

Wielkość P_0 zgodnie ze wzorem (3.12) oznacza straty jałowe transformatora, ponieważ w transformatorze straty mechaniczne $P_m = 0$.

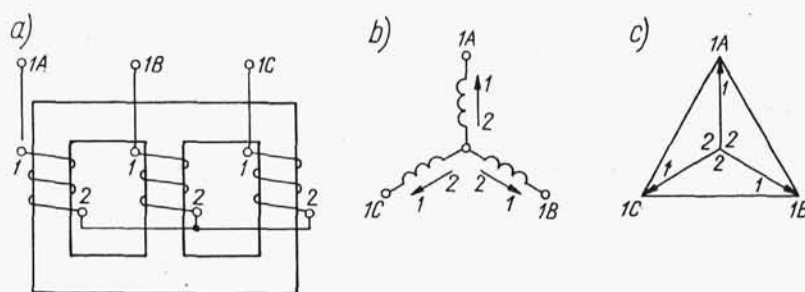
Zgodnie ze wzorem (3.11) straty w rdzeniu są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu napięcia.

3.2.3. Transformatory trójfazowe

3.2.3.1. Sposoby łączenia i grupy połączeń

Transformator trójfazowy można otrzymać przez odpowiednie połączenie uzwojeń trzech transformatorów jednofazowych albo przez odpowiednie połączenie trzech uzwojeń fazowych osadzonych na trzech kolumnach rdzenia transformatora trójfazowego (np. jak na rys. 3.1b). W tym ostatnim przypadku trzy strumienie fazowe, przechodzące przez trzy kolumny spotykają się w rdzeniu nad kolumną środkową. Suma trzech strumieni fazowych przy symetrycznym zasilaniu i symetrycznym obciążeniu transformatora jest równa zero. Z powodu krótszej drogi strumienia w kolumnie środkowej, prąd jałowy tej fazy jest nieco mniejszy od prądów jałowych faz, których uzwojenia są osadzone na kolumnach skrajnych. Ta asymetria prądów jałowych nie ma większego znaczenia, ponieważ prąd jałowy jest bardzo mały w porównaniu z prądem płynącym przez transformator obciążony.

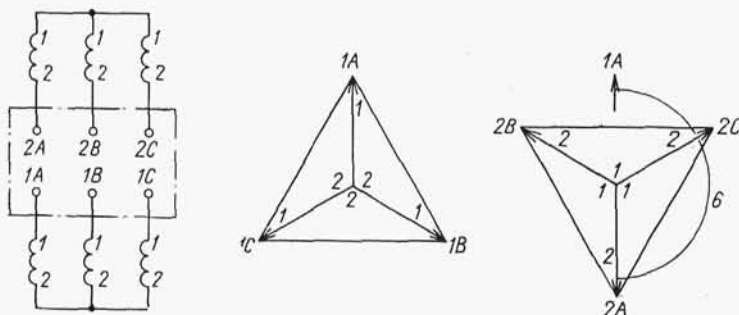
Rozróżnia się trzy rodzaje połączeń uzwojeń transformatorów trójfazowych: w gwiazdę, w trójkąt i w zygzak. Połączenie w gwiazdę (rys. 3.14a, b) otrzymuje się przez połączenie we wspólny punkt (punkt gwiazdowy) wszystkich końców (albo



Rys. 3.14. Połączenie transformatora w gwiazdę

wszystkich początków) uzwojeń fazowych górnych (oznaczenie Y) albo dolnych (oznaczenie y). Wektory symetrycznych napięć fazowych górnych pokazano na rys. 3.14b, a skojarzony wykres wektorowy napięć górnych na rys. 3.14c. Jeśli uzwojenia dolne są połączone analogicznie do uzwojeń górnych, to i wykresy wektorowe napięć obu tych uzwojeń są analogiczne.

Na rysunku 3.15 pokazano schemat układu połączeń transformatora w gwiazdę po obu stronach przy czym uzwojenie górne ma połączone we wspólny punkt gwiazdowy końce uzwojeń, a uzwojenie dolne – początki. Gwiazda napięć



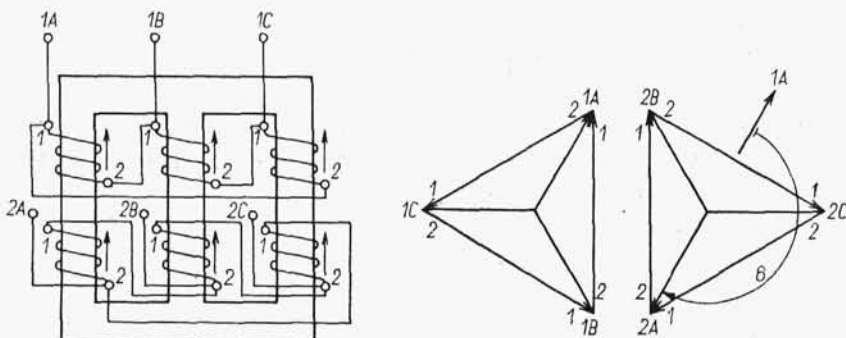
Rys. 3.15. Połączenie uzwojeń i wykres wektorowy napięć transformatora w układzie gwiazda-gwiazda odwrócona

(i odpowiednio trójkąt napięć) uzwojenia dolnego jest obrócona w stosunku do gwiazdy (trójkąta) napięć uzwojenia górnego o π .

