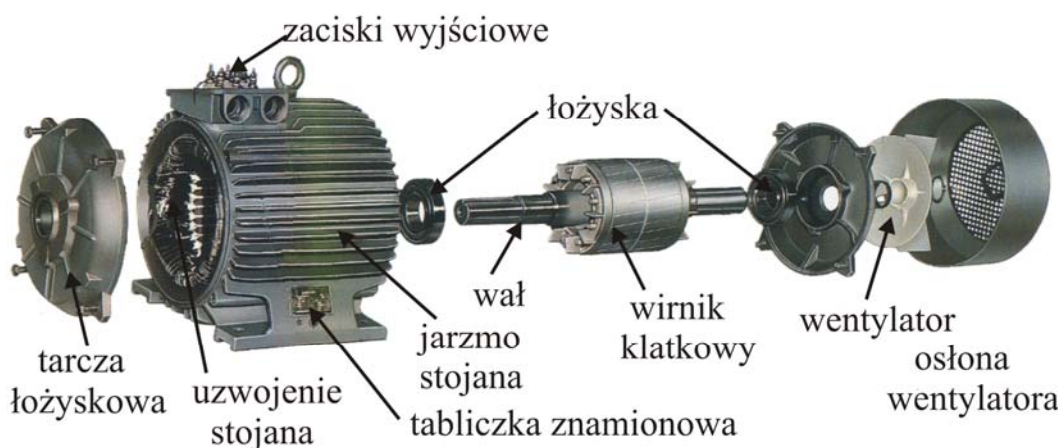


BADANIE SILNIKA INDUKCYJNEGO

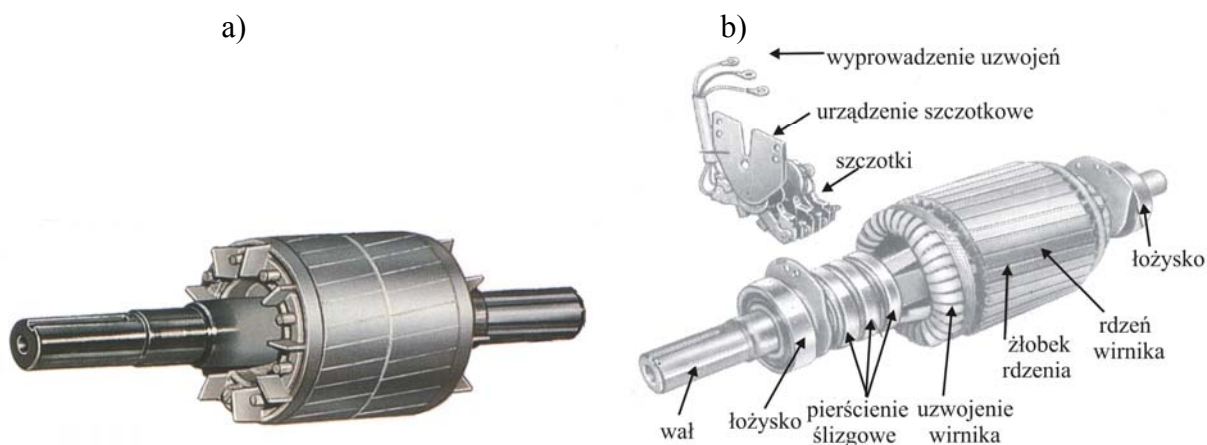
Cel ćwiczenia: poznanie budowy, zasady działania, metod rozruchu, źródeł strat mocy i podstawowych charakterystyk silnika indukcyjnego trójfazowego.

4.1. Budowa i zasada działania silnika indukcyjnego

Silniki indukcyjne zasilane z sieci trójfazowej ze względu na budowę wirnika dzielą się na silniki klatkowe i pierścieniowe. Najbardziej rozpowszechnione są bezzestykowe silniki klatkowe jako stosunkowo tanie i niezawodne. Ich wadą jest to, że rozwijają one stosunkowo mały moment rozruchowy. Tam gdzie jest wymagany duży moment przy rozruchu można zastosować silnik pierścieniowy. Budowę silnika indukcyjnego klatkowego trójfazowego przedstawia rys.4.1.



Rys. 4.1. Widok rozłożonego silnika indukcyjnego klatkowego



Rys.4.2 Wirnik silnika indukcyjnego klatkowego a) i pierścieniowego b)

Stojan silnika indukcyjnego składa się z jarzma w który wtłoczony jest rdzeń spakietowany z izolowanych blach ze stali elektrotechnicznej. Blachy te po obwodzie

zewnątrznym mają wykrawane żłobki. W żłobkach rdzenia stojana znajdują się trzy pasma uzwojeń przesuniętych w przestrzeni względem siebie o 120 stopni elektrycznych. Początki i końce każdego pasma uzwojenia wyprowadzone są na tabliczkę zaciskową znajdującą się na korpusie silnika. Uzwojenie stojana (połączone w gwiazdę lub trójkąt) zasilane z sieci trójfazowej prądu przemiennego wytwarza wirujące pole magnetyczne, którego prędkość obrotowa n_1 jest proporcjonalna do częstotliwości napięcia zasilającego f_1 i odwrotnie proporcjonalna do liczby par biegunów p zgodnie ze wzorem

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}. \quad (4.1)$$

Do stojana należą również tarcze łożyskowe. Silnik indukcyjny klatkowy i pierścieniowy różnią się w zasadzie tylko budową wirnika.

Wirnik silnika klatkowego pokazany jest na rys. 4.2a. Składa się on z wału na który wciśnięty jest pakiet rdzenia wirnika wykonany z izolowanych blach ze stali elektrotechnicznej. W żłobkach znajduje się uzwojenie w postaci klatki zwartej na końcach pierścieniami przewodzącymi prąd. Uzwojenie to wykonane jest najczęściej z aluminium.

