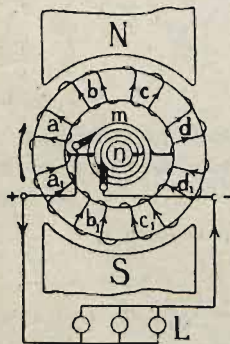


## Prądnice prądu zmiennego.

### 56. Budowa prądnic jednofazowych prądu zmiennego.

Każdą prądnice prądu stałego łatwo jest przerobić na prądnice prądu zmiennego, umieszczając na tworniku zamiast kolektora pierścienie. Na rys. 140 widzimy twornik pierścieniowy, w którym zamiast kolektora mamy dwa pierścienie, połączone z przeciwnymi punktami uzwojenia. Do pierścieni *m* i *n* dotykają szczotki, odprowadzające prąd. Przy obracaniu twornika pomiędzy biegunami elektromagnetycznymi, w zwojach będą powstawały takie same siły elektromotoryczne, jak w twornikach prądnic prądu stałego.

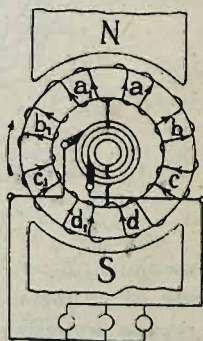


Rys. 140.

Napięcie na szczotkach będzie tu jednak zmienne, ponieważ zależnie od położenia twornika otrzymujemy rozmałą wypadkową siłę elektromotoryczną. W tworniku na rys. 140 mamy dwie równoległe gałęzie: w jednej z nich znajdują się cztery zwojnice *a*, *b*, *c* i *d*, a w drugiej *a*<sub>1</sub>, *b*<sub>1</sub>, *c*<sub>1</sub> i *d*<sub>1</sub>. Siły elektromotoryczne zwojnic *a*, *b*, *c* i *d* na rys. 140 są skierowane wszystkie w jedną stronę, więc dodają się razem i wypadkowa siła elektromotoryczna, wywołująca napięcie na szczotkach, równa jest sumie sił

elektromotorycznych każdej z dwóch grup równolegle połączonych zwojnic. Kierunek sił elektromotorycznych jest wskazany na rysunku. Prąd wypływa z twornika przez pierścień  $m$  do obwodu lamp i wraca z powrotem przez pierścień  $n$ . Wobec tego pierścień  $m$  jest tu biegunem dodatnim, a  $n$  ujemnym.

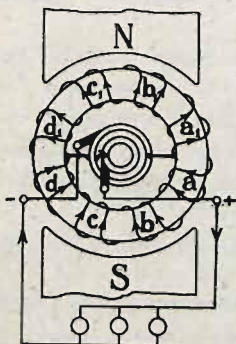
Gdy twornik przekręci się o ćwierć obrotu i znajdzie się w położeniu wskazanem na rys. 141, to zwoje  $a$  i  $b$  będą się znajdowały pod wpływem bieguna północnego, a  $c$  i  $d$  — pod wpływem bieguna południowego. Siły elektromotoryczne w zwojach  $a$  i  $b$  będą skierowane wbrew siłom elektromotorycznym zwojów  $c$  i  $d$ . Siły elektromotoryczne w zwojach  $a$  i  $d$  są jednakowe co do wielkości i przeciwnie co do kierunku; tak samo siły elektromotoryczne w zwojach  $b$  i  $c$  są jednakowe co do wielkości i przeciwnie co do kierunku. Suma takich czterech sił elektromotorycznych jest równa zero. W drugim obwodzie równoległym, gdzie są zwoje  $a_1, b_1, c_1$  i  $d_1$ , siły elektromotoryczne również parami są równe i przeciwnie, więc suma tych sił jest także równa zero. Wobec tego przy położeniu twornika, wskazanem na rysunku 141 napięcie na szczotkach równa się zero.



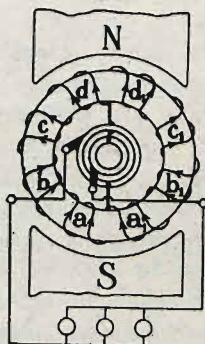
Rys. 141.

Gdy twornik obróci się jeszcze dalej o ćwierć obrotu i zajmie położenie wskazane na rys. 142, to wszystkie zwoje jednego szeregu  $a, b, c$  i  $d$ , znajdą się pod jednym biegunem, a drugiego szeregu  $a_1, b_1, c_1$  i  $d_1$  — pod drugim. Skutkiem tego kierunki sił elektromotorycznych w zwojach  $a, b, c, d$  będą zgodne i siła elektromotoryczna wypadkowa będzie równa sumie sił elektromotorycznych składowych; tak samo i w części obwodu  $a_1, b_1, c_1, d_1$  siły elektromotoryczne poszczególnych zwojów są skierowane wszystkie w jedną stronę. W porównaniu jednak z położeniem twornika na rys. 140 kierunek prądu w obwodzie lamp jest odwrotny.

Obracając się jeszcze dalej o ćwierć obrotu, twornik zajmie położenie, wskazane na rys. 143. Zwojnice  $a, b, c, d$  jednej gałęzi znajdują się w jednej połowie pod biegunem północnym, a w drugiej pod południowym; to samo dotyczy



Rys. 142.



Rys. 143.

zwojnice,  $a_1, b_1, c_1, d_1$  drugiej gałęzi; wobec tego, tak samo jak w położeniu, wskazanem na rys. 141, siła elektromotoryczna wypadkowa równa jest zero i prądu niema.

Dalej twornik przejdzie znowu do położenia, wskazanego na rys. 140 od którego rozpoczęliśmy rozważanie ruchu twornika. Zestawiając wyniki powyższych rozumowań, widzimy, że w ciągu jednego całkowitego obrotu twornika prąd osiąga największe natężenie w jednym kierunku, następnie zmniejsza się do zera, powstaje w kierunku przeciwnym, osiąga w tym kierunku największe natężenie, potem zmniejsza się do zera, znowu powstaje w kierunku poprzednim, osiąga największość i t. d. Czas, po upływie którego w prądzie powtarzają się te same zmiany, nazywamy okresem zmienności prądu. W prądnicy, rozważonej wyżej, zmiany prądu, odpowiadające jednemu okresowi, odbywają się w ciągu jednego obrotu twornika.

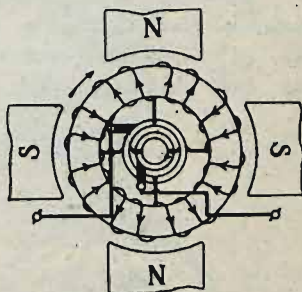
Chcąc otrzymać prąd zmienny z prądnicy czterobiegunowej, stosujemy także dwa pierścienie, łączymy je jednak z uzwo-

jeniem twornika w miejscach znajdujących się pomiędzy sobą na odległości czwartej części uzwojenia. Na rys. 144 wskazany jest sposób łączenia pierścieni z uzwojeniem. Jak widzimy na tym rys. każdy pierścień połączony jest z dwoma przeciwnymi miejscami uzwojenia.

Rozważając przebieg prądu w takim uzwojeniu w podobny sposób jak poprzednio, znajdziemy, że te same zmiany prądu powtarzają się tu co pół obrotu twornika, a więc, przy tej samej prędkości biegu, okres będzie tu dwa razy krótszy.

Zamiast długości okresu obliczamy często liczbę okresów, przypadającą na sekundę.

Uwzględniając, że w minucie mamy 60 sekund, znajdujemy w prądnicy dwubiegunowej liczbę okresów prądu na sekundę, dzieląc liczbę obrotów prądnicy na minutę przez sześćdziesiąt. Jeżeli prądnica ma cztery bieguny, to liczbę obrotów twornika dzielimy przez sześćdziesiąt i mnożymy przez dwa.



Rys. 144.

Wogóle liczba okresów prądu na sekundę równa się liczbie obrotów twornika na minutę, podzielonej przez sześćdziesiąt i pomnożonej przez liczbę par biegunów.

Jeżeli oznaczymy przez  $f$  — liczbę okresów prądu na sekundę, przez  $n$  liczbę obrotów twornika na minutę, a przez  $p$  liczbę par biegunów, to:

$$f = \frac{n p}{60}.$$

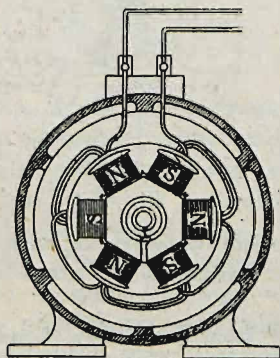
Liczbę okresów prądu na sekundę nazywamy krótko częstotliwością prądu, lub częstotliwością okresów prądu. W ciągu jednego okresu kierunek prądu zmienia się dwa razy, więc podwójna liczba okresów na sekundę wyraża liczbę zmian kierunku prądu na sekundę; na przykład, przy 50 okresach na sekundę mamy 100 zmian kierunku prądu na

sekundę. Liczbę zmian kierunku prądu w ciągu sekundy nazywamy krótko **częstotliwością zmian prądu**. W powyższym przykładzie mieliśmy prąd o częstotliwości okresów 50 i częstotliwości zmian 100.

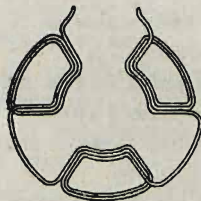
Uzwojenia elektromagnesów prądnic prądu zmiennego zasilamy prądem stałym z innej małej prądnicy prądu stałego, zwanej **wzbudnicą**.

Prądnice prądu zmiennego, których opis podaliśmy wyżej, stosują się rzadko i tylko wtedy, gdy napięcie nie jest wyższe od kilkuset woltów.

Prądnice prądu zmiennego, stosowane powszechnie, mają **twornik nieruchomy**, a obracające się **elektromagnesy**. Na rys. 145 wskazany jest ogólny ustrój takiej prądnicy, a na rys. 146 układ zwojów w uzwojeniu twornika. Zewnętrzna



Rys. 145.

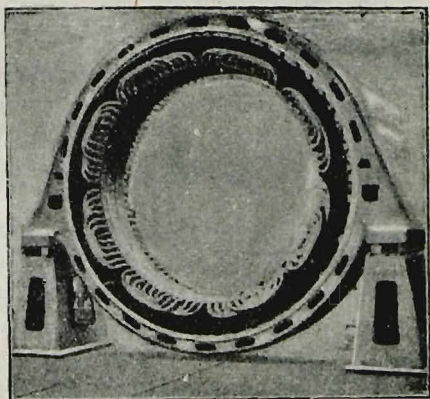


Rys. 146.

rama twornika stanowi odlew żelazny wewnątrz którego znajduje się pierścień, złożony z krążków blaszanych. Stosuje się tu blacha żelazna miękka, bardzo cienka (0,3 — 0,4 mm.), oklejona papierem lub lakierowana.

Tego rodzaju budowa twornika ma na celu osłabienie prądów wirowych, które powstają w żelazie skutkiem ruchu linii magnetycznych.

