

Rząd wielkości uchybu — jak przy transformatorach napięciowych.

Transformator prądowy ma jedną ciekawą właściwość — nie można go zostawić po stronie wtórnej rozwartym, wtedy bowiem znikną amperozwoje wtórne, które kompensowały amperozwoje pierwotne. Amperozwoje pierwotne nieskompensowane wytworzą nadmierny strumień magnetyczny, skutkiem czego żelazo może się tak rozgrzać, że uszkodzi się izolacja między blachami, oraz mogą się trwale zmienić jego właściwości magnetyczne.

Pozatem w uzwojeniu wtórnym wznieci się SEM tego rzędu, że czasami może nastąpić przebicie izolacji.

## 6. Regulacja napięcia.

Napięcie możemy regulować w sposób ciągły lub skokami. Regulację ciągłą uzyskujemy, stosując regulatory indukcyjne, silniki synchroniczne (na biegu jałowym), względnie transformatory przesuwne. Sposoby te omówimy niżej.

a) *Regulacja skokami (zaczepowa)*. Polega na zmianie przekładni transformatora — w tym celu jego uzwojenie jest zaopatrzone w zaczepy.

Zmieniać przekładnię można przy transformatorze odłączonym, lub pod obciążeniem. Większość nowoczesnych transformatorów rozdzielczych posiada zaczepy, umożliwiające regulację w małych granicach (około  $4 \div 5\%$ ). Regulacja odbywa się zwykle po uprzednim odłączeniu transformatora od sieci. O sposobach wyprowadzenia tych zaczepów — patrz VIII—2—d.

Przy przenoszeniu energii elektrycznej na dalekie odległości występują w przewodach znaczne spadki napięcia, zależne od wielkości i charakteru ( $\cos \varphi$ ) obciążenia. Ponieważ zarówno jedno, jak i drugie ulega ciągłym zmianom, — powstaje konieczność regulowania pod obciążeniem. Najidealniejszym bodaj rozwiązaniem pod względem technicznym jest zastosowanie silników synchronicznych, zmieniając wzbudzenie których, możemy utrzymać na całej linii stałe napięcie. Pozatem przewzbudzony silnik synchroniczny poprawia  $\cos \varphi$  linii. Stosowanie silników synchronicznych wypada jednakże drogo (koszt kapitału, straty energii biegu jałowego) — i z tego powodu nie znajdują one szerokiego rozpowszechnienia. Coraz większe zastosowanie mają transformatory z zaczepami. Jeżeli chodzi o granice regulacji — to rzadko zachodzi potrzeba regulacji w granicach szerszych niż  $\pm 20\%$ .

Przy zastosowaniu zaczepek rozróżniamy zasadniczo dwa przypadki:

1) zaczepek, za pomocą których odbywa się regulacja, posiada transformator główny;

2) zastosowany jest specjalny transformator regulacyjny.

Pzyczymy tutaj parę schematów regulacji zaczepowej (nie poruszając narazie kwestji przerwy prądu w obwodzie i zwierania zwojów przy przełączaniu zaczepek).

Będziemy przytem rozpatrywali schemat dla jednej fazy.

Na rys. 109 widzimy transformator główny z zaczepek. Ślizgacz  $K$ , ślizgając się po zaczepekach zmienia napięcie po stronie wtórnej.

Na rys. 110 mamy odmienne wykonanie uzwojenia wtórnego transformatora z rys. 109. Mamy tutaj ten sam zakres regulacji (siedem stopni), lecz uzwojenie wtórne posiada tylko cztery zaczepek, (zamiast 7).

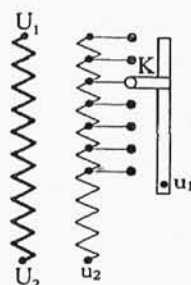
Rys. 111 przedstawia zasadniczo taką samą regulację, jak omawiana wyżej, z tą różnicą, że wyłączalne grupy zwojów znajdują się pośrodku uzwojenia. Ma to tę zaletę, że grupy te, znajdując się we środku, nie potrzebują być mocniej izolowane (patrz VIII—2— $a-c$ ), jak to jest niezbędne przy połączeniu na rys. 109 i 110.

Pozatem ten sposób regulacji dobrze się nadaje przy połączeniu uzwojenia wtórnego w trójkąt.

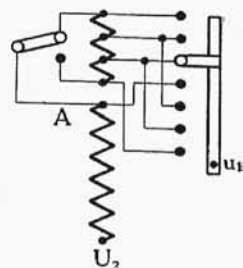
Na rys.  $S$  — oznacza przełącznik dwubiegunowy.