Wirnik silnika pierścieniowego widoczny na rys. 4.2b ma trzy odizolowane pierścienie ślizgowe osadzone na wale, do których przyłączone są końce trzech pasm uzwojeń umieszczonych w żłobkach wirnika. Uzwojenia te wykonane z izolowanego drutu miedzianego połączone są w gwiazdę. Końce uzwojeń wirnika poprzez pierścienie ślizgowe i szczotki wyprowadzone są na tabliczkę zaciskową na stojanie silnika. Stwarza to możliwość podłączenia dodatkowej rezystancji do uzwojeń wirnika w czasie rozruchu. Przyłączenie rezystancji rozruchowej ogranicza prąd w czasie rozruchu zwiększając jednocześnie moment rozruchowy.

Zasada działania silnika opiera się na zjawisku indukcji elektromagnetycznej. Pole magnetyczne wirujące z prędkością synchroniczną określoną wzorem (4.1) wytworzone przez prąd w uzwojeniach stojana indukuje napięcia, których wartości skuteczne określają zależności:

- w uzwojeniach stojana $E_1 = 4,44 \Phi \cdot f_1 \cdot z_1 \cdot k_1,$ (4.2)

- w uzwojeniach wirnika $E_{2s} = 4,44 \Phi \cdot f_2 \cdot z_2 \cdot k_2,$ (4.3)

gdzie: f_1, f_2 – częstotliwości napięcia w stojanie i wirniku, z_1, z_2 – liczba zwojów uzwojenia stojana i wirnika, k_1, k_2 – współczynnik uzwojenia, Φ – strumień magnetyczny.

Największe napięcie w wirniku indukuje się, gdy wirnik jest nieruchomy ($n=0$). Wtedy $f_2=f_1$ a napięcie indukowane w uzwojeniach ruchomego wirnika (E_{2s}) równe jest napięciu (E_2) zgodnie z zależnością $E_{2s}=E_2=4,44 \Phi \cdot f_1 \cdot z_2 \cdot k_2$.

Pod wpływem zaindukowanego napięcia w zwartych uzwojeniach wirnika silnika pojawi się prąd proporcjonalny do tego napięcia i odwrotnie proporcjonalny do impedancji obwodu wirnika

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{s \cdot E_2}{Z_{2s}} \quad (4.4)$$

Współdziałanie pola magnetycznego od prądu wirnika z wirującym polem stojana daje obrotowy moment indukcyjny określony wzorem

$$M = c \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi \quad (4.5)$$

gdzie c – stała konstrukcyjna silnika, ψ – kąt fazowy między napięciem i prądem indukowanym w wirniku.

Pod wpływem tego momentu wirnik silnika obraca się zgodnie z kierunkiem wirowania pola stojana, a jego prędkość będzie zawsze mniejsza od prędkości pola i zależy od obciążenia silnika. Wirnik silnika wiruje wolniej niż pole stojana, niejednocześnie (asynchronicznie) z polem, z pewnym poślizgiem „ s ” względem tego pola. Poślizg ten definiujemy zgodnie z zależnością

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{f_2}{f_1} \quad (4.6)$$

gdzie: n_1 – jest prędkością wirowania pola magnetycznego, n - prędkością wirowania wirnika.

Łatwo zauważyć, że przy zmianach prędkości od zera do n_1 , poślizg zmienia się od 1 do 0. Przekształcając wzór (4.6) zależność na prędkość obrotową silnika indukcyjnego przyjmie postać

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad (4.7)$$

Jak wynika z powyższego wzoru prędkość obrotowa silnika jest wprost proporcjonalna do częstotliwości napięcia zasilającego oraz odwrotnie proporcjonalnie do liczby par biegunów i maleje nieznacznie ze wzrostem poślizgu wywołanego obciążeniem silnika.

4.2. Charakterystyka mechaniczna i charakterystyki robocze silnika indukcyjnego trójfazowego

Charakterystyką mechaniczną silnika indukcyjnego, podobnie jak i innych silników, nazywamy zależność prędkości obrotowej od momentu hamującego $n=f(M)$ przy ustalonej wartości napięcia zasilającego. Zależność tę pośrednio można wyznaczyć analitycznie znajdując najpierw przebieg momentu w funkcji poślizgu $M=f(s)$. W tym celu uzależniamy

moment od poślizgu podstawiając do wzoru na moment $M=c \cdot \Phi I_2 \cdot \cos \psi$ za Φ wyrażenie wyznaczone ze wzoru (4.2), za I_2 wyrażenie ze wzoru (4.4) a za $\cos \psi$ wyrażenie

$$\cos \psi = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \quad (4.8)$$

gdzie: R_2, X_2 – rezystancja i reaktancja uzwojenia wirnika przy $n=0$.

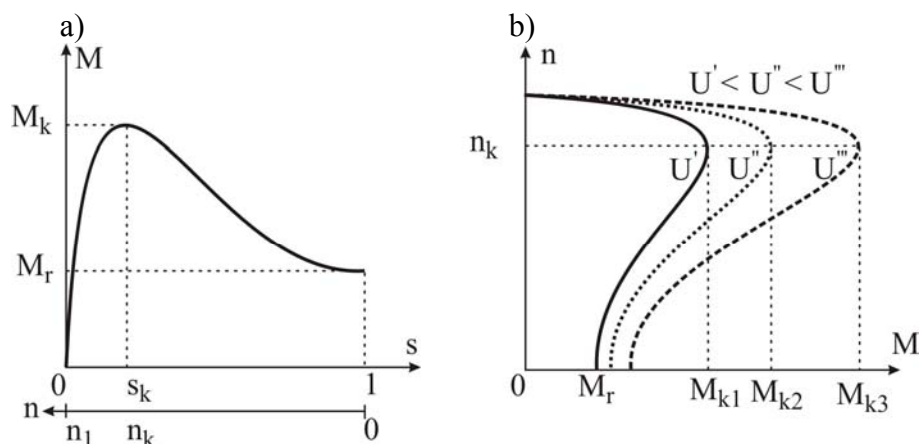
Po przekształceniach ostatecznie otrzymamy wyrażenie na moment obrotowy silnika

$$M = c_1 \cdot E_1^2 \frac{s \cdot R_2}{R_2^2 + s^2 \cdot X_2^2} \quad (4.9)$$

Badając przebieg zmienności tej funkcji należy znaleźć poślizg krytyczny s_k przy którym moment osiąga maksymalną wartość. W tym celu należy przyrównać pierwszą pochodną momentu względem poślizgu do zera i wyznaczyć poślizg krytyczny, który wynosi $s_k = R_2/X_2$, a wzór na maksymalny moment przyjmie wtedy postać

$$M_{max} = M_k = c_1 \cdot E_1^2 \cdot \frac{1}{2X_2} \approx c_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{1}{2X_2} \quad (4.10)$$

