

ROZDZIAŁ XXXII.

Mierzenie pracy prądu.

1. Mierzenie pracy prądu przez pomiar siły prądu, napięcia jego i czasu, lub też mocy i czasu. Gdy chodzi o zmierzenie pracy prądu w ciągu krótkiego czasu, posługujemy się zazwyczaj: przy prądzie stałym — amperomierzem, woltomierzem i zegarkiem, a przy prądzie zmiennym — watomierzem i zegarkiem.

Wskazania, odczytane na amperomierzu i woltomierzu lub na watomierzu, zapisujemy co pewien czas i następnie obliczamy średnią wartość prądu, napięcia lub mocy.

Oznaczając przez e , i , w średnie wartości wskazań woltomierza, amperomierza i watomierza, a przez t czas, w ciągu którego płynął prąd i do którego stosują się powyższe wskazania, obliczamy pracę prądu A ze wzorów:

$$A = e \cdot i \cdot t,$$

albo:

$$A = w \cdot t.$$

Jeżeli napięcie i prąd zmieniają się znacznie, to można otrzymać wyniki dokładniejsze za pomocą przyrządów samopiszących.

Zasada ustroju tych przyrządów polega na tym, że wskazówka zaopatrzona jest w pióro, które kreśli linię na papierze, przesuwanym za pomocą mechanizmu zegarowego; linja w ten sposób otrzymana wyraża w odpowiednich współrzędnych: e , i lub w w zależności od czasu.

Przykłady ustroju takich przyrządów podaję na rys. 371 i 372. Na rysunku 371 widzimy woltomierz samopiszący z podłużnym ruchem wstążki papierowej z góry na dół i z ruchem piórka wzdłuż prostej linii poziomej. Taki ruch osiąga się za pomocą odpowiedniego mechanizmu drążkowego, przekształcającego obrotowy ruch zwojnicy amperomierza na prostolinijski ruch piórka.

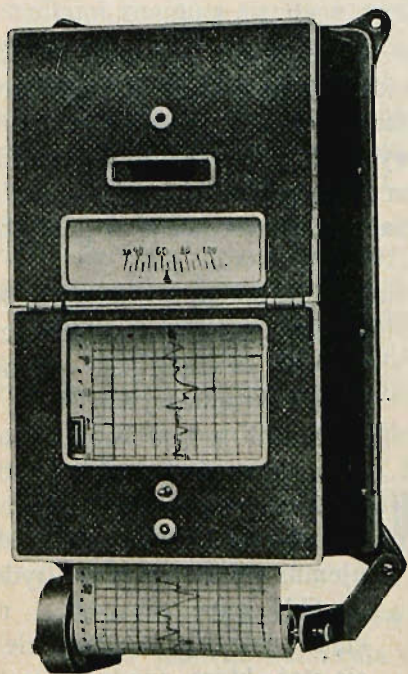
Linja krzywa, wyrażająca zmienność napięcia lub prądu w czasie, otrzymuje się w bardzo dogodnych współrzędnych prostokątnych.

Nieco prostsza jest budowa amperomierza samopiszącego, podanego na rys. 372. W tym przyrządzie prąd przebiega w zwojnicy nieruchomej, która wciąga rdzeń żelazny, utworzony ze zwiniętej stożkowato blaszki żelaznej. Wskazówka i piórko, przytwierdzone do rdzenia żelaznego, przesuwają się w kierunku pionowym, a papier, w kształcie krążka, obraca się około osi poziomej. Krzywa, wy-

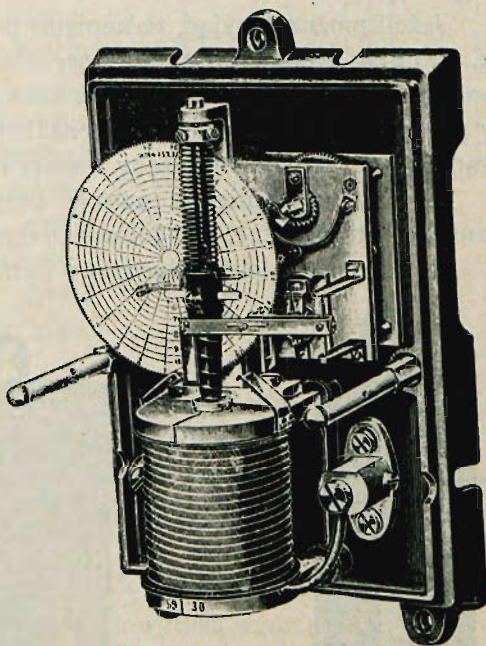
rażająca zależność siły prądu od czasu, otrzymuje się we współrzędnych biegunowych.

Szczegóły ustroju przyrządów samopiszących różnią się od zwykłych przede wszystkim zastosowaniem układów, wytwarzających momenty obrotowe większe niż w przyrządach zwykłych, chodzi tu bowiem o pokonanie oporów przy tarcia pióra o papier, jako też o uniknięcie wpływu ciężaru atramentu, którego ilość w piórze jest zmienna.

Dla uniknięcia tarcia pióra o papier stosowane są niekiedy przyrządy samopiszące, w których koniec wskazówki zaopatrzony jest w sztyfcik, nie dotykający stale do papieru, lecz tylko przyciskany co pewien czas do niego przez odpowie-



Rys. 371.



Rys. 372.

dni drążek za pomocą mechanizmu zegarowego. Pod papierem znajduje się taśma nasyciona farbą w celu odznaczenia tego miejsca, w którym sztyfcik był przyciśnięty.

Pozatem istnieją jeszcze inne przyrządy, w których znajduje zastosowanie iskra elektryczna. Bieguny małej cewki Rhumkorffa połączone są ze wskazówką i płytką metalową pod papierem. Iskierki, wypadające ze wskazówki do płytki, przepalają papier i w ten sposób kreślą linię na papierze.

Tego rodzaju przyrządy najodpowiedniejsze są w tych przypadkach, kiedy zapisywana wielkość zmienia się bardzo szybko, kiedy zatem wskazówka z piórem nie byłaby w stanie z powodu bezwładności podążać za temi zmianami.

Mając krzywą, otrzymaną za pomocą przyrządu samopiszącego, łatwo wyzna-

czyć przez planimetrowanie odpowiednich krzywych średnią moc prądu, a więc i pracę, posługując się wzorami:

$$A = \int_0^t e \cdot i \cdot dt,$$

$$A = \int_0^t w \cdot dt.$$

2. Liczniki. We wszystkich przypadkach, kiedy chodzi o wyznaczenie pracy prądu, wykonanej przez czas dłuższy, stosowane są mierniki pracy albo krócej liczniki elektryczne.

Za pomocą tych przyrządów, na podstawie różnicy wskazań, odczytanych w dwóch chwilach t_1 i t_2 , znajdujemy pracę, wykonaną przez prąd w ciągu czasu $t_2 - t_1$.

Jeżeli można przyjąć, że napięcie prądu jest zawsze stałe, to wystarcza licznik, któryby wskazywał tylko ilość elektryczności, przepływającą w ciągu określonego czasu. Mnożąc wskazania takiego licznika przez napięcie stałe, otrzymamy pracę prądu. Oczywiście mechanizm liczbowy licznika może być z łatwością urządzony w taki sposób, ażeby wskazywał od razu pracę prądu.

Są trzy najważniejsze ustroje liczników, najczęściej stosowane w praktyce: liczniki elektrolityczne, wahadłowe i motorowe.