Na wewnętrznej powierzchni blaszanego pierścienia są żłobki w których umieszczamy zwojnice, wskazane na rys. 146. Druty w zwojnicach stosujemy różne, odpowiednio do wielkości prądu i napięcia. Gdy napięcie jest wysokie, np. kilka tysięcy woltów, a prąd niewielki, np. kilkadziesiąt amperów,

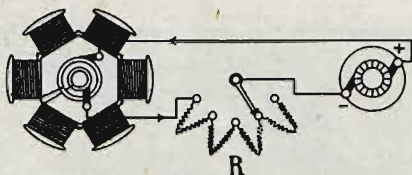


Rys. 147.

to na tworniku umieszczamy zwojnice, nawinięte z drutu okrągłego dobrze izolowanego. Dla zapewnienia dokładnej izolacji drutów od żelaza, umieszczamy wewnątrz rowków rurki mikanitowe, przez które przechodzą druty zwojnic. Przy wielkich prądach i niskim napięciu wykonywamy uzwojenie twornika z prętów lub szyn miedzianych, odpowiednio izolowanych. Wogóle tem więcej dajemy zwojów w zwojnicach, im wyższe napięcie chcemy otrzymać. Na rysunku 145 i 146 wskazane są tylko trzy zwoje w jednej zwojnicy, aby lepiej było widać bieg grutów. Na rys. 147 widzimy duży gotowy twornik uzwojony, stojący w pracowni.

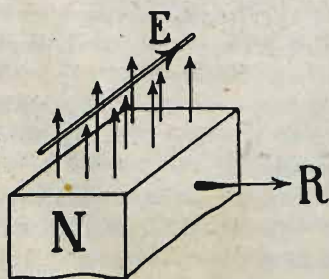
Elektromagnesy prądnicy, obracające się wewnątrz twornika, mają postać wielokąta albo koła z wystęgami, na których osadzone są zwojnice magnesujące rys. 145 i 148. Koło zazwyczaj jest lane stalowe. występy tworzą z kołem całość, lub też stanowią paczki blachy żelaznej, przymocowane do

koła odpowiedniami śrubami. Na te występy nasadzone są zwojnice nawinięte w ten sposób, że obok siebie powstają bieguny przeciwne. Zwojnice elektromagnesów są pomiędzy sobą połączone w szereg i końce obwodu doprowadzone do pierścieni, umocowanych na wale.



Rys. 148.

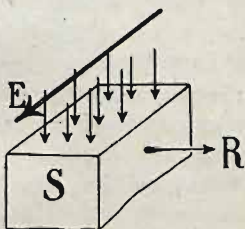
Prąd stały ze wzbudnicy doprowadzamy do zwojnic ruchomych przez szczotki, przylegające szczelnie do powyższych pierścieni. Za pomocą opornika  $R$  możemy zmieniać natężenie prądu, a więc i wielkość strumienia w elektromagnesach. Tak samo jak w prądnicach prądu stałego, przy zwiększaniu obciążenia prądnicy prądu zmiennego, napięcie na końcówkach spada i dla podniesienia tego napięcia do poprzedniej wielkości zwiększamy prąd magnesujący, przez zmniejszenie oporności opornika  $R$ . Gdy elektromagnesy są w ruchu, strumienie magnetyczne, przebiegające od jednego bieguna do drugiego, obracając się razem z elektromagnesami i przecinając druty twornika, wywołują w nich siły elektromotoryczne.



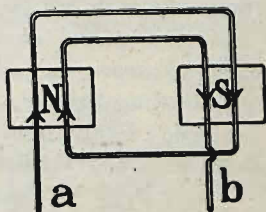
Rys. 149.

Na rys. 145 widzimy, że gdy jedna strona zwojnicy znajduje się nad biegunem północnym, to druga — nad biegunem południowym. Kierunek siły elektromotorycznej w drucie nad biegunem północnym wskazuje strzałka  $E$  na rys. 149 o ile ruch bieguna odbywa się w kierunku strzałki  $R$ . Kierunek  $E$  znajdujemy według reguły indukcji

prądów \*). Prawą rękę kładziemy tu dłonią w dół i duży palec zwracamy na lewo, bo przy ruchu magnesu w prawo, drut względem magnesu przesuwają się w lewo, reszta palców złożonych skieruje się wzdłuż strzałki  $E$ . W podobny sposób znajdziemy kierunek siły elektromotorycznej w drucie nad biegunem południowym, rys. 150, gdzie linie magnetyczne zwrócone są w dół. W tym przypadku dłoń odwracamy do góry, a duży palec jak poprzednio w lewo, wtedy inne palce, wskazujące siłę elektromotoryczną, skierują się wzdłuż strzałki  $E$ ; jest to kierunek odwrotny względem tego, który mieliśmy na rys. 149. Siły elektromotoryczne, powstające w jednej zwojnicy, rys. 151 wywołują prąd w jedną stronę,



Rys. 150.



Rys. 151.

od  $a$  do  $b$ . Im wyższe mamy otrzymać napięcie, tem oczywiście więcej zwojów wypada nawinąć w każdej zwojnicy.

Wszystkie zwojnice na tworniku łączą się razem w jeden obwód tak, aby ich siły elektromotoryczne były zgodne w każdej chwili. Końce obwodu twornika doprowadzone są do zacisków, gdzie umocowujemy przewody, odprowadzające prąd z prądnicy. Na rys. 145 i 146 widzimy połączenie między sobą zwojnic, które mają po trzy zwoje.

Przy obracaniu się elektromagnesów pod zwojnicami twornika przebiegają kolejno bieguny północne i południowe. Skutkiem tego, jeżeli początkowo w zwojnicy na rys. 151 prąd przebiegał od  $a$  do  $b$ , to gdy zmienia się bieguny na odwrot-

\*) Patrz rozdział 46.

ne, pod lewą stroną zwojnicy stanie biegun  $S$ , a pod prawą — biegun  $N$ , kierunek sił elektromotorycznych wypadnie przeciwny i prąd popłynie od  $b$  do  $a$ . Zmiany kierunku prądu powtarzają się za każdym razem, gdy pod zwojnicami zmieniają się bieguny. Z tego wynika, że liczba okresów prądu na sekundę równa jest liczbie obrotów elektromagnesów, czyli magnesnicy, na minutę, podzielonej przez sześćdziesiąt i pomnożonej przez liczbę par biegunów.

A więc jak poprzednio:

$$f = \frac{n \cdot p}{60}.$$

Tu  $p$  — liczba par biegunów,  $n$  — liczba obrotów magnesnicy na minutę.

U nas najczęściej są używane prądy zmienne mające pięćdziesiąt okresów na sekundę. Jeżeli prądnica ma dwa bieguny, to liczba obrotów magnesnicy w ciągu minuty powinna wynosić 3000, ponieważ przy tej prędkości ruchu liczba okresów prądu wyniesie:

$$f = \frac{3000}{60} \times 1 = 50.$$

Przy czterech biegunach liczba obrotów magnesnicy powinna być dwa razy mniejsza, t. j. 1500. Tu mamy dwie pary biegunów, więc liczbę okresów prądu obliczymy w sposób następujący:

$$f = \frac{1500}{60} \times 2 = 50.$$

Prądnice poruszane dużemi tłokowemi maszynami parowemi, albo turbinami wodnemi, obracają się zwykle wolno, np. 100 obrotów na minutę, więc tu wypada zastosować elektromagnesy z sześćdziesięcioma biegunami. Mamy wtedy 30 par biegunów i liczbę okresów prądu otrzymamy ze wzoru:

$$f = \frac{100}{60} \times 30 = 50.$$

Z małą liczbą biegunów stosowane są prądnice, obracane przez turbiny parowe, których prędkość biegu jest wielka. Np. gdy turbina obraca się z szybkością 3000 obrotów na minutę, to elektromagnesy mają tylko dwa bieguny. Ze względu na bardzo szybki ruch, budowa tych elektromagnesów jest nieco odmienna. Na rys. 152 widzimy elektromagnes takiej szybkoobrotowej prądnicy.

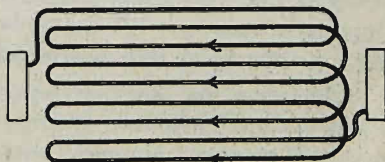


Rys. 152.



Rys. 153.

Na rys. 153 wskazany jest układ zwojów w tym elektromagnecie. Druty, tu jak na tworniku, są ułożone w rowkach, wyżłobionych na powierzchni walca. Walec jest stalowy, pełny, prądów wirowych w nim nie ma, ponieważ linie magnetyczne przebiegają zawsze w jednym kierunku. Na rysunku 154 wskazany jest przebieg prądu w uzwojeniu takiego elektromagnesu. Prąd do ruchomych zwojów doprowadzamy za pomocą szczotek, przylegających do pierścieni, które znajdują się z dwóch stron uzwojenia.



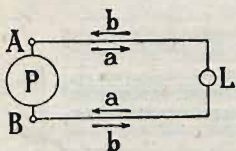
Rys. 154.

## 57. Prąd zmienny w obwodzie bez samoindukcji.

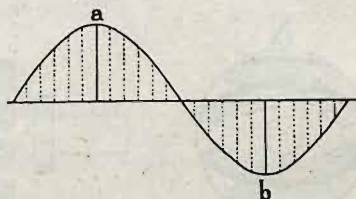
W obwodzie na rys. 155 mamy prądnice —  $P$ , i lampę —  $L$ . Zmienna siła elektromotoryczna prądnicy wywołuje prąd zmienny w obwodzie. Prąd ten osiąga największą

szość w kierunku strzałek  $a$ , potem zmniejsza się stopniowo do zera, powstaje w kierunku strzałek  $b$ , osiąga w tym drugim kierunku największość, zmniejsza się do zera, znowu powstaje w kierunku poprzednim, według strzałek  $a$  i t. d.

Dla ułatwienia wyobraźni, zmienność prądu można przedstawić, za pomocą linii falistej, wykreślonej na rys. 156. Linja



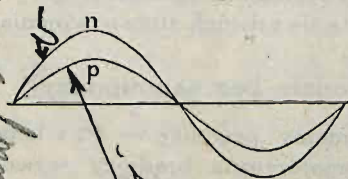
Rys. 155.



Rys. 156.

ta łączy końce kresiek, poprowadzonych w równych odstępach jedna od drugiej. Długość każdej kreski oznacza wielkość prądu. Kreski, poprowadzone do góry, oznaczają prądy, płynące w kierunku strzałek  $a$ , rys. 155, a kreski, poprowadzone w dół, oznaczają prądy, płynące w kierunku strzałek  $b$ . Linja falista na rys. 157 odpowiada jednemu okresowi zmienności prądu, dalej fale powtarzają się.

Napięcie na końcówkach prądnicy  $A B$  zmienia się w powyższym obwodzie zgodnie z prądem. Jeżeli linja falista  $p$ , rys. 157 wyraża zmienność prądu, to linja  $n$  wyraża zmienność napięcia. Zastanawiając się nad przebiegiem tych linii, widzimy, że prąd i napięcie jednocześnie równają się zero, a także jednocześnie osiągają największość w jednym i w drugim kierunku. Taką zgodność zmienności prądu i napięcia wyrażamy zazwyczaj, mówiąc, że fazy napięcia i prądu są zgodne, albo, że nie ma różnicy faz napięcia i prądu, czy też, że prąd i napięcie są w fazie.

