

Maria Jolanta Zielińska, Wojciech Zieliński
Politechnika Lubelska, Lublin

WPLYW STRUMIENIA ZBOCZNIKOWANEGO NA PARAMETRY SCHEMATU ZASTĘPCZEGO DLA SILNIKÓW KLATKOWYCH O DUŻYCH PRĘDKOŚCIACH OBROTOWYCH

THE EFFECT OF A SHUNTED FLUX ON THE PARAMETERS OF AN EQUIVALENT SCHEME FOR SQUIRREL-CAGE HIGH-SPEED MOTORS

Abstract: Squirrel-cage high-speed motors have found their application among others in grinders for precise processing of bearing rings. These are two-pole or, more rarely, four-pole squirrel-cage induction motors with a maximum power of up to $2kW$, with closed rotor slots and speeds ranging from 12 to several hundred rpm. They are supplied with $200 \div 2000Hz$ frequency voltage from motor or thyristor frequency converters.

Closed rotor slots decrease the magnetising current, pulsation losses and losses caused by friction against the cooling agent; they also decrease motor noise and increase the mechanical strength of the rotor.

Because of the use of closed rotor slots in the rotor and the particular structural dimensions of these machines, part of the main flux closes over the slot. Superfluous shunted flux is thus created, which does not participate in inducing voltage in a rotor cage bar. This results in an increase in the value of the scatter flux and decreased motor power. It is then necessary to take this flux into consideration while analysing the properties of high-speed induction motors.

This article describes the essence of the formation of a shunted flux and shows the relationships which allow its calculation. On this basis, the effect of a shunted flux on the parameters of an equivalent scheme of a motor was established.

1. Wstęp

Silniki klatkowe o dużych prędkościach obrotowych stosowane są między innymi w szlifierkach do precyzyjnej obróbki pierścieni łożysk tocznych. Są to silniki indukcyjne klatkowe o mocach do $2kW$, dwubiegunowe rzadziej czterobiegunowe o zamkniętych żłobkach wirnika i prędkościach obrotowych zawierających się w granicach od 12 do kilkuset obrotów na minutę. Zasilane są one napięciem o częstotliwości $200Hz$ do $2kHz$ z maszynowych, bądź tyrystorowych przetwornic częstotliwości. Ponadto silniki te są wykorzystywane do napędu [1]:

- obrabiarek skrawających bardzo twarde materiały (prędkości obrotowe do 150000 min^{-1} oraz moce w przedziale $10 \div 4000 \text{ W}$),
- ultrawirówek do separacji zawieszin używane w laboratoriach (o mocach do 200W),
- kompresorów oraz pomp odśrodkowych,
- pomp próżniowych.

Światowy postęp w stosowaniu technologii wysokoobrotowych doprowadził do wytwarzania silników elektrycznych o maksymalnej prędkości obrotowej do 400000 min^{-1} .

Stosunkowo skromna jest literatura dotycząca tego typu silników.

Największe częstotliwości, czyli najwyższe prędkości obrotowe wynikają z potrzeb technologicznych, a ograniczone są możliwościami wykonawczymi. Silniki te pracują w specyficznych warunkach, posiadają swoją specyficzną konstrukcję oraz niektóre własności odbiegające od maszyn indukcyjnych klatkowych zasilanych napięciem o częstotliwości 50 Hz [5].

Zamknięcia żłobków wirnika są korzystne ze względu na:

- a) zmniejszenie prądu magnesującego,
- b) zmniejszenie strat pulsacyjnych,
- c) znaczne ograniczenie tarcia wirnika o czynnik chłodzący czyli strat mechanicznych,
- d) obniżenie poziomu hałasu,
- e) zwiększanie wytrzymałości mechanicznej wirnika.

W omawianych silnikach rolę czynnika chłodzącego spełnia mgła olejowa, która również smaruje łożyska silnika. Duży jej przepływ uzyskuje się dzięki gładkiemu wirnikowi.