Przy różnych sposobach połączenia uzwojeń górnego i dolnego napięcia otrzymuje się różne przesunięcia wektorów napięć górnych w stosunku do odpowiednich wektorów napięć dolnych. Wyznacza się kąt w godzinach (jedna godzina równa się $\pi/6$) o jaki trzeba obrócić zgodnie z ruchem wskazówek zegara wektor napięcia fazowego uzwojenia górnego, aby pokrył się z odpowiednim wektorem napięcia fazowego uzwojenia dolnego i tę liczbę pisze się po literach oznaczających układ połączeń uzwojeń. Transformator o obydwóch uzwojeniach połączonych jednakowo w gwiazdę należy do grupy połączeń oznaczonej symbolem Yy0, a transformator o połączeniach w gwiazdę z jedną gwiazdą odwróconą należy do grupy Yy6.

Połączenie w trójkąt uzwojenia górnego oznacza się literą D, a uzwojenia dolnego literą d. Jeżeli połączenia w trójkąt w obu uzwojeniach mają identyczne obiegi, to nie ma obrócenia między trójkątami napięć tych uzwojeń i transformator należy do grupy połączeń oznaczonej symbolem Dd0.

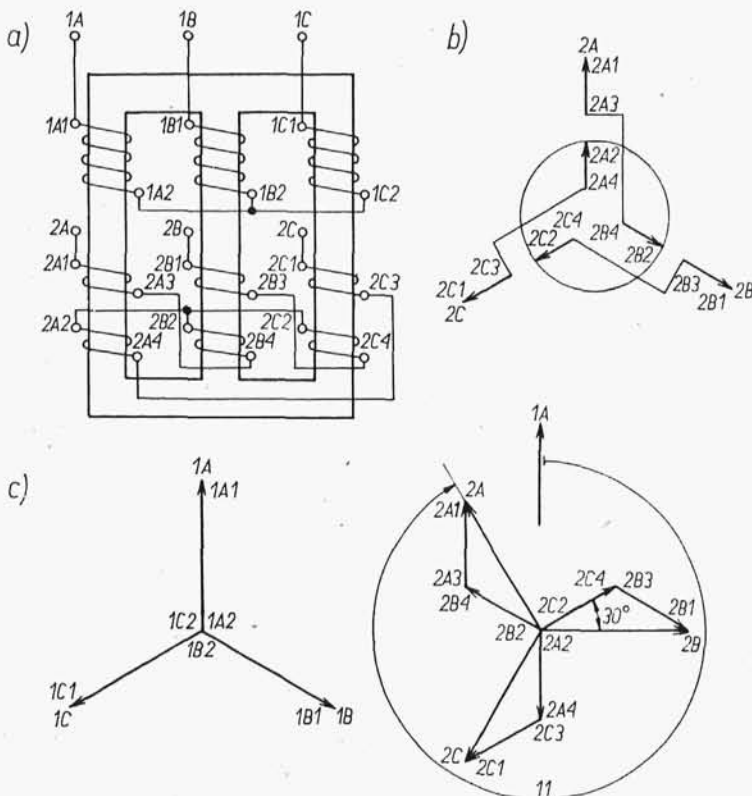
Na rysunku 3.16 przedstawiono układ połączeń transformatora i wykres wektorowy napięć z uzwojeniami połączonymi w trójkąt z tym, że w uzwojeniu dolnym obieg połączenia w trójkąt jest przeciwny do obiegu połączenia w trójkąt



Rys. 3.16. Połączenie uzwojeń i wykres wektorowy napięć transformatora grupy Dd6

w uzwojeniu górnym. Ten transformator należy do grupy połączeń oznaczanej symbolem Dd6.

Połączenie w zygzak jest wykonywane zwykle tylko po stronie dolnej (symbol z). Na rysunku 3.17a przedstawiono układ połączeń transformatora Yz. Połączenie w zygzak otrzymuje się przez połączenie końca (początku) jednej połówki uzwojenia dolnego napięcia osadzonego na danej kolumnie z końcem (początkiem)



Rys. 3.17. Połączenie uzwojeń i wykres wektorowy napięć transformatora grupy Yz11

drugiej połówki uzwojenia dolnego napięcia osadzonego na kolumnie sąsiedniej i zwarcie we wspólny punkt gwiazdowy jednego kompletu pozostałych końcówek. Oczywiście istnieje kilka różnych możliwości wykonania tych połączeń i przez to uzyskanie różnego kąta między napięciem fazowym uzwojenia górnego i dolnego danej fazy. Na rysunku 3.17b pokazano sposób kojarzenia wektorów napięć połówek uzwojenia dolnego, a na rys. 3.17c — wykres wektorowy napięć tego transformatora, który — jak widać z wykresu — należy do grupy Yz11.

