

Wypada to z geometrycznego dodawania napięć, przeprowadzonego na rys. 113.

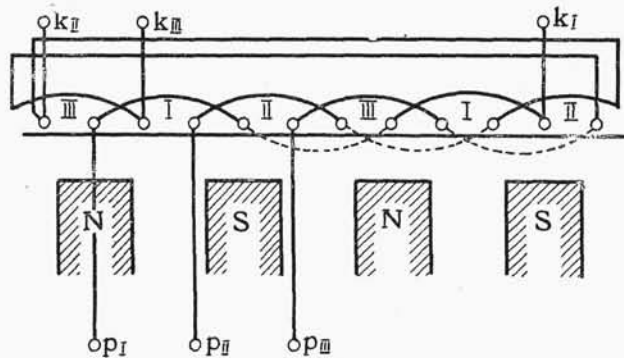
Przy takim skojarzeniu mamy sposobność czerpania prądu o dwóch różnych napięciach.

48. Uzwojenie trójfazowe.

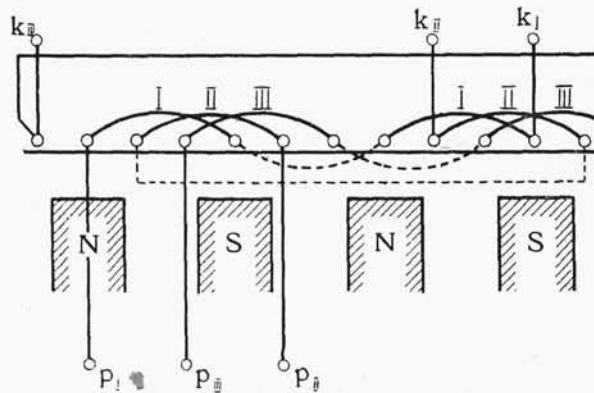
Aby otrzymać uzwojenie trójfazowe umieszczamy na tym samym tworniku trzy jednakowe uzwojenia, z których pobieramy trzy prądy.

Dla osiągnięcia odpowiedniej różnicy faz pomiędzy siłami elektromotorycznymi w tych uzwojeniach, wynoszącej trzecią część okresu, mamy dwa sposoby umieszczania zwojnic.

Jeżeli uzwojenie drugiej fazy względem uzwojenia pierwszej fazy i uzwojenie trzeciej fazy względem uzwojenia drugiej fazy przesuniemy po obwodzie twornika o trzecią część podwójnej podziałki biegunowej, rys. 114, to oczywiście od razu otrzymamy pożądaną różnicę faz napięć.



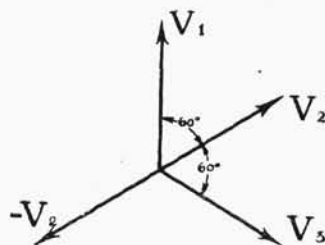
Rys. 114.



Rys. 115.

Możemy jednak zastosować przesunięcie tylko o trzecią część podziałki biegunowej, rys. 115, wtedy różnica faz pomiędzy napięciami w uzwojeniu fazy I-ej i II-giej będzie się równała szóstej części okresu; tak samo różnica faz napięć II i III fazy będzie wynosiła również szóstą część okresu.

Wystarczy jednak końce zwojnic drugiej fazy przyjąć za początki, a początki za końce, aby wektor napięcia odwrócił się, rys. 116, i wtedy będziemy mieli normalny układ trójfazowy. Ten drugi sposób ułożenia zwojnic ułatwia dzielenie dużych tworników na części w celu łatwiejszego przewozu.



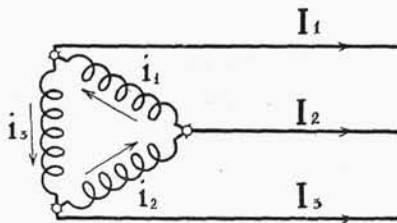
Rys. 116.