Z uwagi na specyficzną budowę wirnika i wymiary konstrukcyjne tych maszyn (mała wysokość jarzma i mała liczba biegunów) część strumienia głównego zamyka się nad żłobkiem. Powstaje więc nieużyteczny strumień z bocznikowany, który nie bierze udziału w indukowaniu napięcia w pręcie klatki. Powoduje to wzrost wartości strumienia rozproszenia i zmniejszenie mocy silnika. Koniecznym jest więc uwzględnienie tego strumienia przy analizie własności silników indukcyjnych szybkoobrotowych.

W artykule opisano istotę powstawania strumienia z bocznikowanego oraz przedstawiono zależności umożliwiające jego obliczanie. Na tej podstawie dokonano ustalenia wpływu istnienia strumienia z bocznikowanego na parametry schematu zastępczego silnika.

2. Powstawanie strumienia z bocznikowanego

W maszynie elektrycznej powstają dwa rodzaje strumieni: strumień główny skojarzony z obwodem stojana i wirnika odpowiedzialny za powstanie napięcia indukowanego w uzwojeniu wirnika oraz strumień rozproszenia skojarzony tylko z jednym uzwojeniem.

Na rysunku 1 przedstawiono linie głównego strumienia magnetycznego dla wycinka obwodu silnika.

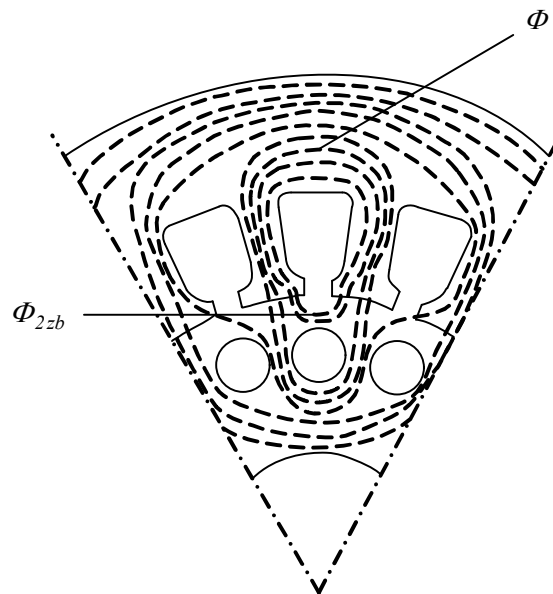
Istnieje część linii magnetycznych, które nie są sprzężone z prętami wirnika i zamykają się w obszarze przesmyku zamknięcia żłobka. W myśl definicji nie jest to strumień rozproszenia, gdyż powstaje on wskutek przepływu prądu w uzwojeniu stojana.

Część strumienia głównego Φ przechodzącego ze stojana do wirnika jest tracona w wirniku, dlatego stratę tę można nazwać strumieniem z bocznikowanym przez zamknięcie żłobków Φ_{2zb} .

Ze względu na małą wysokość jarzma wirnika h_2 oraz małą liczbę biegunów silnika, słuszna jest zależność (1):

$$\frac{\Phi_{2zb}}{\Phi_2} \approx \frac{b_2}{h_2} \quad (1)$$

gdzie b_2 jest wysokością zamknięcia żłobka.



Rys. 1. Przebieg strumienia głównego dla części obwodu silnika

Współczynnik z bocznikowania strumienia σ_{2zb} określono jako:

$$\sigma_{2zb} = \frac{\Phi_{2zb}}{\Phi} \quad (2)$$

Z dużym przybliżeniem strumienie: Φ_2 oraz Φ_{2zb} sumują się algebraicznie:

$$\Phi \approx \Phi_2 + \Phi_{2zb} \quad (3)$$

Uwzględniając powyższe wyrażenia otrzymuje się zależność określającą współczynnik z bocznikowania strumienia w postaci:

$$\sigma_{2zb} = \frac{b_2}{h_2 + b_2} \quad (4)$$

Względna wartość strumienia z bocznikowanego przez zamknięcie żłobków dla kilku silników o różnych mocach znamionowych i dużych prędkościach obrotowych przedstawia tabela 1. Współczynnik σ_{2zb} wzrasta dla silników o coraz większych prędkościach obrotowych, od około 6% dla silnika o prędkości synchronicznej $18000 \frac{obr}{min}$ do około 10% dla silnika o prędkości $90000 \frac{obr}{min}$.