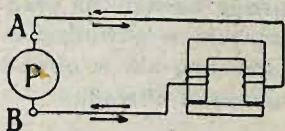


Rys. 157.

## 58. Prąd zmienny w obwodzie z samoindukcją.

Inaczej przebiega prąd w obwodzie, który zamiast lampy ma zwojnicę z samoindukcją, np. elektromagnes, rys. 158. Prąd nie zmienia się tu zgodnie z napięciem na zaciskach

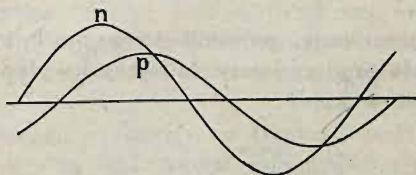
$AB$ . Skutkiem samoindukcji w elektromagnesie, zmiany prądu opóźniają się względem zmian napięcia. Jeżeli linja falista  $n$ , rys. 159 wyraża zmiany napięcia na zaciskach  $AB$ , to zmiany prądu przedstawia linja  $p$ , przesunięta względem poprzedniej



Rys. 158.

linji w bok. Wielkość tego przesunięcia wyraża tak zwaną różnicę faz. Tu prąd spóźnia się w fazie względem napięcia. Gdy napięcie zbliża się do największości, to natężenie prądu jest jeszcze zerem, potem napięcie zmniejsza się, a prąd jeszcze wzrasta i t. d.

Różnica faz prądu względem napięcia w obwodach tego rodzaju jest zaledwie trochę mniejsza od ćwierci okresu, wogóle zależnie od stosunku indukcyjności do oporności obwodu różnica faz zmienia się od zera prawie do ćwierci okresu.



Rys. 159.

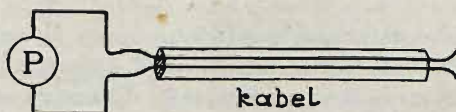
W tych okolicznościach mamy tu jakby bezwładność prądu elektrycznego podobną np. do bezwładności wody płynącej w rurach. Jeżeli np. pompować przez rury wodę to w jednym to w drugim kierunku, to przecie, gdy ciśnienie pompy spadnie do zera, woda czas jaki będzie jeszcze płynąć w tym samym kierunku, a potem, gdy damy ciśnienie odwrotne, nie zaraz prąd wody się zwróci.

Taki prąd wodny nie tylko będzie w zmienności swojej przesunięty w fazie względem zmienności ciśnienia, ale po-  
zatem nigdy nie osiągnie tej prędkości, którą by miał gdyby  
woda nie miała tak zwanej bezwładności.

Zupełnie podobne działanie hamujące wywiera samoindukcja obwodu na prąd elektryczny zmienny. Przy tem samem napięciu w obwodzie z samoindukcją, prąd osiąga mniejsze natężenie, niż w obwodzie bez samoindukcji, przy tej samej oporności obwodu.

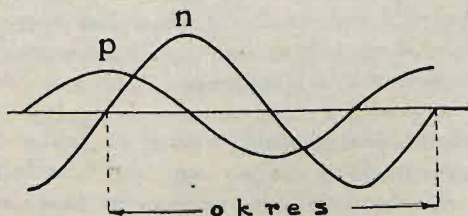
### 59. Prąd w obwodzie z pojemnością.

Inaczej przebiega prąd ładujący przewód kablowy rys. 160. Jeżeli końcówki prądnicy prądu zmiennego połączymy z przewodami kabla, od którego są odłączone odbiorniki, mamy



Rys. 160.

więc obwód przerwany, pomimo to z prądnicy nieustannie płynie do kabla prąd zmienny, ładujący i wyładowujący przewody metalowe w kablu.



Rys. 161.

Prąd ten również nie będzie w fazie z napięciem, jak wskazuje rys. 161, ale on tu wyprzedza w fazie napięcie pra-

wie o ćwierć okresu. Że tak być musi łatwo jest wytłomaczyć. Jeżeli napięcie elektryczne na prądnicę wzrasta, przewodniki elektryzują się, to płynie prąd ładujący; gdy napięcie dojdzie do największości ładowanie się kończy. prąd ustaje; następnie napięcie spada, przewodniki wyładowują się więc prąd płynie w stronę przeciwną i t. d.

Wiemy, że kabel bierze prąd skutkiem pojemności, pojemność więc wywołuje przesunięcie fali prądu zmiennego w stronę odwrotną do tego, jak to czyniła samoindukcja.

W urządzeniach elektrycznych nie zbyt rozległych prąd pojemnościowy jest bardzo mały. Znaczniejszą wartość osiąga on w długich sieciach kablowych przy wysokich napięciach. W przewodach napowietrznych prąd pojemnościowy ma znaczną wartość tylko w liniach dalekonośnych przy bardzo wysokich napięciach, sięgających stu tysięcy i więcej woltów.

## 60. Skuteczne natężenie prądu i skuteczne napięcie.

Zastanawiając się nad zmiennością prądu, wskazaną wykreślenie np. na rys. 156 zrozumiemy łatwo, że taki prąd zmienny nie może mieć takich samych skutków jak prąd stały, którego natężenie równe jest największej wartości prądu zmiennego. Prąd zmienny tylko przez chwilę, dwa razy w ciągu okresu osiąga największość, prąd stały zaś zachowuje stale swoją wartość.

Doświadczenie wskazuje, że ciepłne i mechaniczne skutki prądu zmiennego są takie same, jak prądu stałego, którego wielkość równa jest 0,707 największej wartości natężenia prądu zmiennego.

Np. jeżeli największość (maksimum) prądu zmiennego wynosi 20 amperów, to skutki tego prądu są takie same, jak prądu stałego, którego natężenie wynosi 14,14 ampera.

$$20 \times 0,707 = 14,14 \text{ A.}$$

Obliczoną w ten sposób wartość prądu zmiennego nazywamy skutecznem natężeniem prądu. Jeżeli pewien prąd

zmienny ma skuteczne natężenie 153 ampery, to znaczy, że skutki tego prądu są takie same, jak prądu stałego, którego natężenie równe jest 153 amperom.

W podobny sposób mówimy o skutecznem napięciu. Wiemy przecież, że skutek działania prądu w wielu razach zależy nietylko od natężenia, lecz i od napięcia. Doświadczenie wskazuje, że o ile mamy prąd stały tego samego natężenia, co skuteczna wartość prądu zmiennego, i skutki prądu stałego są takie same jak prądu zmiennego, przy zgodności faz napięcia i prądu, to napięcie prądu stałego jest równe 0,707 części największej wartości napięcia prądu zmiennego.

Powyższa część największej wartości napięcia prądu zmiennego stanowi napięcie skuteczne. Np. gdy mamy prąd zmienny, osiągający dwa razy w ciągu jednego okresu największe napięcie 2828 woltów, to napięcie skuteczne tego prądu wynosi 2000 woltów, tu:

$$2828 \times 0,707 = 2000 \text{ V.}$$

Wszystkie przyrządy pomiarowe, stosowane w urządzeniach prądu zmiennego, wskazują zawsze prąd skuteczny i napięcie skuteczne.

Jeżeli przez  $V_m$  oznaczamy największą wartość zmiennego napięcia, a przez  $V$  — wartość skuteczną i podobnie przez  $I_m$  oznaczamy największą wartość zmiennego natężenia prądu, a przez  $I$  — wartość skuteczną, to dokładne obliczenia wskazują, że dla prądów, zmieniających się z czasem według wykresu, podanego na rys. 156,

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \text{ i } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Poprzednio podana liczba: 0,707 jest zaokrąglonym ułamkiem  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ .

## 61. Oporność pozorna przy prądzie zmiennym.

W obwodach bez samoindukcji i pojemności rys. 155, możemy bez zastrzeżeń stosować prawo Ohma i obliczać

przy prądzie zmiennym natężenie prądu, dzieląc napięcie przez oporność obwodu,

W obwodach z samoindukcją rys. 158 przy prądzie zmiennym nie można stosować zwykłego prawa Ohma. Tu, skutkiem przeciwdziałania siły elektromotorycznej samoindukcji, prąd płynie słabszy, niż to wypadłoby z obliczenia. Np. jeżeli zwoje elektromagnesu łącznie z przewodami mają oporność 3 omów a napięcie na zaciskach  $AB$  wynosi 60 woltów, to według prawa Ohma prąd, płynący do elektromagnesu, będzie

$$I = 60 : 3 = 20 \text{ A.}$$

Taki prąd przy tym napięciu płynie przez elektromagnes tylko ze źródła prądu stałego. Gdy prąd jest zmienny, to przy napięciu skutecznym, wynoszącym również 60 woltów, w tym samym elektromagnecie popłynie prąd np. tylko 2 ampery.

Dla prądu zmiennego elektromagnes ma opór znacznie większy. Dzieląc wolty przez ampery, otrzymamy oporność zwojów elektromagnesu dla prądu zmiennego:

$$Z = 60 : 2 = 30 \Omega,$$

zwoje elektromagnesu mają więc teraz oporność 30 omów.

Oporność przewodów z samoindukcją dla prądu zmiennego zależy nie tylko od własności samych przewodników, ale również od obecności w pobliżu żelaza. Zwojnica bez rdzenia żelaznego ma znacznie mniejszą oporność dla prądu zmiennego, niż ta sama zwojnica z rdzeniem żelaznym, ponieważ w żelazie powstaje większy strumień magnetyczny, a więc i silniejszą mamy samoindukcję.

Pozatem oporność przewodników dla prądu zmiennego zależy jeszcze od częstotliwości zmian prądu. Im częściej zmienia się prąd tem większą oporność dla prądu zmiennego ma przewodnik z samoindukcją. W celu odróżnienia oporności dla prądu zmiennego od oporności dla prądu stałego, całą oporność dla prądu zmiennego nazywamy opornością pozorną, a oporność dla prądu stałego opornością rzeczywistą albo omową. Oporność pozorna składa się z dwóch oporności

z oporności rzeczywistej i z tak zwanej urojonej, wywołanej samoindukcją. Oporność urojona zależy od indukcyjności obwodu (patrz rozdz. 23) i od częstotliwości, zmian prądu.

Oznaczmy przez  $L$  indukcyjność obwodu w henrach, przez  $f$  częstotliwość prądu, a przez  $X$  oporność urojoną w omach, to

$$X = L \cdot 2\pi f = 6,28 \cdot L f.$$

**Przykład.**  $L = 0,5 \text{ H}$ ,  $f = 50$  okresów na sekundę, to,

$$X = 6,28 \cdot 0,5 \cdot 50 = 157 \Omega.$$

Obwód ma tem większą oporność urojoną im większa jest jego indukcyjność i im większa jest częstotliwość prądu.

Znając oporność rzeczywistą obwodu —  $R$  i oporność urojoną  $X$  można obliczyć oporność pozorną —  $Z$ . Według wzoru:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi f L)^2}$$

**Przykład.** Oporność rzeczywista  $R = 3 \Omega$ , oporność urojona  $X = 4 \Omega$ . Wtedy:

$$Z = \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{25} = 5 \Omega$$

W obwodzie otwartym kabla rys. 160, jak wiemy, płynie prąd pojemnościowy, więc i w tym obwodzie mamy przy prądzie zmiennym pewną oporność pozorną, która składa się z oporności rzeczywistej przewodów i oporności urojonej pojemnościowej.

