

ROZDZIAŁ XXX.

Mierzenie napięcia i siły elektromotorycznej.

Mierzenie napięcia i siły elektromotorycznej źródeł prądu dokonywa się przy dokładnych pomiarach przez porównanie napięcia lub siły elektromotorycznej z siłą elektromotoryczną normalnego ogniwa Westona; w praktyce zaś codziennej mierzenie to uskutecznia się za pomocą woltomierzy. *strona 326.*

1. Sposób kompensacyjny prosty porównania sił elektromotorycznych.¹⁾ Zasada tego sposobu porównywania sił elektromotorycznych polega na dobraniu takich oporów r_1 i r_2 w układzie wskazanym na rys. 333, by prąd równał się zeru w tym odgałęzieniu, gdzie znajduje się siła elektromotoryczna E_n . Dla przekonania się o tym, służy galwanometr, włączony w to odgałęzienie. Prąd w galwanometrze równa się zeru wtedy, gdy rozkład potencjałów wzdłuż oporów r_1 i r_2 czyni zadość równaniu:

$$V_b - V_a = E_n,$$

gdzie przez V_a i V_b oznaczone są potencjały w punktach a i b . Słowami warunek ten da się wyrazić, jak następuje: napięcie na punktach a , b równoważyć się winno z siłą elektromotoryczną E_n .

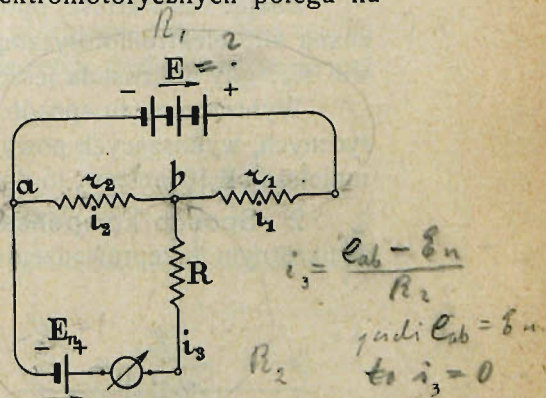
Na podstawie drugiego prawa Kirchhoffa, dla dwóch obwodów zamkniętych w układzie, wskazanym na rys. 333, ułożyć możemy dwa równania. Oznaczmy prądy przez i_1 , i_2 , i_3 w kolei wskazanej na rysunku, opór baterji o sile elektromotorycznej E , wraz z przewodnikami, łączącymi tę baterję z oporami r_1 i r_2 , przez R_1 , cały zaś opór odgałęzienia równoległego do oporu r_2 , a zawierającego ogniwo o sile elektromotorycznej E_n i galwanometr — przez R_2 ; wtedy:

$$E = i_1 \cdot (r_1 + R_1) + i_2 \cdot r_2,$$

$$E_n = i_2 \cdot r_2 - i_3 \cdot R_2.$$

Zakładając, że opory r_1 i r_2 zostały tak dobrane, że $i_3 = 0$, otrzymamy według pierwszego prawa Kirchhoffa: *(dla punktu b)*

$$i_1 = i_2.$$



Rys. 333.

¹⁾ Podany przez Poggendorfa.

Założmy teraz, że:

$$i_1 = i_2 = i.$$

Wtedy, mając na względzie, że $i_3 = 0$, powyższe dwa równania przybiorą postać:

$$E = i \cdot (r_1 + R_1 + r_2),$$

$$E_n = i \cdot r_2.$$

Z tych dwóch równań otrzymamy:

$$E = E_n \cdot \frac{r_1 + R_1 + r_2}{r_2}.$$

Opory r_1 i r_2 stosujemy przytym tak duże, ażeby w porównaniu z nimi można było opuścić mały opór R_1 .

Opuszczając tedy opór R_1 , otrzymamy:

$$E = E_n \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_2}.$$

Ogniwo o sile elektromotorycznej E_n jest zwykle normalnym ogniwem Weston'a; wielkość E_n jest więc znana.

Znając zaś wartości oporów r_1 i r_2 , obliczymy z powyższego równania nieznaną siłę elektromotoryczną E . Opór R służy dla osłabienia prądu w ogniwie E_n , gdy nie została jeszcze osiągnięta zupełna równowaga w układzie.

Wyłuszczone tu sposób stosuje się zwykle do wyznaczenia sił elektromotorycznych, wynoszących powyżej 10 woltów. Jeżeli zaś siła elektromotoryczna jest mniejsza od 10 woltów, to dogodniej stosować sposób kompensacji podwójnej.

2. Sposób kompensacji podwójnej.¹⁾ Zasada tego sposobu polega na dwukrotnym przeprowadzeniu czynności, opisanych przy sposobie poprzednim.

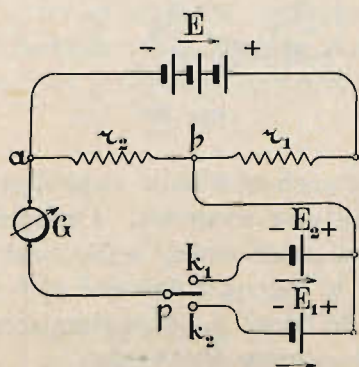
Układ połączeń na rys. 334 wskazuje, że za pomocą przełącznika p w obwód galwanometru wprowadzić można ogniwo o sile elektromotorycznej E_1 , lub też E_2 .

Jeżeli wyłącznik p znajduje się na kontakcie k_1 , to, dobierając odpowiednio opory r_1 i r_2 , osiągamy zrównoważenie siły elektromotorycznej E_2 przez napięcie na punktach ab ; nastąpi to wtedy, gdy prąd w obwodzie galwanometru będzie równać się zeru. Oznaczmy wartości oporów r_1 i r_2 , które będą wtedy, przez r_1' i r_2' . W takim razie na podstawie powyżej wyprowadzonego wzoru otrzymamy:

$$E = E_2 \cdot \frac{r_1' + r_2'}{r_2}.$$

Jeżeli zaś przełącznik p znajduje się na kontakcie k_2 , to dobieramy opory r_1 , r_2 w taki sposób, ażeby zrównoważyć siłę elektromotoryczną E_1 napięciem

¹⁾ Według Du Bois-Reymond'a



Rys. 334.

na ab , zachowując jednak sumę obu oporów stałą. Oznaczmy przez r_1'' i r_2'' takie wartości tych oporów, przy których w tym drugim przypadku prąd w obwodzie galwanometru równa się zeru. Wtedy na tej samej zasadzie, co i poprzednio, otrzymamy wzór:

$$E = E_1 \cdot \frac{r_1'' + r_2''}{r_2''}.$$

Z powyższych dwóch równań, wprowadzając warunek, że $r_1' + r_2' = r_1'' + r_2''$, otrzymujemy:

$$\frac{E_2}{r_2'} = \frac{E_1}{r_2''},$$

czyli:

$$E_1 = E_2 \cdot \frac{r_2''}{r_2'}.$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2''}{r_2'}$$

Znając zaś siłę elektromotoryczną E_2 i stosunek oporu r_2'' do oporu r_2' , możemy obliczyć z tego równania niewiadomą wartość siły elektromotorycznej E_1 .

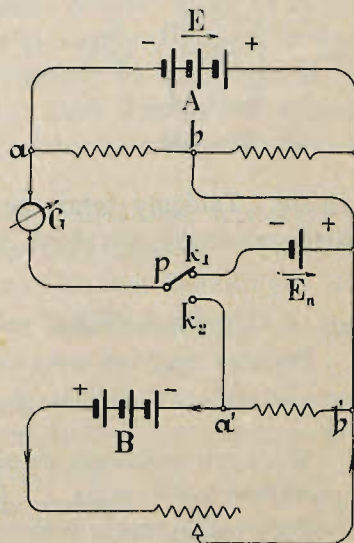
Oba sposoby kompensacyjne nadają się również do wyznaczania napięcia na jakichkolwiek dwóch punktach obwodu, po którym przebiega prąd. Najczęściej jednak stosuje się w tym przypadku sposób kompensacji podwójnej, ponieważ do układu kompensacyjnego nie odgałęzia się żaden prąd.

Układ połączeń przy pomiarze napięcia sposobem kompensacji podwójnej wskazany jest na rys. 335. Chodzi tu o zmierzenie napięcia na punktach $a'b'$ obwodu B ; otóż przyłączamy te punkty do obwodu A w taki sposób, jak to wskazuje rysunek, przedstawiając przełącznik p na kontakt k_2 . Dobieramy opory r_1 i r_2 w obwodzie A w ten sposób, aby osiągnąć równowagę pomiędzy napięciem na punktach ab i $a'b'$. Prąd w obwodzie galwanometru będzie wtedy równać się zeru.