Przebieg momentu w funkcji poślizgu przedstawia rys. 4.3a. Znając ścisłą zależność między prędkością obrotową i poślizgiem charakterystykę $M=f(s)$ przekształcamy w charakterystykę mechaniczną silnika $n=f(M)$ (przy stałej wartości napięcia zasilania) przedstawioną na rys. 4.3b. Na rysunku tym pokazano charakterystyki dla trzech różnych napięć zasilających uzwojenia stojana.

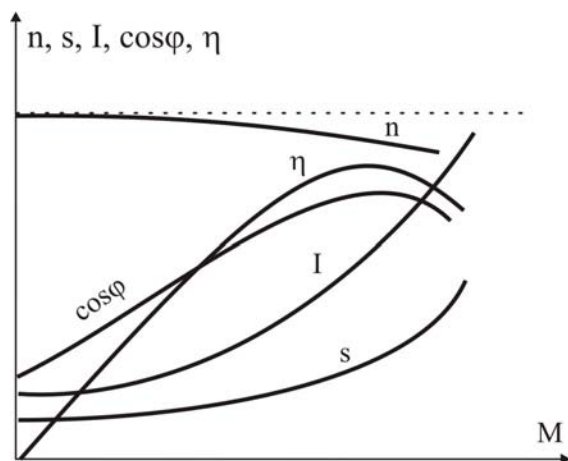


Rys.4.3. Przebieg momentu w funkcji poślizgu a) i prędkości obrotowej w funkcji momentu b) w silniku indukcyjnym trójfazowym

Charakterystyka mechaniczna silnika trójfazowego jest niejednoznaczna, gdyż dla jednego momentu obciążenia możliwe są dwie różne prędkości obrotowe. Charakterystyka ta składa się z części stabilnej (w przybliżeniu liniowej) i części niestabilnej w przedziale prędkości od zera do prędkości obrotowej odpowiadającej poślizgowi krytycznemu. Oprócz charakterystyki mechanicznej interesujące są inne charakterystyki robocze takie jak zależność

sprawności η , średniej wartości prądu pobranego z sieci I , poślizgu s , i współczynnika mocy $\cos\varphi$ w funkcji momentu M . Przykładowy przebieg tych charakterystyk zwanych charakterystykami roboczymi przedstawia rys. 4.4.

Aby zinterpretować przebieg krzywych z rys. 4.4 zakładamy, że silnik pracuje w ustalonych warunkach. Ustalone są wobec tego wszystkie jego parametry takie jak: prędkość obrotowa, prąd stojana, prąd wirnika, moment obrotowy równy momentowi hamującemu i moc oddawana.



Rys.4.4. Typowy przebieg charakterystyk roboczych silnika indukcyjnego

Zwiększenie momentu hamującego spowoduje, że chwilowo moment ten będzie większy niż moment obrotowy i silnik zwolni bieg. Wzrośnie wtedy częstotliwość zmian strumienia w wirniku, to zaś spowoduje zwiększenie indukowanego napięcia E_{2s} . Zwiększy się zatem prąd wirnika. Zwiększenie prądu wirnika wpłynie na zmniejszenie wypadkowego strumienia w obwodzie magnetycznym maszyny (podobnie jak w transformatorze), a to z kolei zmniejszy napięcie indukowane w uzwojeniu stojana E_1 . Zwiększenie zaś różnicy pomiędzy napięciem sieci a napięciem indukowanym E_1 w uzwojeniach stojana spowoduje zwiększenie prądu w tych uzwojeniach i wzrost momentu rozwijanego przez silnik. Nastąpi wtedy stan równowagi i prędkość obrotowa ustali się przy mniejszej prędkości wirnika i większym prądzie, co odpowiada większemu momentowi rozwijanemu przez silnik. Powyższe rozumowanie wyjaśnia przebieg charakterystyk $n=f(M)$ oraz $I=f(M)$.

Wzrost momentu hamującego powoduje zmniejszanie prędkości obrotowej silnika oraz wzrost poślizgu zgodnie z zależnością (4.6)

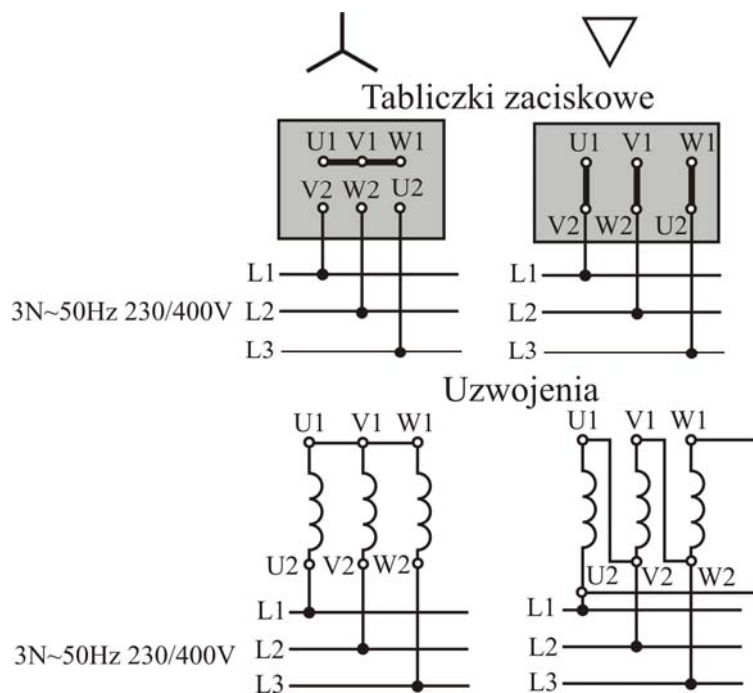
$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}.$$