Oporność urojona pojemnościowa oblicza się według wzoru następującego:

Oznaczamy przez  $C$  pojemność kabla w faradach, przez  $f$  częstotliwość prądu, przez  $X$  oporność urojoną pojemnościową w omach, to:

$$X = \frac{1}{C \cdot 2\pi f} = \frac{1}{6,28 \cdot C \cdot f}$$

**Przykład.**  $C = 0,2 \mu F$  ..  $f = 50$  okresów na sekundę, tu  $C = 0,2 \cdot 10^{-6}$  farada, więc

$$X = \frac{1}{6,28 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot 50} = \frac{1000000}{6,28 \cdot 0,2 \cdot 50} = 15120 \Omega.$$

Z tego obliczenia widzimy, że oporność urojona pojemności jest tem **większa**, im pojemność jest **mniejsza**, gdyż wtedy kabel oczywiście bierze mniejszy prąd. Oporność urojona pojemności jest tem **mniejsza**, im **większa** jest częstotliwość prądu, gdyż oczywiście tem większy ruch ładunków wywołamy w przewodach, im szybciej będziemy zmieniać kierunek i wielkość napięcia.

Oporność urojona pojemności dodaje się do oporności rzeczywistej przewodów i daje oporność pozorną według podobnego wzoru jak przy samoindukcji.

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

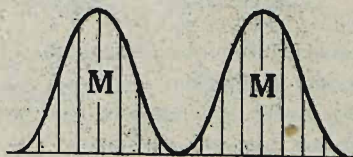
tu jednak przeważnie  $R$  jest małe w porównaniu do  $X$ , tak że  $Z$  mało się różni od  $X$ .

We wszystkich wyżej podanych obwodach, mając wartość skuteczną napięcia, obliczamy wartość skuteczną natężenia prądu, stosując oporność pozorną, zgodnie z prawem Ohma, według wzoru:

$$J = \frac{V}{Z}$$

## 62. Moc prądu zmiennego.

Moc prądu zmiennego obliczamy rozmaicie, zależnie od tego czy prąd przebiega w obwodzie bez samoindukcji i pojemności, czy też w obwodzie z samoindukcją lub pojemnością.



Rys. 162.

W obwodzie bez samoindukcji i pojemności, utworzonym np. z lampek elektrycznych, prąd i napięcie zmieniają

się zgodnie jak to wskazuje rys. 157. Moc prądu jest tu oczywiście również zmienna, tak jak wskazuje rys. 162, gdzie długość kresków wyraża zmienność mocy prądu w czasie.

Największa moc prądu równa się oczywiście iloczynowi największej wartości prądu przez największą wartość napięcia. Z wykresu 162 łatwo spostrzec, że średnia moc prądu równa się połowie mocy największej.

Stosując te same oznaczenia co w rozdziale 60-ym i oznaczając średnią moc prądu zmiennego przez  $P$ , wypadnie:

$$P = \frac{1}{2} \cdot V_m \cdot I_m.$$

Z rozdziału 60-go wiemy, że:

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \text{ a } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \text{ więc:}$$

$$V_m = \sqrt{2} \cdot V \text{ i } I_m = \sqrt{2} \cdot I$$

przeto:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot V \cdot \sqrt{2} \cdot I = V \cdot I.$$

Według tego wzoru: moc średnia równa się dokładnie iloczynowi skutecznego prądu przez skuteczne napięcie; taki iloczyn nazywamy krótko mocą prądu zmiennego.

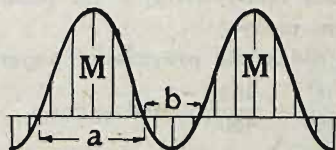
Tu moc także wyrażamy w watach, jak przy prądzie stałym:

$$P = V \cdot I,$$

$$\text{waty} = \text{wołty} \times \text{ampery}.$$

Inaczej jest w obwodach z samoindukcją, tu prąd spóźnia się w swojej zmienności względem napięcia, patrz rysunek 159, wtedy moc prądu, która jest zawsze iloczynem prądu przez napięcie, zmienia się tak, jak wskazuje rys. 163. Tu kreski do góry od linii poziomej wyrażają moc dodatnią, a w dół ujemną. Taki prąd pobiera np. silnik elektryczny. Silnik ten w pewnych chwilach jest źródłem prądu, bo pobierając moc ujemną znaczy to samo, co moc oddawać. W tych

okolicznościach, silnik przez czas  $a$  bierze moc z przewodów, a przez czas krótszy  $b$  oddaje, ostatecznie więc silnik weźmie pewną pracę, ale ta praca będzie mniejsza, niż by wypadła, przy pobieraniu mocy z przewodów bez przerwy.



Rys. 163.

W tym przypadku moc średnia prądu jest mniejsza od poprzedniej. Przy obliczaniu takiej średniej mocy prądu, mnożymy iloczyn woltów przez ampery jeszcze przez współczynnik, który nazywamy kosinusem  $\varphi$ ), więc w obwodzie z samoindukcją:

$$\text{waty} = \text{wolt} \times \text{ampere} \times \text{kosinus } \varphi$$

albo wzorem literowym:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

Im większe jest przesunięcie fazy prądu względem napięcia, tem mniejszy jest kosinus  $\varphi$ , a więc i moc prądu.

Np. gdy silnik elektryczny bierze prąd zmienny 40 amperów, przy 120 woltach, a kosinus  $\varphi = 0,8$  to moc prądu:

$$P = 120 \times 40 \times 0,8 = 3840 \text{ watów.}$$

Wielkość maszyn prądu zmiennego określa się zazwyczaj mocą przy  $\cos \varphi = 1$ , więc dla ominięcia każdorazowej wzmianki o tem, że właśnie w tych warunkach moc jest podana, przyjęto nazywać jednostki mocy przy  $\cos \varphi = 1$ , nie kilowatami, a kilowoltamperami. Skrót:  $kVA$ .

\*) Kosinus  $\varphi$  oznacza się zwykle znakiem:  $\cos \varphi$ , gdzie  $\varphi$  kąt różnicy faz prądu i napięcia, w założeniu że okres  $= 360^\circ$ .

Więc, jeżeli mówimy, że maszyna jest zbudowana na 1000 kVA, to znaczy że pełna moc jej przy  $\cos \varphi = 1$  stanowi 1000 kW.

Iloczyn napięcia przez prąd wogóle nazywamy **moceą pozorną**. Moc pozorna jest większa od rzeczywistej jeżeli kosinus fi jest mniejszy od jednostki.

Stosunek mocy rzeczywistej  $P$  do pozornej  $P'$  nazywamy **spółczynnikiem mocy**.

Spółczynnik mocy dla przykładu poprzedniego wynosi:

$$\frac{P}{P'} = \frac{3840}{4800} = 0,8 = \cos \varphi$$

Spółczynnik mocy zawsze równa się kosinusowi fi.

Wielką wadą prądu zmiennego jest zależność jego mocy od różnicy faz napięcia i prądu. Silniki tu niepotrzebnie biorą więcej pracy z przewodów, aby potem część zwrócić. Gdy **różnica faz napięcia i prądu jest wielka**, to nawet bardzo znaczny prąd, przy wysokiem napięciu **ma małą moc**.

Silniki elektryczne, elektromagnesy i t. p. mają samoindukcję, więc rzeczywista moc prądu w tych przyrządach jest mniejsza od mocy pozornej.

W **lampach elektrycznych żarowych**, które nie mają prawie samoindukcji, moc prądu rzeczywista równa się mocy pozornej i z tego względu w obwodach bez samoindukcji i pojemności **spółczynnik mocy prądu zmiennego równa się jednostce**.

Prąd pojemnościowy w kablach jest przesunięty w fazie względem napięcia prawie o ćwierć okresu i przez to  $\cos \varphi$  jest bliski zera, średnia moc prądu jest tu prawie zero, dla tego prąd pojemnościowy nazywamy nieraz **prądem jałowym**, czyli **bezwatowym**.

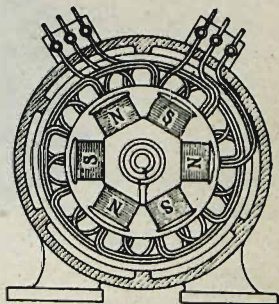
### 63. Prądnice prądu trójfazowego.

Prądnice prądu zmiennego, które opisywaliśmy w jednym z poprzednich rozdziałów, nazywamy zwykle **jednofazowymi**. Prądnice jednofazowe używane są rzadko w urządzeniach

elektrycznych. Najczęściej stosowane są obecnie prądnice trójfazowe.

Tak nazywamy prądnice prądu zmiennego, które wytwarzają jednocześnie trzy prądy zmienne wypływające z prądnicy trzema przewodami.

Prądnice te mogą mieć ruchomy twornik, lub też ruchome elektromagnesy. Zwykle budują się prądnice z nieruchomym twornikiem i ruchomymi elektromagnesami. Uzwojenie twornika w prądnicach trójfazowych jest potrójne, t. j. całe uzwojenie podzielone jest na trzy niezależne obwody, których końce wyprowadzamy do zacisków prądnicy, jak to wskazuje rys. 164. Wszystkie trzy uzwojenia są jednakowe co do liczby zwojów, szerokości zwojnic i grubości drutu. Różnią się te uzwojenia tylko położeniem na obwodzie twornika. Jeżeli elektromagnesy mają sześć biegunów, to poszczególne uzwojenia są przesunięte względem siebie o dziewiątą część obwodu twornika, wogóle zaś o третią część odległości pomiędzy jednakowymi biegunami elektromagnesów. Na rys. 165 mamy twornik prądnicy trójfazowej obracanej turbiną parową.



Rys. 164.

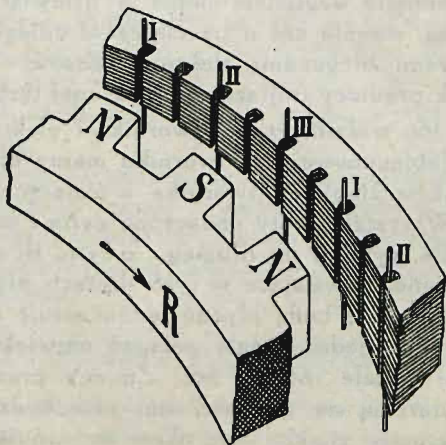
Na rys. 166 widzimy część twornika i elektromagnesów prądnicy wielobiegunowej. Na tworniku mamy kilka drutów, umieszczonych w żłobkach twornika i oznaczonych cyframi rzymskimi. Wszystkie druty oznaczone cyfrą I należą do jednego uzwojenia, cyfrą II do drugiego, a cyfrą III do trzeciego. Prądy indukcyjne, powstające w tych drutach przy obracaniu elektromagnesów, nie będą płynąć jednocześnie do góry lub na dół i nie będą jednocześnie osiągać największości — pomiędzy nimi będzie różnica faz. Zmiany prądu w drucie twornika powtarzają się, gdy pod nim przechodzi powtórnie biegun tego samego znaku, więc okres zmienności prądu odpowiada odległości pomiędzy dwoma jednakowymi biegunami.