Przez odpowiednią kombinację łączenia uzwojeń można otrzymać grupy transformatorów o kątach przesunięcia 0, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10 i 11 godzin. Transfor-

matory o różnych połączeniach (trójkąt, gwiazda, zygzak) odznaczają się różnymi właściwościami eksploatacyjnymi. Dlatego zachodzi potrzeba stosowania tych wszystkich rodzajów połączeń. Zbyt duża różnorodność grup transformatorów o różnych kątach przesunięcia utrudnia jednak ich dobór do pracy równoległej. Dlatego normy na transformatory zalecają budowanie tylko niektórych grup transformatorów, np. Polskie Normy zalecają budowanie transformatorów należących do grup 0, 5, 6, 11 z niektórymi układami połączeń.

Przy takim samym napięciu międzyprzewodowym napięcie fazowe przy połączeniu w trójkąt jest $\sqrt{3}$ razy większe niż napięcie fazowe przy połączeniu w gwiazdę. Liczba zwojów przy połączeniu w trójkąt jest $\sqrt{3}$ razy większa, a przekrój przewodu $\sqrt{3}$ razy mniejszy niż przy połączeniu w gwiazdę. Uzwojenie połączone w trójkąt jest droższe niż uzwojenie połączone w gwiazdę.

Napięcie fazowe uzwojenia połączonego w zygzak

$$U_{ph} = 2 \frac{U}{2} \cos \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3} U}{2} \approx \frac{U}{1,15}$$

przy czym U – napięcie fazowe, jakie wystąpiłoby, gdyby obydwie połówki uzwojenia zygza stanowiły jedną fazę gwiazdy.

Na uzwojenie połączone w zygzak trzeba zużyć więcej miedzi niż na uzwojenie połączone w gwiazdę.

3.2.3.2. Przekładnia

Przekładnią transformatora nazywa się stosunek napięcia międzyprzewodowego górnego do napięcia międzyprzewodowego dolnego w stanie jałowym

$$g = \frac{U_{g0}}{U_{d0}} \quad (3.43)$$

Przy pominięciu bardzo małych spadków napięć w uzwojeniu pierwotnym od bardzo małego prądu jałowego, napięcie na zaciskach jest praktycznie równe odpowiednio skojarzonym – w zależności od rodzaju połączeń – napięciom indukowanym, proporcjonalnym do liczb zwojów zgodnie ze wzorami (3.27) i (3.28). Stąd odpowiednio do kombinacji połączeń uzwojeń po stronie górnej i dolnej w trójkąt (D, d), gwiazdę (Y, y) i zygzak (z) przekładnia transformatora

$$g_{Dd} = \frac{z_g}{z_d} = g_z$$

$$g_{Dy} = \frac{z_g}{z_d \sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} g_z$$

$$g_{Dz} = \frac{z_g}{\frac{z_d}{2} \sqrt{3} \sqrt{3}} = \frac{2z_g}{3z_d} = \frac{2}{3} g_z$$

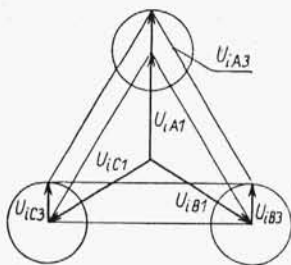
$$g_{Yy} = \frac{z_g \sqrt{3}}{z_d \sqrt{3}} = \frac{z_g}{z_d} = g_z$$

$$g_{Yd} = \frac{z_g \sqrt{3}}{z_d} = \sqrt{3} g_z$$

$$g_{Yz} = \frac{z_g \sqrt{3}}{\frac{z_d}{2} \sqrt{3} \sqrt{3}} = \frac{2z_g}{\sqrt{3} z_d} = \frac{2}{\sqrt{3}} g_z$$

3.2.3.3. Harmoniczne prądu magnesującego i napięcia indukowanego

Przy sinusoidalnie zmiennym napięciu fazowym i strumieniu prąd magnesujący zawiera trzecią harmoniczną (rys. 3.11). W układzie trójfazowym trzecie harmoniczne prądu są ze sobą w fazie we wszystkich trzech uzwojeniach fazowych. W transformatorze o układzie połączeń gwiazda-gwiazda bez przewodu zerowego trzecie harmoniczne prądów nie mogą płynąć. Wtedy strumienie są odkształcone (rys. 3.12) i zawierają trzecie harmoniczne, indukujące trzecie harmoniczne napięcia, które w układzie trójfazowym są ze sobą w fazie we wszystkich trzech uzwojeniach fazowych (rys. 3.18). Na wykresie wektorowym te napięcia U_{iA3} , U_{iB3} , U_{iC3} mogą być



Rys. 3.18. Trzecie harmoniczne napięcia indukowanego w układzie trójfazowym

przedstawione jako wektory wirujące z prędkością 3ω względem końców wektorów pierwszych harmoniczych napięć fazowych U_{iA1} , U_{iB1} , U_{iC1} . W napięciach międzyprzewodowych trzecie harmoniczne napięć indukowanych nie występują. Odbiornik dołączony na napięcia fazowe do wtórnej strony takiego transformatora byłby pod działaniem napięcia odkształconego o wartości maksymalnej odpowiednio większej co może być dla odbiornika niebezpieczne.