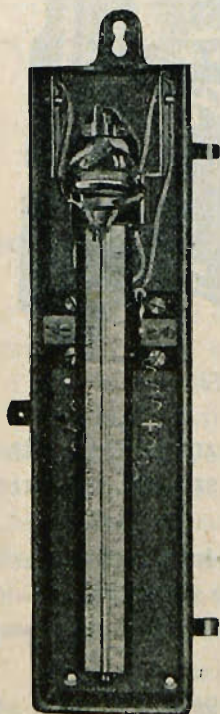
3. Liczniki elektrolityczne. Ustrój tych liczników opiera się na zjawisku

elektrolizy. Za najpraktyczniejszy uważany jest obecnie licznik Wrighta (rys. 373 i 374¹⁾. Elektrolit w tym liczniku stanowi roztwór obojętny soli rtęci w wodzie, elektrodą dodatnią jest czysta rtęć, elektrodą ujemną wykonana jest z irydu.

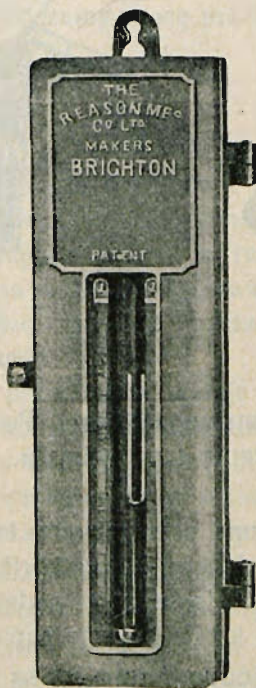
Gdy prąd przepływa, na elektrodzie irydowej wydziela się rtęć, która spada do rurki miarkowej, kalibrowanej. Ilość wydzielonej rtęci jest, jak wiadomo, proporcjonalna do ilości elektryczności, a przy napięciu stałym—do pracy prądu.

Na rurce znajdują się podziałki, wskazujące wprost pracę prądu przy pewnym napięciu stałym.

W tym czasie, kiedy na elektrodzie irydowej wydziela się rtęć, na drugiej elektro-



Rys. 373.



Rys. 374.

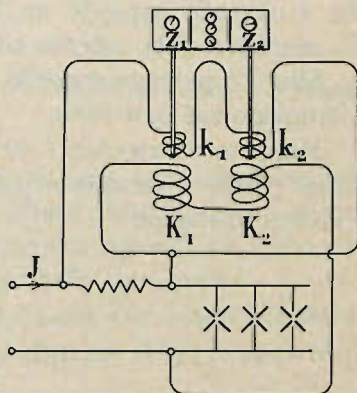
¹⁾ Na rys. 374 licznik widzimy przykryty, a na rys. 373 — bez przykrywk.

dzie rtęciowej — rtęć przechodzi do roztworu. Skoro zaś rurka miarkowa wypełni się rtęcią, cały przyrząd obracamy o 180° około osi poziomej i w ten sposób rtęć z rurki przelewamy do naczynia, ¹⁾ do którego doprowadzony jest biegun dodatni źródła prądu; ustawiając więc przyrząd z powrotem w położenie poprzednie, możemy prowadzić pomiar dalej za pomocą tegoż przyrządu.

Tego rodzaju przyrządy mogą oczywiście być stosowane tylko przy prądzie stałym.

4. Liczniki wahadłowe Arona. Stosowane obecnie liczniki wahadłowe składają się z dwóch mechanizmów zegarowych, których wahadła zaopatrzone są u dołu w zwojnice, nawinięte w taki sposób, że płaszczyzny zwojów są poziome (rys. 375). Pod wahadłami znajdują się dwie zwojnice nieruchome, których zwoje są ustawione również poziomo.

Przez zwoje nieruchome K_1 i K_2 przepuszcza się prąd odgałęziony od tych punktów sieci, gdzie mamy odpowiednie pełne napięcie mierzonego prądu, a przez zwojnice k_1 i k_2 na wahadłach płynie prąd całkowity, którego pracę mierzymy. Jeżeli siła tego prądu jest zbyt wielka, ażeby można było przepuścić go przez dość cienkie druty zwojnic k_1 i k_2 , to wprowadzamy w obwód bocznik i odgałęziamy do zwojnic k_1 i k_2 tylko pewną określoną część prądu całkowitego.



Rys. 375.

Kierunek zwojów w zwojnicach jest tak obrany, że kiedy zwojnice k_1 i K_1 przyciągają się, — zwojnice k_2 i K_2 odpychają się wzajemnie.

Ruch mechanizmów zegarowych zależy od sił, działających na wahadła. Z różnicy ruchu, czyli inaczej z różnicy wskazań tych dwóch zegarów możemy zatem wywnioskować o pracy prądu.

Zależność tę łatwo wyprowadzić, rozumując jak następuje:

Czas T jednego wahanicia wahadła fizycznego wyraża wzór:

$$T = \pi \cdot \sqrt{\frac{M}{F \cdot l}},$$

gdzie M oznacza moment bezwładności wahadła względem osi obrotu,

F — ciężar wahadła, t. j. siłę, z jaką wahadło jest przyciągane do ziemi,

l — odległość środka ciężkości od osi obrotu.

Jeżeli przy każdym wahaniciu wahadło otrzymuje pewien impuls, równoważący siłę tarcia na osi i opór powietrza, to waha się ono bez zatrzymania i wykonywa w ciągu jednostki czasu niezmienną liczbę wahanień.

Założmy, że w omawianym liczniku Arona wahadła zrobione są w taki spo-

¹⁾ Naczynie to znajduje się u góry przyrządu, patrz rys. 373.

sób, że, gdy przez żadną zwojnicę prąd nie płynie, liczba wahań tych wahadeł w jednostce czasu jest jednakowa i wynosi n , wtedy:

$$n = \frac{1}{T} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F \cdot l}{M}}.$$

Pod wpływem prądów powstają siły dodatkowe, proporcjonalne do tych prądów; ponieważ zaś jeden z prądów proporcjonalny jest do napięcia mierzonego prądu, przeto siłę dodatkową F' , działającą na każdą ze zwojnic ruchomych, możemy wyrazić wzorem:

$$F' = C \cdot e \cdot J,$$

gdzie e oznacza napięcie na końcach zwojnic nieruchomych, J — prąd w sieci, a C — wielkość stała, zależna od ustroju i odległości zwojnic.

Siła F' jednego wahadła skierowana jest w tę samą stronę, co i siła ciężkości, drugiego zaś odwrotnie.

Mając to na uwadze i oznaczając ramię działania tej siły przez l' , a liczbę wahań jednego wahadła w jednostce czasu przez n_1 i drugiego przez n_2 , możemy ułożyć równania:

$$n_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F \cdot l + l' \cdot C \cdot e \cdot J}{M}},$$

$$n_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F \cdot l - l' \cdot C \cdot e \cdot J}{M}},$$

albo też, oznaczając przez C' nową wielkość stałą, otrzymamy:

$$n_1 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F \cdot l}{M}} \cdot \left(1 + \frac{C' \cdot e \cdot J}{F}\right)^{\frac{1}{2}},$$

$$n_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F \cdot l}{M}} \cdot \left(1 - \frac{C' \cdot e \cdot J}{F}\right)^{\frac{1}{2}},$$

skąd:

$$n_1 - n_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F \cdot l}{M}} \cdot \left[\left(1 + \frac{C' \cdot e \cdot J}{F}\right)^{\frac{1}{2}} - \left(1 - \frac{C' \cdot e \cdot J}{F}\right)^{\frac{1}{2}} \right].$$

Rozwijając dwumiany w potęgę $\frac{1}{2}$ w szeregi, otrzymamy:

$$n_1 - n_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F \cdot l}{M}} \cdot \left[\left(1 + \frac{C' \cdot e \cdot J}{2F} - \frac{(C' \cdot e \cdot J)^2}{8F^2} + \frac{(C' \cdot e \cdot J)^3}{16F^3} \dots \right) - \left(1 - \frac{C' \cdot e \cdot J}{2F} - \frac{(C' \cdot e \cdot J)^2}{8F^2} - \frac{(C' \cdot e \cdot J)^3}{16F^3} \dots \right) \right].$$

