

Moduł 3

Zasady działania maszyn prądu stałego i przemiennego

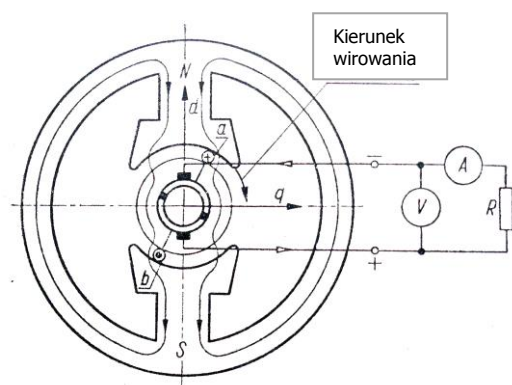
- 1. Zasada działania maszyn prądu stałego**
- 2. Uzwojenia tworników maszyn prądu stałego**
- 3. Obwód magnetyczny i charakterystyka magnesowania maszyny prądu stałego**
- 4. Zasada działania maszyn prądu zmiennego**
- 5. Bieg jałowy i zwarcie silnika indukcyjnego**
- 6. Regulacja prędkości obrotowej w maszynach prądu zmiennego**

1. Zasada działania maszyn prądu stałego

Maszyna elektryczna prądu stałego może pracować przy różnym kierunku przepływu energii, co oznacza, że może działać zarówno jako silnik lub prądnica. Najprostszą maszyną prądu stałego jest maszyna o zasadzie działania przedstawionej na rysunku 1. Jeżeli wirnik tej maszyny jest napędzany jakimś silnikiem, a do szczotek ślizgających się po komutatorze zostanie dołączona jakaś rezystancja, to popłynie prąd jednokierunkowy – maszyna taka działa jak najprostsza prądnica prądu stałego. Jeżeli do szczotek zostanie dołączone źródło napięcia, to przez zezwój popłynie prąd i , powstanie siła $F = Bil$ działająca na pręt o długości czynnej l oraz powstanie moment obrotowy $M = FR$, gdzie R to promień obrotu. Maszyna zacznie się obracać i może napędzać inną maszyną roboczą. Maszyna taka działa jak najprostszy silnik prądu stałego.

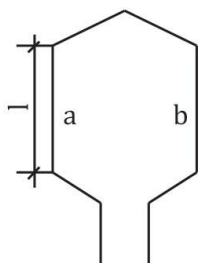
Zasadę indukowania się napięcia w pręcie obracającym się w polu magnetycznym można przedstawić w następujący sposób:

Na rdzeniu magnetycznym wirnika znajduje się zwój o bokach a, b , stanowiących część czynną zwoju o długości l , w przybliżeniu równej długości rdzenia wirnika. Boki zwoju są ze sobą połączone po stronie tylnej przez tzw. połączenie czołowe tylne, natomiast przez połączenie czołowe przednie – do wycinków komutatora. Najprostszy komutator (przedstawiony na rysunku) jest zbudowany z izolowanych od siebie dwóch półpierścieni. Oś podłużna d – oznacza oś przechodzącą przez środek biegunów, zaś oś poprzeczna q – oznacza oś prostopadłą do osi d . W dowolnym punkcie na obwodzie maszyny indukcja w szczelinie ma wartość B_x , pod biegunami indukcja ma wartość stałą B .



Rysunek 1. Zasada działania prądnicy prądu stałego

Źródło: W. Latek, *Zarys maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1978 r., s. 402



Rysunek 2. Szkic zwoju maszyny prądu stałego

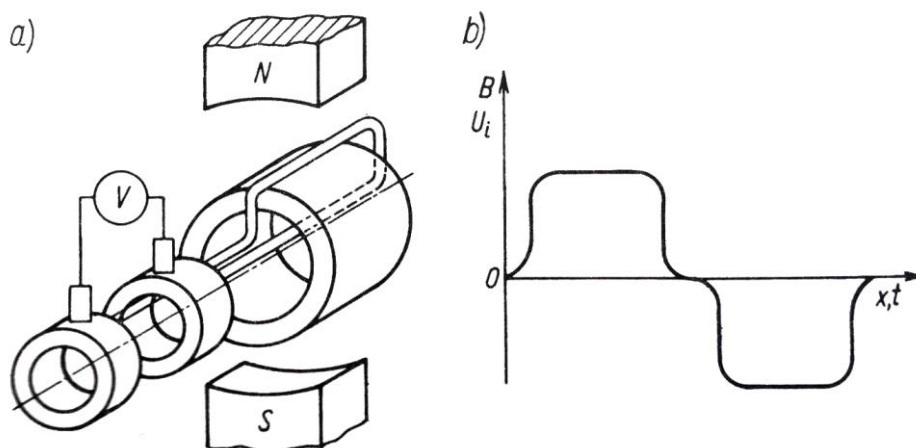
Źródło: Opracowanie własne

Strumień magnetyczny w maszynie prądu stałego wywołany jest biegunami magnetycznymi stojana N-S. Strumień magnetyczny przechodzi od jednego bieguna przez rdzeń wirnika w kształcie pierścienia do drugiego bieguna. Wokół pierścienia

rdzenia magnetycznego owinięty jest zwoj, którego końcówki są dołączone do dwóch pierścieni ślizgowych. Podczas obracania się wirnika z prędkością kątową Ω_m pręt stanowiący bok zewnętrzny zwoju o długości l obraca się z prędkością obwodową $v = \Omega_m R$, gdzie R – promień obrotu. W szczeliny powietrznej między biegunem i wirnikiem jest indukcja B . Wówczas w pręcie – a w tym przypadku również w zwoju o jednym boku czynnym, bo drugi bok znajdujący się wewnątrz pierścienia jest w polu o indukcji $B=0$ – indukuje się napięcie o wartości opisanej wzorem:

$$u_i = Blv$$

Przy stałej wartości prędkości v indukowane napięcie jest proporcjonalne do indukcji B .

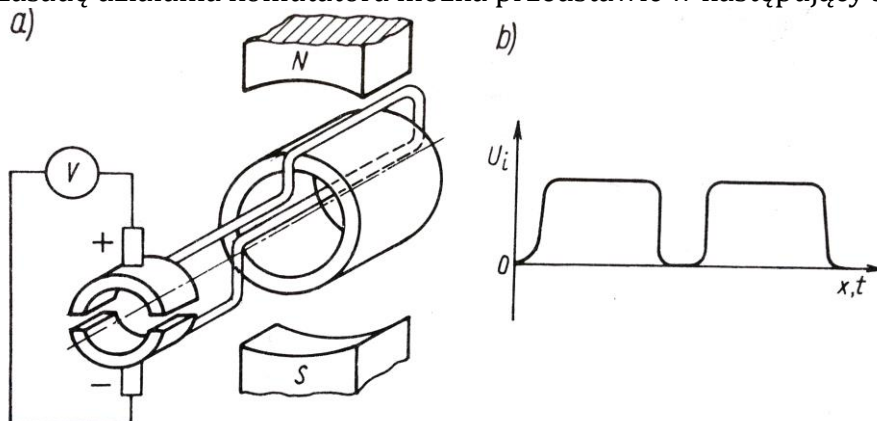


Rysunek 3. Ilustracja zasady indukowania się napięcia w pręcie obracającym się w polu magnetycznym

Źródło: W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1994 r., s. 94

Na rysunku 3b przedstawiono rozkład indukcji B na obwodzie maszyny w funkcji odległości x od punktu leżącego na prostej prostopadłej do osi biegunów. Krzywa $B = f(x)$ w innej skali przedstawia także krzywą $u_i = f(x)$, czyli przebieg zależności napięcia indukowanego w zwoju w funkcji odległości boku czynnego od punktu leżącego na prostej prostopadłej do osi biegunów. Odległość x jest proporcjonalna do czasu. Takie napięcie jest napięciem przemiennym o przebiegu różnym od sinusoidalnego.