Założmy, że równowaga powyższych napięć została już osiągnięta, i oznaczmy siłę prądu w obwodzie A przez i , wartość oporu r_2 pomiędzy punktami a i b — przez r_2' , napięcie zaś na punktach $a'b'$, równe napięciu na punktach ab , przez e ; wtedy na zasadzie prawa Ohma będzie:

$$e = i \cdot r_2'.$$

Przestawiając przełącznik p na kontakt k_1 , włączamy ogniwo z siłą elektromotoryczną E_n . Opory r_2 i r_1 dobieramy w taki sposób, ażeby, zachowując wartość poprzednią ich sumy, otrzymać w obwodzie galwanometru prąd równy zeru. Wtedy z napięciem na punktach a, b równoważy się siła elektromotoryczna E_n , która tym sposobem równać się będzie temu napięciu.



Rys. 335.

Prąd w obwodzie A został poprzedni, ponieważ sumę oporów r_1 i r_2 zachowaliśmy bez zmiany.

Oznaczmy teraz nową wartość oporu r_2 , przy którym prąd w galwanometrze równa się zeru, przez r_2'' ; wtedy na zasadzie prawa Ohma będzie:

$$E_n = i \cdot r_2''.$$

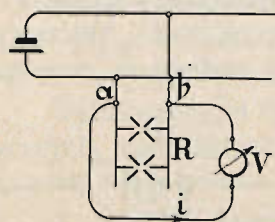
Zestawiając powyższe dwa równania, otrzymamy:

$$e = E_n \cdot \frac{r_2'}{r_2''}.$$

Z tego wzoru obliczyć można wartość napięcia e , o ile znane są siła elektromotoryczna E_n ogniwa normalnego i stosunek oporów r_2' do r_2'' .

3. Woltomierze. Do mierzenia napięć i sił elektromotorycznych posługujemy się jednak najczęściej woltomierzami. Są dwa rodzaje tych przyrządów: woltomierze urządzone tak samo, jak amperomierze i woltomierze elektrostatyczne.

Woltomierze działające prądem. Pomiar napięcia za pomocą woltomierzy pierwszego rodzaju opiera się na zasadzie następującej: Jeżeli mamy zmierzyć napięcie pomiędzy dwoma punktami a i b pewnego obwodu, to przyłączamy woltomierz w sposób, wskazany na rysunku 336. Część prądu obwodu głównego odgałęzia się do woltomierza i, jeżeli siłę prądu w woltomierzu oznaczmy przez i , opór obwodu woltomierza aVb przez R i napięcie pomiędzy punktami a, b przez e , to na zasadzie prawa Ohma będzie:



Rys. 336.

$$e = i \cdot R.$$

Pod wpływem prądu i wskazówka woltomierza odchyli się. Założmy teraz, że pomiędzy prądem i a odchyleniem woltomierza α istnieje zależność, wyrażona wzorem:

$$i = C \cdot \alpha,$$

gdzie C — wielkość stała.

Podstawiając ten wyraz dla i w równanie poprzednie, otrzymamy:

$$e = C \cdot \alpha \cdot R = C \cdot R \cdot \alpha.$$

Wzór ten wskazuje, że odchylenia woltomierza są proporcjonalne do napięcia na punktach a, b , o ile $C \cdot R$ jest wielkością stałą.

Przy przełączaniu woltomierza z jednego miejsca na drugie zdarza się nieraz, że ten sam woltomierz przyłącza się za pomocą rozmaitych drutów, skutkiem czego opór całkowity R będzie za każdym razem inny. Jednakże różnice w tych oporach są zwykle bardzo małe. Jeżeli np. do przyłączenia woltomierza zastosujemy druty miedziane o przekroju 1 mm^2 i długości ogólnej 2 m , to opór takich drutów wyniesie około $0,0351 \Omega$, opór zaś woltomierza wynosi np. około 1000Ω . Tym sposobem opór tych drutów stanowi zaledwie drobną część procentu oporu całkowitego. W takich wypadkach można przyjmować, że napięcie w punktach a, b równa się napięciu na zaciskach woltomierza.

W innych warunkach, np. w tym razie, jeżeli druty, doprowadzające prąd do woltomierza, są bardzo długie, należy uwzględnić opór tychże przy wyznaczaniu wartości wskazań woltomierza.

Ważną jest również rzeczą baczyć, ażeby opór R nie zmieniał się pod wpływem zmian temperatury. Osiąga się to w przybliżeniu, stosując w woltomierzach opory dodatkowe, łączone w szereg ze zwojnicami, a zrobione z drutu manganinowego, lub też z innego stopu, mającego możliwie najmniejszy współczynnik cieplny oporu. Jeżeli drut manganinowy stanowi większą część oporu woltomierza, to opór ogólny zmienia się bardzo mało pod wpływem temperatury; to też praktycznie opór R możemy uważać za stały.

Przy prądzie zmiennym odgrywa także rolę samoindukcja; całkowity opór woltomierza wyraża się wzorem:

$$R = \sqrt{r^2 + (z \pi L)^2},$$

gdzie r — opór omiczny woltomierza, L — współczynnik samoindukcji, a z — liczba zmian prądu w ciągu sekundy.

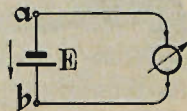
Z tego wzoru wynika, że opór całkowity woltomierza zależy od liczby zmian prądu na sekundę, a więc wartość wskazań woltomierza będzie różna dla rozmaitych prądów.

Chcąc uniknąć tej niedogodności, należy zmniejszyć wpływ składnika $z \pi L$ przez nadanie dużej wartości składnikowi r . W tym celu w obwodach woltomierzy wstawia się duże opory bezindukcyjne (patrz rys. 69, 70, 71). O ile więc $z \pi L$ stanowi małą część procentu całego oporu R , to możemy uważać wskazania takiego woltomierza za niezależne od liczby zmian prądu na sekundę. W tych przypadkach, gdy to jest niemożliwe do osiągnięcia, na skali woltomierza zaznacza się liczbę zmian lub okresów na sekundę tego prądu, przy którym woltomierz był wzorcowany.

Na wielkość L wpływają również rozmaite części metalowe, w których powstają prądy wirowe. Dla uniknięcia tych wpływów przy budowie woltomierzy prądu zmiennego należy unikać stosowania znaczniejszych mas metalowych, a te, które są nieuniknione, rozdzielać dla zmniejszenia siły prądów wirowych.

Przy mierzeniu sił elektromotorycznych woltomierzem działającym za pomocą prądu, należy mieć na względzie tę okoliczność, że woltomierz wskazuje tylko napięcie e na końcówkach a, b (rys. 337). Jeżeli więc opór wewnętrzny źródła prądu jest r , to na podstawie prawa Ohma wzór dla siły elektromotorycznej E będzie:

$$E = e + i \cdot r.$$



Rys. 337.

Ponieważ zaś prąd płynący do woltomierza jest zwykle mały, a opór wewnętrzny źródeł prądu niewielki, przeto w przybliżeniu:

$$E = e.$$

Pozatym należy mieć na uwadze, że wielkość siły elektromotorycznej, np. w ogniwach, zmienia się nieco pod wpływem prądu, przepływającego przez ogniwo.

Z tego wynika wniosek ogólny, że mierzenie siły elektromotorycznej woltomierzami biorącymi prąd jest nieściśle; w technice jednak, mianowicie w tych przypadkach, gdzie nie chodzi o wielką ścisłość, takie pomiary niejednokrotnie bywają stosowane.

Co się tyczy szczegółów ustroju woltomierzy działających prądem, to typów tych przyrządów jest tyleż, co i amperomierzy, a ustrój ich różni się od ustroju amperomierzy tem tylko, że zwojnice wykonane są z cienkiego drutu i że daje się w nich spory opór nawinięcia, a w razie potrzeby włącza się w szereg opory dodatkowe.

Przyrządy dla prądu zmiennego wzorcują się według wartości czynnej napięcia (pierwiastek kwadratowy z przeciętnej kwadratów).

Woltomierze ciepłne i elektrodynamiczne mogą służyć przy zachowaniu tej samej skali do mierzenia napięcia dowolnie zmiennego ¹⁾ i stałego.