Przebieg funkcji $\cos\varphi=f(M)$ można również wyjaśnić opierając się na analizie składowej czynnej i biernej prądu I przy różnych wartościach momentu obciążającego. W zakresie wzrostu funkcji $\cos\varphi=f(M)$ składowa czynna prądu I wraz z obciążeniem rośnie, natomiast składowa bierna (magnesująca) zachowuje w przybliżeniu wartość stałą.

Charakterystyka sprawności silnika asynchronicznego ma przebieg taki sam jak w transformatorze i będzie omówiona w punkcie 4.5.

4.3. Rozruch silników indukcyjnych trójfazowych

Uruchomienie silnika indukcyjnego trójfazowego odbywa się przez przyłączenie odpowiednich napięć do uzwojeń stojana. Uzwojenia te można łączyć w gwiazdę lub trójkąt przez odpowiednie połączenie uzwojeń realizowane zwarciami odpowiednich punktów na tabliczce zaciskowej pokazanej na rys. 4.5.



Rys.4.5. Sposób łączenia uzwojeń stojana silnika indukcyjnego trójfazowego w gwiazdę i trójkąt

W zależności od tego połączenia przyjmuje się odpowiednią wartość napięcia i prądu zasilających silnik odczytanych z tabliczki znamionowej.

Przy zasilaniu silnika napięciem znamionowym w chwili rozruchu silnik indukcyjny pobierałby z sieci prąd wielokrotnie większy od prądu znamionowego. Dzieje się tak dlatego, że przy $n=0$ napięcie indukowane w uzwojeniach wirnika E_{2s} wyznaczone ze wzoru (4.3) jest największe z możliwych przy pracy silnikowej. W związku z tym i prąd w wirniku byłby

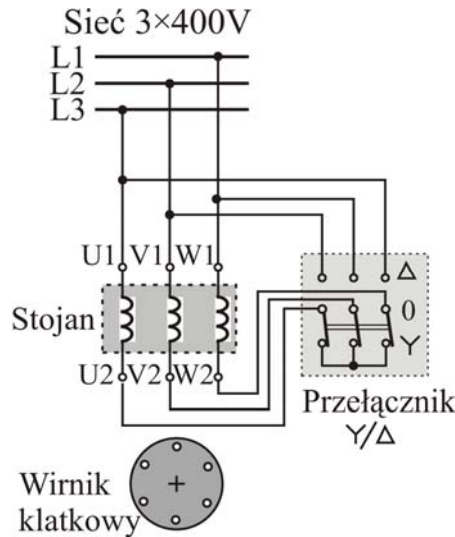
największy z możliwych powodując również pobór dużego prądu z sieci. W początkowej chwili rozruchu silnik można porównać do transformatora w stanie zwarcia. Wiadomo, że zwarcie transformatora przy znamionowym napięciu zasilającym powoduje pobór z sieci prądu wielokrotnie przewyższającego prąd znamionowy. Ciepłne i elektrodynamiczne skutki działania prądu zwarciovego byłyby niebezpieczne dla silnika i sieci zasilającej. Dlatego w czasie rozruchu silników indukcyjnych, szczególnie dużej mocy, należy ograniczać prąd rozruchowy pobierany z sieci.

W praktyce stosowane są następujące sposoby rozruchu silników asynchronicznych:

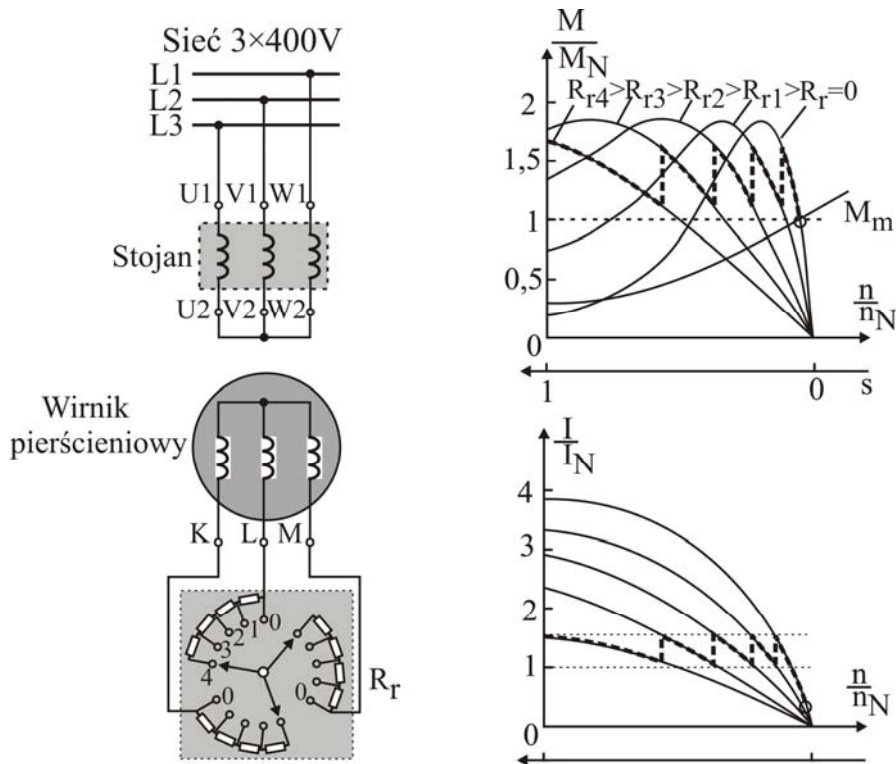
- rozruch bezpośredni (dla niektórych silników małej mocy),
- z wykorzystaniem przełącznika gwiazda/trójkąt dla silników klatkowych (przy połączeniu uzwojeń stojana w gwiazdę prąd pobierany z sieci jest 3 razy mniejszy niż przy połączeniu uzwojeń w trójkąt),
- przez włączenie dodatkowej rezystancji w obwód wirnika silnika pierścieniowego (w chwili rozruchu prąd I_2 maleje bo R_2 rośnie ale rośnie również moment M bo szybciej rośnie $\cos \psi$ niż maleje prąd I_2),
- rozruch przy obniżonym napięciu zasilającym przez zastosowanie trójfazowego regulatora napięcia lub załączenie dodatkowej impedancji w obwód stojana,
- przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego przy warunku $U_1/f_1 = \text{const}$ (gdy f_1 małe to E_2 małe i I_2 małe).

