

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

METODA WYZNACZANIA REZYSTANCJI WIRNIKA Z UWZGLĘDNIENIEM WYPIERANIA PRĄDU DLA SILNIKÓW SZYBKOOBROTOWYCH

A METHOD FOR ROTOR RESISTANCE DETERMINATION IN HIGH-SPEED MOTORS WITH SKIN EFFECT TAKEN INTO ACCOUNT

Abstract: High speed motors are supplied with 400-1500Hz frequency voltage. They operate in special conditions and have a structure and properties that differentiate them from classic machines. In particular, they are distinguished by the high frequency of supply voltage, intensive cooling introduced to reduce the size of the motor, and closed rotor slots used to minimize vibrations and noise.

In the discussed motors, the closed rotor slot was replaced with an open slot due to saturation of the magnetic circuit by the slot leakage flux.

The resistance increase coefficient for rotor cage bar as a function of current flowing through the bar was estimated and then total rotor resistance was determined. Subsequently, the resistance calculated on the basis of geometric dimensions with skin effect taken under consideration was verified against results obtained from measurements.

It was proved that short-circuit resistance is not a constant and depends on the value and frequency of current. It also includes a component which derives from additional losses occurring in solid construction elements and in rotor cage bars. The paper also presents descriptions showing changes in short-circuit resistance as a function of the motor's current determined on the basis of measurements with parametrically variable frequency.

1. Wstęp

Silniki szybkoobrotowe zasilane są napięciem o częstotliwości 400-1500Hz.

Pracują one w specyficznych warunkach, posiadają własności oraz konstrukcję różniącą je od maszyn klasycznych.

Spowodowane jest to głównie przez dużą częstotliwość napięcia zasilającego, wprowadzenia intensywnego chłodzenia dla zmniejszenia wymiarów silnika oraz zastosowania żłobków zamkniętych w wirniku celem ograniczenia drgań i hałasu [2], [3].

Poniżej podjęto próbę określenia rezystancji wirnika w silnikach o dużych prędkościach obrotowych.

W rozpatrywanych silnikach z uwagi na nasytanie się obwodu magnetycznego przez strumień rozproszenia żłobkowego zastąpiono żłobek zamknięty w wirniku żłobkiem otwartym. Wyznaczono współczynnik wzrostu rezystancji pręta klatki wirnika w funkcji prądu płynącego przez ten pręt, a następnie całkowitą rezystancję wirnika.

W dalszej części rezystancja obliczona na podstawie wymiarów z uwzględnieniem wypierania prądu została zweryfikowana wynikami otrzymanymi na podstawie pomiarów.

Udowodniono, iż rezystancja zwarcia nie jest wielkością stałą i zależy od wartości i częstotliwości prądu. Zawiera ona również składową wynikającą ze strat dodatkowych występujących w litych elementach konstrukcyjnych i w prętach klatki wirnika.

Wyznaczenie rezystancji wirnika dla tego typu silników jest zagadnieniem dość złożonym.

Przedstawiono również charakterystyki obrazujące zmiany rezystancji zwarcia w funkcji prądu silnika wyznaczone w oparciu o badania laboratoryjne przy parametrycznie zmiennej częstotliwości.

2. Wyznaczenie rezystancji wirnika na podstawie wymiarów geometrycznych

Przedmiotem analizy był silnik typu PTShPd 24c 170 o następujących danych znamionowych:

$$P_N = 9kW, f_N = 800Hz, U_N = 245V,$$

$$n_N = 400 \frac{obr}{s}.$$

Na podstawie literatury [1] obliczono wartości rezystancji uzwojenia stojana R_l , rezystancję

pręta klatki R_p , rezystancję pierścienia zwiernającego między dwoma sąsiednimi prętami R_k oraz całkowitą rezystancję wirnika R'_2 .

Powyższe rezystancje wynoszą:

$$R_l = 0,11899 \Omega, R_k = 0,403 \cdot 10^{-5} \Omega,$$

$$R_p = 0,109 \cdot 10^{-3} \Omega, R'_2 = 0,07022 \Omega.$$

Wyznaczone parametry nie uwzględniają wpływu zmian częstotliwości napięcia zasilania. Wpływ ten w określonej temperaturze przy zadanych właściwościach materiałów przewodzących zależy głównie od średnicy przewodów nawojowych, wymiarów poprzecznego przekroju żłobków stojana i wirnika.

