Moduł 4

Wpływ parametrów elementów i podzespołów na pracę maszyn elektrycznych

1. **Parametry elementów i podzespołów maszyn elektrycznych**
2. **Regulacja prędkości obrotowej silników prądu stałego**
3. **Charakterystyka pracy silnika indukcyjnego**

1. Parametry elementów i podzespołów maszyn elektrycznych

Podstawowymi parametrami elementów i podzespołów maszyn elektrycznych jest:

- prędkość obrotowa
- napięcia zasilania
- częstotliwość
- uzwojenia
- przekładnia transformatora

1.1. Wpływ parametrów elementów i podzespołów na pracę maszyn elektrycznych

Przekładnia transformatora

Powszechnie stosowanym sposobem regulacji napięcia w sieciach elektroenergetycznych jest zmiana przekładni transformatorów. Każdy transformator energetyczny wyposażony jest w kilka zaczepów, na przykład „+5%", czy „–10%". Zaczepy te odpowiadają procentowym zmianom liczby zwojów w stosunku do przekładni znamionowej transformatora. Ze względu na dużą wartość prądu zaczepy umieszczone są zwykle po stronie wysokiego napięcia.

Znając liczbę zwojów oraz układ połączeń transformatora, można obliczać dowolne wartości napięć w transformatorach.

Na przykład w układzie połączeń Yd przekładnia transformatora wynosi:

$$\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}.$$

Korzystając z tej zależności, można obliczyć na przykład napięcie $U_{1(+5\%)}$ przy położeniu przełącznika zaczepów w pozycji „+5%":

$U_{1(+5\%)} = U_1 + 0{,}05 \cdot U_1 = 1{,}05 \cdot U_1$, a następnie

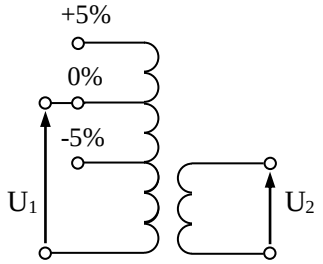
$U_2 = U_{1(+5\%)}\, N_2 : \sqrt{3}\; N_1$.

Rozróżnia się dwa rodzaje regulacji napięcia w transformatorach:

- regulację w stanie beznapięciowym,
- regulację pod obciążeniem.

Transformatory regulowane – w stanie beznapięciowym – mają przełącznik, którym manipuluje się ręcznie, po odłączeniu transformatora od sieci zasilającej (rys. 4.12).

Rys. 4.1. Zmiana przekładni transformatora



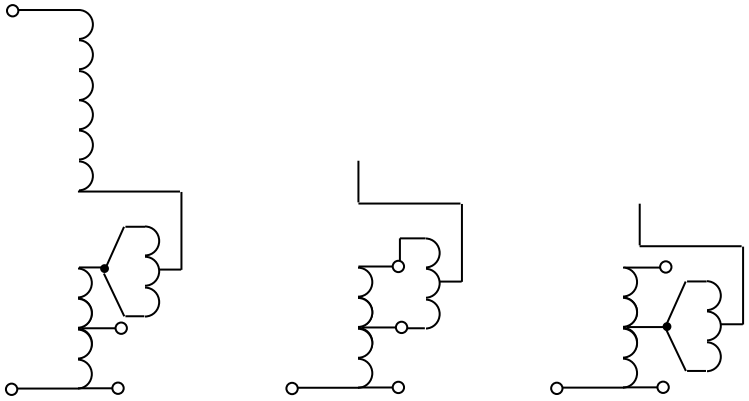
Źródło: Kacejko L., *Pracownia elektryczna. Tom II. Maszyny, urządzenia i napęd*, MCNEMT, Radom, 1993

Zaczep zerowy „0” odpowiada wartości znamionowej napięcia. Na zaczepie +5% liczba zwojów jest większa o 5% od liczby zwojów na zaczepie zerowym. Na zaczepie –5% liczba zwojów jest o 5% mniejsza, niż na zaczepie zerowym.

Wadą regulacji w stanie beznapięciowym jest konieczność odłączania transformatora od sieci na czas przełączania i dlatego metodę taką stosuje się tylko sezonowo albo w razie konieczności zmiany konfiguracji lub obciążenia szczytowego sieci.

Transformatory z regulacją pod obciążeniem są stosowane na wyższe napięcia, w dużych stacjach węzłowych. Zmiana zaczepu jest automatyczna, zależnie od zmniejszania się lub zwiększania napięcia w sieci. Zmiana napięcia jest płynna, a transformator nie jest wyłączony na czas przełączania spod napięcia (kolejne etapy przełączania zaczepów pokazuje rys. 4.2.

Rys. 4.2. Kolejne etapy przełączania zaczepów pod obciążeniem



Źródło: Kacejko L., *Pracownia elektryczna. Tom II. Maszyny, urządzenia i napęd*, MCNEMT, Radom, 1993

Wpływ uzwojenia na pracę maszyny elektrycznej

W maszynach prądu stałego można wyróżnić (ze względu na pełnione funkcje) następujące uzwojenia:

- uzwojenia twornika,
- uzwojenie wzbudzenia,
- uzwojenie biegunów pomocniczych,
- uzwojenie kompensacyjne.

Uzwojenie twornika – jest umieszczone w żłobkach na obwodzie wirnika. Uzwojenie kompensacyjne – jest umieszczone w żłobkach wzdłuż nieruchomych nabiegunników. Jest połączone w szereg z uzwojeniem twornika, co sprawia, że prąd płynący w nim jest proporcjonalny do prądu obciążenia maszyny. Może być podzielone na dwie sekcje dołączone po obu stronach uzwojenia twornika. Nie w każdej maszynie to uzwojenie występuje.

Uzwojenie wzbudzenia biegunów głównych – jego zadaniem jest wytworzenie głównego pola magnetycznego w maszynie. Cewki tego uzwojenia są nawijane na szablonach odpowiadających kształtowi biegunów, odpowiednio zaizolowane i nasadzone na pieńki tych biegunów (rys. 4.3).

Uzwojenie biegunów pomocniczych (gdy maszyna je posiada) – ma za zadanie poprawić warunki pracy maszyny. Cewki tego uzwojenia również są nawijane na szablo-

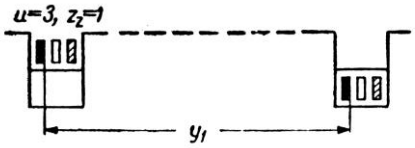
nach odpowiadających kształtowi biegunów, odpowiednio zaizolowane i nasadzone na bieguny komutacyjne.

Od sposobu wykonania uzwojenia twornika zależy wartość napięcia wytwarzanego na zaciskach tego uzwojenia w prądnicy i wartość momentu napędowego wytwarzanego w silniku.

