

Konrad WEINREB¹⁾, Tomasz WĘGIEL²⁾, Adam WARZECHA³⁾, Maciej SUŁOWICZ⁴⁾

WPŁYW NASYCENIA GŁÓWNEGO OBWODU MAGNETYCZNEGO NA OCENĘ EKSCENTRYCZNOŚCI DYNAMICZNEJ SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO KLATKOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono widma prądów stojana dla przykładowego wysokonapięciowego silnika asynchronicznego klatkowego z ekscentrycznością dynamiczną wirnika. Widma zostały wyznaczone numerycznie metodą bilansu harmonicznych, z uwzględnieniem nasycenia głównego obwodu magnetycznego. Nasycenie uwzględnia się przez lokalne deformacje geometrii szczeliny powietrznej w obszarach występowania maksymalnych wartości wypadkowego prądu magnesującego. Dla poprawności określenia stopnia ekscentryczności i umożliwienia wprowadzenia odpowiednich wskaźników ilościowych oceny widma prądu stojana, wyniki obliczeń zostały odniesione zarówno do pomiarów oraz do obliczeń nie uwzględniających skutków nasycenia.

INFLUENCE OF SATURATION EFFECTS ON STATOR CURRENT SPECTRUM FOR ASYNCHRONOUS SQUIRREL - CAGE MOTOR WITH DYNAMIC ROTOR ECCENTRICITIES

Summary. In the paper the mathematical modeling of induction motors with rotor eccentricities is applied to study of the effects in the stator currents caused by saturation of the main magnetic coil. The paper describes the way of calculating the winding inductances and the permeance function when taking into account the saturation effect for cases of rotor eccentricities. The chosen results of calculations are presented as the permeance functions and the stator currents in steady state for different values of the rotor relative eccentricity. The comparison of the computational results with measurement ones is given in the paper as well.

Key words: spectrum of asynchronous motor stator current, eccentricity

1. WSTĘP

Metoda diagnozowania silnika asynchronicznego w niesymetrycznym ustalonym stanie pracy oparta na analizie widma prądu stojana wymaga wyznaczenia niezwykle precyzyjnych wskaźników oceny. Sygnały charakterystyczne dla ekscentryczności wirnika są z reguły kilka rzędów wielkości mniejsze niż podstawowa harmoniczna prądu fazy. Wymaganą czułość kreowanych wzorcowych widm może zapewnić tylko rozbudowany model matematyczny silnika [3],[4]. Uzyskaną z pomiarów bazę danych ograniczają te same standardowe warunki pracy, zwykle bliskie znamionowym. Przybliżanie wyników symulacji komputerowej do realnego widma wymaga rezygnacji z założeń upraszczających, a tym samym prowadzi do znacznej komplikacji modelu. W pracy [5] autorzy wykazali istotny wpływ uwzględnienia harmonicznych żłobkowych jednostkowej permeancji szczeliny powietrznej na kształt widma. Prowadzi to do poprawy zgodności jakościowej z wynikiem pomiaru przez generowanie nowych harmonicznych, lecz nie daje wystarczającej zgodności ilościowej. Wstępne badania pozwalają postawić tezę, że uwzględnienie nasycenia głównego obwodu magnetycznego poprawi oczekiwaną zbieżność analiz.

¹⁾ Dr inż., Katedra Maszyn i Napędów Elektrycznych, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. (+48)(+12) 6282621, fax (+48)(+12) 6282044, e-mail: peweinre@cyf-kr.edu.pl ;

²⁾ Dr inż., Katedra Maszyn i Napędów Elektrycznych, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. (+48)(+12) 6282621, fax (+48)(+12) 6282044, e-mail: pewegiel@cyf-kr.edu.pl

³⁾ Dr inż., Katedra Maszyn i Napędów Elektrycznych, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. (+48)(+12) 6282621, fax (+48)(+12) 6282044, e-mail: pewarzac@cyf-kr.edu.pl

⁴⁾ Mgr inż., Katedra Maszyn i Napędów Elektrycznych, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. (+48)(+12) 6282621, fax (+48)(+12) 6282044, e-mail: pesulowi@cyf-kr.edu.pl

Podobnie jak w [5] permeancje i dalej indukcyjności maszyny asynchronicznej wyznaczone są na bazie koncepcji „sinusoidalnych” uzwojeń [1], co wymaga znajomości widm Fouriera przepływów magnetycznych uzwojeń oraz wyznaczenia funkcji jednostkowej permeancji szczeliny powietrznej [2].