Napięcie można również regulować, stosując autotransformator, z połączeniem uzwojenia np. jak na rys. 110. Część uzwojenia  $U_2 - A$  stanowiłaby stronę pierwotną  $u_1 - U_2$  stronę wtórną, lub naodwrot.

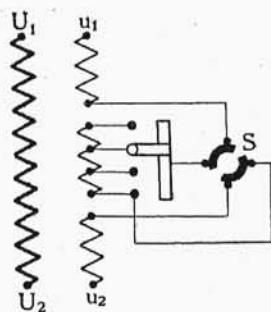
Na rys. 112 mamy schemat połączeń specjalnego transformatora dodatkowego.  $U_1 - X$  — uzwojenie wzbudzające. Przy rozmaitych położeniach ślizgacza i przełącznika dwubiegunowego  $S$  napięcie na linii możemy obniżyć lub podnieść (włączając szeregowo napięcie odpowiedniej części uzwojenia wtórnego zgodnie lub przeciwnie z napięciem pierwotnem).



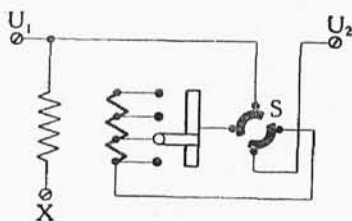
Rys. 109.



Rys. 110.

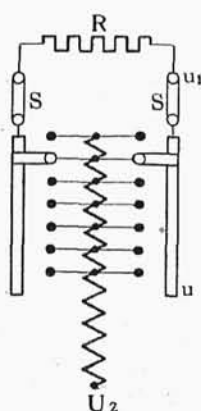


Rys. 111.



Rys. 112.

Przejście ślizgacza z kontaktu na kontakt pociąga za sobą albo rozwarcie obwodu, o ile ślizgacz nie może pokrywać jednocześnie dwóch sąsiednich kontaktów, albo zwarcie zwojów leżących między dwoma kontaktami—o ile ślizgacz te kontakty pokryje.

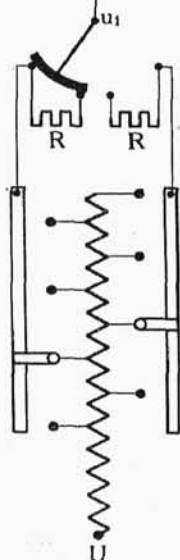


Rys. 113.

Jedno i drugie jest dla pracy transformatora szkodliwe. Możemy temu zapobiec w ten sposób, że, przechodząc od jednego zaczeplu do sąsiedniego, włączamy między te zaczeplu oporność omową, względnie dławik. Przykład takiego rozwiązania widzimy na rys. 113 (jest to rozwinięcie schematu z rys. 109).

Szyna i ślizgacz z prawej strony — są te same, co na rys. 109, po stronie zaś lewej odgrywają rolę pomocniczą. Oporność  $R$  służy do ograniczania prądu w obwodzie zwartym. Normalnie ślizgacz główny i pomocniczy stykają się na tym samym kontakcie (oporność  $R$  — zwarta).

Przy zmianie napięcia najpierw ślizgacz pomocniczy (z lewej strony) przechodzi na sąsiedni kontakt. Wtedy zwoje między sąsiednimi kontaktami są zwarte przez oporność  $R$ , poczem już ślizgacz główny podąża za pomocniczym (w tym czasie przez oporność  $R$  płynie prąd główny transformatora).



Rys. 114.

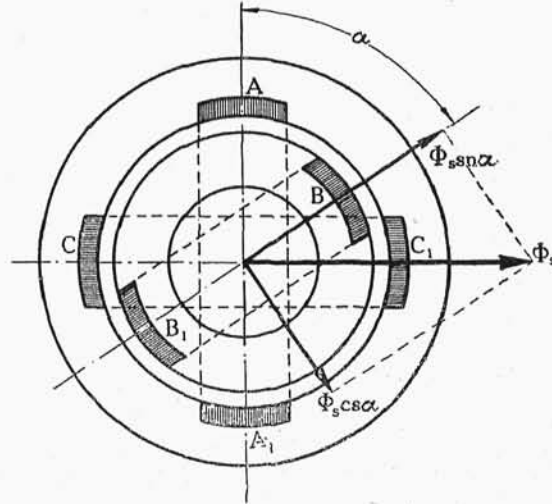
Przy wyżej opisanym sposobie poruszania się ślizgaczy przejściu z kontaktu na kontakt, mimo ograniczania prądu przez oporność  $R$ , zawsze będzie towarzyszyła iskra. By temu zapobiec, daje się przerywacze  $S-S$  poza pudłem olejowym transformatora; każdy z nich wyłącza obwód, gdy należący do niego ślizgacz przechodzi z kontaktu na kontakt.