Uzwojenie twornika umieszczone w żłobkach na zewnętrznej powierzchni twornika, jako nieprzerwany obwód, nazywa się uzwojeniem bębnowym. Uzwojenie to składa się z określonej liczby zwojów. Zwój to boki czynne umieszczone w żłobkach twornika oraz połączenia czołowe. Zwoje połączone szeregowo i umieszczone w tej samej parze żłobków tworzą zezwój (cewkę). W literaturze, dotyczącej uzwojeń tworników, zwojność zezwoju oznaczana jest literami z_z lub N_c. Uzwojenia tworników wykonuje się przeważnie jako dwuwarstwowe. Oznacza to takie uformowanie zezwoju, aby po włożeniu go do żłobków jeden jego bok znajdował się w górnej warstwie żłobka, a drugi bok w dolnej warstwie.

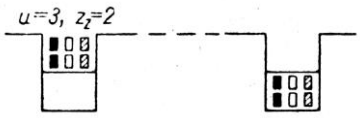
Na rysunku 4.4 przedstawiono szkic uzwojenia dwuwarstwowego z zezwojami jednozwojnymi, a na rysunku 4.5 szkic uzwojenia z zezwojami dwuzwojnymi (zezwoje wielozwojne stosuje się tylko w małych maszynach, przy małej średnicy komutatora).

Rys. 4.3. Uzwojenie o zezwojach jednozwojnych



Źródło: Kacejko L., *Pracownia elektryczna. Tom II. Maszyny, urządzenia i napęd*, MCNEMT, Radom, 1993.

Rys. 4.4. Uzwojenie z zezwojami dwuzwojnymi (z_z=2)



Źródło: Praca zbiorowa, *Poradnik montera elektryka*, WNT, Warszawa, 1997

Zezwoje są połączone ze sobą – poprzez wycinki komutatora – tak, aby tworzyły obwód zamknięty. Osiąga się to w ten sposób, że każdy zezwój jest połączony z dwoma wycinkami komutatora, a do wycinka komutatora przyłączone są końce dwóch różnych zezwojów.

Definicje parametrów konstrukcyjnych twornika oraz ich oznaczenia literowe są następujące:

p – liczba par biegunów maszyny,

Q – liczba żłobków twornika,

$K = z$ – liczba wycinków (działek) komutatora,

a – liczba par gałęzi uzwojenia połączonych równolegle,

$z = Qu$ – liczba boków zezwojów (cewek) na tworniku,

z_z (lub N_c) – zwojność zezwoju (liczba zwojów w zezwoju – cewce),

N – liczba zwojów połączonych szeregowo,

u – liczba boków zezwojów (prętów) w jednej warstwie żłobka,

$\tau_p = \dfrac{Q}{2p}$ – podziałka biegunowa określona liczbą żłobków,

$\tau = \dfrac{\pi D}{2p}$ podziałka biegunowa wyrażona w jednostkach długości obwodu twornika (D – średnica obwodu twornika),

Y_c – poskok komutatorowy,

Y_Q – poskok żłobkowy – odległość między bokami tej samej cewki mierzona liczbą żłobków, dzielących te boki,

Y_1 – poskok uzwojenia (poskok częściowy pierwszy) – odległość między bokami tej samej cewki,

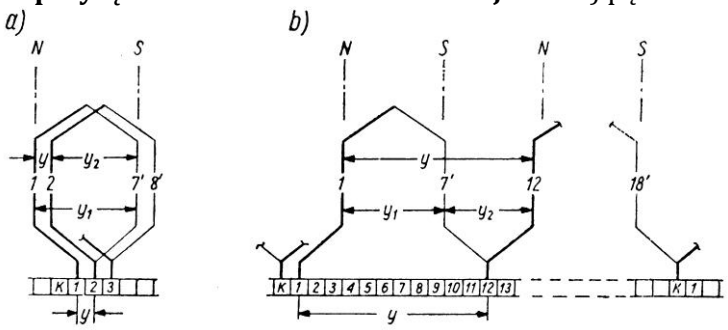
Y_2 – poskok częściowy drugi – odległość między bokami cewek połączonych na tym samym wycinku komutatora,

$Y = Y_1 \pm Y_2$ – poskok całkowity (wypadkowy) – odległość między bokami zezwojów wiodącymi prąd w tym samym kierunku (pomiędzy dwoma bokami leżącymi w górnej warstwie żłobka) dwóch sąsiednich zezwojów połączonych szeregowo.

Zależnie od kształtu połączeń czołowych (od strony komutatora), i sposobu przyłączenia zezwojów do komutatora, rozróżnia się dwa rodzaje uzwojeń twornika (rys. 4.5):

- uzwojenia pętlicowe (rysunek 4.5a) – stosowane w maszynach o mniejszych mocach,
- uzwojenia faliste (rysunek 4.5b) – stosowane w maszynach o większych mocach i dużych napięciach wirnika.

Rys. 4.5. Sposób przyłączenia do komutatora uzwojenia: a) pętlicowego, b) falistego



Źródło: Praca zbiorowa, *Poradnik montera elektryka*, WNT, Warszawa, 1997

Rozpiętość cewki (zezwoju), czyli odległość między jej bokiem umieszczonym w dwóch różnych żłobkach, powinna być tak dobrana, aby w cewce indukowała się możliwie największa siła elektromotoryczna. Osiągamy to wtedy, gdy cewka będzie obejmowała – w pewnej chwili – podczas wirowania możliwie największy strumień. Boki cewki powinny być umieszczone w jednakowym położeniu w stosunku do sąsiednich biegunów o przeciwnych znakach. Rozpiętość cewki powinna więc być równa podziałce biegunowej lub nieco mniejsza od podziałki biegunowej. Rozpiętość cewki jest określana jako poskok żłobkowy Y_Q.

Cewkę nazywamy średnicową, jeżeli $Y_Q = \tau$.

Cewkę nazywamy cięciwową, jeżeli $Y_Q \langle \tau$.

Szczotki, których jedną z ról jest zapewnienie ciągłości przepływu prądu w obwodzie złożonym ze źródła energii elektrycznej i odbiornika, dzielą uzwojenie twornika na

gałęzie równoległe. Warunkiem poprawnej pracy maszyny jest brak prądów wyrównawczych między gałęziami równoległymi. Prądy wyrównawcze nie płyną, jeżeli w każdej chwili napięcia indukowane w poszczególnych gałęziach równoległych są sobie równe. Aby to osiągnąć, uzwojenie musi spełniać następujące warunki (warunki symetrii):

W każdej gałęzi równoległej musi być taka sama liczba boków. Jest to spełnione, gdy

$$\frac{K}{a} = \text{liczbie całkowitej.}$$

Każdemu bokowi jednej gałęzi musi odpowiadać bok każdej innej gałęzi, o takim samym napięciu, które jest w nim indukowane przy takiej samej indukcji. Jest to spełnione,

$$\text{gdy } \frac{Q}{a} = \text{liczbie całkowitej.}$$

Odpowiednie boki wszystkich gałęzi równoległych są umieszczone w jednakowych polach. Jest to spełnione, gdy $\frac{2p}{a} =$ liczbie całkowitej.

