

rzając dostarczoną przez źródło (sieć) energię elektryczną na odprowadzaną do maszyny napędzanej energią 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.

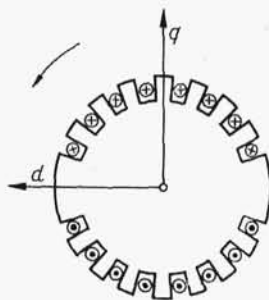
### 3.4. MASZYNY SYNCHRONICZNE

#### 3.4.1. Zasada budowy

W maszynie synchronicznej magneśnicą 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-

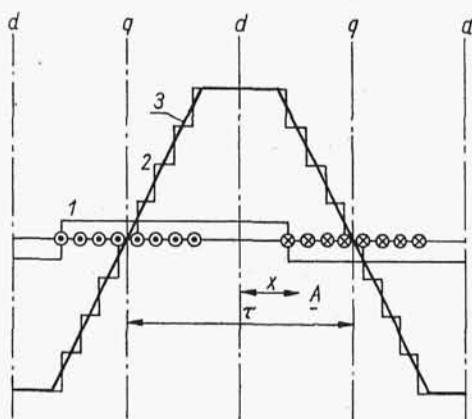


Rys. 3.30. Szkic przekroju wirnika maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi

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

$$f = pn$$



Rys. 3.31. Napięcie magnetyczne wirnika maszyny synchronicznej z biegunami utajonymi

1 – napięcie od jednej pary żłobków, 2 – napięcie wypadkowe, 3 – rozkład napięcia przy pominięciu schodków (harmonicznych żłobkowych)

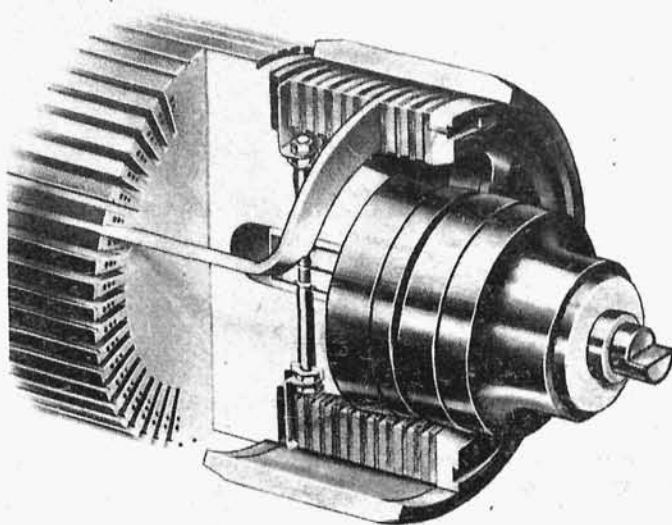
Dla uzyskania dużego  $n$  musi być  $p$  możliwie małe, mianowicie  $p = 1$ . Turbogeneratory są budowane najczęściej jako maszyny dwubiegunowe ( $2p = 2$ ), wtedy przy  $f = 50$  Hz jest  $n = 50$  obr/s albo  $n = 3000$  obr/min. Czasem maszyny z biegunami utajonymi pracują jako tzw. turbomotory, to znaczy silniki o prędkości obrotowej 3000 obr/min.

Przy tej prędkości obrotowej średnica wirnika turbogeneratora, wykonanego jako odkuwka ze stali magnetycznej o dużej wytrzymałości na rozrywanie, nie może przekraczać pewnej wartości granicznej. Dla uzyskania dużej mocy znamionowej turbogeneratora długość części czynnej (beczki) wirnika powinna być możliwie duża. Nie może ona jednak przekraczać pewnej wartości granicznej, powyżej której wirnik jest mało sztywny, co powoduje powstanie drgań. Obecnie wymiarami granicznymi beczki wirnika są: średnica 1300 mm, długość 7000 mm. Taki wirnik ma bieguny utajone. Na rysunku 3.32 pokazano końcowy element beczki wirnika z biegunami utajonymi, z widocznymi żłobkami, elementami uzwojenia i kołpakiem, chroniącym połączenia czołowe uzwojenia wirnika przed rozerwaniem się. Uzwojenia wirnika są umieszczone w żłobkach i zabezpieczone przed wypadnięciem klinami z duraluminium albo z brązu. Końcówki uzwojenia wirnika wyprowadza się przez otwór w osi wału wirnika do pierścieni ślizgowych, po których ślizgają się szczotki dla przeprowadzenia prądu stałego.

Na krańcach beczki wirnika znajdują się wentylatory (radialne albo aksjalne) wymuszające obieg medium chłodzącego.

Trójfazowe uzwojenie stojana jest umieszczone w żłobkach rdzenia stojana, składającego się z blach nakrzemionych, zimnowalcowanych. Fragment stojana turbogeneratora o mocy 200 MW firmy Dolmel pokazano na rys. 3.33.

Konstrukcję podobną do konstrukcji turbogeneratorów mają także turbomotory.