Na rysunku 114 mamy schemat regulacji napięcia pod obciążeniem, zaproponowany przez Jansena. Nie wymaga on specjalnych objaśnień. Ten sposób regulacji znalazł w ostatnich czasach szerokie rozpowszechnienie.

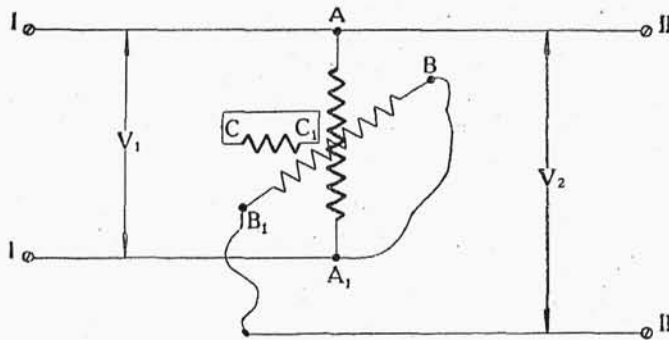
*b) Regulatory indukcyjne.* Noszą one również nazwę transformatorów obrotowych.

Rozpatrzmy regulator indukcyjny jedno i trójfazowy.

*Regulator indukcyjny jednofazowy* — swą budową b. przypomina silnik asynchroniczny — nie posiada tylko zwykle pierścieni ślizgowych i jest, jak zobaczymy później, zaopatrzony dodatkowo w pewne specjalne uzwojenie zwarte. Połączenie uzwojeń — jak w autotransformatorze jednofazowym.



Rys. 115.

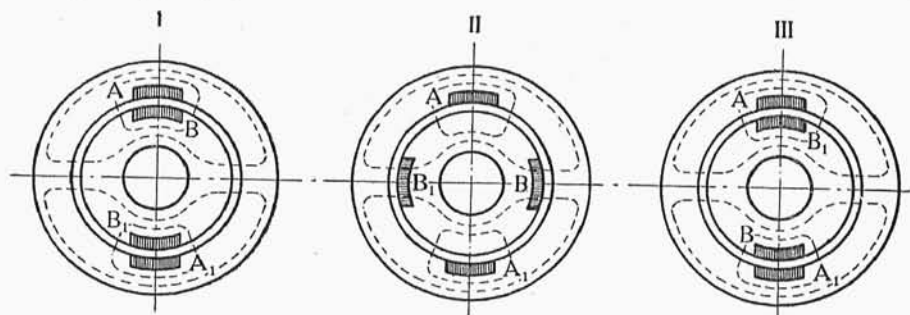


Rys. 116.

Rysunki 115 i 116 dają nam obraz rozmieszczenia uzwojeń w regulatorze indukcyjnym i ich połączenie.  $A-A_1$  jest to uzwojenie pierwotne, nawinięte na stojanie. Uzwojenie  $B-B_1$  jest nawinięte na wirniku; łącznie z uzwojeniem  $A-A_1$ , stanowi ono, jak widać z rysunku 116, stronę wtórną  $A-B_1$ . Wirnik w stosunku do stojana jest normalnie nieruchomy; położenie wirnika można zmienić za pomocą przekładni ślimakowej samohamownej.

Rozpatrzmy kilka położenia charakterystycznych wirnika w stosunku do stojana. Na rys. 117<sup>1</sup> mamy wypadek, gdy oba uzwojenia ( $A-A_1$  i  $B-B_1$ ) zlewają się swymi płaszczyznami. Regulator indukcyjny zachowuje się jak transformator zwyczajny. Strumień  $\Phi_s$ ,

wytworzony przez uzwojenie stojana jest całkowicie skojarzony z uzwojeniem wirnika. Jeżeli SEM, wznieconą w uzwojeniu wirnika oznaczmy przez  $E_w$ , to na zaciskach II—II będziemy mieli napięcie  $V_2 = V_1 + E_w$ . (w założeniu że kierunki wektorów  $V_1$  i  $E_w$  są zgodne).



Rys. 117.