Poza wymienionymi wyżej warunkami uzwojenie twornika musi być tak skonstruowane, aby wszystkie zezwoje miały jednakową zwojność, każdy zezwój miał taki sam poskok oraz w każdym żłobku jest umieszczona taka sama liczba boków. Ponadto indukcja magnetyczna powinna mieć taki sam rozkład pod każdym z biegunów.

Punktem wyjścia przy projektowaniu maszyn są pożądane wielkości znamionowe: moc, napięcie, prędkość obrotowa. Na ich podstawie określa się wymiary maszyny i liczbę par biegunów. Można w przybliżeniu określić wartość siły elektromotorycznej i strumienia magnetycznego (na podstawie wymiarów i przyjętej indukcji) oraz liczbę biegunów. Określenie wymienionych parametrów pozwala wyznaczyć przybliżoną wartość stosunku liczby zwojów połączonych w szereg do liczby par gałęzi równoległych, czyli N/a. Przy doborze liczby par gałęzi równoległych należy mieć na uwadze, że:

- prąd płynący w jednej gałęzi uzwojenia twornika $i_a = \frac{I_a}{2a}$ nie powinien przekraczać wartości 350A. Zatem przy dużym prądzie twornika należy projektować uzwojenie pętlicowe,
- średnie napięcie pomiędzy wycinkami komutatora $u_{śr} = \frac{2pU}{K}$ powinno być mniejsze od 20V – przy większych napięciach wskazane jest uzwojenie faliste.

Uzwojenia pętlicowe i faliste mogą być wykonywane jako proste i wielokrotne.

Uzwojenie pętlicowe nazywa się prostym, gdy dwa zezwoje następujące po sobie są położone tuż obok siebie i nie są oddzielone zezwojami należącymi do innego uzwojenia, a więc $Y_c = 1$. W tym uzwojeniu liczba par gałęzi równoległych jest równa liczbie par biegunów, czyli $2a = 2p$. Wadą tego uzwojenia jest możliwość wystąpienia asymetrii na skutek mogącej wystąpić nierównomierności pól magnetycznych pod biegunami. Szczotki są nieco szersze niż wycinek komutatora.

Dla uzwojenia pętlicowego prostego, mając dane Q, $2p$, u, $Y_c = 1, 2a = 2p$, obli-

czamy:

liczbę boków w całym uzwojeniu $z = Qu$

poskok całkowity $Y = 2Y_c = 2$

liczbę wycinków komutatora $K = \frac{z}{2}$

poskok żłobkowy $Y_Q \le \frac{Q}{2p}$ (należy przyjąć liczbę całkowitą)

poskok częściowy pierwszy $Y_1 = uY_Q + 1$

poskok częściowy drugi $Y_2 = Y_1 - Y$

Po wykonaniu obliczeń należy sprawdzić symetrię uzwojenia.

Uzwojenie pętlicowe można wykonać jako wielokrotne, np. dwukrotne. Wykonuje się je wówczas, gdy zachodzi (ze względu na znaczną wartość prądu) konieczność zwiększenia liczby par gałęzi równoległych, a ze względów ekonomicznych odstępuje się od zwiększania liczby par biegunów. Dla uzwojenia pętlicowego dwukrotnego: $2a = 4p$, $Y_c = 2$. Szerokość szczotki powinna być większa niż szerokość dwóch wycinków komutatora.

Dla uzwojenia pętlicowego dwukrotnego, mając dane $Q,\ 2p,\ u,\ Y_c = 2, 2a = 4p$, obliczamy:

liczbę boków w całym uzwojeniu $z = Qu$

poskok całkowity $Y = 2Y_c = 4$

liczbę wycinków komutatora $K = \frac{z}{2}$

poskok żłobkowy $Y_Q \le \frac{Q}{2p}$ (należy przyjąć liczbę całkowitą)

poskok częściowy pierwszy $Y_1 = uY_2 + 1$

poskok częściowy drugi $Y_2 = Y_1 - Y$

Po wykonaniu obliczeń należy sprawdzić symetrię uzwojenia na podstawie podanych wcześniej wzorów.

Uzwojenie faliste proste ma zawsze dwie gałęzie równoległe, niezależnie od liczby par biegunów. Zezwoje są łączone szeregowo.

Dla uzwojenia falistego prostego, mając dane $Q,\ 2p,\ u,\ 2a = 2$ obliczamy:

liczbę boków w całym uzwojeniu $z = Qu$

poskok komutatorowy $Y_c = \frac{K \pm 1}{p}$

poskok całkowity $Y = 2Y_c$

liczbę wycinków komutatora $K = \frac{z}{2}$

poskok częściowy pierwszy $Y_1 = uY_2 + 1$

poskok częściowy drugi $Y_2 = Y - Y_1$

Po wykonaniu obliczeń należy sprawdzić symetrię uzwojenia, analogicznie jak dla uzwojenia pętlicowego. Ponadto warunkiem wykonalności uzwojenia falistego jest, aby

poskok komutatorowy był liczbą całkowitą.

Dla uzwojenia falistego wielokrotnego cechą charakterystyczną jest, że liczba gałęzi równoległych nie zależy od liczby biegunów i może zawierać się w granicach: $2\langle 2a \le 2p$. Uzwojenie to posiada cechy uzwojenia falistego, ale różni się od niego liczbą gałęzi. Wykonane jest z uzwojeń falistych, ale ich liczba jest taka, jaka wymagana jest liczba par gałęzi równoległych (każde uzwojenie faliste proste ma 2 gałęzie równoległe). Obliczenia dla uzwojenia falistego wielokrotnego wykonuje się jak dla falistego prostego.

Schematy rozwinięte i kołowe omówionych typów uzwojeń są znakomicie przedstawione w literaturze.

Wyprowadzenia uzwojeń w maszynach prądu stałego zgodnie z normą oznacza się następująco:

A1 – A2 uzwojenie twornika
B1 – B2 uzwojenie biegunów komutacyjnych
C1 – C2 uzwojenie kompensacyjne
D1 – D2 uzwojenie wzbudzenia szeregowe
E1 – E2 uzwojenie wzbudzenia bocznikowe
F1 – F2 uzwojenie wzbudzenia obce
H1– H2 uzwojenie pomocnicze w osi podłużnej
I1 – I2 uzwojenie pomocnicze w osi poprzecznej

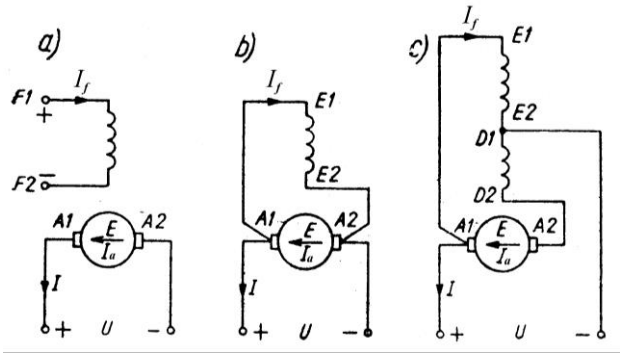
Po oznaczeniach na tabliczce zaciskowej można się zorientować jak skojarzono uzwojenie twornika z uzwojeniem wzbudzenia.