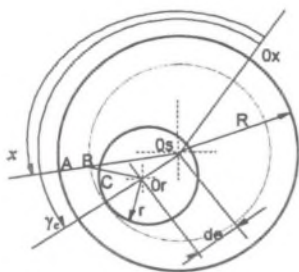
Metody określenia permeancji bazują na zależnościach geometrycznych w odniesieniu do wymiarów szczeliny opisanych między innymi w pracy [2]. Sposób uwzględnienia podwójnego użłobkowania został przedstawiony w pracy [5]. W zastosowanym modelu matematycznym opartym na metodzie bilansu harmonicznych aproksymowana funkcja permeancji jednostkowej szczeliny powietrznej zawiera dodatkowe harmoniczne wywołane od efektów nasyceniowych. Wskutek interakcji tych harmonicznych powstają dodatkowe nowe składniki i uzyskuje się istotną korektę ilościową widma w stosunku do wyliczanego na podstawie prostszych modeli.

2. WYZNACZANIE FUNKCJI PERMEANCJI ORAZ INDUKCYJNOŚCI W PRZYPADKACH EKSCENTRYCZNOŚCI Z UWZGLĘDNIENIEM UŻŁOBKOWANIA ORAZ EFEKTÓW NASYCENIOWYCH

Funkcja jednostkowej permeancji szczeliny powietrznej jest odwrotnością funkcji długości linii sił pola magnetycznego w szczelinie powietrznej. Wyznaczenie tej funkcji jest możliwe po wyznaczeniu rozkładu pola w szczelinie lub w sposób uproszczony.

W pracy użyto przybliżonego sposobu [2] wyznaczania długości linii sił pola magnetycznego w szczelinie powietrznej dla ekscentrycznego ustawienia wirnika względem stojana. Metoda ta uwzględnia prostopadły kierunek wychodzenia i wchodzenia linii sił magnetycznego ze szczeliny powietrznej do materiału ferromagnetycznego stojana i wirnika. Długość linii sił pola magnetycznego jest wówczas równa sumie długości odcinków AB, BC zgodnie z rys. 1.

Dla przypadku ekscentryczności dynamicznej $d_e = d_d, d_s = 0, \gamma_e = \varphi + \chi$, gdzie φ jest kątem obrotu wirnika.



Rys.1. Uproszczony przekrój maszyny z ekscentrycznie usytuowanym wirnikiem

Fig.1. Simplified cross-section of a motor with rotor eccentricities

Dla miejsc na obwodzie szczeliny, gdzie występują złobki oraz efekty nasyceniowe, wprowadza się poprawki $\delta_{2s}(x), \delta_{2r}(x), \Delta\delta_n(x)$ długości linii sił pola magnetycznego

$$\delta_c(x) = \delta(x) + \delta_{2s}(x) + \delta_{2r}(x) + \Delta\delta_n(x). \quad (1)$$

Poprawki długości linii sił pola magnetycznego $\delta_{2s}(x), \delta_{2r}(x)$ dla punktów szczeliny powietrznej pod złobkiem można określić zgodnie z metodą odwzorowań konforemnych, co zostało przedstawione w pracy [5].

Wprowadzenie poprawek długości linii sił pola magnetycznego $\Delta\delta_n(x)$ wywołane efektami nasyceniowymi wymaga znajomości rozkładu pola magnetycznego wyznaczonego na podstawie obliczeń polowych oraz określenia rozkładu

$$\text{współczynnika nasycenia } k_n(x) = \frac{\delta(x) + \Delta\delta_n(x)}{\delta(x)}.$$

Rozkład ten modyfikuje rozmiary zastępczej szczeliny powietrznej.

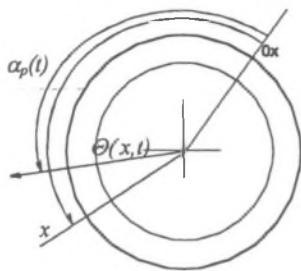
W prezentowanej pracy autorzy zakładają, że lokalne deformacje szczeliny pochodzą głównie od wypadkowego prądu magnesującego.

W celu określenia położenia wypadkowego przepływu (prądu magnesującego) (Rys.2.) posłużono się formułami (2)(3) dla podstawowej harmonicznej [6].

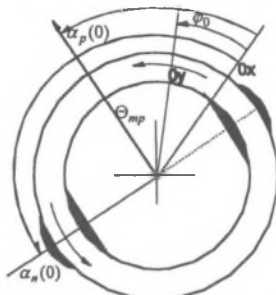
$$\Theta(x, t) = \Theta_{mp}(t) \cos p(x - \alpha_p(t)), \quad (2)$$

$$\underline{\Theta}_{mp} = \underline{\Theta}_{msp} + \underline{\Theta}_{mrp} = w_{sp} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a^3 & a^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} + w_{rp} \begin{bmatrix} 1 & b & \dots & b^{N_r-1} \\ 1 & b^2 & \dots & b^{2(N_r-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & b^{N_r} & \dots & b^{N_r(N_r-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ \vdots \\ i_{rN_r} \end{bmatrix} e^{j p \varphi} \quad (3)$$

gdzie: $w_{sp} = \frac{4 z_s k_{us}^p}{\pi 2 p}$; $w_{rp} = N_r k_{us}^p$; $a = e^{j \frac{2\pi}{3}}$; $b = e^{j \frac{2\pi}{N_r}}$; $\Theta_{mp}(t) = \text{abs}(\underline{\Theta}_{mp})$; $p\alpha_p(t) = \text{arg}(\underline{\Theta}_{mp})$.