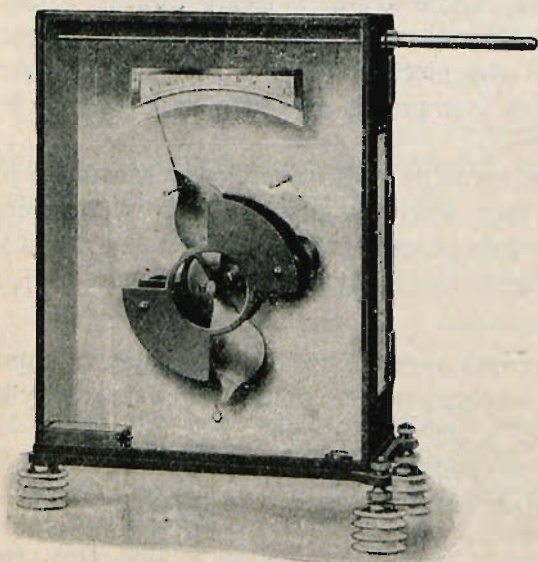
Woltomierze elektrostatyczne. Zasada urządzenia i działania woltomierzy elektrostatycznych polega na własności przyciągania się wzajemnego okładek naładowanych kondensatorów. Na str. 222 wyprowadzony był dla tej siły wzór:

$$F = \frac{e^2 \cdot S \cdot k}{8 \pi \cdot d^2},$$

z którego widzimy, że siła ta jest proporcjonalną do drugiej potęgi napięcia, czyli różnicy potencjałów pomiędzy okładkami; wobec tego woltomierze zbudowane na

tej zasadzie mogą służyć zarówno do prądu zmiennego, jak i do stałego. Wartości podziałek, wyznaczone przy prądzie stałym, będą stanowiły przy prądzie zmiennym pierwiastki kwadratowe z przeciętnej kwadratów wartości chwilowych napięcia.

Z pomiędzy rozmaitych ustrojów stosowanych w praktyce, najważniejsze są dwa. Dla napięć dość wysokich, wynoszących od kilkuset do kilkudziesięciu tysięcy woltów, stosuje się woltomierz, składający się z czterech nieruchomych płytek mosiężnych (rys. 338) i listka glinowego między nimi, obracającego się około osi poziomej. U dołu listka zawieszamy ciężarek; dobiera się on w ten sposób, ażeby, przy równych potencjałach układów ruchomego



Rys. 338.

i nieruchomego, wskazówka znajdowała się na zerze skali, a przy połączeniu układu nieruchomego z jednym, a ruchomego z drugim punktem, gdzie mierzymy

¹⁾ Aby tylko zmienność nie była zbyt powolna.

różnicę potencjałów, wskazówka stanęła na działce właściwej. Gdy pomiędzy układami ruchomym i nieruchomym istnieje pewna różnica potencjałów, listek jest wciągany pomiędzy płytki nieruchome skutkiem przyciągania elektrostatycznego. Listek ten będzie w równowadze wtedy, gdy siła, wciągająca listek, zrównoważy się z siłą ciężkości, działającą na układ ruchomy.

W odmienny sposób urządzony jest woltomierz, przystosowany do mierzenia napięć od kilkudziesięciu do stukilkudziesięciu woltów. Układ najważniejszych części tego przyrządu widzimy na rys. 339.

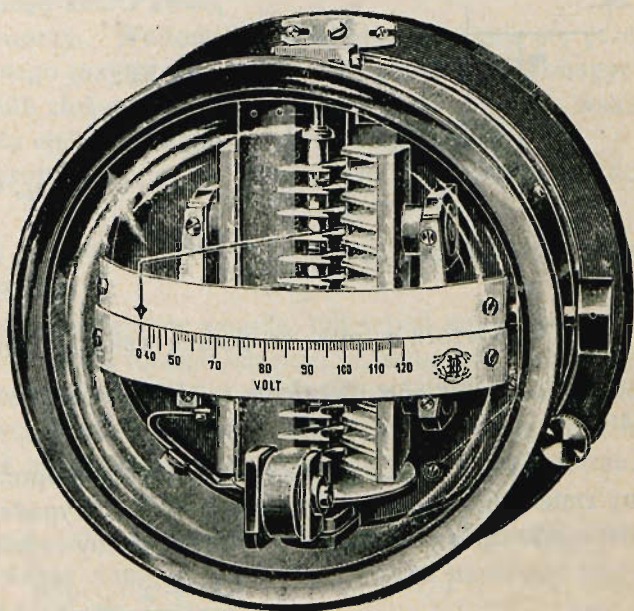
Dwa ¹⁾ rzędy płytek nieruchomych, ustawionych poziomo, stanowią jedną okładkę kondensatora, drugą okładkę tworzy szereg płytek, przymocowanych do pręta, zawieszonego na cienkiej wstążeczce metalowej.

Pod wpływem sił przyciągania elektrostatycznego, płytki ruchome zostają wciągnięte pomiędzy płytki nieruchome; przeciwdziała temu siła sprężystości powyższej wstążeczki, która podczas obrotu układu ruchomego skręca się.

Najważniejszą zaletą woltomierzy elektrostatycznych jest to, że przy napięciu stałym nie biorą one całkiem prądu, a przy napięciu zmiennym z powodu małej pojemności woltomierzy, prąd płynący do nich jest tak słaby, że może być w praktyce uważany za równy zeru.

Ujemną zaś cechą tych przyrządów jest znaczna ich wrażliwość na wpływy elektrostatyczne postronne i potrzeba starannej obsługi; ze względu bowiem na małe siły, poruszające wskazówki tych przyrządów, jest rzeczą konieczną, by części ruchome były zawieszone bardzo delikatnie.

4. Rozszerzenie skali woltomierzy. Jeżeli chodzi o zmierzenie napięcia, przekraczającego skalę danego woltomierza, to przy zwykłych woltomierzach, działających prądem, stosuje się opory dodatkowe, włączone w szereg. Układ połączeń wypada wtedy taki, jak wskazuje rys. 340. Woltomierz o oporze własnym r z oporem dodatkowym R zastosowany tu jest do mierzenia napięcia na punktach $m n$ obwodu lampek.



Rys. 339.

¹⁾ Jeden rząd jest widoczny z prawej strony przyrządu, drugi znajduje się z lewej strony, na rysunku przykryty płytką pionową.

Założmy, że skala woltomierza stosuje się do napięcia e_{ab} ; wtedy wskazania woltomierza α z napięciem na ab związane są wzorem:

$$e_{ab} = C \cdot \alpha,$$

gdzie C jest stała. Przy napięciu danym e_{ab} , napięcie na punktach cb znajdziemy łatwo na podstawie następującego rozumowania.

Oznaczmy prąd w obwodzie woltomierza przez i ; wtedy napięcie na punktach ab według prawa Ohma będzie:

$$e_{ab} = i \cdot r,$$

a na bc :

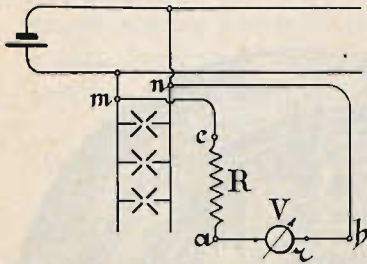
$$e_{bc} = i \cdot (r + R),$$

skąd:

$$e_{bc} = e_{ab} \cdot \frac{r + R}{r},$$

albo:

$$e_{bc} = \frac{r + R}{r} \cdot C \cdot \alpha.$$



Rys. 340.

Z tego wzoru wynika, że podług wskazań woltomierza α , można określić napięcie e_{bc} ,¹⁾ jeżeli się uwzględni tę okoliczność, że stała przyrządu jest $\frac{r + R}{r} \cdot C$ zamiast C .

Przykład. Za pomocą woltomierza o oporze 100Ω ze skalą do $1,5 V$ mamy zmierzyć napięcie, wynoszące $150 V$. Wypada więc włączyć do szeregu z woltomierzem opór dodatkowy — x , taki, ażeby czynił zadość równaniu:

$$\frac{100 + x}{100} = \frac{150}{1,5},$$

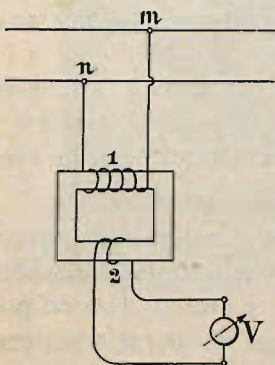
skąd:

$$x = 9900 \Omega.$$

Jeżeli chodzi o rozszerzenie skali woltomierza elektrostatycznego, stosowane są kondensatory, włączane w szereg z woltomierzem: napięcie mierzone rozkłada się wtedy pomiędzy woltomierz i kondensator dodatkowy odwrotnie proporcjonalnie do pojemności.²⁾

Przy prądzie zmiennym, zamiast oporów i kondensatorów, stosuje się przeważnie transformatory, obniżające napięcie.

Jeżeli mamy zmierzyć wysokie napięcie pomiędzy punktami m i n (rys. 341) za pomocą woltomierza, mającego skalę, przystosowaną do napięcia niższego, to woltomierz włącza się w obwód wtórny transformatora, którego obwód pierwotny łączy się z punktami m i n .



