomierza przy prądzie stałym, stosuje się zwykle t. zw. boczniki czyli opory dokładne, włączane równolegle do amperomierza. Oznaczmy opór bocznika (rys. 328) przez r , a opór amperomierza przez R , siłę prądu, przed rozgałęzieniem tegoż przez J , a prądy w amperomierzu i w boczniku przez i_1 i i_2 .



Rys. 328.

Według pierwszego prawa Kirchhoffa:

$$J = i_1 + i_2.$$

Drugie zaś prawo Kirchhoffa dla obwodu zamkniętego daje:

$$i_1 \cdot R - i_2 \cdot r = 0.$$

Z tych dwóch równań, po wyrugowaniu i_2 , otrzymamy:

$$J = i_1 \cdot \frac{(R + r)}{r}.$$

Wzór ten wskazuje, że za pomocą bocznika możemy zwiększyć wartość wskazań amperomierza w stosunku $\frac{R + r}{r}$.

Często stosuje się amperomierze jednoomowe lub dziesięcioomowe. Skala jednoomowych jest zwykle taka, że ostatnia działka odpowiada sile prądu 0,15 A., ostatnia zaś działka 10-omowych odpowiada sile prądu 0,0045 A.

Chcąc przeto umożliwić np. mierzenie amperomierzem jednoomowym prądów do 15 A., należy zastosować bocznik, którego opór wynosi: $r = \frac{1}{99} \Omega$, ponieważ wtedy:

$$\frac{R + r}{r} = \frac{1 + \frac{1}{99}}{\frac{1}{99}} = 100.$$

Przy $i_1 = 0,15 \text{ A.}$, będzie $J = 15 \text{ A.}$

Boczniki wykonywane są zwykle z manganinu dla uniknięcia znacznego wpływu temperatury na ich opór.

W celu osiągnięcia dobrego chłodzenia takich boczników przez otaczające powietrze, robi się je zwykle z płaskiej blachy manganinowej lub też z rurek manganinowych.

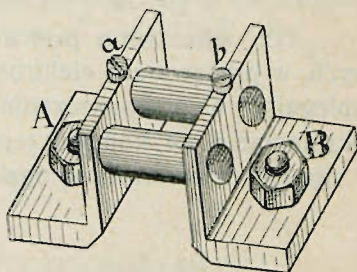
Na rys. 329 widzimy bocznik dziesięcioomowego amperomierza dla prądu do 750 A. Przez śruby *A* i *B* doprowadza się i odprowadza prąd, a zapomocą śrub *a* i *b* bocznik łączy się z amperomierzem.

Przy prądzie zmiennym, w razie potrzeby rozszerzenia skali amperomierza, stosuje się transformatory pomiarowe. Zasada ustroju takich transformatorów jest następująca:

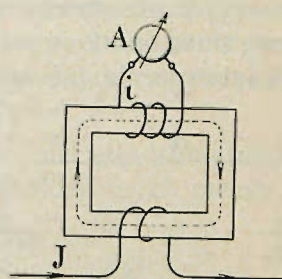
Na ramkę żelazną, składającą się z blaszek (rys. 330) (dla uniknięcia prądów wirowych) nawija się jeden lub kilka zwojów przewodnika, z prądem *J*, który mamy zmierzyć. Prąd ten wywołuje w żelazie ramki zmienny strumień magnetyczny, który przez indukcję wznieca w zwojnicy połączonej z amperomierzem prąd wtórny *i*, wywołujący odchylenie amperomierza. Na skali takiego amperomierza z transformatorem znajdują się zwykle liczby, wskazujące wprost wielkość prądu *J*.

Wskazania każdego amperomierza, zaopatrzonego w transformator, zależą do pewnego stopnia od kształtu krzywej prądu i od częstości zmian na sekundę. Wobec tego, dla otrzymania wskazań całkiem ścisłych, stosować należy taki zespół tylko przy tym prądzie, zapomocą którego był on wzorcowany. Transformatory pomiarowe zawsze stosują się przy prądach wysokiego napięcia, wynoszących ponad 1000 V. W ten sposób unikamy doprowadzania przewodników niebezpiecznych o wysokim napięciu prądu do tablic rozdzielczych, na których są umieszczone przyrządy pomiarowe.