Jeżeli opuścimy składniki w potęgach wyższych od drugiej w przypuszczeniu, że wielkość $C' \cdot e \cdot J$ jest znacznie mniejsza od F , to otrzymamy wzór:

$$n_1 - n_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F \cdot l}{M}} \cdot \frac{C'}{F} \cdot e \cdot J.$$

Wprowadźmy oznaczenie:

$$\frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F \cdot l}{M}} \cdot \frac{C'}{F} = K.$$

Wtedy otrzymamy:

$$n_1 - n_2 = K \cdot e \cdot J.$$

Mnożąc to równanie przez czas dt , w ciągu którego przepływa prąd J przy napięciu e i całkując za czas t , otrzymamy:

$$\int_0^t (n_1 - n_2) \cdot dt = K \cdot \int_0^t e \cdot J \cdot dt.$$

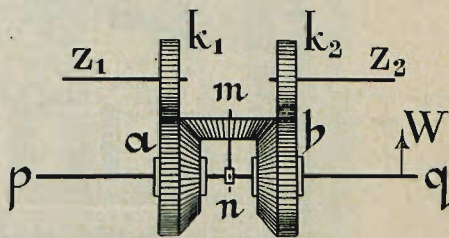
Całka z lewej strony znaku równości wyraża różnicę wskazań dwóch zegarów w ciągu czasu t ; oznaczmy ją przez N . Całka zaś z prawej strony wyraża pracę prądu w czasie t ; oznaczmy ją przez A . Wtedy wypadnie:

$$A = \frac{1}{K} \cdot N,$$

$\frac{1}{K}$ jest wielkością stałą, a zatem praca prądu może być mierzona różnicą wskazań zegarów Z_1 i Z_2 .

Wskazówka na tarczy podziałkowej licznika łączy się z mechanizmami obydwóch zegarów w ten sposób, że kiedy jeden zegar obraca wskazówkę np. w prawo, to drugi obraca ją w lewo. Skutkiem tego wskazówka porusza się tylko wtedy, gdy zachodzi różnica w szybkości ruchu mechanizmów zegarowych.

Przekładnia ruchu od mechanizmów zegarowych do osi wskazówki urządzona jest w sposób następujący (rys. 376). Mechanizmy zegarowe poruszają bezpośrednio osi z_1 i z_2 , na których są osadzone koła zębate k_1 i k_2 , obracające się wraz z temi osiami. Koła te zazębiają się z kołkami a i b osadzonymi luźno na osi pq . Kołki a i b , oprócz uzębienia czołowego, posiadają jeszcze uzębienie stożkowe, które zazębia się z kołkiem stożkowym, osadzonym również luźno na osi mn . Oś mn jest umocowana na osi pq , na końcu której przytwierdza się wskazówka W .



Rys. 376.

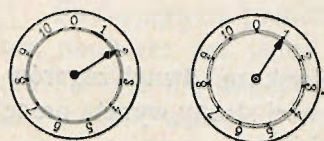
Mechanizmy zegarowe obracają koła k_1 i k_2 w strony przeciwne, więc, gdy prędkość obrotu tych kołek będzie jednakowa, kołki a , b i m będą się również obracały, lecz oś mn zostanie nieruchoma, i oś pq nie obraca się. Różnica w prędkości obrotu kołek k_1 i k_2 wywołuje różnicę w prędkości obrotu kołek a i b , a skutkiem tego — toczenie się kołka środkowego po kołkach a i b , wtedy oś mn obraca się w płaszczyźnie prostopadłej do rysunku i wprawia w ruch przymocowaną do niej oś pq ze wskazówką W .

Dla uniknięcia zbyt częstego odczytywania takiego licznika, oś wskazówki W połączona jest przekładnią zębatą z szeregiem innych osi równoległych ze wskazówkami, które obracają się 10, 100 i t. d. razy wolniej.

Przy odczytywaniu liczników wskazówkowych należy uważać na to, aby nieomylić się w odczytywaniu wskazań, gdy wskazówki zbliżają się do położenia zerowego. Wtedy bowiem np. wskazówka jednostek (rys. 377) może już przejść za zero skutkiem pewnej luźności w zębach kołek, gdy tymczasem wskazówka dzie-

siątek nie dojdzie jeszcze do 2. Przy położeniu wskazówek, podanem na rys. 377, odczytujemy nie 11 a 21.

Zauważyć tu należy, że w licznikach Arona wyregulowanie wahadeł z taką dokładnością, ażeby szły bez prądu zupełnie jednakowo, jest rzeczą niewykonalną.



Rys. 377.

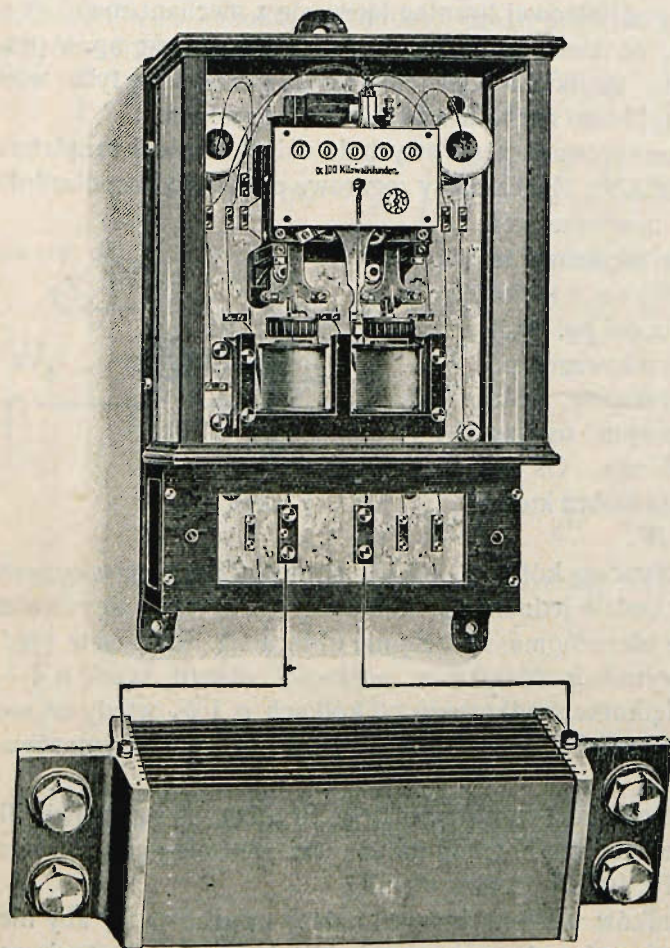
Dla uniknięcia mogących stąd powstać niedokładności we wskazaniach liczników, zmienia się co każde 20 minut za pomocą przełącznika, wprawianego w ruch mechanizmem zegarowym, kierunek prądu w zwojniciach ruchomych. Skutkiem tego wachadło przyspieszające staje się zwalniającem i odwrotnie. Zarazem musi się też oczywiście zmieniać i przekładnia ruchu od me-

chanizmów zegarowych do wskazówek. Przez takie zmiany w układzie mechanizmu powyżej wzmiankowana różnica w biegu zegarów będzie przesuwając wskazówki najpierw w jedną, a potem w drugą stronę, ostatecznie więc nie będzie miała wpływu na położenie wskazówek.

Dla uniknięcia ręcznego nakręcania sprężyn, poruszających wahadła, stosuje się jedną tylko sprężynę, poruszającą oba wahadła, nakręcaną samoczynnie co kilka minut za pomocą elektromagnesu. Co pewien czas elektromagnes przyciąga kotwicę, nakręcającą sprężynę.

