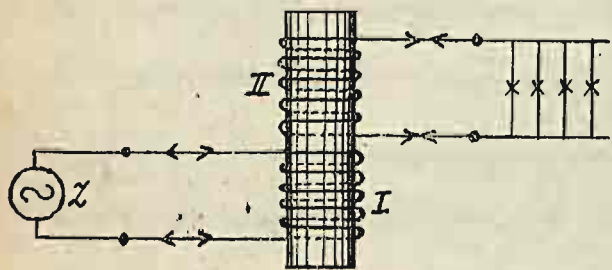


## Transformatory. -

Transformatorami nazywamy przyrządy służące do przetransformowania prądu zmiennego pewnego napięcia w prąd zmienny innego napięcia. Została budowa tych przyrządów polega na zastosowaniu dwóch izolowanych od siebie zwojnic, owiniętych wokół rdzenia żelaznego rys. 196.

Rys. 196. -



Jedną z tych zwojnic zasila się prądem z źródła prądu zmiennego. Ten zwojnik nazywamy pierwotną - I. Drugą

zwojnicę łączymy z odbiornikiem prądu elektrycznego i nazywamy wtórną - II. -

Do zrozumienia działania transformatora należy rozważyć stopniowo działanie tego przyrządu w różnych warunkach. -

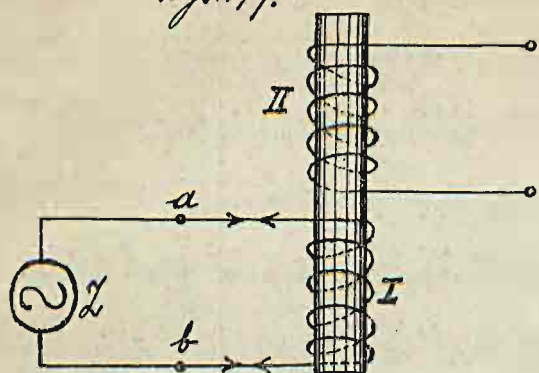
### Transformator nieobciążony. -

Gdy zwojnica wtórna nie jest połączona z odbiornikiem prądu, to prąd we wtórnej zwojnicy nie płynie, wtedy mówimy, że transformator jest nieobciążony rys. 197. -

W tym wypadku do transformatora

zatem prąd niewielki, czyniący zadanie równania:

Rys. 197.-



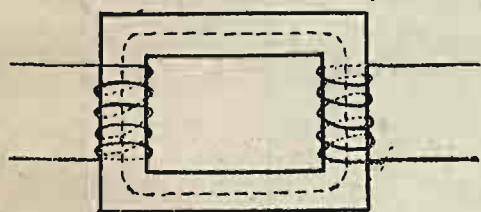
$$\mathcal{E}_{1t} = i_t \cdot r_1 - \mathcal{E}'_{st}$$

tu  $\mathcal{E}_{1t}$  oznacza napięcie na końcówkach  $a, b$  w chwili  $t$ ,  $i_t$  - prąd, a  $\mathcal{E}'_{st}$  - siła elektromotoryczna samowindukacji w chwili  $t$ ,  $r_1$  - opór

omnicznego zwojów pierwotnych transformatora. -

Transformatory budują się zazwyczaj z obwodem magnetycznym zamkniętym, tak jak to wskazuje rys. 198, więc opór magnetyczny jest niewielki, skut-

Rys. 198.-



kiem tego niewielka liczba cewek zwojów może wywołać znaczny strumień magnetyczny i duże  $\mathcal{E}_s$ . Stencyn  $i_t \cdot r$  zazwyczaj jest mały w porównaniu do  $\mathcal{E}$ ,

ponieważ  $r$  wynosi zwykle części oma. -

Z tych uwag wypływa, że gdy transformator jest nieobciążony i strumień magnetyczny powstaje tylko pod wpływem prądu w zwojnicy pierwotnej, prąd płynący do zwojnicy osiąga taką wielkość, która jest warunkowana magnetycznymi właściwościami obwodu i oporem omicznym zwojnicy. -



W przybliżeniu:

$$e_1 = -\dot{\Phi}_1$$

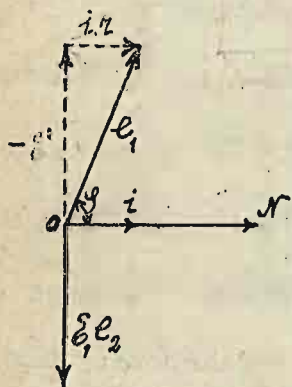
W zwojnicy wtórnej przez indukcję powstaje również siła elektromotoryczna, która wywołuje jej równe napięcie na końcówkach wtórnej zwojnicy:

$$e_2 = \dot{\Phi}_2$$

Prost w transformatorze nie obciążonym spójnia się bardzo znacznie w faze względem napięcia,

Rys. 199. -

ze względu na bardzo małą samowindukcję zwojnicy. -



Wykres wektorowy prądu, napięcia i siły elektromotorycznych i strumienia magnetycznego wskazany jest na rys. 199. -

Tu założyliśmy, że w żelazie nie ma prądów wirowych i histerezy. -

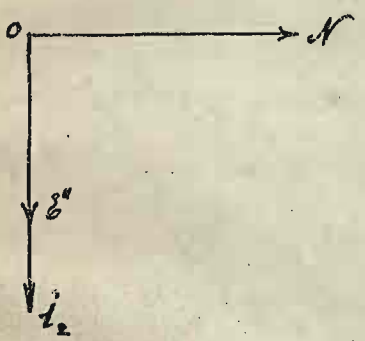
### Transformator obciążony. -

Gdy końcówki wtórnej zwojnicy połączymy z odbiornikiem prądu rys. 196, to we wtórnej zwojnicy powstanie również prąd. - Wtedy strumień magnetyczny będzie wywołany dwoma prądami: pierwotnym  $i_1$  i wtórnym  $i_2$ . Oznaczmy przez  $N$  strumień magnetyczny, wywołany przez obie zwojnice. Układ zwojnic w transformatorze wygląda jest taki, że prawie ten sam strumień  $N$  przechodzi przez jedną i przez drugą zwojnicę. -

Cheć zdać sobie sprawę z działania transformatora w tych warunkach przedwysztućiem zwróćmy uwagę szczególną na powstawanie strumienia magnetycznego pod wpływem obydwóch prądów. -

Zadajmy kierunek wektora wyrażającego zmniejszenie strumienia magnetycznego, wtedy wektory siły elektromotorycznej i prądu we wtórnej zwojnicy będą wiadome. Siła elektromotoryczna indukcji zawsze spóina się o cieni okresu względem strumienia magnetycznego, a prąd w obwodzie pobawionym samoindukcyi jest zgodny co do fazy z siłą elektromotoryczną, wywołując ten prąd. Na podstawie takiego rozumowania wykres wektorowy wypadnie taki jak wykonano na rys. 200. -

Rys. 200. -



Magnetomotoryczna siła zwojnic, wywołująca strumień N, jest w fazie z tym strumieniem\*. Oznaczmy amperozwoje, odpowiadające temu strumieniowi, przez AL; wektor AL

będzie więc w fazie ze strumieniem N.

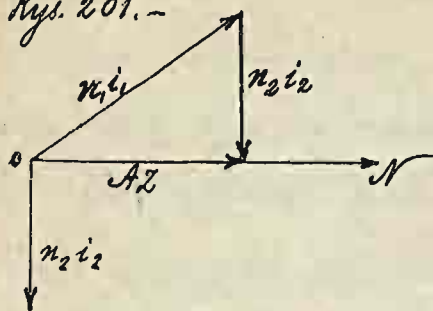
Oznaczmy przez n1 i n2 liczby zwojów odpowiednich zwojnic, wtedy amperozwoje AL są sumą geometryczną amperozwojów n1.i1 i n2.i2, które oczywiście są w fazie z odpowiednimi prądami.

\*) Oile pominiemy wpływ histerezy i prądów wtórnych we zwojnicach. -



Na podstawie tych rozumowań wykreślić możemy wykres wektorowy rys. 201. —

Rys. 201. —



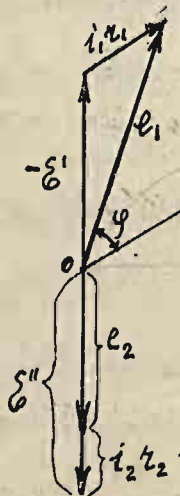
Z wykresu tego widzimy, że prąd w zwojach pierwotnych wyznacza strumień magnetyczny, i że amperowoje wtórne dodają się do pierwotnych w ten sposób, że

amperowoje wypadkowe są mniejsze od amperowojów pierwotnych. —

Napięcie pierwotne, jak przy transformatorze bez obciążenia, stanowi sumę geometryczną  $i_1 r_1$  i  $-\mathcal{E}'$ . — Napięcie zaś wtórne równe jest sił elektromotorycznej wtórnej zmniejszonej o stratę omiczną napięcia we wtórnych zwojach:

$$i_2 r_2$$

Mając to wszystko na względzie, otrzymamy wykres wektorowy wskazujący na rys. 202. —



Rys. 202. —

Zastanawiając się nad wykresem na rys. 202, spostrzegamy, że przy stopniowym obciążeniu transformatora przy wzrastaniu wtórnych amperowojów muszą wzrastać i pierwotne, wypadkowe bowiem porożaje prawie bez zmiany, ponieważ strumień magnetyczny

nie bez zmiany, ponieważ strumień magnetyczny

transformatora obciążonego i nieobciążonego jest jednakowy, strumień ten zawsze wywołuje siłę elektromotoryczną indukcji, prawie równą napięciu na zaciskach zwojnicy pierwotnej. Z układu wektorów na rys. 202 można jeszcze wyciągnąć inny wniosek. Opór obwodu magnetycznego transformatora jest nie wielki, więc i amperewoje wypadkowe małe; w przybliżeniu więc przjąć można, jak widzieć z rysunku:

$$n_1 i_1 = n_2 i_2$$

a stąd  $\frac{i_1}{i_2} = \frac{n_2}{n_1} \dots \dots \dots (1)$

Stosunek sił prądów w zwojnicach transformatora w przybliżeniu równa się odwrotnemu stosunkowi zwojów odpowiednich zwojnic. Z rys. 202 wypływa jeszcze inny wniosek. Przyjmując, że  $i_1 z_1$  i  $i_2 z_2$ , jak to zwykle bywa, są małe w porównaniu do  $\underline{L}_1$  i  $\underline{L}_2$ , możemy w przybliżeniu przjąć:

$$\underline{L}_1 = \mathcal{E}'$$

$$\text{i } \underline{L}_2 = \mathcal{E}''$$

Z pomocą strumienia magnetycznego i liczby zwojów poszczególnych zwojnic siły elektromotoryczne wyrażają się w sposób następujący:

$$\mathcal{E}'_t = \frac{dN}{dt} \cdot n_1 \quad \text{ i } \quad \mathcal{E}''_t = \frac{dN}{dt} \cdot n_2$$



- 274 -

Z tych równości wypadnie, że :

$$\frac{\mathcal{E}'}{\mathcal{E}''} = \frac{n_1}{n_2}$$

a więc w przybliżeniu i

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{n_1}{n_2} \dots \dots \dots (2)$$

Ze wzorów dla prądów i napięć wypływa bezpośrednio:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{i_2}{i_1}$$

$$\text{albo} \quad e_1 i_1 = e_2 i_2 \dots \dots \dots (3)$$

Wzór ten wyraża, że moc prądu dostarczona do transformatora równa się mocy prądu otrzymanej. -

Wszystkie otrzymane powyżej wzory (1), (2) i (3) wyrażają dobre stosunki własności transformatora. -

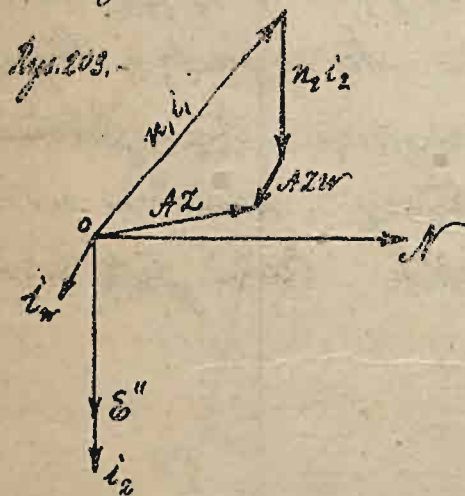
Wzory te jednak zgodne są z doświadczeniami tylko w przybliżeniu, ponieważ założyliśmy, że opory magnetyczne i elektryczne równają się zero i nie ma ani prądów wirowych ani histeresy w żelaznym rdzeniu transformatora; w tym tylko wypadku w transformatorze nie będzie żadnych strat, tak że moc otrzymana równa się mocy dostarczonej do transformatora. -

## Wpływ histerezy i prądów wirowych

Histeresa wywołuje zmianę kształtu krzywej prądu przy zachowaniu sinusoidalnego kształtu krzywej napięcia i spódniciu się strumienia magnetycznego względem magnesujących superowojów. —

Zastępując niekształtną krzywą przez równoważną sinusoidę, wyrazimy magnesujące superowoję pewnym wektorem, przesuniętym napród względem wektora strumienia magnetycznego. —

Prądy wirowe działają jak dodatkowe wtórne nawojenie krótkowartościowej samoindukcji. — Oznaczmy superowoję takiego nawojenia, zastępującego działanie prądów wirowych przez AKW. Zmieniły pod wpływem histerezy i prądów wirowych układ wektorów rys. 202, podajemy na rys. 203. —



Z tego rysunku widzimy, że histeresa i prądy wirowe zwiększają nieco prąd pierwotny i przybliżają jego do napięcia, zmniejszając kąt pomiędzy wektorem prądu  $i_1$  i wektorem napięcia. —

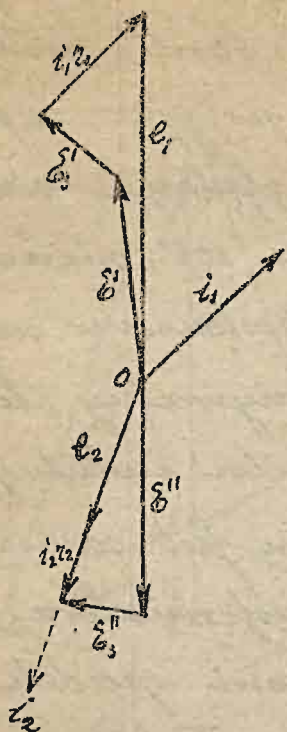


## Wpływ rozproszczenia magnetycznego. —

Pomimo ustawienia zwojnic w najdogodniejszych warunkach, strumienia magnetyczny w pierwotnej zwojnicy nie jest ten sam, jak we wtórnej. —

Oprócz strumienia magnetycznego wspólnego obu zwojnicom, każda z nich obejmuje też zwojny strumienia rozproszone, wywołany superpozycjami tylko jednej odpowiedniej zwojnicy. —

Strumienie rozproszone wywołują dodatkowe siły elektromotoryczne, które dodają się wektorowo do głównych. — Położenie wektorów sił elektromotorycznych rozproszczenia łatwo znaleźć opierając się na tem, że wektory rozproszonych strumieni są zgodne z wektorami odpowiednich prądów, a wektory sił elektromotorycznych przesunięte są względem wektorów strumieni magnetycznych. — Na podstawie tego układu wektorów prądów i napięć transformatora z uwzględnieniem histerezy, prądów wirujących i rozproszczenia, wypadają takie jak wskazano na rys. 204. —



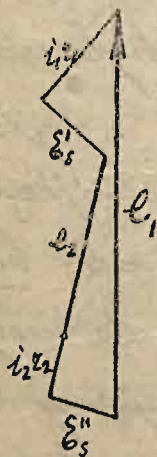
## Spadek wtórnego napięcia przy obciążeniu transformatora.

Zakładamy, że napięcie źródła prądu jest stałe, a więc  $e_1$  - stałe. Napięcie zos  $e_2$  zmniejsza się stopniowo przy zwiększaniu obciążenia.

Czynniki wpływające na to zmniejszenie najłatwiej spostrzedz z wykresu, który

można utworzyć z wykresu na rys. 204. Założmy, że liczba zwojów zwojnicy pierwotnej równa jest liczbie zwojów zwojnicy wtórnej, wtedy  $\delta' = \delta''$ . Mając to na uwadze, z wektorów podanych na rys. 204, możemy utworzyć wielobok wskazany na rys. 205.-

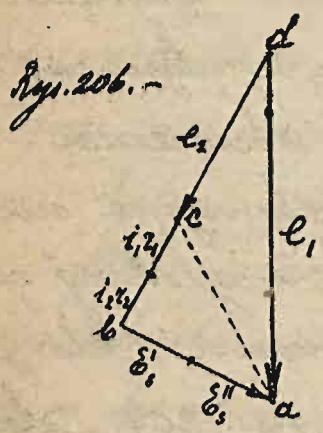
Rys. 205.-



Z tego rysunku widzimy, że przy stałym napięciu  $e_1$ ,  $e_2$  wypada tym mniejsze im większe są spadki napięcia odcierne  $i_1 r_1$  i  $i_2 r_2$ , a także - siły elektromotoryczne samoindukcji  $\delta'_1$  i  $\delta'_2$ . Przy wzroście prądu, wszystkie te czynniki rosną, więc i napięcie  $e_2$  zmniejsza się.



Z wykresu rys. 205 widzimy, że gdy opór magnetyczny obwodu jest bardzo mały, a więc bardzo małe wypadkowe odeprowożwoje, możemy przyjąć, że prądy w zwojnicach są przesunięte względem siebie o  $180^\circ$ . Stosując te przypuszczenia do rys. 205, możemy go przedstawić inaczej, tak jak wskazałem na rys. 206.



Wektor ab nazywamy tu spadkiem napięcia indukcyjnego, wywołanego jest samoindukcją zwojnic transformatora. - Wektor z05 bc stanowi spadek napięcia odcierającego wywołanego oporami odcierania przewodników, z któ-

rych utworzone są zwojnice. Wektor ac wyraża napięcie na końcówkach wtórnej zwojnicy - e2. Z rysunku widzimy, że e2 jest mniejsze od e1, i przy wzrastaniu prądu, e2 maleje. -

Jeżeli prąd nie jest zgodny co do fazy z napięciem wtórnej zwojnicy, to zmniejszą napięcie e2 przy stałym e1, i i przy odchylaniu się wektora I względem e2 otrzymujemy z wykresu na rys. 207, trójkąt abc odpowiada trójkątowi abc na rysunku poprzednim. Kierunek bc jest zgodny z kierunkiem prądu, ba do niego prostopadły. Przy punkcie a' budujemy trójkąt a'b'c' równy trójkątowi abc, wtedy prostokąt c'c jest równy i równoległy do a'a. -





Ukutechniaemy to korzystając z wyżej podanych  
wzorów przybliżonych. Zamiast  $\underline{e}_2$ , wprowadzamy

$$\underline{e}_2' = \frac{\underline{e}_2 \cdot n_1}{n_2}$$

Zamiast  $\underline{i}_2$ , wprowadzamy:

$$\underline{i}_2' = \frac{\underline{i}_2 \cdot n_2}{n_1}$$

Zamiast  $\underline{r}_2$  wprowadzamy:

$$\underline{r}_2' = \frac{\underline{r}_2 \cdot n_1^2}{n_2^2}$$

wtedy  $\underline{i}_2' \cdot \underline{r}_2' = \frac{\underline{i}_2 \underline{r}_2 n_1}{n_2}$

Tak samo, zamiast  $\underline{e}_s''$  wprowadzamy:

$$(\underline{e}_s'')' = (\underline{e}_s'') \frac{n_1}{n_2}$$

Przy normalnem obciążeniu najproszolitszych  
transformatorów o mocy 10-50 kw. Używanych  
przy oświetleniu elektrycznem. Spadek napięcia  
omowego (bc na rys. 207) wynosi około 2% od  $\underline{e}_1$ ,  
a indukcyjny (ab na rys.) — 4%.

### Przykład.

Dla rozrządzenia się w wartościach poszczególnych  
wielkości prądu i napięcia w transformatorze  
podaż kilka liczb wziętych z doświadczenia:  
Transformator na 20 kVA (kilowoltamperów) t.j. 20 k.w.  
przy  $\cos \varphi = 1$ . Przełożenie 4000 : 120 V. Spółczynnik

sprawności 97,5% .-

Bez obciążenia  $i_0 = 0,089 \text{ A}$ .

Przy obciążeniu  $i_1 = 5 \text{ A}$ .  $i_2 = 166,5 \text{ A}$ .

Opór pierwotnych zwojów  $6,7 \text{ } \Omega$ .

" wtórnych "  $0,0052 \text{ } \Omega$ .

Liczba pierwotnych zwojów 2600

" wtórnych " 78.-

### Spółczynnik sprawności transformatora. -

W transformatorze są straty energii dwójakiego rodzaju: w żelaznych częściach obwodu magnetycznego i w przewodnikach miedzianych, które tworzą zwojnice. -

Przy prądzie zmiennym, przebiegającym w zwojnicach w żelazie, powstaje zmienne pole magnetyczne. Pod wpływem zmiennego pola w żelazie wywołuje się ciepło skutkiem histerezy i prądów wirowych. Ilość tego ciepła zależy przede wszystkim od indukcji magnetycznej w żelazie i od częstotliwości zmian prądu. -

Z poprzednich rozważań wiemy, że strumień magnetyczny w transformatorze niezależnie od obciążenia, jest prawie stały. Straty więc w żelazie są prawie stałe. - Drugi rodzaj strat w transformatorze stanowi ciepło Joule'a, powstające w drutach zwojnic, pod wpływem oporu. -



Strata siećta Joule'a jest proporcjonalna do drugiej potęgi prądu. Te straty są więc zależne od obciążenia. Im większe jest obciążenie tym mniejsze są powyższe straty. Transformatory umieszczone w sieciach rozprowadzających energję na znacznych terenach, włączane są zwyższoj noś state, obciążone są zaś znacznie tylko przez czoł względu na krótki. Dla zmniejszenia strat energii w takich transformatrach budujemy ich w ten sposób, aby straty energii w ich czasie były możliwie mniejsze, gdyż straty mając tu miejsce ciągle, natomiast znacznie straty energii w urwojeniach są tylko wtedy, gdy transformator jest obciążony.

Spółczynnik sprawności transformatora wyróżniający słowa: jeden zwykły współczynnik, stosowięcy stosunek mocy otrzymanej do mocy wprowadzonej do transformatora, a drugi t. z. roczny, wyrażający stosunek energii otrzymanej z transformatora w ciągu roku do energii wprowadzonej do transformatora w tym samym czasie. -

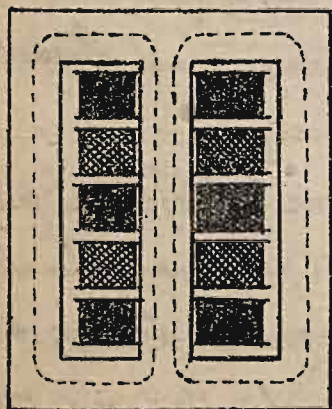
Transformatory stosowane obecnie w praktyce mają współczynniki dwie. Kilko współczynników sprawności wyktych przy normalnym obciążeniu podojemy w tablicy w zależności od mocy transformatora i od liczby okresów czasu noś sekundy. -

KW	$\gamma = 25$	$\gamma = 50$	$\gamma = 100$
1	91	92	93
5	95	96	96
20	96	97	97
40	97	98	98
pony bardzo długo mocy	98	98,5	98,7

## Budowa transformatorów

Względny układ zwojnic i rdzeni, różniący dwa rodzaje transformatorów: płaszczykowe i rdzeniowe. W płaszczykowych zwojnice są nawinięte na jednym rdzeniu żelaznym, którego obwód magnetyczny zamyka się z dwóch stron rys. 208.

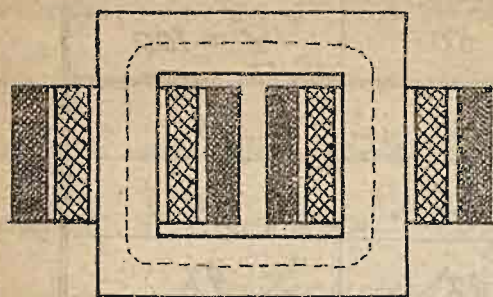
Rys. 208. -



W układzie rdzeniowym mamy dwa rdzenie, na których są nawinięte zwojnice. Rdzenie te są połączone jarzmem u góry i u dołu tak że tworzy się obwód magnetyczny zamykający rys. 209. -

Pierwszy rodzaj budowy może zaletę, że zwojnice są lepiej zabezpieczone od uszkodzenia, niż w transformatorze rdzeniowym,





ale za to wykonanie transformatora rdzeniowego jest tańsze. Zwojnice w transformatorze układają się w ten sposób, aby jakuoymniej powstawało linii' sił magnetycznych, które obejmują tylko jedną zwojnicę, t.j. linii' t.z. rozproszenia magnetycznego.

Dwa są rodzaje układu zwojnic. Jeden układ wskazany na rys. 208 ma zwojnice płaskie, umieszczone jedna nad drugą naprzemiennie wysokiego i niskiego napięcia. -

W drugim układzie, który widzimy na rys. 209, zwojnice mają kształt wysokich cylindrów umieszczonych jeden w drugim. Jeden cylinder stanowi zwojnicę wysokiego napięcia a drugi zewnętrzny lub wewnętrzny - zwojnicę niskiego napięcia.

Celem w celu zmniejszenia rozproszenia magnetycznego, jedna ze zwojnic tworzy dwa cylindry, pomiędzy którymi znajduje się trzeci cylinder, stanowiący drugą zwojnicę. -

Procentem brakuje się mierzą zwojnice pierwotne w kółcie wysokiego cylindra, a wtórne płaskie



umieszczone jedna nad drugą i obejmujące wewnętrzny cylinder rys. 210. -  
Taki podział utwór w znacznym stopniu odpowiednio izolowanie zwojnic.