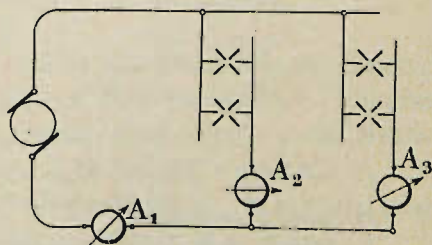
9. Włączanie amperomierzy w obwód. Amperomierze włączają się zawsze w taki sposób, ażeby całkowity prąd, który ma być zmierzony, przeszedł przez amperomierz. Na rys 331 wskazany jest przykład włączenia trzech amperomierzy, z których *A*₁ mierzy całkowity prąd, dostarczany przez prądnice, *A*₂ i *A*₃ mierzą prądy, płynące do poszczególnych grup lamp. Aby uniknąć znacznych strat energii w amperomierzach, opór ich musi być możliwie jak najmniejszy; wtedy moc $J^2 r$, zamieniająca się na ciepło, będzie niewielka. Im większą jest siła prądu, do mierzenia której przeznaczony jest amperomierz, tem mniejszy jest jego opór. Dokładne amperomierze budowane są często w ten sposób, że napięcie na końcówkach amperomierza nigdy nie przewyższa 0,045 V; opór więc tych przyrządów, dla prądów od 1 do 1000 A., waha się w granicach od 0,045 Ω do $45 \cdot 10^{-6} \Omega$. Dla osiągnięcia małego oporu zwojnice amperomierzy wyrabiane są z grubego drutu miedzianego, który



Rys. 329.



Rys. 330.



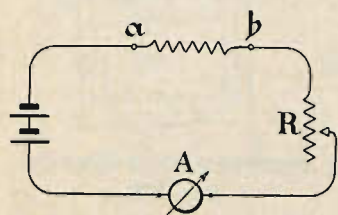
Rys. 331.

nawija się zaledwie kilku zwojami, a przy bardzo silnych prądach nawet jednym tylko zwojem. O ile zaś budowa przyrządu nie pozwala na stosowanie takich zwojnic, to równolegle do amperomierza włączają się odpowiednie boczniki.

10. Mierzenie pośrednie siły prądu. Przy pomiarach bardzo dokładnych, w pracowniach elektrotechnicznych, stosuje się sposób mierzenia siły prądu, polegający na przepuszczaniu mierzonego prądu przez dokładny opór r i wyznaczeniu napięcia na końcach tego oporu metodą kompensacyjną¹⁾ przez porównanie z siłą elektromotoryczną ogniwa normalnego Westona. Prąd oblicza się ze wzoru:

$$J = \frac{e}{r}.$$

11. Wzorcowanie amperomierzy²⁾. Przy sprawdzaniu dokładnych amperomierzy prądu stałego w pracowniach elektrotechnicznych za wielkości podstawowe służą opory normalne i siła elektromotoryczna normalnego ogniwa Westona. Dla sprawdzenia lub wywzorcowania dokładnego amperomierza zestawiamy ob-



Rys. 332.

wód wskazany na rys. 332, a składający się z baterji akumulatorów, normalnego dokładnie znanego oporu ab , opornika regulacyjnego R i amperomierza A , podlegającego sprawdzeniu. Zmieniając opór R , ustawiamy wskazówkę amperomierza na różne działki, a jednocześnie mierzymy napięcie na końcówkach oporu ab ; podług tego napięcia obliczamy siłę prądu, wywołującą zanotowane odchylenia amperomierza.

Amperomierze prądu zmiennego wzorcuje się przez porównanie z amperomierzami elektrodynamicznymi, które mają skalę wyznaczoną zapomocą prądu stałego.

Mniej dokładne amperomierze elektromagnetyczne i inne wzorcujemy przez porównanie ich z amperomierzami dokładnymi, w tym celu włącza się je w jeden obwód w ten sposób, aby przez oba amperomierze przechodził jeden i ten sam prąd.

¹⁾ Patrz § następny.

²⁾ Inaczej: cechowanie amperomierzy.