Na rys. 378 widzimy licznik Arona z bocznikiem dla bardzo silnego prądu. Zwojnice nieruchome są nawinięte na rdzeniach żelaznych, przez nie płynie prąd proporcjonalny do napięcia sieci. Nad zwojnicami nieruchomymi widoczne są zwojnice płaskie, przymocowane do wahadeł, połączone z bocznikiem. Zamiast wskazówek, mechanizm cyfrowy ma tarcze z cyframi od 0 do 9, które są widoczne w okienkach.

Ze wzorów, wyprowadzonych poprzednio dla licznika Arona, wynika wy-



Rys. 378.

rażnie, że licznik ten może być stosowany tak przy prądzie stałym jak i przy zmiennym.

Liczniki Arona są bardzo dokładne; przy odpowiednim ustroju dają one wskazania niezależne od postaci krzywej prądów, ani od liczby okresów na sekundę. Są też bardzo czułe, mogą więc wskazywać energię prądu nawet bardzo słabego w porównaniu z prądem normalnym, dla którego są przeznaczone. Wskazania ich nie zależą od zmiennego tarcia w osiach i prawie zupełnie od temperatury.

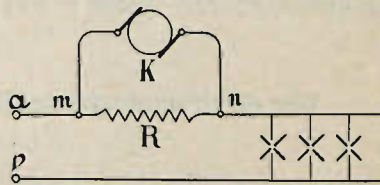
Liczniki te są jednak znacznie droższe od innych, co tłumaczy się skomplikowanym ustrojem mechanizmów zegarowych.

5. Liczniki motorowe do prądu stałego. Ze względu na prostotę budowy i wystarczającą dokładność wskazań, za najbardziej praktyczne uznane być mogą powszechnie teraz używane liczniki motorowe. W ustroju ich znajdują zastosowanie dwie zupełnie różne zasady.

Według patentu O'Keenan'a, licznik stanowi silnik elektryczny obracający się bez żadnego obciążenia; opór tarcia w łożyskach i opór powietrza, są możliwie zmniejszone.

Jeżeli napięcie w sieci jest stałe, to poprzestać można na liczeniu ilości elektryczności; licznik składa się wtedy ze stałego magnesu i kilku osadzonych na jednej osi zwojnic, do których doprowadza się prąd przez nieruchome szczotki, dotykające metalowych blaszek połączonych z powyższymi zwojnicami.

Włączenie takiego licznika w obwód wskazane jest na rys. 379. Prąd główny J przebiega przez opór stały R i wytwarza na jego końcach napięcie e_{mn} . Od tego napięcia odgałęzia się prąd i do licznika K .



Rys. 379.

Oznaczmy przez r opór licznika i przez E — siłę przeciwelektromotoryczną, powstającą w zwojach w czasie ich ruchu; wtedy na zasadzie prawa Ohma:

$$i = \frac{e_{mn} - E}{r}.$$

Ponieważ praca wykonywana przez taki silnik jest nadzwyczaj mała, więc prędkość ruchu zwojnic zwiększa się do tego stopnia, iż E staje się prawie równym e_{mn} ; prąd i jest zaś bardzo mały, można więc przyjąć, że

$$e_{mn} = E.$$

Według prawa Ohma

$$e_{mn} = J \cdot R,$$

a E jest proporcjonalne do prędkości obrotu zwojnic. Jeżeli więc przez n oznaczmy liczbę obrotów zwojnic w ciągu jednostki czasu, a przez C wielkość stałą zależną od indukcji magnetycznej pola, a także od szczegółów ustroju zwojnic i magnesu, to:

$$E = C \cdot n.$$

Z tego równania wynika, że praca prądu J może być mierzona liczbą obrotów osi licznika, wtedy gdy wyraz:

$$e_{ab} (C_1 - C_2 \cdot e_{ab})$$

będzie wielkością stałą przy zmiennym napięciu e_{ab} .

Wyraz ten ma maximum przy: ¹⁾

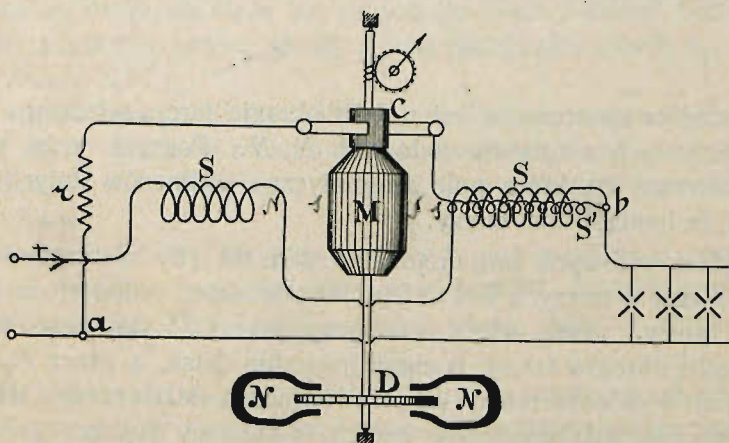
$$C_1 = 2 C_2 \cdot e_{ab} \quad \dots \quad (d)$$

W pobliżu tego maximum wartość powyższego wyrazu zmienia się mało przy zmianie napięcia e_{ab} , co łatwo zrozumiemy, jeżeli wykreślimy linię krzywą, wyrażającą zmienność wyrazu $e_{ab} (C_1 - C_2 \cdot e_{ab})$ w zależności od napięcia e_{ab} .

Ze wzorów (b), (c) i (d) wynika, że dla osiągnięcia maximum wartości rozważanego wzoru należy tak urządzić dodatkowy elektromagnes, aby siła elektromotoryczna, wzniecona przez magnes stały, była dwa razy większa od siły elektromotorycznej, wznieconej przez elektromagnes.

Ustrój liczników motorowych innego rodzaju, obmyślony przez Hummela i Elihu Thomsona, polega na zastosowaniu silnika elektrycznego obciążonego.

Układ części zasadniczych w liczniku Thomsona i połączenie ich z siecią, wskazane są na rys. 380. Prąd główny przepływa przez zwojnice nieruchome SS ,



Rys. 380.

prąd zaś odgałęziony od punktów a i b płynie przez opór duży r , ruchomy układ zwojnic M i dodatkową nieruchomą zwojnicę S' . Zwojnice ruchome zwinięte są w ten sposób, że tworzą okrągły bęben M ; płaszczyzny poszczególnych zwojów są pionowe. Prąd do tych zwojów doprowadza się przez płytki, zwane szczotkami, które przylegają do walca, ²⁾ utworzonego z szeregu izolowanych od siebie płytek metalowych, połączonych ze zwojami.

¹⁾ Wzór ten otrzymamy, znajdując pochodną powyższego wyrazu, według e_{ab} i zakładając, że pochodna ta równa się zeru.

²⁾ Wałek ten zwykle nazywamy kolektorem.

Zwoje nieruchome wytwarzają pole magnetyczne, którego linje bęgną poziomo. Pole to wywiera działanie mechaniczne na pionowe druty z prądem w zwojnicach ruchomych. Skutkiem tego działania bęben M i oś, na której jest on umocowany, obracają się.

Moment obrotowy M jest tu proporcjonalny do prądu J , płynącego w zwojnicach nieruchomych S i S i do prądu i w zwojnicach ruchomych. Jeżeli przez C_1 oznaczymy wielkość stałą, to:

$$M = C_1 \cdot i \cdot J.$$

Prąd i możemy wyrazić według prawa Ohma przez napięcie e pomiędzy punktami a i b (rys. 380) i opór R obwodu odgałęzionego:

$$i = \frac{e}{R}.$$

Stosując ten wzór, przyjmujemy, że siła elektromotoryczna indukcji, powstająca w zwojach ruchomych, jest bardzo mała, ponieważ prędkość obrotu osi jest zazwyczaj niewielka i pole, wywołane w powietrzu przez zwojnice S , S — dość słabe. Zaznaczyć też należy, że opór r , włączony w obwód zwojnic ruchomych, jest znaczny, napięcie przeto pomiędzy szczotkami jest małe.