W transformatorze o układzie połączeń trójkąt-gwiazda, zasilanym od strony trójkąta, trzecie harmoniczne prądów płyną w zamkniętym obwodzie trójkąta (nie ma ich w prądach przewodowych) strumienie są nieodkształcone i napięcia indukowane są nieodkształcone. W transformatorze o układzie połączeń trójkąt-gwiazda bez przewodu zerowego zasilanym od strony gwiazdy prądy magnesujące są nieodkształcone, strumienie i napięcia indukowane tymi strumieniami zawierają trzecie harmoniczne. Pod wpływem trzecich harmoniczych napięć indukowanych, w zamkniętym obwodzie trójkąta płyną trzecie harmoniczne prądów, wywołujących

trzecie harmoniczne strumieni, kompensujące trzecie harmoniczne strumieni od prądów magnesujących. Stąd wniosek, że w transformatorze, mającym przynajmniej jedno uzwojenie zamknięte w trójkąt, napięcia indukowane nie zawierają trzeciej harmonicznej. Dotyczy to także transformatora o układzie gwiazda-gwiazda z dodatkowym uzwojeniem zamkniętym w trójkąt, jak na rys. 3.19.



Rys. 3.19. Transformator o układzie połączeń gwiazda-gwiazda z dodatkowym uzwojeniem zamkniętym w trójkąt

W transformatorze o układzie połączeń gwiazda-zygzak (Yz) bez przewodu zerowego po stronie górnej (pierwotnej) prąd magnesujący nie zawiera trzeciej harmonicznej, strumienie magnetyczne zawierają trzecie harmoniczne, indukują się więc trzecie harmoniczne napięcia, będące ze sobą w fazie we wszystkich sześciu połówkach uzwojenia zygzaka. W każdym uzwojeniu fazowym zygzaka (rys. 3.17) koniec jednej połówki uzwojenia jest połączony z końcem drugiej połówki uzwojenia, więc w danym uzwojeniu fazowym trzecie harmoniczne napięcia indukowanego kompensują się. Napięcia fazowe uzwojenia transformatora połączonego w zygzak nie zawierają trzeciej harmonicznej napięcia indukowanego.

3.2.3.4. Obciążenie symetryczne

Przy obciążeniu symetrycznym napięcia, prądy i strumienie w trzech uzwojeniach fazowych transformatora przebiegają identycznie z tym, że są przesunięte względem siebie o kąt fazowy $2\pi/3$.

Prąd wtórny I_2 wywołuje strumień, którego część kojarzy się ze strumieniem głównym od prądu pierwotnego I_1 , a część jest strumieniem rozproszonym Φ_{12} . Permeancji A_{12} dla strumienia Φ_{12} odpowiada indukcyjność L_{12} i reaktancja rozproszenia uzwojenia wtórnego $X_{12} = \omega L_{12}$. Spadki napięć na uzwojeniu wtórnym są następujące

$$\underline{U}_{X12} = jX_{12} \underline{I}_2 \quad (3.44)$$

$$\underline{U}_{R2} = R_2 \underline{I}_2 \quad (3.45)$$

Przepływ $\underline{\Theta}_2 = z_2 \underline{I}_2$ przeciwdziała przepływowi $\underline{\Theta}_1 = z_1 \underline{I}_1$, więc przepływ wypadkowy ma wartość prawie stałą, równą przepływowi jałowemu $\underline{\Theta}_0 = z_1 \underline{I}_0$, czyli

$$z_1 \underline{I}_0 = z_1 \underline{I}_1 - z_2 \underline{I}_2 \quad (3.46)$$

oraz

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \underline{I}'_2$$

przy czym

$$\underline{I}_2' = \frac{z_2}{z_1} \underline{I}_2$$

Wszystkie napięcia i spadki napięć przenosi się ze strony wtórnej na pierwotną mnożąc przez $\frac{z_1}{z_2}$ (np. $\underline{U}_2' = \underline{U}_2 \frac{z_1}{z_2}$), prądy – mnożąc przez $\frac{z_2}{z_1}$, impedancje – mnożąc przez $\left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2$, bo np.

$$\underline{U}_{R2}' = \underline{U}_{R2} \frac{z_1}{z_2} = R_2 \underline{I}_2 \frac{z_1}{z_2} = \underline{I}_2 \frac{z_2}{z_1} R_2 \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2 = \underline{I}_2' R_2'$$

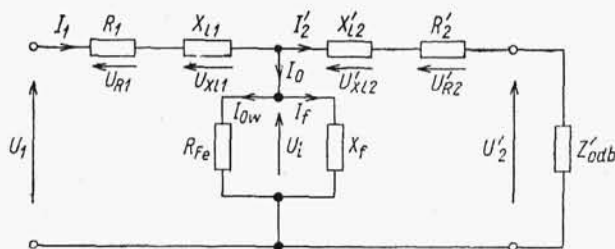
czyli

$$R_2' = R_2 \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2$$

Na rysunku 3.20 przedstawiono schemat zastępczy transformatora (nazywany również schematem typu T). W gałęzi podłużnej występują impedancje R_1 , X_{l1} , R_2' , X_{l2}' i odpowiednio spadki napięć $\underline{U}_{R1} = R_1 \underline{I}_1$, $\underline{U}_{Xl1} = jX_{l1} \underline{I}_1$, $\underline{U}_{R2}' = R_2' \underline{I}_2'$, $\underline{U}_{Xl2}' = jX_{l2}' \underline{I}_2'$. W gałęzi poprzecznej występują impedancje:

$$R_{Fe} = \frac{3U_{l1}^2}{P_{Fe}} \approx \frac{3U_1^2}{P_{Fe}} - \text{odpowiadająca stratom w rdzeniu } P_{Fe} \text{ i składowej czynnej prądu jałowego } I_{0w},$$

$$X_f = \frac{U_{l1}}{I_f} \approx \frac{U_1}{I_0} - \text{odpowiadająca prądowi magnesującemu } I_f.$$

