

magnetyczne od prądu wzbudzenia gdyby reaktancja synchroniczna podłużna była równa reaktancji synchronicznej poprzecznej. Wykresy wektorowe pokazane na rys. 3.113 są nazywane *wykresami Blondella*.

3.10. WZBUDZANIE MASZYN ELEKTRYCZNYCH

3.10.1. Wiadomości ogólne

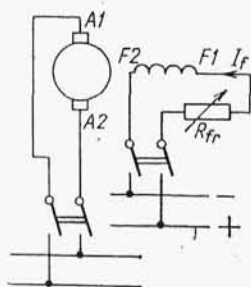
Każda maszyna elektryczna ma uzwojenie, do którego doprowadza się, albo od którego odprowadza się przetwarzaną energię elektryczną. Takimi uzwojeniami są uzwojenia twornika maszyny synchronicznej i maszyny prądu stałego, uzwojenie stojana albo wirnika maszyny indukcyjnej oraz uzwojenie pierwotne i uzwojenie wtórne transformatora. Transformatory i maszyny indukcyjne nie mają innych uzwojeń, oprócz tych do których doprowadza się albo od których odprowadza się przetwarzaną energię elektryczną. W tych maszynach strumień główny jest wytwarzany przez jedno z tych uzwojeń i przez jedno z tych uzwojeń płynie prąd magnesujący. Prąd ten płynie pod wpływem doprowadzonego z zewnątrz napięcia. Wartość prądu magnesującego odpowiada wywołanemu przez niego strumieniowi, pod wpływem którego indukuje się w tym samym uzwojeniu napięcie, prawie równe napięciu doprowadzonemu, bo różniącemu się od napięcia zewnętrznego tylko o spadki napięć na rezystancji i reaktancji rozproszenia tego uzwojenia.

Maszyny prądu stałego i maszyny synchroniczne mają oddzielne uzwojenia wzbudzające, przez które przepływa prąd stały. Do tych uzwojeń doprowadza się energię elektryczną, która spełnia pomocniczą rolę w procesie przetwarzania elektromechanicznego energii i jest przetwarzana na ciepło (ulega dyssypacji), ale nie jest przetwarzana na energię mechaniczną.

W stanie pracy prądnicowej te maszyny mogą pracować jako prądnice obcowzbudne albo samowzbudne. W prądnicie obcowzbudnej prąd wzbudzenia płynie pod wpływem obcego źródła napięcia. W prądnicie samowzbudnej prąd wzbudzenia płynie pod wpływem napięcia twornika, które na początku procesu wzbudzenia jest indukowane pod wpływem strumienia magnetycznego od remanencji. W takim układzie dla uzyskania prawidłowego procesu samowzbudzenia się maszyn musi być spełniony szereg warunków.

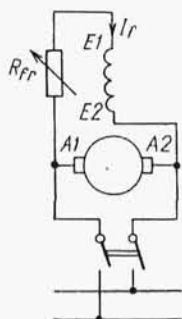
3.10.2. Wzbudzanie maszyn prądu stałego

Schemat ideowy połączeń prądnicy obcowzbudnej prądu stałego przedstawiono na rys. 3.114. Wartość prądu wzbudzenia I_f płynącego pod wpływem obcego źródła napięcia reguluje się przez zmianę rezystancji dodatkowej R_{fz} , włączonej w obwód uzwojenia wzbudzającego. Prądnica obcowzbudna prądu stałego ma dobre właściwości regulacyjne, ale wadą jej jest konieczność dysponowania oddzielnym źródłem napięcia. Uzwojenie twornika oznacza się literami $A1-A2$, a uzwojenie wzbudzające zasilane z obcego źródła – literami $F1-F2$.