Na podstawie tych uwag opuściliśmy we wzorze prawa Ohma siłę elektromotoryczną indukcji i z powyższych dwóch wzorów otrzymujemy:

$$M = \frac{C_1}{R} \cdot e \cdot J.$$

Na osi licznika umocowana jest u dołu okrągła tarcza miedziana D , obracająca się w polu stałych magnesów stalowych N , N . Podczas ruchu, w tarczy powstają prądy wirowe, na które pole magnetyczne magnesów stałych oddziałuje w ten sposób, że hamuje ruch tarczy.

Siła prądów wirowych proporcjonalna jest do siły elektromotorycznej indukcji, powstającej w tarczy, a siła ta jest, jak wiadomo, proporcjonalną do prędkości ruchu tarczy. Jeżeli więc oznaczymy przez J' siłę prądów wirowych, przez n — liczbę obrotów tarczy w ciągu jednostki czasu, a przez C_2 — wielkość stałą, zależną od wymiarów tarczy, od przewodnictwa elektrycznego tarczy i od indukcji magnetycznej pola magnesów stałych, to możemy napisać:

$$J' = C_2 \cdot n.$$

Moment hamujący magnesów stałych proporcjonalny jest do siły prądów wirowych i do indukcji magnetycznej w polu tych magnesów; oznaczając więc ten moment przez M' , a wielkość stałą przez C_3 , otrzymamy:

$$M' = C_3 \cdot J',$$

albo:

$$M' = C_2 \cdot C_3 \cdot n.$$

Skoro zaś prędkość biegu licznika ustali się i n będzie stałym, to momenty obracający i hamujący równoważą się, czyli:

$$M = M',$$

$$\frac{C_1}{R} \cdot e \cdot J = C_2 \cdot C_3 \cdot n.$$

Oznaczmy przez t czas, w ciągu którego prąd stały J płynie pod napięciem e , i pomnóżmy przez ten czas powyższe równanie; wtedy:

$$\frac{C_1}{R} \cdot e \cdot J \cdot t = C_2 \cdot C_3 \cdot n \cdot t.$$

Wprowadzając zaś oznaczenia:

$$\frac{C_2 \cdot C_3 \cdot R}{C_1} = C,$$

$$\text{i} \quad n \cdot t = N,$$

otrzymamy:

$$e \cdot J \cdot t = C \cdot N.$$

Wzór ten wskazuje, że praca prądu J proporcjonalna jest do liczby obrotów osi licznika, może być więc mierzona tą liczbą.

Zwykle oś licznika łączy się za pomocą przekładni ślimakowej, a następnie zębatej z szeregiem krążków, zaopatrzonych w cyfry, które, ustawiając się w okienku licznika, wskazują pewne liczby.

Przekładnie dobierają się w ten sposób, że różnica dwóch liczb, odczytanych w okienkach licznika w pewnej chwili t_1 i w późniejszej chwili t_2 , wskazuje pracę prądu w czasie $t_2 - t_1$.

Zwojnica dodatkowa S' (rys. 380) wytwarza pole magnetyczne, zgodne z polem zwojnic S , S i służy do zrównoważenia momentu tarcia w łożyskach osi. Moment ten hamuje oczywiście bieg licznika; w powyższych wywodach nie był on brany pod uwagę.

Zdarza się nieraz, że z biegiem czasu, gdy powierzchnie ślizgające się po sobie przytrą się, moment hamujący tarcia zmniejsza się, a wtedy zwojnica dodatkowa S' może wywołać bieg licznika nawet wtedy, gdy w zwojnicach SS prądu nie ma.

Zapobiec temu można przez umieszczenie na tarczy hamulcowej drucika żelaznego. Magnesy stałe przyciągają ten drucik i wstrzymują tarczę do chwili, gdy zacznie płynąć prąd główny w zwojnicach S , S .

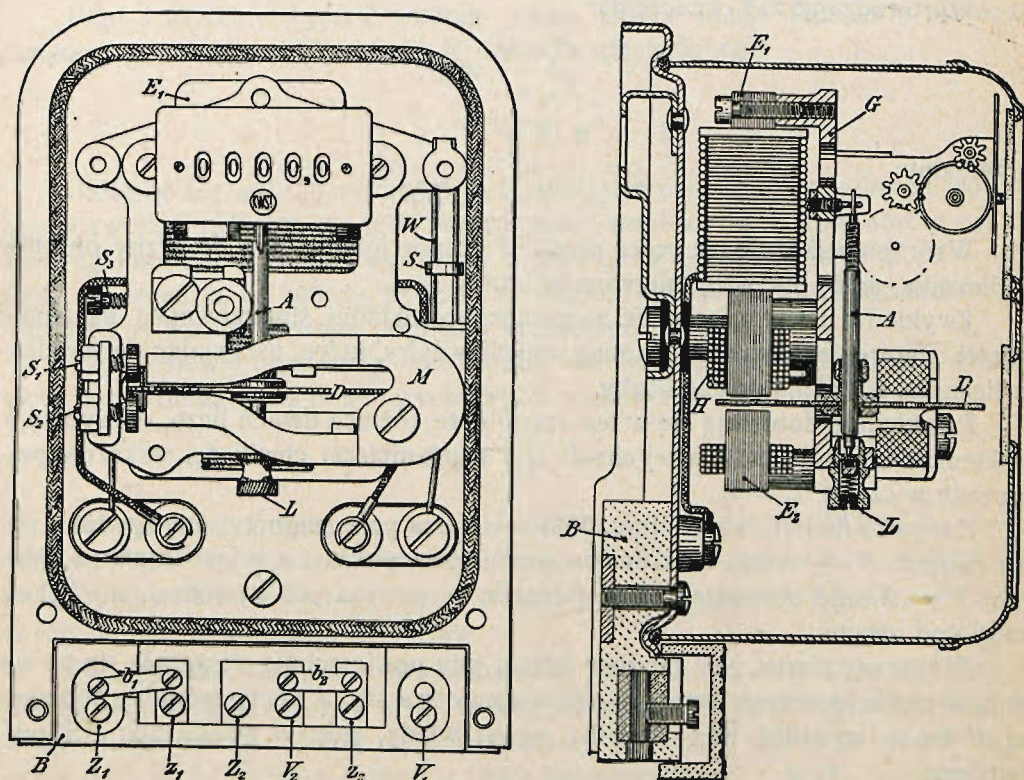
Są jeszcze liczniki, oparte na tej samej zasadzie, co i licznik poprzedni, ale ze zwojnicami ruchomymi, które wykonywają tylko części obrotu w jedną i w drugą stronę, tudzież liczniki, w których wszystkie zwojnice są nieruchome i tylko lekki rdzeń żelazny porusza się wahadłowo.

6. Liczniki motorowe do prądu zmiennego. Opisany powyżej licznik Thomsona może być stosowany także do prądu zmiennego, albowiem kierunek momentu obrotowego nie zmienia się przy jednoczesnej zmianie kierunku prądów w zwojach ruchomych i zwojach nieruchomych, wielkość zaś momentu proporcjonalna jest do średniej wartości iloczynu prądów w obu zwojnicach, a więc do średniej wartości iloczynu napięcia przez siłę prądu.

Obecnie jednak do mierzenia pracy prądu zmiennego są stosowane zazwyczaj liczniki indukcyjne, których urządzenie jest znacznie prostsze od urządzenia licznika Thomsona.