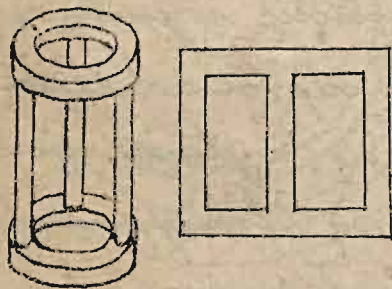
Zwykle staranny się aby napięcie pomiędzy przyłączeniemi zwojami nie przewyższyło 100, a wyjątkowo 200 V. -

Przewodnik w zwojnicach przy prętotach małych stosuje się okrągły, przy dużych - łasnowy. -

Izolacja na przewodnikach najczęściej z bawełny. - Zwojnice z cienkich drutów nawijają się na rurach papierowych, albo mikałitowych (przy wysokich napięciach). -

Isolacja żelazna robią się z blachy cienkiej często lakmionowej. Poszczególne arkusze blachy są pokryte lakiem lub też sklejone cienką bibułką. - Utworzone w ten sposób paczki blachy ściśnięte są bolcami, albo nitami. -

Układ żelaznych części transformatorów prądu trójfazowego widzimy na rys. 211. -



Rys. 211. -

Polewanie żelazne i zwojnice umocowują się sztywno w odpowiedniej ramie i zwykle ściśnięte są silnemi bolcami albo nakładają drogą skutkiem elektromagnetycznego przyciągania się pomiędzy częściami żelaznemi i pomiędzy zwojniami. -

Służą transformatory różnej mocy i na różne napięcia. Obecnie najwyższe napięcie jakie udało się osiągnąć w transformatorach wynosi



blisko miljon woltów. -

Transformatory dla bardzo wysokich napięć po-  
grążają się całkowicie w oleju w celu ułatwienia izo-  
lacji, ponieważ przy bardzo wysokich napięciach w  
pobliżu przewodników łatwo może powstać tak wiel-  
kie natężenie pola elektrycznego, że ono wywołuje  
jonizację i powietrze staje się dobrym przewodnikiem  
elektryczności w tych warunkach ono musi być  
zastąpione innym ośrodkiem bardziej elektrycz-  
nie wytrzymałym. -

Pograżenie transformatorów w olej stosuje  
się jeszcze i w innych wypadkach. -

Jeżeli transformator jest narażony na wilgoć,  
która łatwo mogłaby uszkodzić izolację, zanurza  
się transformator w izolującym nośnym wypetnio-  
nym olejem. -

Transformatory wielkiej mocy wymagają  
stosownego chłodzenia dla odprowadzenia wiel-  
kiej ilości ciepła w nich się wytwarzającego. -

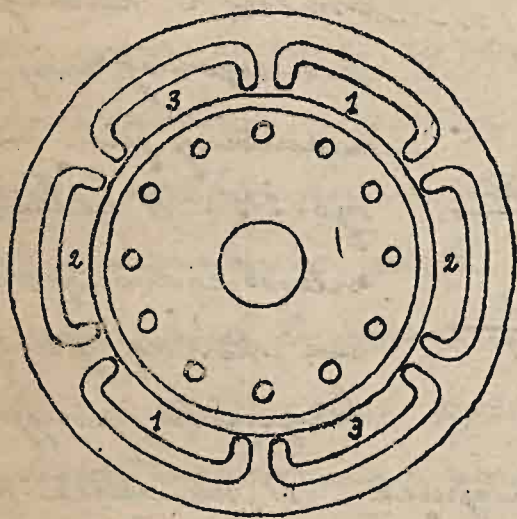
W tym celu musi się transformator  
w nośnym izolującym wypetnionym olejem,  
który chłodzi się za pomocą wentylacji i przepły-  
wającego po nim wody. - W rdzeniach żelaznych  
i pomiędzy wojnicami roztapiają się kamoty  
tłoki, aby w nich mógł krążyć olej, ochla-  
dzający jaknajwięcej powierzchnię grzejących  
się części transformatora. -

## Silniki prądu zmiennego.

Są różne rodzaje silników zasilanych prądem zmiennym. - Wyodróżniamy silniki asynchroniczne, synchroniczne i kolektorowe. Wszystkie te silniki, mogą być budowane dla prądu trójfazowego i jednofazowego. - Najwięcej są rozpowszechnione silniki asynchroniczne prądu trójfazowego.

### Silniki asynchroniczne trójfazowe.

Rys. 212. -

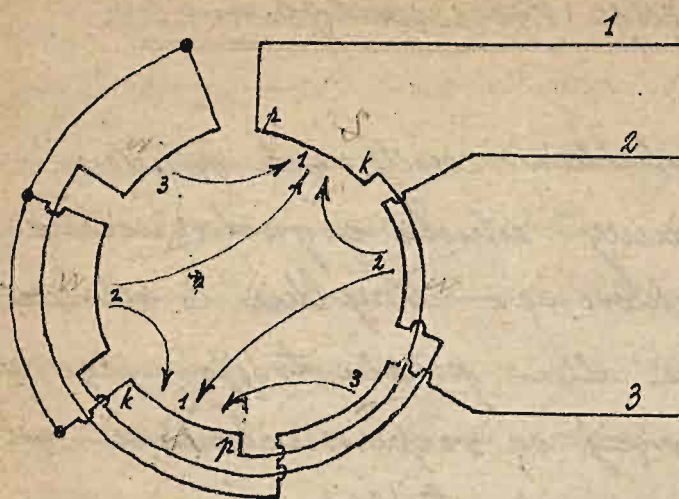


Nieruchomą część silnika asynchronicznego stanowi pierścień utworzony z cienkich blach, na wewnętrznej powierzchni którego są umieszczone zwojnice, rys. 212, w taki sam sposób jak w tworniku trójfazowej prądniczy.

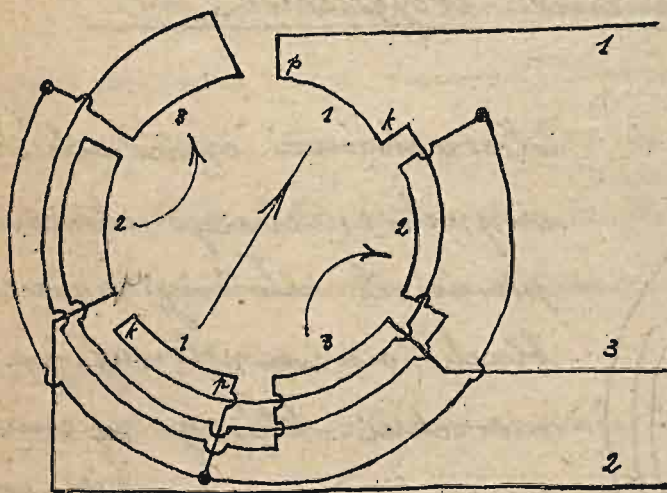
Na rys. 212 wskazano sześć krótkich zwojnic (częściej stosują się długie zachodzące jedna na drugą). Pierścień ten ze zwojnicami nazywa się stojnikiem albo statorem. - Zwojnice te mogą być połączone różnicie. Sposób w ten sposób jak wskazano na rys. 213 obniżający, przenoszący prąd trójfazowy, pole magnetyczne



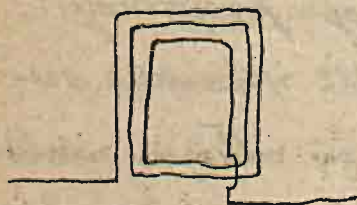
Rys. 213



Rys. 214.



Rys. 215



ortorobiegunowe, a  
tak jak na rys. 214.

dwubiegunowe. -

Pole powstające od  
takiego urzeczywistnienia  
obraca się wokół ob-  
wodu pierścienia re-  
lownego. Zwojnice na  
schematach są poka-  
zane jedynie linij.

Przebiegiem układu  
drutów w kordzie  
pomocniczej zwojnicy  
wskazany jest na  
rys. 215. W układzie  
ortorobiegunowym  
na kordę parę  
biegunów przypada

trzy zwojnice. W układzie roz-  
dwubiegunowym na jeden bie-  
gun przypada trzy zwojnice.  
Przez to wypadło fałsz drugą

odwrócić, t.j. rozłożyć prądami z innej strony,  
aby wypadło pomiędzy prądami odpowiednio róż-  
nica for. -

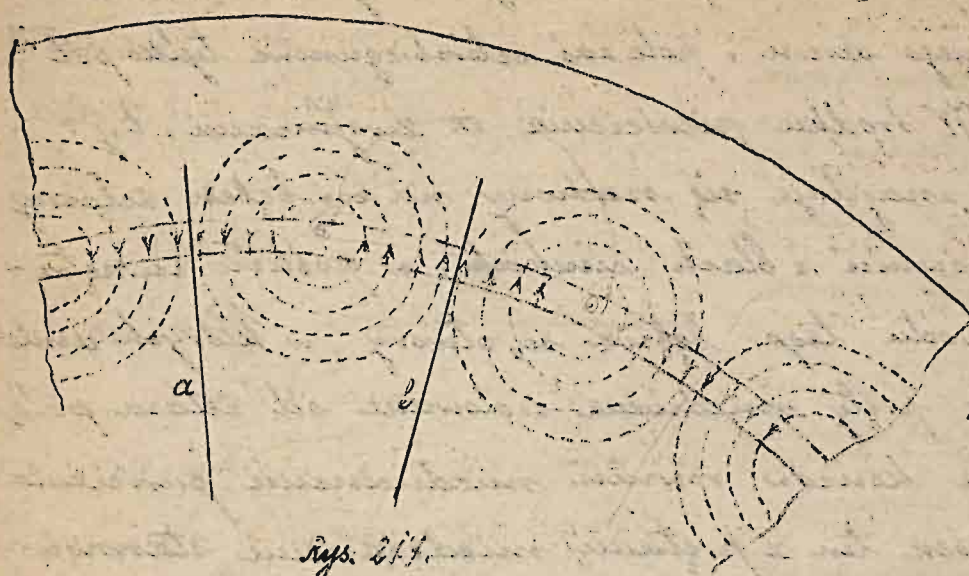
Główną właściwość prądów trójfazowych łatwo spostrzedz, że pole dwóbiegunowe wykona jeden obrót w ciągu jednego okresu, pole zaś czterobiegunowe tylko pół obrotu. - W środku pierścienia ze zwojnicami, t.j. stojnika, znajduje się osadzony na osi bęben żelarny zrobiony również z blach cienkich; w pobliżu zewnętrz- nego obwodu tego bębna są otwory, w których umie- szczają się pręty miedziane izolowane od żelara pota- mione z obu końców również miedzianymi pierścienia- mi. - Bęben ten z prętami miedzianymi stanowi tak zwany wirnik silnika. -

Gdy prąd przepływa w zwojnicach stojnika, to powstające kręcące się pole wywołuje przez indukcję w przewodnikach wirnika prądy indukcyjne, które mają, według prawa Lenza, taki kierunek, że pole magnetyczne działa na te prądy pociągające je za sobą, przez to wirnik obraca się w kierunku obrotu pola; nigdy jednak szybkość biegu wirnika <sup>nie może</sup> dorównać szybkości biegu pola magnetycznego, ponieważ gdyby to nastąpiło, przewodniki wirnika nie przecinałyby linii sił magnetycznych i nie powstawałby prąd indukcyjny, nie byłoby więc siły, która pokonywałaby opory ruchu wirnika utrzymując go stałą szybkość. -



# Pole magnetyczne silników prądu trójfazowego.

Rys. 216.-

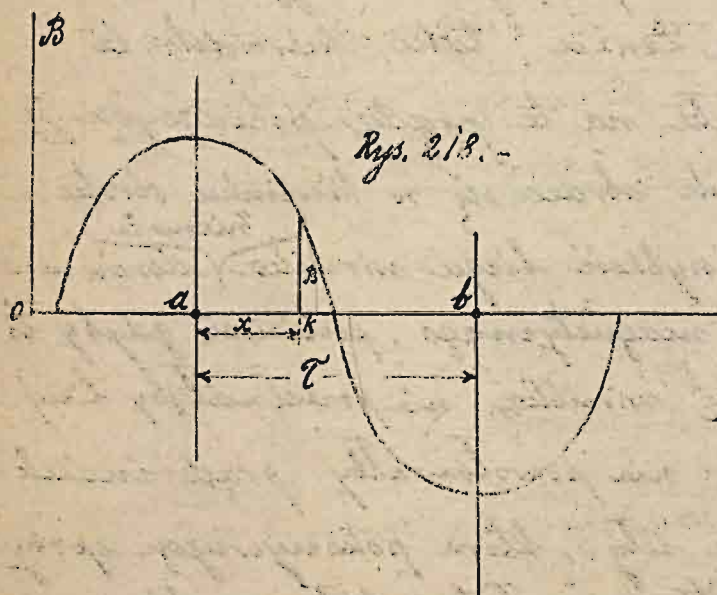


Uzwojenie każdej fazy stojnika ma układ taki sam jak w prądnicach wielofazowych.

Pole wytworzone przez uzwojenie



Rys. 218.-



jednej fazy oczywiście będzie miało układ linii wskazany na rys. 216, gdzie widzimy cięć siatek między stojnikiem i wirnikiem. Wypadkowe pole z szeregu takich pól wywołanych przez poszczególne fazy może się dodając do siebie

porządkowe pola. Dla ułatwienia obliczeń założymy, że gęstość linii sił magnetycznych -  $B$ , czyli indukcja magnetyczna wywołana uzwojeniem jednej fazy zmienia się według siatek powietrznej

węzling prawa sinusoidy. Jestto zatorzenie bliskie do rzeczywistości, jak widać z restawieniem rys. 218.

Sinusoida odpowiednika będzie miała redukcję  $B$ , a odcięte  $x$ , liczone od pewnego punktu  $a$ , gdzie  $B$  ma dodatni maximum. - Pół okresu takiej sinusoidy  $ab$  odpowiada oczywiście odległości pomiędzy środkami dwóch sąsiednich różnofazowanych biegunów, wywołanych przez te uzwojenie.

Oznaczmy tę odległość przez  $\tau$ , wtedy wzór sinusoidy wskazowej na rys. 218 wypadnie następujący:

$$B = \bar{B} \cos \frac{2\pi x}{\tau} = \bar{B} \cos \frac{\pi x}{\tau}$$

*dlatego cos*

$\bar{B}$  - oznacza tu indukcję w punkcie  $k$ .

Zwróćmy teraz uwagę na to, że  $\bar{B}$  zmienia się z czasem stosownie do zmienności prądu w uzwojeniach stojnika. Oznaczmy największe  $\bar{B}$  przy największym prądzie przez  $\bar{\bar{B}}$ , wtedy:

$$\bar{B} = \bar{\bar{B}} \sin \frac{2\pi t}{T}$$

$$i \quad B = \bar{\bar{B}} \sin \frac{2\pi t}{T} \times \cos \frac{\pi x}{\tau}$$

$B$  - jestto indukcyjna magnetyczna wywołana prądem jednej fazy w punkcie  $k$  w chwili  $t$ .

Wzory dla innych faz różnić się będą tem, że prądy temu są przesunięte o m-tą część okresu, jeżeli biorąc ogólnie będziemy mieli m-faz, a zarazem uzwojenie będzie przesunięte względem



uzwojenia sąsiedniej fazy o m-tą część  $2\pi$ , więc dla szeregu porządkowanych faz 1, 2, 3, ..., m, wyraz indukcji magnetycznej  $B$  w punkcie  $x$ , uwzględniając, że  $B$  dla wszystkich faz jest jednakowe, będzie:

$$B_1 = \bar{B} \sin \frac{2\pi t}{T} \cos \frac{\pi x}{\ell}$$

$$B_2 = \bar{B} \sin \left( \frac{2\pi t}{T} + \frac{2\pi}{m} \right) \cos \left( \frac{\pi x}{\ell} + \frac{2\pi}{m} \right)$$

$$B_3 = \bar{B} \sin \left( \frac{2\pi t}{T} + 2 \frac{2\pi}{m} \right) \cos \left( \frac{\pi x}{\ell} + 2 \frac{2\pi}{m} \right)$$

---


$$B_m = \bar{B} \sin \left[ \frac{2\pi t}{T} + (m-1) \frac{2\pi}{m} \right] \cos \left[ \frac{\pi x}{\ell} + (m-1) \frac{2\pi}{m} \right]$$

Wypadkową indukcję magnetyczną  $B'$  w punkcie  $x$ , otrzymamy dodając porządkowe wyrazy:

$$B' = B_1 + B_2 + \dots + B_m$$

Przy dodawaniu uwzględnimy następującą zależność trygonometryczną:

$$\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta) = 2 \sin \alpha \cos \beta.$$

wtedy  $\sin \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \sin(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \sin(\alpha - \beta)$

jeżeli  $\alpha = \frac{2\pi t}{T}$ ,  $\frac{2\pi t}{T} + \frac{2\pi}{m}$  ... i t. d.

$\beta = \frac{\pi x}{\ell}$ ,  $\frac{\pi x}{\ell} + \frac{2\pi}{m}$  ... i t. d.

to  $(\alpha - \beta)$  zawsze równa się  $\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi x}{\ell}\right)$

$$a(\alpha + \beta) = \frac{2\pi t}{T} + \frac{\pi x}{\ell}, \frac{2\pi t}{T} + \frac{\pi x}{\ell} + 2\frac{2\pi}{m} \dots i \text{ t. d.}$$

Mając to na względzie wypisujemy:

$$B' = \frac{m}{2} \bar{B} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi x}{\ell}\right) + \frac{m}{2} \bar{B} \left[ \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \frac{\pi x}{\ell}\right) + \sin\left(\frac{2\pi t}{T} + \frac{\pi x}{\ell} + 2\frac{2\pi}{m}\right) + \dots \right]$$

Suma sinusów w nawiasach równa się zero, ponieważ na tę sumę można rozpatrywać się jako sumę  $m$  sinusoid, których wektory są przesunięte o kąty:  $2\frac{2\pi}{m}$ ,  $2 \cdot 2\frac{2\pi}{m} \dots$  i t. d. do  $2(m-1)\frac{2\pi}{m}$ . Suma takich wektorów rys. 219, gdy  $m$  stanowi całą liczbę, równa się zero.



Rys. 219.

Ostatecznie więc wypadkowa indukcja magnetyczna w punkcie  $k$  normalny silnika w chwili  $t$  będzie:

$$B' = \frac{m}{2} \bar{B} \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi x}{\ell}\right) \dots \dots \dots (a)$$

Zatwierdzając, że  $x=0$ , to otrzymujemy indukcję w punkcie  $a$ :

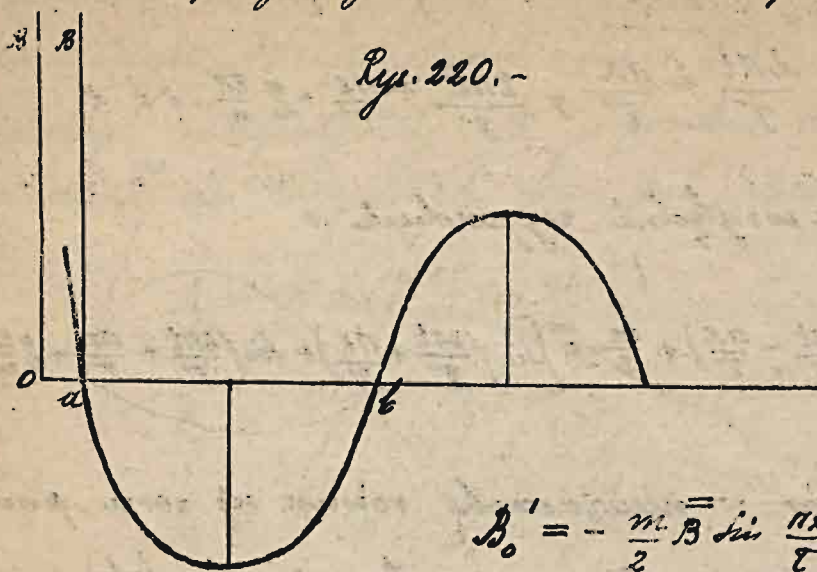
$$B'_a = \frac{m}{2} \bar{B} \sin \frac{2\pi t}{T}$$

Ten wzór wskazuje, że na osie indukcja zmienia się według zwykłego prawa sinusoidy. Zatwierdzając dalej w tym samym równaniu (a), że  $t=0$ , to otrzymujemy wyrażenie indukcji



magnetycznej w zależności od położenia punktu na obwodzie szeregowej w chwili  $t=0$ .

Rys. 220.-



Krzywa odpowiadająca temu wzorowi pokazana jest na rys. 220; jest to sinusoida, której okres równa się  $2l$ , maksymalna wielkość wynosi  $\frac{m}{2} \bar{B}$ .

Wyobraźmy sobie teraz, że punkt  $k$  porusza się po obwodzie szeregowej z taką szybkością, że względnie napotyka stałą równą indukcję  $\bar{B}$ ; założmy więc, że  $\bar{B}$  jest wielkością stałą, wtedy  $i \frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi x}{l}$  jest wielkością stałą np.  $\alpha$ .

$$\frac{2\pi t}{T} - \frac{\pi x}{l} = \alpha$$

$x = \frac{2\pi t \cdot l}{T \cdot \pi} - \frac{\alpha l}{\pi} = \frac{2tl}{T} - \frac{\alpha l}{\pi}$ , a szybkość ruchu punktu  $k$  będzie:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{2l}{T}$$

Założmy że promień obwodu szeregowej jest  $R$ , liczba biegunów -  $p$ , wtedy:

$$T = \frac{2\pi R}{p v}$$

$$v = \frac{2 \cdot 2\pi R}{T \cdot p}$$

Przechodzący przez  $n$  - liczbę obrotów na minutę, to

$$v = 2\pi R \frac{n}{60}$$

Wobec:  $2\pi R \frac{n}{60} = \frac{4\pi R}{T \cdot p}$

$$n = \frac{2 \cdot 60}{T \cdot p} = \frac{2 \cdot 60}{p} = \frac{2 \cdot 60}{p}$$

Punkt więc  $k$  obraca się wokół  $n$  razy na minutę. Ponieważ  $\alpha$  wzięliśmy dowolnie  $\alpha$  więc i dowolnie  $B'$ , to w każdym punkcie przesuwającym się z szybkością  $n$  - obrotów na minutę względem nieruchomej indukcja magnetyczna będzie wielkością stałą.

Z tych warunków wypocde, że pole magnetyczne w przekroju silnika w przybliżeniu może uważać się za sinusoidalne i obraca się z szybkością  $\frac{2 \cdot 60}{p}$  obrotów na minutę.

### Moment kręcący silników asynchronicznych.

Kręcące się pole magnetyczne w silniku asynchronicznym wywołuje w wirniku prądy indukcyjne takiego kierunku, że działanie kręcącego się pola na te prądy pociąga za tym polem wirnik. Na każdą drut wirnika działa pewna siła,



którą możemy wyrazić wzorem:

B. l. I.

B - indukcja magnetyczna gdzie znajduje się drut,

l - długość drutu,

I - prąd w drucie.

Na różne druty działają będą różne siły, więc chcąc wyrazić wypadkowy moment kręcący D działający na wirnik należy wziąć średnią siłę.

Oznaczmy odległość drutów wirnika od osi przez  $\frac{d}{2}$ , a liczbę drutów na wirniku przez Z wtedy:

$$D = \frac{d}{2} (B \cdot l \cdot I)_{sr.} \cdot Z$$

B i I zmieniają się sinusoidalnie, więc:

$$(B \cdot I)_{sr.} = \frac{\bar{B}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\bar{I}}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi$$

B odpowiada  $\bar{E}$ , lecz I opóźnia się względem napięcia z powodu samoindukcji wywołanej tym strumieniem magnetycznym, który nie pojawia się ze zwojeniem stojnika działającego tylko na uzwojenie wirnika.

Oznaczmy przez r - opór uzwojenia wirnika, przez L - współczynnik samoindukcji odpowiadający jednemu drutowi, a przez c - częstość zmian prądu w wirniku, to:

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}}{\sqrt{r^2 + (c \pi L)^2}}$$

Różnica cieżar pomiędzy  $\underline{I}$  i  $\underline{E}$ , a więc i pomiędzy  $\underline{B}$  i  $\underline{E}$  będzie wyrażać się wzorem:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{c \pi L}{r}$$

a więc  $\cos \varphi = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (c \pi L)^2}}$

Podstawiając odpowiednie wyraży we wzór dla  $\underline{D}$ , otrzymamy:

$$\underline{D} = \frac{d}{2} \cdot z \cdot l \cdot \frac{\bar{B}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\bar{E}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{r}{\sqrt{r^2 + (c \pi L)^2}}$$

Częstość zmian prądu  $\underline{C}$  możemy wyrazić przez liczbę biegunów pola i położyć  $n_s = n_p - n_w$  gdzie  $n_p$  - liczba obrotów pola na minutę, a  $n_w$  - liczba obrotów wirnika na minutę

$$C = n_s \cdot p.$$

Siłę elektromotoryczną w jednym drucie możemy wyrazić wzorem:

$$\bar{E} = \bar{B} \cdot l \cdot \frac{\pi \cdot d \cdot n_s}{60}$$

wtedy:

$$\underline{D} = \frac{d}{2} \cdot z \cdot l \cdot \frac{\bar{B}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\bar{B}}{\sqrt{2}} \cdot l \cdot \frac{\pi \cdot d \cdot n_s}{60} \cdot \frac{r}{\sqrt{r^2 + (n_s \cdot p \cdot \pi L)^2}}$$

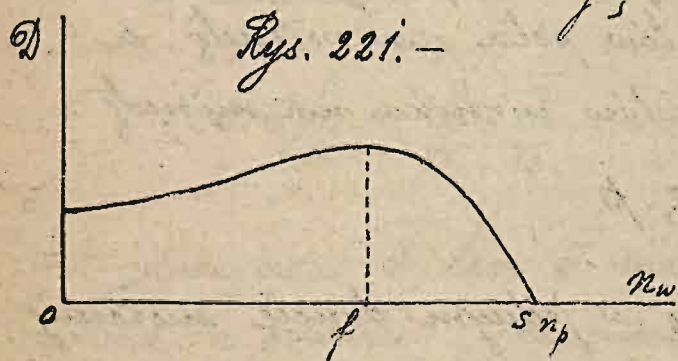
Oznaczając współczynniki określające cechy konstrukcyjne silnika przez  $\underline{K}$ , otrzymamy:



$$D = K \cdot \frac{B^2}{2} \cdot \frac{z \cdot n_s}{\sqrt{z^2 + (n_s \cdot p \cdot H \cdot L)^2}}$$

Wzór ten wskazuje, że przy  $n_s = 0$ ,  $D = 0$ , to znaczy, że gdyby wirnik obracał się tak szybko jak pole, to żadnego momentu kręcącego nie byłoby, co jest łatwo zrozumiałe, gdyż wtedy wirnik nie przecinałby zupełnie linii magnetycznych i w nim nie powstawałby prąd indukcyjny.

Gdy wirnik stoi, to  $n_s = n_p$ , ponieważ  $n_w = 0$ , wtedy mamy pewien moment kręcący, który łatwo obliczamy z powyższego wzoru podstawiając zamiast  $n_s$ ,  $n_p$ .



Rys. 221. -

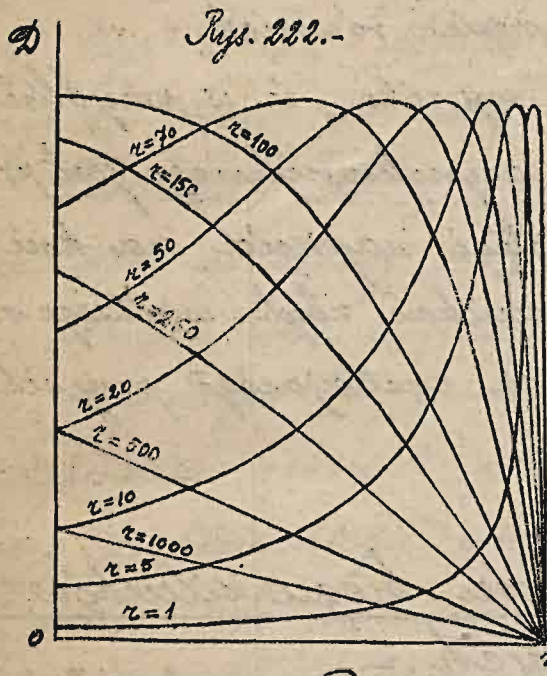
Ze względu na to, że  $n_s$  we wzorze obliczenia  $D$  znajduje się w liczniku i w mianowniku moment kręcący przy pew-

nym  $n_s$  - jest maksymalny. Podstawiając w powyższe wyrażenie zamiast  $n_s$ , równy temu wyraz  $n_p = n_w$  znajdziemy zależność momentu kręcącego  $D$  od szybkości obrotu wirnika  $n_w$ .

