

Maria J. Zielińska, Wojciech G. Zieliński
Politechnika Lubelska, Lublin

POŚLIZGOWA CHARAKTERYSTYKA ADMITANCJI STOJANA SILNIKA INDUKCYJNEGO UZYSKANA PRZY ZASTOSOWANIU SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

SLIP CHARACTERISTIC OF INDUCTION MOTOR ADMITTANCE STATOR OBTAINED WITH THE APPLICATION OF COMPUTER SIMULATION

Abstract: Slip characteristic of induction motor admittance is the admittance locus at varied slip and constant frequency of feeding voltage. Circle diagram can graphically represent the characteristic only in the case when electromagnetic parameters of a machine are constant. Circle diagram makes an important tool at the evaluation of an asynchronous motor operation. Based on the diagram it is possible to find for an arbitrary slip not only values of electrical parameters but also mechanical parameters such as torque, mechanical power and rotational speed. The paper presents a comparative analysis of classical methods for circle diagram elaboration and of their accuracy. Computer simulation of an admittance slip characteristic has been performed with the Matlab-Simulink software, based on dependences that determine admittance of a motor. The analysis concerns conditions when equivalent network parameters of an asynchronous motor are constant and the characteristic is represented by a circle. When electromagnetic parameters of a motor are not constant then the characteristic essentially differs from a typical circle diagram. It mainly concerns a squirrel-cage motor with closed slots in the rotor, fed with high-frequency voltage. In the mentioned case saturation of the closure occurs under the influence of a leakage flux. It has been shown that a shape of the characteristic depends on many parameters of a motor as well as on the way the leakage reactance changes.

1. Wstęp

Poślizgowa charakterystyka admitancji stojana jest miejscem geometrycznym admitancji przy poślizgu zmieniającym się od $+\infty$ do $-\infty$ i stałej częstotliwości napięcia zasilającego. Obraz tej charakterystyki dla silnika indukcyjnego pierścieniowego, jest wykresem kołowym tylko w przypadku stałych parametrów elektromagnetycznych maszyny.

Wykres kołowy można sporządzić na podstawie obliczeń lub w oparciu o pomiary laboratoryjne. W obu przypadkach punktem wyjścia są charakterystyczne stany pracy czyli bieg jałowy i stan zwarcia. W celu jednoznacznego określenia obu punktów konieczna jest znajomość prądu pobieranego w stanie jałowym oraz prądu zwarcia, a także współczynników mocy dla tych stanów pracy. Wykres ten jest ważnym narzędziem przy ocenie pracy silnika indukcyjnego. Na jego podstawie można odczytać, dla dowolnego poślizgu, nie tylko wielkości elektryczne, lecz również istotne parametry mechaniczne. Ponadto wyznaczyć można charakterystyki elektromechaniczne i regulacyjne bez konieczności wykonywania pomiarów przy obciążonym silniku. W artykule porównano pod względem konstrukcji oraz ich dokładności kła-

syczne metody rysowania wykresów kołowych. Komputerowa symulacja poślizgowej charakterystyki admitancji stojana została wykonana z wykorzystaniem programu Matlab-Simulink w oparciu o zależności określające admitancję silnika.

Analiza uwzględnia dwa przypadki kiedy parametry schematu zastępczego silnika są stałe i charakterystyka jest kołem oraz warunku gdy reaktancja rozproszenia i rezystancja wirnika ulega zmianie wówczas przebieg tej charakterystyki znacznie odbiega od typowego wykresu kołowego.

Dotyczy to głównie silników klatkowych zasilanych. Posiadają one głębokie i pół lub całkowicie zamknięte żłobki w wirniku. Występuje wówczas zjawisko wypierania prądu i nasycenia przesmyku nad prętami klatki pod wpływem strumienia rozproszenia.

2. Porównanie metod konstrukcji wykresów kołowych

Istnieje wiele odmian wykresów kołowych, a ich rodzaje różnią się między sobą zarówno pod względem sposobu konstrukcji, uproszczeń

i modyfikacji schematu zastępczego, położenia środka koła jak również dokładności [1] [4].