Zasada wszystkich liczników prądu zmiennego polega na działaniu zmiennych pól magnetycznych na prądy wirowe, wywołane przez te pola w tarczy metalowej, osadzonej na osi, obracającej mechanizm liczbowy¹⁾ licznika.

Na rys. 381 widzimy pewne szczegóły budowy takiego licznika firmy Danubia. Na rdzeniach żelaznych znajdują się zwojnice, z których jedno włączy-



Rys. 381.

ne są w obwód prądu głównego, inne zaś tworzą obwód odgałęziony w tych punktach, gdzie mamy napięcie robocze, skutkiem tego prąd w tych zwojnicach jest proporcjonalny do tego napięcia.

W polu magnetycznym, wytworzonym przez powyższe zwojnice, obraca się tarcza miedziana *D*, umocowana na osi *A*. Oś *A* ma u góry ślimak, obracający mechanizm liczbowy. Magnes stały *M* hamuje ruch tarczy.

Przez odpowiedni układ elektromagnesów osiągamy, że moment obracający oś jest proporcjonalny do mocy prądu, którego pracę mamy mierzyć. Moment zaś hamujący stałego magnesu, jak to wyprowadzono w paragrafie poprzednim, jest

¹⁾ Szereg tarcz lub kółek z liczbami ustawiającymi się w okienkach licznika.

proporcjonalny do prędkości obrotu tarczy, przy ruchu więc obrotowym jednostajnym, będziemy mieli równanie:

$$C_1 \cdot W = C_2 \cdot n,$$

gdzie C_1 i C_2 stałe, W — moc prądu, n — liczba obrotów osi na jednostkę czasu.

Mnożąc obie strony tego równania przez t i wprowadzając oznaczenia:

$$W \cdot t = A, \quad n \cdot t = N, \quad \frac{C_2}{C_1} = C,$$

otrzymamy:

$$A = C \cdot N.$$

Praca prądu jest zatem proporcjonalna do liczby obrotów powyższej tarczy i może być mierzona za pomocą tej liczby. Dla prawidłowego więc działania licznika konieczne są dwa warunki: moment obracający tarczę, wywołany przez zwojnice z prądem, powinien być koniecznie ściśle proporcjonalny do mocy prądu zmiennego, moment zaś hamujący — do prędkości ruchu tarczy. Moc prądu zmiennego może być wyrażona rozmaicie, zależnie od tego, jakie są odbieracze: czy indukcyjne, czy też bezindukcyjne, jak również zależnie od tego, z ilofazowym prądem mamy do czynienia. Otóż do tych rozmaitych okoliczności przystosować też wypada układ zwojnic.

Jakoż rozróżniamy liczniki jednofazowe do obciążenia bezindukcyjnego, jednofazowe do obciążenia indukcyjnego, trójfazowe do równego obciążenia faz, trójfazowe do dowolnego obciążenia faz i t. p.

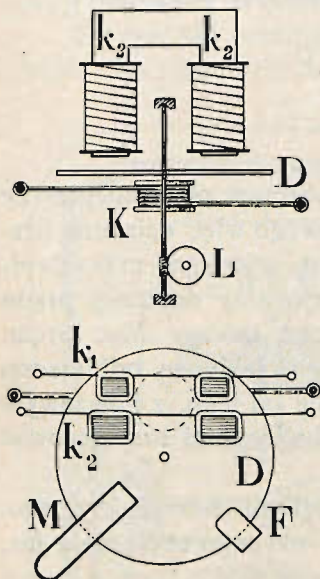
W celu zapewnienia proporcjonalności momentu hamującego do liczby obrotów tarczy, przy urządzeniu licznika zachowana być winna zasada zmniejszania do możliwych granic innych momentów hamujących, w powyższym wywodzie nie uwzględnionych.

Celem zrównoważenia momentu tarcia w łożyskach i w mechanizmie liczbowym, w pobliżu tarczy miedzianej, z boku elektromagnesów umocowana jest blaszka. W tej blaszce zmienne pole magnetyczne elektromagnesów wznieca prądy wirowe, które, działając na prądy wirowe w tarczy ruchomej, wywołują dodatkowy moment obrotowy. Miejsce dla tej blaszki wybieramy w ten sposób, aby moment dodatkowy równoważył moment tarcia.

Dla pewności, że licznik będzie się zatrzymywał w razie przzerwania prądu głównego, pomimo przepływu prądu w zwojnicach odgałęzionych, przymocowuje się do tarczy drucik żelazny, przyciągany przez magnes stały. Zamiast drucika, można tarczę ruchomą w jednym miejscu przedziurawić, przez co układ prądów wirowych przy pewnym położeniu tarczy jest taki, że działanie wspomnianej blaszki jest wtedy zbyt słabe, aby mogło poruszyć tarczę.

Jako przykład ustroju zwojnic w licznikach indukcyjnych rozważymy bardziej szczegółowo licznik Raaba (rys. 382). D — tarcza miedziana, L — mechanizm liczbowy, K — zwojnica z drutu grubego bez rdzenia żelaznego, k_1 , k_1 i k_2 , k_2 — zwojnice z drutu cienkiego, nawinięte na rdzeniach żelaznych, M — magnes hamujący, P — blaszka żelazna dla zrównoważenia momentu tarcia w łożyskach osi i mechanizmie liczbowym, a także oporu powietrza.

Na rys. 383 wskazany jest układ połączeń zwojnic licznika z przewodami sieci. Prąd główny przepływa po zwojnicy K . Zwojnice zaś k_1 i k_2 znajdują się w odgałęzieniu. Zwojnica k_2 ma duży współczynnik samoindukcji i jest wprost włączona pomiędzy dwa przewody sieci, zwojnica zaś k_1 ma współczynnik samoindukcji mniejszy i jest połączona z przewodami przez znaczny opór bezindukcyjny r .

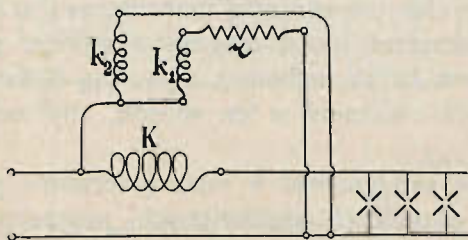


Rys. 382.

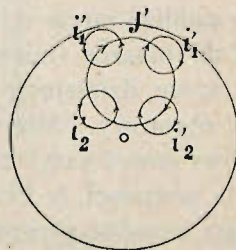
Zwojnice k_1 , k_2 i K wywołują w krążku D prądy wirowe indukcyjne. Oznaczmy siłę prądów w poszczególnych zwojnicach przez i_1 , i_2 , J , prądy zaś indukcyjne, wywołane w krążku przez powyższe prądy — przez i_1' , i_2' , J' . Prawdopodobny układ prądów, wywołanych w krążku, podany jest na rys. 384.

Siły działania prądów w zwojnicach na odpowiednie prądy, wywołane przez nie w krążku, a więc J na J' , i_1 na i_1' , i_2 na i_2' , skierowane będą prostopadłe do powierzchni krążka; nie mogą one zatem wywołać żadnego momentu obrotowego. Siły działania prądów i_1 na i_2' i i_2 na i_1' również nie wytworzą momentu obrotowego, bo rozłożone są symetrycznie względem osi. Pozostają więc tylko siły działania prądów: J na i_1' , J na i_2' , i_1 na J' i i_2 na J' . Z tych sił powstaną cztery momenty obrotowe.

Siła średnia spóldziałania prądów zmiennych jest proporcjonalna do średniego iloczynu wartości chwilowych tych prądów. Z wywodów, podanych w rozdziale XXV § 1, wynika, że średni iloczyn wartości chwilowych wielkości sinusoidalnie zmiennych równa się



Rys. 383.