Zależność to wyraża się linią wskazaną na rys. 221. - Śluch może być zależnie od obciążenia przy różnych szybkościach odpowiednich punktów na osi odciśniętych  $f$  i  $s$ .



Bieg silnika przy szybkościach odpowiadających punktom pomiędzy 0 i 1 jest niemożliwy, ponieważ przy wzroście obciążenia szybkość biegu zmniejsza się i wtedy moment kręjący nie rośnie, lecz maleje, skutkiem czego silnik staje.



Według wzoru powyższego można także wyprowadzić wnioski o zależności momentu kręjącego od oporu uzwojenia wirnika. Opór wirnika jest w liczniku i w mianowniku, więc również gdy  $n_s$  nie jest zbyt mały moment kręjący jest przy pewnym  $z$  ma-

ksymalny. Linja momentów zmienia swój kształt i położenie w zależności od wielkości  $z$  tak jak wskazuje rys. 222,  $z=1$  jest tu opór największy, a  $z=1000$  - najmniejszy.

Toratem moment kręjący zależy jeszcze od indukcji magnetycznej. Wielkość zaś indukcji pola magnetycznego  $B$  wypadkowa, wywołana przez prąd w stojniku i w wirniku, jest prawie proporcjonalna do napięcia na końcówkach nawoju stojnika, ponieważ to napięcie równe jest sumie geometrycznej iloczynu prądu przez opór owiczny odpowiedniej zwojnicy i siły



elektromotorycznej indukcji wywołanej w stojniku przez pole wirujące z odwrotnym zwrotem. Gdy opór omienny jest mały, to napięcie jest prawie równe powyższej sile elektromotorycznej. —

Sila elektromotoryczna jest proporcjonalna do indukcji  $B$ , więc i napięcie również. —

Z tego rozumowania wynika, że w przybliżeniu moment kręjący silnika asynchronicznego jest proporcjonalny do drugiej potęgi napięcia na końcówkach. — Należy więc unikać zbyt wielkiego obniżania się napięcia prądu zasilającego przy silnikach tego rodzaju. —

## Regulacja szybkości biegu silników asynchronicznych. —

Jeżeli wirnik ma  $p$  biegunów, a prąd zasilający  $\gamma$  okresów na sekundę, to wiemy z poprzednich rozważań, że pole wykonuje  $n_p = \frac{2\gamma}{p \cdot 60}$  obrotów na minutę. — Wirnik obraca się wolniej i jeżeli pożądy wynosi  $n_s$ , to liczba obrotów wirnika na minutę będzie:

$$n_w = \frac{2\gamma}{p \cdot 60} - n_s$$

Zmienić  $n_w$  można zmieniając  $\gamma$ ,  $p$ , albo  $n_s$ . Liczba okresów prądu na sekundę zazwyczaj jest stała, zmienić ją nie można. —

Liczbę biegunów  $p$  można zmienić tylko



wtedy, gdy uzwojenie jest odpowiednio uzwojone.

Przez zmianę położenia końcówek zwojnie można zmienić układ uzwojenia w ten sposób, aby otrzymać pole magnetyczne o innej liczbie biegunów. Odpowiednio do liczby biegunów tego pola ustala się jego liczba obrotów na minutę, a więc i szybkość biegu wirnika.

Daleko łatwiej zmienić  $n_s$  wprowadzając opór dodatkowy w obwód uzwojenia wirnika.

Leżąc oś momentu kręącego  $D$  wynika, że przy stałym  $D$  i małych wielkościach  $n_s$  przy zwiększeniu oporu  $r$  pośród  $n_s$  wzrasta, skutkiem czego szybkość biegu wirnika zmniejsza się. Jeżeli  $n_s$  małe, to możemy pominąć wyraz  $(n_s p \pi d)^2$  w porównaniu do  $r$  i wtedy w przybliżeniu:

$$D = \frac{F}{2} \cdot \frac{\bar{B}^2}{r} \cdot n_s$$

$$\text{Skąd: } n_s = \frac{2D}{F \cdot \bar{B}^2} \cdot r$$

Regulowanie szybkości biegu wirnika za pomocą wprowadzenia oporu do obwodu wirnika nie jest jednak oszczędne, bo w oporze dodatkowym traci się dużo energii w postaci ciepła.

Moc równoważną ilości ciepła, wytwarzanej się w uzwojeniu wirnika można wyrazić wzorem:

$$w = I^2 \cdot r \cdot Z$$



$\mathcal{I}$  - prąd w jednym drucie,

$r$  - opór omicowy odpowiadający oporowi jednego drutu wirnika,

$z$  - liczba drutów na wirniku.

$$\mathcal{I} = \frac{\bar{\mathcal{E}}}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{r^2 + (n_s \rho \pi L)^2}}$$

wieć

$$w = \frac{\bar{\mathcal{E}}^2 \cdot r}{2(r^2 + [n_s \rho \pi L]^2)} \cdot z$$

Jak poprzednio:

$$\bar{\mathcal{E}} = B \cdot l \cdot \frac{\pi d n_s}{60}$$

wieć:

$$\frac{B^2 \cdot l^2 \left( \frac{\pi d n_s}{60} \right)^2 \cdot r \cdot z}{2(r^2 + [n_s \rho \pi L]^2)}$$

Zestawiając ten wyraz ze wzorem dla momentu kręzącego  $\mathcal{D}$ , łatwo spostrzećmy że:

$$w = \frac{\pi \cdot \mathcal{D}}{30} \cdot n_s$$

Przy stałym momencie obracającym straty energii na ciepło w wirniku są proporcjonalne do poślizgu. Porównajmy jeszcze te straty z całą mocą mechaniczną otrzymywaną z silnika.

Jeżeli moment obracający jest  $\mathcal{D}$ , a liczba obrotów wirnika na minutę  $n_w$ , to moc mechaniczna otrzymywana w silniku wyrażać się

wzorem:

$$\eta = \frac{D. 2\pi. n_w}{60}$$

wtedy:  $\frac{w}{W} = \frac{n_s}{n_w}$

Jeżeli  $n_p$  - liczba obrotów na minutę pola magnetycznego, to:

$$n_s = n_p - n_w$$

i  $\frac{w}{W} = \frac{n_p - n_w}{n_w}$

Załóżmy że  $n_w = \alpha \cdot n_p$ ,  $\alpha$  jest zawsze mniejsze od jedności, wtedy:

$$\frac{w}{W} = \frac{1 - \alpha}{\alpha}$$

Gdy silnik obraca się szybko,  $\alpha$  jest duże np. 0,9, to:

$$\frac{w}{W} = \frac{0,1}{0,9} = \frac{1}{9}$$

Straty na ogrzewanie przewodników wirnika stanowią tu około 10% mocy strzymanej.

Jeżeli jednak przez wprowadzenie oporu do uwolnienia wirnika zmniejszymy szybkość biegu style, że  $\alpha = 0,5$ , to:

$$\frac{w}{W} = \frac{1 - 0,5}{0,5} = \frac{0,5}{0,5} = 1$$

Straty na ciepło w przewodnikach wirnika



wynoszą, tu tyle samo ile wynosi moc otrzymaną.

## Rozruch silników asynchronicznych.

Przy rozruchu silników na szczególną uwagę zasługują moment kręjący i prąd dostarczany z sieci.

Wyrac momentu obrotowego w chwili rozruchu otrzymaną zakładając we wzorze dla  $D$ ,  $n_s = n_p$ , wtedy:

$$D = \frac{f \cdot \bar{B}^2}{2} \cdot \frac{r \cdot n_p}{r^2 + (n_p \cdot p \cdot \pi L)^2}$$

Z tego wzoru wynika, iż moment obrotowy w chwili rozruchu jest proporcjonalny do drugiej potęgi indukcji magnetycznej, a więc do drugiej potęgi napięcia prądu zasilającego silnik.

Ponieważ moment ten zależy od oporu uwolnienia wirnika. Gdy opór ten jest niewielki, to w mianowniku można opuścić  $r^2$  w porównaniu do  $(n_p \cdot p \cdot \pi L)^2$  i wtedy w przybliżeniu  $D$  jest wprost proporcjonalne do  $r$ , jeżeli natomiast  $r$  jest duże, to  $n_p \cdot p \cdot \pi L$  można opuścić w porównaniu do  $r$ , wtedy  $D$  wypada odwrotnie proporcjonalne do  $r$ .

i przy zwiększeniu oporu uzwojenia wirnika zmniejsza się. - Najdogodniej jest więc mieć taki opór w wirniku, przy którym moment obrotujący otrzymuje się maksymalny. -

Prąd płynący z sieci do uzwojenia stojnika w nieruchomym silniku zależy przede wszystkim od tego, jaki jest opór uzwojenia wirnika. Gdy obwód uzwojenia wirnika jest przerwany, to prąd płynący do stojnika jest bardzo mały, ponieważ samoindukcja uzwojenia stojnika jest bardzo znaczna. Gdy obwód uzwojenia wirnika zamknięty, to w tym uzwojeniu popłynie prąd indukcyjny tak jak w zwykłym transformatorze. Jeżeli opór uzwojenia wirnika będzie mały, to prąd wtórny wytworzy się silny. Jak wiemy z teorii transformatorów, prąd ten tworzy pole, które łączy się z polem zwojów pierwotnych; wypadkowe pole wytwarza siłę elektromotoryczną we wtórnych zwojach wywołującą wtórny prąd. -

Gdy opór uzwojenia wirnika jest niewielki, to siła elektromotoryczna potrzeba

---

Elektrotechnika. Arkusz 20-ty. -

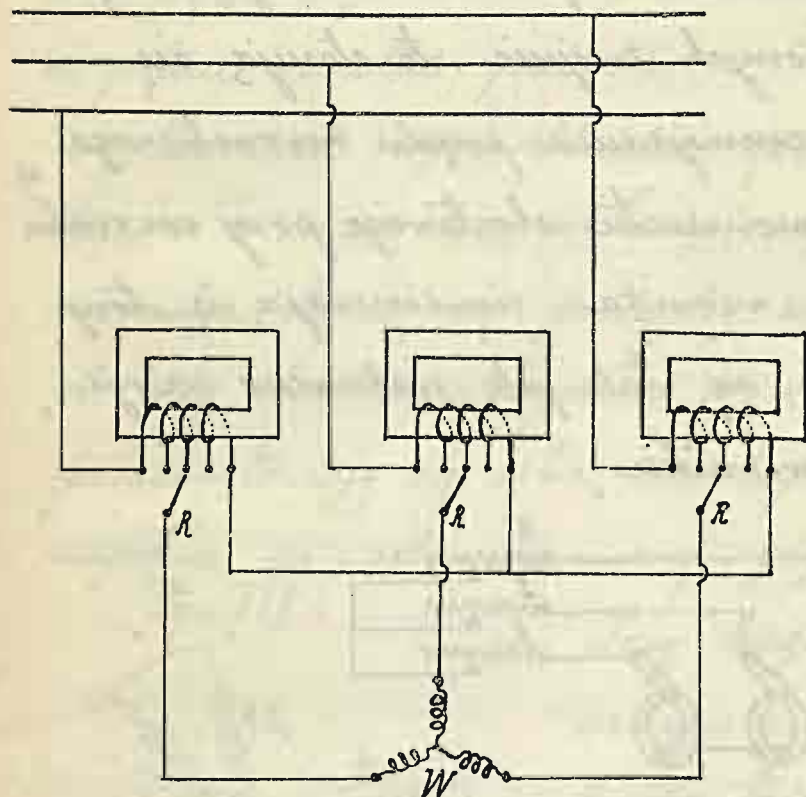


dla wywołania prądu będzie niewielka, więc pole magnetyczne <sup>(skojarzone)</sup> z uwójnictwem stojnika i wirnika jest niewielkie \*). W tych warunkach i elektromotoryczna siła przeciwstawiająca się prądowi w stojniku jest niewielka, skutkiem czego do stojnika w chwili rozruchu płynie znaczny prąd. Dla uniknięcia zbyt silnego prądu w chwili rozruchu stosowane są rozmaite urządzenia. Jeżeli uwójnienie wirnika krótko spięte, to osiągnąć można zmniejszenie prądu w stojniku tylko przy jednoczesnym zmniejszeniu momentu kręcącego silnika przez obniżenie napięcia na końcówkach zwójnic wirnika. Wtedy stosuje się przetacznik gwiazda-trójkąt, który przetacza uwójnienie stojnika z gwiazdy na trójkąt. W chwili rozruchu stosuje się połączenie w gwiazdę rys. 223, ponieważ wtedy na każdą fazę uwójnienia wirnika przypada  $\frac{e}{\sqrt{3}}$  volt, jeżeli  $e$  oznacza napięcie sieci trójfazowej. Gdy silnik już jest w biegu to za pomocą

\*) Magnetyczne działanie prądu stojnika znosi się częściowo z magnetycznym działaniem prądu wirnika.

odpowiedniego przetaczania zmienia się połączenie na trójkąt rys. 224, wtedy pełne napięcie  $\underline{e}$  maury na końcówkach każdej fazy \*)

Rys. 225.



Pozostem stosuje się różne transformatory stopniowe. Na rys. 225 widzimy tego rodzaju urządzenie.

W- uzwojenie wirnika.

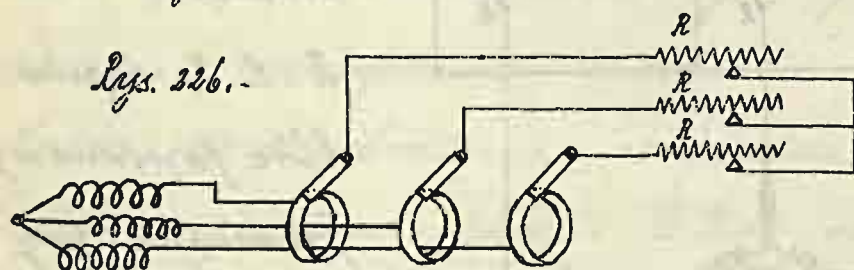
R, R, R, rączki, które przesuwamy jednocześnie. Gdy rączki stoją na

ostatnich lewych kontaktach, to na końcówkach

\*) Gdy wirnik przyspiesza biega prąd w stojniku słabnie, ponieważ zmniejsza się poślizg, t.j. szybkość przesuwania się drutów wirnika względem pola wirującego, a przez to siła elektromotoryczna indukowana w wirniku, a więc i prąd. Słabszy prąd w wirniku mniej przeciwdziała magnesującemu wpływowi prądu stojnika, przez co może powstać silniejsze pole wytwarzające siłę elektromotoryczną w zwojach stojnika. Ta siła elektromotoryczna przeciwdziała się prądowi i osłabia go. —



wirnika maury pełne napięcie sieci. Gdy zaś rączki stoją na ostatnich prawych kontaktach, to napięcie na tworniku jest zero. - Przesuwając rączki stopniowo na lewo zwiększamy napięcie na końcówkach wirnika. - Gdy wirnik ma uzwojenie, składające się z odpowiednio ułożonych zwojnic, to stosując się dwa sposoby dla zmniejszenia prądu rozruchowego, nie zmniejszając momentu obrotowego przy rozruchu. Najczęściej na osi wirnika umieszczają się trzy pierścienie i łączą się tak jak wskazało na rys. 226 z uzwojeniem wirnika.



Do pierścieni dotykają szczotki połączone z opornikami R. Przesuwając kontakty oporników można wprowadzać różne opory do obwodu wirnika. W chwili puszczenia w ruch sprawdzamy opór największy, skutkiem czego stabilnie pracuje wirnik i mniej osłabia pole wywołane

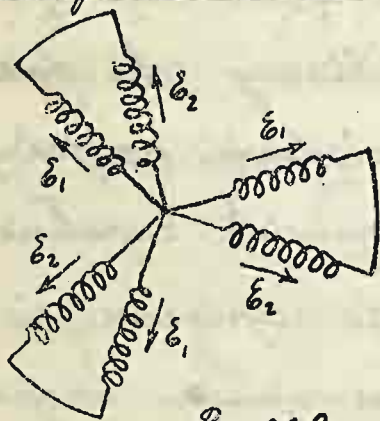
\*) Precyzyjnie, jak widać z poprzednich rozważań, ten moment może być kilkakrotnie większy od normalnego.

przez stojnik. Przez to prąd w stojniku nie powstaje zbyt duży (patrz poprzedni omówienie).

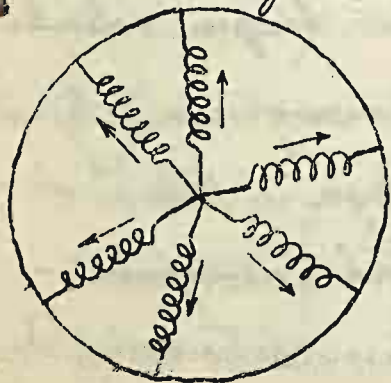
Dla uniknięcia ciągłego ślizgania się szczotek po pierścieniach, często stosuje się urządzenie, za pomocą którego można pierścienie spiąć na krótko a potem szczotki podnieść. -

Zamiast wprowadzania oporów można urządzić w wirniku dwa układy zwojnic, które przy rozruchu łączą się pomiędzy sobą w ten sposób, że siły elektromotoryczne w nich powstające przeciwdziałają sobie nawzajem, rys. 227, jednak zupełnie się z sobą nie równają, gdyż  $\mathcal{E}_1 > \mathcal{E}_2$ . -

Rys. 227. -



Rys. 228.



Przy biegu normalnym uzwojenia zawierane są na krótko tak jak to wskazuje.

rys. 228, wtedy każde z uzwojeń jest krótko zwarte i działają niezależnie od drugiego. -

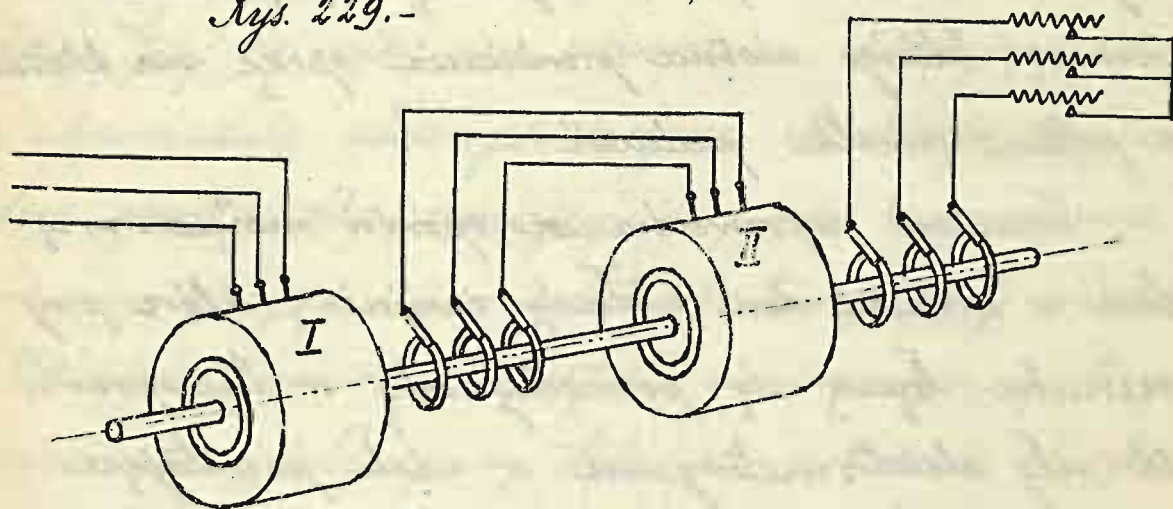
Przez przeciwdziałanie sobie w chwili rozruchu dwóch różnych sił elektromotorycznych osiągniemy taki sam rezultat jak gdybyśmy



wprowadzali do obwodu twornika spór dodatkowy. -

## Połączenie kaskadowe.

Rys. 229. -



W celu zmniejszenia liczby obrotów silników trójfazowych do połowy, stosuje się czasem sposób połączenia kaskadowego. Mamy tu dwa silniki, których wirniki są osadzone na jednym wale. Stojniki silników są nawinięte szeregowo jednakowo w przystosowaniu do napięcia sieci zasilającej. Wirniki mają rozwinięcia rozpatrywane w pierścieniu. Przy szybkim biegu silniki łączą się z siecią zwyczajnie; rozwinięcia stojników są połączone wtedy równolegle, tak że niezależne prądy płyną do tych rozwinięć. -  
Gdy bieg ma być zwolniony połączenie się

zamienia . rys. 229. Prąd doprowadza się tylko do stojnika silnika I-go, następnie wirnik I-go silnika przez pierścienie łączący się ze stojnikiem silnika II-go, a wirnik II-go łączy się, jak zwykle, przez spory. W tych warunkach wał obraca się z szybkością dwukrotnie mniejszą od poprzedniej.

Prędkość pierwszego silnika jest większą od  $\frac{n_p}{2}$ . W wirniku tego silnika powstaje prąd którego częstota odpowiada szybkości biegu pola względem wirnika, a więc  $(n_p - n_w)$ . Prąd ten w silniku II wytwarza pole wirujące, które wykonuje  $(n_p - n_w)$  obrotów na minutę; pod wpływem tego pola wirnik obraca się z szybkością  $n_w$ , jeżeliby tu prędkość była równa zero, to moglibyśmy napisać:

$$n_p - n_w = n_w$$

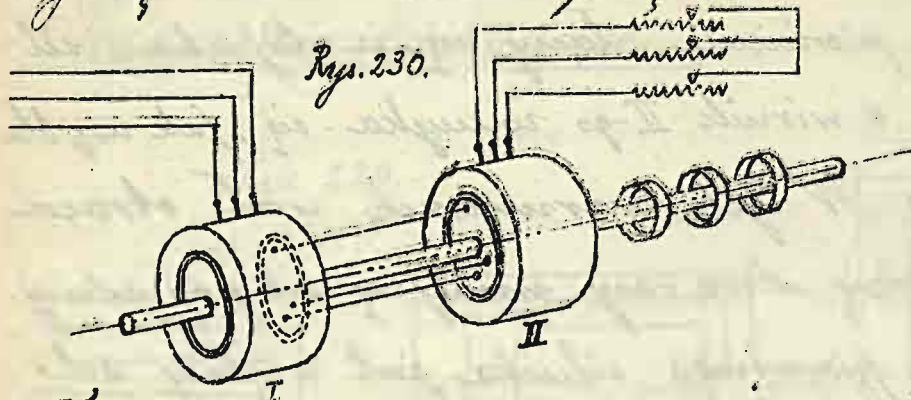
skąd  $n_w = \frac{n_p}{2}$

Skutkiem prędkości  $n_w < \frac{n_p}{2}$

W tych warunkach praca prądu obrotowego z sieci w połowie zamienia się w pracę mechaniczną w pierwszym silniku, a w połowie w drucian.



Dla zaszczędzenia jednej grupy pierścieni, stosuje się czasem układ połączeń wskazany na rys. 230.

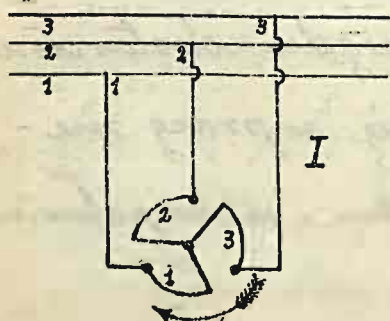


Tu uwojenie wirnika pierwszego jest połączone z uwojeniem wirnika drugiego. Uwojenie <sup>(stojnika)</sup> silnika drugiego jest zwarte przez opory. Jedną grupę pierścieni połączonych z uwojeniami wirników porostawiamy dla umożliwienia pracy silników przy dwóch szybkościach biegu. -

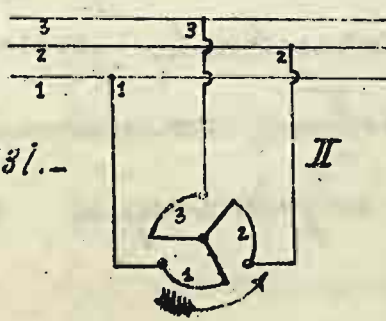
### Zmiana kierunku biegu. -

W silnikach trójfazowych zmiana kierunku biegu odbywa się nadwyczoj prosto przez wymianę połączeń dwóch dowolnych przewodników doprowadzających prąd do uwojenia stojnika. -

Na rys. 231 widzimy schematycznie pokazane połączenie

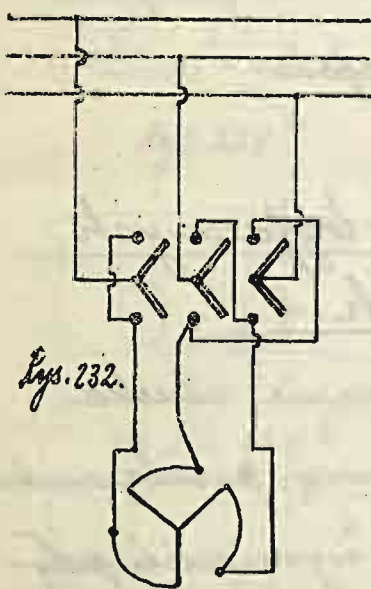


Rys. 231. -



uwojeń stojnika z siecią trójfazową w dwóch wypadkach.

Jak widać z rysunku, przez wymianę połączeń dwóch faz 2 i 3, kolejno biegną fazy zmieniając się. Maksymalne wartości prądu następują po sobie zawsze w kolejce 1. 2. 3, przez to więc pole stojnika obraca się w I wypadku, w kierunku ruchu wskazówki zegara, a w wypadku II w kierunku odwrotnym do poprzedniego. - Pole pociąga za sobą w odpowiednim kierunku wirnik. - W razie potrzeby dla szybkiego wykonania takiej zmiany połączeń stosuje się przełącznik trójbiegunowy wskazany na rys. 232. -

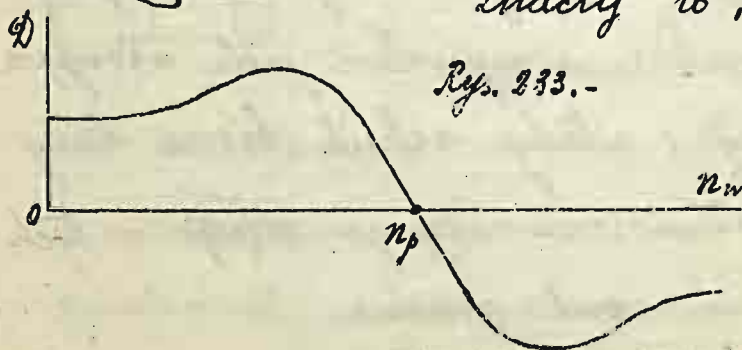


rys. 232.

### Silnik trójfazowy jako źródło prądu.

Z wyrazu matematycznego dla momentu obrotowego wirnika silnika widzimy, że przy  $n_s < 0$ , t.j. kiedy  $n_w > n_p$  rys. 233, moment obrotowy staje się ujemnym. Znacząco to, że silnik przeciw-

Rys. 233. -



stawia pewien opór zewnętrzny momentowi obrotowemu, za pomocą



którego obracamy silnik z szybkością przewyższającą szybkość synchroniczną  $n_p$ . W tych warunkach silnik staje się źródłem energii w nim praca mechaniczna zamienia się na pracę prądu. Zauważyć jednak należy, że tego rodzaju działanie silnika może się odbywać tylko wtedy, gdy sieć, do której jest przyłączony silnik, zasilała jest jednocześnie prąd prądu z elektromagnesowemu, które magnesują się prądem stałym. Taka prądnicą jest niezbędna, aby silnikowi asynchronicznemu, działającemu jako źródło prądu, dostarczać prądu dla magnesowania jego obwodu magnetycznego.