Rys. 3.114. Ideowy schemat połączeń prądnicy obcowzbudnej prądu stałego

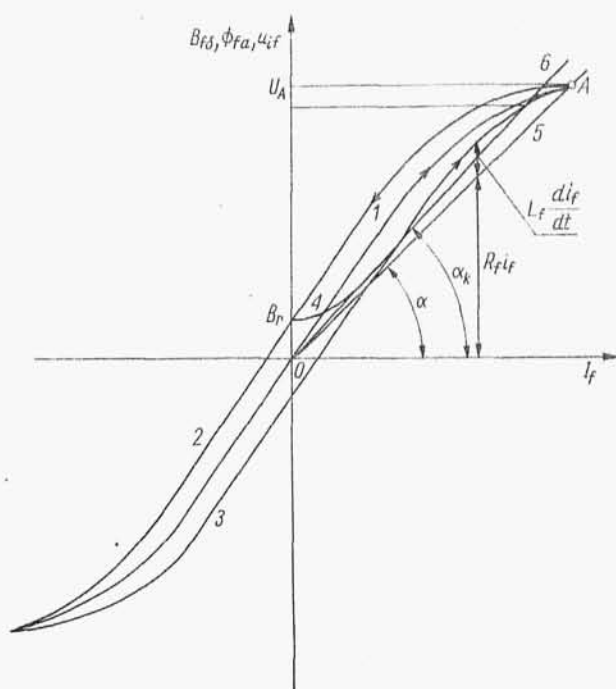
Na rysunku 3.115 przedstawiono ideowy schemat połączeń prądnicy samowzbudnej bocznikowej prądu stałego. Uzwojenie wzbudzące bocznikowe, oznaczone $E1-E2$, jest połączone równoległe z uzwojeniem twornika. W obwodzie uzwojenia wzbudzającego znajduje się rezystancja regulacyjna R_{fr} .



Rys. 3.115. Ideowy schemat połączeń prądnicy samowzbudnej bocznikowej

Pętla histerezy obwodu magnetycznego prądnicy (rys. 3.116) jest to zależność indukcji w szczelinie B_{fd} albo strumienia magnetycznego Φ_{fa} , albo napięcia indukowanego U_{if} od prądu wzbudzenia I_f . Krzywa 1 oznacza zależność indukcji od prądu I_f przy pierwszym magnesowaniu. Gdyby prąd wzbudzenia zmieniany był od pewnej wartości dodatniej do pewnej wartości ujemnej, to indukcja zmieniałaby się według krzywych 2 i 3. W układzie z rys. 3.115 nie można zmieniać kierunku prądu I_f , więc prąd I_f może zmniejszyć swoją wartość do 0, kiedy indukcja jest równa remanencji B_r . Przy następnym wzroście prądu wzbudzenia indukcja zmienia się według krzywej 4.

Jeśli magnesy prądnicy mają indukcję magnetyczną szczątkową (remanencję B_r , strumień Φ_r), to w uzwojeniu wirującego twornika indukuje się napięcie U_{ir} , pod wpływem którego płynie pewien prąd I_f przez uzwojenie bocznikowe $E1-E2$. Prąd ten wywołuje pewien strumień magnetyczny Φ_f . Jeżeli kierunek strumienia Φ_f jest zgodny z kierunkiem strumienia od remanencji Φ_r , to strumień czynny w maszynie ulega zwiększeniu, wzrasta napięcie indukowane w tworniku, wzrasta prąd I_f , wzrasta strumień Φ_f itd., czyli prądnica wzbudzi się od remanencji. Kierunek stru-



Rys. 3.116. Pętla histerezy obwodu magnetycznego prądnicy samowzbudnej prądu stałego

mienia Φ_f zależy od kierunku prądu I_f oraz od kierunku nawinięcia uzwojenia bocznikowego. Kierunek prądu I_f zależy od kierunku napięcia indukowanego U_b , który z kolei zależy od kierunku strumienia Φ_r i od kierunku wirowania twornika.

Przy danym kierunku wirowania można zawsze tak połączyć zaciski uzwojenia bocznikowego $E1-E2$ z zaciskami obwodu twornika $A1-A2$, że strumień wzniecony Φ_f ma kierunek zgodny z kierunkiem strumienia od remanencji Φ_r . Jeśliby przy takim połączeniu zmienić kierunek wirowania twornika, to zmieniłby się kierunek napięcia U_b , kierunek prądu I_f oraz kierunek strumienia Φ_f i prądnica rozmagnesuje się. Jeżeli przy zmienionym kierunku wirowania zmienić połączenie uzwojenia bocznikowego z obwodem twornika, to kierunki strumieni będą znowu zgodne i prądnica znowu się wzbudzi.

Jeżeli przy danym kierunku wirowania połączenie było właściwe i prądnica wzbudzała się, ale został zmieniony kierunek strumienia od remanencji Φ_r przez przemagnesowanie prądnicy z obcego źródła, to zmieni się kierunek napięcia U_b , prądu wzbudzenia I_f oraz strumienia Φ_f . Kierunki strumieni Φ_r i Φ_f będą znowu zgodne i prądnica wzbudzi się, lecz zmieni biegunowość. Podobnie jeśli w prawidłowym układzie połączeń zmieni się kierunek wirowania, a jednocześnie zmieni się sposób połączenia uzwojenia wzbudzającego, to zmieni się kierunek napięcia U_b , lecz kierunek prądu I_f pozostanie nie zmieniony, kierunki strumieni będą zgodne, prądnica wzbudzi się, zmieniając biegunowość.