Zasadę działania komutatora można przedstawić w następujący sposób:



Rysunek 4. Ilustracja zasady działania maszyny elektrycznej z jednym zwojem dołączonym do dwóch półpierścieni izolowanych od siebie

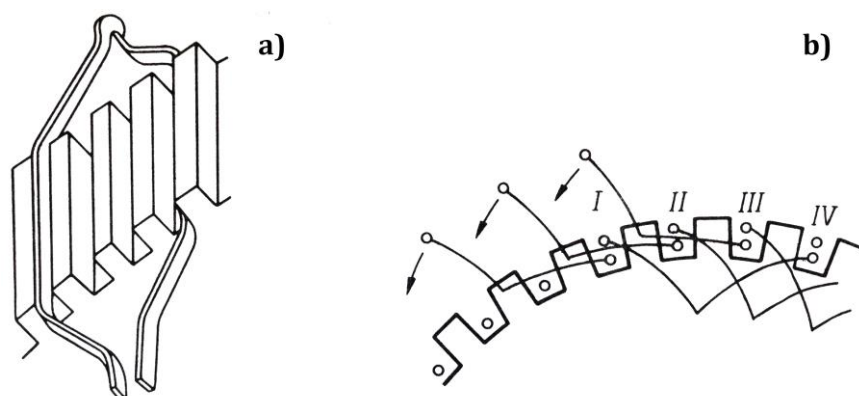
Źródło: W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1994r., s. 95

Końcówki zwoju przedstawionego na rysunku 4 są dołączone do dwóch półpierścieni izolowanych od siebie. W momencie, w którym zwój znajduje się w płaszczyźnie prostopadłej do osi biegunów, bok czynny zwoju przechodzi z pola działania jednego bieguna w pole działania drugiego bieguna. W tej samej chwili końcówka zwoju przez odpowiedni półpierścień traci kontakt ze szczotką dołączoną do jednego zacisku woltomierza i uzyskuje kontakt ze szczotką dołączoną do drugiego zacisku woltomierza. Dlatego napięcie na zaciskach woltomierza jest napięciem wyprostowanym, którego przebieg przedstawia rysunek 4b. Opisane tu półpierścienie przedstawiają sobą najprostszy prostownik mechaniczny – czyli najprostszy komutator.

2. Uzwojenia tworników maszyn prądu stałego

Uzwojenia bębnowe dwuwarstwowe

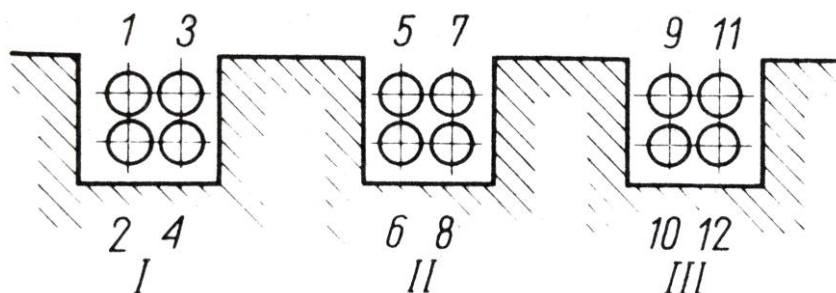
W maszynie prądu stałego stosuje się najczęściej uzwojenia bębnowe dwuwarstwowe. Zasadniczym elementem takiego uzwojenia jest zezwój wykonany na szablonie. Po założeniu zezwoju na rdzeń twornika, lewy bok leży w warstwie górnej, zaś prawy w warstwie dolnej, co przedstawione zostało na rysunku 5a. Sposób wkładania zezwojów do żłobków widoczny jest na rysunku 5b.



Rysunek 5. Uzwojenie bębnowe dwuwarstwowe; a) położenie zezwoju; b) wkładanie zezwojów do żłobków twornika

Źródło: W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1994 r., s. 112

Prawy bok jednego zezwoju wkłada się w dolną część żłobka, np. I, zaś lewy bok zezwoju odchylony w lewo pozostaje niewłożony do żłobka, podobnie postępuje się z drugim zezwojem i następnymi zezwojami, układając tylko prawe boki w dolnych częściach żłobków do momentu włożenia do żłobka prawego boku tego zezwoju, którego lewy bok leży w górnej części tego żłobka, do którego został włożony prawy bok pierwszego zezwoju. Do tego żłobka układa się lewy bok zezwoju, wypełniając tym samym jeden żłobek. W ten sposób wkłada się wszystkie zezwoje i wypełnia się wszystkie żłobki twornika. Boki i żłobki są zwykle odpowiednio ponumerowane, jak na rysunku 6.



Rysunek 6. Zasada numeracji boków i żłobków uzwojenia dwuwarstwowego

Źródło: W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1994 r., s. 112

W żłobku dwuwarstwowego uzwojenia bębnowego są zawsze dwie warstwy uzwojenia, lecz liczba boków w żłobku może być różna, np. 2, 4, 6, 8 itd. Aby prawidłowo wykonać uzwojenie, należy wiedzieć, o jaką liczbę żłobków należy przesunąć się po obwodzie twornika w prawo lub w lewo, aby połączyć bok pierwszego zezwoju z lewym bokiem zezwoju następnego. Ponieważ w jednym żłobku może leżeć kilka boków zezwoju, wygodniej jest mierzyć rozpiętość nie liczbą żłobków, lecz liczbą boków. Stąd wyróżnić można następujące pojęcia:

- poskok częściowy pierwszy y_1 – odległość między lewym i prawym bokiem tego samego zezwoju mierzona liczbą boków na obwodzie twornika – odpowiada ona poskokowi żłobkowemu,
- poskok częściowy drugi y_2 – odległość między prawym bokiem jednego zezwoju a lewym bokiem kolejno z nim połączanego zezwoju następnego, mierzona liczbą boków na obwodzie twornika,
- poskok całkowity lub inaczej poskok uzwojenia y – to odległość między lewymi albo prawymi bokami kolejno ze sobą połączonych zezwojów, mierzona liczbą boków na obwodzie twornika.

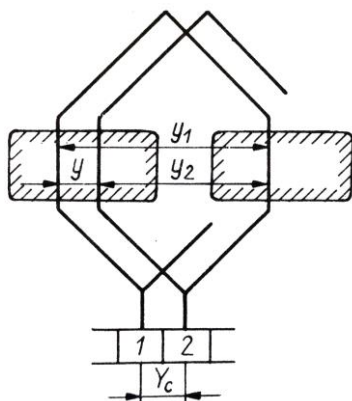
Oprócz powyższych informacji należy uwzględnić również, do których wycinków komutatora mają być połączone boki danego zezwoju oraz boki sąsiednich zezwojów – czyli tzw. poskok komutatorowy y_c , który oznacza odległość między początkiem i końcem zezwoju mierzona liczbą wycinków na komutatorze. W zależności od wybranego poskoku komutatorowego można otrzymać uzwojenie:

- pętlicowe proste,
- pętlicowe dwukrotne,
- faliste proste,
- faliste dwukrotne,
- faliste wielokrotne.

Uzwojenie pętlicowe proste

W uzwojeniu pętlicowym prostym, począwszy od jednego wycinka komutatora, przechodzi się po prawym boku tego samego zezwoju (rysunek 7) aż do sąsiedniego wycinka komutatora. Idąc dalej od tego wycinka, dochodzi się do lewego boku sąsiedniego zezwoju. Przechodząc cały zezwój, przechodzi się w prawo o jeden wycinek komutatora. Poskok komutatorowy dla uzwojenia pętlicowego prostego wynosi +1, czyli:

$$y_c = +1$$



Rysunek 7. Poślizgi uzwojenia pętlicowego prostego

Źródło: J. Zembrzusi, *Uszkodzenia i naprawa silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1992 r., s. 55

Uzwojenie pętlicowe dwukrotne

To uzwojenie otrzymuje się przez wplecenie między siebie dwóch uzwojeń pętlicowych prostych. Prawy bok zezwoju dołączony jest nie do drugiego wycinka komutatorowego, jak w uzwojeniu pętlicowym prostym, ale do wycinka trzeciego. Stąd poskok komutatorowy w uzwojeniu pętlicowym dwukrotnym wynosi 2. Każde z prostych uzwojeń uzwojenia pętlicowego dwukrotnego ma $a=p$ par gałęzi równoległych. Gdyby spleść nie 2, a m uzwojeń pętlicowych prostych, to powstałoby uzwojenie m -krotne, którego poskok komutatorowy wynosiłby $y_c = +m$, zaś liczba par gałęzi równoległych $a = mp$.

Dzięki zastosowaniu uzwojenia pętlicowego m -krotnego uzyskuje się m -krotne zwiększenie liczby par gałęzi równoległych, co jest istotne przy budowie maszyn na duże wartości prądów.