Rys. 341.

¹⁾ Wobec małego oporu drutów, łączących przyrządy z punktami m i n , możemy przyjąć $e_{bc} = e_{mn}$.

²⁾ Patrz rozdział IX § 6.

Zwojnica pierwotna ma dużo zwojów, wtórna zaś mało; obie zwojnice osadzone są na wspólnej ramie żelaznej. Za pośrednictwem strumienia magnetycznego, przenikającego tę ramę, w zwojnicy wtórnej powstaje siła elektromotoryczna, tyle razy mniejsza od napięcia pierwotnego, ile razy mniej zwojów ma wtórna zwojnica w porównaniu z pierwotną. ¹⁾ Na skali woltomierza zazwyczaj wskazane są liczby, wyrażające napięcie na końcówkach zwojnicy pierwotnej.

Tego rodzaju transformatory stosują się również wtedy, gdy chodzi o uniknięcie doprowadzenia prądu wysokiego napięcia wprost do przyrządu mierniczego.

5. Wzorcowanie woltomierzy. Woltomierze dokładne wzorcuje się przez porównanie wskazań wzorcowanego przyrządu z wynikami pomiarów, dokonanych sposobem kompensacji prostej lub złożonej, t. j. przez porównanie napięcia, wskazywanego przez woltomierz z siłą elektromotoryczną ogniwa normalnego.

Woltomierze techniczne wzorcuje się przez porównanie z woltomierzami dokładnymi.

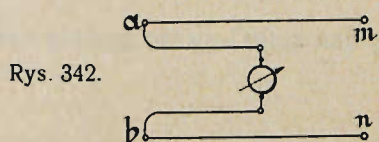
Woltomierze, mające skalę jednakową dla prądu stałego i zmiennego, wzorcowane są zazwyczaj prądem stałym.

Inne zaś woltomierze, które odchylają się wogóle tylko pod wpływem prądu zmiennego lub też mają skalę różną dla rozmaitych prądów, wzorcowane są odpowiednim prądem zmiennym przez porównanie ich odchyleń ze wskazaniami woltomierzy dokładnych, wzorcowanych prądem stałym i mających skalę niezależną od rodzaju prądu. W tenże sposób należy wzorcować wszystkie woltomierze z transformatorem.

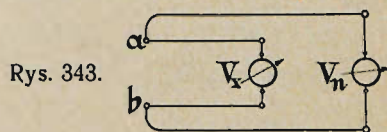
Przy wzorcowaniu stosuje się układy połączeń wskazane na rys. 342 i 343. Na punktach *ab* mamy odpowiednie napięcie zmienne i z tymi punktami łączymy badany woltomierz, a przez zaciski *m n* — przyrząd kompensacyjny. Jeżeli wzorcuje się woltomierz techniczny V_x , to, zamiast przyrządu kompensacyjnego, włącza się woltomierz dokładny V_n (rys. 343). Gdy zaś mamy woltomierz z transformatorem, to punkty *ab* łączą się ze zwojnicą pierwotną transformatora, połączonego z woltomierzem.

Dla otrzymania stopniowo zmiennego napięcia na punktach *ab*, stosowane bywają różne układy przyrządów. Na rys. 344 *Z* — źródło prądu, *r* — opór regulacyjny, *R* — opór stały. Przy zmianie wielkości oporu *r*, zmienia się siła prądu w obwodzie, a więc i napięcie na zaciskach *ab*, które wynosi *iR*.

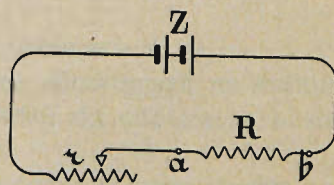
Na rys. 345 mamy znów baterję małych akumulatorów, zwykle o pojemności kilku ampero-



Rys. 342.



Rys. 343.

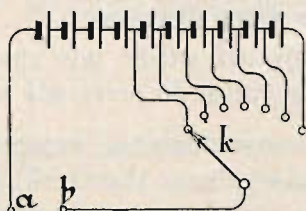


Rys. 344.

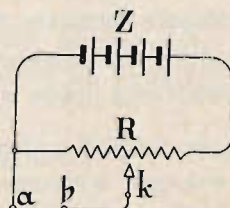
¹⁾ Patrz rozdział XX.

godzin, połączonych w taki sposób, że przesuwając rączkę k , możemy zmieniać liczbę ogniw włączonych pomiędzy punktami a i b , a przez to i napięcie na tych punktach.

Wreszcie na rys. 346 ze źródłem prądu Z włączony jest w szereg opór sta-



Rys. 345.



Rys. 346.

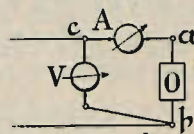
ły R ; punkt a łączy się nastale z jednym końcem oporu, a drugi b z rączką k , za pomocą której punkt ten można połączyć w różnych miejscach z oporem R i stosownie do tego otrzymać różne napięcia na punktach $a b$, od zera do napięcia, istniejącego na końcówkach źródła prądu.

ROZDZIAŁ XXXI.

Mierzenie mocy prądu.

1. **Mierzenie mocy prądu amperomierzem i woltomierzem.** Moc prądu elektrycznego stałego mierzymy zazwyczaj za pomocą amperomierzy i woltomierzy. Mnożąc przez siebie jednoczesne wskazania tych przyrządów, otrzymujemy moc prądu. Należy jednak przy tem zdawać sobie sprawę z nieuniknionych błędów i wiedzieć, jak w danym razie można je poprawić.

Rozważmy przedewszystkiem wypadek mierzenia mocy prądu, pochłanianego przez odbieracz O (rys. 347). Moc tego prądu obliczymy podług wzoru:



Rys. 347.

$$e_{ab} \cdot J.$$

Amperomierz, włączony w obwód tak, jak to wskazuje rysunek, mierzy zupełnie ściśle prąd, płynący do odbieracza, woltomierz zaś wskazuje napięcie nie na końcówkach odbieracza, lecz na punktach cb ; napięcie to jest większe od napięcia na końcówkach ab .

Oznaczmy opór amperomierza przez r ; wówczas według prawa Ohma napięcie na końcówkach ca będzie:

$$e_{ca} = J \cdot r,$$

napięcie zaś na punktach c, b równa się sumie napięć na punktach: c, a i a, b , czyli:

$$e_{cb} = e_{ca} + e_{ab},$$

a więc:

$$e_{cb} = J \cdot r + e_{ab}.$$

Mnożąc to równanie przez J , otrzymamy:

$$e_{cb} \cdot J = J^2 \cdot r + e_{ab} \cdot J,$$

gdzie iloczyn $e_{ab} \cdot J$ stanowi moc prądu, dostarczoną odbieraczowi O .

Powyższe równanie wskazuje, że iloczyn wskazań odczytanych na woltomierzu i amperomierzu większy jest od mocy, dostarczonej do odbieracza o stratę mocy, zużytej na ogrzewanie amperomierza.

Jeżeli opór amperomierza jest znany, to niedokładność tę łatwo można sprostować, odejmując moc prądu $J^2 \cdot r$ od mocy, otrzymanej przez pomnożenie wskazań amperomierza i woltomierza.

W razie pomiaru mocy prądu, wynoszącej kilka kilowatów, poprawki tej się nie robi, gdyż jest ona mniejszą od błędów, popełnianych przy odczytywaniu przyrządów.

Przykład 1. Załóżmy, że przy mierzeniu mocy pochłanianej przez silnik, wskazanie amperomierza wynosi 15 A., a woltomierza — 110 V., opór zaś amperomierza do 15 A. stanowi około 0,01 Ω . Moc zamieniająca się w amperomierzu na ciepło wynosi zatem:

$$15^2 \cdot 0,01 = 2,25 \text{ W.}$$

Iloczyn wskazań na amperomierzu i woltomierzu będzie wtedy $110 \times 15 = 1650 \text{ W}$. Moc prądu, pochłonięta przez odbieracz, będzie więc $1650 - 2,25 = 1647,75 \text{ W}$. Poprawka, którą tu wprowadziliśmy, wynosi zaledwie:

$$\frac{2,25 \cdot 100}{1650} = 0,1365 \%$$

Dokładność odczytywanych wskazań nawet na bardzo dokładnych przyrządach używanych w technice, nie przewyższa 0,25%; wobec tego poprawka powyższa nie ma żadnego praktycznego znaczenia, gdyż wartość jej znajduje się po za granicą błędów w odczytywaniu.