Przy wykonywaniu maszyn przyjęto zasadę: początek cewki jest oznaczony indeksem 1, a koniec indeksem 2; jeżeli w silniku prąd przepływa we wszystkich uzwojeniach od 1 do 2 (np. od A1 do A2, od E1 do E2), to silnik wiruje w prawo, patrząc od strony wyprowadzonego końca wału.

W prądnicy napędzanej w prawo (patrząc na nią od strony wału), w prętach uzwojenia, indukowane jest napięcie o takim zwrocie, że zacisk prądnicy (oznaczony symbolem A1) będzie miał wyższy potencjał niż zacisk oznaczony symbolem A2. Zaciskom tym możemy umownie przypisać znaki „+”i „ - ”.

Ze względu na sposób łączenia uzwojeń twornika z uzwojeniem wzbudzenia (określony przez trzecią literę w oznaczeniu typu maszyny) istnieje kilka schematów połączeń dla maszyn prądu stałego.

Rys. 4.6. Sposoby łączenia uzwojeń prądnic prądu stałego: a) obcowzbudnej, b) bocznikowej, c) szeregowo-bocznikowej



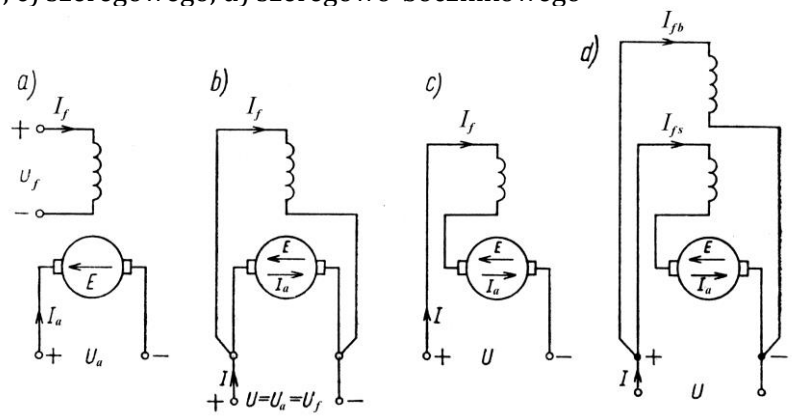
Źródło: PN-89/E-06702 – Maszyny elektryczne wirujące. Straty i sprawność.

Od schematów połączeń uzwojeń przyjęto nazwy maszyn.

Prądnice (rys. 4.6) wykonuje się jako:

- obcowzbudne,
- bocznikowe,
- szeregowo-bocznikowe.

Rys. 4.7. Sposoby łączenia uzwojeń silników prądu stałego: a) obcowzbudnego, b) bocznikowego, c) szeregowego, d) szeregowo-bocznikowego



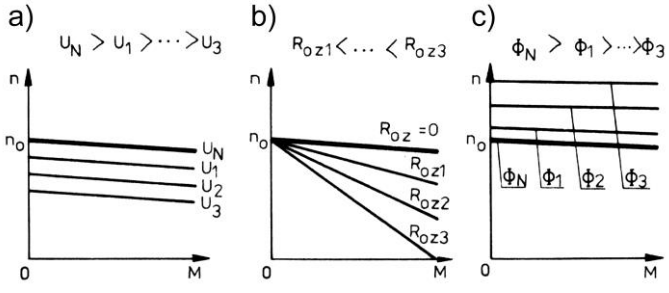
Źródło: PN-89/E-06702 – Maszyny elektryczne wirujące. Straty i sprawność

2. Regulacja prędkości obrotowej silników prądu stałego

W silnikach bocznikowych i obcowzbudnych prędkość można regulować poprzez:

- zmianę napięcia zasilającego – rys. 4.8a.
- zmianę napięcia twornika (wtrącanie rezystorów dodatkowych w obwód twornika) rys. 4.8.
- zmianę strumienia rys. 4.8c.

Rys. 4.8. Rodziny charakterystyk mechanicznych silnika bocznikowego przy: a) zmniejszaniu napięcia twornika, b) zwiększaniu rezystancji zewnętrznej R_{0Z} w obwodzie twornika, c) zmniejszaniu strumienia magnetycznego głównego



Źródło: własne

Sposób pierwszy jest stosowany głównie w silnikach obcowzbudnych, bowiem zmiana napięcia zasilania twornika nie ma wpływu na zmianę strumienia. Jest to sposób na zmniejszanie prędkości silnika w szerokim zakresie. W silnikach bocznikowych zmniejszania napięcia zasilania na ogół nie stosuje się, ponieważ jednocześnie następuje zmniejszanie napięcia zasilania obwodu wzbudzenia i zmniejszenie strumienia (maleje prąd wzbudzenia), co sprawia, że zmiany prędkości są niewielkie.

Sposób drugi polega na takim włączeniu rezystorów w obwód twornika, aby napięcie na uzwojenie wzbudzenia nie było zmniejszone. Pozwala to na zmniejszanie prędko-

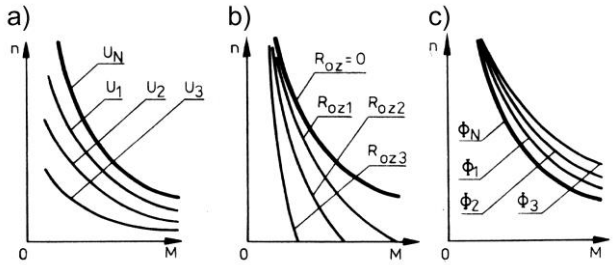
ści poniżej znamionowej. Jest to metoda nieekonomiczna, ponieważ wiąże się ze stratą mocy na rezystorach dodatkowych. Jest stosowana na ogół w silnikach o małej mocy. Regulacja prędkości, przez zmianę napięcia zasilania twornika, może być realizowana za pomocą układu mostka tyrystorowego.

Sposób trzeci pozwala na zwiększanie prędkości. Stosowany w silnikach obcowzbudnych i bocznikowych – w obwód uzwojenia wzbudzenia włączane są rezystory zmniejszające prąd wzbudzenia (strumień), co powoduje wzrost prędkości obrotowej silnika. Sposób jest ekonomiczny, ponieważ straty mocy w rezystorach regulacyjnych nie są duże (prąd w obwodzie wzbudzenia maszyny ma znacznie mniejszą wartość niż prąd twornika). Przy regulacji prędkości silnika tą metodą należy zwrócić uwagę na właściwy dobór rezystorów regulacyjnych (ich jakość i wartość). Ponieważ twornik jest zasilany napięciem znamionowym, to przy dużej wartości rezystancji regulacyjnych w obwodzie wzbudzenia, prędkość maszyny wzrośnie nadmiernie, co może doprowadzić do jej uszkodzenia mechanicznego. Ponadto, przy małym prądzie wzbudzenia, wartość siły elektromotorycznej E jest mała, prąd w obwodzie twornika rośnie do wartości, przy której spadki napięcia na rezystancji twornika kompensują napięcie sieci. Maszyna może zostać uszkodzona cieplnie. Przerwa w obwodzie wzbudzenia spowodowałaby przepływ bardzo dużego prądu w obwodzie twornika oraz możliwość rozbiegania się maszyny (strumień maleje do wartości szczątkowej). W silnikach obcowzbudnych regulację prędkości za pomocą zmiany strumienia można uzyskać poprzez zmianę napięcia zasilania obwodu wzbudzenia. Wymaga to regulowanego źródła napięcia.