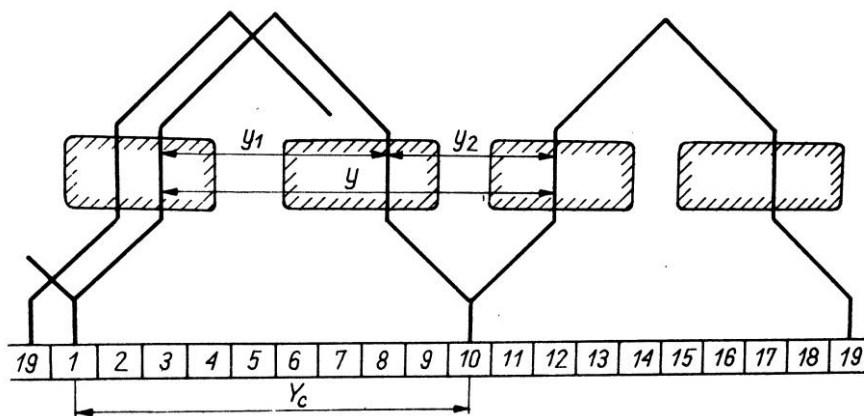
Uzwojenie faliste proste

W uzwojeniu pętlicowym poskok częściowy pierwszy y_1 odkładany był na prawo, a poskok częściowy drugi y_2 odkładany był na lewo. W ten sposób poskok całkowity y równy był różnicy poskoków częściowych i zezwój tworzył pętlę – skąd nazwa tego uzwojenia. W uzwojeniu falistym poskok częściowy drugi y_2 odkładany jest w tym samym kierunku, co poskok częściowy pierwszy y_1 , czyli również w prawo. Poskok uzwojenia y jest więc równy sumie poskoków częściowych $y = y_1 + y_2$. Boki jednego zezwoju falistego są połączone z wycinkami komutatora oddalonymi od siebie o poskok komutatorowy y_c . Do wycinka komutatora połączonego z prawym bokiem zezwoju pierwszego dołączony jest lewy bok drugiego zezwoju, który powinien znajdować się w warunkach magnetycznych najbardziej zbliżonych do warunków magnetycznych zezwoju pierwszego. Prawy bok zezwoju drugiego jest połączony z wycinkiem komutatora oddalonym znowu od poprzedniego o poskok komutatorowy. W taki sposób niezależnie od ilości par biegunów p obiega się cały twornik maszyny jedną falą uzwojenia składającą się z liczby p zezwojów wykonując p poskoków komutatorowych i dochodzi się do wycinka oddalonego od wycinka wyjściowego o $K-1$ wycinków. Można więc zapisać, że:

$$py_c = K - 1$$

stąd

$$y_c = \frac{K - 1}{p}$$



Rysunek 8. Fragment uzwojenia falistego

Źródło: J. Zembruski, *Uszkodzenia i naprawa silników elektrycznych*, WNT, Warszawa 1992 r., s. 55

Uzwojenie faliste wielokrotne

Jest to uzwojenie nazywane często uzwojeniem szeregowo-równoległym. Uzyskuje się je w ten sposób, że obiegając wycinki komutatora podobnie jak przy pierwszej fali, łączy się je z wycinkiem komutatora oddalonym w lewo od wycinka 1 o m wycinków. Wówczas:

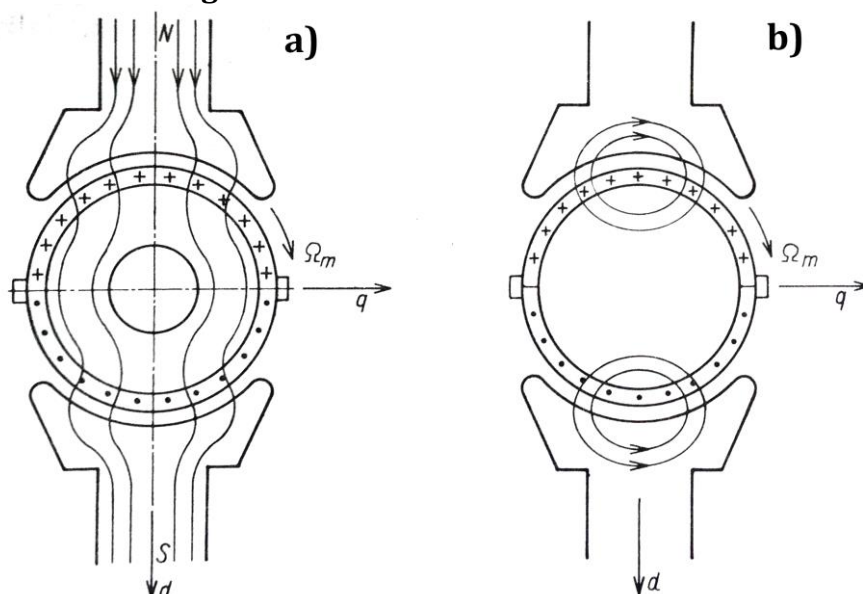
$$py_c = K - m$$

stąd

$$y_c = \frac{K - m}{p}$$

Liczba m oznacza krotność uzwojenia. Przy $m = 2$ otrzymuje się uzwojenie faliste dwukrotne, przy $m = 3$ uzwojenie faliste trzykrotne itd.

3. Obwód magnetyczny i charakterystyka magnesowania maszyny prądu stałego

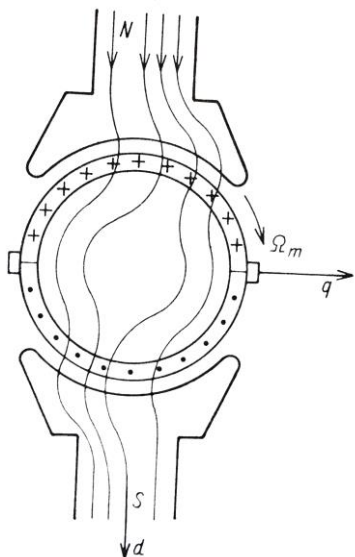


Rysunek 9. Przebieg strumienia magnetycznego: a) od magnesów; b) od prądu twornika

Źródło: W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1994 r., s. 124

Rysunek 9a przedstawia przebieg strumienia magnetycznego ϕ_f od magnesów w maszynie prądu stałego. Przy zaznaczonym kierunku wirowania i prędkości kątowej Ω_m indukują się napięcia w prętach uzwojenia twornika w odpowiednich kierunkach. Podczas pracy prądnicowej prąd płynie zgodnie z kierunkiem indukowanego napięcia. W górnej części rysunku widać, jak prąd twornika wpływa do płaszczyzny rysunku, a w dolnej części z niego wypływa. Rysunek 9b przedstawia strumień magnetyczny ϕ_a od prądu twornika. Strumień ten zamyka się przez nabiegunnik i rdzeń twornika. Pod jedną połówką nabiegunnika strumień ϕ_a wpływa do twornika, pod drugą wypływa z twornika. Strumień twornika ϕ_a jest skierowany w osi szczotek. Przy szczotkach ustawionych w osi poprzecznej strumień twornika jest strumieniem poprzecznym.

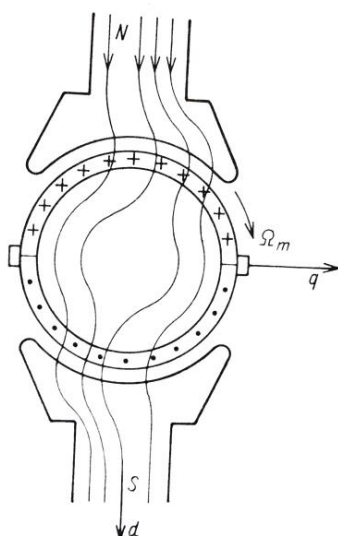
W maszynie obciążonej strumień wypadkowy Φ przedstawiony na rysunku 10 jest sumą strumienia od magnesów ϕ_f i strumienia twornika ϕ_a . Droga strumienia wypadkowego Φ jest skrzywiona w stosunku do strumienia magnesów ϕ_f – przy pracy prądnicowej w kierunku wirowania wirnika. Pod jedną połówką nabiegunnika następuje zagęszczenie strumienia. Na skutek wzrostu nasycenia magnetycznego pod połówką nabiegunnika z zagęszczonym strumieniem, strumień wypadkowy Φ jest nieco mniejszy od strumienia magnesów ϕ_f .