Przykład 2. Załóżmy, że przy tym samym układzie przyrządów (rys. 347) mierzymy moc prądu pochłanianą przez lampkę elektryczną. Woltomierz wskazuje napięcie 10 V, a amperomierz — prąd 1,5 A., opór zaś amperomierza wynosi 1 Ω . W takim razie moc prądu według wskazań odczytanych na przyrządach wypadnie 15 W., a strata mocy na ciepło w amperomierzu:

$$1,5^2 \cdot 1 = 2,25 \text{ W.}$$

Rzeczywista moc prądu, pochłonięta przez lampkę, będzie:

$$15 - 2,25 = 12,75 \text{ W.}$$

W tym przypadku poprawka wynosi:

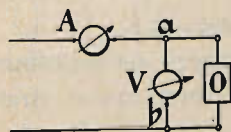
$$\frac{2,25 \cdot 100}{15} = 15 \%$$

Tak znacznej poprawki pominąć oczywiście nie można, — jest ona znacznie większa od błędów, jakie wynikają przy odczytywaniu przyrządów.

Układ połączeń woltomierza i amperomierza można jeszcze wykonać w inny sposób, wskazany na rys. 348. Wtedy napięcie, wskazywane przez woltomierz, jest rzeczywistym napięciem na końcówkach odbieracza, lecz prąd, przepływający przez amperomierz, równa się wtedy sumie prądów płynących przez odbieracz i przez woltomierz. Oznaczmy prąd w amperomierzu przez J , w odbieraczu przez J_0 i w woltomierzu przez i ; wtedy według pierwszego prawa Kirchhoffa wypadnie:

$$J = J_0 + i.$$

Mnożąc zaś to równanie przez e_{ab} , otrzymamy:



Rys. 348.

cjonalna do prądów w obu zwojnicach. Oznaczmy prąd w zwojnicy nieruchomej w chwili t przez J_t , w ruchomej przez i_t , a stałą przez C' , wtedy:

$$M_s = C' \cdot (J_t \cdot i_t)_s.$$

$(J_t \cdot i_t)_s$ oznacza tu średnią wartość iloczynu prądów.

Jeżeli opór zwojnicy ruchomej oznaczymy przez r , opór dodatkowy przez R , a napięcie w chwili t na punktach c , b przez e_t , to, pomijając nieznaczną samoindukcję w obwodzie zwojnicy ruchomej, możemy napisać wzór:

$$i_t = \frac{e_t}{R + r},$$

a zatem:

$$M_s = C' \cdot \frac{1}{R + r} \cdot (e_t \cdot J_t)_s.$$

$(e_t \cdot J_t)_s$ wyraża średnią moc prądu, o którą zwykle nam chodzi przy pomiarach; oznaczmy ją przez W .

Wtedy otrzymamy:

$$M_s = C' \cdot \frac{1}{R + r} \cdot W,$$

a stąd:

$$W = \frac{R + r}{C'} \cdot M_s.$$

Podstawiając w to równanie znalezione poprzednio wyrażenie (a) dla M_s , otrzymamy:

$$W = \frac{R + r}{C'} \cdot C \cdot \alpha.$$

Jeżeli współczynniki C' i C nie zależą od wielkości kąta α , to moc prądu będzie proporcjonalna do kąta α . Przez odpowiedni kształt i układ zwojnic można osiągnąć prawie dokładnie niezależność wielkości C' od kąta α . Przy odpowiednich sprężynach wielkość C jest również stała; wobec tego podziałkę na skali otrzymać możemy zupełnie jednostajną.

Wskazania watomierza elektrodynamicznego są ściśle dla wszelkich prądów, albowiem przy powyższym rozumowaniu nie czyniliśmy żadnych założeń co do funkcji, wyrażającej zależność prądu lub napięcia od czasu.

Wzorcować więc można watomierz prądem stałymi, mierząc moc za pomocą amperomierza i woltomierza. Jeżeli chodzi o pomiary bardzo ściśle, to należy uwzględnić, że, mierząc watomierzem moc prądu pochłanianą przez odbieracz O (rys. 349), i włączając watomierz, jak to wskazuje rysunek 349, popełniamy błąd taki sam, jak przy mierzeniu mocy za pomocą amperomierza i woltomierza, włączonych w obwód według rys. 347. Prąd do zwojnicy ruchomej płynie bowiem od napięcia nieco wyższego, i w mocy wskazywanej przez watomierz mieści się także moc, przetwarzająca się na ciepło w zwojnicy nieruchomej.

Jeżeli natomiast włączymy watomierz inaczej, jak to wskazuje rys. 350, to wówczas popełnimy inny błąd; prąd w zwojnicy nieruchomej będzie zbyt wiel-

ki, ponieważ przez tę zwojnicę, oprócz prądu płynącego do odbieracza, przepływa również prąd zwojnicy ruchomej.

W tym przypadku wskazania watomierza, oprócz mocy, pochłanianej przez odbieracz, zawierać będą jeszcze moc, przetwarzającą się na ciepło w zwojnicy ruchomej.

Znając opory zwojnic, nieruchomej i ruchomej, jak również napięcie i siłę prądu, zasilającego odbieracz, łatwo obliczyć poprawki, jakie należy wprowadzić do wskazań watomierza.

Niektóre watomierze zaopatrywane bywają w uzwojenie kompensacyjne, które usuwa wyżej wspomniany błąd przy pomiarach watomierzem. Takie uzwojenie włącza się w szereg ze zwojnicą ruchomą i umieszcza się nieruchomo w ten sposób, aby osłabić pole magnetyczne, wywoływane przez zwojnicę nieruchomą.

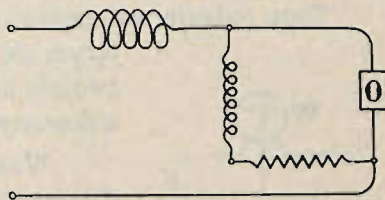
Watomierze, stosowane w pracowniach, najczęściej zaopatrzone są w cztery zaciski, z których dwa stanowią końcówki zwojnicy nieruchomej, a dwa inne — końcówki zwojnicy ruchomej. Zwojnica ruchoma przystosowana jest do prądu o względnie niewielkim napięciu, np. 30 V. Jeżeli napięcie prądu, którego moc mierzymy, jest większe od 30 V., to stosujemy opory dodatkowe, łącząc je w szereg ze zwojnicą ruchomą.

Przy wykonaniu połączenia należy uważać, ażeby opór dodatkowy przed zwojnicą ruchomą był włączony w miejscu R , a nie w R' (rys. 351).

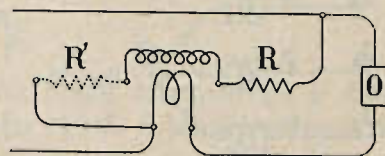
Włączając opór w R' , wytworzylibyśmy znaczną różnicę potencjałów pomiędzy zwojnicami ruchomą i nieruchomą, skutkiem czego wewnątrz przyrządu mogłoby w pewnych okolicznościach powstać krótkie zwarcie, ¹⁾ powodujące uszkodzenie przyrządu.

Obok watomierzy elektrodynamicznych na szczególną uwagę zasługują jeszcze watomierze indukcyjne.

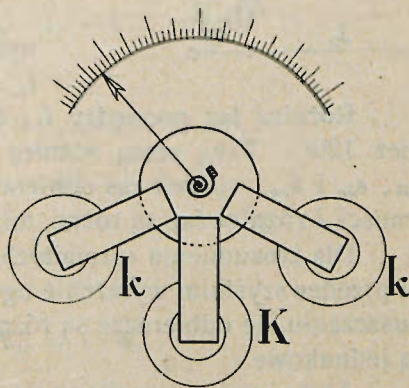
Ustrój tych przyrządów oparty jest na tej samej zasadzie, co i ustrój amperomierzy indukcyjnych, z tą tylko różnicą, że tutaj na krążek glinowy działają trzy elektromagnesy (rys. 352). Zwojnica elektromagnesu K ma uzwojenie z grubego drutu, po którym przepływa cały prąd; natomiast przez zwojnice k i k przepływa prąd odgałęziony. Na biegunach



Rys. 350.



Rys. 351.

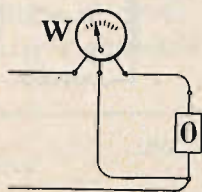


Rys. 352.

¹⁾ Krótkim zwarcie lub, prościej, zwarcie nazywamy zetknięcie się dwóch przewodników o znacznej różnicy potencjałów, lub też połączenie tych przewodników przez mały opór.

elektromagnesów k i k umieszczone są blaszki, przykrywające częściowo te bieguny. Moment obrotowy, działający na krążek, zależy tu od napięcia i siły prądu, jak również od różnicy faz pomiędzy napięciem i siłą prądu; odchylenie wskazówki osadzonej na osi będzie więc zależało od mocy prądu.