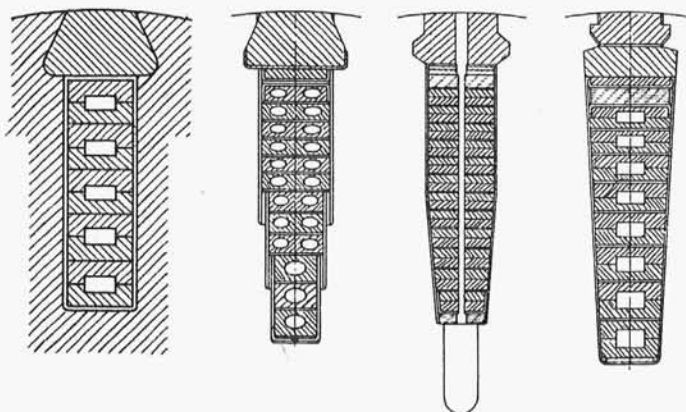
Rys. 3.32. Krańcowy fragment beczki wirnika turbogeneratorsa



Rys. 3.33. Rdzeń stojana turbogeneratorsa o mocy 200 MW produkcji Dolmel z bezpośrednim chłodzeniem wodnym uzwojenia stojana

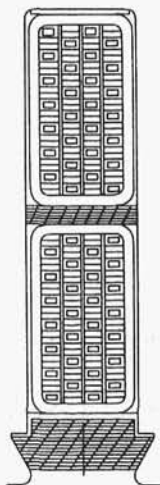
Turbogeneratorsy o niewielkiej mocy znamionowej (do ok. 50 MW) mają *chłodzenie powietrzne pośrednie* w obiegu zamkniętym. Wentylatory wirnika wymuszają przepływ powietrza przez odpowiednie drogi w turbogeneratorsie. Powietrze nagrzane w turbogeneratorsie jest chłodzone w umieszczonych pod turbogenerato-

rem chłodnicach wodnych, stanowiących zespół rur, przez których wnętrze przepływa woda chłodząca, a które z zewnątrz są omywane przez powietrze chłodzone. Zwiększenie mocy znamionowej w jednej maszynie (obecnie do 1500 MW) uzyskuje się przede wszystkim dzięki uintensywnieniu chłodzenia. W tym celu stosuje się *chłodzenie bezpośrednie* z medium chłodzącym o lepszych właściwościach przejmowania ciepła jakim jest wodór pod ciśnieniem (do ok. 500 kPa, czyli ok. 5 at) albo woda destylowana i zdejonizowana. Medium chłodzące przepływa wewnątrz prętów uzwojenia i bezpośrednio od tych prętów odbiera wytworzone w nich ciepło. Dzięki temu eliminuje się spadki temperatur na drodze strumienia ciepłego w izolacji



Rys. 3.34. Żłobki wirników turbogeneratorów z prętami chłodzonymi bezpośrednio

i w rdzeniu. Na rysunku 3.34 pokazano przykładowe przekroje żłobków wirnika turbogeneratora z chłodzeniem bezpośrednim wodorowym, a na rys. 3.35 – przykładowy przekrój żłobka stojana turbogeneratora z chłodzeniem bezpośrednim wodnym.



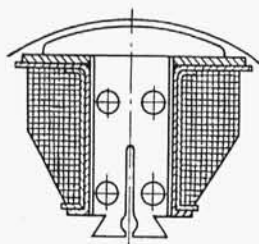
Rys. 3.35. Przykładowy przekrój żłobka stojana turbogeneratora z chłodzeniem bezpośrednim wodnym

Ze względu na duże wymiary turbogeneratorów i duże indukcje w szczelinie strumień magnetyczny turbogenerators jest bardzo duży, a więc uzwojenia stojana są jednozwojne. Dla zmniejszenia strat dodatkowych w uzwojeniu spowodowanych niejednakową gęstością prądu pręt uzwojenia wykonuje się z wielu izolowanych od siebie elementarnych prętów, połączonych równolegle i odpowiednio przeplecionych (rys. 3.36).

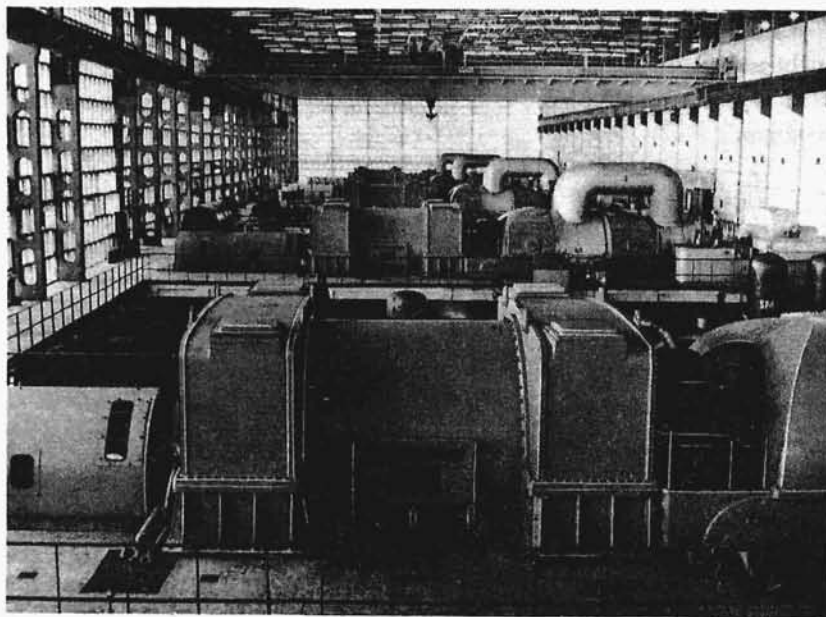
Drugi zasadniczy typ maszyn synchronicznych to maszyny z biegunami wydatnymi. Szkic bieguna wydatnego pokazano na rys. 3.37. Bieguny wydatne