Tablica 1.

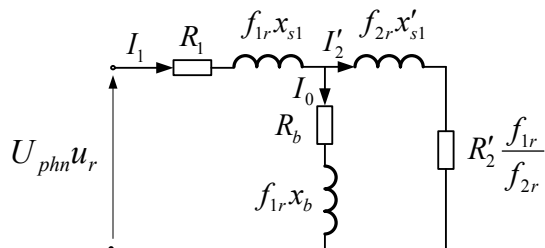
P_N	n_1	b_2	h_2	σ_{2zb}
kW	10^3 $\frac{\text{obr}}{\text{min}}$	mm	mm	–
5,7	18	0,50	8,15	0,058
4,5	24	0,50	7,75	0,061
2,7	30	0,45	4,9	0,084
1,8	36	0,45	4,9	0,084
1,6	42	0,45	4,9	0,084
1,4	51	0,45	4,9	0,084
1,1	60	0,45	3,95	0,102
0,9	75	0,40	3,80	0,095
0,72	90	0,40	3,80	0,095

3. Wpływ strumienia zbocznikowanego na parametry schematu zastępczego

W schematach zastępczych silników asynchronicznych zasilanych napięciem o częstotliwości 50Hz zwykle pomija się rezystancję gałęzi poprzecznej R_{Fe} reprezentującą straty w rdzeniu, gdyż straty te stanowią niewielki udział w całkowitych stratach [2]. Dla silnika klatkowego wysokoobrotowego rezystancja ta została uwzględniona (rys. 2).

W przypadku zasilania silnika napięciem niższym od znamionowego, w stanie ustalonym uwidacznia się znaczny wpływ rezystancji uzwojeń stojana [5].

Na rysunku 2 przedstawiono schemat zastępczy silnika wysokoobrotowego z uwzględnieniem wpływu zmian napięcia i częstotliwości źródła zasilania.



Rys. 1. Schemat zastępczy silnika klatkowego wysokoobrotowego z uwzględnieniem zmian napięcia i częstotliwości źródła zasilania

Napięcie zasilania wyraża się zależnością: $U_{1n} = U_{ph} u_r$, natomiast częstotliwość $f_1 = f_n f_{1r}$, przy czym u_r , f_{1r} są względnymi wartościami napięcia i częstotliwości źródła zasilania.

Wartość rezystancji R_b oraz reaktancji X_b określa zależność (5):

$$R_b = \frac{R_{Fe}}{1 + \left(\frac{R_{Fe}}{X_\mu}\right)^2} \quad (5)$$

$$X_b = \frac{X_\mu}{1 + \left(\frac{X_\mu}{R_{Fe}}\right)^2}$$

Napięcie indukowane w fazie stojana silnika wyraża zależność (6), natomiast napięcie indukowane w wirniku formuła (7):

$$U_{i1} = 4,44 f_1 z_1 \Phi \xi_1 \quad (6)$$

$$U_{i2} = 4,44 f_2 z_2 \Phi \xi_2 \quad (7)$$

gdzie: f_1, f_2 - częstotliwości napięcia zasilającego i częstotliwość w wirniku, $z_1, z_2 = \frac{1}{2}$ -

liczba zwojów fazy stojana i wirnika, ξ_1, ξ_2 - współczynniki odpowiednio uzwojenia stojana i wirnika, który jest równy współczynnikowi skosu żłobków ξ_{2s} .

Przekładnię napięciową określa zależność (8):

$$g_u = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = 2 \frac{z_1 \xi_1}{\xi_{2s} (1 - \sigma_{2zb})} \quad (8)$$

We wzorze (8) występuje współczynnik zbocznikowania strumienia σ_{2zb} . Jeżeli w wirniku występują żłobki otwarte, wówczas $\sigma_{2zb} = 0$ i zależność określająca przekładnię napięciową sprowadza się do postaci znanej dla silników klasycznych.