Jeżeli prądnica nie jest obciążona, to prąd płynący w obwodzie twornika I_a jest równy prądowi wzbudzenia. Jest to prąd o wartości stanowiącej zaledwie parę procent wartości prądu znamionowego prądnicy. Wtedy na zaciskach prądnicy, a więc i na zaciskach obwodu wzbudzenia panuje napięcie prawie równe napięciu indukowanemu w tworniku przy biegu jałowym, czyli $u_{if} = u_0$. W stanie nieustalonym ze wzrostem prądu i_f to napięcie rośnie. Równanie bilansu napięć na zaciskach obwodu wzbudzenia ma postać

$$u_0 = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}$$

W stanie ustalonym jest $i_f = I_f = \text{const}$, więc napięcie na zaciskach maszyny

$$U_0 = R_f I_f$$

Do takiego napięcia wzbudzi się prądnica, to jest do napięcia o wartości U_A określonej rzędną punktu A przecięcia się prostej $R_f i_f$ (prosta 5 na rys. 3.116) z krzywą $R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}$ (krzywa 4 na rys. 3.116). Rzędne punktów przecięcia się prostych $R_f i_f$ z krzywą $R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}$, a więc i wartość ustalona napięcia, do której wzbudza się prądnica, zależy od kąta α , przy czym

$$\text{tg } \alpha = \frac{R_f I_f}{I_f} = R_f$$

czyli od wartości całkowitej rezystancji obwodu wzbudzenia. Wartość napięcia, do której wzbudza się prądnica, zmniejsza się (wzrasta) ze wzrostem (zmniejszaniem się) wartości rezystancji w obwodzie bocznikowym. Aby prądnica wzbudziła się, musi być

$$R_f < R_{fk} = \text{tg } \alpha_k$$

przy czym α_k oznacza kąt nachylenia prostej 6 na rys. 3.116, będącej styczną do wybrzuszenia krzywej 4 przebiegu $B_{fs} = f(I_f)$.

Z powyższych rozważań wynika, że za pomocą zmiany wartości rezystancji regulacyjnej R_{fr} w obwodzie bocznikowym prądnicy prądu stałego można zmieniać wartość napięcia, do którego wzbudza się ta prądnica oraz, że zbyt duża rezystancja w obwodzie wzbudzenia prądnicy może być przyczyną jej niewzbudzenia się. Zbyt duża wartość rezystancji w obwodzie wzbudzenia może być spowodowana dużą wartością rezystancji regulacyjnej R_{fr} , niedotarciem szczotek albo niedostatecznym dociskiem szczotek.

Może być stosowany układ szeregowy wzbudzenia, tzn. z uzwojeniem wzbudzającym włączonym w szereg z uzwojeniem twornika. Wtedy przez uzwojenie wzbudzające płynie prąd równy prądowi twornika. Taki układ połączeń stosuje się wyłącznie do silników prądu stałego, ponieważ prądnica samowzbudna szeregową prądu stałego ma krzywą $U = f(I_a)$ o przebiegu bardzo różnym od przebiegu płaskiego, co jest bardzo niedogodne.

Dla uzyskania właściwych kształtów charakterystyk stosuje się i w prądnicach i w silnikach szeregowo-bocznikowy układ wzbudzenia. Wtedy maszyna prądu stałego ma dwa uzwojenia wzbudzające: jedno bocznikowe, połączone równolegle z twornikiem i jedno szeregowe, połączone w szereg z twornikiem. Te dwa uzwojenia połączone są najczęściej tak, że ich przepływy wspomagają się.

3.10.3. Wzbudzanie maszyn synchronicznych

Przez uzwojenie wzbudzające maszyny synchronicznej płynie prąd stały. Źródłem zasilającym to uzwojenie jest najczęściej *wzbudnica*, czyli maszyna synchroniczna jest najczęściej wzbudzana obco. Wzbudnice mogą być wirujące albo statyczne. Wzbudnicami wirującymi są osadzone najczęściej na wspólnym wale z maszyną synchroniczną maszyny prądu stałego albo maszyny synchroniczne współpracujące z układem prostowników.