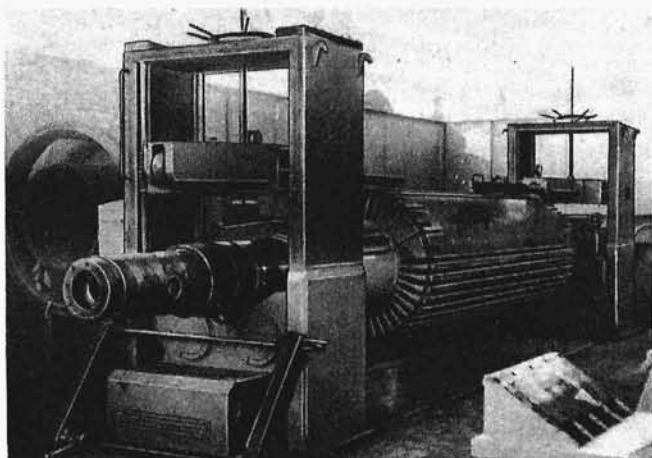
Rys. 3.36. Zasada przeplatania przewodów w pręcie stojana turbogenerators



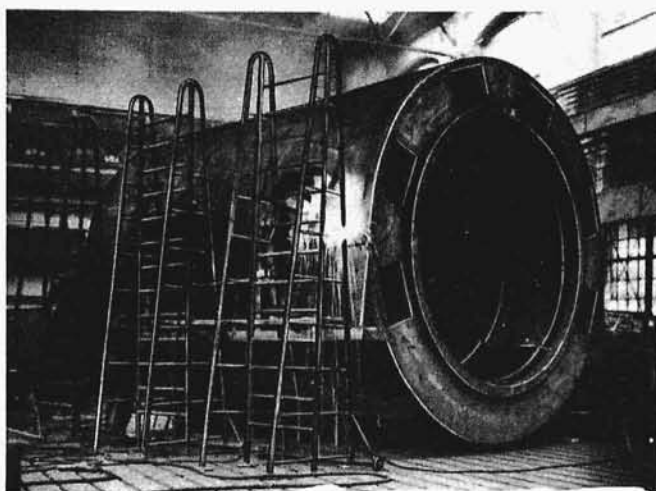
Rys. 3.37. Biegun wydatny maszyny synchronicznej



Rys. 3.38. Turbogenerators 120 MW ustawione w elektrowni



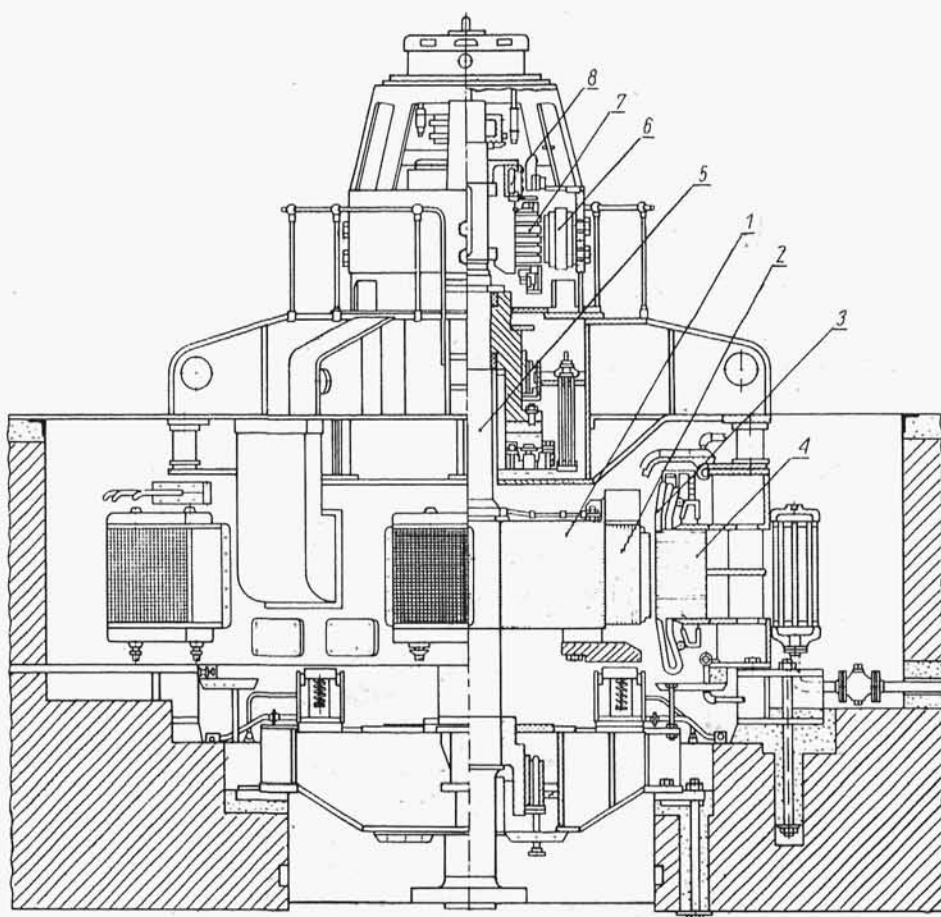
Rys. 3.39. Wirnik turbogeneratorsa w czasie obróbki



Rys. 3.40. Korpus stojana turbogeneratorsa w czasie obróbki

mają wszystkie maszyny synchroniczne o niewielkiej mocy (do kilku megawatów) oraz maszyny o prędkości obrotowej  $n < 1500$  obr/min. Należą do nich także *hydrogeneratory*, tzn. prądnice synchroniczne napędzane turbinami wodnymi, mającymi małe prędkości obrotowe (czasem kilkanaście obrotów na minutę). Hydrogeneratory mają bardzo duże średnice a małe długości. Pracują one często w położeniu pionowym.