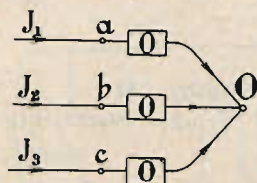
Tego rodzaju watomierze urządza się również z walcem glinowym, obracającym się w polu magnetycznym, wywołanym przez szereg zwojnic ustawionych wokoło, podobnie jak w amperomierzu, wskazanym na rys. 327.



Rys. 353.

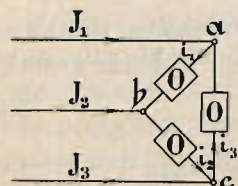
Watomierze indukcyjne albo elektrodynamiczne, urządzone do ustawienia na tablicach rozdzielczych, mają niekiedy tylko trzy zaciski do doprowadzania prądu. Dwa większe przeznaczone są do wprowadzania prądu głównego, a mniejszy do przyłączania drugiego końca zwojnicy ruchomej, której pierwszy koniec przyłączony jest wewnątrz przyrządu do zwojnicy nieruchomej. Układ połączeń w tym przypadku podany jest na rys. 353.

3. Zastosowanie watomierzy do mierzenia prądu trójfazowego. Prąd trójfazowy płynie trzema przewodnikami w ten sposób, że fazy prądów są różne, i jeżeli wszystkie odbieracze, włączone w poszczególne fazy, zupełnie są jednakowe, to wielkości czynne prądów i napięć we wszystkich fazach są jednakowe i przesunięte względem siebie o trzecią część okresu.



Rys. 354.

Celem wyzyskania wszystkich trzech faz prądu trójfazowego, odbieracze prądu włączają się zazwyczaj w sposób, wskazany na rys. 354 i 355. Połączenie według rys. 354 nazywa się połączeniem w gwiazdę, połączenie zaś według rys. 355 — połączeniem w trójkąt. Odbieraczami, wskazanymi na tych rysunkach, mogą być np. lampki elektryczne albo też poszczególne zwoje silnika trójfazowego.



Rys. 355.

Jeżeli opory omiczne i indukcyjne poszczególnych odbieraczy są jednakowe, to $J_1 = J_2 = J_3$, $i_1 = i_2 = i_3$, $e_{a0} = e_{b0} = e_{c0}$, a $e_{ab} = e_{bc} = e_{ca}$. Różnica faz pomiędzy i_1 , i_2 i i_3 wynosi 120° , pomiędzy J_1 , J_2 i J_3 również 120° . Taką samą różnicę faz mamy pomiędzy e_{a0} , e_{b0} i e_{c0} i pomiędzy e_{ab} , e_{bc} i e_{ca} . Jeżeli zaś odbieracze nie są jednakowe, to niema powyższych równości i różnice faz są różne, mianowicie większe lub mniejsze od 120° .

Dla zrozumienia rozmaitych sposobów włączania watomierzy, wyprowadzimy tu przede wszystkim wyrażenie ogólne całkowitej mocy prądu trójfazowego, w przypuszczeniu, że odbieracze są różne, czyli że i prądy w poszczególnych fazach nie są jednakowe.

Ażeby uniknąć znakowania zbyt złożonego, oznaczamy tu chwilowe wartości prądów i napięć przez J_1 , J_2 , J_3 , i_1 , i_2 , i_3 , e_{ab} , e_{ba} , e_{ca} , e_{ao} , e_{bo} , e_{co} , a to stosownie do rys. 354 i 355. Strzałkami na tych rysunkach oznaczone są kierunki dodatnie prądów i napięć.

W razie połączenia w gwiazdę (rys. 354), moc całkowita prądu trójfazowego w danej chwili — W_t będzie równa sumie mocy w tejże chwili w poszczególnych fazach:

$$W_t = e_{ao} \cdot J_1 + e_{bo} \cdot J_2 + e_{co} \cdot J_3.$$

Według pierwszego prawa Kirchhoffa:

$$J_1 + J_2 + J_3 = 0,$$

skąd:

$$J_3 = -J_1 - J_2;$$

wprowadzając zaś to znaczenie J_3 w równanie mocy, otrzymamy:

$$W_t = (e_{ao} - e_{co}) \cdot J_1 + (e_{bo} - e_{co}) \cdot J_2.$$

Oznaczając przez literę V z odpowiednim znacznikiem potencjał w danym punkcie, otrzymamy:

$$e_{ao} = V_a - V_o, \quad e_{bo} = V_b - V_o \quad \text{i} \quad e_{co} = V_c - V_o,$$

skąd:

$$e_{ao} - e_{co} = (V_a - V_o) - (V_c - V_o) = V_a - V_c = e_{ac},$$

$$e_{bo} - e_{co} = (V_b - V_o) - (V_c - V_o) = V_b - V_c = e_{bc}.$$

Możemy więc napisać:

$$W_t = e_{ac} \cdot J_1 + e_{bc} \cdot J_2.$$

W razie połączenia w trójkąt, moc całkowita prądu trójfazowego w danej chwili — W_t będzie także równa sumie mocy w tejże chwili w poszczególnych fazach, czyli:

$$W_t = e_{ab} \cdot i_1 + e_{bc} \cdot i_2 + e_{ca} \cdot i_3,$$

oraz:

$$e_{bc} + e_{ca} = (V_b - V_c) + (V_c - V_a) = -(V_a - V_b) = -e_{ab}.$$

Podstawiając zaś powyższy wyraz dla e_{ab} w równanie dla mocy, otrzymamy:

$$W_t = e_{bc} \cdot (i_2 - i_1) + e_{ca} \cdot (i_3 - i_1).$$

Według pierwszego prawa Kirchhoffa:

$$i_2 - i_1 = J_2,$$

$$i_3 - i_1 = -J_1,$$

a zatem:

$$W_t = e_{bc} \cdot J_2 - e_{ca} \cdot J_1.$$

Ponieważ jednak:

$$e_{ca} = V_c - V_a = -(V_a - V_c) = -e_{ac},$$

przeto:

$$W_t = e_{ac} \cdot J_1 + e_{bc} \cdot J_2.$$

Widzimy więc, że moc prądu trójfazowego w obu przypadkach wyraża się tym samym wzorem.

W praktyce ma przedewszystkiem znaczenie nie moc w danej chwili, ale moc średnia, którą będziemy nazywali krótko mocą prądu trójfazowego, oznaczając ją przez W . Mamy zatem:

$$W = (e_{ac} \cdot J_1)_s + (e_{bc} \cdot J_2)_s,$$

gdzie nawiasy i znaczek s oznaczają, że są to wartości średnie z iloczynów odpowiednich wielkości.

Założmy teraz, że napięcia i prądy zmieniają się tu w zależności od czasu dokładnie według sinusoidy, i oznaczmy różnicę faz pomiędzy napięciem e_{ac} i prądem J_1 przez φ_1 , a różnicę faz pomiędzy napięciem e_{bc} i prądem J_2 przez φ_2 . Wtedy, na zasadzie wywodów, podanych w rozdziale XXV, otrzymamy:

$$W = e_{ac} \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1 + e_{bc} \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad . \quad . \quad . \quad (a)$$

Litery e_{ac} , e_{bc} , J_1 i J_2 oznaczają tu wartości czynne prądów i napięć. Kąt φ_1 lub φ_2 może tu wypaść większy od 90° , a wtedy odpowiedni wyraz staje się ujemnym; pamiętać więc należy, że mamy tu do czynienia z sumą algebraiczną.

Układ dwóch watomierzy. Celem wyznaczenia dwóch mocy składowych, trzeba oczywiście zastosować dwa watomierze, włączone w taki sposób, jak to wskazuje rys. 356. Według wywodów paragrafu 2 rozdziału niniejszego, watomierz wskazuje średni iloczyn prądu, przepływającego przez zwojnicę nieruchomą, przez napięcie na końcówkach obwodu zwojnicy ruchomej, przeto w rozważanym przypadku watomierz W_1 wskaże średni iloczyn: ¹⁾

$$(e_{ac} \cdot J_1)_s = e_{ac} \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1.$$

Watomierz W_2 wskaże średni iloczyn:

$$(e_{bc} \cdot J_2)_s = e_{bc} \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2.$$

Jeżeli przy jednakowym połączeniu zwojnic watomierzy ²⁾ wychylenia wskazówek otrzymują się w jedną stronę,

to wskazania watomierzy wypadnie dodać, gdy zaś wychylenia będą w różne strony — to odjąć.