Gdy obrócimy wirnik tak, by płaszczyzny obu uzwojeń były w stosunku do siebie prostopadłe (rys. 117<sup>II</sup>) wtedy uzwojenie wirnika nie będzie wcale skojarzone ze strumieniem stojana. Żadna SEM w tym uzwojeniu się nie wznieci—na zaciskach II—II otrzymamy napięcie  $V_2 = V_1$ .

Obracając wirnik o dalsze 90°, otrzymamy znówu pełne skojarzenie uzwojenia wirnika ze strumieniem stojana. SEM, wzniecana w wirniku, będzie co do wielkości taka sama, jak w wypadku pierwszym — czyli  $E_w$ , jednakże o przeciwnym kierunku. Napięcie na zaciskach II—II:  $V_2 = V_1 - E_w$ .

Każde położenie wirnika pośrednie między pierwszym i trzecim da na zaciskach II—II napięcie  $V_2$  w granicach:

$$V_1 + E_w \geq V_2 \geq V_1 - E_w,$$

zależnie od kąta, który ze sobą tworzą osie obu uzwojeń (patrz rys. 115).

Oznaczmy ten kąt przez  $\alpha$ . Strumień stojana  $\Phi_s$  rozkładamy na dwie składowe:  $\Phi_s \cos \alpha$  i  $\Phi_s \sin \alpha$ . Z tych dwóch strumieni strumień  $\Phi_s \cos \alpha$  jest skojarzony z uzwojeniem wirnika.

Przy skojarzeniu uzwojenia wirnika z pełnym strumieniem  $\Phi_s$  SEM, wzniecona w tym uzwojeniu, wynosiła  $E_w$ ; gdy strumień jest mniejszy ( $\Phi_s \cos \alpha$ ) SEM będzie oczywiście w tym samym stosunku mniejsza i wyniesie  $E_w \cos \alpha$ . Zatem ostatecznie:

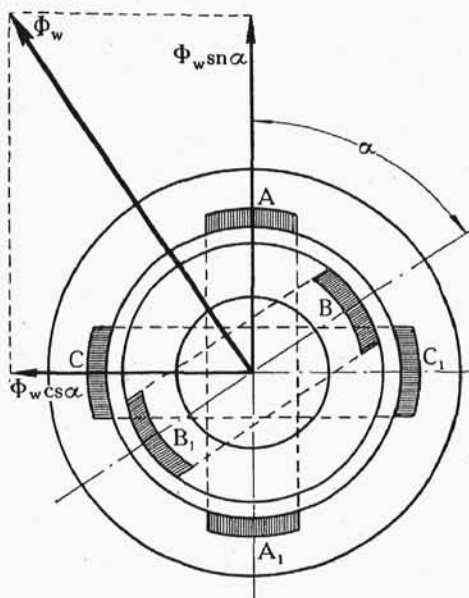
$$V_2 = V_1 + E_w \cos \alpha, \text{ gdzie } 0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ.$$

Otrzymujemy regulację napięcia zupełnie płynną.

Przez uzwojenie wirnika przepływa prąd, a zatem uzwojenie to wytwarza swój strumień  $\Phi_w$ , skierowany prostopadłe do płasz-

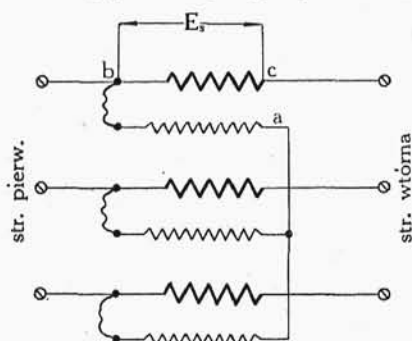
czyzny uzwojenia. Strumień ten możemy rozłożyć (rys. 118) na dwie składowe:  $\Phi_w \cos \alpha$  i  $\Phi_w \sin \alpha$ . Pierwsza z nich ( $\Phi_w \cos \alpha$ ) jest kompensowana przez strumień stojana  $\Phi_s$ , gdyż oba strumienie są skierowane w stosunku do siebie wprost przeciwnie.

Składowa druga  $\Phi_w \sin \alpha$ , nie będąc skompensowaną, odgrywa rolę strumienia rozproszenia, powodując nadmierny indukcyjny spadek napięcia w uzwojeniu wirnika. By tę składową stłumić, stojan otrzymuje dodatkowo specjalne uzwojenie zwarte ( $C-C_1$ ) pod kątem prostym do uzwojenia  $A-A_1$ .



Rys. 118.