Nabiegunniki, a nawet i całe bieguny są wykonane często z blachy o grubości ok. 1 mm. W zewnętrznej części nabiegunników z blach są umieszczane w kierunku osi maszyny pręty zwarte po obu końcach przez pierścienie, tworząc w ten



Rys. 3.41. Szkic hydrogeneratora

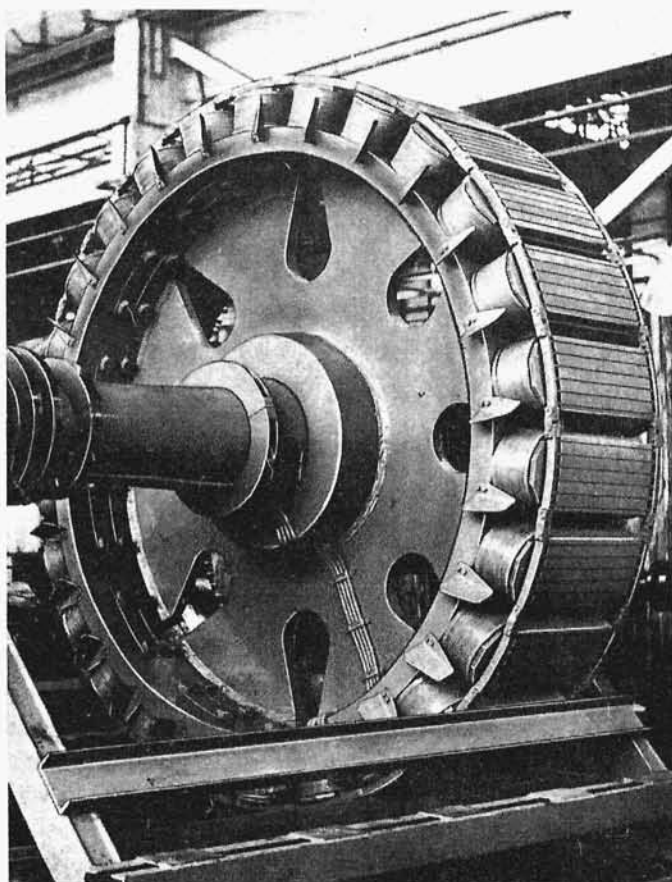
1 – biegun magnesu hydrogeneratora, 2 – uzwojenie wzbudzące hydrogeneratora, 3 – uzwojenie twornika hydrogeneratora, 4 – rdzeń twornika hydrogeneratora, 5 – wał, 6 – biegun wzbudnicy, 7 – twornik wzbudnicy, 8 – komutator wzbudnicy

sposób klatkę tłumiącą albo rozruchową. W przypadku nabiegunków wykonanych z litego żelaza nie ma potrzeby dawać wyraźnej klatki zwartej, ponieważ lity blok żelazny ma wiele obwodów zwartych.

Maszyny synchroniczne małej mocy (do kilku kilowatów) wykonywane są z uzwojeniem wzbudzącym w stojanie i z uzwojeniem twornika na wirniku. Ostatnio coraz szersze zastosowanie, przede wszystkim ze względu na pewność pracy, znajdują maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi.

Na rysunkach 3.38 ÷ 3.42 pokazano różne konstrukcje maszyn synchronicznych.



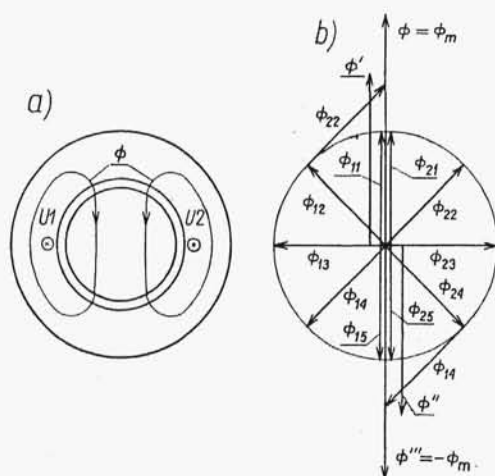


Rys. 3.42. Wirnik wielobiegunowej maszyny synchronicznej z biegunami wypukłymi

### 3.4.2. Zasada działania

W maszynie synchronicznej z biegunami utajonymi prąd wzbudzenia  $I_f$  wznieca napięcie magnetyczne, o przebiegu zbliżonym do trapezu (jak na rys. 3.31). Można przyjąć w przybliżeniu, że jest to przebieg sinusoidalny. Przy niezmienniej (w przybliżeniu) grubości szczeliny wzdłuż obwodu wirnika reluktancja ma także wartość niezmienną i indukcja magnetyczna ma na obwodzie wirnika przebieg w przybliżeniu sinusoidalny. Podobnie w przybliżeniu sinusoidalny przebieg ma indukcja wzniecona prądem wzbudzenia  $I_f$  w maszynie synchronicznej z biegunami wypukłymi. Strumień magnesów  $\Phi_f$  (od prądu wzbudzenia  $I_f$ ) wiruje w przestrzeni z prędkością  $n$  razem z wirnikiem, przecinając trójfazowe uzwojenie twornika umieszczone w stojanie i indukując w nim symetryczne napięcia trójfazowe o częstotliwości  $f = pn$ . Jeśli do zacisków twornika jest dołączony odbiornik trójfazowy symetryczny, to przez uzwojenie twornika płynie symetryczny prąd trójfazowy, maszyna synchroniczna pracuje jak prądnica.