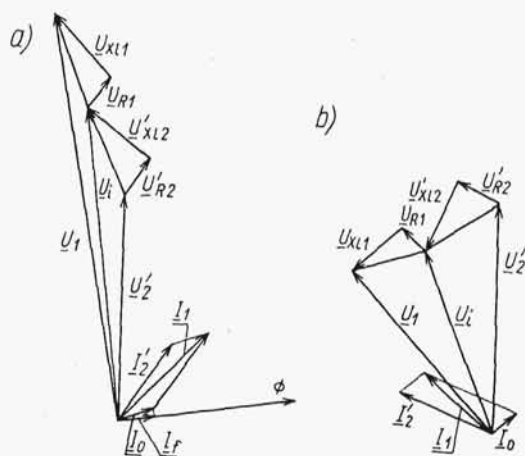


Rys. 3.20. Schemat zastępczy transformatora

Słuszne są następujące równania napięć i prądów

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_i &= \underline{U}_2' + \underline{U}_{R2}' + \underline{U}_{Xl2}' \\ \underline{U}_1 &= \underline{U}_i + \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{Xl1} \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_0 + \underline{I}_2' \\ \underline{I}_0 &= \underline{I}_{0w} + \underline{I}_f \end{aligned} \right\} \quad (3.47)$$

Wykres wektorowy transformatora obciążonego odbiornikiem o charakterze indukcyjnym (odniesione napięcie wtórne jest niższe niż napięcie pierwotne)



Rys. 3.21. Wykres wektorowy transformatora

przedstawiono na rys. 3.21a, a obciążonego odbiornikiem o charakterze pojemnościowym (odniesione napięcie wtórne jest wyższe niż napięcie pierwotne – na rys. 3.21b). Na tych wykresach (dla lepszej przejrzystości) narysowano spadki napięć na impedancjach transformatorów U_R i U_{Xl} przesadnie duże w porównaniu z napięciami U_1 , U'_2 , U_i .

3.3. MASZYNY KOMUTATOROWE PRĄDU STAŁEGO

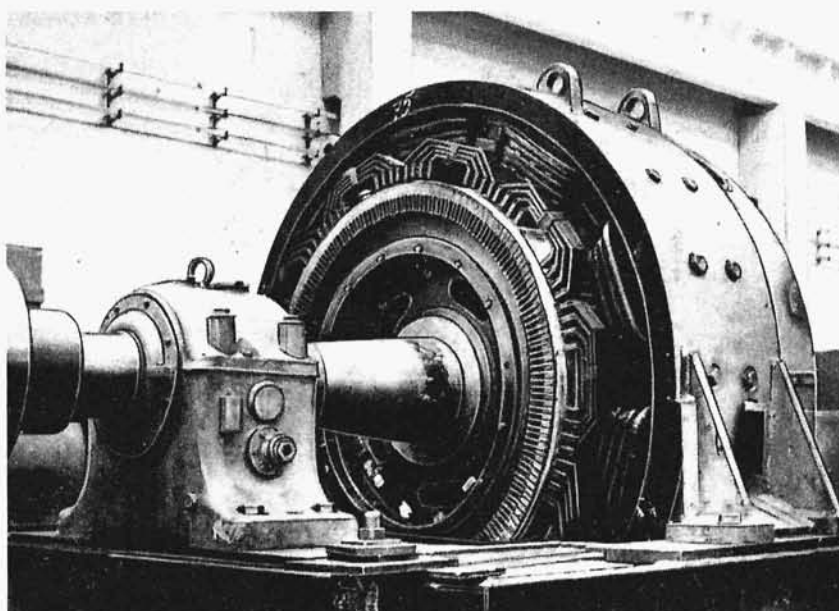
3.3.1. Zasada budowy

Maszyna komutatorowa prądu stałego, jak każda maszyna wirująca, ma część wirującą – wirnik i część nieruchomą – stojan.

W wirniku znajdują się uzwojenia twornika i komutator. W stojanie znajdują się bieguny magnetyczne oraz szczotki, umieszczone w szczotkotrzymaczach, ślizgające się po wirującym komutatorze.

Na rysunkach 3.22÷3.25 pokazano różne elementy konstrukcji maszyn prądu stałego. Cewki uzwojenia biegunów głównych (uzwojenia wzbudzającego) są osadzone na rdzeniach biegunów. Dla zwiększenia powierzchni przewodzącej strumień magnetyczny, rdzenie biegunów magnetycznych są zakończone rozszerzonymi nabiegunkami. Pomiedzy biegunami głównymi znajdują się bieguny komutacyjne, których zadaniem jest polepszenie komutacji. W nabiegunkach biegunów głównych dużych maszyn umieszcza się uzwojenie kompensacyjne, którego zadaniem jest kompensacja zniekształcenia rozkładu indukcji spowodowanego reakcją twornika.