W silnikach szeregowych prędkość można regulować poprzez:

- zmianę napięcia zasilającego twornik – rys. 4.9a.
- włączanie rezystorów dodatkowych w obwód twornika – rys. 4.9b.
- zmianę strumienia – rys. 4.9c.

Rys. 4.9. Rodziny charakterystyk mechanicznych silnika szeregowego przy: a) zmniejszaniu napięcia twornika, b) zwiększaniu rezystancji zewnętrznej w obwodzie twornika, c) zmniejszaniu strumienia magnetycznego głównego



Źródło: PN-91/E-06700 – Maszyny elektryczne wirujące. Terminologia

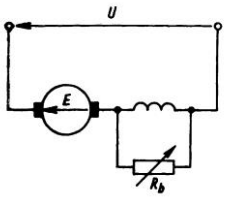
W silnikach szeregowych zmianę napięcia zasilającego realizuje się poprzez równoległe i szeregowe łączenie silników. Sposób ten jest najczęściej stosowany w trakcji.

Sposób włączania rezystorów w obwód twornika – praktycznie nie jest stosowany. Wiąże się ze stratami mocy, a ponadto w silnikach szeregowych zmniejszenie prądu twornika powoduje jednocześnie zmniejszenie strumienia – prędkość zmienia się niewiele.

Sposób trzeci pozwala zwiększać prędkość. Zwiększenie prędkości uzyskuje się poprzez zmniejszenie prądu w uzwojeniu wzbudzenia. Aby przy szeregowym połączeniu uzwojeń twornika i wzbudzenia nie zmniejszać prądu twornika, rezystory regulacyjne

dołączane są do uzwojenia wzbudzenia równolegle (rys. 4.10). Ta metoda regulacji jest związana ze stratami mocy, stąd jest rzadko stosowana.

Rys. 4.10. Regulacja prędkości obrotowej silnika szeregowego przez zmniejszanie strumienia



Źródło: PN-92/E-01200 – Symbole graficzne stosowane w schematach

Zmianę kierunku wirowania silnika prądu stałego można uzyskać, dokonując zmiany kierunku prądu w jednym z uzwojeń, np. twornika.

3. Charakterystyka pracy silnika indukcyjnego

Zespół wielkości charakteryzujących pracę, do której w określonych warunkach silnik jest przystosowany, podawany jest przez wytwórcę na tabliczce znamionowej.

- Napięcie znamionowe U_N – wartość skuteczna napięcia przemiennego dla silników trójfazowych – napięcia międzyprzewodowego, określona w woltach (V) lub kilowoltach (kV).
- Prąd znamionowy I_N – wartość skuteczna prądu przemiennego dopływającego z sieci przy obciążeniu silnika mocą znamionową zasilanego napięciem znamionowym, w stanie nagrzanym, podawany jest w amperach (A) lub kiloamperach (kA).
- Moc znamionowa P_N – moc mechaniczna, którą silnik może oddawać do maszyny roboczej, bez przekroczenia dopuszczalnych przyrostów temperatury dla określonego rodzaju pracy.

Zależność między mocą mechaniczną P oddawaną przez silnik a mocą elektryczną dostarczoną do silnika P_{in}

$$P = \eta P_{in} \text{ dla warunków znamionowych } P_N = \eta_N P_{inN}$$

Moc elektryczna dostarczona do silnika:

trójfazowego: $P_{inN} = \sqrt{3}\, U_N I_N \cos\varphi_N$

jednofazowego: $P_{inN} = U_N I_N \cos\varphi_N$

- Znamionowa prędkość obrotowa n_N [obr./min] (lub ω_N [rad/s]) – prędkość, z jaką wiruje wirnik silnika obciążonego mocą znamionową przy napięciu znamionowym.
- Moment znamionowy M_N – określony w niutonometrach (Nm):

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N} = 9{,}55\frac{P_N}{n_N}$$

- Poślizg znamionowy s_N – poślizg w znamionowych warunkach pracy.
- Sprawność znamionowa η_N – sprawność silnika pracującego w warunkach znamionowych (U_N, I_N, P_N).
- Częstotliwość znamionowa f_N.

- Znamionowy współczynnik mocy $\cos\varphi_N$ – wartość występująca przy obciążeniu znamionowym w stanie nagrzanym.

Bilans mocy i sprawność

Moc czynna pobierana jest z sieci zasilającej P_{in}:

$$P_{in} = m_1 U_{1f} I_{1f} \cos\varphi_1$$

Dla silnika trójfazowego: $P_{in} = \sqrt{3}\, UI \cos\varphi_1$

Straty mocy czynnej w uzwojeniu stojana: ΔP_{Cu1}

$$\Delta P_{Cu1} = m_1 R_1 I_1^2$$

Straty mocy czynnej w rdzeniu stojana ΔP_{Fe1}

$$\Delta P_{Fe1} = m_1 E_1 I_{Fe}$$

gdzie: m_1 – liczba faz uzwojenia stojana, I_{Fe} – składowa czynna prądu stanu jałowego.

Moc czynna przekazana ze stojana do wirnika za pośrednictwem pola wirującego (moc pola wirującego):

$$P_\psi = P_{in} - \Delta P_{Cu1} - \Delta P_{Fe1} = m_2 \cdot \frac{R_2 + R_D}{s} I_2^2$$

lub

$$P_\psi = m_2 E_2 I_2 \cos\psi_2$$

gdzie: m_2 – liczba faz uzwojenia wirnika, R_2 – rezystancja uzwojenia wirnika, R_D – rezystancja dodatkowa podłączona do pierścieni ślizgowych silnika pierścieniowego, ψ_2 –kąt przesunięcia fazowego między siłą elektromotoryczną wirnika E_2 i prądem wirnika I_2.