49. Kojarzenie uzwojeń trójfazowych.

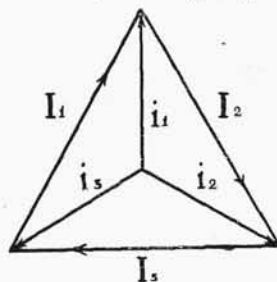
Uzwojenie trójfazowe, jak widzieliśmy, ma sześć końców, a mianowicie każda faza po dwa, trzeba więc dla odprowadzenia prądu pociągnąć sześć drutów.

Zamiast sześciu drutów prowadzimy jednak zwykle tylko trzy druty, kojarczając uzwojenia w trójkąt lub w gwiazdę.

Kojarczając w trójkąt według rysunku 117, mamy pomiędzy przewodami takie same napięcie, jak na poszczególnych fazach, natomiast prąd w przewodach odprowadzających przy równym obciążeniu faz jest $\sqrt{3}$ większy od prądu w uzwojeniach poszczególnych faz.



Rys. 117.



Rys. 118.

Wynika to z wektorowego dodawania prądów według pierwszego prawa Kirchhoffa w punktach rozgałęzienia, rys. 118.

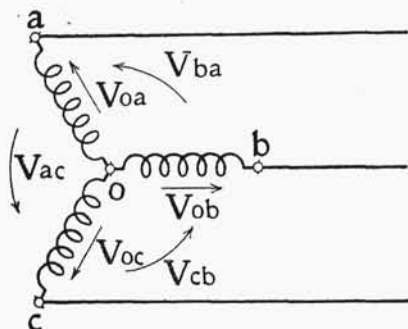
$$\hat{I}_1 = \hat{i}_1 - \hat{i}_3 \quad \hat{I}_2 = \hat{i}_2 - \hat{i}_1 \quad \hat{I}_3 = \hat{i}_3 - \hat{i}_2$$

Kojarczając fazy w gwiazdę, rys. 119, będziemy mieli prądy przewodowe równe prądom fazowym, ale zato napięcia międzyprzewodowe będą $\sqrt{3}$ razy większe od napięć fazowych, jak to wynika

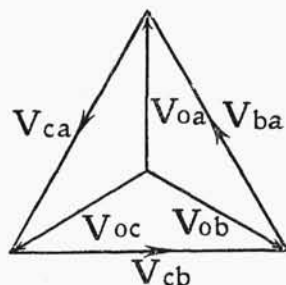
z geometrycznego dodawania napięć fazowych według rys. 120. Np.,

$$\hat{V}_{ba} = \hat{V}_{oa} - \hat{V}_{ob}$$

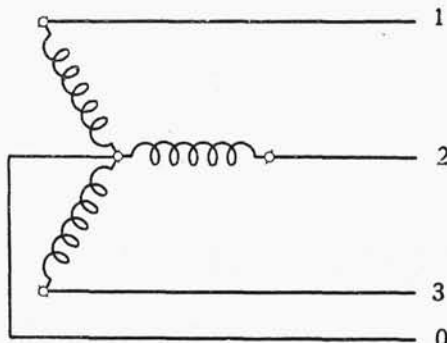
Kojarząc fazy w gwiazdę, prowadzimy nieraz cztery przewody, jak wskazuje rys. 121; trzy przewody 1, 2, 3 są to tak zwane fazowe, czwarty — zerowy.



Rys. 119.



Rys. 120.



Rys. 121.

Tu mamy sieć o podwójnem napięciu, np., 380 i 220 woltów. Wyższe napięcie — między przewodami fazowymi, a niższe — między przewodami fazowymi a przewodem zerowym.

W przewodzie zerowym płynie prąd tylko wtedy, gdy obciążenie poszczególnych faz jest nierówne. Układ czteroprzewodowy ma zastosowanie wtedy, gdy dla silników przeznaczamy, np., napięcie 380 woltów, a dla lamp 220 woltów.

Obecnie lampy żarowe wyrabia się najwyżej na 260 woltów.