Rysunek 10. Strumień wypadkowy w maszynie prądu stałego

Źródło: W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1994 r., s. 125

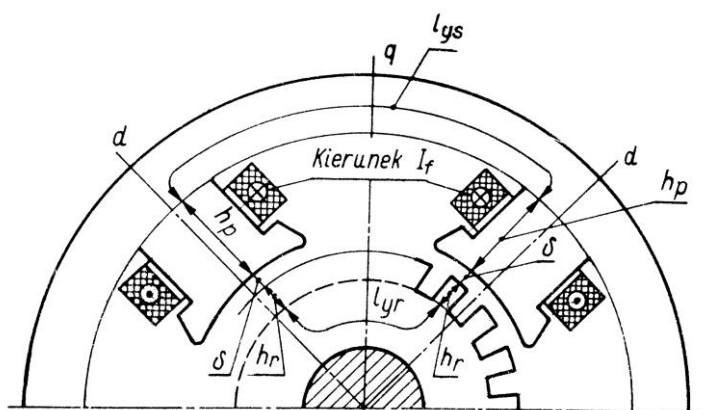
Przy pracy silnikowej prąd ma kierunek przeciwny niż przy pracy prądnicowej, kierunek strumienia twornika ϕ_a jest skierowany przeciwnie i strumień wypadkowy jest skrzywiony w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania twornika.



Rysunek 11. Strumień wypadkowy w maszynie prądu stałego

Źródło: W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1994 r., s. 125

Strumień magnetyczny biegunów powstaje dzięki temu, że bieguny magnetyczne są elektromagnesami (wzbudzenie elektromagnetyczne) lub są magnesami trwałymi (wzbudzenie magnetoelektryczne). Rysunek 12 przedstawia szkic obwodu magnetycznego czterobiegunowej maszyny prądu stałego. Na biegunach umieszczone jest uzwojenie wzbudzenia. Bieguny magnetyczne mają znaki na przemian przeciwne, a więc kierunek prądu magnesującego I_f musi być taki sam, jak zaznaczono na rysunku 12. Strumień w obwodzie zamykającym się przez dwa sąsiednie bieguny, jarzmo rdzenia stojana i wirnik jest wymuszony przez przepływ uzwojeń wzbudzenia dwóch sąsiednich biegunów.



Rysunek 12. Szkic obwodu magnetycznego maszyny prądu stałego

Źródło: W. Latek, *Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT, Warszawa 1994 r., s. 107

Na rysunku 12 zaznaczono długości poszczególnych odcinków drogi strumienia magnetycznego:

- w jarzmie rdzenia stojana l_{ys}
- w biegunach $2h_p$
- w szczelinach powietrznych
- w jarzmie rdzenia wirnika l_{yr}
- w zębach wirnika $2h_r$

W każdym z tych odcinków drogi strumienia występuje spadek napięcia magnetycznego. Przepływ θ_f wywołany prądem wzbudzenia I_f przepływającym przez N_f zwojów jednej pary biegunów, czyli dwukrotnie przez N_p zwojów na jednym biegunie, jest równy sumie spadków napięcia magnetycznego na całej drodze strumienia:

$$\theta_f = N_f I_f = 2N_p I_f$$

oraz

$$2N_p I_f = 2U_{m\delta} + 2U_{mr} + 2U_{mp} + U_{mys} + U_{myr}$$

gdzie:

$U_{m\delta}$ – spadek napięcia w szczelinie powietrznej

U_{mr} – spadek napięcia w zębach wirnika

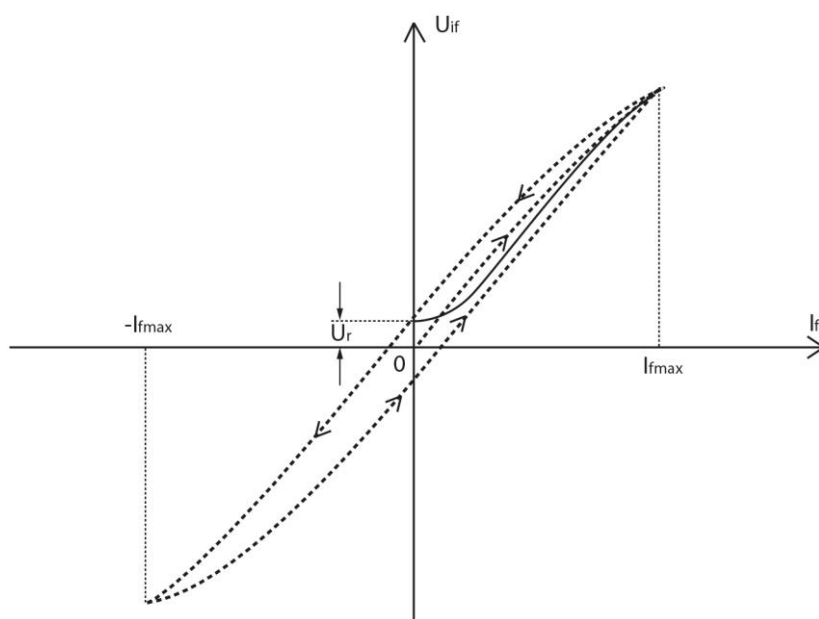
U_{mp} – spadek napięcia w magnesach

U_{mys} – spadek napięcia w jarzmie rdzenia stojana

U_{myr} – spadek napięcia w jarzmie rdzenia wirnika

Przeważającą część spadku napięcia magnetycznego stanowi spadek w szczelinie powietrznej.

Charakterystyka magnesowania maszyny prądu stałego jest charakterystyką biegu jałowego i jest to zależność napięcia U_{if} indukowanego strumieniem magnesów wywołanym prądem wzbudzenia I_f przy stałej wartości prędkości obrotowej równej prędkości znamionowej n_N . Jest to innymi słowy zależność $U_{if} = f(I_f)$ przy $n = n_N$.



Rysunek 13. Przebieg charakterystyki magnesowania z uwzględnieniem pętli histerezy

Źródło: Opracowanie własne

Charakterystykę magnesowania można wyznaczyć z pomiarów wykonywanych na maszynie wirującej ze znamionową prędkością obrotową i znajdującej się w stanie biegu jałowego w zakresie pracy prądnicowej. Wyłącznik w obwodzie twornika powinien być otwarty wówczas prąd twornika $I_a = 0$. Uzwojenie wzbudzenia zasila się z obcego źródła prądem I_f . Poprzez odpowiednie zmniejszenie rezystancji R_{fr} uzyskuje się taką wartość prądu I_f , przy której napięcie U zmierzone woltomierzem na zaciskach twornika wyniesie $U = 1,3U_N$, gdzie U_N to napięcie znamionowe prądnicy. Z uwagi na to, że w obwodzie twornika nie płynie prąd – nie występują również w tym obwodzie spadki

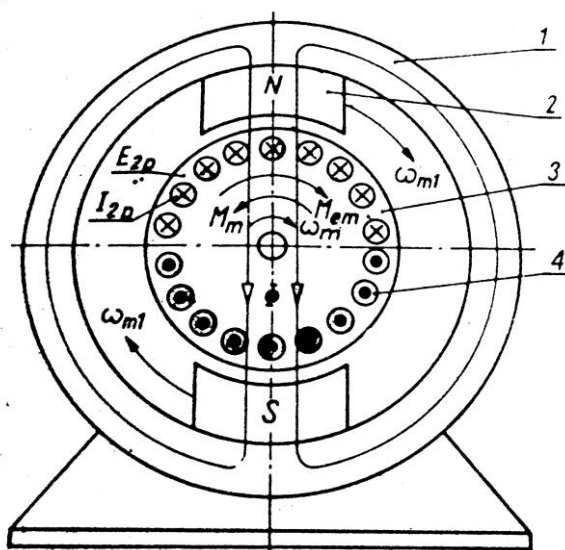
napięć. Strumień od magnesów jest zarazem strumieniem całkowitym maszyny, więc napięcie U na zaciskach maszyny jest równe napięciu U_{if} indukowanemu w maszynie przez prąd wzбудzenia I_f . Następnie, zmniejszając stopniowo wartość prądu wzбудzenia I_f , mierzy się wartości U_{if} oraz I_f .

4. Zasada działania maszyn prądu zmiennego

Rozpatrując maszynę indukcyjną pierścieniową lub klatkową, mającą w stojanie uzwojenie trójfazowe o liczbie par biegunów równej p , które jest przyłączone do symetrycznej sieci trójfazowej o częstotliwości f_1 , można stwierdzić, że w tych warunkach powstaje w maszynie pole kołowe wirujące względem stojana z prędkością kątową ω_{m1} nazywaną prędkością kątową synchroniczną opisaną wzorem:

$$\omega_{m1} = \frac{2\pi f_1}{p}$$

Takie pole wirujące można wytworzyć w maszynie również w inny sposób – stosując np. magnes trwały mający p par biegunów i wirujący względem stojana z prędkością synchroniczną ω_{m1} . Stąd wynika model maszyny indukcyjnej wirującej przedstawiony na rysunku 14.