Uproszczona analiza pozwala na stwierdzenie iż wpływ częstotliwości na wspomniane parametry będzie znaczny. Uzwojenie wirnika stanowi bowiem klatka, której pręty mają znaczną średnicę w porównaniu ze średnicą przewodu nawojowego uzwojenia stojana.

Ponadto pręty klatki wirnika umieszczone są w żłobkach zamkniętych i wystąpi zjawisko nasycania się przesmyku nad prętami klatki pod wpływem strumienia rozproszenia.

Celem uproszczenia obliczeń wyznaczono współczynniki korygujące posługując się zastępczym otwarciem żłobka. Jest to takie zamknięcie przy którym spadek napięcia magnetycznego dla strumienia rozproszenia będzie równy spadkowi napięcia magnetycznego na szerokości zastępczego otwarcia żłobka.

3. Metoda zastępczego otwarcia żłobka

Przy przepływie prądu I_p w pręcie klatki wirnika umieszczonym w żłobku zamkniętym powstaje pole magnetyczne rozproszenia.

Korzystając z prawa przepływu przy znanej charakterystyce magnesowania blach stosowanych w wirniku obliczono zastępcze otwarcie żłobka określone w postaci zależności (1):

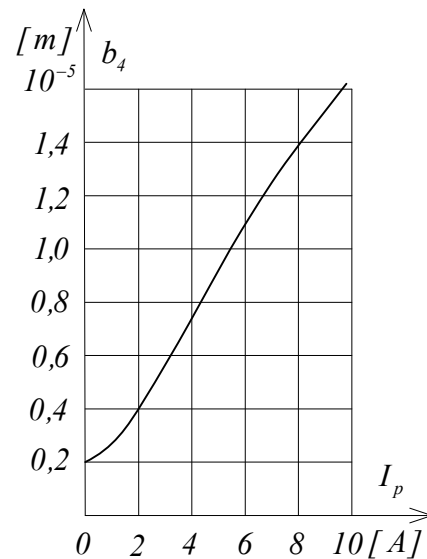
$$b_4 = \frac{I_p}{\phi} \mu_0 h_4 l_{Fe2} \quad (1)$$

gdzie:

h_4 - wysokość przesmyku zamknięcia żłobka,

l_{Fe2} - długość rdzenia wirnika.

Przebiegi zależności zastępczego otwarcia żłobka $b_4 = f(I_p)$ wyznaczoną na podstawie zależności (1) przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zależność zastępczego otwarcia żłobka od prądu w pręcie klatki wirnika badanego silnika

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono że kąt otwarcia żłobka dla całego zakresu zmian prądu od zera do wartości znamionowej zmienia się w zakresie od $0,02^\circ$ do $1,5^\circ$ i praktycznie nie powoduje zmian rezystancji.

Stwierdzono również że przesmyk nad żłobkiem wirnika ulega nasyceniu już przy stosunkowo małych prądach.

Znając zastępcze otwarcie żłobka obliczono współczynnik wzrostu rezystancji k_r dla zmiennego stanu nasycenia odwzorowanego w postaci zmieniającego się otwarcia żłobka [2]. Wartość tego współczynnika przy różnych częstotliwościach napięcia zasilania przedstawiono w tablicy 2.

Ponadto w tablicy tej zamieszczono obliczoną

wartość $\frac{R'_{2(W)}}{R'_2}$ obrazującą powiększenie

całkowitej rezystancji wirnika w odniesieniu do rezystancji obliczonej bez uwzględnienia zjawiska wypierania prądu.

Tablica 1.

f [Hz]	400	500	600	700	800
k_r	1,090	1,144	1,202	1,284	1,318
$\frac{R'_{2(W)}}{R'_2}$	1,057	1,079	1,105	1,140	1,155

Największy wzrost rezystancji wirnika występuje przy częstotliwości $f = 800\text{Hz}$.

Z powyższego wynika, że wzrost całkowitej rezystancji wirnika przy uwzględnieniu zjawiska wypierania prądu jest rzędu 15% przy częstotliwości $f = 800\text{Hz}$.