Poszczególne druty na rys. 166 są przesunięte względem siebie o trzecią część tej odległości, więc różnica faz w zmienności poszczególnych prądów wynosi trzecią część okresu.



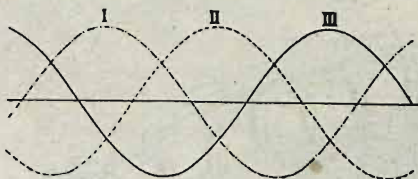
Rys. 165.

Linjami falistemi można wyrazić zmienność prądu w poszczególnych drutach, tak jak to widzimy na rys. 167.



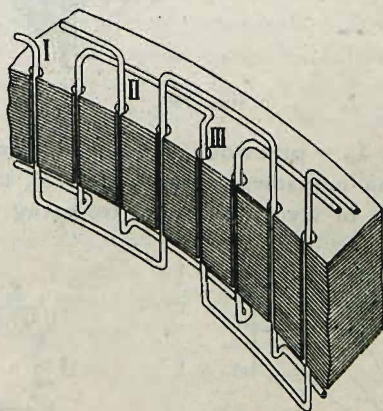
Rys. 166.

W celu utworzenia z poszczególnych drutów zwojów umieszczamy pomiędzy drutami na rys. 166 jeszcze po jednym drucie i łączymy pomiędzy sobą tak, jak wskazano na rys. 168. Tu widzimy trzy odrębne uzwojenia. Zwykle nazywamy je kolejno uzwojeniami I, II i III fazy.



Rys. 167.

Jeżeli dla osiągnięcia odpowiedniego napięcia, wypada umieścić w jednym żłobku kilka drutów, to zwijamy wtedy zwojnice. Układ zwojnic mamy na rys. 165 i 169.

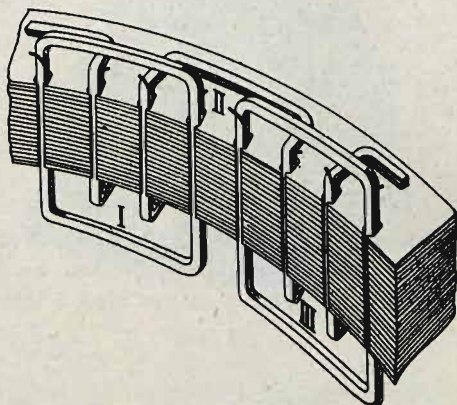


Rys. 168.

Wszystkie zwojnice jednej fazy łączymy w szereg w taki sposób, aby siły elektromotoryczne były zgodne, t. j. wywoływały prąd w obwodzie twornika w jednym kierunku. Końce uzwojeń poszczególnych faz doprowadzamy do sześciu zacisków, wskazanych na rys. 164.

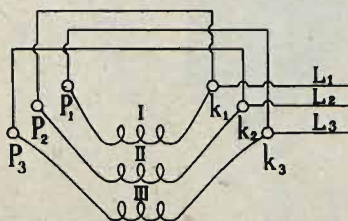
Prąd zwykle odpływa z prądnicy przez trzy albo cztery przewody, przy skojarzeniu uzwojeń twornika w trójkąt albo w gwiazdę.

Przy połączeniu w trójkąt zaciski prądnicy łączymy według rys. 170. Litery  $p$  i  $k$  oznaczają tu początki i końce

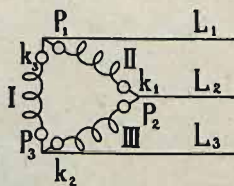


Rys. 169.

uzwojeń,  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  — przewody, odprowadzające prąd. Takie połączenie można narysować jeszcze inaczej, tak, jak wskazano na rys. 171, tu wyraźnie widać trójkątny układ zwojnic.



Rys 170.



Rys. 171.

W obwodzie zamkniętym, utworzonym przez trzy uzwojenia I, II, III, prąd wewnętrzny powstać nie może, ponieważ siły elektromotoryczne w tych uzwojeniach są przesunięte

w fazie względem siebie o trzecią część okresu, i dlatego nigdy się nie zdarza, aby wszystkie wywoływały prąd w jedną stronę. Gdy jedna siła elektromotoryczna stara się wytworzyć prąd np. w kierunku ruchu wskazówki zegarka, to dwie inne — w stronę przeciwną. Wielkości tych sił elektromotorycznych są takie, że się zawsze znoszą.

Prąd płynąć może tylko do przewodów  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , o ile przyłączymy do nich lampy, lub inne przyrządy.

Przewody są połączone bezpośrednio z końcówkami poszczególnych uzwojeń, więc napięcie pomiędzy przewodami równe jest napięciu, jakie powstaje w uzwojeniu każdej poszczególnej fazy. Uzwojenia faz robimy zawsze zupełnie jednakowe, więc napięcia poszczególnych faz są równe, a przez to napięcie pomiędzy przewodami  $L_1$  i  $L_2$  równe jest napięciu pomiędzy przewodami  $L_2$  i  $L_3$  i równe napięciu pomiędzy przewodami  $L_1$  i  $L_3$ . Prąd, płynący w przewodach, jest większy od prądów w poszczególnych uzwojeniach. Na każdy prąd w przewodach składają się po dwa prądy, płynące w uzwojeniach twornika. Przy takim składaniu prądów zmiennych nie można jednak stosować podanego poprzednio prawa Kirchhoffa, o ile pomiędzy składowymi prądami jest różnica faz.

Najczęściej prądy w uzwojeniach są jednakowego natężenia i wtedy prąd w przewodzie jest 1,73 razy większy od prądu w poszczególnych uzwojeniach.

Zależność ta wyraża się wzorem w następujący sposób:

Oznaczmy przez  $I$  prąd w przewodzie, przez  $i$  prąd w uzwojeniu każdej fazy, to

$$I = i \cdot \sqrt{3} = i \cdot 1,73.$$

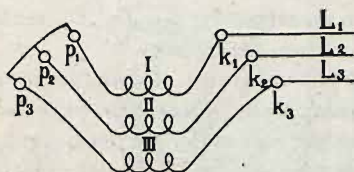
**Przykład:**

$$i = 100 \text{ A}; I = 100 \cdot 1,73 = 173 \text{ A}.$$

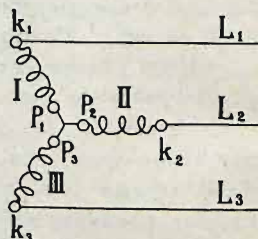
Uzwojenia w prądnicy trójfazowej można łączyć jeszcze inaczej, a mianowicie w gwiazdę. Na rys. 172 widzimy taki układ, tu początki uzwojeń mamy złączone razem, od końców zaś są poprowadzone przewody.

Można byłoby naodwrot połączyć razem końce uzwojeń, a od początków wyprowadzić przewody.

Na rys. 173 to samo połączenie narysowane jest w ten sposób, że wyraźnie widać układ zwojów w kształcie gwiazdy.



Rys. 172.



Rys. 173.

Prądy płynące w przewodach układu gwiazdowego, są równe prądom poszczególnych faz, bo przewody stanowią bezpośredni ciąg dalszy uzwojeń twornika.

Napięcie pomiędzy każdymi dwoma przewodami nazywamy międzyprzewodowym, ono jest tu wywołane siłami elektromotorycznymi dwóch połączonych w szereg uzwojeń. Ze względu na różnicę faz tych elektromotorycznych sił, napięcie międzyprzewodowe wypada mniejsze od podwójnego napięcia jednej fazy. Mianowicie: napięcie międzyprzewodowe jest tylko 1,73 razy większe od napięcia na końcówkach uzwojeń poszczególnych faz.

Oznaczmy przez  $V$  napięcie międzyprzewodowe, przez  $v$  napięcie poszczególnych faz, to:

$$V = v \cdot \sqrt{3} = v \cdot 1,73.$$

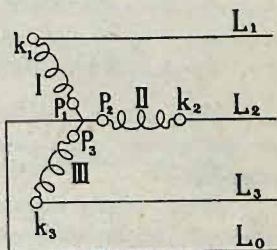
**Przykład.** Napięcie fazowe  $v = 220$  woltów, to napięcie międzyprzewodowe.

$$V = 220 \times 1,73 = 380 \text{ woltów.}$$

Porównywając połączenie w gwiazdę z połączeniem w trójkąt łatwo spostrzec, że przy połączeniu w gwiazdę mamy w przewodach mniejszy prąd, ale za to wyższe napięcie.

**Przykład.** Przy połączeniu w trójkąt mamy: 173 A i 220 V, a przy połączeniu w gwiazdę tych samych zwojnic: 100 A i 380 V.

Czasem odprowadzamy prąd z prądnicy trójfazowej za pomocą czterech przewodów. Wtedy uzwojenia faz łączymy w gwiazdę i od zacisków połączonych razem, które tworzą tak zwany **punkt zerowy**, prowadzimy przewód czwarty, wskazany na rys. 174. Przewód ten także nazywamy **zerowym**. Pomiedzy przewodem zerowym, a każdym z przewodów głównych napięcie równa się napięciu poszczególnych faz.



Rys. 174.

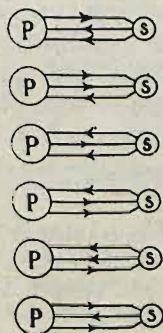
W ten sposób z tej samej prądnicy możemy brać prądy przy różnych napięciach. Np. jeżeli napięcie poszczególnych faz wynosi 220 woltów, to między każdym z przewodów głównych a przewodem zerowym np. pomiędzy  $L_1$  i  $L_0$  i t. d. mamy 220 woltów, a jednocześnie pomiędzy każdymi dwoma przewodami głównymi  $L_1$   $L_2$   $L_3$  mamy napięcie 380 woltów.

Lampy, silniki i wogóle wszelkie przyrządy i maszyny możemy włączać na przewody  $L_1$   $L_2$   $L_3$  lub też pomiędzy przewody:  $L_1$  i  $L_0$  albo  $L_2$  i  $L_0$ , czy też  $L_3$  i  $L_0$  odpowiednio do napięcia, na które są zbudowane.

Silnik prądu trójfazowego jest połączony z prądnicą zawsze za pomocą trzech przewodów  $L_1$   $L_2$   $L_3$ .

Jeżeli trzy prądy, płynące po głównych przewodach  $L_1$ ,  $L_2$  i  $L_3$ , są równe, to różnica faz pomiędzy nimi wynosi dokładnie trzecią część okresu i wtedy kolejną zmiennosć kierunków prądów mamy podaną na rys. 175.

Na początku prąd wypływa z prądnicy przewodem I-ym, a wraca II-im i III-cim, następnie wypływa przewodami I-ym i II-im,



Rys. 175.

a wraca III-cim i t. d. po ostatnim układzie prądów idzie znowu pierwszy i t. d.

