

pełnych obrotów, lecz oscyluje naprzemian w jedną i drugą stronę. Część ruchomą stanowią dwie cewki napięciowe, które są naprzemian włączane i wyłączane, oscylując pomiędzy nieruchomymi cewkami prądowymi. W punktach zwrotnych następuje za każdym razem przełączenie cewek napięciowych, tak, że kierunek siły ulega zmianie i system ruchomy jest zmuszony poruszać się w kierunku odwrotnym. Ruch oscylacyjny przenosi się na liczydło, wskazujące zużyta moc w watogodzinach. Wskutek przerywania prądu powstają iskry, niszczące kontakty, co stanowi wadę tego rodzaju liczników.

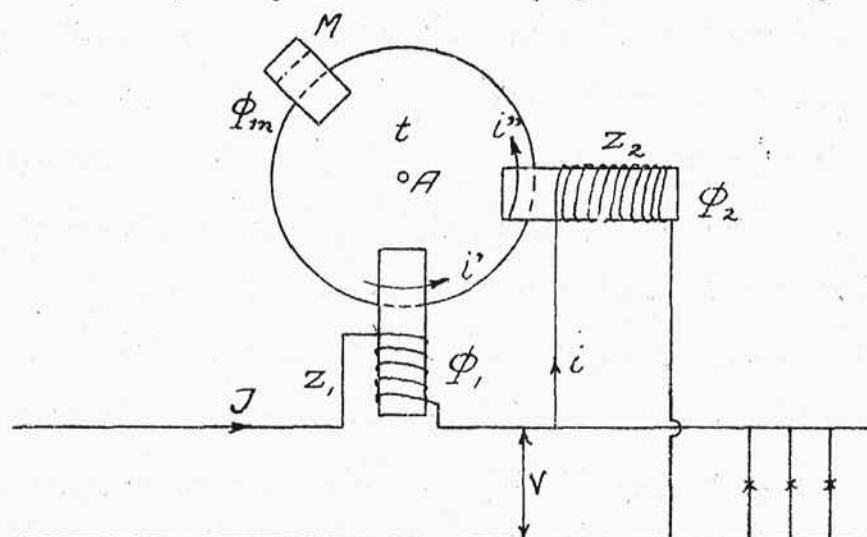
R O Z D Z I A Ł X V .

LICZNIKI INDUKCYJNE.

1/ Zasada działania.

Liczniki indukcyjne polegają na działaniu zmiennych pól magnetycznych na prądy wirowe, wywołane przez te pola w tarczy metalowej, osadzonej na osi, obracającej mechanizm liczbowy

licznika. Na rys. 86 widzimy pewne szczegóły



Rys. 86.

budowy takiego licznika. Na rdzeniach żelaznych są umieszczone cewki, z których jedna /cewka Z_1 / jest włączona w obwód prądu głównego, zaś druga /cewka Z_2 / tworzy obwód odgałęziony w tych punktach, gdzie mamy napięcie reboce, wskutek czego prąd i , przez nią przepływający, jest proporcjonalny do tego napięcia. W polu magnetycznym, wytworzonym przez powyższe zwojnice, obraca się tarcza miedziana

t , umocowana na osi A . Oś ta za pomocą ślimaka obraca mechanizm liczbowy. Magnes trwały M wytwarza moment tłumiący. Cewka Z_1 , jako prądowa, jest utworzona z niewielkiej

liczby zwojów grubego drutu, zaś cewka Z_2 , jako napięciowa, jest utworzona z dużej liczby zwojów cienkiego drutu.

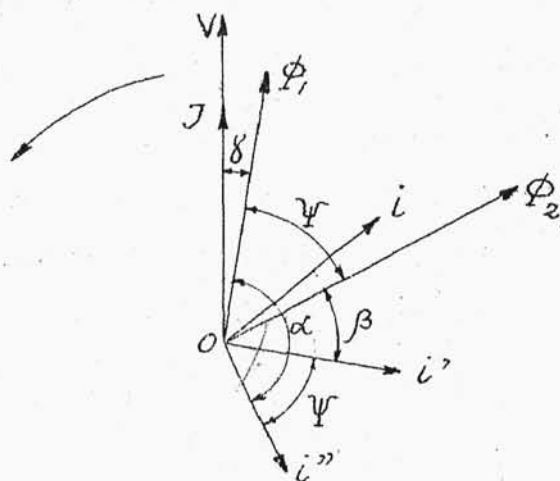
Aby moment kręcający był proporcjonalny do mocy mierzonej, trzeba, aby przesunięcie fazy pomiędzy polami magnetycznymi ϕ_1 i ϕ_2 , wytworzonymi przez cewki prądową i napięciową, nie było równe \mathcal{C} , lecz $90^\circ \pm \mathcal{C}$. Należy w tym celu indukcyjność cewki napięciowej zrobić znacznie większą od prądowej. Warunek wspomniany w zupełności osiągnąć się nie da, wskutek istniejących strat omowych, tak, że kąt w ten sposób otrzymany jest mniejszy od 90° .

Następujące rozważanie wskaże nam jednak drogę do osiągnięcia pełnego przesunięcia fazy 90° .

W celu przedstawienia wykresu wektorowego, rozważmy wypadek obciążenia bezindukcyjnego /żarówki/. Rozkład poszczególnych wektorów uwidocznia rys.87.