Główne założenia, na których oparte są zasady tworzenia wykresów kołowych są następujące:

- prądy, napięcia i strumienie zmieniają się sinusoidalnie przez co pomija się wpływ wyższych harmonicznych na moment obrotowy,
- obwody magnetyczne są nienasycone czyli prądy i wywołane przez nie strumienie mają przebieg sinusoidalny,
- uzwojenia są symetryczne,
- strumień magnetyczny w szczelinie powietrznej zmienia się sinusoidalnie,
- parametry schematu zastępczego są wielkościami stałymi, a wirnik jest reprezentowany przez jedną gałąź R, L,
- straty na histerezę i prądy wirowe w rdzeniu wirnika są pomijalnie małe.

Analiza opierająca się na typowym schemacie zastępczym silnika indukcyjnego pozwala określić prąd pobierany I_s który sprowadza się do postaci wektorowej przedstawionej w postaci zależności (1):

$$I_s = U \frac{a + fs}{c + ds} \quad (1)$$

gdzie a, f, c, d są to wektorowe parametry obwodu, wyrażone jako: $a = A + ja$, $f = F + jf$, $c = C + jc$, $d = D + jd$.

Wartości tych parametrów w odniesieniu do schematu zastępczego i założeniu że $R_{Fe} = \frac{1}{g}$

oraz $X_\mu = \frac{1}{b}$ wynoszą odpowiednio:

$$A = R_2'g, \quad a = R_2'b$$

$$F = 1 + bX_2', \quad f = gX_2'$$

$$C = R_2' + R_2'R_1 + R_2'X_1b$$

$$c = R_2'R_1b - R_2'X_1g$$

$$D = R_1 + X_2'R_1b - X_2'X_1g$$

$$d = X_1 + X_2' + X_2'R_1g + X_2'X_1b$$

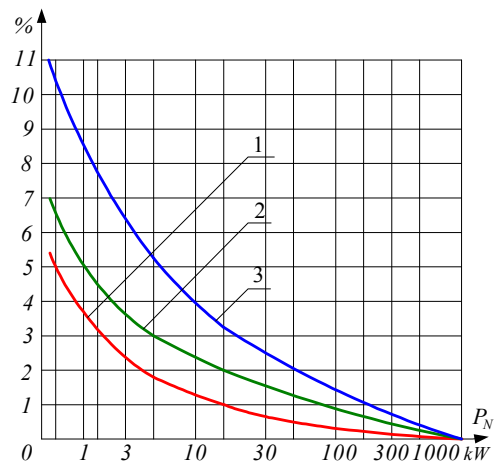
Równanie (1) przy stałych parametrach obwodu jest kołem. Istnieje możliwość wyznaczenia, w układzie współrzędnych prostokątnych charakterystyki tego równania.

Klasyczne metody rysowania wykresów kołowych sprowadzają się jednak do wyznaczenia środka okręgu i określenia położenia dwóch punktów odpowiadających stanowi jałowemu i próbie zwarcia.

Przeprowadzone poniżej porównanie dotyczy: dokładnego wykresu Ossany, dokładnego wykresu Kostienki, uproszczonej metody Kostienki, poprawionej i uproszczonej metody Kostienki, wykresu kołowego Heylanda oraz wykresu Richtera opartego na metodzie Heylanda.

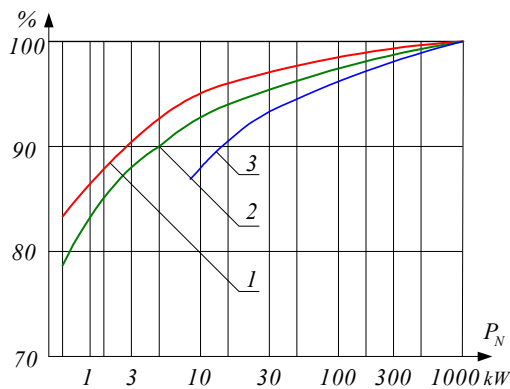
Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wyniki porównania dotyczące różnic w odczytywanych wartościach współczynnika mocy oraz maksymalnej mocy mechanicznej dla silników o różnych mocach znamionowych.

Wykresem odniesienia dla wszystkich omawianych przypadków jest wykres Ossany.



Rys.1. Różnice w odczytanych wartościach $\cos \varphi$ z wykresów kołowych w zależności od mocy znamionowej silników 1- wykres Kostienki uproszczony i poprawiony oraz wykres Richtera, 2- wykres Heylanda dla $R_1 \neq 0$, 3- wykres Heylanda dla $R_1 = 0$

Wykresy oznaczone jako 1 (rys.1) osiągają w stosunku do dokładnego wykresu Ossany błąd mniejszy od 1% dopiero przy mocach znamionowych silników większych od około 15 kW, dla wykresu Heylanda przy $R_1 \neq 0$ przy mocy około 50 kW natomiast dla $R_1 = 0$ przy około 70 kW.