### Hamowanie biegu silników trójfazowych asynchronicznych.

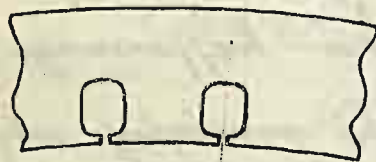
Gdy chodzi o szybkie zachamowanie silnika, to można na chwilkę, za pomocą przełącznika wskazanego na rys. 232, szybko wymieścić połączenia dwóch drutów i wywołać pole wirujące w odwrotną stronę; wtedy silnik bierze duży prąd z sieci, nie można więc go długo w tych warunkach trzymać pod prądem. -

Inny rodzaj hamowania można zastosować, gdy silnik porusza np. tramwaj. - W tym wypadku gdy tramwaj zjeżdża z góry, można pozostawić połączenie silnika z siecią i wtedy przy szybkościach przewyżniających synchroniam, silnik będzie hamował bieg tramwaju działając jako źródło prądu.

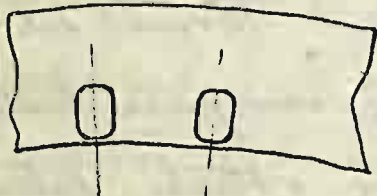
## Budowa silników asynchronicznych trójfazowych.

Stojnik silników składa się z pierścienia ułożonego z blaszek żelaznych z rowkami na powierzchni zewnętrznej. - Pierścień ten umocowuje się w oprawie z litej stali lub żelaza. Rowki silników mają

Rys. 234<sup>a</sup>



Rys. 234<sup>b</sup>

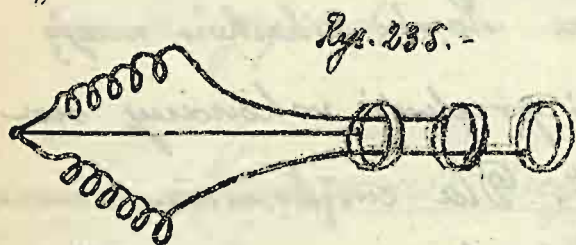


zewnętrzny przekrój wskazany na rys. 234<sup>a</sup>. Dla zwiększenia samoindukcji w stojniku robią się czasem zamiast rowków otwory rys. 234<sup>b</sup>, umieszczone bardzo blisko do wewnętrznej powierzchni pierścienia. Zwiększenie samoindukcji jest potrzebne dla zmniejszenia prądu biegu luźnego. -

Utworzenie stojnika robi się takie jak w prądnicach prądu zmiennego, również rabinie.



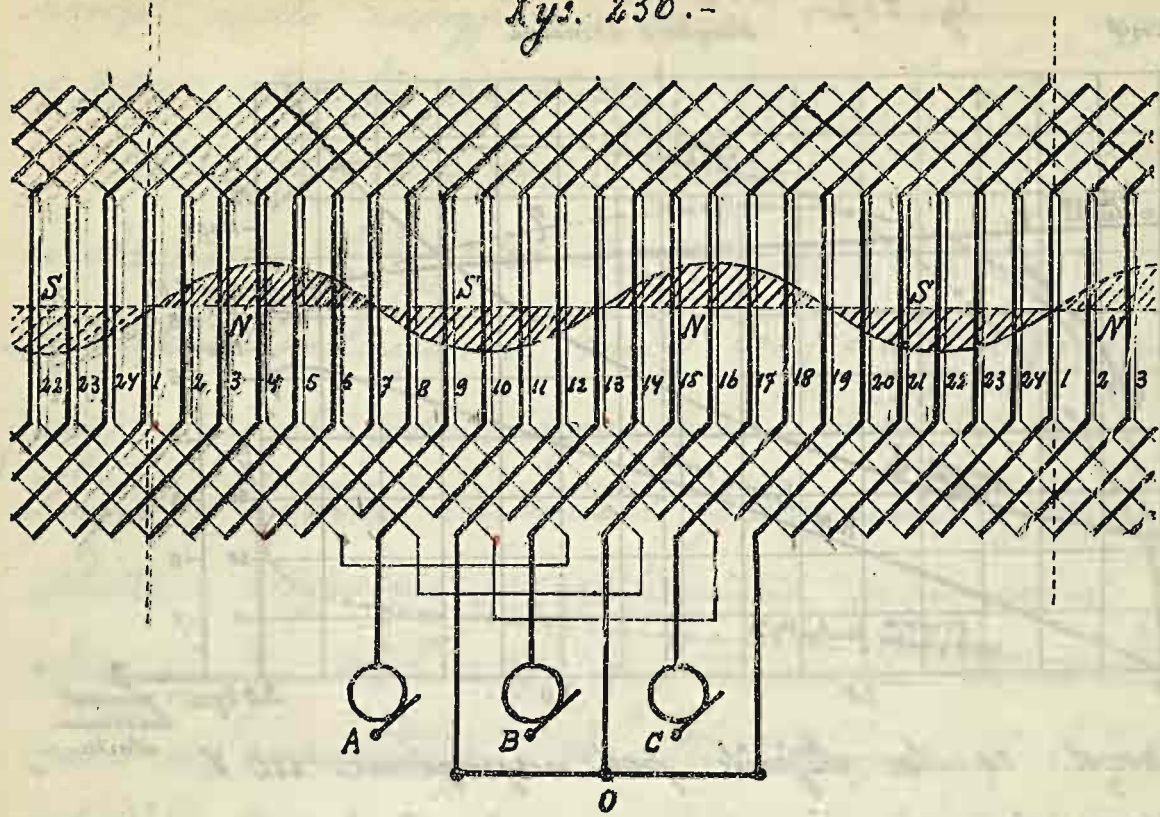
zależnie od liczby biegunów i napięcia prądu  
zasilającego stojnik. Uwojenie wirnika zwy-  
czaj jest także trójfazowe o tej samej liczbie  
biegunów co uwojenie stojnika, ale liczba i  
grubość drutów najczęściej przystosowuje się do  
niższego napięcia, które wreszcie może być  
strane dowolnie tak, aby najdogodniej było  
wykonać nawinięcie i w razie potrzeby zbud-  
ować opornik do regulowania prądu w wirniku.  
Proszę dla uproszczenia uwojenia stosuje  
się uwojenie dwufazowe z trzema pierścieniami  
rys. 235.-



Na rys. 236 pokazany  
jest przykład uwojenia  
wirnika trójfazowego

złożonego ze słabek potężnych pomiędzy sobą  
miedzy określonego skoku. Potężenie poszczególnych  
faz jest tu wykonane w gwiazdę. - Wirniki sil-  
ników małych mają najczęściej uwojenie krótko-  
warte. Rdzeń wirnika robi się z blach. Polwki  
lub kanały są takie same jak na stojniku. -  
Szereźnia pomiędzy stojnikiem i wirnikiem robi  
się tak małą, jak tylko na to pozwalają warunki

Rys. 236.-

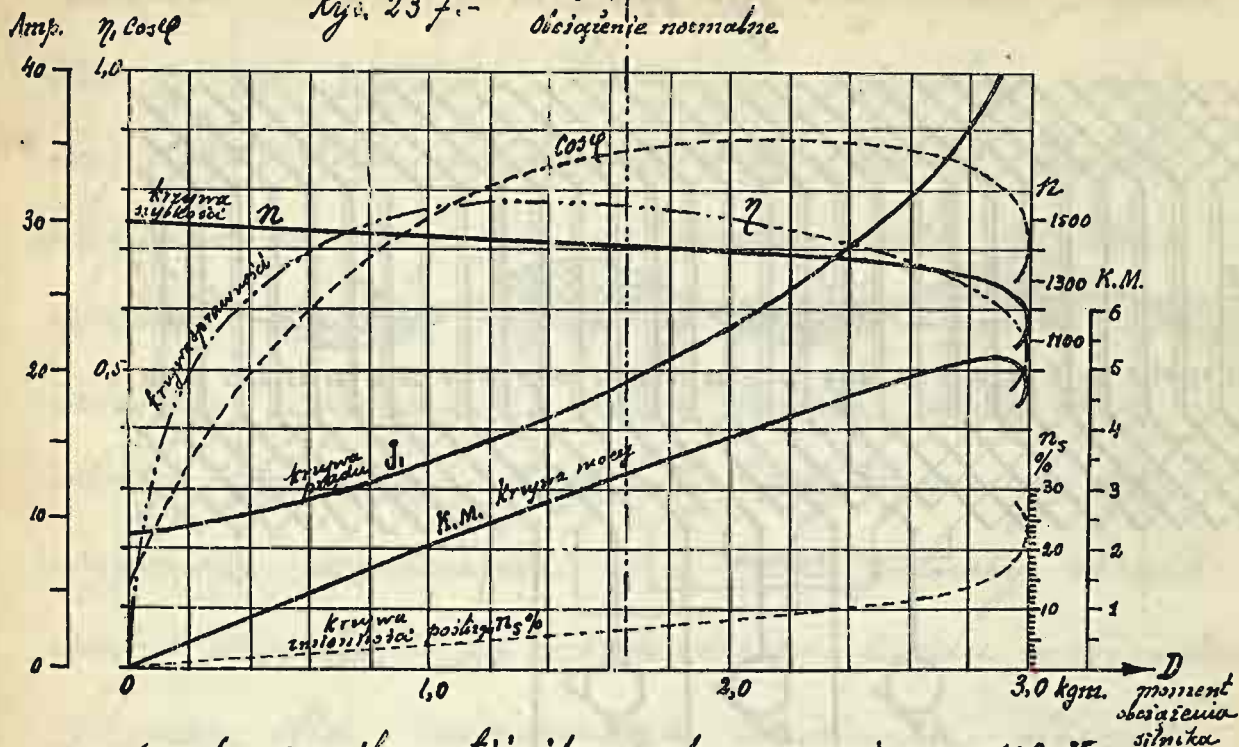


mechaniczne. Jest to niezgodne ze względu na zmniejszenie strumienia magnetycznego rozproszonego.-

### Charakterystyki silnika trójfazowego.-

Najważniejsze cechy działania normalnie zbudowanego silnika najlepiej się wydają na wykresach. Na rys. 237 mamy krzywe wyrażające rozmaite wielkości w zależności od momentu obciążenia silnika  $P$ . (Moment maksymalny wynosi 3 kgm.) Silnik ten jest zbudowany na normalnie obciążenie 3,5 toni mechanicznych.





a prąd zasila stojnik pod napięciem 110 V.  
Szybkość biegu silnika przy obciążeniu stopniowo  
zmniejsza się, tak że przy obciążeniu normal-  
nym wynosi około 1420 obrotów :-

$$1500 - 1420 = 80$$

co stanowi 5,3% od 1500. Gdy obciążenie przewyższa  
3 kgm. prędkość biegu szybko spada do zera.  
Zmierzoność poślizgu  $n_s = n_p - n_n$  wskazana jest  
za pomocą krzywej  $n_s$ . - Na średnią wartość  
zastępuje dalej  $\cos \varphi$ , wyrażający stosunek mocy  
nieczynnej do mocy pozornej prądu zasilającego  
stojnik. Przy biegu luzem, gdy  $D=0$ ,  $\cos \varphi = 0,16$ ,  
przy tak małym współczynniku mocy silnik trój-  
fazowy przy biegu luzem pochłania z sieci

bardzo mało energii nie bawąc na znacny prąd:  
 ~ 8 kwp., Moc ta wyniesie:

$$\sqrt{3 \cdot 110 \cdot 8 \cdot 0,16} = 244,2 \text{ watów.}$$

co stanowi:  $\frac{244}{351786} \cdot 100 = 9,5\%$  od 3,5 k.m.

Największy współczynnik mocy  $\cos \varphi = 0,88$  otrzymujemy przy obciążeniu wynoszącemu około 2,2 kwp..

Krywa  $\eta$  wyraża zmienność współczynnika sprawności silnika. Największy współczynnik sprawności otrzymujemy około 0,77 przy obciążeniu nieco mniejszym od nominalnego. Po prostu krzywe  $\underline{\eta}$  i  $\underline{k.m.}$  wskazują wzrost prądu, wciągającego stojnik i mocy pożytecznej wyrażonej w koniach mechanicznych.

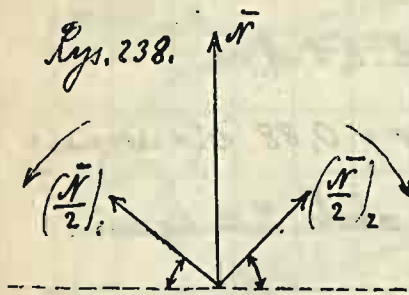
### Silniki asynchroniczne jednofazowe.

Jeżeli stojnik silnika trójfazowego asynchronicznego nawinąć jednofazowo, to otrzymamy silnik jednofazowy asynchroniczny. Gdy wirnik takiego silnika stoi, to pole wytworzone przez prąd w stojniku jest nieruchome, ono zmienia tylko swój zwrot tyle razy na sekundę, ile razy na sekundę zmienia się kierunek prądu. - Skutkiem tego pola w uwójce wirnika powstają prądy indukcyjne, ale układ ich wypadkowy jest



taki, że żaden moment kręjący nie może się wytworzyć, siły oddziaływania pola stojnika na prądy w wirniku znoszą się.

Rys. 238. Chcąc zdać sobie sprawę z działania siłnika jednofazowego można rozłożyć pole magnetyczne wirnika dwoma polami wirującymi.



Określimy amplitudę strumienia tego pola wirującego przez  $\bar{N}$ , wtedy pole to można uważać jakosumę dwóch pól wirujących w przeciwnie strony o amplitudach  $\frac{\bar{N}}{2}$ . Ruty tych pól na kierunku poziomym zawsze znoszą się, a rut na kierunku pionowym będzie:

$$\left(\frac{\bar{N}}{2}\right)_1 \sin \alpha + \left(\frac{\bar{N}}{2}\right)_2 \sin \alpha = \left[\left(\frac{\bar{N}}{2}\right)_1 + \left(\frac{\bar{N}}{2}\right)_2\right] \sin \alpha = \bar{N} \sin \alpha$$

Jeżeli pola obracają się jednostajnie i jeden obrót odbywa się w ciągu  $T$  sekund, to

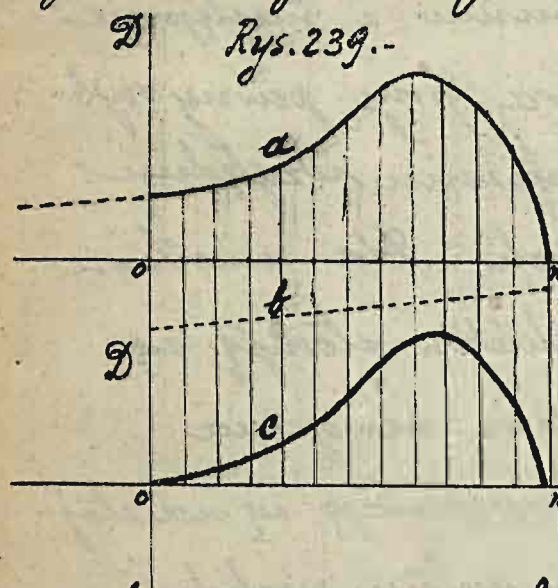
$$\alpha = \frac{2\pi t}{T}$$

Wtedy suma rutów strumienia magnetycznych wirujących wyraża się wzorem:

$$\bar{N} \sin \frac{2\pi t}{T}, \text{ (który)} \text{ wyraża więc strumień wirującego pola magnetycznego.}$$

Moment obrotowy silnika można znaleźć, odejmując od siebie momenty kręjące wywołane powiększeniem wirującego strumienia magnetycznego.

Z rozważań powyższych widzimy, że wtedy, gdy wirnik stoi, momentu kręącego nie ma, ponieważ składowe pola wywołują dwa momenty, działające w strony odwrotne. Silnik więc sam z miejsca nie rusza. Jeżeli jednak za pomocą siły pomocniczej wprowadzić wirnik w ruch, chociaż niebył szybki, to moment kręący powstaje w tę właśnie stronę, w którą wirnik był obrócony. Na rys. 239 linja a wyraża za-



leżność od szybkości biegu wirnika biegu wirnika tego momentu kręącego, który został wywołany przez pole magnetyczne składowe, obracające się w kierunku

ruchu wirnika. Linja b wyraża zależność od szybkości tego momentu kręącego, który

Elektrotechnika, arkusz 21.-



-322-

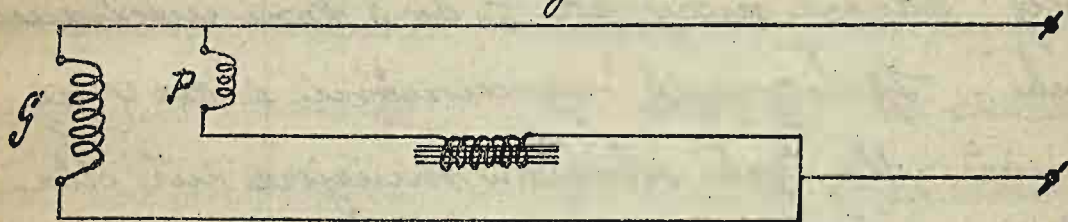
zostāt wywołany przez pole składowe, obracające się w stronę przeciwną do ruchu wirnika. Miłośkość tego momentu łatwo znaleźć, zakładając we wzorze momentów podanym dla silnika trójfazowego  $n_s$  i  $n_p$  i przedstawiając linij momentów (a) za os  $D$  w lewo. -

Prędkość linij (b) są ujemne, gdyż wyraża ona zmniejszenie momentu kręcącego działającego wstecz. - Suma algebraiczna momentów, wyrażonych linijami (a) i (b) stanowi całkowity moment obracający silnika. - Z kształtu krzywej (c) widzimy, że przy zwiększaniu się szybkości biegu wirnika, moment kręcący rośnie do pewnego maximum i następnie znowu zmniejsza się do zera przy pewnej szybkości mniejszej od synchronizmu względem składowych pól wirujących. Dla umożliwienia rozruchu takich silników stosują się metody dodatkowe rozruchowe nawożenia.

Dodatkowe nawożenia umieszczają się na stojniku w położeniu przesuniętem względem nawożeń głównych o ćwierć odległości pomiędzy jedynymi biegunami głównego pola.

Przez dodatkowe uwrojenie przebiega prąd tak zwanej pomocniczej fazy, który za pomocą samoindukcyi, albo pojemności, jest wstecz albo napród przesunięty w fazie względem prądu głównego. - Gdy stosuje się prąd pomocniczy wypędzający prąd główny, to działanie o charakterze pojemnościowym otrzymuje się przypuszczając prąd przez elektrolit, wtedy siła elektromotoryczna polaryzacji ma wpływ podobny jak siła elektromotoryczna kondensatora. Układ połączeń przy zastosowaniu samoindukcyi wskazany jest na rys. 240. -

Rys. 240



Prądy : główny i pomocniczy wytwarzają pole wirujące zmienne, które wprowadza w ruch silnik w pierwszej chwili przy ruszeniu z miejsca. - Gdy szybkość biegu silnika wzrośnie dostatecznie, dodatkowe uwrojenie często wyłącza się, - można jednak go i zostawić w obwodzie o ile przy braku silnika



- 324 -

-było to przewidziane. -

Chcąc zmienić kierunek biegu silnika jednofazowego, trzeba poruszyć go w odwrotną stronę. Jeżeli jest uwójcień dodatkowy, to należy zmienić kierunek prądu (wymienić druty doprowadzające prąd) w uwójcień dodatkowy lub też w główny. -

Budując się silniki jednofazowe w podobny sposób jak trójfazowe. Wirnik może posiadać uwójcień krótko wartę lub też z pierścieniami. Dla tej samej mocy silniki jednofazowe mają ciężar o 50% większy od silników trójfazowych. Używają się więc zwykle tylko jako silniki małej bardzo mocy od  $\frac{1}{20}$  do 3 koni mechanicznych. - Spółczynnik sprawności i cos  $\varphi$  są również dla tych silników mniejsze niż dla silników trójfazowych tej samej mocy. -

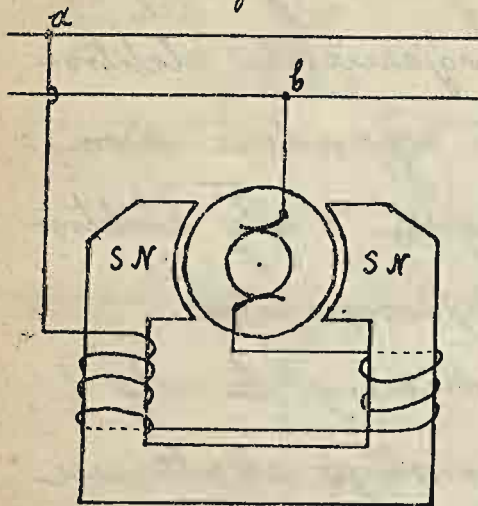
### Silniki prądu zmiennego z kolektorem. -

Jest kilka układów połączeń stosowanych przy silnikach tego rodzaju. -

Silnik prosty neregulowy. Na rys. 241 widzimy

układ połączeń silnika szeregowego. Budowa twornika jest taka sama jak przy prądzie stałym, tylko

Rys. 241. -



rdzenie elektromagnesów musi być wykonane z cienkich blach żelaznych dla osłabienia prądów wirowych. -

Prąd przepływający zmienny, więc kierunek jego zmiennia się jednocześnie w tworniku i w

elektromagnesach, a przez to kierunek momentu obrotowego pozostaje stały. - Przy wykonaniu tego rodzaju silników wypada jednak zwrócić uwagę na niektóre szczegóły budowy dla osiągnięcia dobrej sprawności silnika szeregowego, czyli uniknięcia iskrowania szczotek. - Ze względu na zmiennosc pól magnetycznych w tworniku i w elektromagnesach tam powstają prądy wirowe i straty skutkiem histerezy; tych strat w silnikach stałego prądu nie ma. Dla uniknięcia strat mierzy stosuje się prąd zmienny o mniejszej liczbie okresów na sekundę niż dla oświetlenia, a więc np. 15 lub 25.

\*) Przy większym  $\cos \varphi$ , ta sama moc prądu otrzymujemy przy mniejszej sile prądu. -

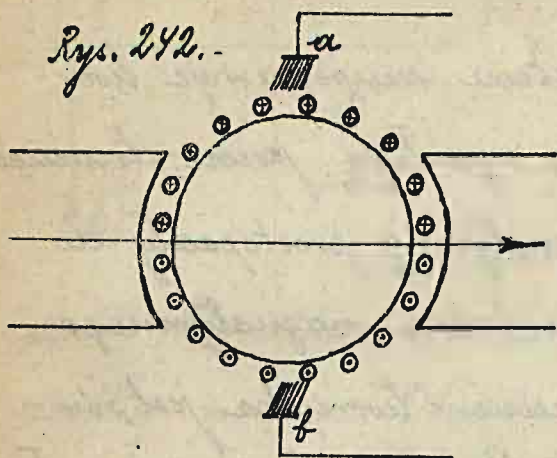


Aby zdać sobie sprawę z wielkości współczynnika mocy prądu dopływającego do silnika, trzeba rozważyć te siły elektromotoryczne, jakie powstają w tworniku i w nawojeniach elektromagnesów. - Wyróżnić tu wypadnie dwa rodzaje sił elektromotorycznych: siły elektromotoryczne statyczne i dynamiczne. -

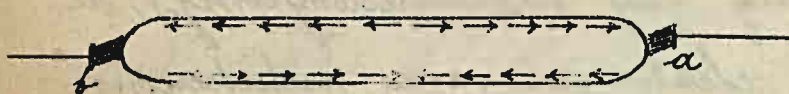
Statycznemu nazywać będziemy te siły elektromotoryczne, które powstają skutkiem zmienności pola magnetycznego, zachowującego niezmieniony kierunek w przestrzeni, dynamicznemu zaś takie, które powstają skutkiem ruchu przewodników twornika w polu magnetycznym. Strumień magnetyczny zmieniający wywołany przez prąd w elektromagnesach wywołuje siły elektromotoryczne  $\mathcal{E}_m$  w nawojeniach elektromagnesów. Statyczna siła elektromotoryczna wywołana przez ten strumień w tworniku będzie  $= 0$ , gdyż siły elektromotoryczne powstające w drutach twornika będą miały kierunek wskazany na rys. 242. Suma takich sił w obwodzie prądu przepływającego przez szczotki, będzie równa zero,

ponieważ siły elektromotoryczne powstające w poszczególnych drutach znoszą się jakto wskazuje rys. 243 przedstawiający rozwinięte nawinięcie twornika.

Rys. 242.



Rys. 243

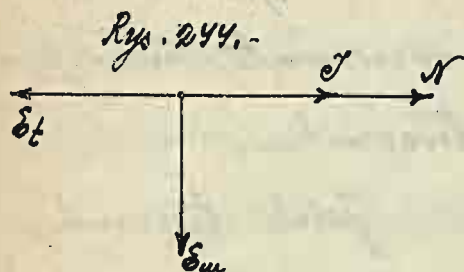


Jeżeli twornik obraca się, to powyższe pole wywoła siły elektromotoryczne dynamiczne w

zwojach twornika także są one jak w silniku prądu stałego, to siła elektromotoryczna będzie odwrotna do prądu w tworniku. Dużymy tę siłę przez  $\mathcal{E}_f$ , ona jest okresowo zmieniająca, ponieważ zmienia się pole, które ją wywołuje. Chcąc wyrzucić rozwinięte siły elektromotoryczne wektorami, należy uprzytomnić sobie, że pomijając wpływ prądów wirowych i histerezy, prąd  $\mathcal{I}$  jest w fazie z polem, które wywołuje. Siła elektromotoryczna  $\mathcal{E}_m$ , jak każda siła elektromotoryczna indukcji spóźnia się w fazie o ćwierć okresu.

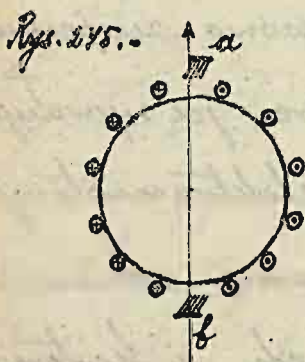


Sila elektromotoryczna dynamiczna w tworniku jako przeciwna prądowi spełnia się w fobie o ( $180^\circ$ ) pół okresu, rys. 244.