Rys.2. Położenie wypadkowego przepływu magnetycznego
Fig.2. Location of MMF



Rys.3. Strefy deformacji szczeliny powietrznej wywołane efektami nasyceniowymi (dla p = 1; t = 0)
Fig.3. Location of air gap deformation caused by saturation effects (for p = 1; t = 0)

Przepływ wypadkowy (2) powoduje efekty nasyceniowe, a tym samym deformacje zastępczej szczeliny powietrznej. Położenie osi tego przepływu jest określone przez kąt α_p (rys.3.). Położenie osi deformacji szczeliny względem osi przepływu określa różnica kątów $\alpha_n - \alpha_p$.

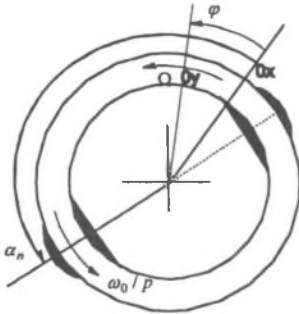
Obliczenia polowe wykonane dla kilku silników wskazują, że wyższe wartości współczynnika nasycenia występują w osi podłużnej pola (gdy nasycenia zębów dominuje nad nasyceniem jarzm) lub w osi pola (gdy nasycenie jarzm jest dominujące). W pierwszym przypadku można przyjąć w przybliżeniu, że $\alpha_n(0) = \alpha_p(0)$, natomiast w drugim przypadku $\alpha_n(0) = \alpha_p(0) + \frac{\pi}{2p}$.

W ogólnym przypadku liczba stref deformacji jest równa liczbie biegunów. Stopień deformacji można określić na podstawie rozkładów współczynnika nasycenia $k_n(x)$ wyznaczonych metodą modelowania pola magnetycznego. Współczynniki te wyznaczono w drugim powiązanim tematycznie artykule współautorów.

W stanie ustalonym dla dowolnej chwili czasowej t związki pomiędzy kątem obrotu wirnika a położeniem deformacji szczeliny wywołanej efektami nasyceniowymi (wirującej z prędkością ω_0/p) uzależnione są od poślizgu s. Zgodnie z rys.4. (gdzie: ω_0 - pulsacja napięcia zasilającego, Ω - prędkość obrotowa) zależności te można przedstawić dla maszyny o dowolnej liczbie par biegunów p w następujący sposób:

$$\alpha_n(t) = \varphi(t) + \frac{s}{1-s} \varphi(t) - \frac{1}{1-s} \varphi(0) + \alpha_n(0) = \varphi(t) + \varphi_p(t) \quad (4)$$

Na podstawie długości linii sił pola magnetycznego w szczelinie (1) jest możliwe określenie funkcji jednostkowej permeancji szczeliny powietrznej poprzez znalezienie rozkładu Fouriera funkcji odwrotności długości linii sił pola magnetycznego. Jeśli uwzględniamy ułożbokowanie i deformacje wywołane efektami nasyceniowymi, funkcja permeancji jednostkowej jest funkcją trzech zmiennych.



$$\Lambda(x, \varphi, \varphi_p) = \frac{1}{\delta_c(x, \varphi, \varphi_p)} = \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{k \in K} \Lambda_{m,n,k} e^{jm x} e^{jn \varphi} e^{jk \varphi_p} \tag{5}$$

gdzie: $\varphi_p(t) = \frac{s}{1-s} \varphi(t) - \frac{1}{1-s} \varphi(0) + \alpha_n(0)$.