50. Siła elektromotoryczna prądnic prądu zmiennego.

Według zasady, że siła elektromotoryczna w drucie twornika jest równa liczbowo strumieniowi, przeciętemu w jednostkę czasu,

znajdziemy, że w jednym drucie uzwojenia twornikowego, przy względnym ruchu magnesnicy i twornika, powstanie średnia siła elektromotoryczna:

$$E_{sr} = \Phi 2p \frac{n}{60} 10^{-8} \text{ woltów,}$$

gdzie Φ — strumień magnetyczny jednego bieguna,

$2p$ — liczba biegunów magnesnicy,

n — liczba obrotów magnesnicy na minutę.

Skuteczna wartość tej siły elektromotorycznej oczywiście będzie inna:

$$E_1 = k_1 E_{sr}$$

gdzie k_1 jest współczynnikiem, zależnym od kształtu funkcji, wyrażającej zależność siły elektromotorycznej od czasu, funkcja zaś ta zależy od rozkładu gęstości linii magnetycznych w szczelinie pomiędzy magnesnicą, a twornikiem. Wielkość współczynnika k , zawsze jest większa od jedności.

Uzwojenie jednej fazy ma z drutów, połączonych w szereg; nie we wszystkich jednak drutach siły elektromotoryczne są ze sobą w fazie, przeto cała siła elektromotoryczna uzwojenia jednej fazy będzie:

$$E = k_2 E_1 z$$

Tu współczynnik k_2 zależy od różnicy faz pomiędzy siłami elektromotorycznymi poszczególnych drutów, i jest mniejszy od jedności. Uwzględniając wszystkie powyższe zależności, otrzymamy:

$$E = k_1 k_2 \Phi 2p \frac{n}{60} z 10^{-8} \text{ woltów.}$$

Pozatem wiemy, że częstotliwość prądu f wyraża się wzorem:

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

więc wprowadzając jeszcze skrót $2 k_1 k_2 = k$, otrzymamy:

$$E = k f z \Phi 10^{-8} \text{ woltów.}$$

Wartość współczynnika k zależy oczywiście od rodzaju uzwojenia na tworniku i budowy magnesnicy.

Tak np., dla zwojnic szerokich w układzie trójfazowym wartości dla k bywają następujące:

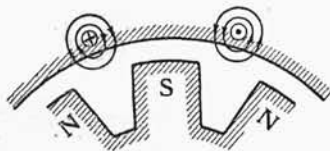
Układ jednego boku zwojnicy	ooo	oo	o
$\frac{a}{\tau} = \frac{2}{3}$	2,26	2,30	2,46
$\frac{a}{\tau} = \frac{1}{2}$	2,54	2,59	2,83

$\frac{a}{\tau}$ — oznacza stosunek szerokości bieguna do podziałki biegunowej.

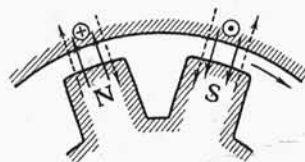
51. Reakcja twornika w prądnicach prądu zmiennego.

Przy obciążeniu prądnicy na wielkość siły elektromotorycznej ma wpływ nie tylko strumień magnetyczny magnesnicy, lecz także i strumień twornika.

Chcąc dokładniej rozważyć wpływ strumienia magnetycznego twornika na napięcie prądnicy, rozkładamy ten strumień na dwie części. Jedna część strumienia magnetycznego twornika przenika do biegunów elektromagnesów, kojarzy się tu ze strumieniem magnetycznym magnesnicy i stanowi właściwą reakcję twornika; druga zaś część zamyka się w szczelinie, rys. 122, pomiędzy magnesnicą, a twornikiem i nie ma znacznego wpływu na przebieg linii magnetycznych w magnesnicy, jednak daje siłę elektromotoryczną samoindukcji w uzwojeniu twornika.



Rys. 122.



Rys. 123.

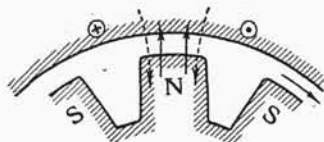
Skutki reakcji twornika są różne zależnie od tego, jakimi odbiornikami jest obciążona prądnica.