Maszyna prądu stałego pracująca jako wzbudnica maszyny synchronicznej jest prądnicą samowzbudną bocznikową albo obcowzbudną. Warunki samowzbudzania się pracującej jako wzbudnica prądnicy bocznikowej prądu stałego są identyczne z warunkami omówionymi w p. 3.10.2. Przy odpowiednio dużych mocach wzbudnicy prądu stałego buduje się ją jako prądnicę obcowzbudną. Wtedy wzbudnicą dla tej prądnicy jest osadzona na tym samym wale odpowiednio mniejsza prądnica samowzbudna bocznikowa prądu stałego. Ta prądnica samowzbudna nazywa się *podwzbudnicą*. Tak więc turbogenerator odpowiednio dużej mocy ma osadzone na wspólnym wale wzbudnicę i podwzbudnicę. Warunki samowzbudzania się prądnicy prądu stałego omówione w p. 3.10.2 odnoszą się wtedy do podwzbudnicy. Osadzanie wzbudnicy i podwzbudnicy na wspólnym wale z maszyną synchroniczną (np. z turbogeneratorem) spowodowane jest koniecznością uzyskania dużej pewności ruchu.

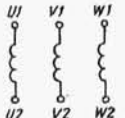
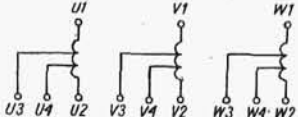
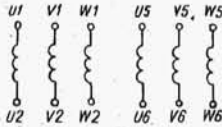
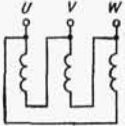
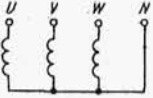
Moc znamionowa wzbudnicy wynosi około 4% mocy znamionowej dużych turbogeneratorów. Oznacza to, że dla turbogeneratorów o największych mocach znamionowych nie mogą być jako wzbudnice zastosowane prądnice prądu stałego komutatorowe o prędkości obrotowej 3000 obr/min. Wynika to stąd, że ze względów wytrzymałościowych ograniczone są średnice blach twornika i średnice komutatorów wirujących z prędkością 3000 obr/min, a więc ograniczone są także i moce znamionowe tych maszyn. Jako wzbudnice tak dużych turbogeneratorów mogą być stosowane:

- prądnice prądu przemiennego osadzone na wale turbogeneratorskiego i połączone z układem statycznych prostowników niesterowanych (diody krzemowe) albo sterowanych (tyrystory);
- prądnice prądu przemiennego z układem wirujących prostowników (diod krzemowych), tworzące układy bezszczotkowe;
- układ prostowników sterowanych (najczęściej z tyrystorów) zasilanych albo za pośrednictwem specjalnego transformatora z zacisków wzbudzonej maszyny synchronicznej (układ samowzbudnej maszyny synchronicznej stosowany także do maszyn niewielkich mocy) albo za pomocą transformatora z szyn zbiorczych.

3.11. OZNACZENIA KOŃCÓWEK I UKŁADY POŁĄCZEŃ MASZYN ELEKTRYCZNYCH



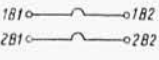



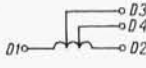





W tablicy 3.3 podano przykładowe znormalizowane oznaczenia zacisków i końcówek uzwojeń trójfazowych stojanów maszyn indukcyjnych i synchronicznych. W trójfazowych wirnikach maszyn indukcyjnych należy zamiast liter *U, V, W* użyć do oznaczeń odpowiednio liter *K, L, M*.

Tablica 3.3. Przykładowe oznaczenia zacisków i końcówek uzwojeń trójfazowych stojanów maszyn indukcyjnych i synchronicznych

Lp.	Rodzaj uzwojenia albo układ połączeń stojana	Liczba zacisków	Oznaczenia
1	Uzwojenie pojedyncze	6	
2	Uzwojenie pojedyncze z odgałęzieniami (przykładowo dwoma)	12	
3	Uzwojenie podzielone na 2 części przeznaczone do połączenia szeregowego albo równoległego (przykładowo)	12	
4	Uzwojenie pojedyncze połączone w trójkąt	3	
5	Uzwojenie pojedyncze połączone w gwiazdę	3 albo 4	

W tablicy 3.4 podano oznaczenia zacisków i końcówek uzwojeń maszyn prądu stałego. Uzwojenie wzbudzające maszyny synchronicznej oznacza się *F1-F2*, podobnie jak uzwojenie wzbudzające maszyny prądu stałego zasilane z obcego źródła.