Prąd główny \mathcal{I} , praktycznie biorąc, jest w fazie z napięciem V . Strumień ϕ , wytworzony przez cewkę prądową, spóźnia się względem prądu \mathcal{I} o pewien niewielki kąt γ .

spowodowany stratami w żelazie cewki prądowej



Rys 87.

oraz prądami wirowymi i' , indukowanymi przez niego w tarczy. Strumień Φ_2 , wytworzony przez cewkę napięciową, spóźnia się względem napięcia V , a prąd i w cewce napięciowej, wytwarzający strumień Φ_2 , wyprzedza tenże strumień z podobnych przyczyn jak w cewce prądowej. Strumienie Φ_1 i Φ_2 indukują w tarczy ϵ siły elektromotoryczne, które są proporcjonalne do tych strumieni i do częstotliwości. Te siły elektromotoryczne wywołują w tarczy prądy wirowe i', i'' , które spóźniają się o ćwierć okresu względem odpowiednich strumieni. Zakładamy przytem, że samoindukcji prądów wirowych /rozproszenie/ niema, wskutek czego siły elektromotoryczne

są w fazie z prądami przez nie wywołanymi.

Moment kręjący występuje pod wpływem wzajemnego działania prądów wirowych, indukowanych przez strumień jednego elektromagnesu, oraz strumienia drugiego elektromagnesu, gdyż np. prąd i' płynie w polu magnetycznym \mathcal{P}_2 , a prąd i'' - w polu \mathcal{P}_1 .

Średni moment, wywołany działaniem strumienia \mathcal{P}_1 na prąd i'' , podobnie jak w watomierzach dynamometrycznych, jest równy:

$$M_{s_1} = c_1 \mathcal{P}_1 i'' \cos \alpha = c_1 \mathcal{P}_1 i'' \cos(90^\circ + \psi) = -c_1 \mathcal{P}_1 i'' \sin \psi$$

zakładając $-c_1 = c_1'$ mamy:

$$M_{s_1} = c_1' \mathcal{P}_1 i'' \sin \psi$$

Podobnie jest:

$$M_{s_2} = c_2 \mathcal{P}_2 i' \cos \beta = c_2 \mathcal{P}_2 i' \cos(90^\circ - \psi) = c_2 \mathcal{P}_2 i' \sin \psi$$

Ponieważ momenty M_{s_1} i M_{s_2} posiadają kierunki zgodne, zatem średni moment wypadkowy będzie:

$$M_s = M_{s_1} + M_{s_2} = c_1' \mathcal{P}_1 i'' \sin \psi + c_2 \mathcal{P}_2 i' \sin \psi$$

Leż prądy wirowe są proporcjonalne do odpowiednich strumieni, które je wywołują, t.j.

$$i' = c_3 \mathcal{P}_1 \quad \text{oraz} \quad i'' = c_4 \mathcal{P}_2$$

Podstawiając te wartości w równanie dla M_s , otrzymamy:

$$M_s = c_1' c_4 \mathcal{P}_1 \mathcal{P}_2 \sin \Psi + c_2 c_3 \mathcal{P}_1 \mathcal{P}_2 \sin \Psi = c_5 \mathcal{P}_1 \mathcal{P}_2 \sin \Psi$$

Wiedząc, że strumień \mathcal{P}_1 jest proporcjonalny do prądu głównego I , a strumień \mathcal{P}_2 - do napięcia V , możemy ostatecznie równanie przedstawić w następującej postaci:

$$M_s = c_s V I \sin \Psi$$

Ażeby moment ten był proporcjonalny do rzeczywistej mocy mierzonej, która wyraża się iloczynem $V I \cos \varphi$, to potrzeba aby było:

$$\sin \Psi = \cos \varphi$$

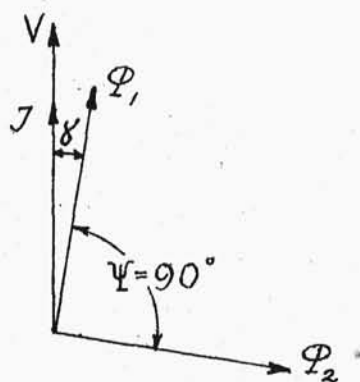
czyli

$$\Psi = 90^\circ - \varphi$$

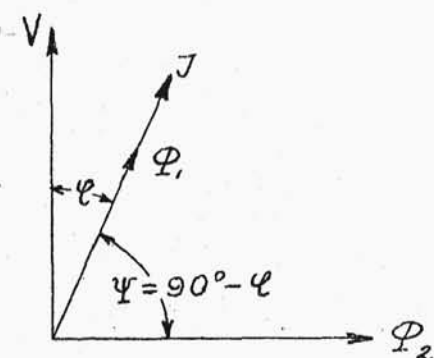
Przy obciążeniu bezindukcyjnym jest $\varphi = 0$, zatem $\Psi = 90^\circ$, to znaczy, że strumienie \mathcal{P}_1 i \mathcal{P}_2 winny być do siebie prostopadłe. Ponieważ strumień \mathcal{P}_1 jest przesunięty wstecz o kąt φ względem napięcia V , przeto strumień

\mathcal{P}_2 musi być przesunięty wstecz względem tegoż napięcia o kąt $90^\circ + \delta$; ze względu, że δ jest bardzo mały, można go praktycznie nie uwzględnić. Przy obciążeniu indukcyjnym musi być spełniony warunek $\psi = 90^\circ - \varphi$ / przyjmując dla uproszczenia kąt $\delta = 0$ /.

Rys. 88 przedstawia wykres wektorowy przy obciążeniu bezindukcyjnym, spełniający wspomniany warunek, a rys. 89 przedstawia taki wykres przy obciążeniu indukcyjnym.