Rys.2. Różnice w odczytanych wartościach mocy maksymalnej na wale silnika z różnych wykresów kołowych w odniesieniu do wykresu Ossany. Oznaczenia linii analogicznie jak na rysunku 1

Błędy w odczycie maksymalnej mocy na wale silnika dla różnych metod konstrukcji wykresów są bardzo małe przy mocach znamionowych silników powyżej 100 kW.

3. Postać ogólna poślizgowej charakterystyki admitancji stojana

Analiza schematu zastępczego maszyny indukcyjnej o nienasyconym obwodzie magnetycznym wirnika pozwala na uzależnienie admitancji stojana od poślizgu wirnika [4].

Na płaszczyźnie Gaussa miejsce geometryczne admitancji stojana przy poślizgu zmieniającym się w zakresie $s \in (-\infty, +\infty)$ jest przedstawione przez poślizgową charakterystykę admitancji. Jej obrazem graficznym jest koło, a ogólna postać wyraża się wzorem (2):

$$\underline{Y}(s) = \frac{\underline{I}_s(s)}{\underline{U}_s(s)} = G(s) + jB(s) = \frac{\underline{A} + s\underline{B}}{\underline{C} + s\underline{D}}$$

gdzie: (2)

$G(s)$, $B(s)$ - składowe czynne i bierne admitancji stojana $\underline{Y}(s)$,

\underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} - parametry zespolone niezależne od poślizgu i wynikające ze schematu zastępczego maszyny o znanych elementach. Parametry te można wyznaczyć sprowadzając zależność określającą admitancję $Y(s)$ do postaci określonej zależnością (2).

Parametry zespolone określone są jako:

$$\underline{A} = \frac{I}{\underline{Z}_{1F}}, \quad \underline{B} = \frac{\underline{Z}'_{2F}}{R'_2 \underline{Z}_{1F}}, \quad \underline{C} = I + \frac{R_1}{\underline{Z}_{1F}}$$

$$\underline{D} = \frac{R_1 \underline{Z}'_{2F}}{R'_2 \underline{Z}_{1F}} + \left(1 - \frac{\underline{Z}_{12}^2}{\underline{Z}_{1F} \underline{Z}'_{2F}} \right) \frac{\underline{Z}'_{2F}}{R'_2} \quad (3)$$

Wartości poszczególnych impedancji występujące w zależności (3) otrzymane po przekształceniu schematu zastępczego wynoszą:

$$\underline{Z}_{12} = \frac{jX_\mu R_{Fe}}{jX_\mu + R_{Fe}}, \quad \underline{Z}_{1F} = jX_1 + \frac{X_\mu^2}{jX_\mu + R_{Fe}},$$

$$\underline{Z}'_{2F} = jX'_2 + \frac{X_\mu^2}{jX_\mu + R_{Fe}}$$

Istnieje również inny sposób graficznego przedstawienia tej charakterystyki. Opiera się ona na wskazach środka okręgu i promienia.

Na płaszczyźnie Gaussa miejsce geometryczne $Y(s)$ zatacza krzywą o punktach charakterystycznych:

$$Y(s=0) = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}, \quad Y(s=\infty) = \frac{\underline{B}}{\underline{D}},$$

$$Y(s=1) = \frac{\underline{A} + \underline{B}}{\underline{C} + \underline{D}}$$

Równanie (2) można zapisać w postaci (4) gdzie wskazy \underline{M} i \underline{K} wyznaczają okrąg $Y(s)$:

$$Y(s) = \underline{M} + \underline{K} \frac{\underline{C}^* + s\underline{D}^*}{\underline{C} + s\underline{D}} \quad (4)$$

gdzie: \underline{C}^* , \underline{D}^* są to zespolone parametry sprzężone \underline{C} i \underline{D} .

4. Symulacja poślizgowej charakterystyki admitancji stojana w oparciu o program Matlab-Simulink

Na podstawie rozważań teoretycznych przedstawionych w poprzednim rozdziale wykonano symulację poślizgowej charakterystyki admitancji stojana silnika indukcyjnego klatkowego w oparciu o dwa sposoby [3], [5].