Straty mocy w uzwojeniu wirnika $\Delta P_{Cu2} = m_2 R_2 I_2^2$

Moc czynna wydzielona na rezystancji dodatkowej R_D – ΔP_D

$$\Delta P_D = m_2 R_D I_2^2$$

Moc mechaniczna $P_m = P_\psi - (\Delta P_{Cu2} + \Delta P_D) = m_2[(R_2 + R_D)\frac{1-s}{s}]I_2^2$

Moc użyteczna na wale silnika $P = P_m - \Delta P_m$

Suma strat mocy $\Sigma\Delta P = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Fe1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_D + \Delta P_m$

Zależność między mocą i momentem elektromagnetycznym:

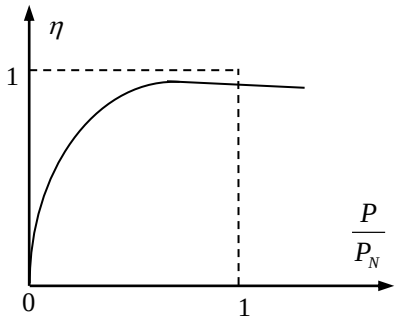
$$P_m = \omega M = 2\pi \frac{n}{60} M \qquad 1[n]=1\text{obr/min}$$

Sprawność silnika zdefiniowana jest jako stosunek mocy użytecznej na wale silnika do mocy pobranej z sieci:

$$\eta = \frac{P}{P_{in}} = \frac{P_{in} - \sum \Delta P}{P_{in}}$$

Sprawność silnika nie jest wielkością stałą, lecz zmienia się wraz ze zmianą obciążenia silnika (rys. 4.11) i największą wartość osiąga dla takiego obciążenia, przy którym straty zmienne (obciążeniowe) ΔP_{obc} są równe stratom stałym (jałowym) ΔP_0.

Rys. 4.11. Wykres sprawności silnika indukcyjnego



Źródło: materiał własny

Moment elektromagnetyczny maszyny indukcyjnej

Momentem obrotowym silnika jest moment elektromagnetyczny, który jest określony stosunkiem mocy pola wirującego do prędkości pola wirującego:

$$M = \frac{P_\Psi}{\omega_1} = \frac{m \cdot R_2}{s} I_2^2$$

Po sprowadzeniu parametrów obwodu wirnika na stronę uzwojenia stojana (parametry sprowadzone oznaczone znakiem „prim" np.: $R_2^{'}, X_2^{'}$) i przyjęciu uproszczeń, otrzymujemy wzór na moment elektromagnetyczny:

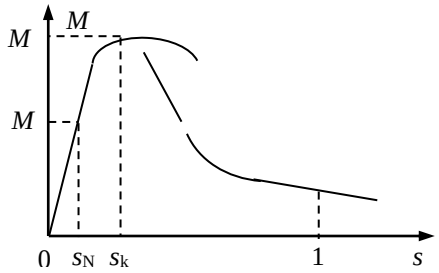
$$M = \frac{m \cdot R_2^{'} \cdot U_1^2}{\omega_1 \left[s\left(X_1 + X_2^{'}\right)^2 + \frac{R_2^{'2}}{s} \right]}$$

Wartość momentu elektromagnetycznego zależy od napięcia zasilającego, rezystancji obwodu wirnika oraz od częstotliwości napięcia zasilającego ($\omega_1 = 2\pi f_1$ i $X = 2\pi f L_r$).

Z powyższej zależności wynika, że funkcja opisująca zależność momentu elektromagnetycznego od poślizgu $M = f(s)$ ma dwa ekstrema. Wykres funkcji $M = f(s)$ dla silnika, nazywany często charakterystyką mechaniczną silnika, przedstawia rys. 4.12. Maksymalną wartość momentu nazywa się momentem krytycznym M_k lub momentem utyku M_u, a opisuje go zależność:

$$M_k = \pm \frac{m \cdot U_1^2}{2\omega_1 \left(X_1 + X_2^{'}\right)}$$

Rys. 4.12. Wykres zależności *M* = f(*s*) dla silnika indukcyjnego



Źródło: własne

Na wartość momentu krytycznego ma wpływ napięcie zasilające, natomiast nie ma wpływu rezystancja obwodu wirnika (rys. 4.8).

Wartość poślizgu, przy którym silnik wytwarza największy moment elektromagnetyczny, nazywa się poślizgiem krytycznym s_k lub utyku s_u.

$$s_k = \pm \frac{R_2^{'}}{X_1 + X_2^{'}}$$

Wartość poślizgu krytycznego zależy wprost proporcjonalnie od rezystancji obwodu wirnika, ale nie zależy od napięcia zasilającego, dzięki czemu przy odpowiednim doborze rezystancji włączonej do obwodu wirnika (silniki pierścieniowe) możemy uzyskać największy moment elektromagnetyczny dla prędkości wirnika równej zeru:

$$n = 0 \rightarrow s = 1 \text{ i } R_2^{'} + R_d^{'} = \left(X_1 + X_2^{'}\right)$$

Jest to cenna zaleta silników indukcyjnych pierścieniowych pozwalająca uruchamiać silniki pierścieniowe przy obciążeniu znamionowym.

Wzór Klossa określający zależność między momentem elektromagnetycznym M przy poślizgu s, a momentem krytycznym M_k przy poślizgu krytycznym s_k:

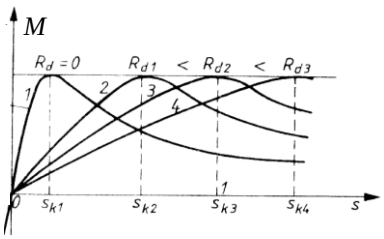
$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

Stosunek momentu maksymalnego do momentu znamionowego nazywa się przeciążalnością momentem i oznacza u lub p_M

$$u = \frac{M_k}{M_N}$$

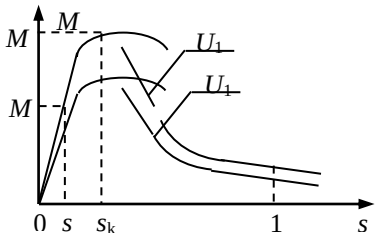
Przy stałej wartości poślizgu możemy uprościć wzór na moment elektromagnetyczny do postaci $M = cU_1^2$, z czego wynika, że moment elektromagnetyczny zależy od kwadratu napięcia zasilającego. Jest to wada silników indukcyjnych, gdyż niewielkie spadki napięcia w sieci powodują znaczne zmniejszenie (rys. 4.13) momentu napędowego silnika.

Rys. 4.13. Wykres zależności M = f(s) dla silnika indukcyjnego, dla dwóch różnych wartości napięcia zasilającego $U_{1N} > U_1$



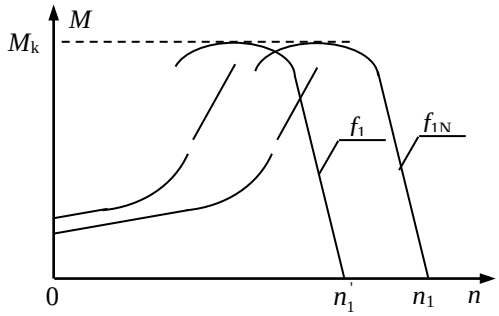
Źródło: materiał własny

Rys. 4.14. Wykres zależności M = f(s) dla silnika indukcyjnego, dla różnych wartości rezystancji obwodu wirnika



Źródło: materiał własny.