Rys. 88.



Rys. 89.

Podczas ruchu tarczy magnes trwały \mathcal{M} /rys. 86/ wywołuje w niej prądy wirowe, działające tłumiąco. Moment tłumiący przez nie spowodowany jest, jak wiadomo, proporcjonalny do kwadratu strumienia \mathcal{P}_m , do grubości i prze-

wodności tarczy oraz do liczby obrotów w jednostce czasu; zatem

$$M_{h_m} = c_1 \Phi_m^2 n \gamma$$

Oprócz magnesu trwałego działają również tłumiące strumienie Φ_1 i Φ_2 . Momenty tłumiące są:

$$M_{h_1} = c_2 \Phi_1^2 n \gamma$$

$$M_{h_2} = c_3 \Phi_2^2 n \gamma$$

Prądy wirowe, pochodzące od strumieni Φ_1 i Φ_2 , mają podobny charakter i przebieg, jak prądy indukowane przez magnes trwały. Różnica między nimi jest tylko ta, że podczas gdy pierwsze są prądami zmiennymi, to drugie są prądami stałymi.

W stanie ustalonym musi być zatem spełniona następująca równość:

$$\gamma \cdot c_s V J C_s \varphi = (c_1 \Phi_m^2 + c_2 \Phi_1^2 + c_3 \Phi_2^2) n = c_h n$$

stąd zaś:

$$n = \frac{c_s V J C_s \varphi}{c_h} = c' V J C_s \varphi$$

Jeżeli przyjmiemy, że napięcie V , a więc wyraz $c_s \Phi_m^2$, są wielkościami stałymi, to,

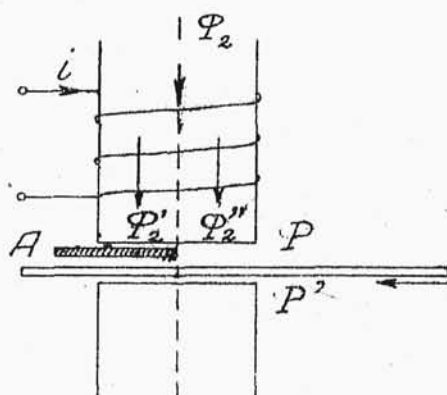
jak widać z ostatniego równania, liczba obrotów n będzie proporcjonalna do mierzonej mocy, jeżeli wyraz $C_2 \varphi^2$, który zmienia się wraz z prądem J , jest możliwie mały. Daje się to osiągnąć przez stosowanie magnesów trwałych, wytwarzających możliwie silne tłumienie /duże $C_1 \varphi_m^2$ /.

2/ Wpływy postronne, błędy i regulacja.

Tarcie w licznikach indukcyjnych jest mniejsze niż w liczniku z kolektorem; stanowi ono ok. 1/3 tarcia w stosunku do elektrodynamicznych. Tłumaczy się to brakiem szczotek, mniejszą wagą systemu ruchomego oraz wstrząśnieniami tegoż systemu, powodowanymi prądem zmiennym.

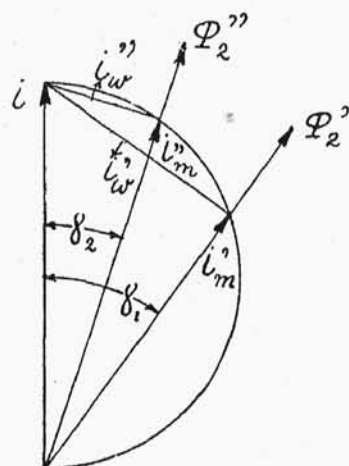
Błąd spowodowany tarcieniem możemy prawie skompensować za pomocą siły pomocniczej, która może być wytworzona różnymi sposobami, polegającymi przeważnie na wywołaniu asymetrii pola napięciowego; np.

a/ przez nierównomierne obciążenie strumienia napięciowego. Sposób ten przedstawia rys.



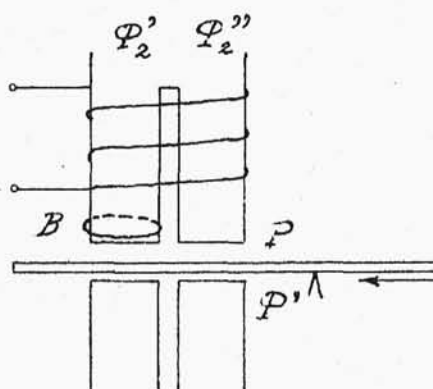
Rys. 90.

Pomiędzy biegunami jest umieszczona płytką miedziana A , pokrywająca część powierzchni bieguna P . Płytką ta powoduje silniejsze obciążenie wiatowe /prądy wirowe/ części Φ_2' strumienia magnetycznego, wskutek czego strumień Φ_2' jest bardziej przesunięty w fazie względem prądu i w cewce napięciowej, niż strumień Φ_2'' /rys. 91/. Okoliczność ta powoduje powstawanie dodatkowego momentu kręącego, skierowanego w stronę strumienia bardziej przesuniętego t.j. Φ_2' . Na rys. 91 i_m oznacza prąd magnetyzujący, zaś i_w - prąd wiatowy. Opory magnetyczne dróg obu strumieni są jednakowe. Tarcza obraca się w lewo.



Rys. 91.