Rys. 384.

iloczynowi wartości czynnych pomnożonemu przez \cos kąta, wyrażającego różnicę faz pomiędzy temi wielkościami.

Mając to na względzie, możemy moment obrotowy, działający na krążek licznika, wyrazić wzorem:

$$M = A \cdot J \cdot i_1' \cdot \cos \alpha + B \cdot J \cdot i_2' \cdot \cos \beta + C \cdot i_1 \cdot J' \cdot \cos \gamma + D \cdot i_2 \cdot J' \cdot \cos \delta,$$

gdzie M oznacza cały moment obrotowy;

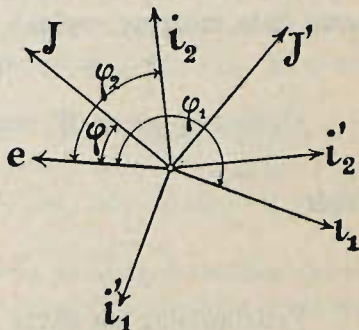
A, B, C, D — czynniki stałe, zależne od wymiarów zwojnic i krążka, od od-

ległości krążka od zwojnic, od własności magnetycznych żelaza i od oporu właściwego metalu, z którego zrobiono krążek;

α , β , γ — kąty różnicy faz pomiędzy odpowiednimi prądami.

Dla zdania sobie sprawy z wielkości tych kątów, wykreślimy układ wektorów, wyrażających poszczególne prądy, mając na względzie układ połączeń, podany na rys. 383.

Załóżmy, że prąd główny J przesunięty jest wstecz o pewien kąt φ względem napięcia e (rys. 385). Prąd i_1 , ze względu na znaczny opór bezindukcyjny r , spóźnia się względem napięcia e zaledwie o niewielki kąt; jednakże dla osiągnięcia prawidłowego działania licznika, kierunek tego prądu, w zwojnicy k_1 , powinien być odwrócony w porównaniu z innymi zwojnicami, skutkiem czego na wykresie należy wektor i_1 wyobrazić jako odwrócony, czyli tworzący z e kąt φ_1 , nieco większy od 180° . Z powodu znacznej samoindukcji zwojnic k_2 prąd i_2 spóźnia się względem e o kąt φ_2 , nieznacznie tylko mniejszy od 90° . Prądy, wywołane w krążku przez indukcję, będą się spóźniały względem prądów pierwotnych nie wiele więcej od 90° , jeżeli uwzględnić, że magnetyczne działanie prądów w krążku jest niewielkie, a więc niewielka jest ich



Rys. 385.

samoindukcja. Na rys. 228 (rozdział XX § 3) widać, że gdy $i_1 \cdot \frac{n_2}{n_1}$ jest małe, to wektor i_2 jest prawie prostopadły do i_1 .

Do wyrażenia momentu obrotowego wprowadzamy kąty:

$$\angle (i_1, e) = \varphi_1, \quad \angle (i_2, e) = \varphi_2, \quad \angle (J, e) = \varphi.$$

Przyjmując:

$$\angle (J, J') = 90^\circ, \quad \angle (i_1, i_1') = 90^\circ \quad \text{ i } \quad \angle (i_2, i_2') = 90^\circ$$

i pamiętając, że:

$$\angle (J, i_1') = \alpha, \quad \angle (J, i_2') = \beta, \quad \angle (i_1, J') = \gamma \quad \text{ i } \quad \angle (i_2, J') = \delta,$$

otrzymamy:

$$\begin{aligned} \alpha &= 270^\circ - (\varphi_1 - \varphi), \\ \beta &= 90^\circ + (\varphi_2 - \varphi), \\ \gamma &= -[90^\circ - (\varphi_1 - \varphi)], \\ \delta &= 90^\circ - (\varphi_2 - \varphi). \end{aligned}$$

Te wyrażenia dla kątów α , β , γ i δ podstawiamy we wzór momentu obrotowego, poczem otrzymamy:

$$\begin{aligned} M &= -A \cdot J \cdot i_1' \cdot \sin (\varphi_1 - \varphi) - B \cdot J \cdot i_2 \cdot \sin (\varphi_2 - \varphi) + \\ &+ C \cdot i_1 \cdot J' \cdot \sin (\varphi_1 - \varphi) + D \cdot i_2 \cdot J' \cdot \sin (\varphi_2 - \varphi). \end{aligned}$$

Prądy wzniecone w krążku są proporcjonalne do prądów wzniecających, więc zmieniając czynniki stałe A, B, C, D na A', B', C', D' , możemy wprowadzić we wzór momentu odpowiednie prądy w zwojnicach zamiast prądów wznieconych w krążku, wtedy otrzymamy:

$$M = -A' J \cdot i_1 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi) - B' J \cdot i_2 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi) + \\ + C' \cdot i_1 \cdot J \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi) + D' \cdot i_2 \cdot J \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi),$$

albo:

$$M = (C' - A') \cdot J \cdot i_1 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi) + (D' - B') \cdot J \cdot i_2 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi) \quad (a)$$

Prądy i_1 i i_2 są proporcjonalne do napięcia e ; oznaczając więc przez C_1 i C_2 nowe stałe, możemy napisać:

$$M = e \cdot J \cdot [C_1 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi) + C_2 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi)].$$

Oznaczmy przez W moc prądu J przy napięciu e i różnicy faz φ , wtedy:

$$W = e \cdot J \cdot \cos \varphi,$$

skąd:

$$e \cdot J = \frac{W}{\cos \varphi},$$

Podstawiając ten wyraz we wzór dla momentu, otrzymamy:

$$M = W \cdot \frac{[C_1 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi) + C_2 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi)]}{\cos \varphi}.$$

Po rozwinięciu sinusów różnic kątów φ_1, φ i φ_2, φ , wypadnie:

$$M = W \cdot [C_1 \cdot \sin \varphi_1 + C_2 \cdot \sin \varphi_2 - \operatorname{tg} \varphi \cdot (C_1 \cdot \cos \varphi_1 + C_2 \cdot \cos \varphi_2)].$$

Wielkość $C_1 \cdot \sin \varphi_1 + C_2 \cdot \sin \varphi_2$ jest dla licznika danego wielkością stałą. Wyraz zaś $C_1 \cdot \cos \varphi_1 + C_2 \cdot \cos \varphi_2$ można łatwo sprowadzić do zera, ponieważ φ_2 jest $< 90^\circ$, a $\varphi_1 > 180^\circ$ i $< 270^\circ$; cosinusy więc tych kątów mają znaki odwrotne. Wystarczy tylko dobrać odpowiednio wielkość stałych C_1 i C_2 , co daje się osiągnąć przez odpowiednią budowę zwojnic k_1 i k_2 . Mając to na uwadze, możemy cały wyraz w nawiasie powyższego wzoru oznaczyć jedną literą K , wyrażając wielkość stałą, a wtedy otrzymamy:

$$M = K \cdot W.$$

Z poprzednich zaś rozumowań wiemy, że w takich warunkach liczba obrotów krążka licznika proporcjonalna jest do pracy prądu.

Jeżeli obciążenie sieci jest bezindukcyjne, i licznik ma wskazywać prawidłowo tylko przy takim obciążeniu, to zbyteczną jest rzeczą ustawiać zwojnicę k_2 .