Rys. 4.15. Wykres zależności M = f(n) dla silnika indukcyjnego, dla dwóch różnych wartości częstotliwości napięcia zasilającego $f_{1N} > f_1$ dla U/f = const.



Źródło: materiał własny

Praca silnikowa maszyny indukcyjnej

Jeżeli moment napędowy M (elektromagnetyczny) silnika będzie większy od momentu obciążenia M_{obc}, o moment strat jałowych M_0, czyli:

$$M = M_{obc} + M_0,$$

wirnik będzie wirował z prędkością $n\left[\frac{obr.}{min}\right]$, która odpowiada prędkości kątowej $\omega = \frac{2\pi n}{60}\left[\frac{rad}{s}\right]$. Silnik będzie wykonywał pewną pracę nawet przy biegu jałowym, pokonując straty mocy w łożyskach i na wentylację.

Bieg jałowy silnika – stan pracy, w którym do uzwojenia stojana doprowadzone jest napięcie, obwód wirnika jest zamknięty, a wał silnika nie jest obciążony. Wirnik wiruje z prędkością ω_0 zbliżoną do prędkości synchronicznej, gdyż poślizg $s_0 \approx 0{,}001$.

Silnik pobiera niewielką moc czynną P_0, która idzie na pokrycie strat:

- w uzwojeniu stojana $\Delta P_{Cu0} = m_1 R_1 I_{f0}^2$
- w rdzeniu stojana $\Delta P_{Fe0} = m_1 E_1 I_{Fe}$

gdzie: I_{Fe} –składowa czynna prądu stanu jałowego I_0, E_1 – siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu stojana, przy czym $E_1 \approx U_1$.

- mechanicznych ΔP_m

Ze względu na małą częstotliwość napięcia wirnika $f_2 = sf_1$ pomijalnie małe są straty mocy w rdzeniu oraz uzwojeniu wirnika.

Bilans mocy dla stanu jałowego: $P_0 = \Delta P_{Cu0} + \Delta P_{Fe0} + \Delta P_m$

Straty niezależne od prądu obciążenia nazywane są stratami jałowymi, są to straty stałe

$$\Delta P_0 = P_0 - \Delta P_{Cu0} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m$$

Silnik na biegu jałowym, zasilany napięciem znamionowym obciąża sieć zasilającą prądem: $I_0 = (0{,}25 \div 0{,}5) I_N$

a w silnikach dużych mocy nawet do $0{,}7 I_N$.

Współczynnik mocy przy biegu jałowym: $\cos\varphi = 0{,}1 \div 0{,}2$

co wskazuje, że silnik w tym stanie pracy pobiera niemal wyłącznie moc bierną i z tego względu silniki indukcyjne nieobciążone powinny być wyłączane z sieci.

Napięcie zwarcia – wyrażona w procentach napięcia znamionowego wartość napięcia U_z, jakie należy doprowadzić do uzwojenia zasilanego (najczęściej stojana), aby przy nieruchomym wirniku i zwartym drugim uzwojeniu w uzwojeniach silnika popłynął prąd znamionowy.

$$u_{z\%} = \frac{U_z}{U_N} 100\%$$

Dla typowych maszyn indukcyjnych: $u_{z\%} = (10 \div 25)\% U_N$

Prąd zwarcia maszyny indukcyjnej zasilanej napięciem znamionowym może osiągać wartości w granicach $I_z = (4 \div 10) I_N$.

Wartość prądu zwarcia zależy od napięcia zwarcia: $I_z = \frac{100}{u_{z\%}} I_N$

Próbę zwarcia pomiarowego przeprowadza się w celu wyznaczenia napięcia zwarcia oraz obciążeniowych strat mocy.

Stan obciążenia silnika indukcyjnego – stan pracy, w którym silnik zasilany z sieci obciążony jest momentem oporowym maszyny roboczej. Silnik samoczynnie dostosowuje się do zmian obciążenia i każdy wzrost momentu hamującego powoduje wzrost prądu obciążenia silnika (pobieranego ze źródła).

Własności oraz zachowanie się silnika, podczas zmiany obciążenia, możemy przedstawić w postaci charakterystyk ruchowych – rys. 4.16. Zespół silnik – maszyna robocza powinien pracować stabilnie w całym zakresie zmian obciążenia, tzn. że po zaniknięciu krótkotrwałego zakłócenia, powinien wrócić do poprzedniego punktu pracy, a przy trwałej zmianie obciążenia powinien ustalić się nowy, stabilny punkt pracy.

W stanie ustalonym moment hamujący M_h równoważony jest przez moment elektromagnetyczny M:

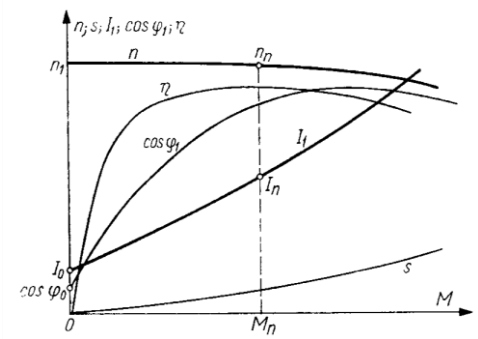
$$M = M_h$$

W stanie nieustalonym, gdy prędkość wirnika ulega zmianie powstaje moment dynamiczny M_d wywołujący zmianę prędkości

$$M_d = M - M_h$$

Jeżeli moment napędowy silnika jest większy od momentu hamującego $M > M_h$, układ przyśpiesza. W przypadku odwrotnym $M < M_h$ – układ zwalnia.

Rys. 4.16. Charakterystyki ruchowe silnika indukcyjnego pracującego przy U_1 = const, f_1 = const, dla $0 < s < s_k$



Źródło: Kacejko L., *Pracownia elektryczna. Tom II. Maszyny, urządzenia i napęd*, MCNEMT, Radom, 1993.

Wartość momentu dynamicznego decyduje o szybkości zmian prędkości, czyli o przyśpieszeniu kątowym układu. W stanie przejściowym wpływ na zachowanie się układu ma moment bezwładności J części wirujących i dla J = const możemy zapisać:

$$M_d = J\frac{d\omega}{dt}$$

Zachowanie się zespołu silnik – maszyna robocza – w stanie obciążenia – opisuje równanie ruchu układu napędowego:

$$M = M_h + J\frac{d\omega}{dt}$$

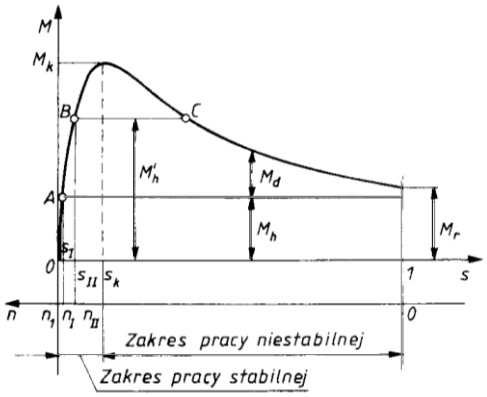
Stany nieustalone w pracy silnika występują podczas: rozruchu, hamowania, zmiany obciążenia, regulacji prędkości, zmiany warunków zasilania.