Tablica 3. 4. Oznaczenia zacisków i końcówek maszyn prądu stałego



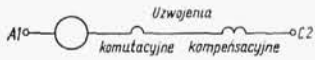
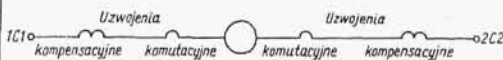
Lp.	Rodzaj uzwojenia	Liczba zacisków	Oznaczenie
1	Uzwojenie twornika	2	
2	Uzwojenie biegunów komutacyjnych	2	
3	Uzwojenie biegunów komutacyjnych 2-sekcyjne (łączone po obu stronach twornika)	4	
4	Uzwojenie kompensacyjne	2	
5	Uzwojenie kompensacyjne 2-sekcyjne (łączone po obu stronach twornika)	4	
6	Uzwojenie wzbudzające szeregowe	2	
7	Uzwojenie wzbudzające szeregowe z 2 odgańzieniami	4	
8	Uzwojenie wzbudzające bocznikowe	2	
9	Uzwojenie wzbudzające zasilane z obcego źródła	2	
10	Uzwojenie wzbudzające zasilane z obcego źródła przeznaczone do łączenia szeregowego albo równoległego	4	
11	Uzwojenie dodatkowe w osi podłużnej	2	
12	Uzwojenie dodatkowe w osi poprzecznej	2	

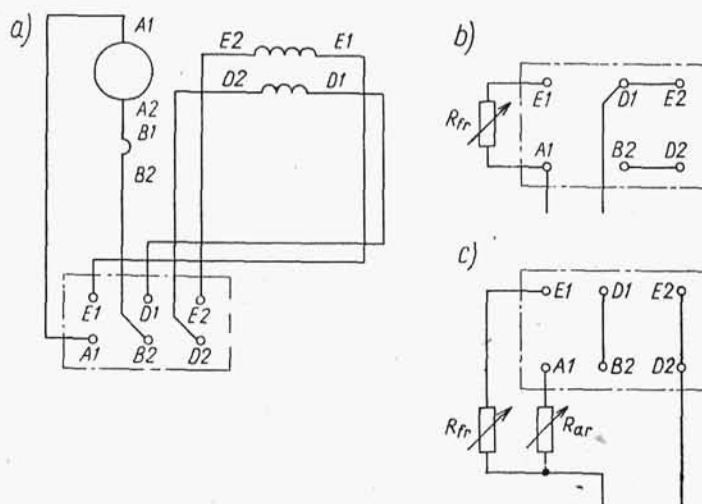
W tablicy 3.5 podano uproszczone oznaczenia maszyny prądu stałego przy uzwojeniu twornika połączonym szeregowo z uzwojeniami kompensacyjnymi i biegunów komutacyjnych.

W tablicy 3.6 podano uproszczone oznaczenia zacisków i końcówek uzwojeń dopuszczalne w przypadku, gdy do jednego zacisku przyłączono więcej niż jedną końcówkę.

Na rysunku 3.117a przedstawiono schemat połączeń uzwojeń maszyny prądu stałego z zaciskami tabliczki zaciskowej, na rys. 3.117b schemat połączeń zacisków do pracy prądnicowej na współdziałanie przepływów szeregowego i bocz-

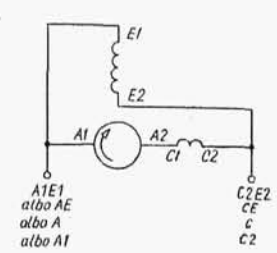
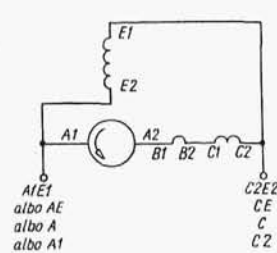
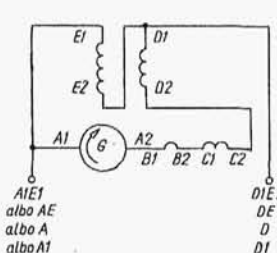
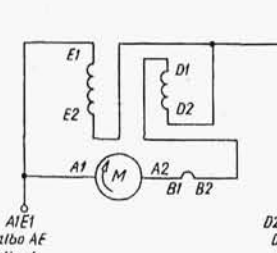
Tablica 3.5. Uproszczone oznaczenia maszyny prądu stałego przy uzwojeniu twornika połączonym szeregowo z uzwojeniem biegunów komutacyjnych