Bez tej zwojnicy wzór (a), wyrażający moment obrotowy, będzie:

$$M = (C' - A') \cdot J \cdot i_1 \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi).$$

Oznaczając stałą przez K i uwzględniając, że i_1 jest proporcjonalne do e , a $\varphi = 0$, otrzymamy:

$$M = K \cdot e \cdot J.$$

Przy $\varphi = 0$, moc prądu $W = e \cdot J$, przeto:

$$M = K \cdot W.$$

Jeżeli mamy prąd trójfazowy, to przy równym obciążeniu faz, możemy stosować licznik takiej samej budowy, jak wyżej opisany, z niektórymi tylko drobnymi zmianami. Przy różnym zaś obciążeniu faz, licznik powinien być zaopatrzony w dwa krążki metalowe, umocowane na jednej wspólnej osi. Układ połączeń zwojnic takiego licznika z siecią oparty jest na nieco zmienionej zasadzie mierzenia mocy prądu trójfazowego za pomocą dwóch watomierzy. Szczegóły, dotyczące liczników trójfazowych, znajdzie czytelnik w dziełku L. Fatersona i A. Kühna „O indukcyjnych miernikach elektryczności“.

7. Wzorcowanie liczników. Liczniki kilowatgodzin, czyli mierniki pracy prądu, wzorcowane są za pomocą amperomierza, woltomierza i zegarka, albo też za pomocą watomierza i zegarka.

Stosując odpowiedni prąd i napięcie, wymierzamy siłę i napięcie prądu lub moc prądu oraz czas, a zarazem liczymy obroty osi głównej licznika, w ciągu tego czasu; według tych danych określa się liczbę obrotów osi, odpowiadającą jednej kilowatgodzinie; oznaczmy tę liczbę przez C_1 .

Z przekładni, zastosowanej pomiędzy osią główną licznika a mechanizmem liczbowym, łatwo obliczyć, ile osi ma zrobić obrotów, ażeby mechanizm liczbowy wskazał jedną kilowatgodzinę; zresztą ta liczba obrotów wskazana jest zwykle na liczniku; oznaczmy ją przez C_2 . Wtedy błąd licznika w odsetkach wyrazi się we wzorze:

$$\frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot 100.$$

W pracowniach, przeznaczonych do wzorcowania wielkiej liczby liczników, zwojnice główne i napięciowe zasilane są z różnych źródeł.

Liczniki stosowane w praktyce powinny pod względem dokładności czynić zadość pewnym wymaganiom, które określają zazwyczaj:

a) wielkość najmniejszego prądu, wprawiającego licznik w ruch; b) granice błędów dopuszczalnych przy różnej sile prądu głównego i wreszcie c) największe wskazania licznika bez prądu w zwojnicach głównych.¹⁾

Dane liczbowe, dotyczące tych wymagań, zmieniają się, zależnie od warunków handlowych i technicznych. Niektóre liczby czytelnik znajdzie w rozdziale XXXIX § 5.

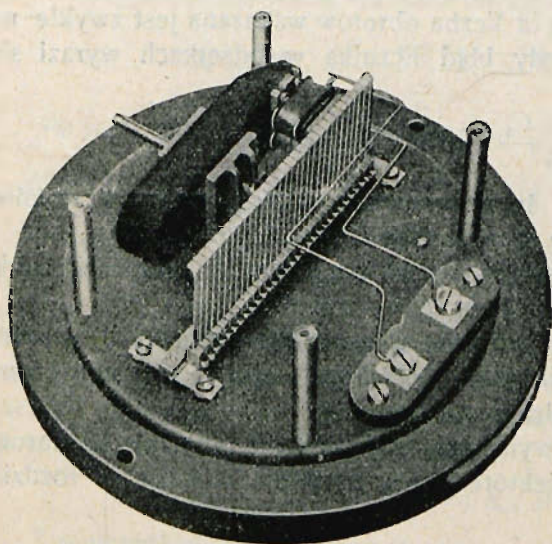
¹⁾ Bieg licznika pod wpływem prądu odgałęzionego zdarza się czasem skutkiem momentów obrotowych dodatkowych, mających na celu pokonanie tarcia w łożyskach osi głównej i w mechanizmie liczbowym.

ROZDZIAŁ XXXIII.

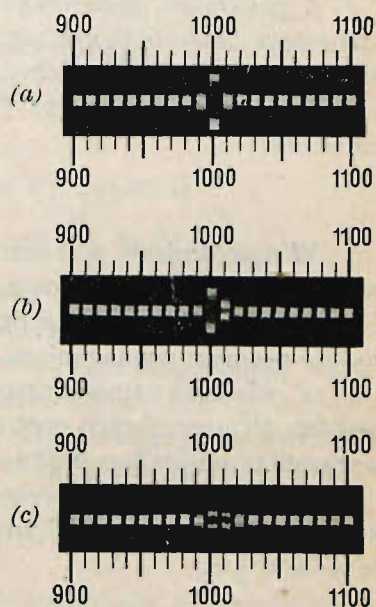
Częstościomierze.

Przyrządy, wskazujące liczbę okresów prądu zmiennego w ciągu sekundy, nazywamy częstościomierzami. Obecnie stosowane są zwykle częstościomierze, oparte na rezonansie pomiędzy częstością drgań własnych płaskich sprężynek, a liczbą zmian prądu na sekundę.

Według układu Frahma szereg sprężynek, które mają rozmaitą częstość drgań własnych (rys. 386), jest umocowany na jednej płytce; do tej samej płytki przy-



Rys. 386.



Rys. 387.

twierdza się inną małą płytkę żelazną, umieszczoną bezpośrednio pod biegunami stałego magnesu stalowego; na biegunach magnesu umocowane są rdzenie z żelaza miękkiego, zaopatrzone w zwojnice.

Gdy prąd zmienny przebiega przez zwojnice, siła przyciągania ulega wahaniom, których częstość równa jest częstości zmian prądu. Skutkiem tego drga płytka żelazna, znajdująca się pod wpływem elektromagnesu, a z nią i sprężynki, największe jednak wychylenia spostrzeżemy na tych sprężynkach, których okres

drgań własnych jest najbliższy do okresu zmienności prądu. Końce sprężynek zaopatrzą się w białe kwadraciki, które w ruchu tworzą paski dłuższe lub krótsze.

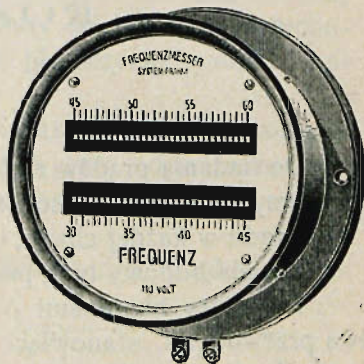
Na rys. 387 (a) widzimy obraz drgających kwadracików, gdy częstość prądu jest zgodna z częstością drgań własnych sprężynki środkowej, rys. 387 (b), odpowiada częstości prądu nieco większej, a rys. (c) częstości jeszcze większej, mniejszej jednak od częstości drgań własnych sprężynki drugiej, licząc od środka wprawo. Przypatrując się uważnie tym obrazom kwadracików drgających, można dość dokładnie oznaczyć częstość zmian prądu.

Im więcej sprężynek posiada przyrząd dla danej skali zmian częstości, tym dokładniej można odczytać na takim przyrządzie częstość zmian prądu.

Na rys. 388 widzimy przyrząd z dwoma szeregiem sprężynek do wyznaczania częstości zmian prądu od 30 do 60 okresów na sekundę.

W obwód włączamy częstościomierz tak samo, jak woltomierz, ponieważ zwojnice tych przyrządów mają duży opór i są przystosowane do małej siły prądu. Częstościomierz, zbudowany dla pewnego napięcia, nie można włączać na napięcia wyższe, ponieważ skutkiem zbyt silnego prądu może być uszkodzony.

Oprócz opisanych powyżej, budowane są jeszcze częstościomierze, których ustrój oparty jest na zależności oporu indukcyjnego, lub też oporu pojemności od częstości zmian prądu na sekundę. Takie przyrządy mają zwykłą wskazówkę, poruszającą się p o skali z podziałkami.



Rys. 388.