Poza tem szeregowo twornika wywołują jeszcze strumień magnetyczny prostopadły do strumienia magnetycznego

elektromagnetyczn. - Ten strumień twornika jest również w fobie z prądem; strumień ten niewywołuje żadnej wypadkowej siły elektromotorycznej, <sup>Dynamicznej</sup> on wzniessa tylko siłę elektromotoryczną indukcyjną statyczną, ponieważ jest zmiennej i wywołuje w poszczególnych drutach takie siły elektromotoryczne, jak wskazało na rys. 245. Te siły elektro-

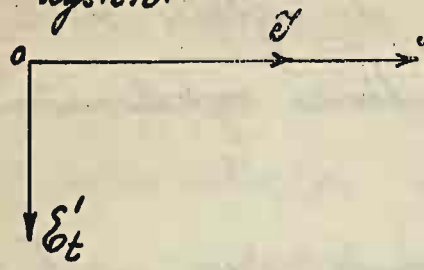


motoryczne, jak wiemy z teorii prądu prądu stałego, dają pewną wypadkową w obwodzie prądu płynącego przez szrotki. Jak każda siła elektromo-

toryczna indukcji, powstająca pod wpływem zmiennego pola, ona będzie przemieniała o ćwierć okresu wstecz względem strumienia magnetycznego, a więc i prądu. Na rys. 246

wskazany jest wektor tej siły elektromotorycznej, oznaczonej przez  $\mathcal{E}_t'$ . Prosto! w tworniku i w

Rys. 246.-



elektromagnesach jest ten sam, więc oznaczając przez  $\mathcal{E}$  napięcie na zaciskach a b rys. 248 a przez  $r_1$  i  $r_2$

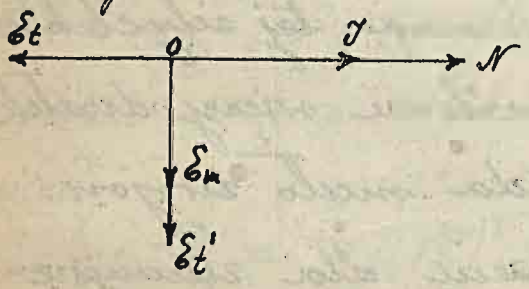
opory twornika i elektromagnesów, otrzymamy według prawa Ohma:

$$\mathcal{I}_t = \frac{\mathcal{E}_t + \mathcal{E}_{um} + \mathcal{E}_t + \mathcal{E}_t'}{r_1 + r_2}$$

Stąd:  $\mathcal{E}_t = \mathcal{I}_t(r_1 + r_2) - \mathcal{E}_{um} - \mathcal{E}_t - \mathcal{E}_t'$

Wyróżając odpowiednie wielkości wektorami i mając na względzie poprzednie rys. 244 i 246 otrzymamy z rys. 247 i trójkąt rys. 248, który wyrazi powyższe równanie.

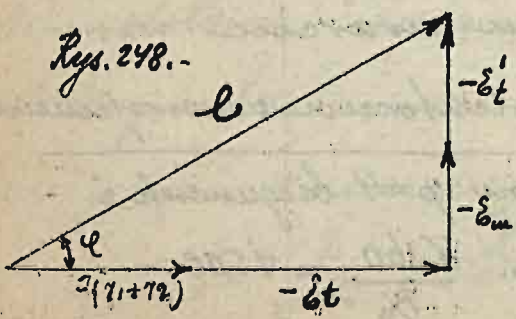
Rys. 247.-



Z tego trójkąta widzimy, że cos. kąta  $\varphi$ , wyrażający różnicę faz pomiędzy  $\mathcal{E}$  i  $I$  może być wyrażony wzorem:

$$\cos \varphi = \frac{\mathcal{I}(r_1 + r_2) + \mathcal{E}_t}{\mathcal{E}}$$

Rys. 248.-



Dynamiczna siła elektromotoryczna w tworniku  $\mathcal{E}_t$



jest proporcjonalna do szybkości obrotu twornika, więc cos  $\varphi$  wypada tym większy im szybkość obrotu będzie większa. Zwykle stosuje się szybkość obrotu podwójną w porównaniu do szybkości synchronicznej \*)

Mala ilość okresów na sekundę daje małe wielkości dla  $\varepsilon'_t$  i  $\varepsilon_m$ , co również wpływa na zmniejszenie kąta  $\varphi$ .

Na negolną wzmiankę zasługuje jeszcze sprawa iskrenia węzłok. Oprócz czynników rozważonych przy sytuacjach prądu stałego mamy tu jeszcze siłę elektromotoryczną indukcji, która powstaje w krótkorazowych, przez węzłoki, zwojniciach twornika skutkiem zmiany strumienia magnetycznego objętego przezwoje tej zwojnicy. Dla zmniejszenia tej siły elektromotorycznej stosujemy możliwie więcej dwiatek kolektora, przez co wypada mało zwojów w jednej zwojnicy. - Czasem dla zmniejszenia prądu przy krótkim zwarcie wprowadzają się pomiędzy kolektorem i uwrojeniem

---

\*) Synchroniczna szybkość przy  $p=4$  biegunach i  $f=50$  okresach na se. wynosi np.  $\frac{4 \cdot 60}{\frac{p}{2}} = 1500$ .

opory dodatkowe. W tym celu również stosuje się jakuożywniejszą częstotliwość zmiennego prądu.

Moment obrotowy silnika.

Opierając się na wzore podanym na str. 217 dla silników zasilanych prądem stałym, możemy wyrazić moment obrotowy rozważanego silnika w pewnej chwili  $t$  wzorem:

$$D_t = K_1 \cdot N_t \cdot I_t$$

$$I_t = \bar{I} \cdot \sin \frac{2\pi t}{T} \quad i \quad N_t = N \cdot \sin \frac{2\pi t}{T}$$

niech:

$$D_t = K_1 \cdot N \cdot \bar{I} \cdot \sin^2 \frac{2\pi t}{T}$$

Oznaczmy maksymalny moment przez

$$\bar{D} = K_1 \cdot N \cdot \bar{I}$$

wtedy:

$$D_t = \bar{D} \cdot \sin^2 \frac{2\pi t}{T}$$

$$\text{albo: } D_t = \left( \sqrt{\bar{D}} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi t}{T}$$

Sredni moment obrotowy niech będzie  $D_s$ ,

wtedy:

$$D_s = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sqrt{\bar{D}} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi t}{T} dt$$

Na podstawie znanej zależności pomiędzy maksymalną wartością, a średnią z kwadratów prądu zmiennego sinusoidalnego wypadła:

$$D_s = \frac{\bar{D}}{2} = \frac{K_1 \cdot \bar{I} \cdot N}{2}$$



-332-

Przewodząc wartość czynną dla  $I$  za-  
miast maksymalnej, otrzymamy:

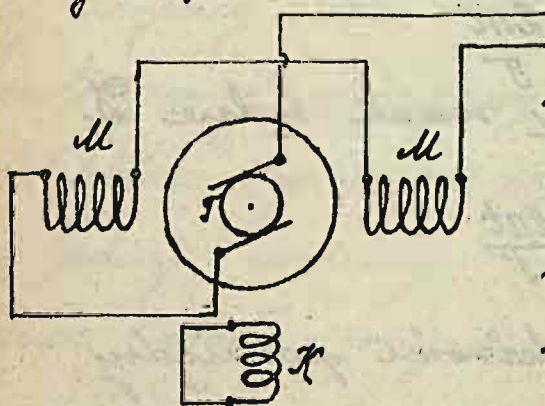
$$D_s = \frac{K_1}{\sqrt{2}} \cdot I \cdot \bar{N}$$

Przyjmując, że  $I$  i  $\bar{N}$  mają taką samą lic-  
bową wartość jak  $I$  i  $N$  przy prądzie statym,  
znajdujemy, że przy prądzie zmiennym sil-  
nik ma moment obrotowy o 30% mniejszy.  
 $\bar{N}$  jest przy niewielkieu nasyceniu magne-  
tycznem proporcjonalne do  $I$ , więc moment  
 $D_s$  zmienia się z prądem tak samo  
jak w silniku zasilanym prądem statym.

### Silnik szeregowy skompensowany. -

W celu zmniejszenia samoindukcyi w twor-  
niku stosują się czasem zwoje kompensu-

Rys. 249.-

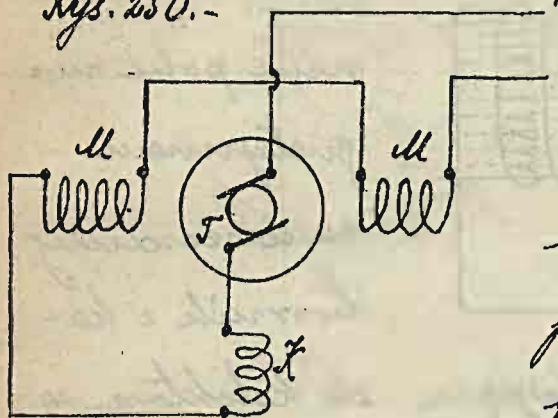


jace. Są dwa rodzaje  
silników ze zwojami  
kompensacyjnymi. Na  
rys. 249 wskazany jest  
układ potężniejszy, gdzie  
zwoje kompensacyjne są  
krótko zwarte i stanowią

zwoje wtórne transformatora. W zwojach tych  
powstaje przez indukcję prąd przeciwny

w faze mniejszej o pół okresu względem prądu twornika skutkiem czego prąd ten stabilizuje znacznie strumień magnetyczny wytworzony przez cewki twornika.

Rys. 250.-



Drugi układ połączeń widniwy na rys. 250. Tutaj przez cewkę kompensacyjną przepływa prąd główny.

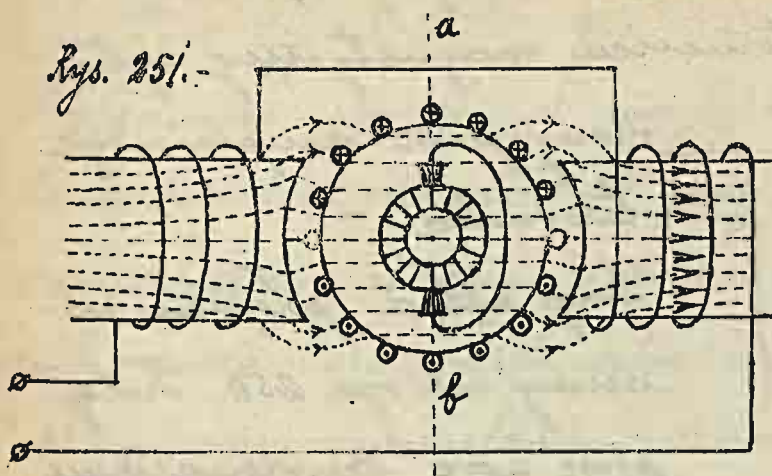
Na obydwóch rysunkach  $T$  oznacza twornik,  $M$   $M$  - cewki elektromagnesów,  $K$  - cewka kompensacyjna. - Tego rodzaju silniki nie mają wydających biegunów. Ułożenie  $M$   $M$  i  $K$  jest umieszczone w rowkach na powierzchni wewnętrznej pierścienia utworzonego z cienkich blach żelaznych takiego kształtu jak w silnikach asynchronicznych poprzednio rozważanych. - Właściwości silników tego rodzaju są wogóle takie same jak silników zwykłych szeregowych, mają one tylko nieco mniejszy kąt  $\varphi$ , a więc większy  $\cos \varphi$  i mniej w nich iskry szczotki. -



# Silniki repulsyjne. - 334 -

Prąd doprowadzamy w tych silnikach tylko

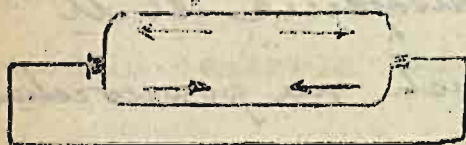
Rys. 251.-



do elektromagne-  
sów. Wznie-  
nem polu ma-  
gnetycznem  
umieszczamy  
twornik z ko-

lektorem. Szrotki przylegające do kolektora są  
krótko zwarte rys. 251. Jeżeli szrotki znajdują  
się na linii obojętnej a b, to wtedy całe  
umwienie dzieli się na dwie połowy wten

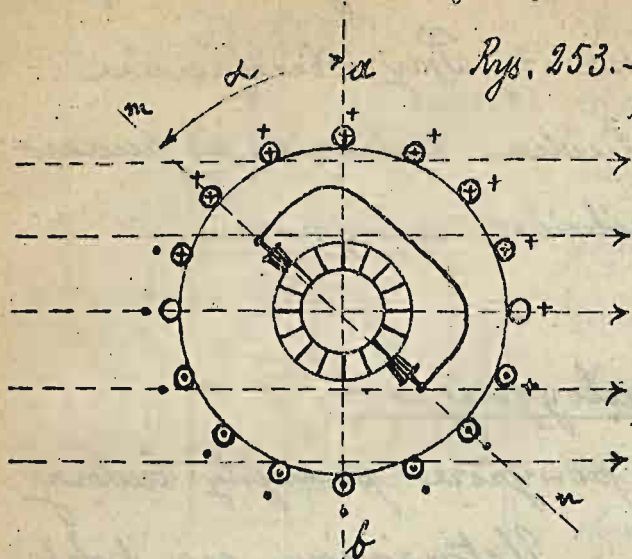
Rys. 252.-



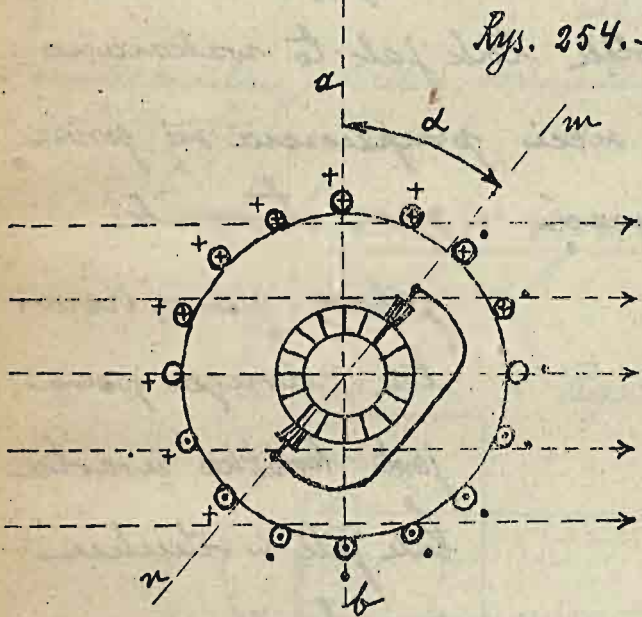
zposób jak wskazało na  
rys. 252. Siły elektromoto-  
ryczne wywołane przez

indukację wznieuszego pola w poszczególnych  
drutach będą miały w pewnej chwili kie-  
runki takie jak wskazało na rys. 252. Wy-  
padkowa tych elektromotorycznych sił w  
każdej połowie równa się zero, więc prądu  
w tworniku nie będzie. - Jeżeli jednak obro-  
cić szrotki o pewien kąt  $\alpha$  od linii obo-  
jętnej ab do mn, to wtedy inny będzie

układ drutów w gateriach równoległych



Rys. 253.-



Rys. 254.-

twornika i siły elektromotoryczne nie równoważą się zupełnie. - Kierunki sił elektromotorycznych w pewnej chwili w poszczególnych drutach wskazane są na rys. 253 i 254. krzyżkami i punktami wewnątrz kółek. - Kierunki prądów wskazują krzyżki i punkty zewnątrz kółek.

Z układu tych prądów widzimy, że działanie pola magnetycznego na te prądy daje pewien moment kręzący. - Jeżeli obrócimy szrotki w stronę przeciwną od linii obrotowej rys. 254, to układ prądów będzie odwrotny i moment kręzący zmieni swój kierunek. W skutkach repulujących łatwo jest rozpoznać





wtórnej wojnicy transformatora.

W ten sposób daje się regulować szybkość

Rys. 255. - bieg silnika, która przy wyższym napięciu będzie większa. Ten prąd doprowadzi się z sieci przez zaciski a b. Tego rodzaju silniki biegną bez wielkiego istnienia przy znacznej częstotliwości zmiennego prądu (50 i 60 okresów na sek.) mogą duży współczynnik mocy i mogą być budowane z

szeroką szerokością powietrzną, co umożliwia stosowanie ich do napędu kolei elektrycznych. -

## Silniki synchroniczne.

Silniki synchro-

Rys. 256. -

nierne są zwykłe-

mi prądnicami

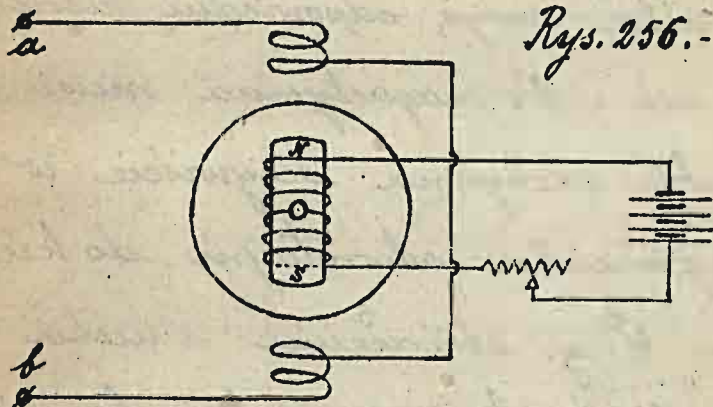
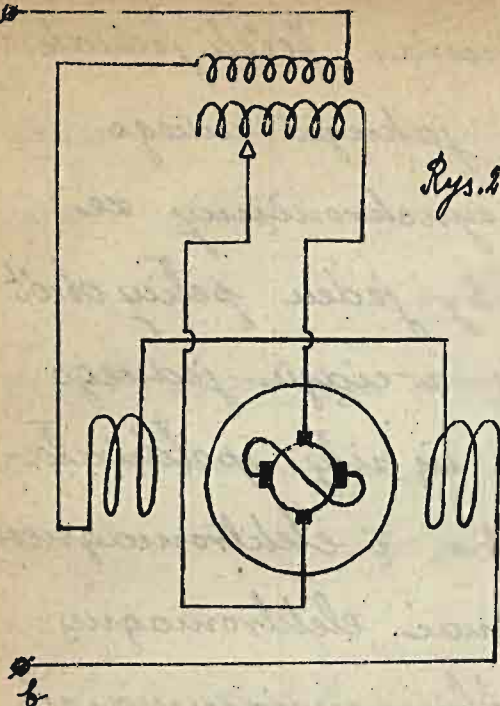
prądu zmiennego,

działającymi jako

silniki. - Gdy ma-

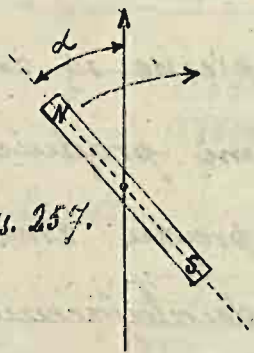
my układ jednofazowy rys. 256 i zasiliamy stojnik przez zaciski a i b prądem zmiennym, to łatwo spostrzedz, że zmiennne pole stojnika nie może wprawić w ruch nieruchomego elektromagnesu zasilanego prądem stałym. -

Elektrotechnika, arkusz 22. -





Silnik z miejsca samej nie rusza. Jeżeli jednak elektromagnes ten za pomocą jakiegoś innego silnika wprowadzimy w ruch synchroniczny ze zmiannością prądu tak, aby jeden pełny obrót elektromagnesu odbywał się w ciągu jednego okresu prądu, to wywierają się siły współdziałania pola zmieniającego stojnika i elektromagnesu; one będą starały się utrzymać elektromagnes w synchronicznym biegu. Dla wywiązania się tych sił jest rzecz konieczną, aby oś magnesu tworzyła pewien kąt  $\alpha$  rys. 257 w chwili, kiedy



Rys. 257.

linje magnetyczne pola stojnika mają odpowiedni kierunek. Oś magnetyczna musi być odchylona oczywiście w kierunku odwrotnym do kierunku

ruchu. - Przy obciążeniu silnika synchronicznego szybkość biegu pozostaje bez zmiany, tylko kąt  $\alpha$  się zwiększa. Największy moment kręjący otrzymujemy wtedy, gdy kąt ten równa się  $90^\circ$ . Przy dalonym wzroście obciążenia silnik zatrzymuje się. Podobne własności ma również silnik trójfazowy. -

Szybkość biegu silnika synchronicznego jest związana z liczbą okresów prądu zmiennego,asilującego silnik, wzorem:

$$n = \frac{\gamma \times 60}{p_2}$$

Jeżeli prądnicą dostarczającą prądu do silnika obraca się z szybkością  $n'$  to:

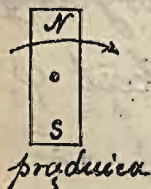
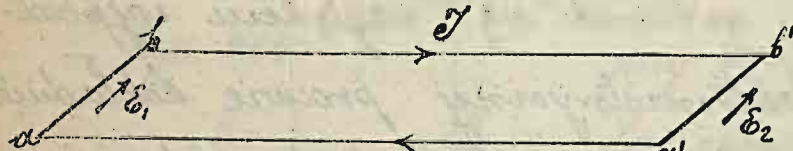
$$\gamma = \frac{n' \times \frac{p'}{2}}{60}$$

Z tych dwóch równań wypada:

$$n = \frac{n' \times \frac{p'}{2}}{60} \times \frac{60}{\frac{p_2}{2}} = n' \times \frac{p'}{p}$$

albo:  $\frac{n}{n'} = \frac{p'}{p}$

Rozważmy jeszcze niektóre szczegóły działania silników synchronicznych.



Rys. 258.



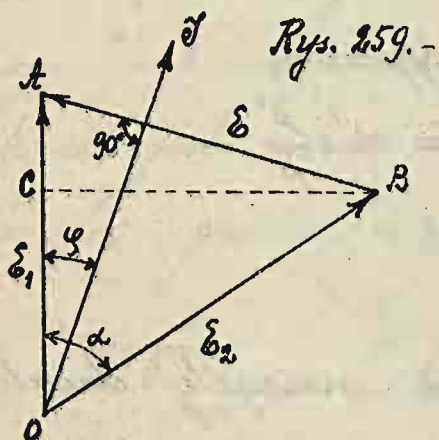
Na rys. 258 mamy schematycznie przedstawiony obwód składający się

z drutów prądnic  $a$  i  $b$  i silnika  $a'$  i  $b'$ , a zowarane są elektromagnesy w tych maszynach obracające się w jedną stronę z jednakową szybkością. - W drutach silnika powstaje



sila elektromotoryczna  $\mathcal{E}_2$ , a w drutach prąd-  
nicy  $\mathcal{E}_1$ ; wypadkowa sila elektromotoryczna wy-  
wołuje prąd w obwodzie  $\mathcal{I}$ . -

Elektromagnes silnika odchylony jest o  
pewien kąt  $\alpha$  od odpowiedniego polozenia elektro-  
magnesu prądnic, więc pomiędzy silami  
elektromotorycznymi  $\mathcal{E}_1$  i  $\mathcal{E}_2$  jest różnica faz  $\alpha$



rys. 259. -

Gdy  $\mathcal{E}_1$  i  $\mathcal{E}_2$  wyrażają  
się wektorami  $\underline{OA}$  i  $\underline{OB}$ ,  
to wypadkową siłę elektro-  
motoryczną wyraża wektor  
 $\underline{AB}$ . -

Ze względu na bardzo mały opór omicowy  
obwodu, prąd spóinia się względem wypad-  
kowej siły elektromotorycznej prawie dokładnie  
o kąt  $90^\circ$ . Względem siły elektromotorycznej  
prądnic prąd spóinia się o pewien kąt  $\varphi$ .

Pomijając niewielkie straty energii w  
prądnic i w silniku, moc prądu dostarczo-  
na przez prądnicę i wytwarzając pracę  
mechaniczną w silniku wynosi:

$$W = \mathcal{E}_1 \times \mathcal{I} \cos \varphi. -$$

Prąd  $I$  jest proporcjonalny do siły elektromotorycznej  $\mathcal{E}$ , może więc być wyrażony wzorem:

$$I = K_1 \cdot \mathcal{E}.$$

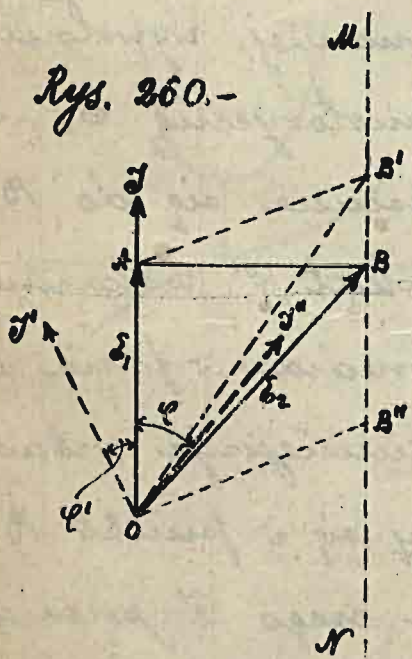
Podstawiając ten wyraz we wzór poprzedni, otrzymujemy:

$$W = K_1 \cdot \mathcal{E}_1 \cdot \mathcal{E}_2 \cdot \cos \varphi$$

Jeżeli  $K_1$  i  $\mathcal{E}_1$  są wielkościami stałymi, to  $W$  jest proporcjonalne do  $\mathcal{E}_2 \cos \varphi$ , ten zaś iloczyn wyraża się długością  $BC$ .

Gdy zmienia się kąt  $\alpha$  przy stałych  $\mathcal{E}_1$  i  $\mathcal{E}_2$ , to zmienia się również długość  $BC$ , wyrażająca moc. Z układu wektorów na rys. 259 widzimy, że największą moc otrzymamy silnik wtedy gdy  $\alpha = 90^\circ$ . - Rozważmy jeszcze warunki pracy

Rys. 260.-



silnika synchronicznego przy różnym wzbudzeniu. Za pomocą opornika w obwodzie elektromagnetycznym silnika synchronicznego można zmieniać siłę prądu magnetyzującego, a więc i strumienia magnetyczny



wywotlajacy siłę elektromotoryczną  $\mathcal{E}_2$ . Przy  
silnym prądzie w elektromagnesach  $\mathcal{E}_2$  może  
być większe od  $\mathcal{E}_1$ , przy małym zaś mniejsze.  
Jeżeli założymy że obciążenie silnika będzie  
stałe, to i moc pobierana z prądu będzie  
stała. Zwracając się do wykresu na rys. 259 i  
260  
możemy powiedzieć, że odległość punktu  $B$   
od linii  $OA$  będzie stała. Wypada więc że  
w tych warunkach przy zwiększeniu  $\mathcal{E}_2$ , punkt  
 $B$  porusza się po linii prostej  $MM'$  równo-  
ległej do  $OA$ . —

Gdy  $\mathcal{E}_2$  stanowi przeciwprostokątną trójkąt-  
ka prostokątnego  $OAB$ , to prąd wypływający  
z prądu jest w fazie z siłą elektromotoryczną  $\mathcal{E}_1$ .  
Wbudowując silnik jeszcze mocniej wywołujemy  
jeszcze większą siłę elektromotoryczną  $\mathcal{E}_2$ , skut-  
kiem czego punkt  $B$  przesunie się do  $B'$ ,  
a prąd  $I$  do  $I'$  i utworzy kąt  $\varphi'$  wskazujący,  
że w tym razie prąd wyprzedza w fazie siłę  
elektromotoryczną. Jeżeli zmniejszyć wbudowanie  
silnika, to  $\mathcal{E}_2$  zmniejszy się i punkt  $B$   
przejdzie do  $B''$  skutkiem czego  $I$  przesunie  
się do  $I''$  i utworzy z  $\mathcal{E}_1$  kąt  $\varphi$  wyprzedzający

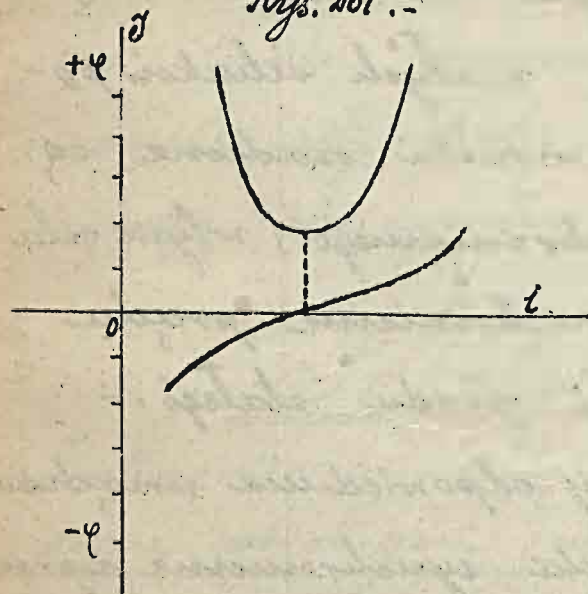
spóźniecie się w fazi prądu  $I$  względem  $E$ , -

Poratunek wzoru :

$$W = E_1 \cdot I \cos \varphi$$

widzimy że przy stałych wartościach czynników  $W$ , i  $E_1$ , przy wzroście  $\cos \varphi$ ,  $I$  zmniejsza się. Najmniejszy prąd będzie dopływał do silnika synchronicznego wtedy, gdy  $\varphi = 0$ , a więc  $\cos \varphi = 1$ . Na podstawie tych rozważań wypada, że siła i faza prądu płynącego do silnika synchronicznego zależy od stopnia wzbudzenia jego elektromagnesów. Za pomocą wykresów zależność  $\varphi$  i prądu  $I$  od prądu w elektromagnesach <sup>(wyznacza się)</sup> tak jak to wskazuje rys. 261. Ta własność sil-

Rys. 261. -



ników synchronicznych ma praktyczne znaczenie ze względu na możliwość otrzymywania w sieci prądu wyprzedzającego napięcie.