Taką kolejność zmiany kierunków prądów w przewodach prądu trójfazowego możemy łatwo stwierdzić podług linii fali-  
stych na rys. 167 gdzie widzimy, jak jedna fala podnosi się nad  
linią zerową gdy dwie inne są u spodu.

#### 64. Moc prądu trójfazowego.

Moc prądu, wypływającego z prądnicy trójfazowej, równa jest sumie mocy prądów, wypływających z poszczególnych uzwojeń.

Jeżeli prądy poszczególnych faz są jednakowe, to można obliczyć krótko całą moc prądu trójfazowego na zasadzie następującego rozumowania.

Założmy, że uzwojenia prądnicy są połączone w trójkąt, rys. 171, niech uzwojenie jednej fazy daje prąd 20 amperów przy napięciu 120 woltów, a zmienność prądu i napięcia jest zgodna.

Moc prądu, jednej fazy, wynosi:

$$p = 120 \times 20 = 2400 \text{ watów.}$$

Moc prądu wszystkich trzech faz jest trzy razy większa:

$$P = 120 \times 20 \times 3 = 7200 \text{ watów.}$$

Jeżelibyśmy, zamiast prądu w uzwojeniu, wprowadzili w taki sam rachunek prąd w przewodach, to wynik byłby 1,73 razy za duży, ponieważ prąd przewodowy jest 1,73 razy większy od prądu w poszczególnych fazach. Można więc obliczać moc prądu trójfazowego, mnożąc napięcie przez potro-  
jony prąd przewodowy, ale otrzymany iloczyn należy podzielić przez 1,73:

Prąd przewodowy w powyższym przykładzie stanowi.

$$20 \times 1,73 = 34,6 \text{ A,}$$

więc całkowita moc prądu trójfazowego wynosi:

$$P = \frac{120 \times 34,6 \times 3}{1,73} = 7200 \text{ watów.}$$

Zwracając jednak uwagę na to, że:

$$3 : 1,73 = 1,73,$$

krócej obliczymy moc prądu trójfazowego ze wzoru:

$$P = 120 \times 34,6 \times 1,73 = 7200 \text{ watów.}$$

W praktyce amperomierzem i woltomierzem zwykle mierzymy prąd przewodowy i napięcie międzyprzewodowe, więc dla obliczenia mocy prądu trójfazowego najczęściej stosujemy wzór ostatni.

Według tego wzoru:

$$\text{moc} = 1,73 \times \text{napięcie międzyprzewodowe} \times \text{prąd przewodowy,}$$

$$\text{moc} = 1,73 \times \text{wolty} \times \text{ampery,}$$

albo wzorem literowym:

$$P = 1,73 \cdot V \cdot I.$$

Takie same prawo obliczenia mocy prądu trójfazowego możemy stosować i przy połączeniu w gwiazdę: rys. 173, mamy tu wprawdzie prąd w przewodach równy prądowi każdej fazy, ale za to napięcie międzyprzewodowe jest 1,73 razy większe od napięcia poszczególnych faz.

Gdy prąd, wypływający z prądnicy trójfazowej, przebiega po obwodzie z samoindukcją, to wtedy, jak przy zwykłym prądzie zmiennym, moc prądu obliczona powyżej jest **pozorna**, w rzeczywistości zaś mamy tu moc mniejszą. Rzeczywista moc prądu trójfazowego otrzymujemy wtedy, mnożąc powyższy iloczyn przez współczynnik mocy, czyli kosinus fi.

$$\text{Moc} = 1,73 \times \text{wolty} \times \text{ampery} \times \cos \varphi,$$

albo wzorem literowym:

$$P = 1,73 \cdot V \cdot I \cos \varphi.$$

Pełną moc maszyn określamy przy  $\cos \varphi = 1$  i podajemy w kilowoltamperach (kVA).

**Przykład.** Maszyna trójfazowa na pełny prąd przewodowy 50 A i napięcie między przewodami 6000 V, jest maszyną na:

$$1,73 \cdot 6000 \cdot 50 = 519 \text{ kVA.}$$

## 65. Połączenie kilku prądnic prądu zmiennego.

Prądnice prądu zmiennego jednofazowego i trójfazowego łączymy tylko równolegle, ponieważ przy szeregowem połączeniu prawidłowa praca nie jest możliwa.

Na rys. 176 wskazany jest układ połączeń prądnic  $P_1$  i  $P_2$ , zasilających lampy  $L$ . Wystawmy sobie, że prądnica  $P$  jest już w ruchu i zasilą prądem szyny zbiorcze  $s_1$  i  $s_2$ , a trzeba połączyć drugą prądnicę  $P_2$ , równolegle do pierwszej. W tym celu wprawiamy w ruch prądnicę  $P_2$  i za pomocą opornika w obwodzie elektromagnesów nastawiamy prąd w uzwojeniach elektromagnesów w ten sposób, aby napięcie na zaciskach prądnicy  $P_2$  było równe napięciu na szynach. Następnie nastawiamy prędkość biegu prądnicy  $P_2$  tak, aby czystotliwość okresów prądu prądnicy  $P_2$  była równa częstotliwości okresów prądu prądnicy  $P_1$ . Jeżeli liczba biegunów prądnic jest jednakowa, to i liczby obrotów muszą być równe, jeśli zaś w jednej prądnicie biegunów jest więcej niż w drugiej, to prądnica mająca więcej biegunów, obracać się musi wolniej.

Naprz. jedna prądnica ma 30 par biegunów, a druga 2 pary biegunów, to gdy pierwsza wykonywa 100 obrotów na minutę, druga powinna obracać się z prędkością 1500 obrotów na minutę.

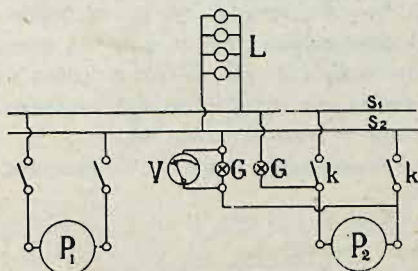
Po wyrównaniu częstotliwości okresów, należy jeszcze uzgodnić fazy, t. j. osiągnąć taki ruch prądnic, aby w obydwóch prądnicach siły elektromotoryczne jednocześnie osiągały największość w tym samym kierunku.

Wyrównywanie częstotliwości i uzgodnienie faz osiągamy, nastawiając ostrożnie mechanizmy, miarkujące dopływ pary lub ropy i t. p. do silnika, poruszającego prądnicę.

Równość okresów i zgodność faz spostrzegamy za pomocą tak zwanych lampek fazowych  $G, G$ , wskazanych na rysunku 176, przez te lampki prądnicę przyłącza się do szyn. Kiedy okresy nie są zupełnie równe i fazy nie zgodne, to lampki fazowe świecą nierówno, migają. Przy zbliżaniu się okresów i faz do zgodności migania są coraz powolniejsze. aż wreszcie lampki gasną i rozżarzają się co kilka sekund.

Wtedy należy uchwycić chwilę, gdy lampki są ciemne i zamknąć przerywacz  $kk$ , który łączy obie końcówki prądnicy  $P$  bezpośrednio z szynami.

Nieraz obok lampek włączamy woltomierz  $V$ , który wskazuje zgodność faz dokładniej. Gdy fazy elektromotorycznych sił prądnic są zupełnie zgodne to woltomierz ten wskazuje dokładnie zero.



Rys. 176.

Dla ułatwienia osiągnięcia właściwej szybkości biegu prądnicy przyłączanej, służą wskaźniki częstotliwości z których jeden jest przyłączony do prądnicy pracującej, a drugi do prądnicy przygotowywanej do włączenia\*).

Dwie prądnice połączone równolegle, niezależnie od obciążenia, zachowują stałe prędkość biegu, odpowiadającą równości okresów prądu.

Rozdział obciążenia pomiędzy prądnice osiągamy za pomocą nastawiania dopływu pary, ropy i t. p. do silników, obracających prądnice. Ta prądnica daje więcej pracy, której silnik ma szerzej otwartą klapę, doprowadzającą parę, ropę i t. p. do silnika.

W prądnicach prądu zmiennego nie można, jak przy prądzie stałym, rozdzielać obciążenia za pomocą nastawiania opornika w obwodzie elektromagnesów. Wprawdzie prąd wzrasta przy zwiększaniu elektromotorycznej siły jednej z prąd-

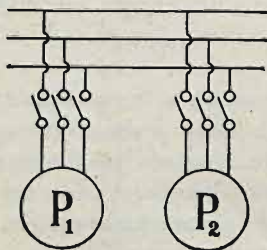
\*) Patrz następny rozdział o pomiarach przy prądzie zmiennym § 73.

nic, ale jednocześnie przesuwają się fazy tego prądu względem napięcia i moc prądu pozostaje bez zmiany.

Takie zachowanie się prądnic tłumaczymy tem, że pod wpływem wzrostu jej prądu, w silniku obracającym prądnice, nie może się zwiększyć dopływ pary, lub ropy potrzebny dla wykonania większej pracy, gdyż zwiększa się on samoczynnie tylko wtedy, gdy silnik zwolni biegu, a tu zwolnić biegu silnik nie może, jest bowiem sprzęgnięty przez prądnice z drugim silnikiem i obraca się zawsze zgodnie, w ten sposób, że okresy zmienności elektromotorycznych sił obu prądnic są jednakowe.

Tak zachowują się przy prądzie zmiennym wszystkie prądnice, włączone w obwód równoległe.

Połączenie równoległe prądnic trójfazowych wskazane jest na rys. 177.

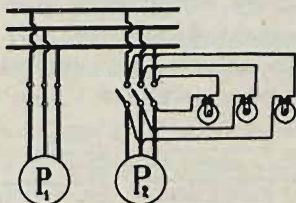


Rys. 177.

Przy połączeniu prądnic jednofazowych jest rzeczą zupełnie obojętną, który przewód, idący od prądnicy, przymocujemy do pewnej szyny. Natomiast przy wykonaniu równoległych połączeń w układach trójfazowych, należy przestrzegać, aby w przewodach różnych prądnic, połączonych razem, kolejność zmian prądu była jednakowa. Sprawdzić połączenie łatwo za pomocą lampek, włączonych przed uskutecznieniem bezpośredniego połączenia. Lampki włączamy tak, jak wskazano na rys. 178. O ile fazy i częstotliwości nie są zupełnie wyrównane, to wszystkie lampki powinny jednocześnie

zapalać się i gasnąć. Gdy nastąpiło wyrównanie, to wszystkie muszą być stale ciemne.

Jeżeli lampki włączone według rys. 178 rozżarzają się kolejno, a przy wyrównanych fazach i częstotliwościach jedne są stale ciemne, a drugie jasne, to znaczy, że prądnica  $P_2$  jest



Rys. 178.

niewłaściwie przyłączona i trzeba dowolne dwa przewody, prowadzące od prądnicy do wyłącznika, wymienić.

Tego rodzaju ostrożność należy przestrzegać zawsze, gdy łączymy przewody trójfazowe w elektrowniach czy na sieci.