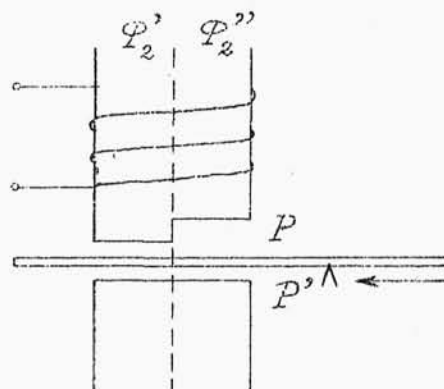
Zamiast płytki A może być użyty pierścień zwarty B , obejmujący część przekroju bieguna, jak to uwidocznia rys. 92.



Rys. 92.

b/ Przez wpływanie na opór magnetyczny szczeliny. Sposób ten jest przedstawiony na rys. 93, gdzie szczelina powietrzna po lewej stronie

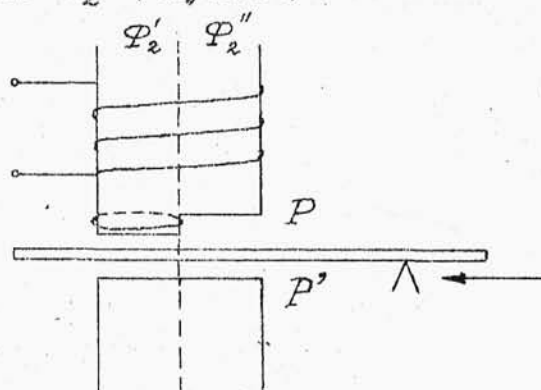
jest mniejsza niż po prawej. Obciążenia pól Φ_2' i Φ_2'' są jednakowe, ale opór magnetyczny



Rys. 93.

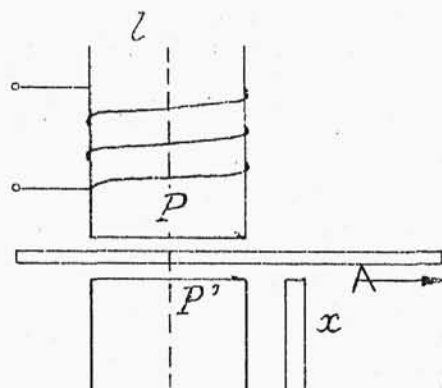
strumienia Φ_2' jest mniejszy niż strumienia Φ_2'' . Wskutek tego jest $\delta_1 > \delta_2$ /rys.91/ i tarcza obraca się w lewo.

Można również połączyć sposób b/ ze sposobem a/, dodając pierścień zwarty na wystającej części bieguna i w ten sposób obciążając więcej strumień Φ_2' /rys.94/.



Rys. 94.

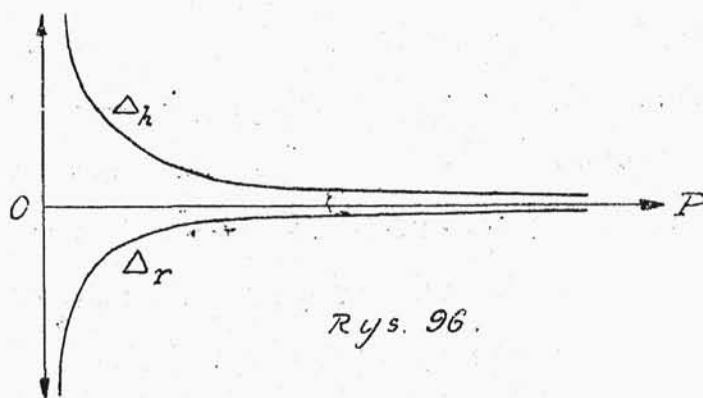
c/ Obok rdzenia napięciowego jest umieszczony trzpień żelazny x /rys. 95/ Prądy wirowe,



Rys. 95.

wytworzone w tarczy i krążące w około osi l rdzenia, starają się wciągnąć trzpień do środka, gdzie pole magnetyczne jest najgęstsze. Tarcza obraca się w kierunku od rdzenia napięciowego do trzpienia t.j. w prawo.

Przebieg krzywej błędów Δ_r , spowodowanych tarciem, przedstawia rys. 96. Krzywa Δ_h wyraża procentowy wpływ siły pomocniczej, dzięki której



Rys. 96.

ujemny błąd przy małym obciążeniu jest częściowo lub całkowicie skompensowany.

Zależność hamowania od obciążenia. Spółczynnik hamowania C_h nie jest wielkością stałą, gdyż wielkość momentu M_h zależy od prądu \mathcal{I} . Jak widzieliśmy, moment ten wzrasta wraz z \mathcal{P}^2 lub, praktycznie biorąc, wraz z \mathcal{I}^2 . Zatem przy dużym obciążeniu hamowanie jest silniejsze i przez to błąd ujemny - większy.

Wpływ żelaza. Z powodu obecności żelaza, stosowanego w cewkach w celu zwiększenia momentu kręącego, pomiędzy strumieniem \mathcal{P} , prądem magnesowania \mathcal{I}_m i prądem watowym \mathcal{I}_w , a zatem również prądem głównym \mathcal{I} , nie zachodzi ścisła proporcjonalność; również faza γ nie jest dokładnie stałą, lecz zmienia się wraz z obciążeniem \mathcal{I} . Zwykle daje się małe nasycenie żelaza, odpowiadające dolnej części krzywej magnesowania, w której przenikliwość μ rośnie wraz ze strumieniem \mathcal{P} i w której tenże strumień rośnie szybciej niż prąd \mathcal{I}_m . Ponieważ zwykle strumień \mathcal{P} również wzrasta szybciej niż prąd \mathcal{I}_w , to stąd wynika, że moment kręący zwiększa się szybciej niż obciążenie \mathcal{I} , powodu

jąc błąd dodatni. Szczelina powietrzna zmniejsza wpływ żelaza z powodu dużego oporu magnetycznego.