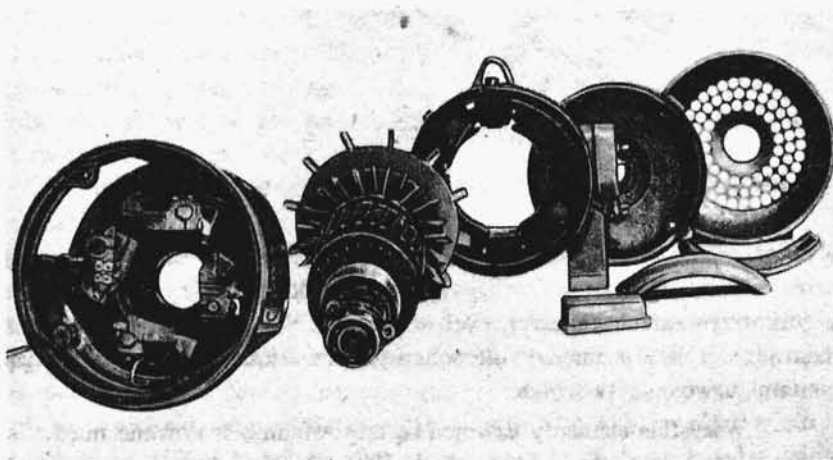
Nabiegunki, a bardzo często także i bieguny wykonuje się z blach elektrotechnicznych. Często jarzmo stojana i czasem bieguny wykonuje się z litej stali.



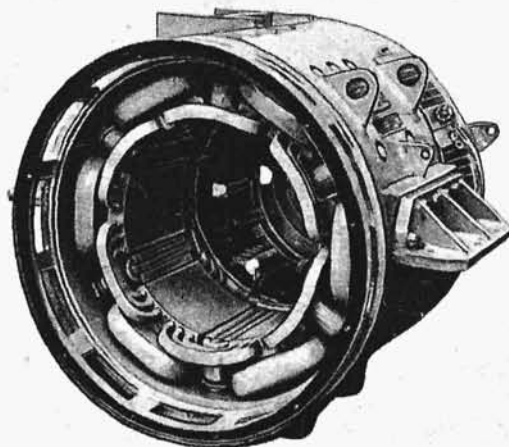
Rys. 3.22. Maszyna prądu stałego ze zdjętą tarczą od strony przeciwnej do komutatora

Niekiedy jarzmo jest wykonane także z blach elektrotechnicznych. Bieguny magnetyczne są przymocowane do jarzma stojana. Jarzmo wykonane z litej stali stanowi zarazem konstrukcję nośną.

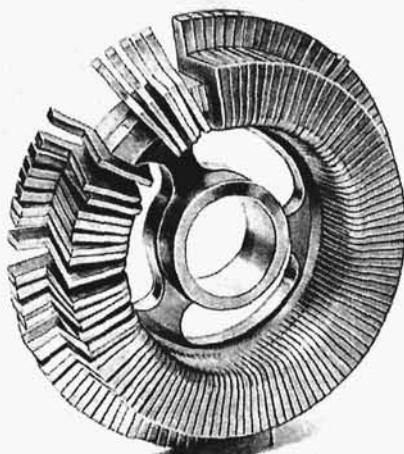
Na wale wirnika jest umieszczony pakiet blach twornika, w którego żłobkach znajduje się uzwojenie twornika. Odpowiednie końcówki uzwojenia twornika



Rys. 3.23. Maszyna prądu stałego rozebrana na elementy



Rys. 3.24. Stojan maszyny prądu stałego



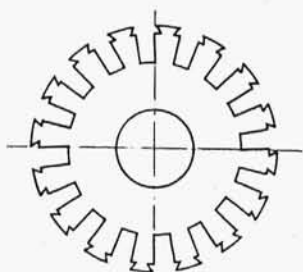
Rys. 3.25. Komutator maszyny prądu stałego w trakcie składania

są dołączone do odpowiednich wycinków komutatora. W czasie wirowania wirnika po powierzchni komutatora ślizgają się szczotki znajdujące się w nieruchomych szczotkotrzymaczach umieszczonych w stojanie. W ten sposób szczotki umożliwiają przewodzenie prądu między nieruchomymi zaciskami stojana a wirującymi elementami uzwojenia twornika.

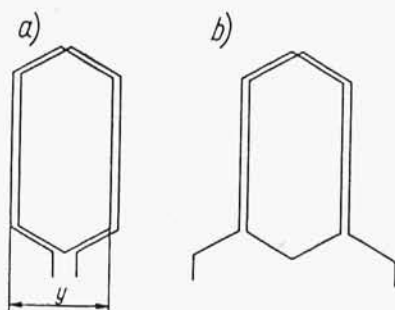
Wszystkie elementy uzwojeń są odpowiednio izolowane między sobą (izolacja zwojowa) oraz od rdzenia (izolacja główna). Wycinki komutatora są izolowane między sobą i od pierścienia, na którym są osadzone.