*Regulator indukcyjny trójfazowy*—różni się od silnika trójfazowego asynchronicznego tylko brakiem pierścieni ślizgowych oraz dodaniem przekładni ślimakowej, umożliwiającej zmiany położenia wirnika w stosunku do stojana. Uzwojenia stojana i wirnika są takie same, jak w silniku. Połączenie uzwojeń—autotransformatrowe (rys. 119), przyczem pierwotnem jest uzwojenie wirnika,

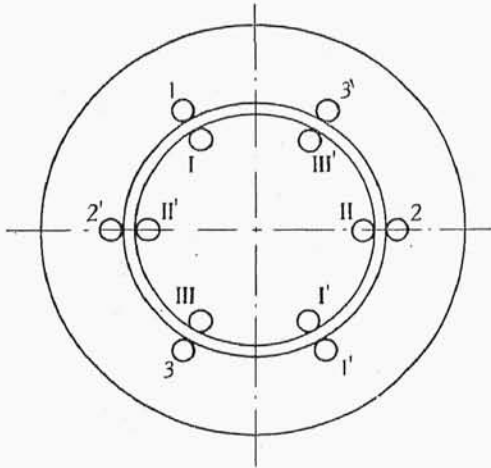


Rys. 119.

połączone w  $\Delta$ . Gdy uzwojenie trójfazowe wirnika załączymy na sieć trójfazową, w obwodzie wirnika popłynie prąd i dookoła wirnika powstanie pole magnetyczne, wirujące z szybkością  $n = \frac{60f}{p}$ , gdzie  $f$ —częstotliwość prądu, a  $p$ —liczba par biegunów, na jaką są nawinięte uzwojenia stojana i wirnika. O ile napięcie po stronie pierwotnej jest stałe, wielkość pola wirującego jest praktycz-

nie też stała i niezależna od obciążenia i położenia wirnika. To pole, wirując, będzie przecinało zarówno uzwojenie stojana, jak i wirnika.

Ponieważ jest stałe, więc i SEM-e przez nie wzniecane w obu uzwojeniach będą miały stałą wartość. Od wzajemnego położenia stojana i wirnika zależy przesunięcie fazowe tych SEM-yh.



Rys. 120.

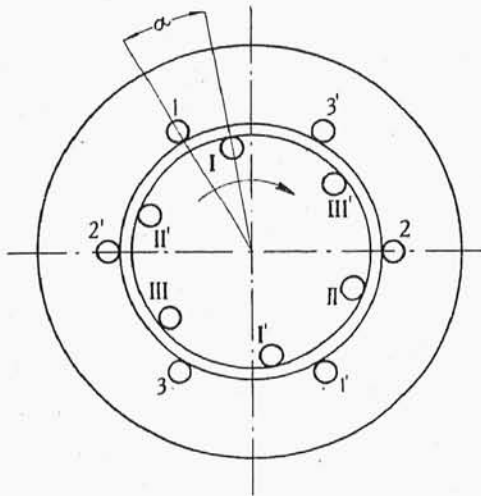
Rys. 120 schematycznie przedstawia regulator indukcyjny trójfazowy. Uzwojenia stojana i wirnika są tu nawinięte na 2 bieguny.

Dla prostoty przyjmujemy, że na biegun i fazę przypada jeden żłobek.

Przy wzajemnym położeniu uzwojeń stojana i wirnika, jak na rys. 120, podlegają one jednocześnie działaniu tego samego pola magnetycznego, a więc SEM-e, wzniecane w tych uzwojeniach, w tym samym czasie

będą osiągały swe wartości maksymalne, będą przechodziły przez zero i t. p. — jednym słowem będą ze sobą w fazie.

Gdy wirnik skrećimy w stosunku do stojana o pewien kąt  $\alpha$ ,



Rys. 121.