Rysunek 14. Model maszyny indukcyjnej trójfazowej; 1 – stojan, 2 – magnes trwały wirujący względem stojana z prędkością synchroniczną ω_{m1} , 3- wirnik wirujący z dowolną prędkością ω_m , 4 - pręty uzwojenia wirnika.

Źródło: Praca zbiorowa, *Maszyny i napęd elektryczny*, WSiP, Warszawa 1978 r., s. 126

W różnych stanach pracy maszyny indukcyjnej wirnik może wirować względem stojana w dowolnym kierunku z prędkością kątową ω_m . Przyjmijmy kierunek wirowania wirnika zgodny z kierunkiem wirowania pola magnetycznego, jak to przedstawiono na rysunku 14. Zjawiska zachodzące w maszynie indukcyjnej uwarunkowane są prędkością $\omega_{m1-2} = \omega_{m1} - \omega_m$ wirowania pola magnetycznego względem wirnika, którą określa się za pomocą poślizgu. Przy przyjętych strzałkach prędkości wirowania pola magnetycznego ω_{m1} oraz wirnika ω_m poślizg s można zdefiniować zależnością:

$$s = \frac{\omega_{m1-2}}{\omega_{m1}} = \frac{\omega_{m1} - \omega_m}{\omega_{m1}}$$

Poślizg wyraża się również za pomocą prędkości obrotowych, wówczas korzysta się ze wzoru:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

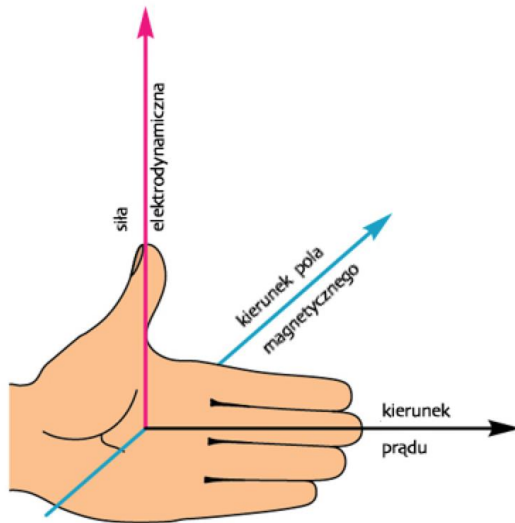
Podczas wirowania pola magnetycznego względem wirnika z prędkością $\omega_{m1-2} = \omega_{m1} - \omega_m = s\omega_{m1}$ w prętach uzwojenia wirnika indukują się przemienne siły elektromotoryczne E_{2p} o częstotliwości:

$$f_2 = p \frac{\omega_{m1-2}}{2\pi} = ps \frac{\omega_{m1}}{2\pi} = sf_1$$

Wartości chwilowe oraz kierunki rzeczywiste indukowanych sił elektromotorycznych wynikają z prawa określającego siłę elektromotoryczną rotacji $\mathcal{E} = Blv$. Jeżeli obwód uzwojenia wirnika jest zamknięty, to pod wpływem indukowanych sił elektromotorycznych płynie w prętach wirnika prąd przemienny I_{2p} . Wartość chwilowa tego prądu zależy od wartości chwilowej siły elektromotorycznej E_{2p} oraz impedancji obwodu uzwojenia wirnika. Rzeczywisty kierunek prądu wynika z kierunku siły elektromotorycznej E_{2p} oraz kąta fazowego ψ_2 impedancji obwodu uzwojenia wirnika. Na pręty uzwojenia wirnika znajdujące się w wirującym polu magnetycznym, w których płynie prąd I_{2p} , działają siły elektrodynamiczne F_{emp} o wartości wynikającej z zależności $F = BIl$ i o kierunku rzeczywistym wynikającym z reguły lewej dłoni. Te siły elektrodynamiczne tworzą pary sił, w wyniku których na wirnik działa moment elektromagnetyczny M_{em} . Maszyna indukcyjna będzie pracować przy stałej prędkości kątowej ω_m wirnika, jeżeli moment mechaniczny M_m zostanie zrównoważony momentem elektromagnetycznym M_{em} działającym na wirnik w kierunku przeciwnym do kierunku działania momentu elektromagnetycznego. Moment mechaniczny M_m jest równy sumie momentu strat mechanicznych (tarcia i wentylacji) ΔM_m oraz momentu użytecznego M działającego z zewnątrz maszyny na wał wirnika.

Reguła lewej dłoni:

Jeżeli lewą dłoń ustawi się tak, że linie indukcji pola magnetycznego wnikają prostopadle do dłoni, a cztery wyprostowane palce wskazują kierunek i zwrot przepływu prądu – to kciuk odchylony pod kątem prostym wskazuje kierunek i zwrot siły elektrodynamicznej.



Rysunek 15. Reguła lewej dłoni

Źródło: <http://encyklopedia.pwn.pl/haslo/3932019/lewej-dloni-regula.html>, stan na dzień 20.08.2013

Z przedstawionej zasady działania maszyny indukcyjnej wynika, że kierunki rzeczywiste sił elektromotorycznych E_{2p} , prądu I_{2p} , siły elektrodynamicznej F_{em} , momentu elektromagnetycznego M_{em} oraz momentu mechanicznego M_m mogą być różne, ponieważ są uwarunkowane kierunkiem wirowania pola magnetycznego względem wirnika – czyli wartością i znakiem poślizgu s .

Możliwości pracy maszyny indukcyjnej w różnych stanach wynikają z rozpatrzenia wzajemnego układu rzeczywistych kierunków prędkości kątowej wirnika, momentu elektromagnetycznego, momentu mechanicznego oraz wartości częstotliwości w obwodzie uzwojeń stojana i wirnika. Na podstawie przedstawionej zasady działania otrzymuje się następujące możliwe stany pracy maszyny indukcyjnej:

- **praca transformatorowa** – jeśli $\omega_m = 0$, czyli poślizg $s = 1$. Częstotliwość w obwodzie uzwojeń stojana i wirnika ma taką samą wartość $f_2 = f_1$, analogicznie jak w transformatorze. W tych warunkach występuje moment elektromagnetyczny $M_{em} > 0$, zatem aby $\omega_m = 0$, trzeba wirnik zahamować momentem mechanicznym $M_m > 0$, przy czym musi zachodzić równość $M_m = M_{em}$,
- **praca silnikowa** – jeśli $0 < \omega_m < \omega_{m1}$, czyli $1 > s > 0$. W tych warunkach powstaje moment elektromagnetyczny $M_{em} > 0$, działający zgodnie z kierunkiem wirowania pola magnetycznego, który wprawia wirnik maszyny w ruch obrotowy. Jeżeli na wirnik działa również moment mechaniczny $M_m > 0$, wówczas ustala się praca maszyny przy takiej prędkości wirowania $\omega_m > 0$, przy której wystąpi równowaga momentów działających na wirnik,
- **idealny bieg jałowy** – jeśli $\omega_m = \omega_{m1}$, czyli $s = 0$. Pole magnetyczne jest nieruchome względem wirnika, a więc w uzwojeniu wirnika nie indukują się siły elektromotoryczne $E_{2p} = 0$. Wobec tego nie powstanie moment elektromagnetyczny $M_{em} = 0$, zatem aby wirnik mógł wirować z prędkością synchroniczną, trzeba go napędzić z zewnątrz momentem użytecznym $M < 0$ w celu pokonania momentu strat mechanicznych $\Delta M_m > 0$. W tych warunkach moment mechaniczny $M_m = 0$,
- **praca prądnicowa** – jeśli $\omega_{m1} < \omega_m < 0 \leq \infty$, czyli $0 > s \geq -\infty$. Przy prędkości nadsynchronicznej wirnika zmienia się kierunek wirowania pola magnetycznego względem wirnika i w efekcie powstaje moment

elektromagnetyczny $M_{em} > 0$. Aby wirnik mógł wirować z taką prędkością, trzeba go napędzić z zewnątrz momentem użytecznym $M < 0$ większym od momentu strat mechanicznych $\Delta M_m > 0$. Zatem moment mechaniczny $M_m < 0$, co przy $M_{em} < 0$ oraz $\omega_m > 0$ wskazuje na możliwość pracy prądnicowej lub hamulcowej. Wobec tego maszynę można użyć jako prądnicę lub jako hamulec oddający energię do sieci – tzw. hamowanie prądnicowe,

- **praca hamulcowa** – jeśli $0 > \omega_m \geq -\infty$, czyli $1 < s \leq \infty$. Wirnik wiruje w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania pola magnetycznego $\omega_m < 0$, zatem powstaje moment elektromagnetyczny $M_{em} > 0$. Należy więc wirnik napędzić momentem mechanicznym $M_m > 0$ działającym zgodnie z kierunkiem ruchu wirnika. Taki układ kierunków momentu mechanicznego, prędkości kątowej i momentu elektromagnetycznego wskazuje na możliwość pracy prądnicowej lub hamulcowej, jednakże z uwagi na zmienną częstotliwość energii oddawanej do sieci z zacisków wirnika maszyna pracująca przy $s > 1$ rzadko znajduje zastosowanie jako prądnicą.