1. Jeżeli natężenie prądu w odbiornikach jest w fazie z siłą elektromotoryczną, indukowaną w uzwojeniu twornika przez magnesnicę, to maksimum prądu przypada na tę chwilę, gdy mamy maksymalną siłę elektromotoryczną, a więc boki zwojnicy twornika

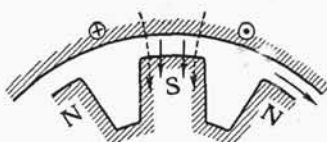
stoją w środku nad biegunami, rys. 123. Wtedy linie magnetyczne twornika na jednej połowie biegunów będą zgodne z liniami magnetycznymi, a w drugiej przeciwne, przez co powstanie niewielkie zmniejszenie strumienia magnetycznego, gdyż skutkiem nasycenia żelaza wzmocnienie strumienia będzie mniejsze, niż osłabienie.

2. Gdy odbiorniki będą miały bardzo znaczną samoindukcję, tak że w przybliżeniu będzie można przyjąć, iż prąd opóźni się w fazie względem siły elektromotorycznej o ćwierć okresu, to maksimum prądu będzie wtedy, gdy środek bieguna znajdzie się w środku cewki, rys. 124. Ponieważ spóźniający się prąd ma kierunek tej siły elektromotorycznej, która minęła, a ruch bieguna jest w prawo, więc strumień magnetyczny, wywołany prądem twornika, będzie miał kierunek wręcz przeciwny do kierunku strumienia w magnetycznym. Oba te strumienie, objęte przez zwojnicę twornika, będą wzmacniały się i słabły jednocześnie, wzniecając więc siły elektromotoryczne przeciwne. Przeto wypadkowa siła elektromotoryczna będzie o wiele mniejsza od wzbudzonej przy obciążeniu bezindukcyjnym.

3. Gdy obciążenie prądnicy będzie pojemnościowe, tak że prąd będzie wyprzedzał napięcie w fazie o ćwierć okresu, wtedy w chwili położenia bieguna w środku zwojnicy, rys. 125, kierunek



Rys. 124



Rys. 125.

prądu będzie odpowiadał kierunkowi siły elektromotorycznej, która nastąpi. W tych okolicznościach strumień, wywołany przez prąd w tworniku, będzie zgodny ze strumieniem magnetycznym i, zmieniając się jednocześnie, wywoła dodatkową siłę elektromotoryczną, która doda się do siły elektromotorycznej, wywołanej tylko przez magnetyczną, przez co będziemy mieli siłę elektromotoryczną wypadkową większą od tej, która była przy obciążeniu omowym, t. j. bezindukcyjnym i bezpojemnościowym.

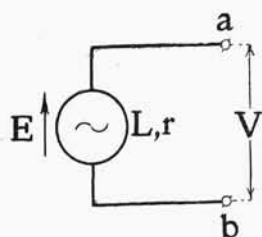
52. Indukcyjny i omowy spadek napięcia w tworniku.

Napięcie V na zaciskach prądnicy prądu zmiennego, rys. 126, może być wyrażone wzorem:

$$\hat{V} = \hat{E} - \hat{I}L\omega - \hat{I}r$$

Tu E — oznacza siłę elektromotoryczną w uzwojeniach twornika z uwzględnieniem oddziaływania twornika.

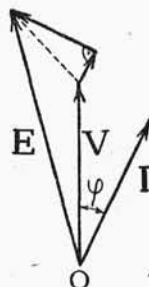
$IL\omega$ — spadek napięcia indukcyjny, Ir — spadek napięcia omowy.



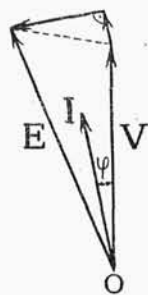
Rys. 126.



Rys. 127.



Rys. 128.



Rys. 129.

Wynik geometrycznego odejmowania spadków napięcia widzimy na rys. 127, 128 i 129.

Na rys. 127 prąd jest zgodny w fazie z napięciem, na rys. 128 — opóźnia się w fazie względem napięcia, a na rys. 129 — wyprzedza w fazie napięcie.