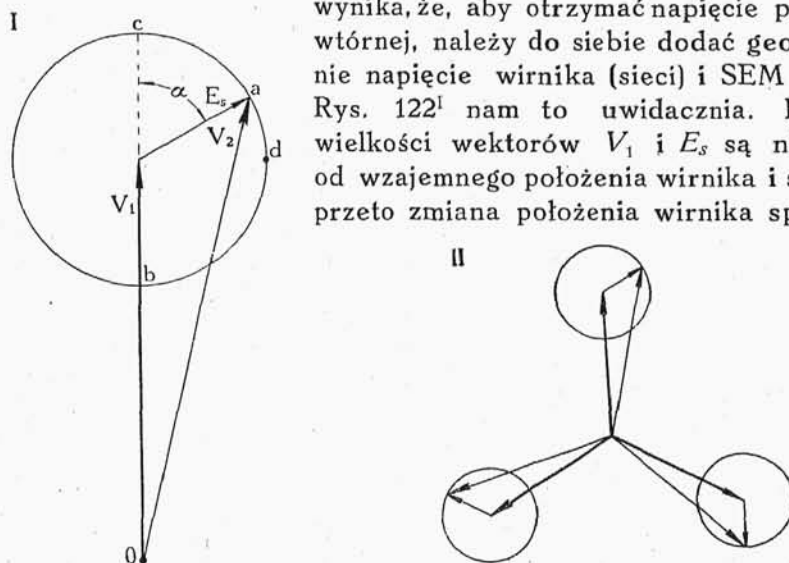
wtedy, przyjmując, że kierunek pola wirującego jest taki, jak na rys. 121, powiemy, że SEM stojana wyprzedza SEM wirnika o kąt  $\alpha$ , gdyż oś pola wirującego najpierw przetnie przewody w żłobku np. 1 stojana, a później dopiero w żłobku I wirnika. Przy skreśnieniu wirnika o  $180^\circ$  przesunięcie fazowe między SEM-emi w wirniku i stojanie będzie wynosiło  $180^\circ$ . Napięcie fazowe po stronie wtórnej ( $V_2 = V_{ac}$ ), jak widać z rys. 119, jest

sumą napięcia fazowego w wirniku ( $V_{ab}$ ) i SEM-ej wzniecanej w fazie stojana ( $E_s = E_{bc}$ ).

Pomijając spadki napięć, napięcie fazowe wirnika można utożsamić z jego SEM-ą. Wtedy przesunięcie fazowe między napię-



ciem fazowym wirnika, a SEM-ą fazową stojana będzie się równało kątowi  $\alpha$  skręcenia wirnika w stosunku do stojana. Z tego wynika, że, aby otrzymać napięcie po stronie wtórnej, należy do siebie dodać geometrycznie napięcie wirnika (sieci) i SEM stojana. Rys. 122<sup>I</sup> nam to uwidacznia. Ponieważ wielkości wektorów  $V_1$  i  $E_s$  są niezależne od wzajemnego położenia wirnika i stojana—przeto zmiana położenia wirnika spowoduje



Rys. 122.

tylko przesuwanie się punktu  $a$  wzdłuż okręgu koła ze środkiem w czubku wektora  $V_1$  i o promieniu równym  $E_s$ . Przy zgodnym położeniu uzwojenia stojana i wirnika, punkt  $a$  zajmie położenie  $c$ , przy obrocie wirnika o  $180^\circ$ —położenie  $b$ . W tych granicach od  $Oc$  do  $Ob$  możemy płynnie zmieniać napięcie po stronie wtórnej.

Wykres 122<sup>I</sup> jest sporządzony dla jednej fazy.

Rys. 122<sup>II</sup> daje nam obraz zmian napięcia we wszystkich 3-ch fazach regulatora indukcyjnego.

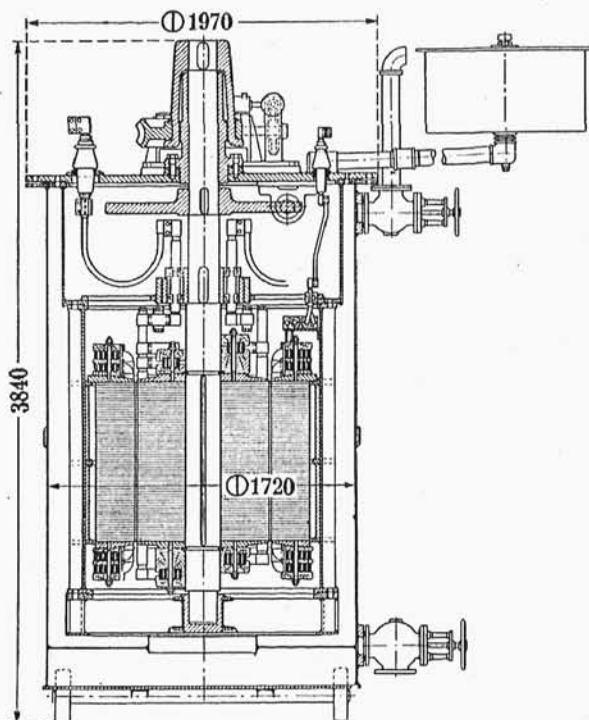
Regulatory indukcyjne, podobnie jak transformatory zwyczajne, mogą być zanurzone w pudle z olejem. Daje to pewną izolację i dobre chłodzenie.