5. Bieg jałowy i zwarcie silnika indukcyjnego

Biegiem jałowym silnika indukcyjnego nazywa się taki stan jego pracy, w którym obwód wirnika jest zamknięty, do uzwojeń stojana doprowadzone jest napięcie, a wał silnika nie jest obciążony żadnym momentem. W silniku wytwarza się bardzo mały moment, równoważący niewielki moment od sił tarcia w łożyskach i od sił tarcia wirnika o powietrze. Dlatego też prąd w wirniku jest bardzo mały. W stanie stojania silnika indukcyjnego płynie wówczas prąd składający się z prądu wirnika sprowadzonego do stojana, z prądu magnesującego oraz prądu odpowiadającego stratom w rdzeniu. Z uwagi na to, że w stanie jałowym prąd w wirniku niezbędny do wywołania małego momentu jest znikomy, to również napięcie indukowane w uzwojeniu wirnika potrzebne do wywołania małego prądu jest niewielkie. Wobec powyższego również poślizg oznaczony przy biegu jałowym jako s_0 jest bardzo mały i wynosi tylko ułamek procenta. Częstotliwość w wirniku $f_2 = s_0 f$ jest bardzo mała i jest ona zarazem częstotliwością przemagnesowywania blach wirnika. Z uwagi na niewielką częstotliwość w wirniku można uznać, że przy biegu jałowym silnika indukcyjnego straty w rdzeniu występują tylko w stojanie. Podobnie ze względu na bardzo mały prąd wirnika można pominąć straty w uzwojeniach wirnika. Ponieważ moc oddana przez silnik w stanie pracy jałowej jest równa zero – wał silnika jest nieobciążony – to moc pobrana przez silnik przy biegu jałowym P_{10} :

$$P_{10} = P_{Cu1} + P_m + P_{Fe} + P_{d0}$$

pokrywa następujące straty:

- straty w uzwojeniu stojana P_{Cu1} ,
- straty w rdzeniu stojana P_{Fe} ,
- straty mechaniczne P_m ,
- straty dodatkowe jałowe P_{d0} .

Straty dodatkowe jałowe to straty pulsacyjne i powierzchniowe na zębach stojana i wirnika. Głównym powodem występowania strat pulsacyjnych jest to, że przy obrotach wirnika względem stojana ząb stojana zmienia swoje położenie względem układu zęb-żłobek wirnika, co powoduje zmianę rozkładu indukcji w poszczególnych zębach stojana. Podobnie ząb wirnika zmienia swoje położenie względem układu zęb-żłobek

stojana. Jest to powodem powstawania dodatkowych strat w zębach. Straty powierzchniowe wywołane są wyższymi harmonicznymi – przede wszystkim żłobkowymi – w krzywej indukcji podczas biegu jałowego. Mierzenie i obliczanie strat dodatkowych jest bardzo trudne, dlatego często stosuje się uproszczenie, że całe straty dodatkowe P_{d0} występują w stojanie i wyznacza się je łącznie ze stratami podstawowymi w rdzeniu stojana P_{Fe} .

Prąd jałowy I_0 jest mały, więc i straty w uzwojeniu stojana $P_{cu1} = 3R_1 I_0^2$ są również niewielkie. Wprowadza się pojęcie strat jałowych:

$$P_0 = P_m + P_{Fe} + P_{d0}$$

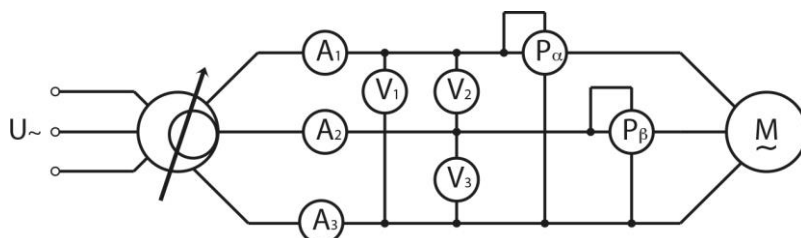
podstawiając:

$$P_{10} = P_{cu1} + P_m + P_{Fe} + P_{d0}$$

otrzymujemy:

$$P_0 = P_{10} - P_{cu1}$$

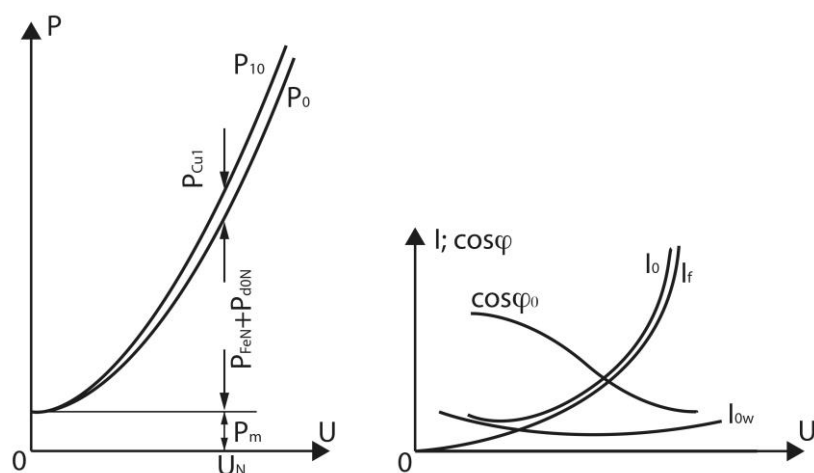
Rysunek 16 przedstawia schemat do badania silnika indukcyjnego między innymi do wykonania próby biegu jałowego. Na podstawie wskazań trzech amperomierzy oblicza się średnią wartość prądu przewodowego, na podstawie wskazań woltomierzy – średnią wartość napięcia międzyprzewodowego. Watomierze wpięte w układzie Arona służą do badania mocy pobieranej przez silnik. Pomiary wykonuje się przy napięciu regulowanym od $1,3 U_N$ do takiej wartości minimalnej, przy której silnik jeszcze się nie zatrzymuje.



Rysunek 16. Układ połączeń do badania silnika indukcyjnego

Źródło: Opracowanie własne

Prędkość obrotowa silnika przy biegu jałowym jest prawie stała, tak więc można przyjąć, że $P_m = \text{const}$. Straty w rdzeniu są w przybliżeniu proporcjonalne do B^2 oraz do U^2 . Można przyjąć także, że $P_{d0} = cU^2$. Stąd zależność $P_0 = P_m + P_{Fe} + P_{d0}$ w funkcji napięcia przedstawia parabolę z minimum leżącym na osi P i przesuniętym od punktu 0 o wartość P_m .