Zmiana napięcia. Zmiana ta wpływa na strumień Φ_2 , wywołujący moment hamujący $M_{h_2} = c_2 \Phi_2^2 n$. Jeżeli napięcie wzrośnie, to wzrośnie również strumień Φ_2 , a więc i hamowanie, wskutek czego liczba obrotów licznika zmniejszy się. W wypadku zmiennego napięcia moment M_{h_2} powinien być zatem mały wobec tłumienia magnesem trwałym.

Zmiana częstotliwości. W równaniu na moment kręący $M_s = c_s \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi$ w stałej $c_s = c_0 f$ jest zawarta częstotliwość f . Przy stałych: napięciu V , prądzie I oraz przesunięciu fazy ψ , strumień Φ_1 pozostaje praktycznie niezmiennym, zaś strumień Φ_2 jest zależny od częstotliwości, która ta zależność jest wywołana dużą indukcyjnością cewki napięciowej w stosunku do jej oporu omowego. Zależność ta może być przedstawiona w postaci $\Phi_2 = \frac{K}{f}$, co znaczy że iloczyn $\Phi_2 f$ pozostaje w przybliżeniu stałym.

Przesunięcie fazy ψ pomiędzy strumieniami wzrasta wraz z rosnącym f , jednakże wzrost

ten wywiera tylko nieznaczny wpływ na moment kręący M_s , tak, że moment ten jest prawie niezależny od częstotliwości.

Siła pomocnicza jest nieco zależną od niej i to w stosunku odwrotnym.

Temperatura. - Przy zmianie temperatury zmienia się przewodność tarczy, wskutek czego zmienia się w tym samym stosunku moment kręący i hamujący. Gdyby przesunięcie fazy strumieni nie uległo zmianie, to liczba obrotów licznika pozostałaby niezmienną.

W rzeczywistości zmniejsza się wraz z rosnącą temperaturą strumień \mathcal{P}_m magnesu trwałego, tak, że przy wyższej temperaturze licznik wykazuje błąd dodatni.

Regulacja i urządzenia pomocnicze. - W celu zapobieżenia biegowi jałowemu licznika tarcza posiada szczelinę lub otwór, dąży ona do ustawienia się w takiej pozycji pod biegunami cewki napięciowej, aby prądy w niej indukowane były minimalne. Będzie to wówczas, gdy tarcza ustawi się otworem pod rdzeniem, tamując drogę prądom wirowym.

Można również zastosować do tego celu skrzy-

dełko żelazne lub płamę żelazną.

Dla regulowania liczby obrotów magnes trwały jest zaopatrzony w specjalną przesuwnicę. Oprócz tego są jeszcze urządzenia,, służące do wyrównywania przesunięcia faz, wyłączenia biegu luźnego, regulowania rozruchu i cechowania.

3/ Typy liczników indukcyjnych.

Zależnie od sposobu wytworzenia przesunięcia 90° pomiędzy strumieniami, wytwarzającymi moment kręący, przy obciążeniu bezindukcyjnym, rozróżniamy typy, w których to przesunięcie może być wytworzone:

A/ przez wpływanie na pole napięciowe,

B/ przez wpływanie na pole prądowe.

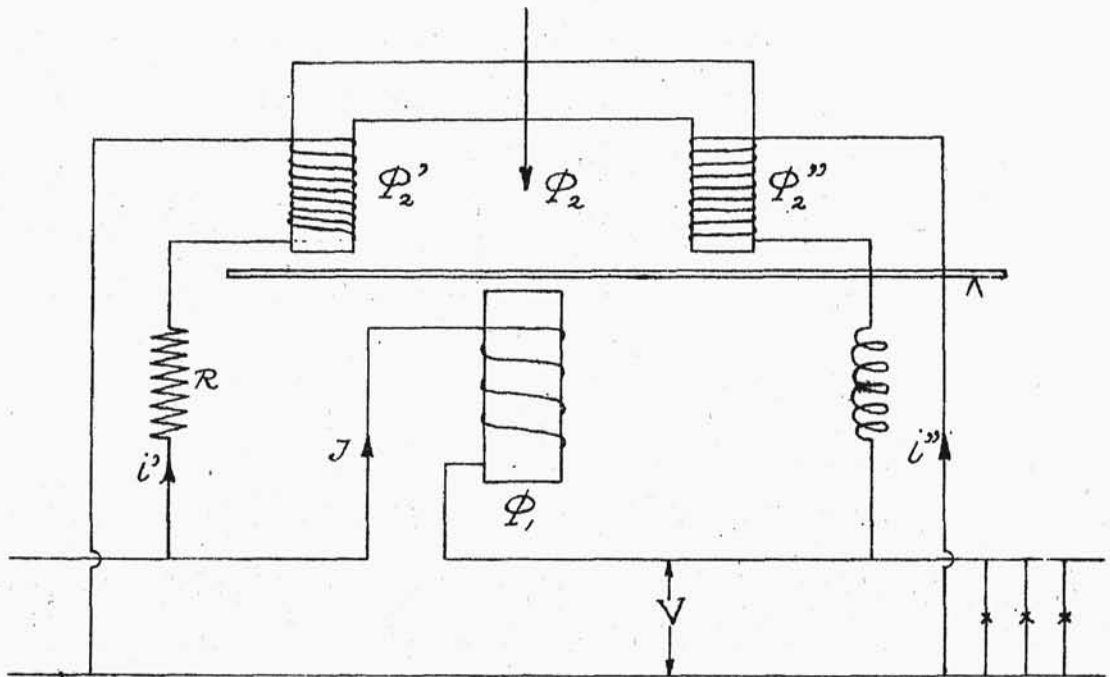
W obu wypadkach działanie tego pola może być:

α) przez wypadkową pola rozdzielonego,

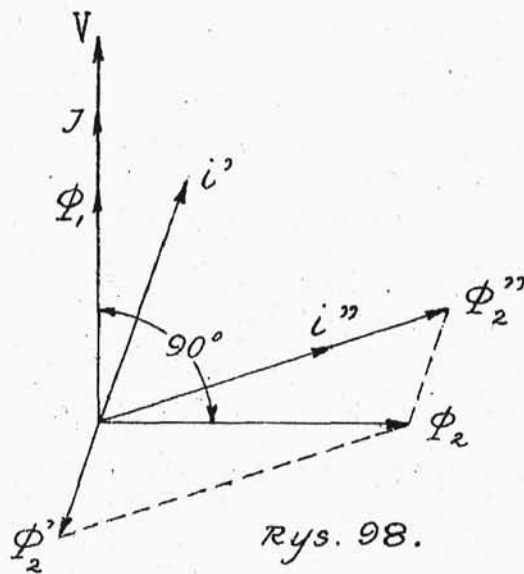
β) przez jedną jego składową.

Typ A. α , przedstawia rys. 97; w typie tym następuje rozdział pola napięciowego oraz działanie jego wypadkowej. Odpowiedni wykres wektorowy przedstawia rys. 98.

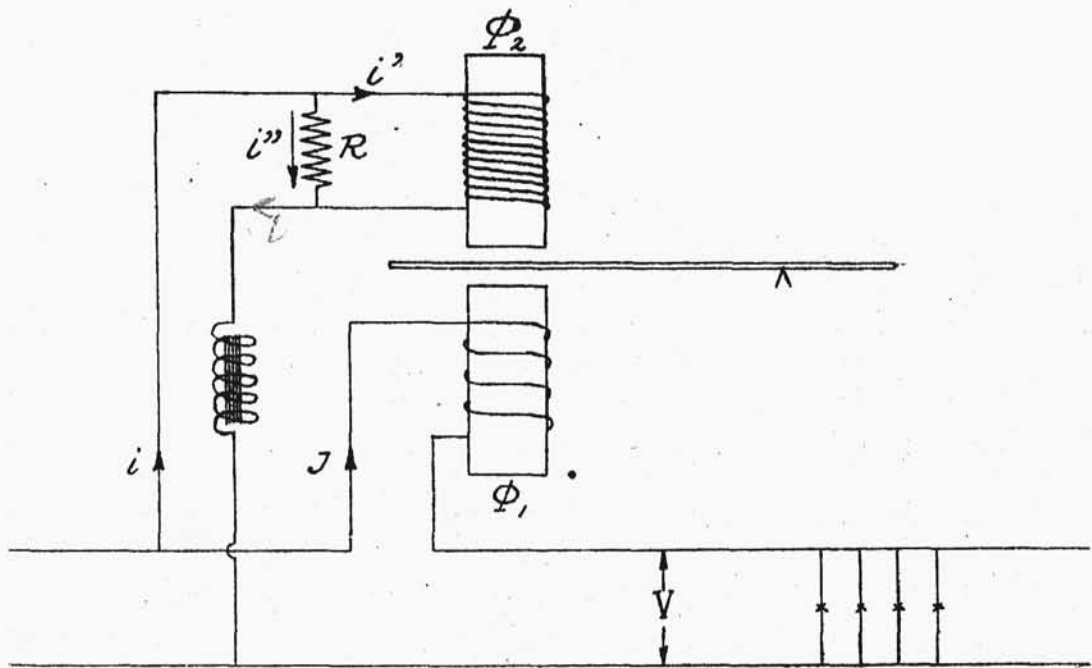
Zmieniając opór \mathcal{R} , zmieniamy strumień \mathcal{P}_2' przy stałym strumieniu \mathcal{P}_2'' , wskutek czego zmie-



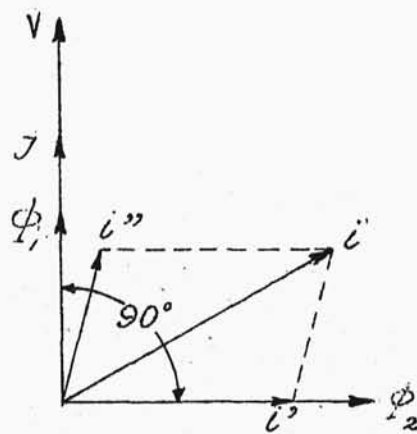
Rys. 97.



Rys. 98.



Rys. 99.