Na rys. 123 mamy przekrój takiego regulatora o mocy własnej 2120 kVA i napięciu na fazę: w wirniku  $\frac{5200}{\sqrt{3}}$  V, w stojanie 392 V.

Zastosowanie: używa się reg. induk. dla zasilania przetwornic jednotwornikowych i prostowników rtęciowych, gdy chcemy po stronie prądu stałego płynnie zmieniać napięcie w szerokich granicach; przy sieciach dalekośnośnych—dla regulacji napięcia (sposób drogi) oraz w pewnych innych wypadkach specjalnych.

Moc pozorną własną regul. induk. możemy obliczyć według wzoru:





Rys. 123.

$$P' = \frac{(V_{mx} - V_{min}) \cdot I \cdot \sqrt{3}}{2 \cdot 1000} \text{ kVA}$$

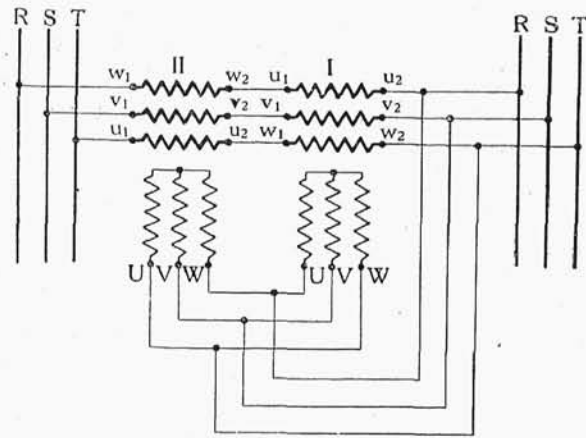
gdzie  $V_{mx}$  i  $V_{min}$  — granice regulacji;  $I$  — normalny prąd.

*Uwaga.* Na rys. 116 i 119 linie wężykowate oznaczają giętke kabelki, któremi są połączone uzwojenia stojana i wirnika.

Regulator indukcyjny trójfazowy, opisany wyżej, nosi nazwę regulatora pojedynczego. Przy jego stosowaniu między napięciem sieci pierwotnej i wtórnej istnieje, jak wskazuje rys. 122, pewne przesunięcie fazowe. Jest ono tem znaczniejsze, im SEM stojana  $E_s$  jest większa i im położenie wirnika jest bardziej zbliżone do środkowego (p-kt  $d$  na kole rys. 122<sup>1</sup>). To przesunięcie fazowe może być czasami niepożądane — np. przy pracy równoległej, gdyż byłoby przyczyną prądów wyrównawczych. Pozatem, zwłaszcza przy większych mocach, moment oddziaływania stojana na wirnik osiąga duże wartości, co utrudnia skręcanie wirnika pod obciążeniem.

Jednemu i drugiemu może zapobiec zastosowanie t. zw. regulatora indukcyjnego podwójnego, utworzonego z dwóch zupełnie jednakowych pojedynczych.

Schemat połączeń uzwojeń widzimy na rys. 124. Uzwojenia pierwotne (wzbudzające) obu regulatorów są połączone równolegle. Przy załączeniu, jak na rys. 124, pola wirujące każdego z nich będą się obracały w kierunkach przeciwnych. Uzwojenia wtórne są połączone w szereg. Zatem SEM-e w nich wznie-



Rys. 124.

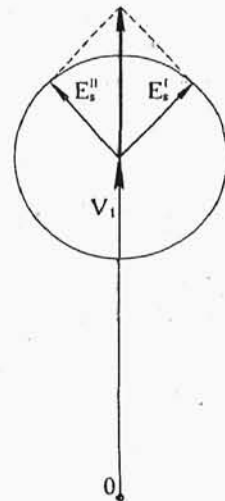
cione będą się ze sobą dodawały. Wskutek przeciwnego kierunku obracania się pól wirujących, kąty przesunięcia fazowego każdej z tych SEM w stosunku do napięcia  $V_1$ , będąc jednakowe co do wielkości, są przeciwne co do znaku. W ten sposób wektor ich sumy geometrycznej (rys. 125) będzie skierowany zawsze wzdłuż wektora napięcia  $V_1$ , wobec czego unikniemy przesunięcia fazowego, które występuje przy regulatorze pojedynczym.

c. *Transformatory przesuwne.* Zostały one wprowadzone na rynek przez firmę drezdeńską Koch i Sterzel — i pozwalają również na płynną regulację napięcia.

Wyjaśnimy tutaj zasadę budowy i działania tych transformatorów.