Pierwszy z nich opiera się na wyrażeniu przedstawionej jako formuła (2) czyli na podstawowej zależności wynikającej ze schematu zastępczego maszyny indukcyjnej.

Druga metoda wykorzystuje wzór (3) środka wskazu okręgu i promienia. Przedmiotem analizy był silnik typu PTShPp 30-36 KM 120 o dużej prędkości obrotowej stosowany do szlifowania otworów i bieżni łożysk tocznych o następujących danych znamionowych [6]:

$$U_N = 153 / 183V, \quad P_N = 2,7 / 3,3kW,$$

$$f_N = 500 / 600Hz$$

i parametrach schematu zastępczego:

$$R_1 = 0,1086\Omega, \quad R_2' = 0,09271\Omega,$$

$$X_{\mu} = 11,08\Omega, \quad R_{Fe} = 291,65\Omega,$$

$$X_1 = 1,67\Omega, \quad X_2' = 29,36\Omega.$$

Konstrukcja takich silników, w porównaniu z typowymi silnikami małej mocy, różni się znacznie na skutek:

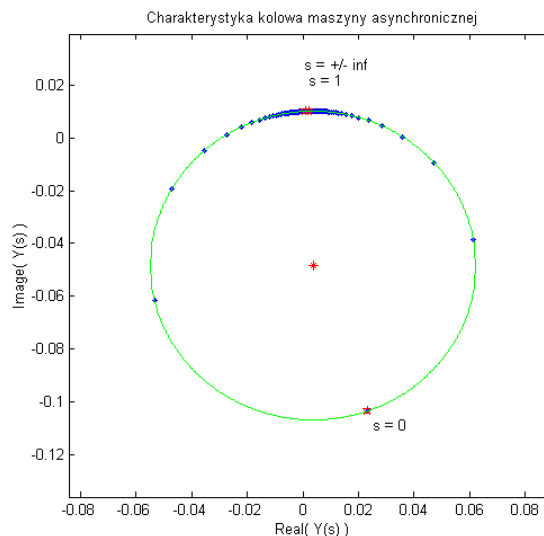
- wprowadzenia intensywnego chłodzenia dla zmniejszenia wymiarów gabarytowych silnika,
- zastosowania dodatkowych elementów ułatwiających szlifowanie,
- konieczności ograniczenia drgań i hałasu,
- dużej częstotliwości napięcia zasilania.

Ze względu na duże prędkości obrotowe używane przez tego typu silniki stosuje się smarowanie łożysk mgłą olejową, będącą mieszaniną oleju, nafty i sprężonego powietrza.

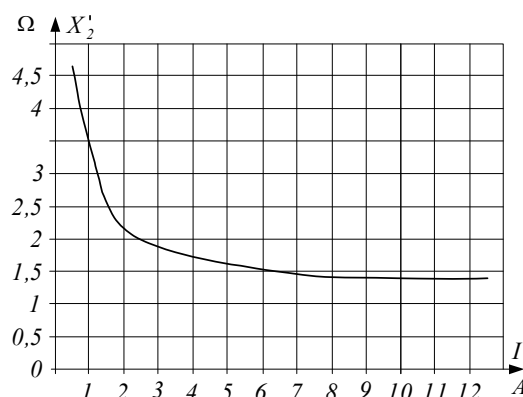
Konieczność ograniczenia hałasu i drgań powoduje że w silnikach stosuje się żłobki zamknięte w wirniku. Rozwiązanie takie zmniejsza również tarcie wirnika o mgłą olejową, obniżając straty mechaniczne oraz zwiększa wytrzymałość mechaniczną wirnika.

Poślizgowe charakterystyki admitancji otrzymane na drodze symulacji komputerowej dla obu wspomnianych powyżej przypadków pokazano na rys.3.

W silniku zasilanym napięciem o dużej częstotliwości żłobki w wirniku są zamknięte i dlatego też występuje nasycenie rdzenia w przesmyku jego zamknięcia. Zostało więc ono uwzględnione przy symulacji charakterystyki. Zmiany reaktancji wirnika X_2' w zależności od prądu pobieranego przez silnik I_s wyznaczone na podstawie badań doświadczalnych przedstawiono na rys.4.