3.3.2. Zasada działania

Rdzeń twornika jest złożony z ułożkowanych krążków blach (rys. 3.26). W żłobkach blach twornika są umieszczone boki zezwojów uzwojenia twornika. Przykładowo na rys. 3.27 pokazano szkice zezwojów dwuzwojnych uzwojenia twornika



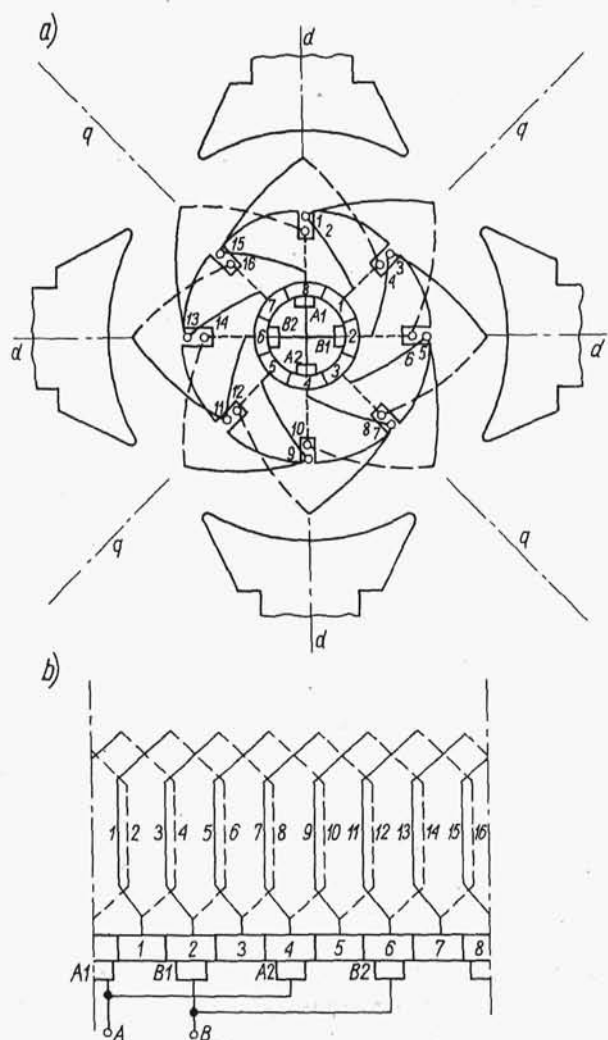
Rys. 3.26. Żłobkowana blacha twornika



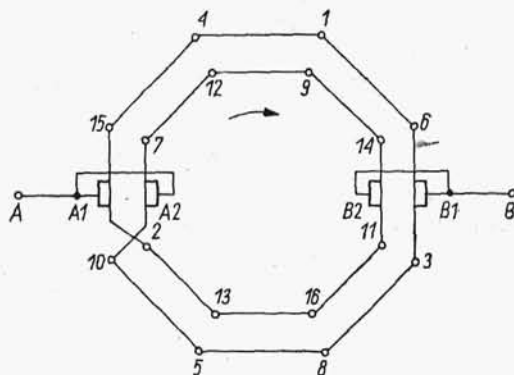
Rys. 3.27. Zezwoje twornika maszyny prądu stałego:
a) pętlicowy; b) falisty

maszyny prądu stałego, a na rys. 3.28 schemat uzwojenia pętlicowego prostego. Schemat płaski otrzymano z rozwinięcia twornika rozciętego między żłobkiem zawierającym boki 1-2 i żłobkiem zawierającym boki 15-16. Rozwinięty schemat tego uzwojenia, z zaznaczonymi w postaci kółek bokami uzwojenia pokazano na rys. 3.29. Widać z tego schematu podział uzwojenia na gałęzie równoległe przez nieruchome w przestrzeni szczotki (w tym przypadku cztery gałęzie równoległe). Przy ruchu obrotowym twornika poszczególne boki uzwojenia przechodzą z jednej gałęzi do drugiej, ale liczba boków w danej gałęzi oraz położenie gałęzi w przestrzeni (w przybliżeniu) są niezmiennie. Dzieje się to dzięki komutatorowi.

Komutator jest to pierścień złożony z wycinków miedzianych (na rys. 3.28 jest osiem wycinków komutatora) poprzedzielanych warstwami izolacji. Po wirującym razem z uzwojeniem twornika komutatorze ślizgają się nieruchome szczotki. Bieguna magnesów (stojana) mają znaki na przemian przeciwne. Boki danej gałęzi uzwojenia są pod działaniem danego bieguna magnetycznego, więc przy ruchu twornika indukują się w nich napięcia zwrócone w tym samym kierunku. Napięcie między szczotkami jest sumą napięć indukowanych w poszczególnych bokach, gdyż boki danej gałęzi są połączone z sobą w szereg.