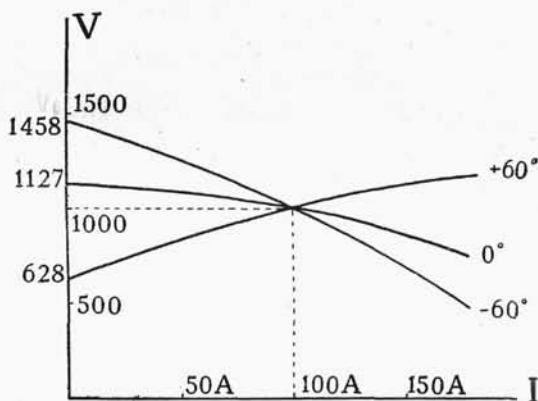
Z tych wykresów wynika, że wpływ indukcyjności twornika na napięcie prądnicy jest podobny do wpływu prądu twornikowego na siłę elektromotoryczną twornika, rozważanego poprzednio jako oddziaływanie (reakcja) twornika. Przy tej samej sile elektromotorycznej i tem samym natężeniu prądu mamy najwyższe napięcie przy obciążeniu pojemnościowym, nieco niższe przy obciążeniu omowym i jeszcze niższe przy obciążeniu indukcyjnym.

53. Zewnętrzne charakterystyki prądnic prądu zmiennego.

Krzywą zmienności napięcia na zaciskach prądnicy w zależności od natężenia prądu w obwodzie twornika nazywamy charakterystyką zewnętrzną. Wobec przedstawionych w powyższych paragrafach wpływów prądu twornika na napięcie prądnicy, charakterystyki prądnicy będą miały różne położenie i kształt, zależnie od rodzaju obciążenia, rys. 130. Najniżej przejdzie charakterystyka przy obciążeniu indukcyjnym, wyżej pójdzie przy obciążeniu omowym, a jeszcze wyżej — przy obciążeniu pojemnościowym.

Charakterystyczną cechą prądnicy jest zmiana jej napięcia przy ociążeniu.

Wyznacza się tę zmianę przez doprowadzenie napięcia do wartości normalnej przy pełnem ociążeniu, a następnie obserwuje się napięcie po ociążeniu, nie zmieniając prądu magnesującego.



Rys. 130.

Zmianę napięcia obliczamy zwykle w odsetkach według następującego wzoru:

$$\varepsilon = \frac{V_o - V}{V} \cdot 100$$

V_o — napięcie prądnicy ociążzonej.

V — napięcie prądnicy ociążzonej.

Dla normalnych prądnic, napędzanych turbinami parowymi, przy ociążeniu z $\cos \varphi = 1$

$$\varepsilon = \text{od } 20 \text{ do } 30\%$$

a przy ociążeniu indukcyjnem z $\cos \varphi = 0,8$

$$\varepsilon = \text{od } 35 \text{ do } 50\%$$

Takie duże zmiany w napięciu są stosowane głównie w celu zabezpieczenia prądnic od nadmiernych prądów przy zwarciaach.

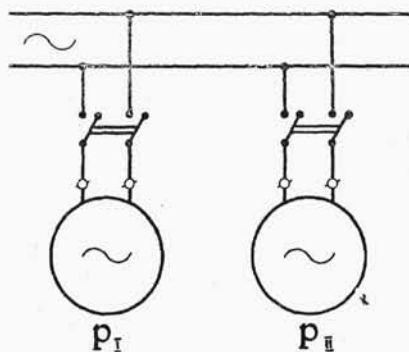
Jeżeli z jakichkolwiek względów nie można otrzymać dość znacznego spadku napięcia przy nadmiernym prądzie twornika, to pomiędzy prądnicą a szynami zbiorczemi dajemy w przewodach dławiki bez żelaza, których indukcyjność powoduje mały spadek napięcia przy prądzie normalnym, natomiast znaczny przy prądzie nadmiernym.

Dla utrzymania stałego napięcia przy zmiennem obciążeniu stosują się zazwyczaj regulatory automatyczne, które pod wpływem napięcia i prądu twornika odpowiednio zmieniają natężenie prądu, magnesującego elektromagnesy prądnicy.