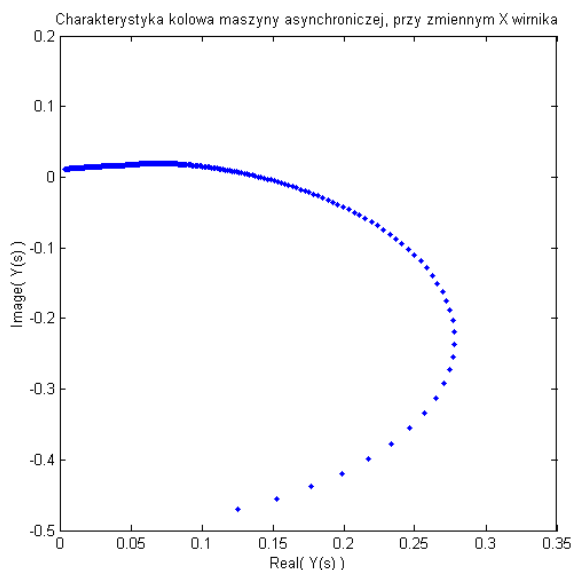
Rys.3. Poślizgowe charakterystyki admitancji stojana silnika indukcyjnego uzyskane na podstawie zależności (2) określającej admitancję stojana (charakterystyka przedstawiona w postaci punktów) oraz (3) na podstawie wskazów środka i promienia okręgu (jako linia ciągła)



Rys.4. Zależność reaktancji wirnika sprawowanej na stronę stojana w funkcji prądu stojana $X_2' = f(I_s)$

Po uwzględnieniu zmiennych parametrów schematu zastępczego asynchroniczna charakterystyka admitancji stojana znacznie odbiega od wykresu kołowego (rys.5).

Z wykresu zamieszczonego na rys.5. widać wyraźnie że zmieniająca się reaktancja wirnika silnika X_2' wpływa w znaczny sposób na kształt omawianej charakterystyki.



Rys.5. Poślizgowa charakterystyka admittance stojana silnika asynchronicznego typu PTShP 30-36 KM 120 przy uwzględnieniu zmian reaktancji wirnika w wyniku nasycenia rdzenia

5. Wnioski końcowe

1. Wykres kołowy i jego prawidłowa konstrukcja jest bardzo istotna, gdyż na jego podstawie można ocenić szereg ważnych parametrów dotyczących maszyny indukcyjnej.
2. Istnieje kilka metod wykreślenia wykresów kołowych. Różnią się one od siebie konstrukcją, sposobem wyznaczania środka koła ale przede wszystkim dokładnością. Najdokładniejsze i najczęściej stosowane są dwie metody: metoda Ossany oraz dokładna metoda Kostienki.
3. Komputerową symulację poślizgowej charakterystyki admittance stojana wykonano w oparciu o program Matlab. Dla stałych parametrów schematu zastępczego charakterystyka ta jest wykresem kołowym.
4. Przy symulacji charakterystyki uwzględniono również bardziej dokładny przypadek który uwzględnia zjawisko nasycenia rdzenia. Zjawisko to wpływa na reaktancję wirnika, zmieniającą się w zależności od wartości prądu. Charakterystyka ta nie jest wówczas kołem, a jej kształt zależny jest od wielu parametrów maszyny i od tego w jaki sposób się one zmieniają.
5. Wykorzystany do wykonania symulacji program Matlab umożliwia testowanie algorytmów, modelowanie i symulację, analizę i wizualizację danych, sygnałów oraz wyników obliczeń. Wpływa to na możliwość

rozbudowy przedstawionych symulacji dotyczących np. uwzględnienia wielu zmiennych parametrów schematu zastępczego silnika indukcyjnego związanych przykładowo ze zjawiskiem wypierania prądu.

6. Literatura

- [1]. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne, tom III, Silniki indukcyjne*, Warszawa 1964r;
- [2]. Głowacki A.: *Obliczenia elektromagnetyczne silników trójfazowych*, Warszawa 1993r;
- [3]. Mrozek B, Mrozek Z.: *Matlab5.x, Symulink 2.x, poradnik użytkownika*, Warszawa 1998r;
- [4]. Paszek W.: *Stany nieustalone w maszynach elektrycznych, część I, Maszyny asynchroniczne*, Gliwice 1981r;
- [5]. Tarnowski W.: *Symulacja i optymalizacja w Matlab'ie*, Sopot 2001r;
- [6]. Zielińska M.: *Cechy szczególne silników indukcyjnych zasilanych napięciem o dużej częstotliwości*, rozprawa doktorska, Gliwice 1986r.