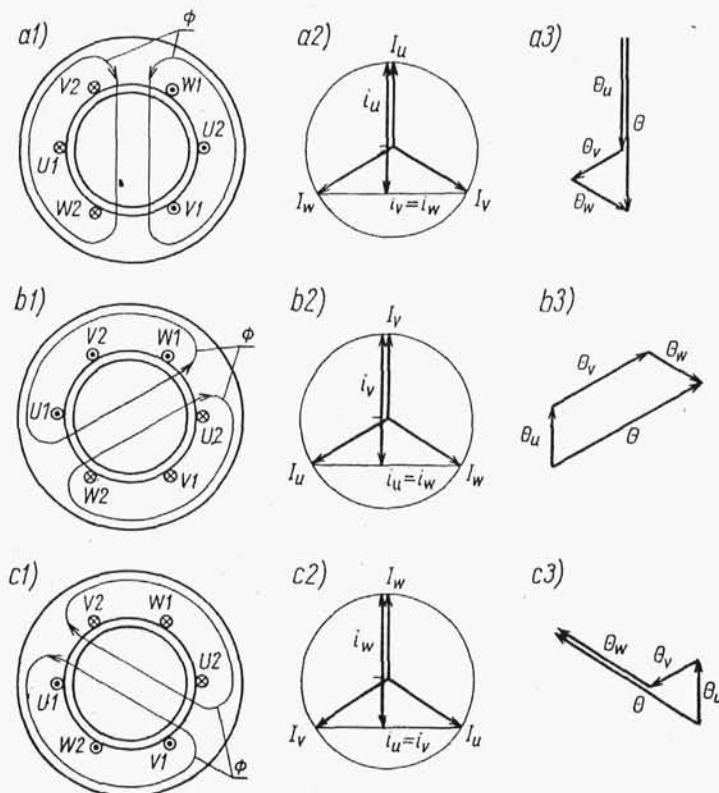




Rys. 3.43. Ilustracja powstawania magnetycznego strumienia oscylującego

Prąd przemienny wywołuje przemienne oscylujące napięcia magnetyczne w poszczególnych uzwojeniach fazowych. Na rysunku 3.43a pokazano schemat przekroju przez stojan i wirnik maszyny ze zwojem  $U1-U2$  w stojanie oraz z zaznaczonym strumieniem magnetycznym, którego chwilowy zwrot odpowiada chwilowemu zwrotowi prądu w zwoju  $U1-U2$ . Przy maksymalnym prądzie powstaje maksymalny strumień  $\Phi_m$  jak na rys. 3.43b. Ten strumień może być traktowany jako suma strumieni  $\Phi_{11}$  i  $\Phi_{21}$ . W następnych chwilach strumień zmniejsza się, np. do wartości  $\Phi'$ , i może być traktowany jako suma strumieni  $\Phi_{12}$  i  $\Phi_{22}$  itd. W taki sposób strumień magnetyczny oscylujący pomiędzy wartościami  $\Phi_m$  oraz  $-\Phi_m$  może być traktowany jako suma wirujących w przeciwnych kierunkach strumieni  $\Phi_1$  (o kolejnych wartościach  $\Phi_{11}, \Phi_{12}$  itd.) i  $\Phi_2$  (o kolejnych wartościach  $\Phi_{21}, \Phi_{22}$  itd.). Dodawanie strumieni może być w powyższy sposób wykonywane tylko przy pominięciu zjawiska nasycenia magnetycznego, można natomiast w ten sposób zawsze dodawać napięcia magnetyczne. Można uzasadnić, że strumienie składowe  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  wirują w przeciwnych kierunkach z jednakowymi prędkościami kątowymi.

Rysunek 3.44 jest ilustracją graficzną zasady powstawania strumienia magnetycznego wirującego. Na rysunku 3.44a1 pokazano rozmieszczenie trzech zwojów  $U1-U2$ ,  $V1-V2$  oraz  $W1-W2$  rozłożonych symetrycznie na obwodzie maszyny, stanowiących najprostsze symetryczne uzwojenie trójfazowe. Na rysunku 3.44a2 przedstawiono wykres wektorowy symetrycznych prądów fazowych  $I_u, I_v, I_w$  oraz wartości chwilowych prądów fazowych  $i_u = I_m, i_v = i_w = -I_m/2$  w chwili kiedy prąd w uzwojeniu fazy  $U$  ma wartość maksymalną  $I_m$ . Tej sytuacji odpowiadają zaznaczone na rys. 3.44a1 kierunek przepływu prądu w zwojach (krzyżyk – wpływ prądu do zwojów, kropka – wypływ prądu ze zwojów) oraz wypadkowy strumień. Na tej podstawie wyrysowano na rys. 3.44a3 przepływy fazowe i przepływ wypadkowy. Podobnie na rysunkach b oraz c zilustrowano stan zjawiska w chwili, kiedy prąd



Rys. 3.44. Ilustracja powstawania magnetycznego strumienia wirującego

osiąga wartość maksymalną odpowiednio w uzwojeniach faz  $V$  oraz  $W$ . Z rysunku widać, że w przypadku zasilania uzwojenia trójfazowego symetrycznym prądem trójfazowym symetrycznym otrzymuje się przepływ wirujący (napiecie magnetyczne) oraz odpowiednio strumień i indukcję. Wektor tego przepływu ma stałą wartość i wiruje ze stałą prędkością kątową w kierunku następstwa faz (np. od  $U$  do  $V$  oraz do  $W$ ). Pole magnetyczne o strumieniu wirującym nazywa się w skrócie *polem magnetycznym wirującym*. Pole magnetyczne wirujące o stałej wartości amplitudy przepływu nazywa się *polem magnetycznym kołowym*.

Strumień magnetyczny  $\Phi_a$  wywołany trójfazowym prądem twornika wiruje z prędkością równą prędkości strumienia wirującego magnesów  $\Phi_r$ . Obydwa te strumienie wirują w przestrzeni z jednakową prędkością, czyli są względem siebie nieruchome (w stanie ustalonym) i tworzą wspólny strumień wypadkowy wirujący z prędkością  $n = f/p$ . Moment elektromagnetyczny hamujący jest równy momentowi napędowemu silnika napędowego.