Gdy obciążenie prądnicy wzrasta, regulator automatyczny zwiększa natężenie prądu magnesującego, gdy zaś obciążenie maleje, regulator zmniejsza prąd magnesujący i tą drogą utrzymuje napięcie prądnicy na właściwym poziomie. U nas najszersze zastosowanie mają regulatory automatyczne Tirrilla, Siemens-Schuckerta i Brown-Boveri.

54. Warunki równoległej pracy prądnic jednofazowych.

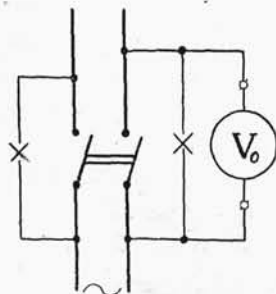
Zaciski prądnic prądu zmiennego, mających pracować równolegle, rys. 131, przyłączają się do przerywaczy dowolnie.



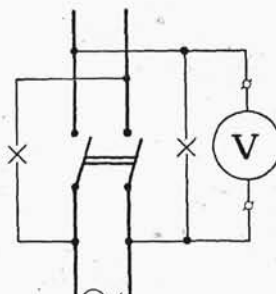
Rys. 131.

Gdy jedna prądnica pracuje na sieć i ma być przyłączona druga, to należy w tej drugiej prądnicy zrównać z pierwszą napięcie i częstotliwość prądu oraz uzgodnić fazy napięć.

Do skontrolowania wyrównania napięć służy woltomierz.



Rys. 132.



Rys. 133.

Wyrównanie zaś częstotliwości i faz sprawdzamy lampkami fazowymi i woltomierzem zerowym, włączonym równolegle do jednej z lampek fazowych, rys. 132.

Gdy częstotliwości i fazy zostaną wyrównane, lampy zgasną, a woltomierz zerowy wskaże zero napięcia. Wtedy należy zamknąć przerywacz.

Jeżeli połączenie lampek z wyłącznikiem skrzyżować, tak, jak pokazane na rys. 133, to wypadnie zamknąć wyłącznik wtedy, gdy lampki będą świeciły najsilniej i woltomierz będzie wskazywał pełne napięcie.

Po włączeniu obu prądnic na wspólne szyny zbiorcze, obie prądnice będą biegły synchronicznie, to jest pomiędzy liczbami obrotów na minutę wirników i liczbami par biegunów zachodzić będzie zależność:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{p_2}{p_1}$$

W tym biegu synchronicznym prądnice będą utrzymywane przez prąd wyrównawczy, który natychmiast powstanie w zamkniętym obwodzie dwóch prądnic, połączonych szynami zbiorczymi, skoro tylko siły elektromotoryczne prądnic rozsuną się w fazie, rys. 134, i dadzą w sumie pewną siłę elektromotoryczną wypadkową.

Prąd ten oddziaływa na wirniki prądnic w ten sposób, że hamuje wirnik, który w ruchu swoim poszedł zbyt daleko naprzód, a przyspiesza bieg wirnika, który się spóźnił, z tego powodu oba wirniki utrzymują się w biegu zgodnym.

Dla dokładnego zrozumienia działania prądnic, połączonych równolegle, ważnem jest zapoznanie się z wpływem zmiany wzbudzania i zmiany dopływu czynnika, poruszającego silnik napędowy, na natężenie prądu twornika i na jego obciążenie, wyrażone w mocy, oddawanej do sieci.



Rys. 134.

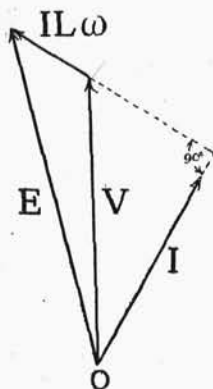
55. Wpływ zmiany wzbudzania prądnicy na prąd w tworniku.