Najczęstszym sposobem rozruchu silników indukcyjnych klatkowych jest przełącznik gwiazda – trójkąt. Na czas rozruchu uzwojenia stojana łączy się w gwiazdę a po osiągnięciu przez wirnik prędkości obrotowej bliskiej znamionowej przełącza się je na trójkąt. Takie przełączenie powoduje trzykrotne zmniejszenie prądu rozruchowego. Wiąże się to jednak ze znacznym zmniejszeniem momentu rozruchowego. Rozruch taki stosuje się zwykle w silnikach klatkowych uruchamianych przy biegu jałowym. Sposób przełączania uzwojeń przy takim rozruchu pokazany jest na rys.4.6.

Rozruchu silnika pierścieniowego dokonuje się za pomocą rozrusznika to jest trójfazowego rezystora włączanego w obwód uzwojeń wirnika (rys.4.7). Wzrost rezystancji wirnika powoduje zmniejszenie prądu rozruchowego przy jednoczesnym wzroście momentu rozruchowego. Dzieje się tak dlatego, że ze wzrostem rezystancji w obwodzie wirnika wolniej maleje prąd I_2 niż rośnie $\cos \psi$ i moment będący iloczynem $M = c \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \psi$ wzrasta. Przy



Rys.4.6. Rozruch silnika klatkowego za pomocą przełącznika gwiazda – trójkąt



Rys.4.7. Rozruch silnika pierścieniowego za pomocą rozrusznika

odpowiednio dobranej rezystancji rozrusznika moment rozruchowy może osiągnąć największą wartość równą momentowi krytycznemu rozwijanemu przez silnik.

Stosując rozrusznik ograniczamy prąd do wartości dopuszczalnych. Po zakończeniu rozruchu polegającego na zwieraniu rezystancji rozrusznika do zera wirnik silnika obraca się z największą prędkością bliską prędkości synchronicznej. Wtedy prąd w uzwojeniach wirnika, a więc i prąd pobierany z sieci jest mały, ponieważ częstotliwość zmian strumienia magnetycznego w wirniku jest bardzo mała (wirnik obraca się tylko nieco wolniej od pola

wirującego). W uzwojeniach indukuje się więc małe napięcie, powodując przepływ niewielkiego prądu.

W początkowej chwili rozruchu, gdy do silnika przyłączono napięcie zasilające, silnik można porównać do transformatora. Bez użycia rozrusznika transformator ten znajdowałby się w stanie zwarcia. Wiadomo, że zwarcie transformatora przy znamionowym napięciu zasilającym powoduje przepływ prądu wielokrotnie przewyższającego prąd znamionowy. Ciepłne i elektrodynamiczne skutki działania prądu zwarciovego byłyby niebezpieczne dla silnika i sieci zasilającej.

4.4. Regulacja prędkości obrotowej silników indukcyjnych

Prędkość obrotową w silnikach indukcyjnych opisaną zależnością $n = \frac{60f_1}{p} \cdot (1-s)$

możemy regulować przez zmianę:

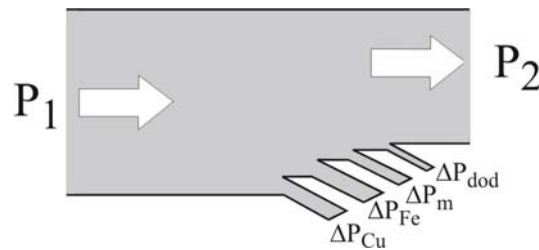
- częstotliwości f_1 napięcia zasilającego - przy czym zmianie częstotliwości musi towarzyszyć zmiana wartości skutecznej napięcia tak, aby stosunek U_1/f_1 był w przybliżeniu stały w celu zapewnienia prądu pobieranego z sieci bliskiego znamionowemu (powodującego wytworzenie optymalnego strumienia a więc i optymalnego wykorzystania silnika),
- liczby par biegunów p – jest to regulacja skokowa (gdyż liczba par biegunów p może być tylko liczbą całkowitą),
- zmianę poślizgu s – zmianę poślizgu można realizować przez włączanie impedancji w obwód stojana lub wirnika. Jest to nieekonomiczny sposób pozwalający na regulację prędkości obrotowej w niewielkim zakresie i praktycznie nie stosowany.

Podstawowym sposobem regulacji prędkości obrotowej jest zmiana częstotliwości napięcia zasilającego.

4.5. Straty mocy i sprawność silnika indukcyjnego

Straty mocy w silnikach elektrycznych są sumą strat mocy w obwodach elektrycznych, w obwodzie magnetycznym, strat mocy mechanicznej związanej z tarciami przy ruchu obrotowym i strat dodatkowych. Bilans mocy, przy zamianie energii elektrycznej w mechaniczną, w silniku indukcyjnym obrazowo przedstawia rysunek 4.8. Moc mechaniczna wyjściowa $P_2 = M \cdot \omega$ jest równa mocy elektrycznej wejściowej

$P_1 = \sqrt{3}U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1$ pomniejszonej o straty mocy towarzyszące przetwarzaniu energii elektrycznej w mechaniczną w silniku.