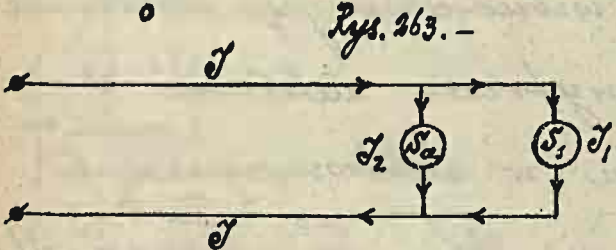
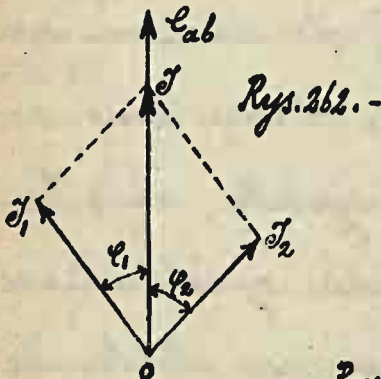
Prąd taki kładąc się z prądem płynącym do silników asynchronicznych daje prąd zgodny z napięciem.

Łatwo to zrozumieć z rys. 262. i z rys. 263. -



$S_2$  - silnik asynchroniczny, który bierze prąd  $I_2$  i połączony jest w formie wyglądu napięcia  $E_{ab}$  o kącie  $\varphi_2$  .-

$S_1$  - silnik synchroniczny, który bierze prąd  $I_1$  wyprzedzający napięcie o kąt  $\varphi_1$  .-



Przy odpowiednio dobranych prądach  $I_1$  i  $I_2$  o takich kątach  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  wypadkowy prąd  $I$  będzie zgodny co do fazy z napięciem  $E_{ab}$  .-

Przebieg w ruchu

silników synchronicznych uskutecznia się za pomocą przy pomocy małych silników pomocniczych, których wirniki osadzone są na osi silnika synchronicznego; w tym celu stosują się silniki asynchroniczne prądu trójfazowego i silniki prądu stałego. -

Można także przy odpowiednim urządzeniu przemienić w ruch silniki synchroniczne wprost podłączając ich do sieci. Gdy mamy do czynienia z prądem trójfazowym, to prąd

urządzeniu stojnika wytwarzania prądu wirów w nasadkach biegunowych wirnika i silnik działa jako asynchroniczny; do strymowania odpowiednich prądów wirów, nasadki biegunowe zespawają się w krótkokwadratowe urządzenie dodatkowe \*).

Gdy wprowadzimy w ruch silnik synchroniczny przy pomocy silników pomocniczych, to należy przede wszystkim osiągnąć synchroniczną szybkość biegu a następnie wyrównanie napięcia i fazy (patrz połączenie równoległe prądu prądu ziemnego) połączyć stojnik z siecią. Przy zatrzymywaniu silnika należy mieć na uwadze aby najpierw przerwać prąd w stojniku a potem w elektromagnesach. Ponieważ przy biegu asynchronicznym wirnika, prąd stojnika mniejszy, w urządzeniach elektromagnesów siły elektromotoryczne dość wielkie, że mogą one wywołać uszkodzenie izolacji.

## Przetwornice

Przetwornice nazywamy maszyną posiadającą obracającą się część i służące do

\*) Stosuje się to jednak również ze względu na bardzo silny prąd, który silnik bierze przy rozruchu.



przetwarzania jednego rodzaju prądu w drugi.

Zależnie od rodzajów prądu pierwotnego i wtór-  
nego, budowa tych maszyn jest rozmaita.

Gdy chodzi o przetwarzanie prądu elektrycznego  
stałego pewnego napięcia w prąd stały napięcia  
innego, to stosujemy zazwyczaj dwie maszyny,  
których wirniki osadzone są na jednej osi, lub  
też mają osie potańczone sprzężone. Jedną z  
tych maszyn bierze energję prądu z sieci i oba-  
ca osie, druga zaś wytwarza prąd. Obie  
osie maszyn tańczą się w jedną, elektromagnesy  
tej maszyny zasilane są z sieci, a twornik za-  
opatruje się w dwa niezależne nawojenia, z któ-  
rych każde ma swój kolektor. W tego rodzaju  
maszynach reakcja twornika jest bardzo ma-  
ła, ponieważ magnetyczne pole od prądów  
w nawojeniach na tworniku prawie się zeruje.  
Z powodu umieszczenia nawojów o różnych  
napięciach obok siebie jest jednak obawa wy-  
tworzenia się wysokiego napięcia względem  
ziemi w obwodzie napięcia niskiego wskutek  
uszkodzenia izolacji. —

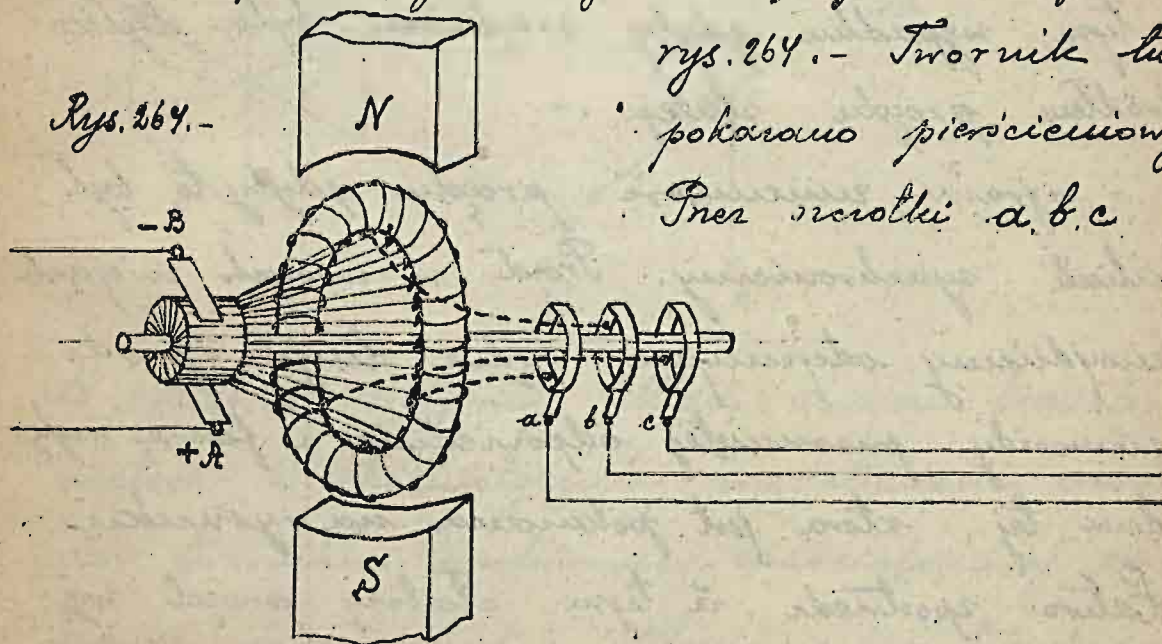
Najprostsze zastosowanie mają przetwornice obrotowego  
magnetyzacji prądu stałego z sieci prądu zmiennego.

W tym razie układ najprostszy, stosowany przy  
mniejszej mocy maszyn, polega na połączeniu  
sprężynki osi silnika prądu zmiennego z osią  
prądnicą prądu stałego. Taki stosunek tej  
wielkiej wadę, że współczynnik sprawności jest  
dość niski. Tak np. przy mocy maszyn wy-  
noszącej kilkudziesiąt kilowatów współczynnik  
sprawności każdej maszyny wynosi około 80%,  
więc współczynnik sprawności zespołu będzie  
 $0,8 \times 0,8 = 0,64$ .

Z tego względu przy większej mocy maszyn  
stosują się zwykle przetwornice jednostwornikowe.

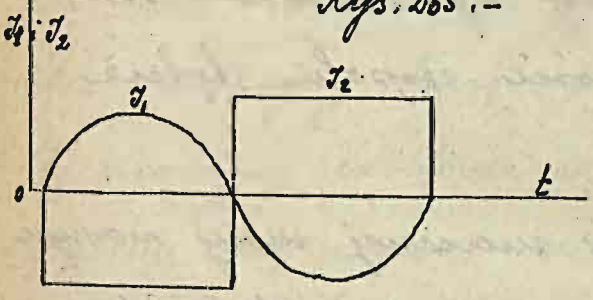
Sposób budowy takiej maszyny widzimy na  
rys. 264. - Twornik tu  
pokazano pierścieniowy.  
Przez szczelki a, b, c

Rys. 264. -





doprowadzonym do twornika prąd zmienny np. trójfazowy, otrzymujemy zos' pner kolektor prąd stały ze skrutek A i B. Elektromagnesy magnesują się prądem stałym. Twornik obraca się tu w tych samych warunkach jak w silniku synchronicznym. - W nawojeniach twornika przebiega tu prąd zmienny stanowiący różnicę prądu zmiennego dostarczonego z sieci i prądu stałego odbieronego z kolektora. -



Rys. 265. -

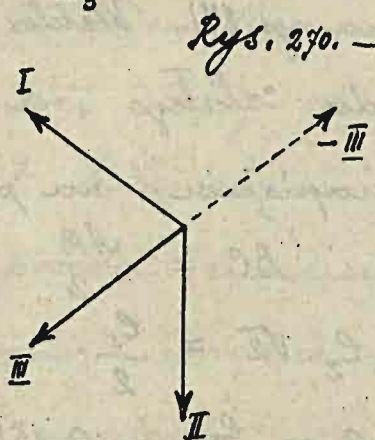
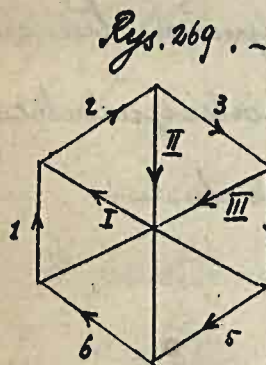
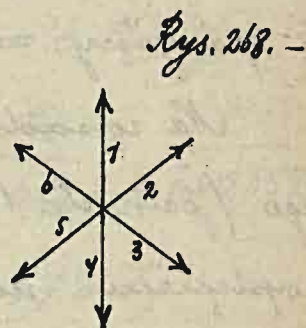
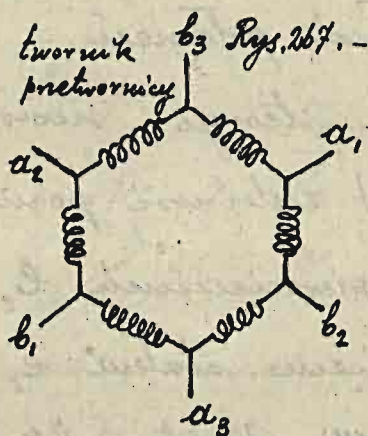
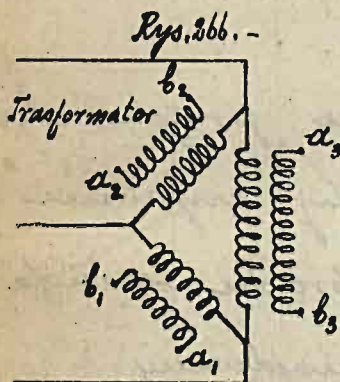
Prąd w wojnicy uzyskiwanej się w środku nawojenia pewnej fazy wyraża się różnicą kątowych  $I_1$  i  $I_2$  rys. 265. -

$I_2$  - wyraża tu zmiennoci prądu w tej wojnicy w tym wypadku gdyby prądnicą była tylko źródłem prądu stałego. -

- wyraża zmiennoci prądu gdyby to był silnik synchroniczny. Prąd w innych wojach uzyskiwany odejmując odpowiednie linie  $I_2$  od sinusoidy przesuniętej odpowiednio w fazie względem tej, która jest pokazana na rysunku. Łatwo zrozumieć, że tym słabszy prąd wy-

padkowy otrzymujemy w tych wojniach im na-  
wiskę liczbę for podcielo twornik. -

Prądy w tworniku ogrzewają druty, co  
stosowi stratę energii, która ramycaj twornik  
dłuch się na nesi for, rozpatryje się w nesi  
pierscieui i rozitor się prądem nesiioforowym,  
który otrzymujemy z trójforowego za pomocą odpo-  
wiednich transformatorów. -



Na rys. 266 i 267 widzimy układ nawoju transformatora i schematycznie przedstawione nawo-  
je twornika pnetwornicy nesiioforowej po-  
stawione w nesiiskę. Główne woje transformator-



torą łączą się przewodnikami niepokornymi  
na rysunku z końcami nawinięcia twornika  
(oczywiście przez pierścienie i środku), prze-  
wodniki łączą końcówki jednakowo oznaczone.

Na rys. 269. - za pomocą wektorów wykonano jest  
zasada dodawania sił elektromotorycznych  
w układzie trójfazowym. Wtedy np. napięcie  
I jest sumą napięć 2, 3 i 4, na tem jest opar-  
ty powyższy układ połączeń.

Na zasadzie teorii możemy prosto sta-  
tego (patrz str. 144) zależności pomiędzy czynem  
napięciem na pierścieniach  $E_2$  prądu trójfazy-  
owego, a napięciem statum  $E_s$  znajdujemy z  
wykresu na rys. 271. Wektor  $AB$  wyraża tu na-  
pięcie prądu statego, a  $BC$  maksymalną  
wartość napięcia na pierścieniach.

$$BC = \frac{AB}{2}$$

$$\text{więc } E_2 \cdot \sqrt{2} = \frac{E_s}{2}$$

$$E_2 = \frac{E_s}{2\sqrt{2}} = 0,354 E_s$$

Zakładając, że strat w maszynie nie ma, łatwo  
znajdziemy stosunek pomiędzy prądami  
płynącymi w sieci prądu statego i trójfazowego.

Oznacmy prąd stały  $I_s$ , a oznaczmy wartość prądu sześcioprowowego doprowadzonego do każdego pierścienia przez  $I_z$  i przez  $I_z'$  w każdej fazie,

wtedy :

$$I_s \cdot I_s = 6 \cdot I_z \cdot I_z'$$

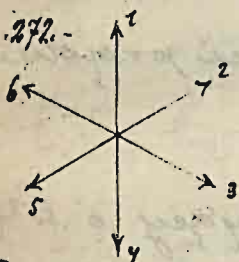
Z rys. 273. - widzimy, że :  $I_z' = I_z$ , więc :

$$I_s \cdot I_s = 6 \cdot I_z \cdot I_z$$

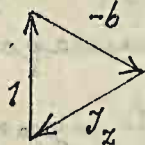
$$\frac{I_z}{I_s} = \frac{I_s}{6 I_z} = \frac{1}{6 \cdot 0,354}$$

$$I_z = 0,472 I_s$$

Rys. 272. -



Rys. 273. -



Podobnie jak w przetwornicach prądu stałego reakcja twornika jest tu niewielka. -

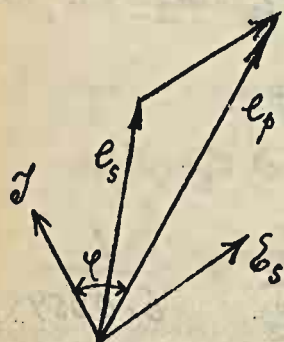
Spółczynnik sprawności duży od 87 do 96 % przy mocy kilku set kilowatów. -

W przetwornicach prądu miernego noś stały łatwo jest bardzo uzyskać samoczynne utrzymywanie stałego napięcia przy miernym obciążeniu ; wystarczy w tym celu dodać szeregowo umwienie noś elektromagnetyczne i wprowadzić w obwód prądu miernego : diodniki. -



Wtedy pod wpływem wzmożonego wzbudzenia prąd zmienny wyprzedza napięcie pod którym wpływa do twornika i siła elektromotoryczna samoindukcyi w dtorniku proporcjonalna do prądu zwiększa napięcie na pierścieniach.

Rys. 274. - Wyposa to z układu wektorów na rys. 274. -



$\epsilon_p$  - napięcie na pierścieniach przetwornicy. -

$\epsilon_s$  - napięcie w sieci prądu zmiennego. -

$I$  - prąd wyprzedzający o  $\angle \phi$

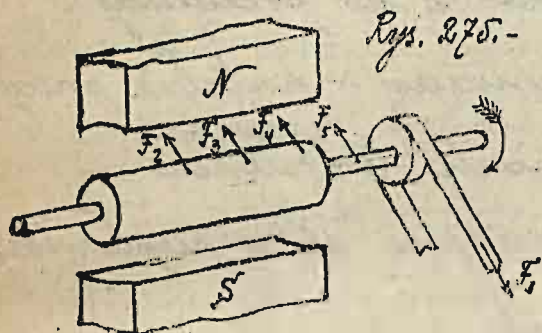
napięcie na pierścieniach.

$\epsilon_s$  - siła elektromotoryczna samoindukcyi w dtorniku. -

## O stratach w maszynach elektrycznych i współczynniku sprawności tych maszyn.

### Źródła prądu (generatory).-

Załóżmy że twornik źródła prądu wprowadzimy w ruch za pomocą pasa.



Rys. 275.-

Sila  $F_1$  - wywołująca różnicę naciągów w pasie wytwarza moment skręcający  $M$ , który działa w kierunku obrotu

osi. Sila  $F_1$  przeciwdziałają innym siłom:

$F_2$  - wynikająca z działania pola magnetycznego na prąd elektryczny w drutach twornika,

$F_3$  - z działania pola magnetycznego na prądy wirowe w rdzeniu twornika,

$F_4$  - z działania pola magnetycznego na części żelaza wskutek opóźnień się w nich stanu magnetycznego t.j. histerezy i

$F_5$  - wskutek tarcia w łożyskach i oporu powietrza.

Sily te tworzą hamujące ruch momenty obrotowe:

Elektrotechnika, z kursu 23-c.



$M_2, M_3, M_4, M_5$

- 354 -

Przy jednostajnym biegu maszyny:

$$M_1 = M_2 + M_3 + M_4 + M_5$$

Mnożąc obie strony równania przez  $2\pi n$ , gdzie  $n$  - liczba obrotów osi na jednostkę czasu strzymania:

$$M_1 \cdot 2\pi n = M_2 \cdot 2\pi n + M_3 \cdot 2\pi n + M_4 \cdot 2\pi n + M_5 \cdot 2\pi n$$

$M_1 \cdot 2\pi n$  - wyraża moc dostarczoną do prądu

$M_2 \cdot 2\pi n$  - wyraża moc strzymaną w kształcie pracy prądu w uzwojeniach twornika. -

$M_3 \cdot 2\pi n$  - wyraża moc zamieniającą się w ciepło wskutek prądów wirowych. -

$M_4 \cdot 2\pi n$  - wyraża moc zamieniającą się na ciepło wskutek histeresy. -

$M_5 \cdot 2\pi n$  - wyraża moc zamieniającą się na ciepło wskutek tarcia w łożyskach i oporu powietrza. -

Oznacząc prąd w tworniku przez  $\underline{I}$ , a siłę elektromotoryczną przez  $\underline{E}$ , a także wprowadzając odpowiednie skrócone oznaczenia, otrzymamy równanie:

$$W_1 = E \cdot I + W_2 + W_3 + W_5$$

Stąd, tak zwany mechaniczny współczynnik sprawności maszyny będzie:

$$\eta' = \frac{\mathcal{E} \cdot \mathcal{I}^{35.5}}{W_1}$$

Z mocy  $\mathcal{E} \mathcal{I}$ , część  $\mathcal{I}^2 r$  i  $\mathcal{I}_1^2 R$  traci się na ciepło w drutach twornika i elektromagnesów, więc zmieniając przez  $\mathcal{E}$  napięcie na końcówkach prądu, a przez  $\mathcal{I}'$  prąd płynący do obwodu zewnętrznego strumienia:

$$\mathcal{E} \cdot \mathcal{I} = \mathcal{E} \cdot \mathcal{I}' + \mathcal{I}^2 r + \mathcal{I}_1^2 R.$$

Stąd tak zwany elektryczny współczynnik sprawności maszyny będzie:

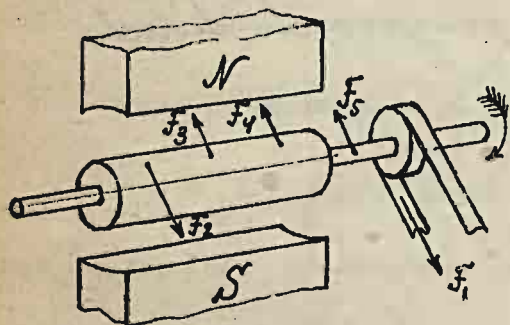
$$\eta'' = \frac{\mathcal{E} \cdot \mathcal{I}'}{\mathcal{E} \cdot \mathcal{I}}$$

Całkowity współczynnik sprawności prądu:

$$\eta = \eta' \cdot \eta'' = \frac{\mathcal{E} \cdot \mathcal{I}'}{W_1}$$

## Silniki elektryczne (motory).

Rys. 276.-



wtedy odwróci się kierunek momentów sił  $F_1$  i  $F_2$  \*); siła  $F_2$  będzie poruszającą, a  $F_1$  ha-

\*) Oznaczenia zachowujemy wszystkie poprzednie. -

Tracniej nieco przedstawia się sprawa jeżeli mamy silnik. Założymy, że kierunek obrotu twornika pozostał ten sam,



- 356 -

mując. Lity  $F_3$ ,  $F_4$  i  $F_5$  w dalonym ciągu będą  
hamujące, więc przy ruchu jednostajnym b-  
drucy mieli równanie:

$$M_2 = M_1 + M_3 + M_4 + M_5$$

a stąd:

$$M_2 \cdot 2\pi n = M_1 \cdot 2\pi n + M_3 \cdot 2\pi n + M_4 \cdot 2\pi n + M_5 \cdot 2\pi n$$

$$E \cdot I = W_1 + W_3 + W_4 + W_5$$

Spółczynnik sprawności mechanicznej będzie:

$$\eta' = \frac{W_1}{E \cdot I}$$

Uwzględniając straty na ciepło w drutach twornika  
i elektromagnesów, otrzymamy spółczynnik elektryczny:

$$\eta'' = \frac{E \cdot I}{E \cdot I'}$$

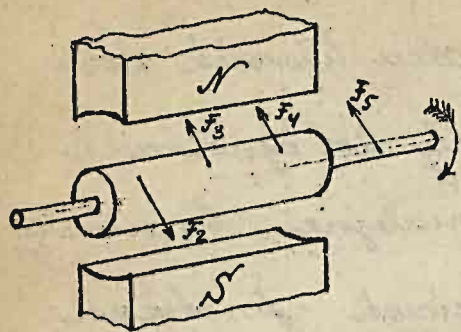
a więc spółczynnik cały będzie:

$$\eta = \eta' \cdot \eta'' = \frac{W_1}{E \cdot I'}$$

Przetwornice drutowornikowe mają spółczynnik  
sprawności równy iloczynowi powyższych dwóch  
spółczynników:

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 = \frac{E_1 \cdot I_1'}{E_2 \cdot I_2'}$$

Przetwornice jeduotwornikowe mają daleko mniejsze  
straty mechaniczne i na ciepło wskutek histeren-  
y i prądów wirowych, a także w drutach wirnika.  
Zachowując powyższe oznaczenia i kierunek



obrotu osi maszyny obraca-  
jącej się siłę  $F_2$  i hamujące:  
 $F_3$ ,  $F_4$  i  $F_5$ .

Równanie momentów będzie  
następujące:

$$M_2 = M_3 + M_4 + M_5$$

a stąd:

$$E \cdot I = W_3 + W_4 + W_5$$

Cała moc prądu płynącego w drutach twornika,  
zamienia się tu na straty energii w kształcie  
ciepła.