Rysunek 17. Charakterystyki biegu jałowego

Źródło: Opracowanie własne

Stanem zwarcia maszyny indukcyjnej nazywa się taki stan, przy którym uzwojenie unieruchomionego wirnika jest zwarte, a do uzwojenia stojana doprowadzone jest napięcie. Poślizg $s = 1$, a częstotliwość prądów w wirniku $f_2 = sf = f$ równa się częstotliwości prądów w stojanie. Jest to częstotliwość duża i na skutek tego w uzwojeniu wirnika indukuje się stosunkowo duże napięcie. Prąd wirnika można wyrazić wzorem:

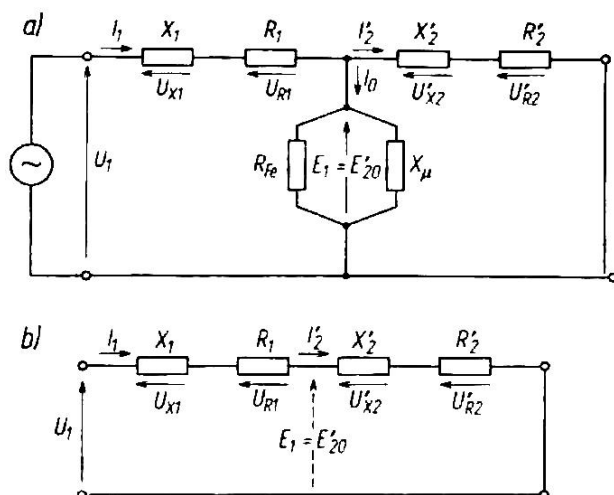
$$I_2 = \frac{U_{i2}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} = \frac{U_{i2}}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

Prąd w stanie zwarcia maszyny indukcyjnej jest stosunkowo duży, ponieważ rezystancja R_2 jest mała i może on wynosić od 4 do 10 krotności prądu znamionowego. Z uwagi na zahamowany wirnik silnika moc mechaniczna nie jest oddawana, zaś moc elektryczna pobierana przez silnik jest w całości zamieniana na ciepło. Dzięki bardzo małym stratom w rdzeniu można przyjąć, że całkowita moc pobrana przeznaczona zostaje na pokrycie strat obciążeniowych w uzwojeniu stojana i wirnika.

$$P_z = P_{Cu1} + P_{Cu2}$$

Podobnie jak w transformatorze – napięciem zwarciovym nazywa się takie napięcie, przy którym przez uzwojenie stojana maszyny indukcyjnej będącej w stanie zwarcia płynie prąd znamionowy. Tak zdefiniowane napięcie zwarciove oznacza się najczęściej przez U_z . Napięcie zwarcia typowych maszyn indukcyjnych zawiera się w granicach od 10 do 25% napięcia znamionowego.

Prądem zwarciovym nazywa się prąd płynący przez uzwojenie stojana maszyny indukcyjnej będącej w stanie zwarcia, jeśli do zacisków stojana przyłożone jest napięcie znamionowe. Tak zdefiniowany prąd oznacza się najczęściej przez I_z .

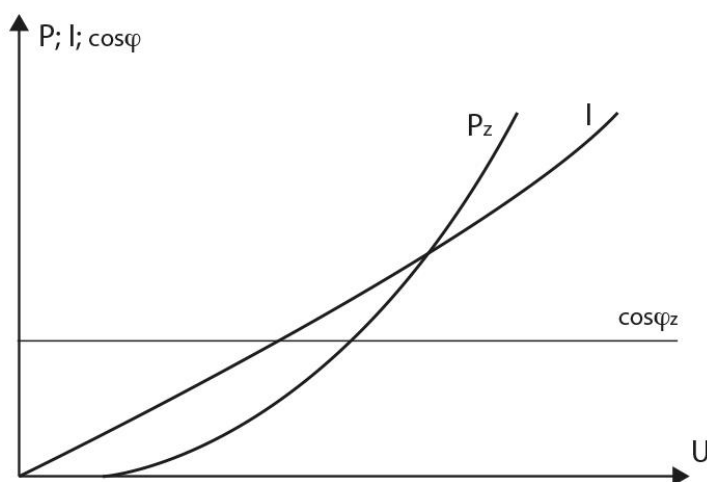


Rysunek 18. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego w stanie zwarcia: a) pełny, b) uproszczony

Źródło: E. Goźlińska, *Maszyny elektryczne*, WSiP, Warszawa 2007 r., s. 164

Na rysunku 18 przedstawiony został schemat zastępczy silnika indukcyjnego w stanie zwarcia. Na schemacie *b* pominięty został prąd jałowy I_0 uwagi na bardzo znikomą wartość, jaka jest pobierana w stanie zwarcia przy zasilaniu napięciem znamionowym.

Charakterystyki zwarcia maszyny indukcyjnej przedstawione zostały na rysunku 19.



Rysunek 19. Charakterystyki zwarcia maszyny indukcyjnej

Źródło: Opracowanie własne

Są to zależności prądu, mocy i współczynnika mocy od napięcia przy zwarcu.

6. Regulacja prędkości obrotowej w maszynach prądu zmiennego

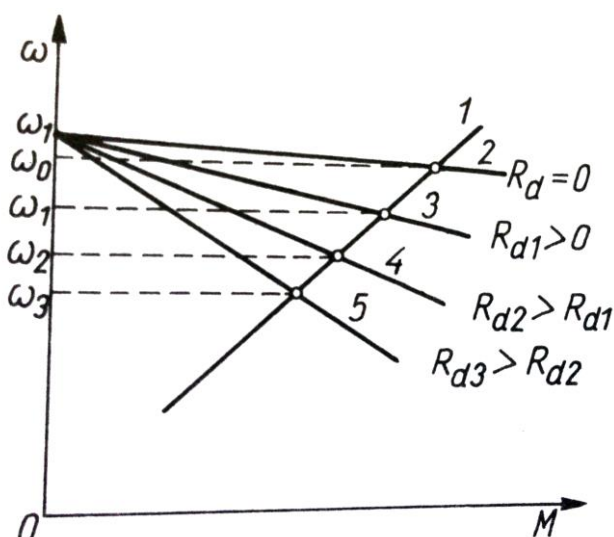
Prędkość kątową silnika indukcyjnego opisuje się wzorem:

$$\omega = \omega_s(1 - s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1 - s)$$

Wszystkie metody regulacji prędkości kątowej (rad/s^1) można sprowadzić do trzech parametrów:

- poślizgu s ,
- liczby par biegunów p ,
- częstotliwości napięcia zasilającego f_1 .

Zmianę poślizgu uzyskuje się przez zmianę rezystancji w obwodzie wirnika bądź przez wprowadzenie dodatkowego napięcia do obwodu wirnika silnika pierścieniowego – tzw. układ kaskadowy. Regulacja przez włączenie dodatkowej rezystancji w obwód wirnika przebiega podobnie jak dla silników obcowzbudnych prądu stałego. Jest ona prosta do realizacji, lecz wiąże się z dużymi stratami energii i małą sztywnością charakterystyk mechanicznych. Do regulacji prędkości kątowej wykorzystuje się rezystory stosowane do rozruchu. Należy jednak pamiętać, że rozrusznik jest przeznaczony tylko do pracy dorywczej, zaś rezystor regulacyjny pracuje przy obciążeniu ciągłym, dlatego też musi on być zaprojektowany na znacznie większą moc.

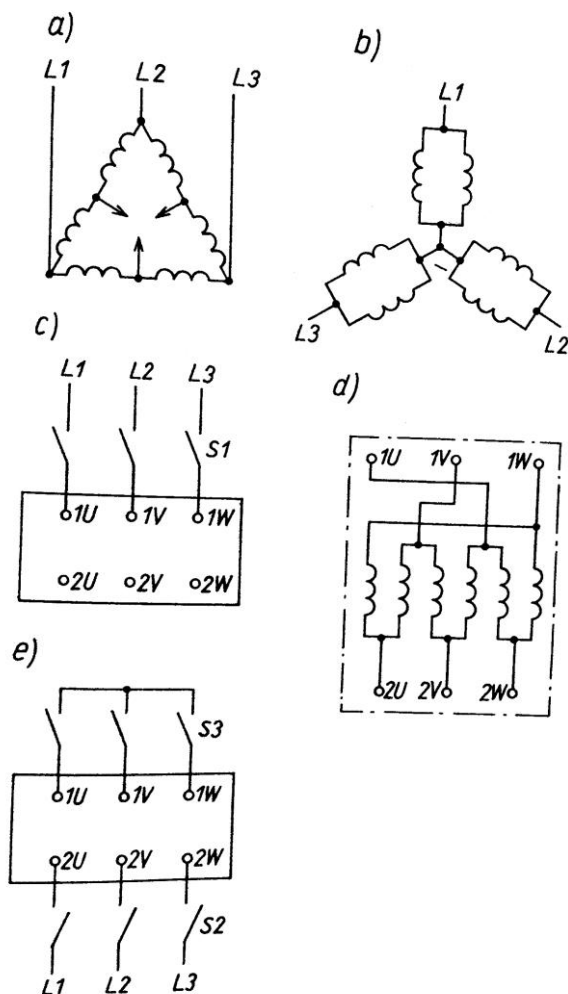


Rysunek 20. Regulacja prędkości kątowej za pomocą zmiany rezystancji dodatkowej w obwodzie silnika pierścieniowego; 1-krzywa obciążenia maszyny roboczej

Źródło: Praca zbiorowa, *Napęd elektryczny*, WSiP, Warszawa 1994 r., s. 104

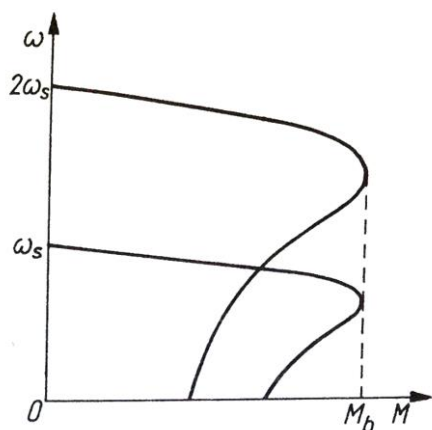
Regulacja prędkości przez zmianę liczby par biegunów jest regulacją ekonomiczną, gdzie wymagana liczba stopni prędkości nie przekracza 2-4. Do takiej regulacji stosuje się silniki wielobiegowe, których uzwojenie stojana musi być przełączalne na dwie liczby biegunów. Mogą też być dwa uzwojenia w stojanie, co umożliwia zwiększenie liczby stopni prędkości kątowej. Wirnik klatkowy nadaje się do każdej liczby par biegunów. Na rysunku 21 przedstawiono sposób podłączenia silnika dwubiegowego pracującego przy dwóch prędkościach znamionowych do sieci. Odpowiadające temu układowi charakterystyki mechaniczne przedstawiono na rysunku 22.