Rys.4.8. Bilans mocy w silniku elektrycznym

Straty mocy w obwodach elektrycznych są związane z wydzielaniem się ciepła na rezystancji przez wartość skuteczną przepływającego prądu i zależą od tej rezystancji oraz kwadratu tego prądu. Dla silnika indukcyjnego trójfazowego możemy zapisać

$$\Delta P_{cu} = 3R_f \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 \quad (4.11)$$

gdzie: R_f i I_1 są odpowiednio rezystancją i prądem stojana, a R_2 i I_2 rezystancją i prądem wirnika.

Straty mocy w obwodzie magnetycznym ΔP_{Fe} są sumą strat wywołaną prądami wirowymi ΔP_{ow} i przemagnesowaniem obwodu magnetycznego ΔP_{μ} . Straty te można wyrazić wzorem

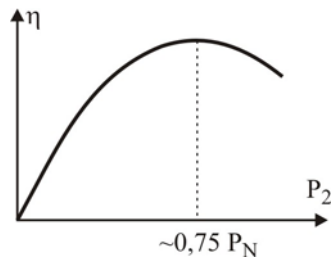
$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{\mu} + \Delta P_{ow} = c_{\mu} \cdot B^2 \cdot f_1 + c_{ow} \cdot B^2 \cdot f_1^2 \quad (4.12)$$

gdzie: B jest indukcją magnetyczną, f_1 częstotliwością napięcia zasilającego, a c_{μ} i c_{ow} stałymi materiałowymi.

Straty mocy w obwodzie magnetycznym zależą więc od częstotliwości i kwadratu indukcji magnetycznej. Napięcie indukowane w uzwojeniach silnika jest proporcjonalne do indukcji magnetycznej. Napięcie zasilające zaś jest w przybliżeniu równe napięciu indukowanemu (przy pominięciu spadków napięć na rezystancjach uzwojeń wywołanych prądem). Z tego wynika, że straty mocy w obwodzie magnetycznym są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu napięcia zasilającego.

Straty mechaniczne ΔP_m zależą głównie od prędkości obrotowej i są związane z tarciami w łożyskach, tarciami szczotek o pierścieni ślizgowe (w silniku pierścieniowym) i momentem wentylacyjnym. Przy stałej prędkości obrotowej straty mechaniczne są praktycznie stałe.

Sprawnością η każdego przetwornika a więc i omawianego silnika nazywamy stosunek mocy wyjściowej P_2 do mocy pobranej P_1 tj. $\eta = P_2/P_1$. Przykładowy przebieg sprawności silnika w funkcji mocy wyjściowej przedstawia rys.4.9.

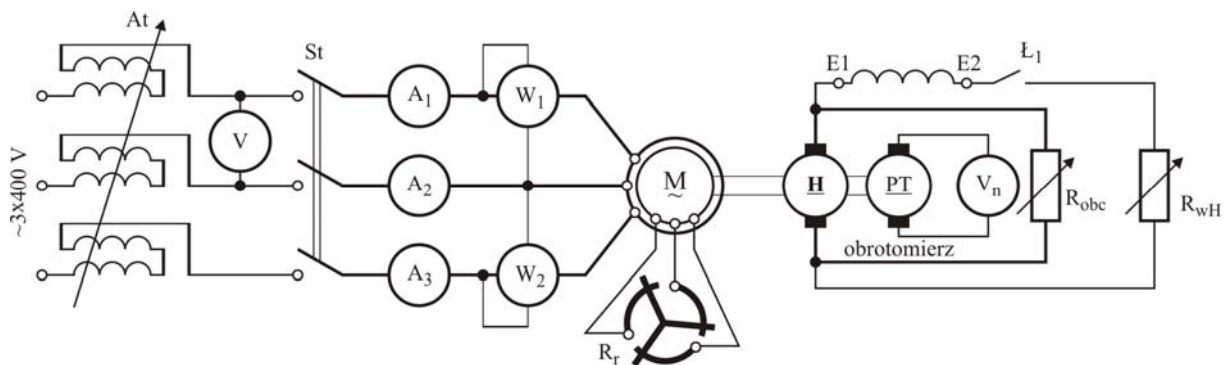


Rys.4.9. Przykładowy przebieg sprawności w funkcji mocy wyjściowej w silniku indukcyjnym

Przy biegu jałowym ($P_2=0$) sprawność jest równa zero, a następnie rośnie ze wzrostem mocy oddawanej przez silnik. Ze wzrostem obciążenia silnika, a więc i mocy P_2 , rosną szybko straty w uzwojeniach przy prawie niezmiennych stratach w obwodzie magnetycznym i stratach mechanicznych. Przy zrównaniu się strat w miedzi i strat w żelazie funkcja $\eta = f(P_2)$ osiąga maksimum, a przy dalszym obciążaniu silnika zaczyna maleć. Największą sprawność mają silniki zwykle przy obciążeniu (70 – 80)% mocy znamionowej P_N .

4.6. Badania laboratoryjne

Badany będzie silnik indukcyjny pierścieniowy przy połączeniu uzwojeń stojana w gwiazdę. Schemat układu pomiarowego do badań przy biegu jałowym i przy obciążeniu silnika przedstawia rysunek 4.10.