4. Rezystancja wirnika skorygowana w oparciu o badania laboratoryjne

Rezystancja wirnika R'_2 obliczana na podstawie wymiarów geometrycznych z uwzględnieniem zjawiska nasycenia rdzenia i wypierania prądu obciążona jest dużym błędem. Dlatego też wyznacza się ją w oparciu o badania doświadczalne.

Rezystancja ta jest wartością zastępczą wynikającą ze strat w uzwojeniu wirnika, strat dodatkowych uwarunkowanych wielkością prądów wirowych w przecie klatki wirnika indukowanych przez strumień rozproszenia oraz wielkością prądów wirowych indukowanych w maszynowych częściach konstrukcyjnych, w czołowych powierzchniach rdzenia przez strumień połączeń czołowych.

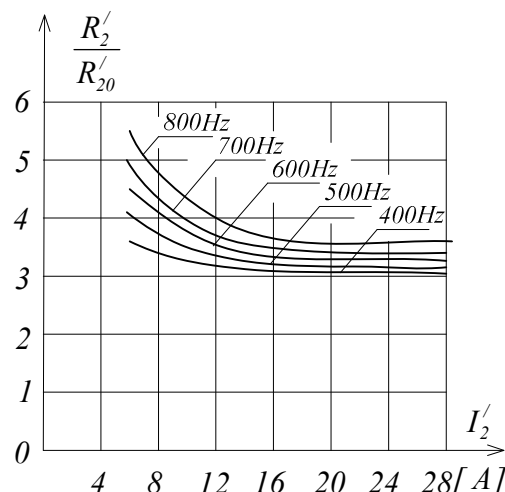
Z tego powodu rezystancja wirnika powiększa się w miarę zwiększania częstotliwości napięcia zasilającego i jest dodatkowo zależna od prądu wirnika. Przy zmniejszającym się prądzie zmniejsza się bowiem zastępcze otwarcie żłobka, powstaje dwuwymiarowe wypieranie prądu i w konsekwencji zwiększa się współczynnik k_r .

Współczynnik rezystancji wirnika obliczonej w odniesieniu do rezystancji pomierzonej jest dość duży i świadczy o powstawaniu w wirniku dodatkowych strat. Są one tym większe im wyższa jest częstotliwość prądu płynącego w wirniku.

Rezystancję wirnika obliczoną na podstawie wymiarów geometrycznych i skorygowaną po uwzględnieniu zjawiska wypierania prądu R'_{2o}

porównano z rezystancją pomierzoną R'_2 dla różnych wartości częstotliwości.

Otrzymane wyniki zamieszczono na rysunku 2.



Rys. 2. Zależność $\frac{R'_2}{R'_{2o}}$ wyznaczona w funkcji prądu wirnika I'_2 dla różnych częstotliwości napięcia zasilania

5. Wnioski końcowe

Rezystancja wirnika obliczana na podstawie wymiarów geometrycznych z uwzględnieniem zjawiska nasycenia rdzenia i wypierania prądu obciążona jest dużym błędem. Dlatego też wyznacza się ją w oparciu o badania doświadczalne. Szczególne różnice dotyczą poślizgów większych od krytycznego, kiedy to częstotliwość prądu w wirniku jest duża. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że kąt otwarcia żłobka dla całego zakresu zmian prądu od zera do wartości znamionowej zmienia się w zakresie od $0,02^\circ$ do $1,5^\circ$ i praktycznie nie powoduje zmian rezystancji. Stwierdzono również, że przesmyk nad żłobkiem wirnika ulega nasyceniu już przy stosunkowo małych prądach. Wyznaczenie rezystancji wirnika na podstawie pomiarów indywidualnie dla takiego rodzaju silnika daje możliwość uzyskania prawidłowych wyników.

6. Literatura

- [1]. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne, Tom III: Silniki indukcyjne*, WNT, Warszawa 1964.
- [2]. 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.
- [3]. Zielińska M., Zieliński W.: *Własności mechaniczne szybkoobrotowych indukcyjnych silników klatkowych*. XI Seminarium Techniczne BOBRME Komel. Katowice 2001.