Lp.	Układ połączeń	Liczba zacisków	Oznaczenie
1	Uzwojenie twornika połączone szeregowo z uzwojeniem biegunów komutacyjnych	2	
2	Uzwojenie twornika między sekcjami uzwojeń biegunów komutacyjnych	2	
3	Uzwojenie twornika połączone szeregowo z uzwojeniami biegunów komutacyjnych i kompensacyjnym	2	
4	Uzwojenie twornika między sekcjami uzwojeń biegunów komutacyjnych i kompensacyjnego	2	



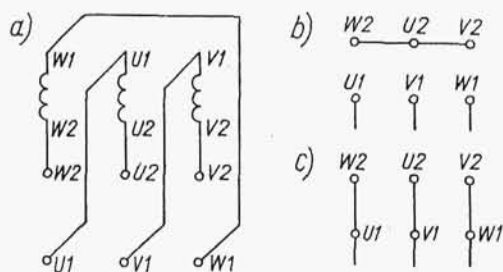
Rys. 3.117. Schematy połączeń maszyn prądu stałego: a) połączenie z zaciskami tabliczki zaciskowej; b) połączenie na tabliczce zaciskowej maszyny do pracy prądnicowej; c) połączenie na tabliczce zaciskowej maszyny do pracy silnikowej

Tablica 3. 6. Uprozczone oznaczenia zacisków i końcówek uzwojeń maszyn prądu stałego dopuszczalne w przypadkach kiedy do jednego zacisku przyłączono więcej niż jedną końcówkę

Lp.	Układ połączeń	Liczba zacisków	Oznaczenie
1	Prądnice albo silniki skompensowane z przeplecionymi uzwojeniami kompensacyjnymi i biegunów komutacyjnych przy prawym kierunku wirowania	2	 <p> A1E1 albo AE albo A albo A1 </p> <p> C2E2 CE C C2 </p>
2	Prądnice albo silniki skompensowane z połączonymi uzwojeniami kompensacyjnymi i biegunów komutacyjnych przy lewym kierunku wirowania	2	 <p> A1E1 albo AE albo A albo A1 </p> <p> C2E2 CE C C2 </p>
3	Prądnica o wzbudzeniu bocznikowo-szeregowym (na współdziałanie przepływów) z uzwojeniami biegunów komutacyjnych i kompensacyjnym przy prawym kierunku wirowania	2	 <p> A1E1 albo AE albo A albo A1 </p> <p> D2E2 DE D D1 </p>
4	Silnik o wzbudzeniu bocznikowo-szeregowym (na współdziałanie przepływów) z uzwojeniem biegunów komutacyjnych przy prawym kierunku wirowania	2	 <p> A1E1 albo AE albo A albo A1 </p> <p> D2E2 DE D D2 </p>

nikowego z włączonym opornikiem regulacyjnym R_{fr} w obwodzie wzbudzenia, a na rys. 3.117c schemat połączeń zacisków do pracy silnikowej na współdziałanie przepływów szeregowego i bocznikowego z włączonym opornikiem regulacyjnym R_{fr} w obwodzie wzbudzenia i opornikiem regulacyjnym R_{ar} w obwodzie twornika.

Na rysunku 3.118a pokazano schemat połączeń uzwojeń stojana trójfazowej maszyny indukcyjnej, na rys. 3.118b schemat połączeń zacisków tabliczki zaciskowej przy połączeniu w gwiazdę, a na rys. 3.118c schemat połączeń zacisków tabliczki zaciskowej przy połączeniu w trójkąt.



Rys. 3.118. Schematy połączeń maszyn indukcyjnych: a) połączenie uzwojeń stojana z zaciskami tabliczki zaciskowej; b) połączenie zacisków dla uzyskania układu gwiazdowego; c) połączenie zacisków dla uzyskania układu trójkąta

Maszyny synchroniczne pracują prawie wyłącznie przy połączeniu uzwojeń tworników w gwiazdę. Duże maszyny synchroniczne mają najczęściej wyprowadzone wszystkie końcówki uzwojeń twornika przez izolatory przepustowe. Oznaczenia końcówek uzwojeń są wtedy umieszczone na końcach sworzni przepustowych tych izolatorów. Małe maszyny synchroniczne mają najczęściej uzwojenia tworników połączone na trwałe w gwiazdę. Wtedy na tabliczkę zaciskową są wyprowadzone jedne końcówki uzwojeń fazowych oraz końcówka przewodu zerowego N . Jeśli mała maszyna synchroniczna ma wyprowadzone wszystkie końcówki (sześć) na tabliczkę zaciskową, to oznaczenia są zgodne z rys. 3.118a, a połączenie w gwiazdę należy wykonać według rys. 3.118b.