Rys. 100.

nia się również faza strumienia wypadkowego

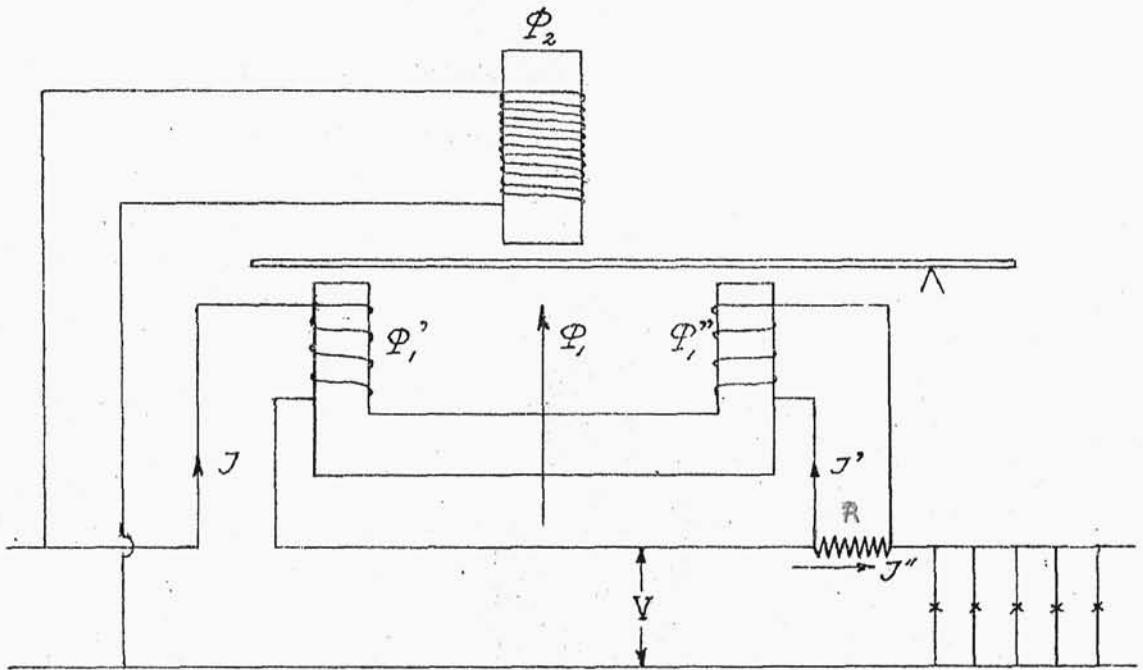
\mathcal{P}_2 . Przez stosowany dobór tego oporu można uzyskać przesunięcie fazy pomiędzy strumieniami \mathcal{P}_1 , \mathcal{P}_2 , wynoszące 90° .

Typ A. β , przedstawia rys.99; w typie tym następuje rozdział prądu napięciowego oraz działanie jednej ze składowych tego prądu. Odpowiedni wykres wektorowy przedstawia rys.100.

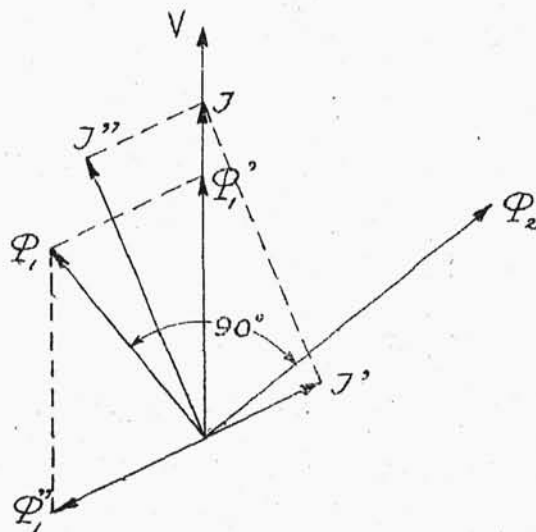
Zmieniając opór \mathcal{R} , zmieniamy prąd i'' przy stałym prądzie i , wskutek czego zmienia się również faza prądu i'' . Przez stosowany dobór tego oporu można uzyskać przesunięcie fazy pomiędzy strumieniami \mathcal{P}_1 , \mathcal{P}_2 , wynoszące 90° .

Typ B. \mathcal{L} przedstawia rys.101; w typie tym następuje rozdział pola prądowego oraz działanie jego wypadkowej. Odpowiedni wykres wektorowy przedstawia rys.102.

Zmieniając opór \mathcal{R} , zmieniamy prąd \mathcal{I}'' przy stałym prądzie \mathcal{I} , wskutek czego zmienia się faza prądu \mathcal{I}' , a więc i strumienia \mathcal{P}_1'' przy stałym strumieniu \mathcal{P}_1' . Przez stosowny dobór tego oporu można uzyskać przesunięcie fazy pomiędzy strumieniami \mathcal{P}_1 , \mathcal{P}_2 , wynoszące 90° .