Rys. 4.10. Schemat układu pomiarowego dla badania silnika indukcyjnego pierścieniowego

Silnik jest zasilany napięciem trójfazowym o regulowanej wartości skutecznej napięcia za pomocą regulatora indukcyjnego At . Rozruchu silnika dokonujemy za pomocą rozrusznika o rezystancji R_r , tj. trójfazowej rezystancji włączanej na czas rozruchu w obwód wirnika. Do pomiaru prędkości obrotowej może być wykorzystana prądnica tachometryczna PT (jak na schemacie) lub obrotomierz cyfrowy. Silnik będzie obciążony hamownicą maszynową H . Jest to prądnica samowzbudna prądu stałego z obrotowym stojanem. Do obwodu twornika prądnicy przyłączony jest odbiornik o stałej rezystancji R_{obc} a w obwód wzbudzenia włącza

się łącznikiem L_I regulowaną rezystancję R_{wH} . Zmiana rezystancji w obwodzie wzbudzenia powoduje zmianę prądu w tym obwodzie i zmianę strumienia Φ a więc i napięcia indukowanego na zaciskach prądnicy zgodnie ze wzorem $E=c_E \cdot \Phi \cdot n$. Zmiana napięcia wyjściowego prądnicy powoduje zmianę prądu płynącego przez obciążenie i zmianę momentu obciążającego badany silnik.

4.6.1. Pomiar charakterystyk biegu jałowego

Głównym celem badania silnika przy biegu jałowym jest pomiar strat mocy w silniku i dokonanie przybliżonego rozdziału tych strat. Straty mocy będą badane w zależności od wartości napięcia zasilającego.

Biegiem jałowym silnika indukcyjnego nazywa się taki stan, w którym wał silnika nie jest obciążony momentem. Moc elektryczna pobierana z sieci zasilającej zużytkowana zostaje wtedy na pokrycie strat występujących w silniku. Próba biegu jałowego przeprowadzona przy różnych napięciach pozwoli oszacować jakie wartości przyjmują straty mechaniczne oraz straty w stali w warunkach znamionowych.

Po połączeniu układu pomiarowego zgodnie z rys.4.10 należy dokonać jego rozruchu. W celu ograniczenia prądu rozruchowego (przy jednoczesnym zwiększeniu momentu rozruchowego) rozruchu silnika dokonujemy za pomocą rozrusznika. W tym celu regulatorem A_t ustawiamy znamionowe napięcie zasilania a rękojeść rozrusznika R_r ustawiamy się w położeniu wyjściowym tj. w lewym skrajnym położeniu (całkowita rezystancja włączona w obwód wirnika) a następnie zamykamy stycznik St . Gdy silnik zacznie się obracać, zmniejszamy rezystancję rozrusznika, aż do jej zwarcia.

Pomiary przeprowadza się zmniejszając napięcie zasilające od $1,2U_N$ do takiej wartości, przy której prąd po osiągnięciu minimum zaczyna wzrastać. Pomiaru trójfazowej mocy pobranej przez silnik dokonujemy za pomocą dwóch watomierzy. Moc pobrana może być różnicą lub sumą wskazań watomierzy. Przy $\cos\varphi < 0,5$ (co ma miejsce przy biegu jałowym) wskazania watomierzy odejmuje się. Gdy $\cos\varphi$ rośnie wskazania jednego z watomierzy maleją do zera (przy $\cos\varphi = 0,5$), a następnie wskazówka watomierza zacznie się wychylać w przeciwną stronę. Należy wtedy przełączyć cewkę napięciową tego watomierza i od tego momentu wskazania przyrządów dodajemy ($\cos\varphi > 0,5$). Wyniki pomiarów należy wpisać do tabeli 4.1.

Przy obliczeniach należy skorzystać ze wzorów:

$$I_0 = \frac{I_{01} + I_{02} + I_{03}}{3} \quad - \text{średni prąd biegu jałowego};$$

$$P_0 = P_{01} \pm P_{02} \quad - \text{moc pobrana z sieci zasilającej};$$

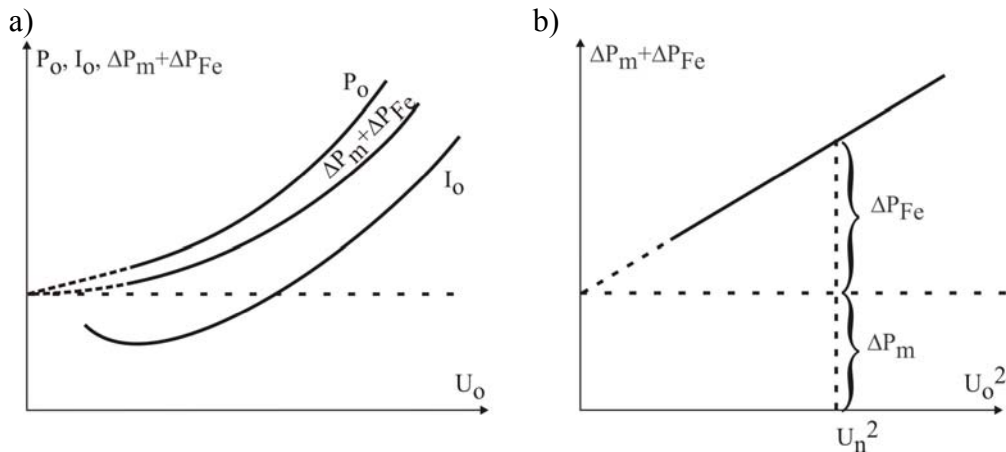
$$\Delta P_{Cu} \approx 3R_f \cdot I_0^2 \quad - \text{straty w miedzi};$$

$$\Delta P_m + \Delta P_{Fe} = P_0 - \Delta P_{Cu} \quad - \text{suma strat mechanicznych i strat w stali}.$$

Tab. 4.1

Lp.	Pomiary							Obliczenia			
	U_0	I_{01}	I_{02}	I_{03}	P_{01}	P_{02}	n	I_0	P_0	ΔP_{Cu}	$\Delta P_m + \Delta P_{Fe}$
	V	A	A	A	W	W	1/min	A	W	W	W
1.											
2.											
3.											
...											

W obliczeniach za wartość rezystancji jednej fazy uzwojenia stojana przyjąć $R_f = 1.3 \Omega$.