## 66. Synchronoskopy i woltomierze zerowe na tablicach rozdzielczych prądnic trójfazowych.

Gdy w elektrowni mamy kilka prądnic trójfazowych przeznaczonych do równoległej pracy, to za każdym razem, gdy mamy jedną z prądnic przyłączyć równolegle do innych będących w ruchu, należy przed włączeniem uzgodnić fazy i częstotliwości prądnicy przyłączanej z fazą i częstotliwością prądnic pracujących, czyli jak zwykle mówimy krótko zsynchronizować.

Częstotliwości uzgadniamy w przybliżeniu obserwując częstościomierze\*).

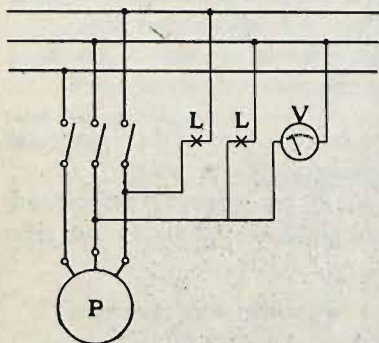
Dokładne jednak wyrównanie częstotliwości i uzgodnienie faz można osiągnąć tylko obserwując synchronoskop i woltomierz zerowy.

\*) Patrz dalej § 73.

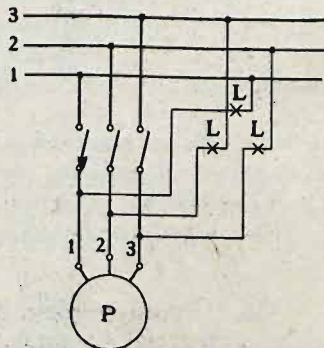
Jako synchronoskop stosowane bywają urządzenia z lampkami lub ze wskazówką.

Najprostsze urządzenie z dwoma lampkami w pudełku ze szklaną matową szybką zaopatruje się zazwyczaj również w woltomierz zerowy.

Połączenie takiego woltomierza i lampek z prądnicą, która ma być włączona wskazuje rys. 179. Tu lampki gasną, a woltomierz schodzi na zero, gdy zostaną uzgodnione częstotliwości i fazy napięcia prądnicy i szyn zbiorczych.



Rys. 179.



Rys. 180.

Inne urządzenie ma trzy lampki *L* rys. 180 zamknięte w pudełku za szklaną szybą matową. Układ połączeń wskazany jest na rys. 180, tu jedna lampka włączona jest jak zwykle na przewody jednej fazy 1—1. Druga i trzecia natomiast włączone są na krzyż z zaciskami różnych faz 2—3 i 3—2.

Przy takim połączeniu, w razie zgodności faz i częstotliwości, pierwsza lampka zgaśnie, dwie inne będą świecić jasno. Gdy fazy nie są uzgodnione, to wskutek kolejnego migania lampek, światelko pod szybą matową krąży wokół, to w tą, to w ową stronę, zależnie od tego czy prądnica obraca się za wolno czy za szybko. Włączać można gdy światło będzie nieruchome w pewnym określonym miejscu szybki przyrządu.

Na podobnej zasadzie jak powyższe trzy lampki, urządza się synchronoskopy ze wskazówką. W pudełku są trzy pary elektromagnesów połączone z przewodami zacisków przerywacza w taki sam sposób jak poprzednie lampki.

Pomiędzy temi elektromagnesami znajduje się blaszka żelazna, osadzona swobodnie na poziomej osi. Do tej blaszki przymocowuje się nieruchomo wskazówka, która znajduje się zewnątrz białej pokrywki zamykającej pudełko z elektromagnesami.

W czasie uzgadniania fazy i częstotliwości napięcia prądnicy  $P$  z fazą i częstotliwością napięcia szyn zbiorczych, przez elektromagnesy przebiegają takie same prądy jak przez poprzednie lampki i siła tych elektromagnesów zmienia się kołowo. Gdy jesteśmy już bliscy uzgodnienia, siła elektromagnesów kołuje wolno i porywa za sobą blaszkę ruchomą, która wiruje to w jedną to w drugą stronę, zależnie od tego czy prądnica obraca się za szybko czy za wolno, gdyż odpowiednio do tego zmienia się kierunek kołowania siły elektromagnesów.

Przerywacz prądnicy można włączyć wtedy, gdy wskazówka zatrzyma się na kresce zrobionej na białej pokrywce przyrządu, gdyż przy tem położeniu wskazówki będą uzgodnione częstotliwości i fazy.

---

## Pomiary przy prądzie zmiennym.

### 67. Mierzenie natężenia i napięcia prądu zmiennego.

Napięcie i natężenie skuteczne prądu zmiennego mierzymy w taki sam sposób jak napięcie i natężenie prądu stałego. Nie każdy jednak amperomierz i woltomierz nadaje się do pomiaru przy prądzie zmiennym.

Zazwyczaj na skali tych przyrządów, które mogą być stosowane na prąd zmienny, zboku jest znaczek w postaci fali.

Jeżeli przyrząd wskazuje prawidłowo tylko przy pewnej częstotliwości prądu, to obok znacзка fali podana jest liczba wskazująca częstotliwość, przy której przyrząd wskazuje prawidłowo.

Dla pomiarów przy prądzie zmiennym używane są obecnie najczęściej amperomierze i woltomierze elektromagnetyczne z ruchomą blaszką żelazną, których opis podaliśmy w § 31. Działki na tych przyrządach mają tę samą wartość przy prądzie zmiennym co i przy stałym,

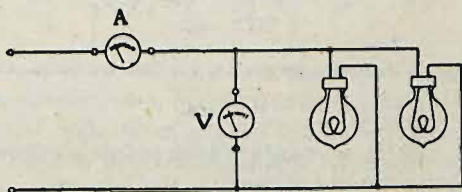
Rozszerzanie skali w tych przyrządach odbywa się przy prądzie zmiennym nie za pomocą boczników, lecz przez użycie transformatorów miernikowych opisanych w rozdziale o transformatorach.

Przy prądzie zmiennym mogą być używane jeszcze amperomierze i woltomierze z dwoma cewkami, jedną ruchomą drugą nieruchomą, pozatem cieplne z rozszerzającym się drucikiem, oraz indukcyjne z ruchomym krążkiem lub bębniem, patrz § 33 i 34.

## 68. Mierzenie mocy prądu zmiennego jednofazowego i trójfazowego amperomierzem i woltomierzem.

Gdy obciążenie sieci mamy tylko lampami, to możemy moc zmierzyć sposobem pośrednim. Przy prądzie jednofazowym włączamy amperomierz i woltomierz tak jak wskazano na rys. 181.

Woltomierz wskazuje skuteczne napięcie na przewodach zasilających lampy, a amperomierz skuteczny prąd, który



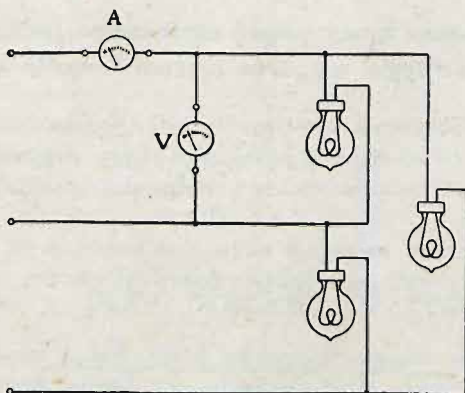
Rys. 181.

pobierają lampy\*). Iloczyn skutecznego napięcia przez skuteczny prąd stanowi średnią moc prądu zmiennego.

Przy prądzie trójfazowym lampy włączamy pomiędzy druty poszczególnych faz. Wtedy można obliczyć moc pobraną przez poszczególne grupy lamp jak przy prądzie jednofazowym, gdyż każda grupa lamp pobiera prąd jednofazowy, trzeba tylko zmierzyć skuteczne natężenie i napięcie prądu, pobieranego przez każdą grupę osobno.

Jeżeli jednak obciążenie faz jest równe, a więc wszystkie powyższe trzy grupy mają jednakową liczbę takich samych lamp, to moc prądu, pobraną przez wszystkie lampy łącznie, można obliczyć mierząc natężenie prądu w dowolnym przewodzie głównym i napięcie pomiędzy dwoma dowolnymi przewodami głównymi za pomocą amperomierza i woltomierza włączonych tak jak wskazano na rys. 182.

\*) Prąd odgałęziony do woltomierza zazwyczaj jest tak mały w porównaniu do prądu pobieranego przez lampy, że nie bierzemy go pod uwagę.



Rys. 182.

Wtedy, jak to wypadło z poprzednich wywodów, całkowitą moc obliczymy ze wzoru:

$$P = 1,73. V. I$$

$V$  i  $I$  — są to powyższe wskazania woltomierza i amperomierza.

### 69. Mierzenie mocy prądu jednofazowego watomierzem.

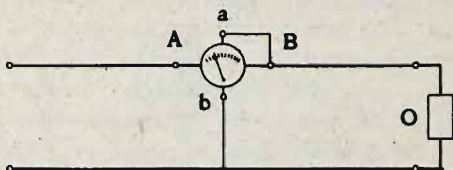
Jeżeli mamy dowolny odbiornik prądu, np. w szczególności silnik elektryczny, który pobiera prąd niezgodny w fazie z napięciem, to dla zmierzenia mocy takiego prądu musimy zastosować watomierz z ruchomą cewką lub z ruchomym bębniem czy krążkiem.

Wychylenie takiego watomierza wskaże nam średnią moc prądu zmiennego z uwzględnieniem różnicy faz pomiędzy prądem i napięciem.

Watomierz ma cztery zaciski, dwa prądowe  $A$  i  $B$  i dwa napięciowe  $a$  i  $b$ . Włącza się je tak jak wskazano na rys. 183.

Ustrój watomierzy cewkowych, gdzie jedna cewka jest nieruchoma, a druga ruchoma był opisany w § 35. Takie watomierze nadają się dla prądu stałego i zmiennego.

Dla prądu zmiennego wyłącznie stosowane są jeszcze watomierze indukcyjne. One dają wychylenia tylko przy prądzie zmiennym. W tych watomierzach jest ruchomy krążek albo bębenek z blachy glinowej i nieruchome elektromagnesy.



Rys. 183.

Przez te elektromagnesy przepuszczamy prąd główny i odgałęziony. Strumienie magnetyczne wywołane temi prądami, wzniecają w ruchomym krążku lub bębnieku prądy wirowe.

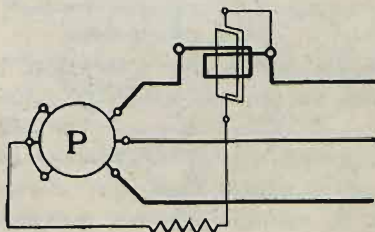
Oddziaływanie elektromagnesów na prądy w krążku lub bębnieku daje siły wychylające wskazówkę osadzoną na osi bębniaka czy krążka. Przeciwdziałają temu wychyleniu sprężynki.

Działki na watomierzach oznaczają waty lub kilowaty.

### 30. Mierzenie mocy prądu trójfazowego watomierzem.

Jeżeli mamy dowolne odbiorniki na prądzie trójfazowym, przy dowolnem obciążeniu poszczególnych faz, to dla pomiaru mocy należy stosować watomierze.