Oznaczmy prąd strumienowy z przetwornicy  
przez  $I_2$ , a napięcie przez  $E_2$ , prąd doprowa-  
dzony przez  $I_1$  przy napięciu  $E_1$ , a opory twor-  
nika i elektromagnesów przez  $r$  i  $R$ , prąd w  
elektromagnesach  $I'$ , wtedy:

$E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2 + E \cdot I + I^2 r + I'^2 R$ , a czyli  
spółczynnik sprawności:

$$\eta = \frac{E_2 \cdot I_2}{E_2 \cdot I_2 + W_3 + W_4 + W_5 + I^2 r + I'^2 R}$$

czyli 
$$\eta = \frac{E_2 \cdot I_2}{E_1 \cdot I_1}$$

Straty w przetwornicach jednostwornikowych są

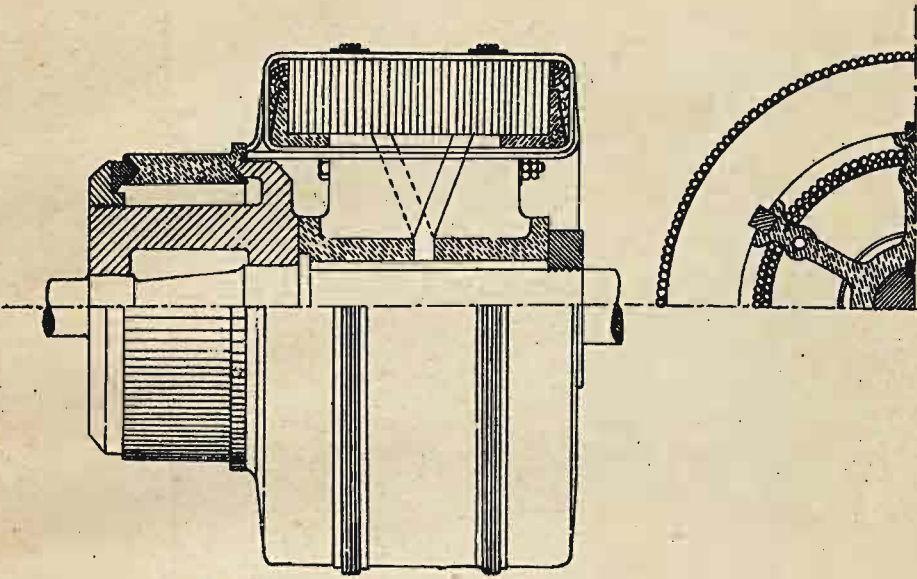


zućnienie mniejsze skutkiem tego, że  $W_3 + W_4 + W_5$  jest mniejsze, ponieważ mamy jeden twornik zamiast dwóch, a następne straty na ogrzewanie drutów twornika mogą być mniejsze, bo mamy twornik jeden w którego nawojeniach przebiega niewielki prąd stanowiący różnicę prądów dopływającego do przetwornicy i odpływającego z niej. —

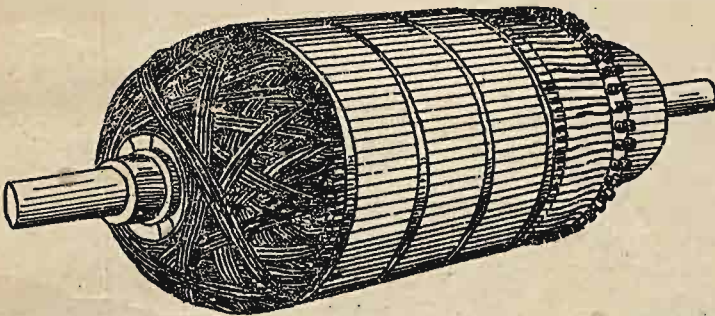
— K o n i e c —



nr. 465

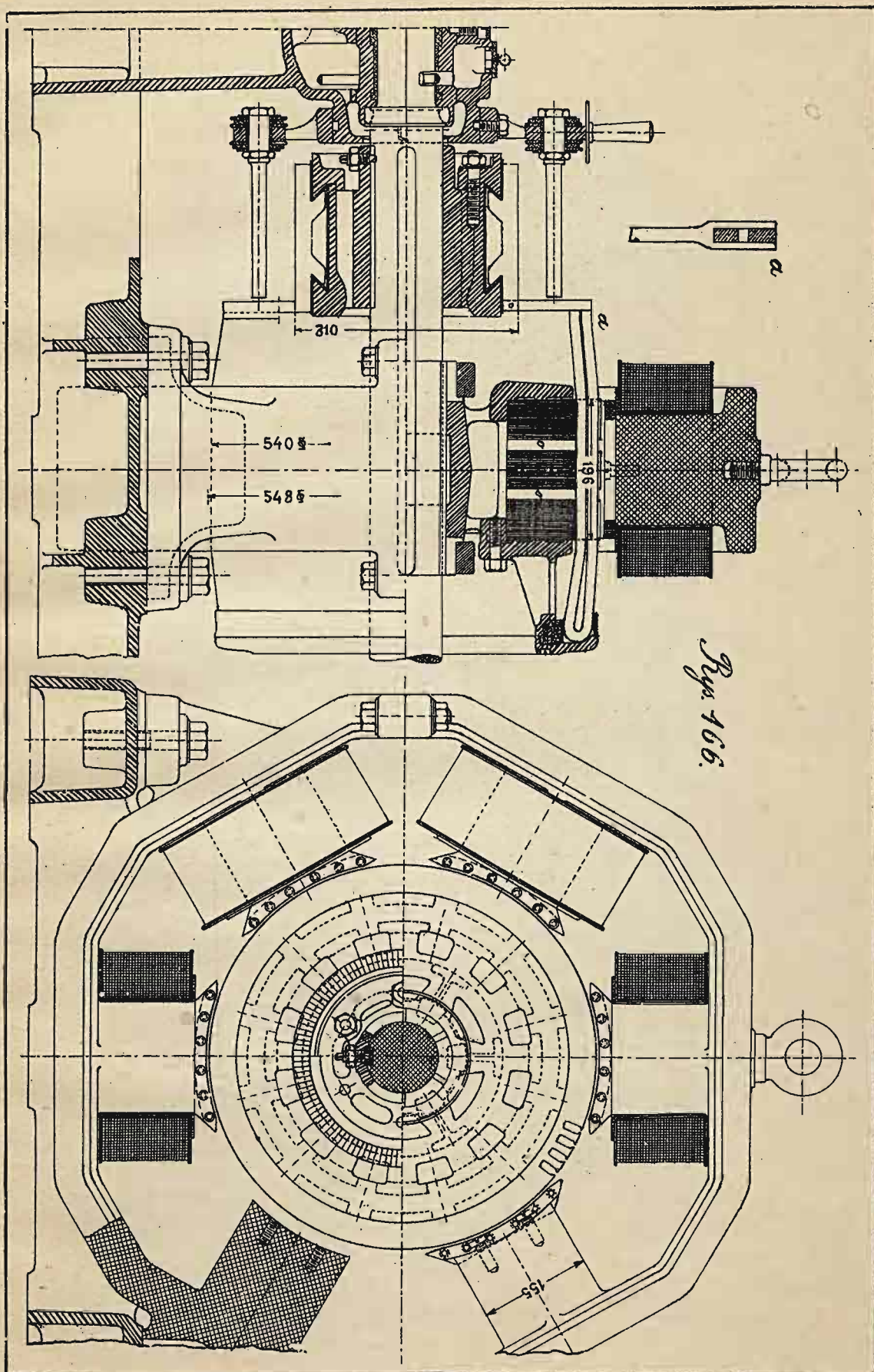


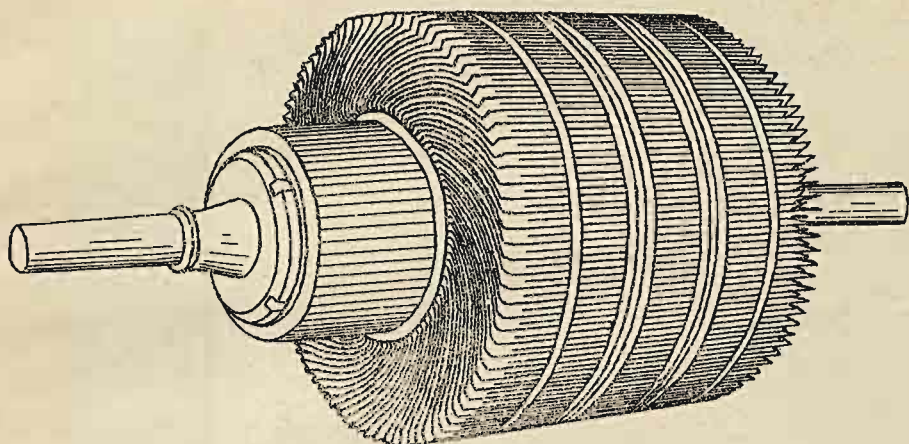
*Fig. 164.*



*Fig. 165.*







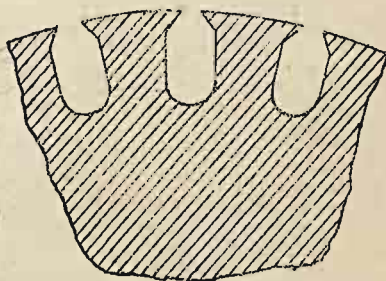
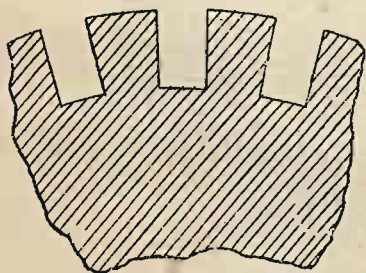
*Fig. 167.*



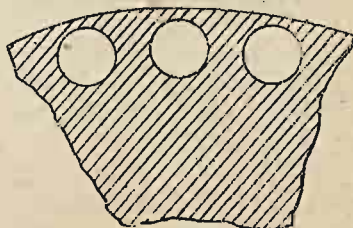
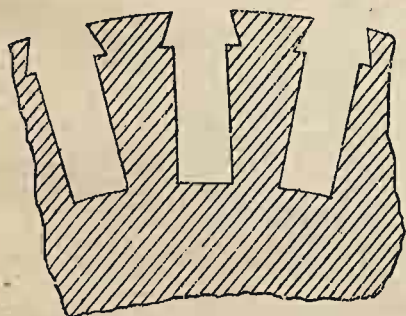
*Fig. 167A.*



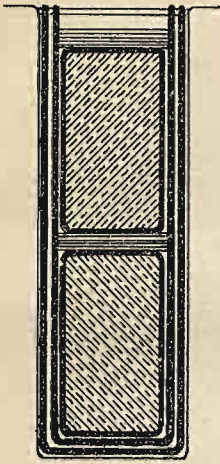
*Fig. 168.*



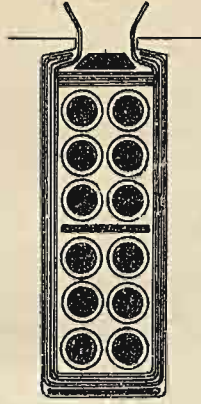
*Fig. 169.*



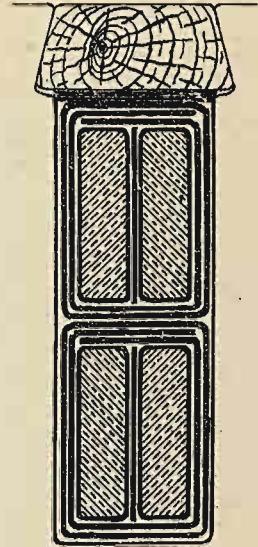




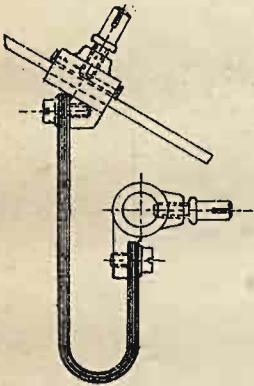
*Fig. 168.*



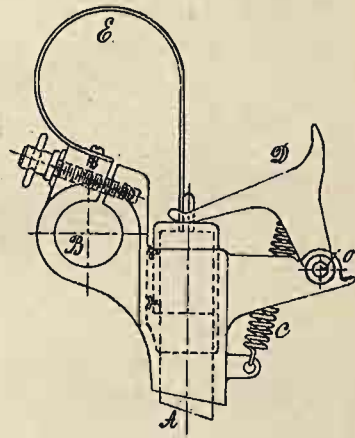
*Fig. 169'.*



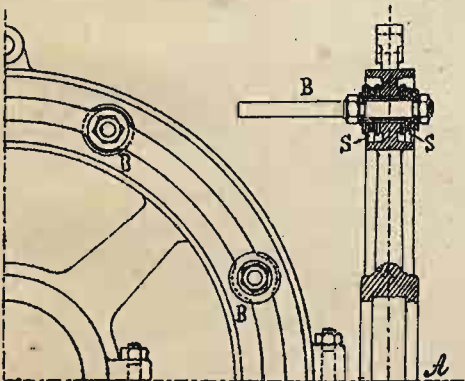
*Fig. 169''.*



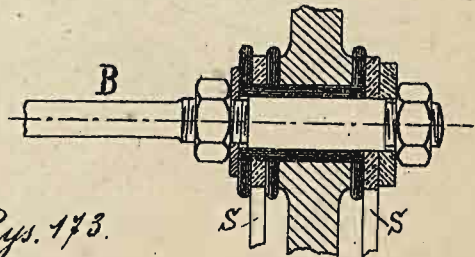
*Fig. 171.*

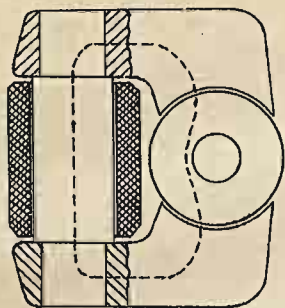


*Fig. 172.*

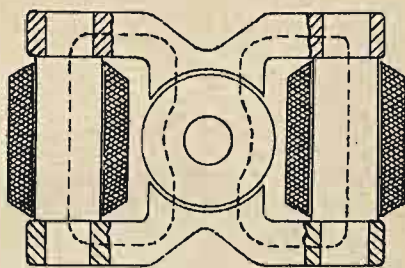


*Fig. 173.*

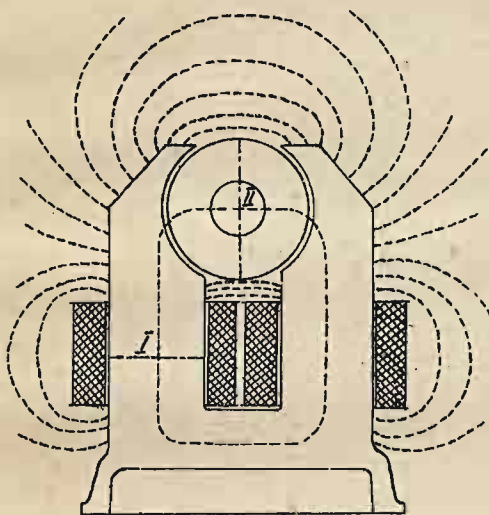




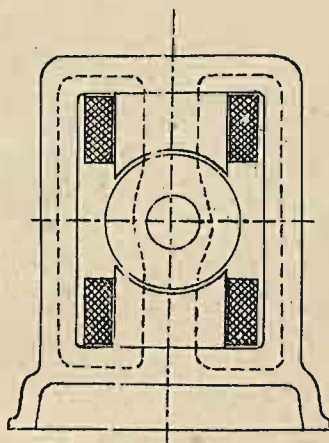
*Fig. 174.*



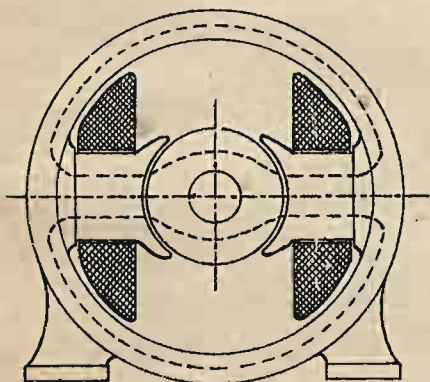
*Fig. 175.*



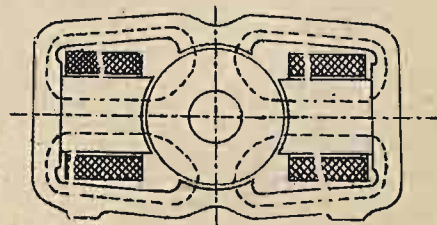
*Fig. 176.*



*Fig. 177.*

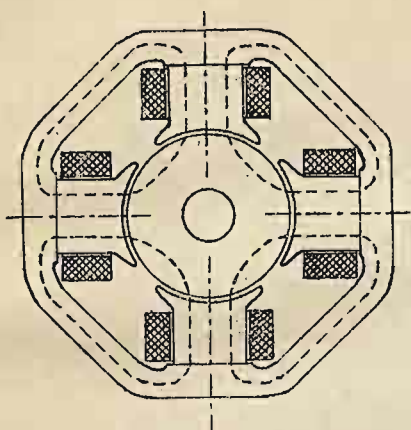


*Fig. 178.*

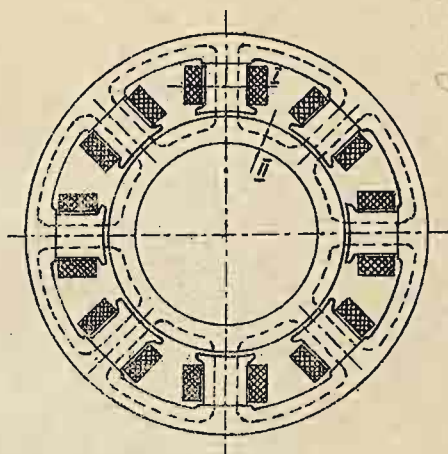


*Fig. 179.*





*Fig. 180.*



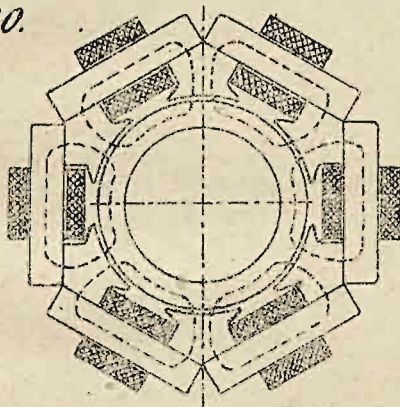
*Fig. 181.*



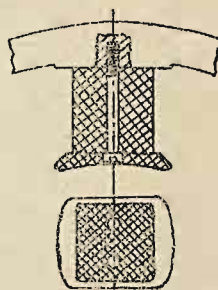
*Fig. 183.*



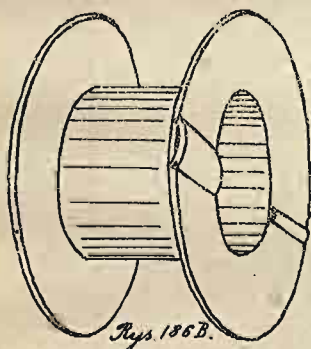
*Fig. 184.*



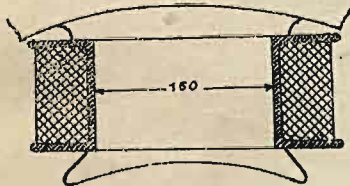
*Fig. 182.*



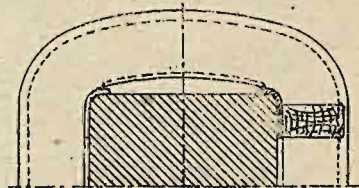
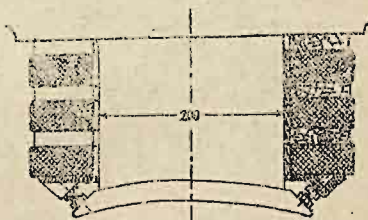
*Fig. 185.*



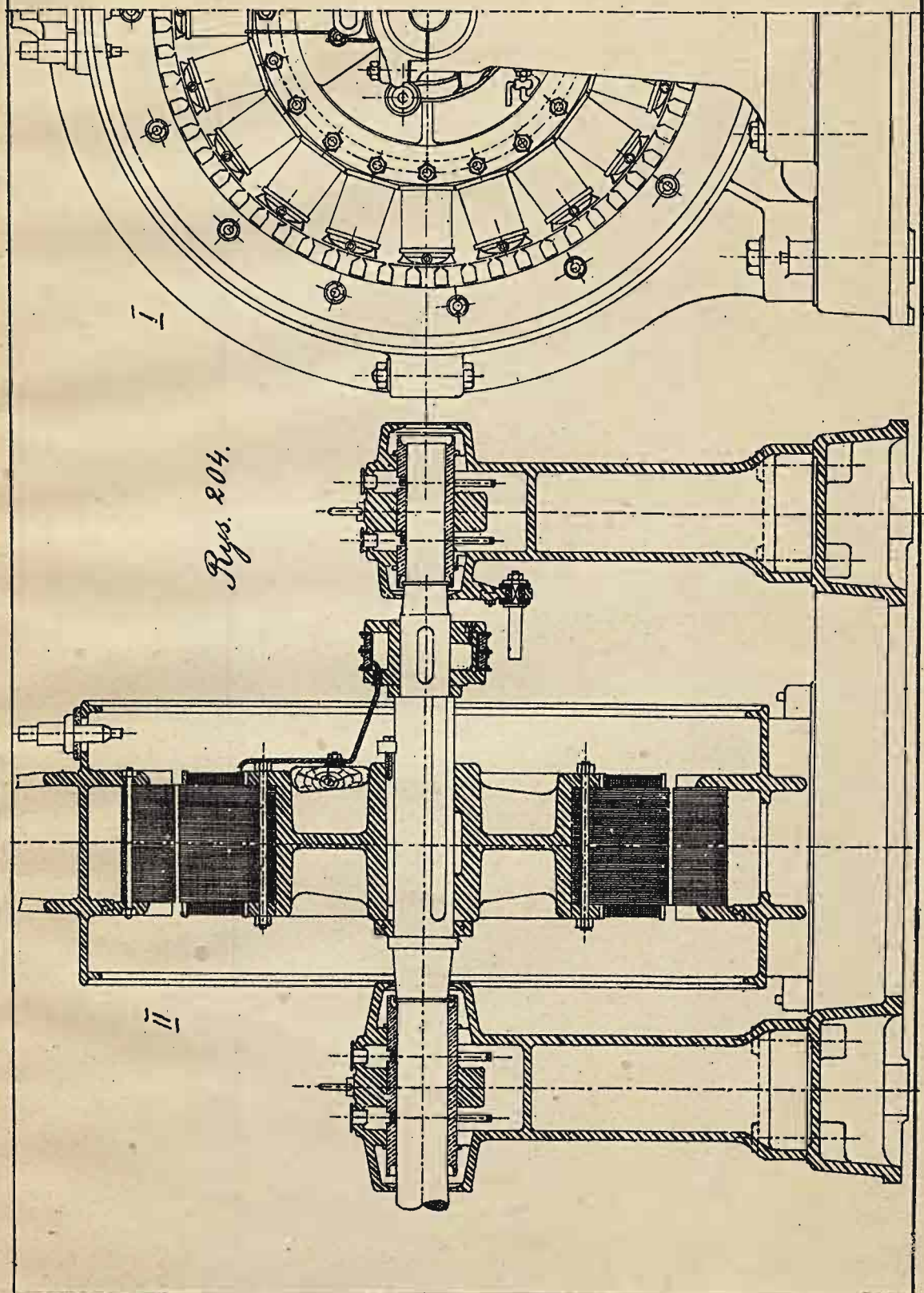
*Fig. 186B.*



*Fig. 186A.*

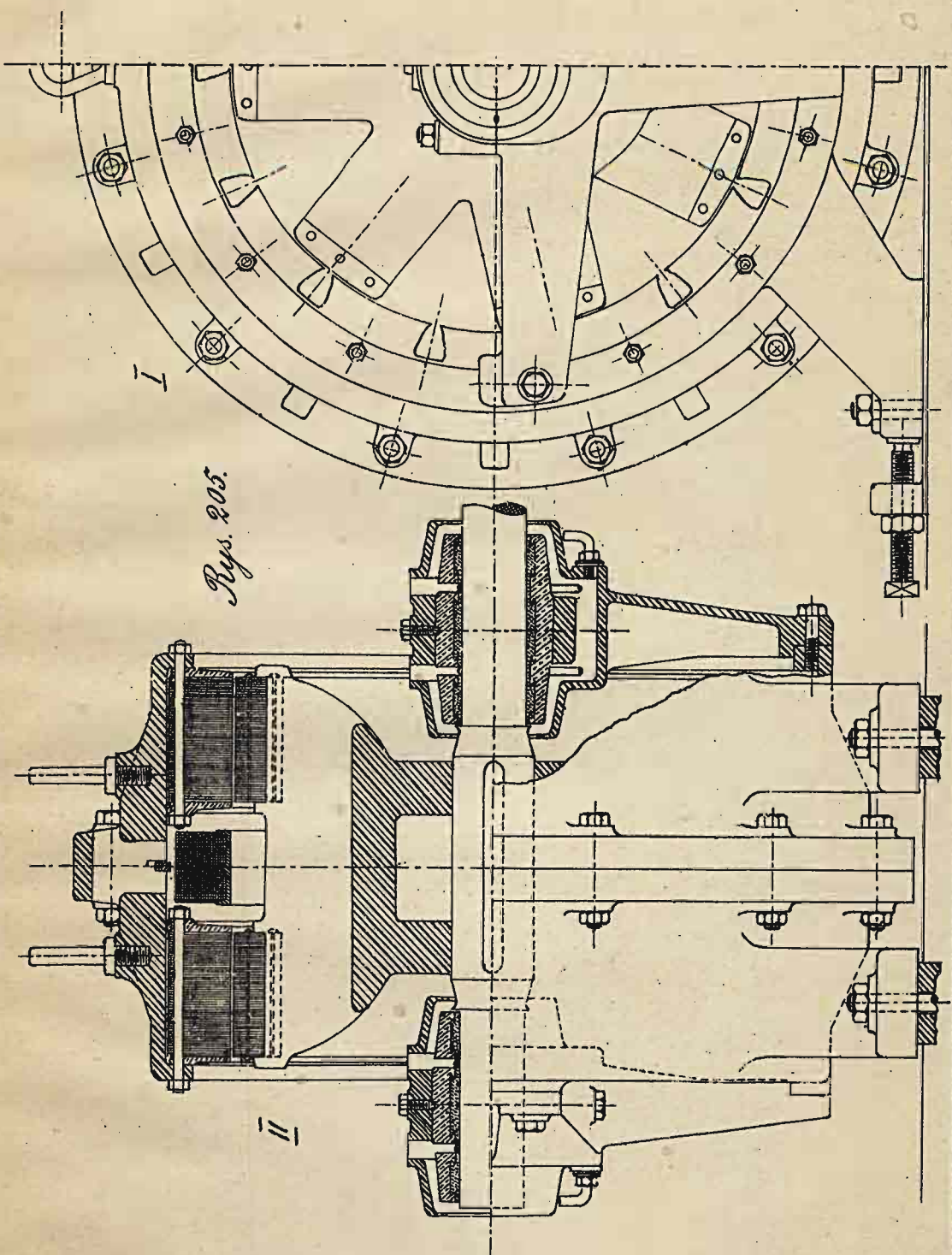


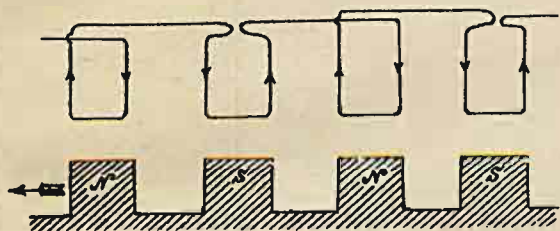
*Fig. 187.*



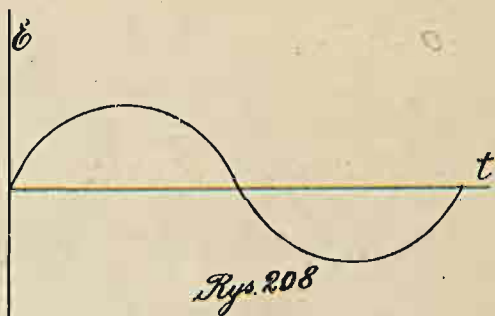


*Fig. 205.*

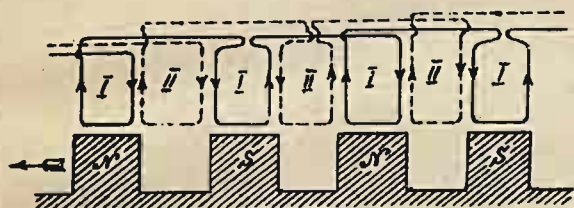




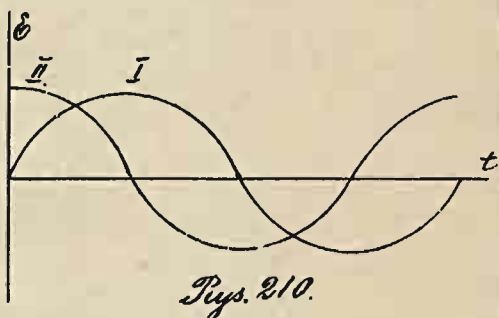
Rys. 207.