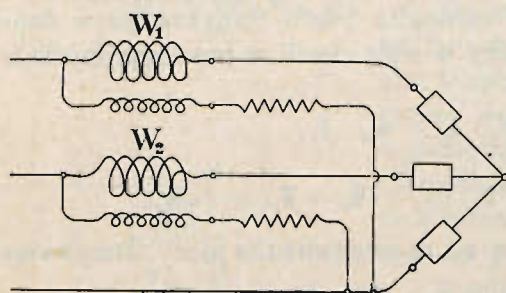
Można również zastosować jeden watomierz, włączając go najpierw w jedną fazę, a potem w drugą, jeżeli tylko rozkład napięć i prądów jest trwały.

Układ z jednym watomierzem. Jeżeli obciążenie poszczególnych faz jest jednakowe, to do zmierzenia całej mocy prądu trójfazowego wystarczy jeden watomierz.

W razie połączenia odbieraczy w gwiazdę z dostępnym punktem zerowym O ,

¹⁾ Patrz oznaczenia na rys. 354 i 355.

²⁾ W przypadkach wątpliwych należy włączyć na próbę oba watomierze w jeden obwód; gdy połączenia są zgodne, odchylenia w obu przyrządach będą w jedną stronę.



Rys. 356.

najdogodniej będzie włączyć watomierz w taki sposób, jak to wskazano na rys. 357. Prąd jednej fazy przechodzi tu przez zwojnicę nieruchomą watomierza a na końcówkach zwojnicy ruchomej mamy napięcie, tak zwane fazowe albo przewodowe.

W tych warunkach watomierz wskazuje oczywiście moc w jednej tylko fazie; należy więc wskazania jego potroić, ażeby otrzymać moc całkowitą prądu trójfazowego.

Jeżeli watomierz urządzony jest do mierzenia całej mocy prądu trójfazowego, to na jego skali podane są zazwyczaj cyfry potrojone, wyrażające od razu całkowitą moc prądu trójfazowego.

Jeżeli punkt zerowy jest niedostępny, albo też niema go wcale, bo odbieracze połączone są w trójkąt, to za pomocą trzech oporników można wytworzyć punkt zerowy. Oporniki R_1 , R_2 , R_3 łączą się wtedy tak, jak to wskazuje rys. 358.

Jeżeli opór zwojnicy ruchomej jest r , to opory należy tak dobrać, ażeby

$$r + R_1 = R_2 = R_3.$$

Stała watomierza zależy oczywiście od wielkości $r + R_1$.

Można stosować jeszcze układ połączeń nieco uproszczony, opuszczając opór R_1 . Ten sposób mierzenia opiera się na wywodach następujących:

Jeżeli mamy układ odbieraczy połączonych w trójkąt (rys. 359), to, stosownie do przeprowadzonych wyżej rozumowań, całkowita moc prądu trójfazowego wyraża się wzorem:

$$W = e_{ac} \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1 + e_{bc} \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2.$$

Wzór ten możemy napisać inaczej, jeżeli rozważymy wykresy wektorowe prądów i napięć.

Zakładamy, że obciążenie faz jest jednakowe, czyli że:

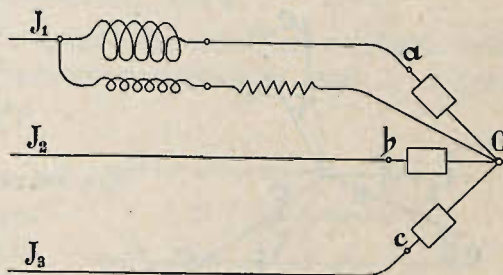
$$i_1 = i_2 = i_3,$$

a skutkiem tego:

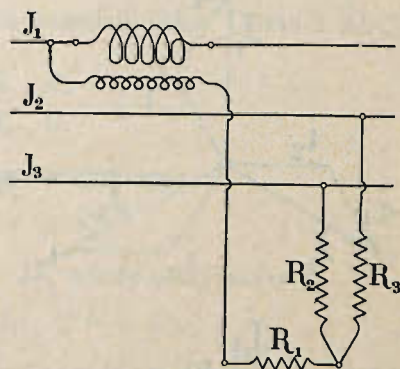
$$J_1 = J_2 = J_3,$$

jak również:

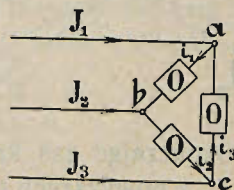
$$e_{ab} = e_{bc} = e_{ca}.$$



Rys. 357.



Rys. 358.



Rys. 359.

Jeżeli watomierz ma być używany stale w takim układzie, to na skali jego podane być winny cyfry, wyrażające całkowitą moc prądu trójfazowego.

4. Wyznaczanie współczynnika mocy za pomocą watomierza. Na podstawie powyższych wywodów łatwo wykazać, że przy równym obciążeniu trzech faz, za pomocą wskazań dwóch watomierzy, włączonych według rys. 356, można obliczyć przesunięcie fazy prądu względem napięcia, a więc i współczynnik mocy prądu, wyrażający stosunek mocy rzeczywistej do pozornej.

Z układu wektorów wskazanego na rys. 360 widzimy, że każdy prąd przesunięty jest względem swego napięcia o kąt φ ; rzeczywista moc całkowita prądu będzie zatem:

$$W = e_{ab} \cdot i_1 \cdot \cos \varphi + e_{bc} \cdot i_2 \cdot \cos \varphi + e_{ca} \cdot i_3 \cdot \cos \varphi.$$

Gdy wszakże obciążenie wszystkich trzech faz jest jednakowe, możemy napisać krócej:

$$W = 3 \cdot e \cdot i \cdot \cos \varphi.$$

Moc pozorna będzie $3 \cdot e \cdot i$, a więc:

$$\frac{W}{3 \cdot e \cdot i} = \cos \varphi.$$

Kąt φ znajdziemy ze wskazań dwóch watomierzy w sposób następujący: Oznaczmy wskazania tych watomierzy (rys. 356) przez W_1 i W_2 ; w takim razie z poprzednio podanych wzorów mamy:

$$W_1 = e_{ac} \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1,$$

$$W_2 = e_{bc} \cdot J_2 \cdot \cos \varphi_2.$$

Ponieważ zaś rozważamy tutaj wypadek równego obciążenia wszystkich trzech faz, a więc przy $e_{ac} = e_{bc}$ i $J_1 = J_2$ otrzymamy:

$$\frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} = \frac{\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2}{\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2}.$$

Z poprzednich wywodów (str. 342) wiemy, że:

$$\varphi_1 = 30^\circ + \varphi, \quad \text{a} \quad \varphi_2 = 30^\circ - \varphi,$$

a zatem:

$$\frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} = \frac{\cos (30^\circ + \varphi) - \cos (30^\circ - \varphi)}{\cos (30^\circ + \varphi) + \cos (30^\circ - \varphi)} = \frac{\sin 30^\circ \cdot \sin \varphi}{\cos 30^\circ \cdot \cos \varphi}$$

a ponieważ $\sin 30^\circ = \frac{1}{2}$, a $\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$, otrzymamy:

$$\frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

skąd:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \cdot \frac{W_2 - W_1}{W_1 + W_2}.$$

Mając $\operatorname{tg} \varphi$, łatwo znaleźć $\cos \varphi$ z tablic trygonometrycznych, lub też obliczyć go ze wzoru:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}.$$

Jest to względnie dość dokładny sposób wyznaczania współczynnika mocy przy prądzie trójfazowym, o ile krzywe prądów i napięcia nie różnią się znacznie od sinusoid, i obciążenie faz jest równe. Zwracać tu jednak należy baczną uwagę na znak wskazań watomierzy, i wskazania ujemne wprowadzać do powyższego wzoru ze znakiem minus.

5. Mierzenie mocy prądu trójfazowego amperomierzem i woltomierzem. Jeżeli odbieracze prądu są bezindukcyjne, np. lampki żarowe, to napięcie na każdym z odbieraczy jest w fazie z prądem, przepływającym przez odpowiedni odbieracz. Wtedy przy równym obciążeniu we wszystkich fazach moc całkowita da się wyrazić wzorem:

$$3 e \cdot J,$$

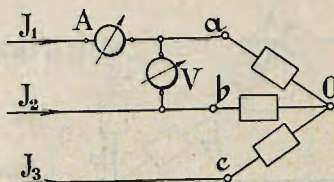
gdzie e oznacza wartość czynną napięcia, a J — wartość czynną prądu każdego odbieracza.

W rozważanym przypadku (rys. 364):

$$e_{ao} = e_{bo} = e_{co} = e,$$

oraz:

$$J_1 = J_2 = J_3 = J.$$



Rys. 364.