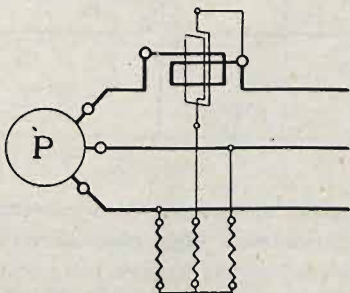
Jeżeli prądy trzech faz są równe, to można mierzyć moc jednej fazy i pomnożyć przez trzy.



Rys. 184.

Włączenie watomierza dla pomiaru mocy jednej fazy przy połączeniu w gwiazdę pokazane jest na rys. 184.

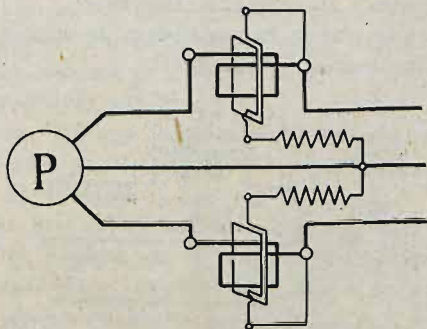
Przy równym obciążeniu faz i dowolnem połączeniu wewnątrz prądnicy czy silnika, można jeszcze włączyć watomierz według układu rys. 185.



Rys. 185.

Jeżeli przyrząd jest specjalnie przystosowany do tego układu połączeń, a skala odpowiednio wycechowana, to na tym watomierzu odczytamy całą moc prądu trójfazowego.

Jeżeli obciążenia poszczególnych faz lampami lub silnikami nie są równe, to zawsze należy stosować dwa watomierze włączone tak, jak wskazuje rys. 186. Suma wskazań tych watomierzy wyraża całą moc prądu trójfazowego.



Rys. 186.

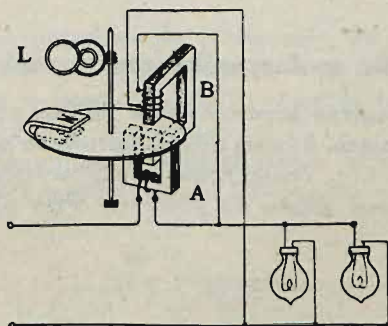
Na podstawie takiego układu połączeń budujemy watomierze z jedną skalą i jedną wskazówką, ale podwójnymi uzwojeniami.

Zmiana skali watomierzy odbywa się przez przełączanie wielokrotnych cewek nieruchomych i włączanie oporników dodatkowych w obwodzie cewek ruchomych. Lub też przy pomocy transformatorów miernikowych prądowych i napięciowych. Patrz rozdział o transformatorach.

Tego rodzaju połączenia, jak wskazane na rys. 186, stosują się również przy budowie liczników prądu trójfazowego, wskazujących całą pracę prądu trójfazowego przy jednakowym i różnym obciążeniu faz.

## 71. Licznik prądu zmiennego.

Dla mierzenia pracy prądu zmiennego służą liczniki, które mają taki sam mechanizm liczbowy jak opisane w § 36, lecz inny zupełnie wirnik, rys. 187.



Rys. 187

Tu wirnik ruchomy stanowi tarcza glinowa (aluminjowa) osadzona na wałku, który za pomocą ślimaka jest sprzęgnięty z mechanizmem liczbowym L.

W pobliżu tej tarczy są dwa elektromagnesy: jeden A magnesowany prądem roboczym płynącym do lampek drugi B prądem odgałęzionym, proporcjonalnym do napięcia na sieci zasilającej lampki.

Elektromagnesy te wznecają w tarczy prądy wirowe i, oddziałując na nie, obracają tarczę. Magnes stały obejmujący tarczę hamuje jej ruch.

W ten sposób, podobnie jak w liczniku na rys. 63, liczba obrotów wykonana przez wirnik tego licznika będzie tem większa im silniejszy prąd popłynie do lampek, im wyższe będzie napięcie na lampach oraz im dłużej prąd będzie płynął, przeto im większą pracę prąd wykona.

Szczegóły ustroju takiego licznika bywają różne zależnie od tego czy on jest zbudowany na prąd jednofazowy, czy też na trójfazowy.

Następnie ustrój tych liczników zależy również od tego czy licznik przeznaczony jest dla odbiorników o równem obciążeniu faz czy też o różnem obciążeniu faz, czy na prąd trójfazowy, prowadzony trzema przewodami, czy też czterema przewodami i wreszcie czy odbiorniki będą pobierać prąd tylko przy  $\cos\varphi = 1$ , czy też także prąd o  $\cos\varphi$  mniejszym od jedności.

## 72. Wskaźnik współczynnika mocy prądu zmiennego.

W celu ciągłego kontrolowania rodzaju obciążenia prądnic w elektrowniach, bywają nieraz stosowane przyrządy wskazujące  $\cos\varphi$ \*) t. j. współczynnik mocy wyrażający stosunek rzeczywistej mocy prądu do pozornej. Przy prądzie jednofazowym:

$$\cos\varphi = \frac{P}{VI}$$

Przy prądzie trójfazowym i równym obciążeniu faz:

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}VI}$$

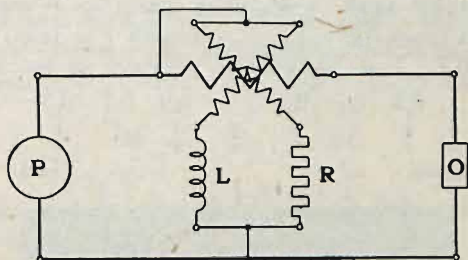
$\cos\varphi$  — wyraża w jakiej mierze prąd jest przesunięty w fazie względem odpowiedniego napięcia w jedną lub w drugą stronę. Przy  $\cos\varphi = 1$  różnica faz równa się zeru, a przy  $\cos\varphi = 0$ ,

---

\*) Czytaj kosinus fi.

różnica faz wynosi ćwierć okresu, a więc im  $\cos\varphi$  jest mniejszy tem większą mamy różnicę faz.

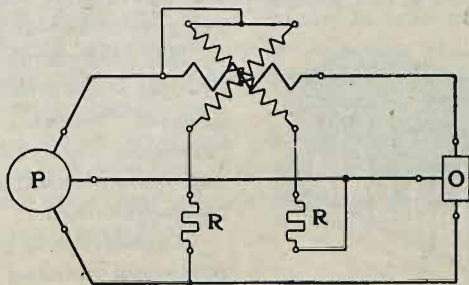
Wskaźnik  $\cos\varphi$  jest zbudowany podobnie jak watomierz z tą tylko różnicą, że niema sprężynek zwracających wskazówkę w kierunku do zera i zamiast jednej cewki ruchomej ma dwie cewki ruchome zamocowane razem na jednej osi, do której przytwierdzona jest również wskazówka rys. 188 \*)



Rys. 188.

Cewki ruchome połączone są równolegle, ale mają w swoich obwodach dodatkowe opory. Jedna z nich ma opór dodatkowy indukcyjny w postaci cewki  $L$ , mającej znaczną samoinдукcję, a druga opór bezindukcyjny  $R$ .

W tych warunkach oddziaływanie cewki nieruchomej na cewki ruchome ma kierunki odwrotne i w pewnym poło-



Rys. 189.

\*) Na tym rysunku i na niektórych następnych dla uproszczenia rysunku cewki są przedstawiane zygaczkami.

zeniu układu ruchomego cewek siły, działające na ruchome cewki w przeciwne strony, będą w równowadze. Wtedy wskazówka przymocowana do cewek wskaże właściwy  $\cos \varphi$ .

Przy prądzie trójfazowym włączamy wskaźnik  $\cos \varphi$ , tak jak pokazano na rys. 189 tu  $R$  i  $R$  oba opory są bezindukcyjne. Taki wskaźnik daje prawidłowe wskazania tylko przy równym obciążeniu faz.

Na środku skali wskaźnika kosinusa  $\cos \varphi$  mamy zwykle działkę oznaczoną jedynką, a w prawo i w lewo idą działki: 0,9—0,8—0,7 i t. d., cała skala wygląda w ten sposób:

0,5	0,7	0,9	1	0,9	0,7	0,5
cap.						ind.

Działki w prawo od jedynki odpowiadają spóźnianiu się, a działki w lewo wyprzedzaniu prądu względem napięcia.

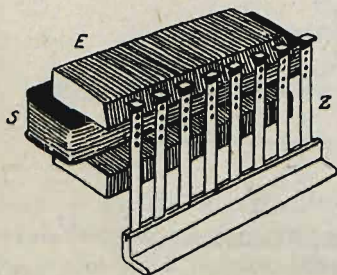
Połowa skali, odpowiadająca spóźnianiu się prądu, zwykle bywa oznaczona znakiem ind. od słowa inductive, a połowa skali, odpowiadająca wyprzedzaniu prądu, znakiem cap. od słowa capacitive\*).

### 73. Wskaźnik częstotliwości prądu.

Przy równoległym połączeniu prądnic prądu zmiennego obie prądnice przed połączeniem muszą mieć napięcia o równej częstotliwości zmian.

Dla porównania tych częstotliwości służą wskaźniki częstotliwości. Najczęściej używane przyrządy tego rodzaju są zbudowane na zasadzie rezonansu mechanicznego.

Zasadniczą część składową przyrządu stanowi elektromagnes, którego rdzeń, złożony z blaszek żelaznych, magnesuje

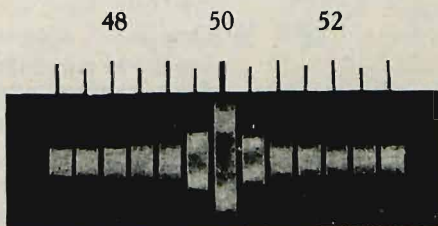


Rys. 190.

\*) Czytaj kapacytyw.

się za pomocą cewki zwiniętej z cienkiego, dobrze izolowanego drutu. Taki elektromagnes  $E$  z cewką  $S$  rys. 190, zasilany prądem zmiennym, wprawia w drgania szereg sprężynek  $Z$ , osadzonych we wspólnej oprawce. Sprężynki na wolnym końcu są obciążone przylutowanymi do nich ciężarkami różnej wielkości. Skutkiem tego każda ze sprężynek ma różną częstotliwość drgań własnych, to znaczy takich które wykonywa sprężynka po wychyleniu puszczona wolno.

W tych warunkach pod wpływem prądu wychylać się będzie najwięcej ta sprężynka, której częstotliwość drgań własnych będzie równa częstotliwości prądu zasilającego elektromagnes.



Rys. 191.

W wycięciu okrągłej tarczy przyrządu widzimy rząd białych kwadracików umocowanych na końcach sprężynek, a nad nimi liczby wskazujące odpowiednią częstotliwość. Gdy sprężynka drga, tworzy się smuga. Liczba pod albo nad smugą najdłuższą wyraża częstotliwość prądu rys. 191.

Oporność tych przyrządów jest znaczna i przystosowana do napięcia prądu badanego.

Włączają się te przyrządy tak jak woltomierze, a wobec tego że one są przystosowane do odpowiedniego napięcia, to napięcie prądu badanego nie może być większe od wskazanego z boku skali przyrządu.