Maszyna synchroniczna może pracować także w zakresie pracy silnikowej. Jeśli niewzbudzona maszyna synchroniczna (przy prądzie wzbudzenia  $I_f = 0$ ) zostanie doprowadzona przez dodatkowe urządzenie do prędkości synchronicznej,

a następnie wzbudzona i w odpowiedniej chwili do zacisków twornika tej maszyny zostanie doprowadzone napięcie trójfazowe, to przez uzwojenie twornika popłynie prąd trójfazowy, powstanie strumień wirujący i moment obrotowy. Jeśli dodatkowe urządzenie napędzające zostanie teraz odłączone, to wytworzony moment obrotowy obraca wirnik maszyny w kierunku zgodnym z kierunkiem wirowania pola magnetycznego twornika. Maszyna synchroniczna pracuje w zakresie pracy silnikowej. W obydwóch stanach pracy (prądnicowej i silnikowej) maszyna synchroniczna wiruje z prędkością  $n = f/p$ , strumień magnesów i twornika wirują z tą samą prędkością  $n = f/p$  i są względem siebie nieruchome.

Bardzo małe maszyny synchroniczne mają budowę odwróconą: uzwojenie twornika mają na wirniku, a uzwojenie wzbudzające w stojanie. Wtedy przy pracy wirnik wiruje w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania strumienia twornika względem twornika, więc strumień twornika jest w przestrzeni nieruchomy. Strumień magnesów jest także nieruchomy. Strumień twornika i strumień magnesów są względem siebie nieruchome.

Maszyna o jednofazowym uzwojeniu twornika jest maszyną synchroniczną jednofazową. Wtedy strumień twornika wzniesiony przez prąd przemienny jednofazowy jest strumieniem oscylującym i może być rozłożony na dwie składowe wirujące w kierunkach przeciwnych (względem siebie). Jedna składowa strumienia wiruje w kierunku przyjętym umownie za dodatni, tzn. w kierunku zgodnym z kierunkiem wirowania wirnika i jest nieruchoma względem wirnika i strumienia magnesów. Druga składowa strumienia twornika wiruje w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania magnesów z prędkością (względem magnesów)  $2n = 2f/p$ . Taki strumień indukuje w obwodach zamkniętych wirnika napięcia i prądy podwójnej częstotliwości, powodując straty i nagrzewanie się elementów wirnika, co jest wadą maszyny synchronicznej jednofazowej.

Przy niesymetrycznym obciążeniu maszyny trójfazowej powstaje strumień od składowej przeciwnej prądu wirujący w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania wirnika. Prądy w obwodach zamkniętych magnesu (wyraźne klatki tłumiące w maszynach z biegunami wydatnymi i lity wirnik w maszynie z biegunami utajonymi) kompensują strumień od składowej przeciwnej prądu twornika. Te obwody zamknięte tłumią także kołysania ruchu mechanicznego, powstające w stanach nieustalonych maszyny synchronicznej i dlatego są nazywane *obwodami tłumiącymi*.

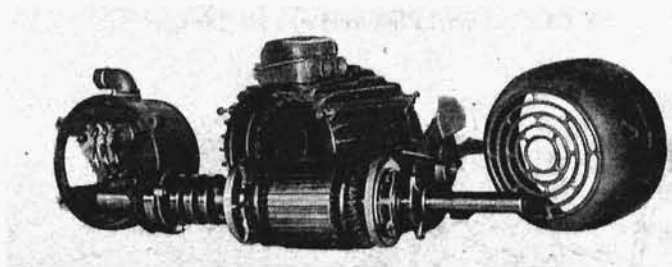
### 3.5. MASZYNY INDUKCYJNE

#### 3.5.1. Zasada budowy

Ze względu na liczbę faz rozróżnia się maszyny indukcyjne trójfazowe i jednofazowe. Ze względu na rodzaj budowy rozróżnia się maszyny indukcyjne pierścieniowe i klatkowe. Rdzenie stojana i wirnika maszyny indukcyjnej wykonuje się z blach elektrotechnicznych. W żłobkach rdzenia stojana i wirnika są umieszczone uzwojenia.

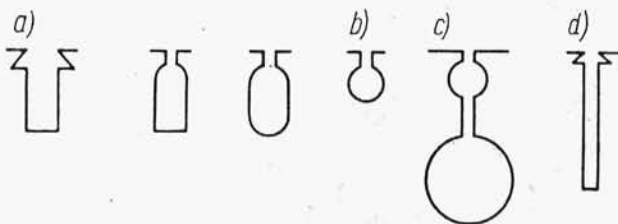
Maszyna indukcyjna, podobnie jak każda maszyna elektryczna wirująca, może pracować w zakresie pracy silnikowej i prądnicowej. Zasadniczym zakresem pracy maszyny indukcyjnej jest jednak praca silnikowa. Dlatego najczęściej mówi się o silniku indukcyjnym zamiast ogólnie o maszynie indukcyjnej.