Jeżeli prądnica prądu zmiennego pracuje na sieć sama, to powiększenie prądu wzbudzającego powoduje wzrost napięcia sieci, przytem w przeważnej liczbie wypadków zwiększa się również

prąd i moc oddana do sieci. Skutkiem tego wzrasta obciążenie silnika napędowego. Pod wpływem zwiększonego obciążenia silnik napędowy trochę zwalnia biegu i regulator jego wpuszcza więcej czynnika, napędzającego silnik, przez co równowaga pomiędzy momentem napędowym, a momentem obciążenia ustala się znowu, ale już przy nowej, nieco zmniejszonej, szybkości biegu.

Jeżeli natomiast dana prądnica pracuje równolegle z innymi prądnicami, to przebieg zjawisk jest zupełnie odmienny.

Rozważmy dwie prądnice, rys. 131, połączone równolegle, mające narazie równe siły elektromotoryczne oraz równe prądy, przesunięte o ten sam kąt względem napięć, a więc równe obciążenia. Wtedy wykresy wektorowe tych prądnic będą miały układy zupełnie jednakowe tak, jak pokazano na rys. 135, gdzie pominięto omowy spadek napięcia, wobec tego że zwykle jest on bardzo mały. Tu wektor $IL\omega$ jest oczywiście prostopadły do wektora I .



Rys. 135.

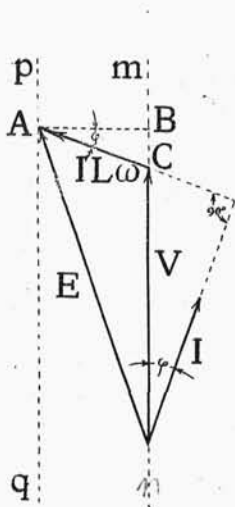
Zwiększając prąd magnesujący prądnicy, np., I-ej i zmniejszając jednocześnie prąd magnesujący prądnicy II-ej, można na szynach zbiorczych utrzymać to samo napięcie, a przez to, przy niezmiennych warunkach odbioru, ten sam prąd w sieci, przytem natężenie prądu w poszczególnych prądnicach zmieni się. Ta

zmiana jednak zajdzie w ten sposób, że rozkład obciążenia na poszczególne prądnice zmianie nie ulegnie.

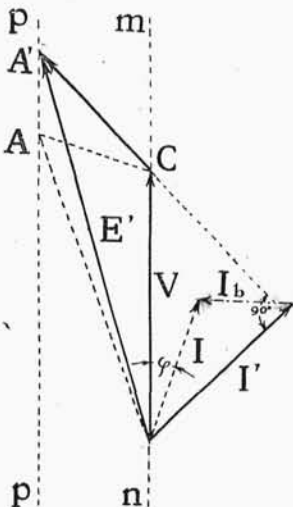
Wynika to z następującego rozumowania. Gdyby obciążenie jednej prądnicy wzrosło, a drugiej zmniejszyło się, to zaraz zostałaby zachwiana równowaga pomiędzy momentami hamującymi prądnic, a momentami napędowymi odpowiednich silników, gdyż dopływ czynnika napędowego do silników nie uległ zmianie.

W tych warunkach prądnica więcej obciążona musiałaby zwalniać biegu, a mniej obciążona przyspieszać i regulatory odśrodkowe zaczęłyby działać. Regulator pierwszego zespołu zwiększyłby dopływ czynnika napędowego do silnika, a regulator drugiego zmniejszyłby dopływ tego czynnika, skutkiem tego mogłaby znowu ustalić się równowaga, ale przy wolniejszym biegu prądnicy pierwszej i szybszym biegu prądnicy drugiej; to jednak jest niemożliwe, gdyż prądnice prądu zmiennego, równolegle połączone, mogą pracować, tylko w biegu synchronicznym. Skutkiem tego przy zmianie wzbudzenia zmieniają się w prądnicach nie tylko natężenia prądów, lecz i różnice faz pomiędzy prądami i napięciami,

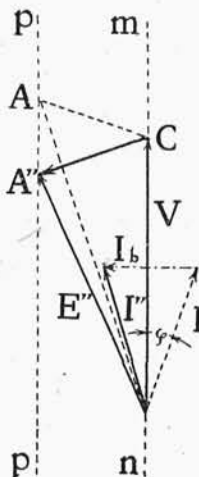
zmiany te zachodzą w ten sposób, że moc prądów, dostarczanych przez poszczególne prądnice, pozostaje taka sama, jaka była poprzednio.