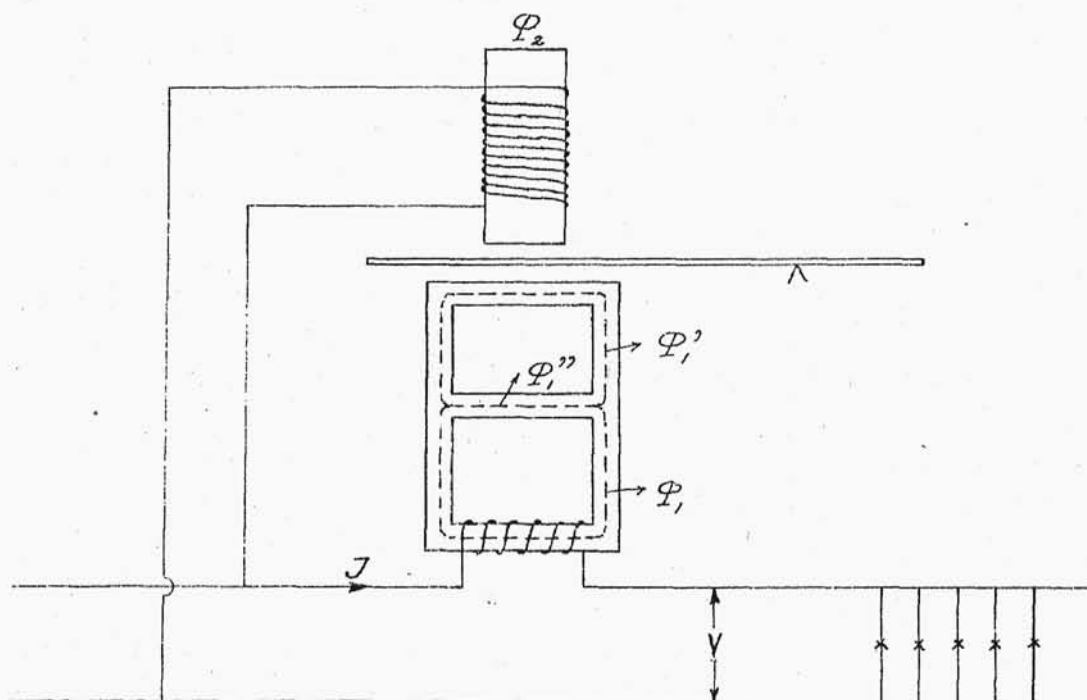


Rys. 101.

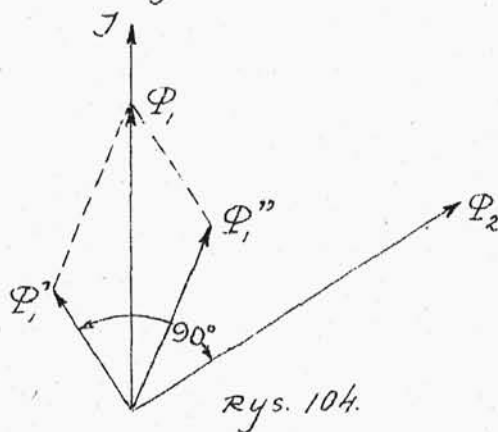


Rys. 102.

Typ B. β przedstawia rys.103; w typie tym następuje rozdział pola prądowego oraz działanie jednej ze składowych tego pola. Odpowiedni wykres wektorowy przedstawia rys.104.



Rys. 103.



Rys. 104.

Zmieniając strumień Φ za pomocą bocznika magnetycznego, zmieniamy wielkość i fazę strumienia Φ' . Przez stosowny dobór tego bocznika można uzyskać przesunięcie fazy pomiędzy strumieniami Φ' Φ_2 , wynoszące 90° .

Prócz tego istnieje cały szereg innych rozwiązań. W nowoczesnych licznikach regulacja przesunięcia fazy strumienia odbywa się najczęściej przez silne ich rozproszenie, które pozwala osiągnąć nawet przeszło 90° . Doregulowywanie odbywa się za pomocą opornika regulacyjnego.

4/ Zastosowanie.

Liczniki indukcyjne nadają się tylko do prądu zmiennego. Zużycie energii w cewce prądowej wynosi ok. 1 W., w cewce napięciowej przy 100 V wynosi również 1 W. Liczniki te odznaczają się wytrzymałością na przeciążenie oraz zmiany temperatury; zmiana częstotliwości w granicach 10% nie wpływa na ich wskazania. Liczniki indukcyjne są budowane do 200 A i 600 V. Przy silniejszym prądzie i wyższym napięciu stosuje się transformatoriki pomiarowe. Boczniki i oporniki dodatkowe używanymi być nie mogą.

Liczniki trójfazowe. Do pomiaru pracy prądu trójfazowego można zastosować trzy oddzielne liczniki jednofazowe. Przeważnie jednak stosuje się układ Arona, w którym dwa systemy jednofazowe /Ferrarisa/ są złączone w jeden przyrząd. Te dwa systemy działają na wspólną oś, a nawet i na wspólną tarczę. - Należy przytem uważać na połączenia, aby kierunek momentu kręcącego był w obu systemach ten sam.

Wadą tego systemu jest wzajemne wpływanie obu systemów na siebie: np. strumień prądowy \mathcal{P}_1 jednego systemu w razie wspólnej osi działa na tarczę drugiego systemu wspólnie z jego polem napięciowym \mathcal{P}_2 . Ponadto w razie wspólnej tarczy prądy indukowane przez jeden system działają hamująco wraz z polem drugiego systemu. W celu zmniejszenia tego wpływania daje się duże odstępy pomiędzy poszczególnymi częściami tych dwóch systemów.

Na liczniku powinien być zaznaczony porządek faz, jaki miał miejsce przy cechowaniu, gdyż w razie zmiany kierunku przyłączenia faz, błędy spowodowane wzajemnem wpływaniem obu systemów, dają się wówczas szczególnie wyczuć. Niektóre liczniki posiadają urządzenia, uniezależniające ich wskazania od porządku faz.

W poniższej tabelce są wyszczególnione liczbowe dane, dotyczące się niektórych typów liczników jedno- i trójfazowych.

	1-faz.	3-faz.
Moment kręący /gr.cm./	5 ÷ 6	8 ÷ 11
Waga /gr./	30	65
Liczba obrotów na min.	45	45
Zużycie prądu głównego /wat./	1	2 x 1
Zużycie prądu bocznikowego/wat./	0,8	2 x 0,8
Moment rozruchu /gr.cm./	0,5	0,5 ÷ 1
Błąd całkowity Δ	$\pm 2,5 \%$	$\pm 3 \%$