Rys. 4.11. Charakterystyki strat biegu jałowego: a) w funkcji napięcia zasilającego; b) w funkcji kwadratu napięcia zasilającego

Po wykonaniu obliczeń należy wykreślić charakterystyki biegu jałowego P_0 , $(\Delta P_m + \Delta P_{Fe})$ i $I_0 = f(U_0)$, których teoretyczne przebiegi pokazano na rys. 4.11a. Następnie, w celu rozdzielania strat mechanicznych i strat w żelazie należy wykonać wykres funkcji $(\Delta P_m + \Delta P_{Fe}) = f(U^2)$ i metodą graficzną wyznaczyć straty w stali ΔP_{Fe} i straty mechaniczne ΔP_m tak, jak pokazano na rys. 4.11b.

Funkcja $\Delta P_m + \Delta P_{Fe} = f(U^2)$ jest liniowa, co umożliwia wyznaczenie strat mechanicznych. Przedłużenie prostej $(\Delta P_m + \Delta P_{Fe}) = f(U^2)$ do przecięcia się z osią rzędnych wyznacza wartość strat mechanicznych ΔP_m .

Przedstawiony przybliżony /sposób podziału strat mocy w silniku indukcyjnym trójfazowym można uzasadnić następująco. Jak już wspomniano straty mechaniczne zależą głównie od prędkości obrotowej. W stanie jałowym prędkość obrotowa zmienia się bardzo nieznacznie, więc można przyjąć, że straty mechaniczne są w tym przypadku stałe. Straty zaś w stali są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu indukcji magnetycznej

Napięcie indukowane w uzwojeniu stojana, którego wartość w stanie jałowym niewiele się różni od napięcia zasilającego, jest zależne liniowo od indukcji. Wobec tego można przyjąć, że straty w stali są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu napięcia zasilającego. Krzywą $\Delta P_m + \Delta P_{Fe} = f(U)$ otrzymujemy odejmując od strat całkowitych $P_0 = f(U_0)$ straty w uzwojeniach $\Delta P_{Cu} = f(U_0)$. Trzeba zauważyć, że nie mając pomierzonego prądu w wirniku jest możliwy tylko pomiar strat w miedzi stojana

$$\Delta P_{Cu\ st} = 3 \cdot R_f \cdot I_1^2.$$

Całkowite straty w miedzi są sumą strat mocy w uzwojeniach stojana $\Delta P_{Cu\ st}$ i wirnika $\Delta P_{Cu\ w}$. Straty w uzwojeniach wirnika przy biegu jałowym są pomijalnie małe w porównaniu ze stratami w uzwojeniach stojana. Można więc założyć że przy biegu jałowym

$$\Delta P_{Cu} \approx \Delta P_{Cu\ st}.$$

Uzasadnia się to tym, że przy małym poślizgu w stanie jałowym napięcie indukowane w uzwojeniach wirnika jest małe i w związku z tym płynący tam prąd jest mały. Straty mocy w uzwojeniach wirnika zależne od kwadratu prądu są więc pomijalne. Podczas badań przy zmniejszaniu napięcia straty w miedzi wirnika możemy pominąć tylko wtedy, gdy prędkość obrotowa, a więc i poślizg, utrzymują się na stałym poziomie. Przy małym napięciu zasilającym, gdy poślizg zaczyna wzrastać, straty w miedzi wirnika również szybko rosną i tym tłumaczy się wzrost prądu przy zmniejszaniu napięcia.

4.6.2. Pomiar charakterystyk roboczych

Charakterystykami roboczymi silnika asynchronicznego nazywany zależności obrotów n , mocy pobranej P_1 , poślizgu s , mocy użytecznej na wale P_2 , prądu I pobranego przez silnik, współczynnika mocy $\cos\varphi$ i sprawności η od momentu obciążającego silnik M przy znamionowym napięciu zasilającym U_{1N} i przy stałej znamionowej częstotliwości f_{1N} (n , P_1 , P_2 , s , I , $\cos\varphi$ i $\eta = f(M)$ przy $U_{1N} = \text{const}$ i $f_{1N} = \text{const}$).

Pomiary wykonujemy w układzie pomiarowym przedstawionym na rysunku 4.10. Silnik obciążamy hamownicą maszynową od biegu jałowego do takiej wartości momentu hamującego, przy której prąd silnika osiąga 1,2 prądu znamionowego. Napięcie podczas

pomiarów należy utrzymywać stałe i równe napięciu znamionowemu U_{IN} . Wyniki pomiarów wpisać do tabeli 4.2.

$U_{IN} = \text{const} = \dots\dots\dots \text{V}, f_{IN} = \text{const} = \dots\dots\dots \text{Hz}$ Tab. 4.2

Lp.	Pomiary							Obliczenia						
	I_1	I_2	I_3	P_{11}	P_{12}	n	M	I	P_1	ω	$\cos\varphi$	s	P_2	η
	A	A	A	W	W	1/min	Nm	A	W	rad/s	–	–	W	%
1.														
2.														
3.														
...														

Przy obliczeniach należy skorzystać ze wzorów:

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \quad \text{- średni prąd silnika;}$$

$$P_1 = P_{11} \pm P_{12} \quad \text{- moc pobrana z sieci zasilającej;}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot n \quad \text{- prędkość kątowna wału;}$$

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I} \quad \text{- współczynnik mocy}$$

$$P_2 = M \cdot \omega \quad \text{- moc na wale silnika;}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% \quad \text{- sprawność silnika;}$$

$$s = \frac{f_2}{f_1} \cdot 100\% = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\% \quad \text{- poślizg silnika.}$$

gdzie: f_2 – częstotliwość prądu w wirniku, $f_1=50$ Hz częstotliwość sieci zasilającej, n_1 - prędkość obrotowa pola wirującego, n - prędkość obrotowa wału silnika.

Na podstawie wyników pomiarów i obliczeń należy wykreślić w jednym układzie współrzędnych charakterystyki $n, s, \cos\varphi, I, \eta=f(M)$. Przykładowe charakterystyki robocze zostały przedstawione na rys. 4.4 a uzasadnienie ich przebiegów w punkcie 4.2.