Silnik indukcyjny pierścieniowy ma uzwojenia trójfazowe, w stojanie i wirniku. Takie uzwojenie, najczęściej wielozwojne, ma izolację zwojową (izolację przewodu, z którego jest wykonane uzwojenie) i izolację zezwojów (między uzwojeniem i rdzeniem). Części składowe silnika indukcyjnego pierścieniowego pokazano na rys. 3.45. Końcówki uzwojenia trójfazowego wirnika są dołączone do



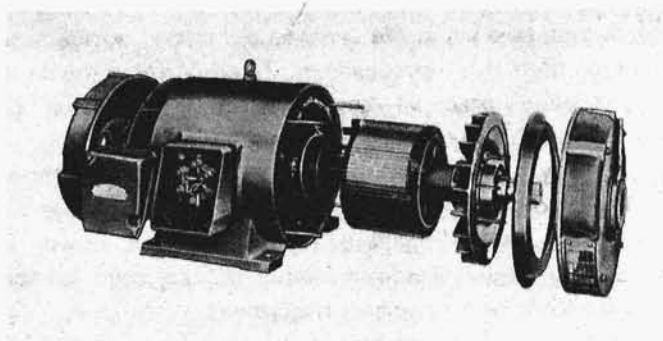
Rys. 3.45. Części składowe silnika indukcyjnego pierścieniowego o mocy 1,5 kW

pierścieni ślizgowych, po których podczas ruchu wirnika ślizgają się (jeśli nie są podniesione) szczotki umieszczone w szczotkotrzymaczach w stojanie. Do zacisków połączonych ze szczotkami można dołączyć układ oporników (np. opornik trójfazowy symetryczny), w ten sposób w obwód uzwojenia wirnika może być włączona rezystancja. W normalnym stanie pracy szczotki są podniesione a pierścień zwarty. Dokonuje się tego za pomocą dźwigni podnoszącej szczotki i przesuwającej element zwierający pierścień ślizgowy. Na rysunku 3.46a pokazano kształty żłobków stojanów i wirników maszyn indukcyjnych pierścieniowych.

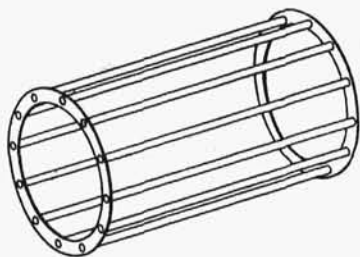


Rys. 3.46. Kształty żłobków maszyn indukcyjnych: a) stojana i wirnika pierścieniowego; b) wirnika jednoklatkowego; c) wirnika dwuklatkowego; d) wirnika głębokożłobkowego

Części składowe silnika indukcyjnego klatkowego przedstawiono na rys. 3.47. Stojan takiego silnika ma uzwojenie trójfazowe albo jednofazowe analogiczne jak stojan silnika pierścieniowego, a wirnik ma uzwojenie klatkowe. Szkic

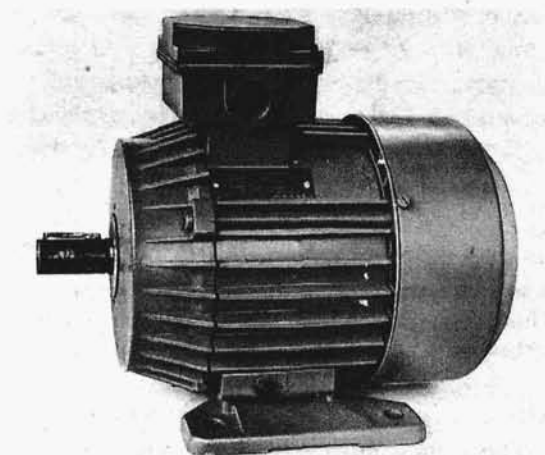


Rys. 3.47. Części składowe silnika indukcyjnego klatkowego



Rys 3.48. Szkic uzwojenia klatkowego silnika indukcyjnego

takiego uzwojenia klatkowego przedstawiono na rys. 3.48. W każdym żłobku wirnika znajduje się pręt uzwojenia, a końce wszystkich prętów są zwarte pierścieniami. Każdy pręt w żłobku stanowi oddzielną fazę uzwojenia. Takie uzwojenie wykonuje się najczęściej bez izolacji pomiędzy elementami z prądem i rdzeniem. Pręty oraz pierścienie zwierające są miedziane albo mosiężne, mogą być także aluminiowe. Wtedy rdzeń wirnika wkłada się do formy i całe uzwojenie wykonuje jako odlew



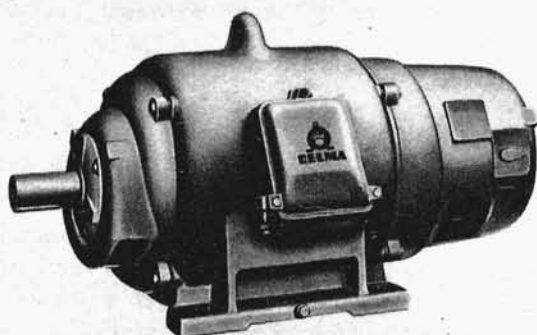
Rys. 3.49. Silnik indukcyjny trójfazowy klatkowy

aluminiowy. Taka konstrukcja jest bardzo prosta, tania i pewna w działaniu, z czego wynika szerokie zastosowanie silników. Kształt żłobka uzwojenia klatkowego pokazano na rys. 3.46b.

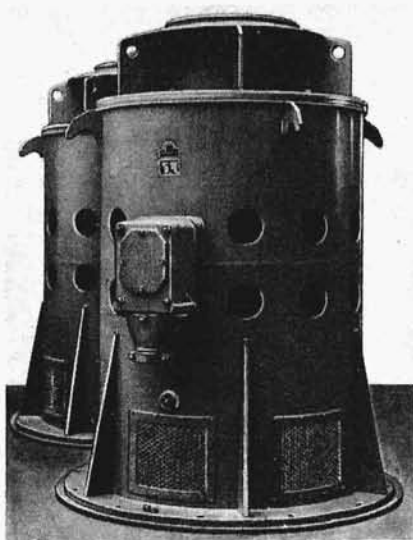
Dla polepszenia właściwości rozruchowych silnika klatkowego wykonuje się uzwojenie wirnika jako uzwojenie dwuklatkowe o kształcie żłobków pokazanych na rys. 3.46c, albo jako uzwojenie głębokożłobkowe o kształtach żłobków pokazanych na rys. 3.46d.