Napięcie e można łatwo wyrazić przez e_{ab} , ponieważ z układu odbieraczy (rys. 364) wypada, że e_{ab} równa się różnicy geometrycznej napięć e_{bo} i e_{ao} , czyli:

$$e_{ab} = e_{bo} - e_{ao}.$$

Napięcia e_{ao} , e_{bo} i e_{co} są odpowiednio przesunięte względem siebie o 120° , a więc w układzie wektorów przedstawiają się one tak, jak to wskazuje rys. 365, wypadkowe zaś napięcie e_{ab} będzie jednym z boków trójkąta, którego dwa inne boki będą e_{bo} i $(-e_{ao})$. Jest to trójkąt równoramienny, kąt rozwarty tego trójkąta wynosi 120° , a zatem kąty ostre tegoż mają po 30° , stąd wynika, że:

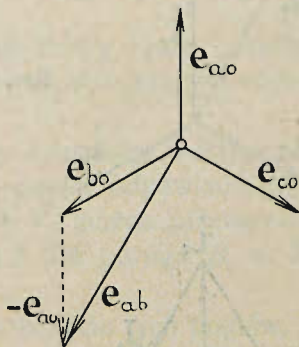
$$e_{ab} = e_{ao} \cdot \cos 30^\circ + e_{bo} \cdot \cos 30^\circ,$$

ponieważ zaś $e_{ao} = e_{bo} = e$, a $\cos 30^\circ =$

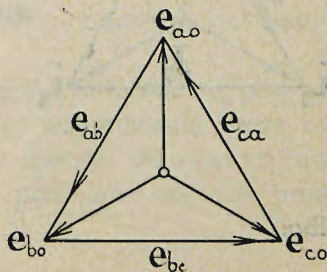
$$= \frac{\sqrt{3}}{2}, \text{ przeto:}$$

$$e_{ab} = \sqrt{3} \cdot e.$$

Rys. 365.



Rys. 366.



Z układu wektorów na rys. 365 łatwo spostrzec, że napięcia wypadkowe e_{ab} , e_{bc} i e_{ca} będą bokami trójkąta, otrzymanego przez połączenie końców wektorów e_{ao} , e_{bo} i e_{co} (rys. 366).

Moc całkowita prądu trójfazowego może być przeto wyrażona wzorem:

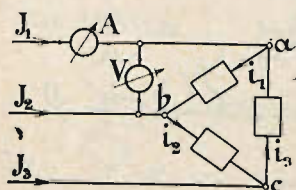
$$3 \cdot e \cdot J = 3 \cdot \frac{e_{ab}}{\sqrt{3}} \cdot J,$$

albo:

$$\sqrt{3} \cdot e_{ab} \cdot J_1.$$

Napięcie e_{ab} i prąd J_1 odczytuje się na woltomierzu i amperomierzu, włączonych tak, jak to wskazuje rys. 364.

Jeżeli mamy połączenie odbieraczy w trójkąt (rys. 367), to przy równym obciążeniu faz wypadnie:



Rys. 367.

oraz:

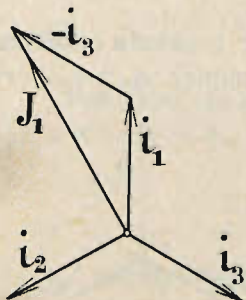
$$i_1 = i_2 = i_3 = i,$$

$$e_{ab} = e_{bc} = e_{ca} = e'.$$

Jeżeli zaś odbieracze są bezindukcyjne, to moc całkowita prądu trójfazowego da się wyrazić wzorem:

$$3 \cdot e' \cdot i.$$

Prądy i_1 , i_2 i i_3 są przesunięte odpowiednio względem siebie o третią część okresu; mogą być zatem wyrażone trzema wektorami tak, jak to widzimy na rysunku 368. Według prawa Kirchhoffa, dla punktu a mamy równanie wektorowe:



$$J_1 + i_3 - i_1 = 0,$$

a więc:

$$J_1 = i_1 - i_3.$$

Rys. 368. Trójkąt na rys. 368 jest równoramienny; jego kąt rozwarty ma 120° , a więc kąty ostre mają po 30° , a $\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$. W takich warunkach możemy ułożyć równanie:

$$J_1 = i_1 \cdot \cos 30^\circ + i_3 \cdot \cos 30^\circ = i \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Prądy J_1 , J_2 , J_3 będą bokami trójkąta, utworzonego przez połączenie końców wektorów i_1 , i_2 , i_3 (rys. 369).

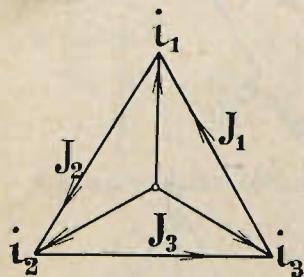
Rys. 369. i_2 , i_3 (rys. 369).

Uwzględniając tę zależność pomiędzy prądami J i i w układzie trójfazowym, otrzymamy dla mocy całkowitej prądu trójfazowego wzór następujący:

$$3 \cdot e' \cdot i = 3 \cdot e' \cdot \frac{J}{\sqrt{3}},$$

albo:

$$\sqrt{3} \cdot e_{ab} \cdot J_1.$$



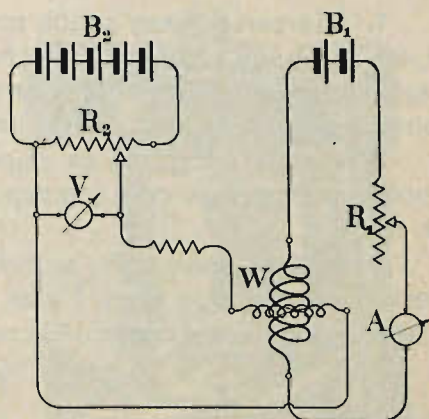
Otrzymujemy tu więc ten sam wzór, jaki znaleźliśmy w przypadku połączenia odbieraczy w gwiazdę.

Stąd wniosek, że niezależnie od rodzaju układu odbieraczy, moc całkowitą prądu trójfazowego można obliczyć według powyższego wzoru ze wskazań amperomierza i woltomierza, jeżeli tylko odbieracze są bezindukcyjne i dają jednakowe obciążenie we wszystkich trzech fazach.

Jeżeli zaś odbieracze są indukcyjne, to moc prądu trójfazowego należy mierzyć za pomocą watomierza tak, jak to wskazanem zostało poprzednio.

6. Wzorcowanie watomierzy. Watomierze elektrodynamiczne wzorcuje się prądem stałym za pomocą dokładnych amperomierzy i woltomierzy.

Układ połączeń stosuje się zwykle taki, jak wskazuje rys. 370. Przez zwojnicę nieruchomą watomierza przepuszcza się prąd ze źródła prądu B_1 , utworzonego z kilku akumulatorów. Za pomocą opornika R_1 można siłę prądu nastawiać na odpowiednią wartość, wskazaną przez amperomierz A . Zwojnicę ruchomą watomierza zasila się prądem z baterji B_2 , która może składać się z wielkiej liczby ogniw akumulatorowych o małej pojemności, gdyż w obwodzie zwojnicy ruchomej zazwyczaj przebiega prąd słaby, napięcie jednak musi być takie, dla jakiego przeznaczony jest watomierz. Nastawianie odpowiedniego napięcia na zwojnicy ruchomej odbywa się za pomocą opornika R_2 . Do mierzenia tego napięcia służy woltomierz V .



Rys. 370.

Iloczyn wskazań woltomierza i amperomierza daje liczbę watów, odpowiadającą odchyleniu watomierza współczesnego z powyższymi wskazaniem woltomierza i amperomierza.

Przez zastosowanie dwóch źródeł prądu unikamy znacznego zużycia energii dla wzorcowania i konieczności rozporządzania mocą prądu, odpowiadającą skali watomierza; np. watomierz do 100 KW (200 A przy 500 V) można przewzorcować, mając np. jedną baterję na 200 A przy 6 V, t. j. na 1,2 KW i drugą B_2 na 500 V przy 0,5 A, t. j. na 0,25 KW.

Przy prądach bardzo silnych albo przy wysokim napięciu tych prądów, zwojnicę nieruchomą watomierzy zasila się prądem przez transformator prądu. Jeżeli w sieci mamy wysokie napięcie, to inny transformator, t. zw. transformator napięcia, służy do zasilania zwojnicy ruchomej.

Wzorcowanie watomierzy z transformatorami powinno odbywać się przy połączeniu watomierza przez te transformatory. Wtedy do wzorcowania może być zastosowany oczywiście tylko prąd zmienny, przyczem stosuje się również dwa źródła prądu zmiennego: jedno — niższego napięcia przy znacznej sile prądu i drugie — wysokiego napięcia przy małej sile prądu.