Rys. 136.



Rys. 137.



Rys. 138.

Wynika to z następującego wykresu wektorowego. Na rys. 136, wykres wektorowy wyraża zależność:

$$\hat{V} = \hat{E} - \hat{I}L\omega$$

Moc, oddana przez prądnicę, wynosi:

$$P = VI \cos \varphi$$

Odcinek AB wyraża $IL\omega \cos \varphi$, jest więc proporcjonalny do mocy, oddanej przez prądnicę do sieci. Przy stałej mocy P długość odcinka AB jest stała. Przy zmianie siły elektromotorycznej E punkt A posuwa się wzdłuż prostej pq , równoległej do mn .

Przy równych siłach elektromotorycznych obu prądnic wykresy prądnic będą jednakowe.

Przy zmianie wzbudzenia inne będą siły elektromotoryczne i punkty A przesuną się wzdłuż pq w przeciwnie strony, tak jak to widzimy na rys. 137 i 138. W pierwszej prądnicy, gdzie wzbudzenie zostało zwiększone, prąd wzrośnie i odchyli się w fazie od napięcia w prawo, w prądnicy zaś drugiej, gdzie wzbudzenie zostało zmniejszone, prąd twornika zmniejszy się i odchyli się w fazie w przeciwną stronę w ten sposób, że będzie teraz wyprzedzać napięcie; rzuty jednak obu prądów na kierunek napięcia pozostaną bez zmiany, obciążenia więc prądnic pozostały te same.



Każdy z prądów I' i I'' można rozłożyć wektorowo na dwa prądy, z których jeden będzie prądem I , płynącym do sieci, tym samym co przy równych siłach elektromotorycznych, a drugi I_b — prądem bezwzrostowym, płynącym tylko w obwodzie prądnicy. Prąd taki zwiększa ilość ciepła Joule'a w uzwojeniach prądnicy i z tego względu jest niepożądany.

A zatem siły elektromotoryczne prądnicy, pracujących równolegle, powinny być równe, a prądy — proporcjonalne do mocy, oddawanych przez prądnice.

Wtedy współczynniki mocy prądnicy będą jednakowe i nie będzie prądów bezwzrostowych, płynących w obwodzie prądnicy, zwanym przez szyny zbiorcze.

56. Zmiana rozkładu obciążenia na prądnicach prądu zmiennego, pracujących w połączeniu równoległym.

Prądnica prądu zmiennego, pracująca równolegle z innymi, nie może być obciążona lub odciążona przez zmianę jej siły elektromotorycznej, gdyż silnik napędowy nie jest w stanie zmienić automatycznie swej mocy, wobec stałości biegu, związanego z biegiem innych prądnicy.

Regulator odśrodkowy, stosowany zwykle, nie zmieni swego położenia, gdy szybkość biegu utrzymuje się stała.

Chcąc obciążyć prądnice więcej lub mniej, należy przestawić położenie regulatora dla danej szybkości lub też w inny sposób zmienić dopływ czynnika, wprawiającego w ruch silnik napędowy.

Pod wpływem tej czynności zmieni się faza nie zaś wielkość siły elektromotorycznej względem napięcia na zaciskach, co wywoła zmianę prądu i obciążenia prądnicy.

Szczegóły tego zjawiska łatwo uwidocznić na wykresie wektorowym.

Zachowując oznaczenia, stosowane w paragrafie poprzednim, będziemy mieli wykres, przedstawiony na rys. 139. W miarę zwiększania mocy, dostarczanej prądnicą przez silnik napędowy, zwiększa się kąt ϕ pomiędzy napięciem V i siłą elektromotoryczną E .

Odcinek AB , wyrażający moc, oddaną przez prądnice do sieci, w miarę wzrostu kąta ϕ rośnie, ale tylko do $\phi = 90^\circ$; wtedy odcinek AB staje się równy OA' — promieniowi koła, zakreślonego promieniem E z punktu O .