Rys. 3.28. Schemat uzwojenia pętlicowego prostego: a) okrągły; b) płaski



Rys. 3.29. Rozwinięty schemat uzwojenia twornika maszyny prądu stałego

Napięcie indukowane w jednym pręcie

$$u_{ib} = Blv \quad (3.48)$$

przy czym: B – indukcja pod biegunem; l – długość czynna (w rdzeniu żelaznym) pręta; v – prędkość obwodowa pręta. Indukcja B jest proporcjonalna do strumienia przechodzącego od bieguna do twornika, prędkość obwodowa v jest proporcjonalna do prędkości obrotowej n , a więc napięcie indukowane wypadkowe (w gałęzi, na szczotkach) w stanie ustalonym

$$U_i = c_U \Phi n \quad (3.49)$$

Strumień Φ jest wywołany albo przez trwałe magnesy w statorze, albo przez elektromagnesy, przez których uzwojenie wzbudzące płynie prąd stały I_f (prąd wzbudzenia). Napięcie indukowane jest proporcjonalne do strumienia (indukcji), a w przybliżeniu do prądu wzbudzenia I_f oraz do prędkości obrotowej n . Przy stałej wartości prądu wzbudzenia i stałej wartości prędkości obrotowej napięcie indukowane ma w funkcji czasu wartość stałą, zniekształconą jedynie ząbkami, powstającymi w chwili przechodzenia boku z jednej gałęzi uzwojenia do drugiej (w czasie tzw. komutacji).

Maszyna z dołączonym do szczotek odbiornikiem o rezystancji R_a pracuje jak prądnica, przez jej twornik płynie prąd I_a , a napięcie na jej zaciskach w stanie pracy prądnicowej wynosi

$$U = U_i - R_{at} I_a \quad (3.50)$$

przy czym R_{at} – rezystancja całkowita w obwodzie twornika.

Jeżeli w maszynie wzbudzonej (w uzwojeniach magnesów płynie prąd I_f , powstaje indukcja B , strumień Φ) doprowadzić do szczotek napięcie U , to przez uzwojenie twornika płynie prąd I_a , a przez poszczególne gałęzie równoległe (a więc także i przez pręty uzwojenia) płynie prąd $I_g = \frac{I_a}{2a}$ (gdzie a – liczba par gałęzi równoległych). Wtedy na poszczególne pręty o długości l działają siły

$$f = BI_g l \quad (3.51)$$

a na twornik działa moment elektromagnetyczny

$$M_e = c_M \Phi I_a \quad (3.52)$$

który przy pracy silnikowej jest momentem napędowym, a przy pracy prądnicowej, kiedy twornik maszyny obraca się pod wpływem momentu napędowego zewnętrznego, jest momentem hamującym.

Przy pracy silnikowej pod wpływem momentu elektromagnetycznego (napędowego) wirnik (twornik) maszyny obraca się, w jej uzwojeniu indukuje się napięcie określone wzorem (3.49). Przy pracy silnikowej związek pomiędzy napięciem zewnętrznym, napięciem indukowanym i prądem jest określony wzorem

$$U = U_i + R_{at} I_a \quad (3.53)$$

Maszyna elektryczna prądu stałego może pracować jak prądnica prądu stałego, przetwarzając dostarczoną przez silnik napędowy energię mechaniczną na odprowadzaną do odbiorników (sieci) energię elektryczną, albo jak silnik prądu stałego, przetwa-

rzając dostarczoną przez źródło (sieć) energię elektryczną na odprowadzaną do maszyny napędzanej energię mechaniczną. Maszyna elektryczna prądu stałego może więc, jak każda maszyna elektryczna, pracować przy zmiennym kierunku przepływu energii.

Prąd twornika wywołuje strumień twornika skierowany w osi szczotek (najczęściej w osi q), strumień magnesów jest skierowany w osi d . Przy ruchu obrotowym wirnika strumień twornika jest nieruchomy w przestrzeni. Strumień twornika i strumień magnesów są względem siebie nieruchome.

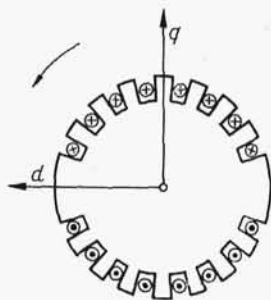
3.4. MASZYNY SYNCHRONICZNE

3.4.1. Zasada budowy

W maszynie synchronicznej magnesnicą jest wirnik (bieguny magnetyczne są na wirniku), a twornikiem jest stojan. Budowa maszyny synchronicznej jest więc „odwrotna” w stosunku do budowy maszyny prądu stałego.

Są dwa zasadnicze rodzaje maszyn synchronicznych: z biegunami utajonymi i z biegunami wydatnymi.

Uzwojenie wzbudzające maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi jest umieszczone w żłobkach rozmieszczonych na około $2/3$ obwodu wirnika (rys. 3.30). Na rysunku 3.31 pokazano przebieg napięcia magnetycznego wznie-



Rys. 3.30. Szkic przekroju wirnika maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi

conego przez prąd stały przepływający przez uzwojenie wzbudzające. Obwód wirnika jest okręgiem, grubość szczeliny między wirnikiem i stojanem jest stała i reluktancja dla strumienia magnetycznego przechodzącego przez szczelinę ma na całym obwodzie wartość prawie stałą. Dlatego można uważać, że rys. 3.31 przedstawia także rozkład indukcji magnetycznej od prądu wzbudzenia.

Maszyny z biegunami utajonymi pracują najczęściej jako prądnice napędzane turbinami parowymi i są nazywane *turbogeneratorami*. Turbiny parowe powinny mieć możliwie dużą prędkość obrotową. Prędkość obrotowa n , częstotliwość f oraz liczba par biegunów p są związane zależnością

$$f = pn$$