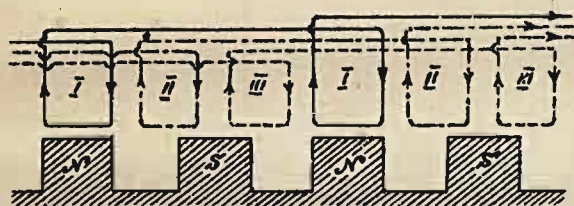
Rys. 208



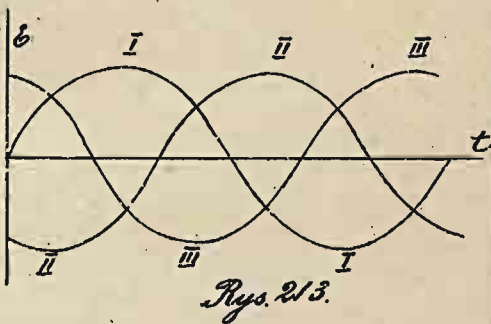
Rys. 209.



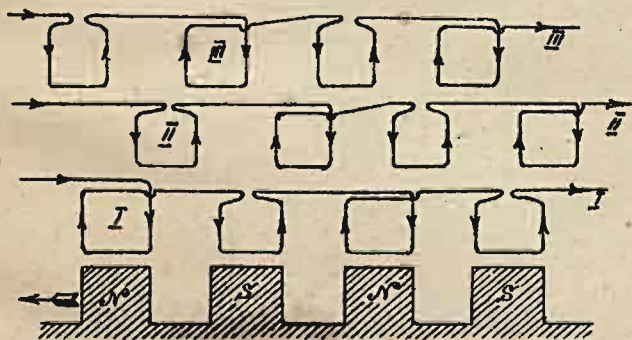
Rys. 210.



Rys. 211.



Rys. 213.



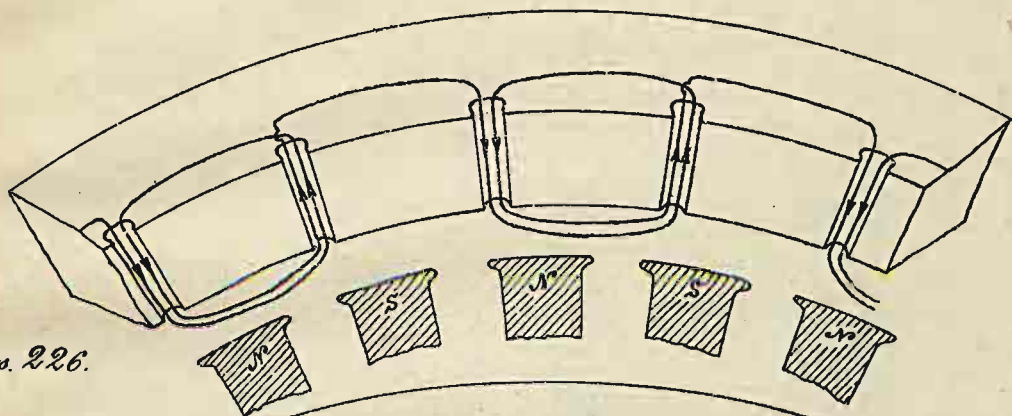
Rys. 212



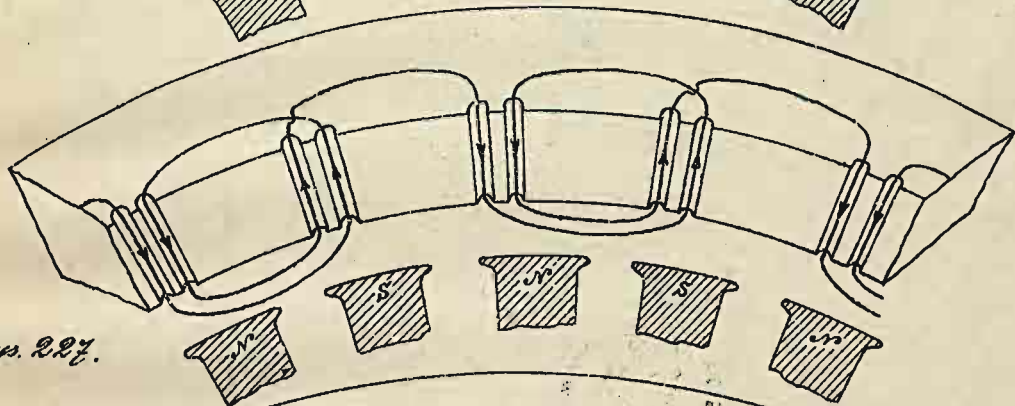
Rys. 214.



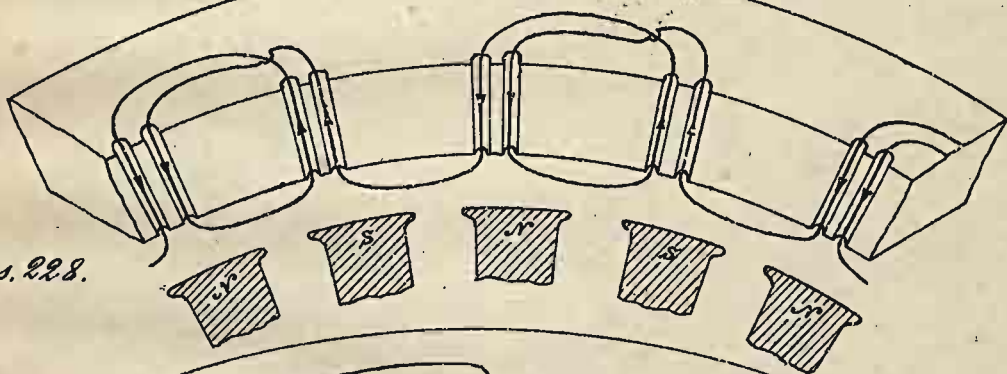
Rys. 226.



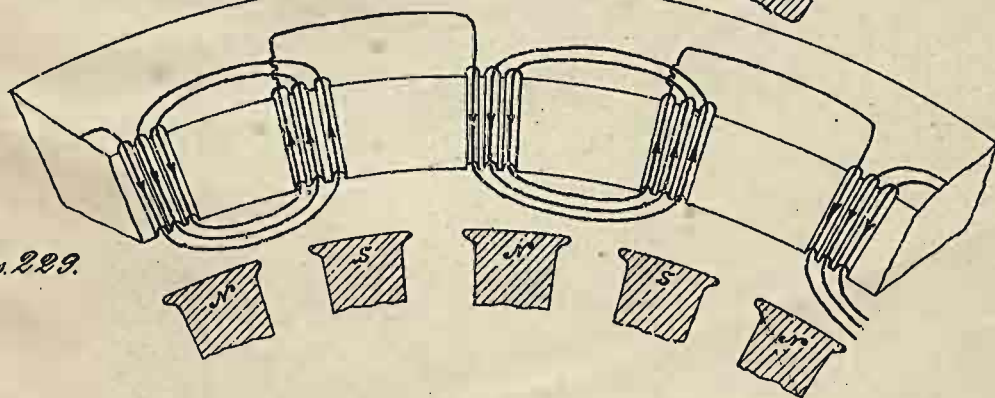
Rys. 227.

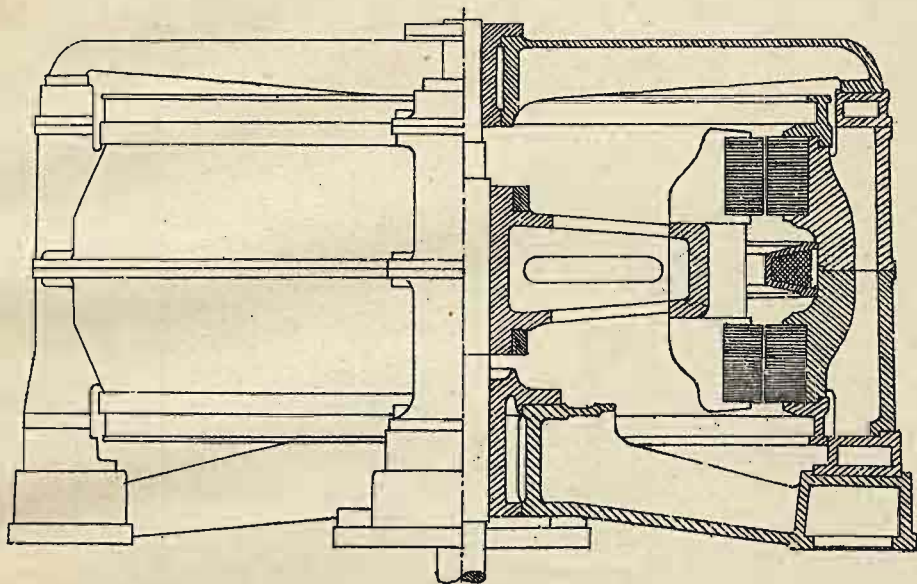


Rys. 228.

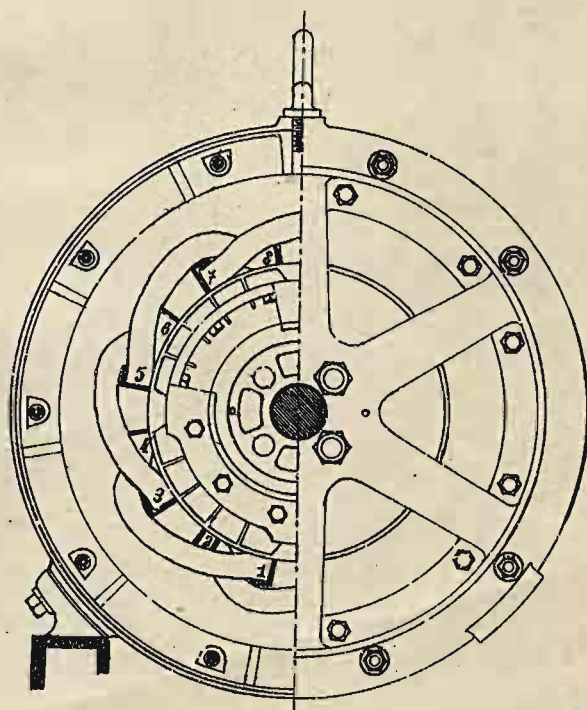
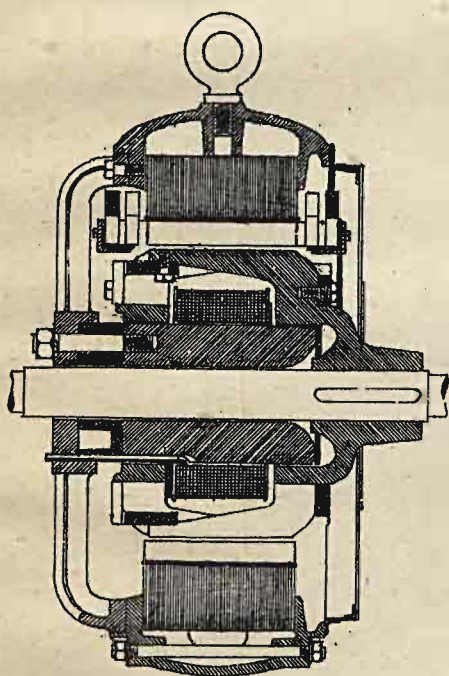


Rys. 229.



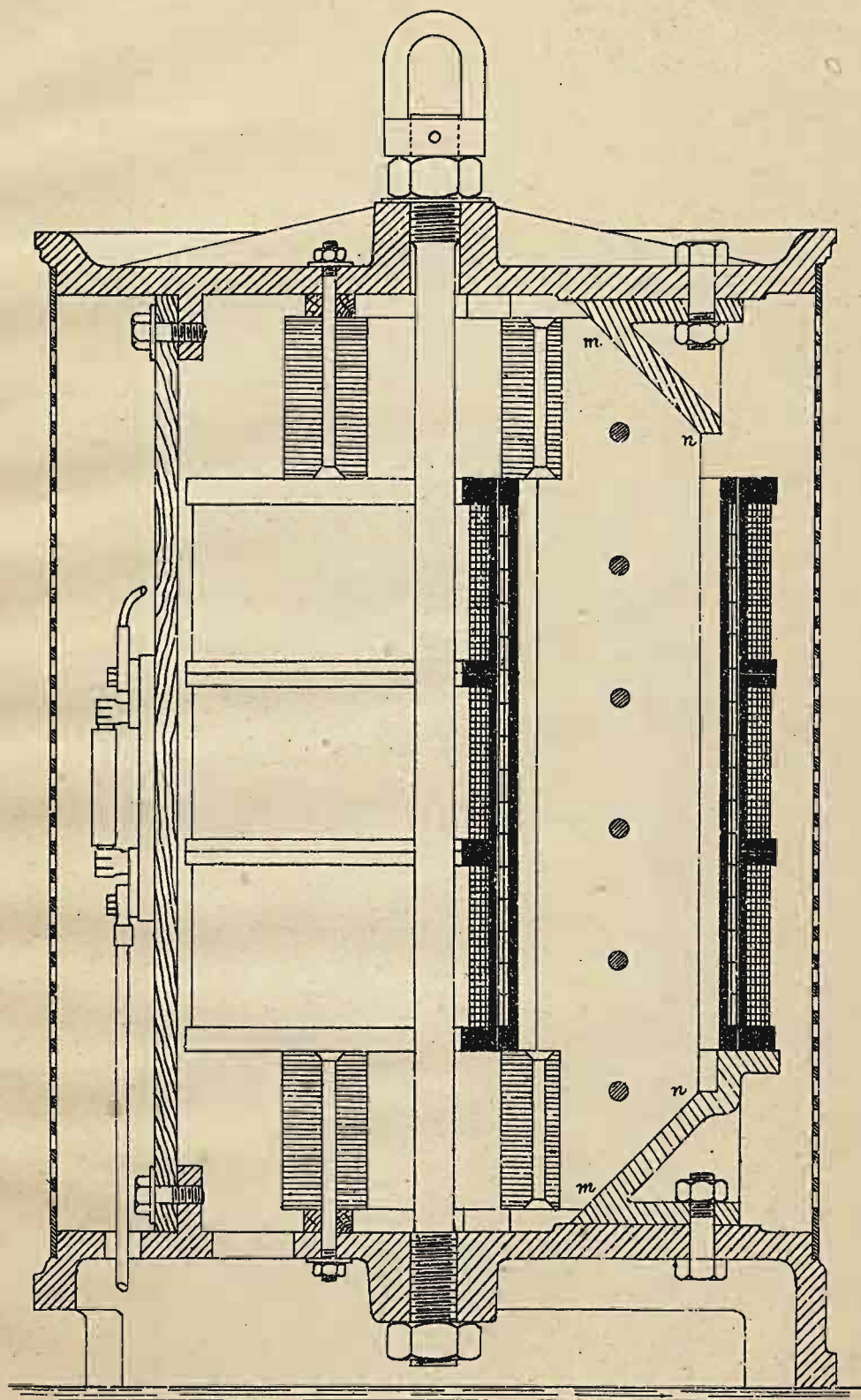


*Rys. 240*

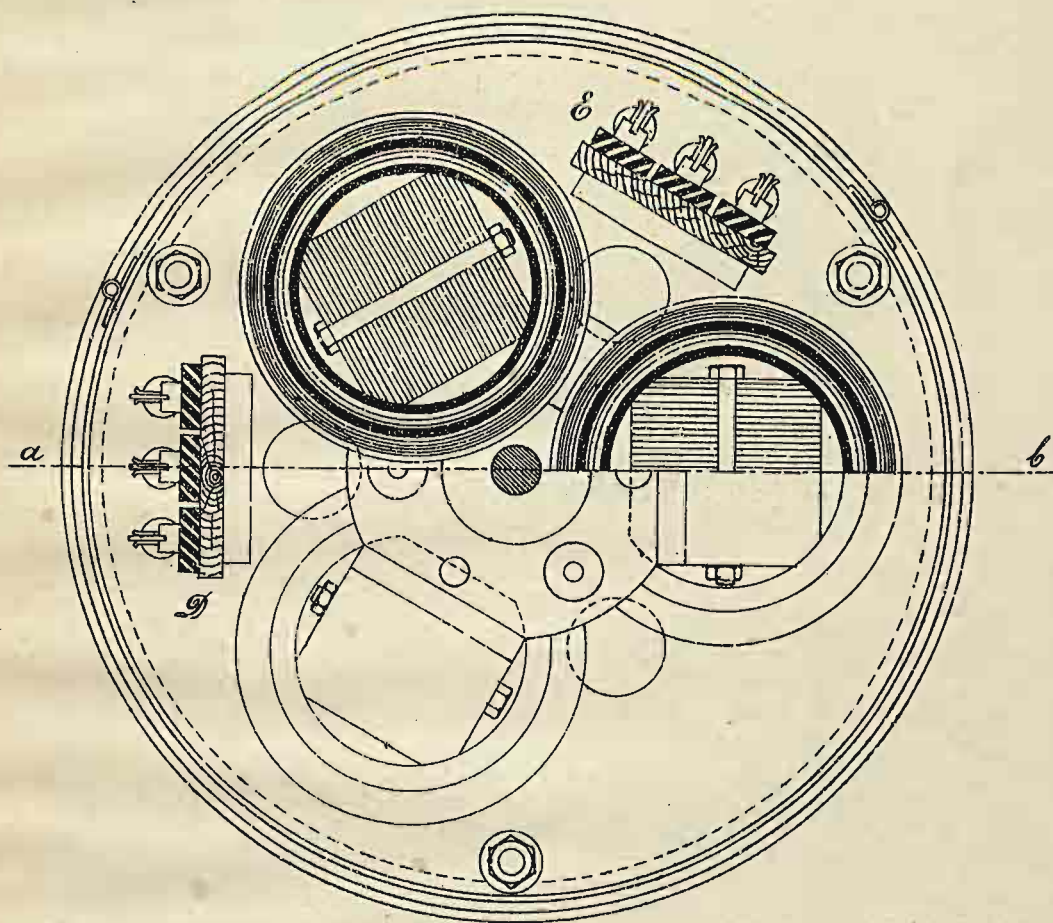


*Rys. 241*



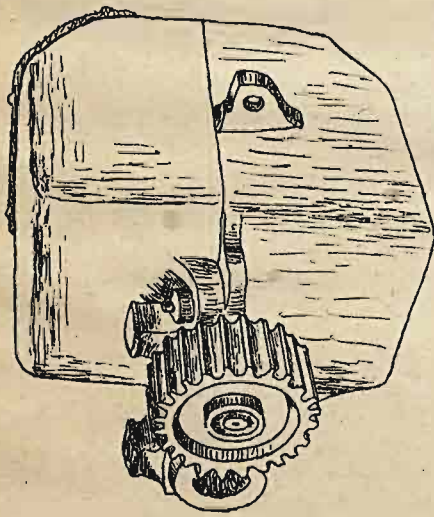


Rys. 262.

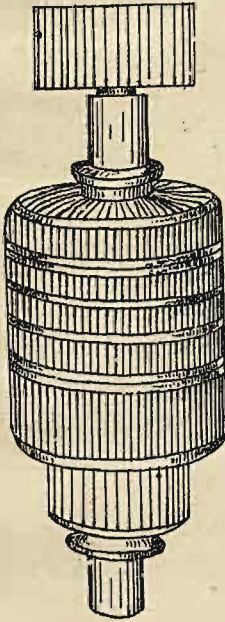


*Rys. 263.*

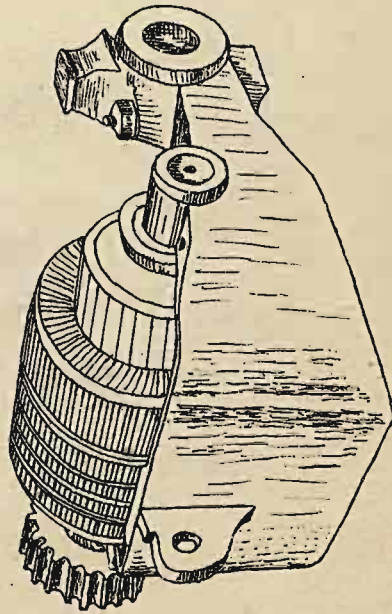




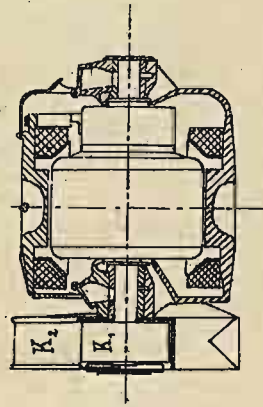
*Fig. 294-a*



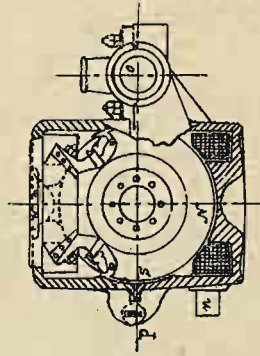
*Fig. 294-c*



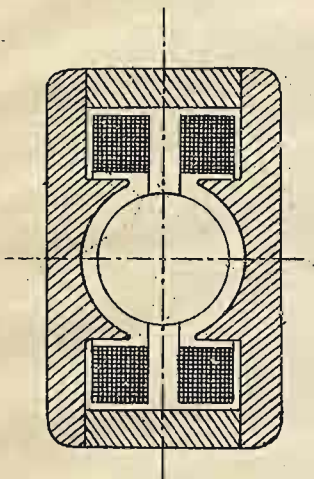
*Fig. 294-b*



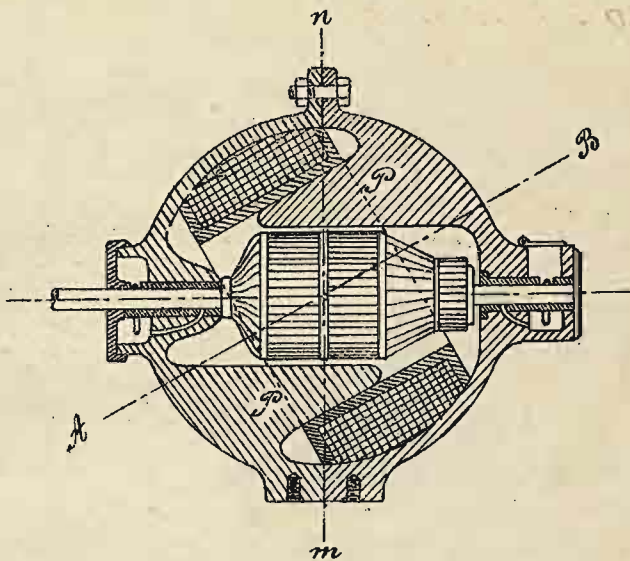
*Fig. 292*



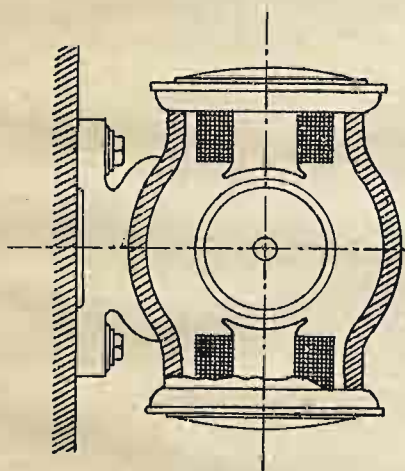
*Fig. 293*



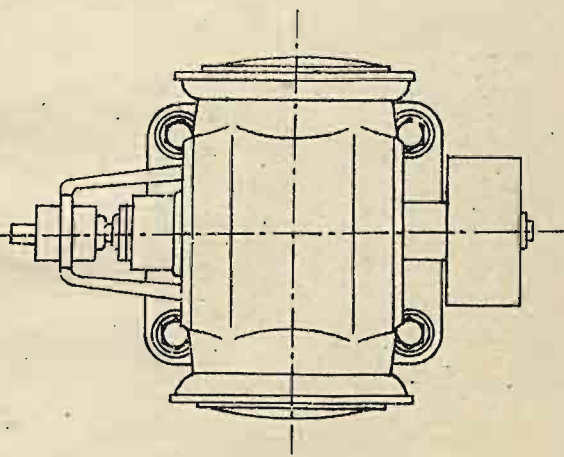
*Rys. 295*



*Rys. 296*

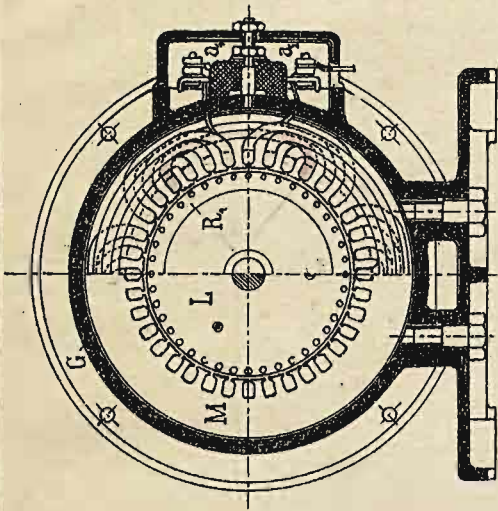


*Rys. 297*

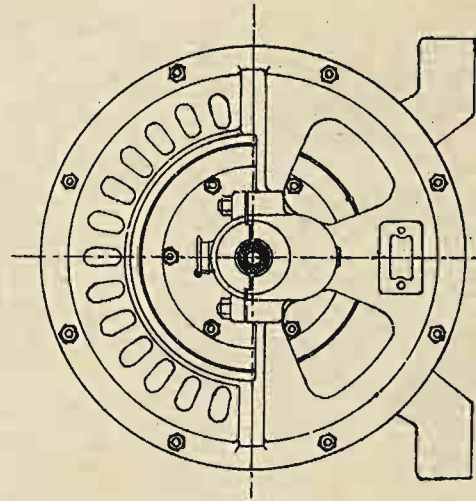


*Rys. 298*

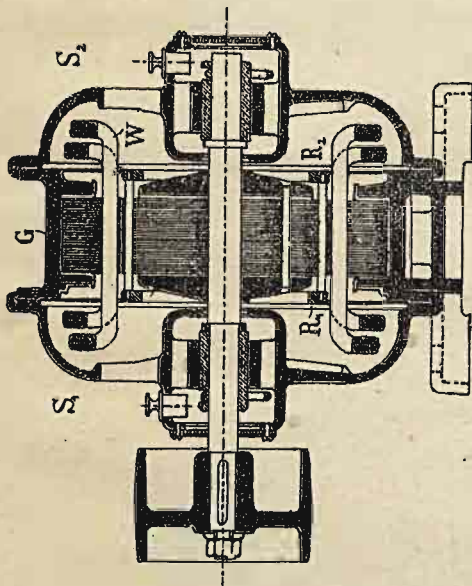




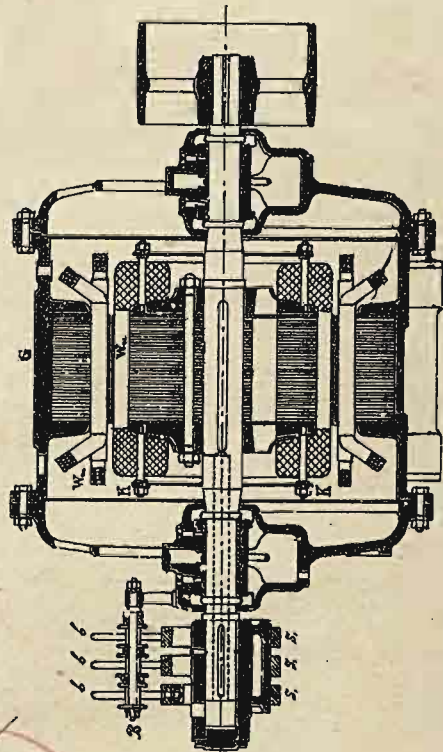
Rys. 317.



Rys. 319.



Rys. 316.



Rys. 318.