W przypadku, gdy zaburzenie w pracy powoduje zatrzymanie lub rozbieganie układu, mamy do czynienia z pracą niestabilną.

Silnik pracuje stabilnie w układzie napędowym w zakresie poślizgów $0 < s < s_k$ (rys. 4.17).

W tym zakresie silnik samoczynnie przystosowuje się do zmian obciążenia i punkt pracy powinien leżeć w tym zakresie poślizgów z uwzględnieniem spodziewanych przeciążeń. Przeciążalność silników indukcyjnych jest niewiele większa niż 2.

Rys. 4.17. Wyjaśnienie zakresu pracy stabilnej silnika indukcyjnego

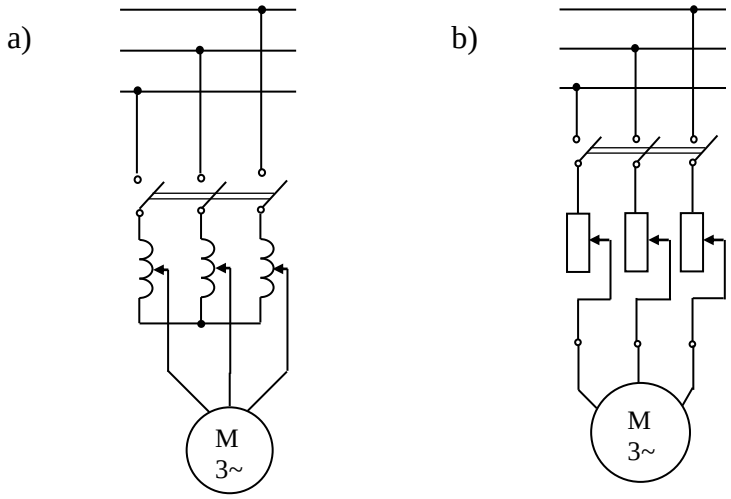


Źródło: Goźlińska E., *Maszyny elektryczne*, WSiP, Warszawa, 1998.

$$u = \frac{M_k}{M_N} \geq 2$$

W silnikach klatkowych zmianę poślizgu realizuje się, zmieniając napięcie zasilające przez zastosowanie transformatora, autotransformatora lub regulatora rezystancyjnego bądź reaktancyjnego włączonego w obwód stojana. W regulatorach reaktancyjnych stosowanych w zautomatyzowanych układach stabilizacji prędkości, stosuje się dławiki podsycane prądem stałym. Niska sprawność, mały zakres regulacji, gdyż $M_{\max} \approx cU_1^2$ i szybko maleje moment napędowy.

Rys. 4.18. Regulacja prędkości przez zmianę wartości napięcia stojana:
a) autotransformatory regulacyjne, b) regulator rezystancyjny



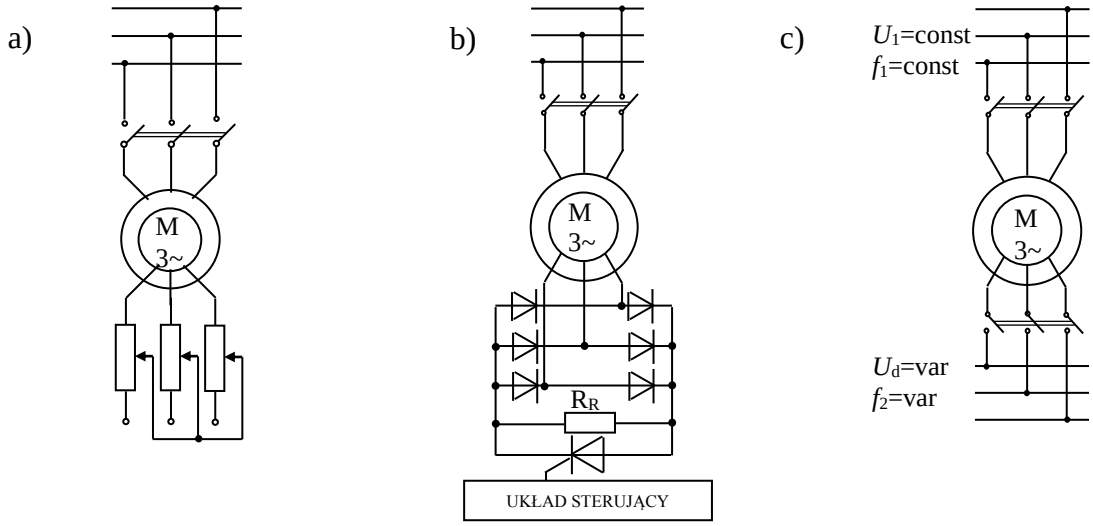
Źródło: materiał własny

W silnikach pierścieniowych zmianę poślizgu realizuje się, zmieniając rezystancję obwodu wirnika lub doprowadzając napięcia dodatkowego do pierścieni ślizgowych.

Włączenie regulatora rezystancyjnego w obwód wirnika (rys. 4.19a i b) umożliwia regulację płynną, regulację ze stratami dodatkowymi ($\Delta P = mR_rI^2$), regulację w dół.

Zmiana napięcia doprowadzonego do pierścieni ślizgowych (rys. 4.19c): regulacja w górę i w dół odbywa się praktycznie bez strat dodatkowych.

Rys. 4.19. Regulacja prędkości przez włączenie elementów dodatkowych w obwód wirnika: a) i b) regulator rezystancyjny, b) napięcie dodatkowe



Źródło: materiał własny.

Bibliografia:

1. Goźlińska E.: Maszyny elektryczne. WSiP, Warszawa 1998
2. Kacejko L.: Pracownia elektryczna. Tom II. Maszyny, urządzenia i napęd. MCNEMT, Radom 1993
3. Plamitzer A.M.: Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1976.
4. Praca zbiorowa: Poradnik montera elektryka. WNT, Warszawa 1997
5. Normy:

- 5. PN-92/E-01200 – Symbole graficzne stosowane w schematach.
- 6. PN-91/E-06700 – Maszyny elektryczne wirujące. Terminologia.
- 7. PN-88/E-06701 – Maszyny elektryczne wirujące. Ogólne wymagania i badania
- 8. PN-89/E-06702 – Maszyny elektryczne wirujące. Straty i sprawność.
- 9. PN-88/E-06705 – Maszyny elektryczne wirujące. Stopnie ochrony.
- 10. PN-88/E-06706 – Maszyny elektryczne wirujące. Sposoby chłodzenia.
- 11. PN-89/E-06707 – Maszyny elektryczne wirujące. Oznaczenia form wykonania.
- 12. PN-88/E-06708 – Maszyny elektryczne wirujące. Oznaczenia wyprowadzeń i kierunku wirowania.