Wprowadza się zastępczy współczynnik uzwojenia wirnika ξ_{2z} określony jako:

$$\xi_{2z} = \xi_{2s} (1 - \sigma_{2zb}) \quad (9)$$

i wówczas przekładnia napięciowa wyrażona jest zależnością:

$$g_u = 2 \frac{z_1 \xi_1}{\xi_{2z}} \quad (10)$$

Zastępczy współczynnik uzwojenia odzwierciedla rzeczywiste, mniejsze niż w silniku klasycznym, skojarzenie strumienia głównego z klatką wirnika.

Przy obciążeniu silnika występuje oddziaływanie pola wirnika na pole stojana. Strumień oddziaływania twornika korzysta również z zamknięć żłobków, którymi się także bocznikuje. Wskutek tego jego oddziaływanie jest mniejsze niż w odpowiednim silniku klasycznym i stanowi w przybliżeniu $(1 - \sigma_{2zb})$ tego oddziaływania.

Uwzględniając słabsze oddziaływanie twornika, rzeczywisty przepływ wirnika sprowadzony na stronę stojana określa formuła (11):

$$I_2' m_1 z_1 \xi_1 = I_2 m_2 z_2 \xi_2 (1 - \sigma_{2zb}) \quad (11)$$

Z powyższego wynika, że:

$$I_2' = I_2 \frac{m_2 \xi_{2s} (1 - \sigma_{2zb})}{m_1 2 z_1 \xi_1} \quad (12)$$

Jak widać, strumień zbocznikowany przez przesmyk zamknięcia żłobków wirnika nie zmienia jakościowo parametrów schematu zastępczego. Widoczny jest tylko wzrost wartości parametrów wirnika sprowadzonych na stronę stojana w związku ze zmianą przekładni napięciowej.

4. Wnioski końcowe

Na podstawie analizy przeprowadzonej w artykule wynikają następujące wnioski:

1. Zastosowanie żłobków zamkniętych w wirnikach silników klatkowych o dużych prędkościach obrotowych powoduje powstanie strumienia zbocznikowanego.
2. Z uwagi na specyficzną budowę wirnika i wymiary konstrukcyjne tych maszyn (mała wysokość jarzma i mała liczba biegunów) część strumienia głównego zamyka się nad żłobkiem. Powstaje więc nieużyteczny strumień zbocznikowany, który nie bierze udziału w indukowaniu napięcia w pręcie klatki.
3. Strumień ten powoduje wzrost wartości strumienia rozproszenia i zmniejszenie mocy silnika. Koniecznym jest więc uwzględnienie tego strumienia przy analizie własności silników indukcyjnych szybkoobrotowych.

4. Konfiguracja schematu zastępczego nie zmienia się, wzrastają natomiast wartości parametrów wirnika przeliczone na stronę stojana, gdyż wzrasta przekładnia napięciowa.

5. Literatura

- [1]. Dąbrowski M., Rudeński A. *Oprogramowanie do projektowania silników indukcyjnych wysokoobrotowych*. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy KOMEL, Maszyny Elektryczne, Zeszyty problemowe Nr 80/2008, Katowice – maj 2008.
- [2]. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne, Tom III: Silniki indukcyjne*, WNT, Warszawa 1964.
- [3]. Zielińska M., Zieliński W.: *Chosen electromagnetic parameters of asynchronous high-speed motors of reduced noise level*. Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection the Second Conference, str 261-264, Nałęczów 1997.
- [4]. Zielińska M.: *Własności mechaniczne szybkoobrotowych indukcyjnych silników klatkowych*. XI Seminarium Techniczne BOBRME KOMEL. Katowice 2001.
- [5]. Zielińska M.: *Cechy szczególne silników indukcyjnych zasilanych napięciem o dużej częstotliwości*, rozprawa doktorska, Gliwice 1986r.
- [6]. Zielińska M., Zieliński W.: *Metoda określenia parametrów elektromagnetycznych szybkoobrotowych silników asynchronicznych uwzględniająca zjawisko nasycenia rdzenia*. Materiały III Sympozjum Sterowanie i Monitorowanie Układów Przemysłowych SM'99, Kazimierz Dolny.