¹rad/s – czyt. radian na sekundę - jednostka prędkości obrotowej ω



Rysunek 21. Schemat podłączenia silnika dwubiegowego: a) schemat podłączenia uzwojeń w trójkąt, b) schemat podłączenia uzwojeń w podwójną gwiazdę, c) podłączenie silnika w trójkąt, d) schemat podłączenia uzwojeń silnika do tabliczki zaciskowej, e) podłączenie silnika w podwójną gwiazdę

Źródło: Praca zbiorowa, *Napęd elektryczny*, WSiP, Warszawa 1994 r., s. 105



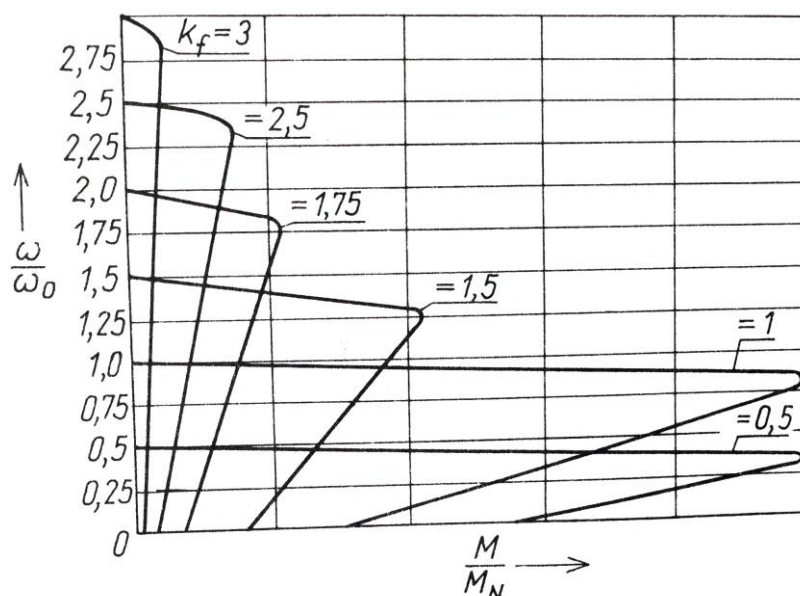
Rysunek 22. Charakterystyki mechaniczne przy regulacji prędkości kątowej silnika za pomocą zmiany liczby par biegunów

Źródło: Praca zbiorowa, *Napęd elektryczny*, WSiP, Warszawa 1994 r., s. 105

Regulacja prędkości przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego jest regulacją płynną w bardzo szerokim zakresie i obecnie dzięki rozwojowi techniki przekształtnikowej jest powszechnie stosowana. Jest to regulacja bardzo ekonomiczna. Zmiana częstotliwości napięcia zasilającego wywołuje zmianę momentu krytycznego M_b silnika zgodnie ze wzorem:

$$M_b \approx \frac{3U_1^2}{\omega} \frac{1}{2X_s}$$

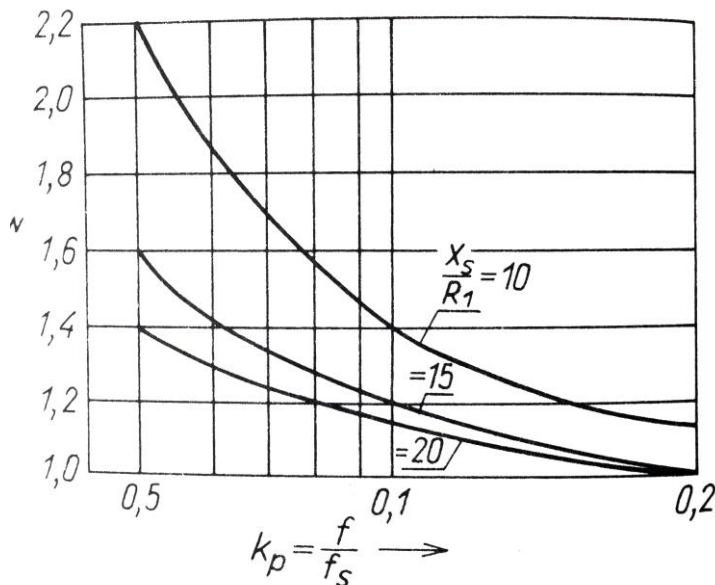
Utrzymanie stałej wartości momentu krytycznego M_b pociąga za sobą konieczność zmiany amplitudy napięcia zasilającego tak, aby został spełniony warunek $\frac{U}{f} = \text{const}$ w przedziale częstotliwości od wartości znamionowej w dół ($f < f_s$). Zapewnia to utrzymanie stałego strumienia w tym zakresie regulacji. Otrzymuje się charakterystyki o stałym momencie krytycznym M_b . Jest to I strefa regulacji.



Rysunek 23. Charakterystyki mechaniczne silnika asynchronicznego przy sterowaniu częstotliwościowym

Źródło: Praca zbiorowa, *Napęd elektryczny*, WSiP, Warszawa 1994 r., s. 106

Jedynie w zakresie małych częstotliwości należy zwiększyć napięcie, czyli pomnożyć wartość $\frac{U}{f}$ przez współczynnik k_w , który wyznacza się z wykresu przedstawionego na rysunku 24.



Rysunek 24. Współczynnik k_w zwiększający stosunek U/f przy regulacji prędkości kątowej silnika indukcyjnego dla niskich częstotliwości

Źródło: Praca zbiorowa, *Napęd elektryczny*, WSiP, Warszawa 1994 r., s. 106

Dla częstotliwości $f > f_s$ wartość napięcia zasilania nie może być podwyższona, ponieważ przekroczyłaby napięcie znamionowe na jaki zbudowany został silnik. W związku z tym napięcie dla częstotliwości $f > f_s$ utrzymuje się stałe $U = U_{sN}$. Jest to regulacja przy osłabieniu pola, zwana II strefą regulacji. Moment krytyczny M_{bf} rozwijany przez silnik w tej strefie wynika z zależności:

$$M_{bf} = \frac{M_b}{k_f^2}$$

gdzie: M_{bf} to moment krytyczny silnika przy częstotliwości $f > f_s$, $N \cdot m$ (jednostka miary)

M_b – moment krytyczny silnika w zakresie częstotliwości $f_s > f > 0$, $N \cdot m$

$k_f = f/f_s$

W I i II strefie regulacji prędkości poślizg krytyczny oblicza się ze wzoru:

$$s_{bf} = \frac{R'_r}{k_f X_s}$$

gdzie: s_{bf} – poślizg krytyczny przy częstotliwości f

$k_f = f/f_s$; R'_r – rezystancja obwodu wirnika silnika Ω

X_s – sumaryczna reaktancja silnika określona dla częstotliwości f_s , Ω (jednostka miary).

Bibliografia:

1. Maszyny elektryczne, E. Goźlińska, WSIP, 2013r.
2. Zarys maszyn elektrycznych, W. Latek, WNT, 1978r.
3. Maszyny i napęd elektryczny, Praca zbiorowa, WSiP, 1978r.
4. Poradnik inżyniera elektryka, Praca zbiorowa, WNT, 1995r.
5. Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach, W. Latek, WNT, 1994r.
6. Aparaty i urządzenia elektryczne, W. Kotlarski, J. Grad, WSIP, 2012r.