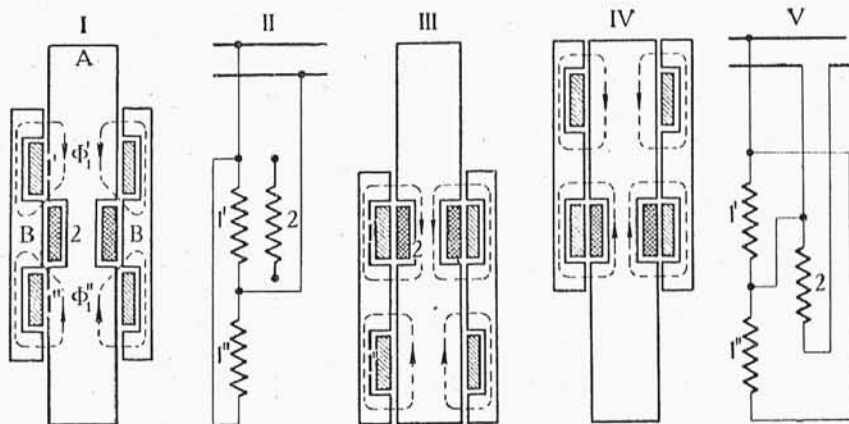
Transformator jednofazowy (rys. 126<sup>I</sup>) składa się z nieruchomego rdzenia  $A$  i ruchomej ramy  $B-B$ , utworzonej z dwóch części sztywno ze sobą związanych. Rama wewnątrz posiada dwa jednakowe uzwojenia pierwotne  $1'$  i  $1''$ , połączone ze sobą równolegle i tak nawinięte, by strumienie przez nie wytwarzane były skierowane przeciwnie. Na rdzeniu  $A$  mamy nawinięte uzwojenie wtórne 2. Schemat połączeń przedstawia rys. 126<sup>II</sup>. Gdy uzwojenie wtórne zajmuje w stosunku do pierwotnych położenie środkowe (rys. 126<sup>I</sup>), wpływy strumieni  $\Phi_1'$  i  $\Phi_1''$  wzajemnie się znoszą — napięcie na zaciskach uzwojenia 2 jest równe zero.

Gdy ramę przesuniemy w położenie dolne (rys. 126<sup>III</sup>), uzwojenie  $1''$  nie odgrywa żadnej roli (pobiera tylko prąd magnesujący), natomiast uzwojenia  $1'$  i 2 tworzą normalny transformator jednofa-



Rys. 125.

zowy płaszczony — napięcie w uzwojeniu wtórnem osiąga swe maksimum. Ten sam obraz otrzymamy przy górnem położeniu ramy (rys. 126<sup>IV</sup>), jednakże kierunek napięcia w uzwojeniu wtórnem będzie przeciwny. W położeniu pośrednim na uzwojenie wtórne działają oba strumienie, wzniecając SEM-e przeciwnych kierunków, tak że na zaciskach uzwojenia otrzymamy różnicę tych SEM-ych, wiel-



Rys. 126.

kość której zmienia się w sposób płynny, zależnie od wzajemnego położenia rdzenia i ramy.

W praktyce transformator przesuwny znalazł zastosowanie jako transformator dodawczy. Uzwojenia główne (1', 1'', 2) są połączone, jak na rys. 126<sup>V</sup>. Przez uzwojenie 2 w takim połączeniu płynie prąd niezależnie od położenia tego uzwojenia w stosunku do uzwojeń pierwotnych — nie mamy w ten sposób (poza dwoma skrajnymi połączeniami) skompensowania amperozwojów pierwotnych i wtórnych, co pociąga za sobą nadmierne strumienie rozproszania. By te strumienie stłumić, otrzymuje transformator uzwojenia zwarte (podobnie, jak przy regulatorze induk. jednofazowym), mieszczące się w ramie.

Mocne sprężyny dociskają do siebie rdzeń i ramę — tak żeby szczelinę powietrzną pomiędzy nimi uczynić jaknajmniejszą. Słabe nasycenie żelaza w miejscach styku zabezpiecza od nadmiernego zagrzania się i nie milego dźwięku. Przy prądzie trójfazowym korzysta się z trzech jednofazowych jednostek, połączonych w układ trójfazowy.

Samo przesuwanie ramy w stosunku do rdzenia odbywa się przy małych transformatorach ręcznie, przy większych — za pomocą silnika elektrycznego z przekładnią ślimakową. Jednostki większe zanurza się w oleju. Transformatory przesuwne, z powodu niemożności uzyskania dobrego odizolowania uzwojeń, nie nadają się do wysokich napięć,