Obecnie silniki indukcyjne mają najczęściej budowę zamkniętą, ciepło strat wydzielonych w maszynie jest więc oddawane przez powierzchnię zewnętrzną stojana, którą dla uintensywnienia chłodzenia często wykonuje się pofalowaną.

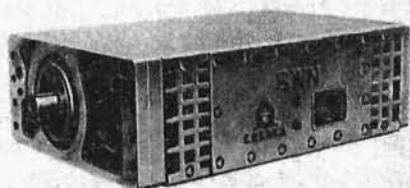
Na rysunkach 3.49 ÷ 3.52 pokazano silniki indukcyjne o różnej budowie.



Rys. 3.50. Silnik indukcyjny trójfazowy pierścieniowy



Rys. 3.51. Silniki indukcyjne klatkowe pionowe



Rys. 3.52. Silnik indukcyjny klatkowy budowy ognioszczelnej

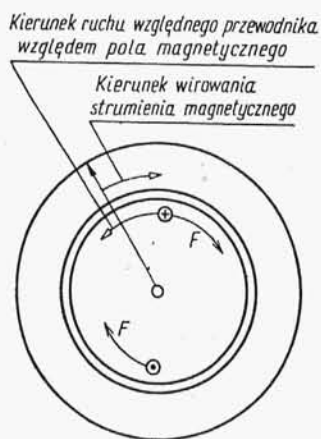
### 3.5.2. Zasada działania

Prąd wielofazowy (najczęściej trójfazowy, czasem dwufazowy) płynący w uzwojeniu wielofazowym (trójfazowym, dwufazowym) stojana wywołuje strumień wirujący z prędkością obrotową

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad (3.54)$$

przy czym:  $f$  – częstotliwość prądu;  $p$  – liczba par biegunów uzwojenia stojana.

Ten strumień indukuje w poszczególnych uzwojeniach fazowych stojana i w prętach uzwojenia nieruchomego wirnika napięcia o częstotliwości  $f$ . W zamkniętym uzwojeniu wirnika (w uzwojeniu klatkowym albo przy zwartych pierścieniach) płynie wielofazowy prąd, wywołujący strumień wirnika wirujący w tym samym kierunku i z taką samą prędkością, co i strumień stojana. Powstaje wspólny strumień wirujący z prędkością  $n_1$ .



Rys. 3.53. Ilustracja zasady działania maszyny indukcyjnej

Kierunek prądu w pręcie wirnika i kierunek siły  $F$  działającej na ten pręt przy danym kierunku wirowania strumienia pokazano na rys. 3.53. Zgodnie z kierunkiem siły  $F$  jest skierowany moment elektromagnetyczny  $M_e$  odpowiadający tej



sile. Wirnik obraca się z pewną prędkością  $n$  w kierunku wirowania strumienia. Wprowadza się pojęcie *poślizgu*

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3.55)$$

Przy nieruchomym (zahamowanym) wirniku  $n = 0$ ;  $s = 1$ , a przy prędkości synchronicznej  $n = n_1$ ;  $s = 0$ . Prędkość wirowania strumienia względem wirnika jest równa  $n_1 - n$ , a częstotliwość napięć indukowanych w wirniku

$$f_2 = p(n_1 - n) = sf \quad (3.56)$$

skąd przy  $n = 0$ , czyli  $s = 1$ , częstotliwość  $f_2 = f$ , a przy  $n = n_1$ , czyli  $s = 0$  częstotliwość  $f_2 = 0$ .

Strumień stojana wiruje względem nieruchomego punktu (stojana) z prędkością  $n_1$ . Strumień wirnika wiruje względem wirnika z prędkością

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = sn_1 \quad (3.57)$$

Wirnik wiruje względem stojana w kierunku wirowania strumienia z prędkością  $n$ , więc strumień wirnika wiruje względem stojana z prędkością

$$n_2 + n = sn_1 + n = n_1 \quad (3.58)$$

Obydwa strumienie (stojana i wirnika) wirują z jednakową prędkością także i przy wirniku wirującym względem stojana, tworząc wspólny strumień wirujący. Strumień stojana i strumień wirnika są względem siebie nieruchome.

Z zależności (3.58) wynika

$$\frac{f_2}{p} + n = \frac{f}{p}$$

skąd

$$f = f_2 + pn \quad (3.59)$$

Przy prędkości synchronicznej ( $n = n_1$ ) poślizg  $s = 0$ , a częstotliwość  $f_2 = 0$ , więc w wirniku nie indukują się napięcia i nie płyną prądy. Pod wpływem własnego momentu (elektromagnetycznego) maszyna indukcyjna może się obracać tylko z prędkością  $n < n_2$ , czyli przy  $s > 0$ . Prędkość synchroniczną (a także prędkość nadsynchroniczną w kierunku zgodnym z kierunkiem wirowania pola magnetycznego i prędkość w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania pola magnetycznego) może maszyna indukcyjna uzyskać tylko pod wpływem odpowiedniego momentu zewnętrznego. Wartość napięcia indukowanego w wirniku jest proporcjonalna do częstotliwości napięcia w wirniku, a więc także do poślizgu. Przy małych poślizgach napięcie indukowane w uzwojeniach wirnika, prąd i moment obrotowy są małe. Przy biegu jałowym silnika indukcyjnego moment hamujący i moment elektromagnetyczny są bardzo małe, więc poślizg silnika indukcyjnego przy biegu jałowym jest bardzo mały i rośnie ze wzrostem obciążenia silnika zewnętrznym momentem hamującym.