Rys.4. Związki pomiędzy położeniem deformacji szczeliny, a kątem obrotu wirnika
Fig.4. Relations between rotor angle and location of air gap deformation

Sposób wyznaczania indukcyjności dla przetwornika z dwoma uzwojeniami „a” i „b” umieszczonymi w nierównomiernej szczelinie przy założeniu występowania jedynie radialnej składowej pola został szczegółowo przedstawiony w pracach [1], [2]. Prace te nie dotyczyły jednak przypadku, gdy funkcja permeancji jednostkowej szczeliny powietrznej zależy od trzech zmiennych, dlatego autorzy proponują zastosowanie pewnej modyfikacji, dzięki której funkcja indukcyjności może być przedstawiona następująco:

$$L_{ba} = \sum_v \sum_m \sum_n \sum_k L_{v,m,n,k}^{ba} e^{jv(x_b - x_a)} e^{jm x_b} e^{jn \varphi} e^{jk \varphi_p} \tag{6}$$

Założono, że przez uzwojenia „a” i „b” płyną prądy wytwarzające przepływy magnetyczne, których spektra Fouriera zawierają harmoniczne v oraz ρ , należące odpowiednio do zbiorów A, B .

Uzwojenia te są scharakteryzowane przez swoje współczynniki uzwojeń $k_a^{|v|}, k_b^{|\rho|}$ oraz liczby zwojów w_a, w_b . Ogólnie zbiory A i B są zbiorami liczb całkowitych z wyłączeniem zera. Szczelina powietrzna jest scharakteryzowana poprzez funkcję permeancji i jest opisana szeregiem Fouriera o ogólnej postaci (5), przy czym zbiory M, N, K harmonicznych m, n, k funkcji permeancji są w ogólnym przypadku zbiorami liczb całkowitych.

Formuła (6) w każdym przypadku może zostać przekształcona do ogólnej postaci:

$$L_{ba} = \sum_g \sum_q L_{g,q}^{ba} e^{jg \varphi} e^{jq \varphi_p} = \sum_g \sum_q L_{g,q}^{ba} e^{j(g+q)\varphi} e^{jq(\frac{q}{1-s})\varphi} \tag{7}$$

gdzie g, q należy do zbioru liczb całkowitych.

Z zależności (7) widać, że indukcyjności stają się funkcjami prawie okresowymi.

Jeżeli założymy, że rozpatrujemy przypadki, dla których wartość wyrażenia $g+q+q(\frac{s}{1-s})$ należy do zbioru liczb całkowitych, wówczas funkcja (7) staje się funkcją okresową. Można tutaj wyróżnić dwa przypadki i zastosować następujące uproszczenia:

- Poślizg s jest bardzo mały ($s \approx 0$). Wówczas można zapisać:

$$L_{ba} = \sum_k L_k^{ba} e^{jk \varphi} \tag{8}$$

- Poślizg ma wartość taką, że wartość wyrażenia $\frac{1-s}{s}$ jest liczbą całkowitą. Wówczas można zapisać:

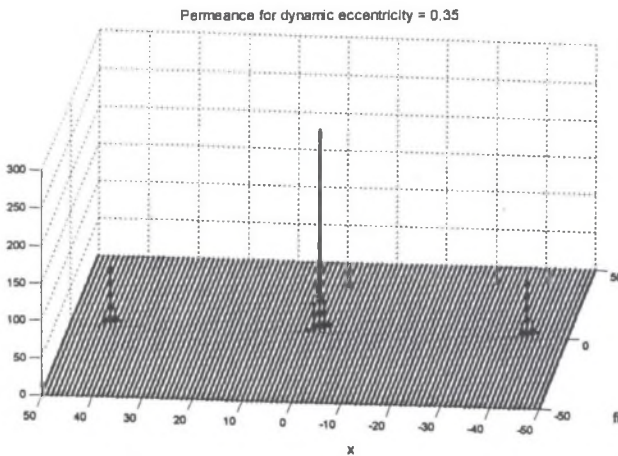
$$L_{ba} = \sum_l L_l^{ba} e^{jl \varphi} \tag{9}$$

Użycie jednego z powyższych przybliżeń powoduje, że funkcje indukcyjności są funkcjami okresowymi i mogą być użyte do poszukiwania rozwiązań równań modelu matematycznego silnika asynchronicznego w stanie ustalonym metodą bilansu harmoniczných.

Zastosowanie pierwszego przybliżenia jest dość dobrym odzwierciedleniem pracy silnika w warunkach znamionowych z uwagi na fakt, że dla większości dużych silników wartości poślizgu znamionowego są bardzo małe. Takim właśnie przypadkiem autorzy zajmują się w prezentowanej pracy. Natomiast użycie drugiego przybliżenia daje możliwość uzyskania precyzyjniejszego widma, zawierającego również subharmoniczne względem φ . Przy takim podejściu jest możliwe udowodnienie, że użycie metody bilansu harmonicznym dopuszcza wystąpienie harmonicznym o częstotliwościach $(1+2s)f_0$, charakterystycznych dla przypadków maszyn z nasyceniem, co nie było możliwe w klasycznych założeniach dotyczącej tej metody.

3. WYNIKI WYBRANYCH TESTÓW NUMERYCZNYCH ORAZ REZULTATY POMIAROWE

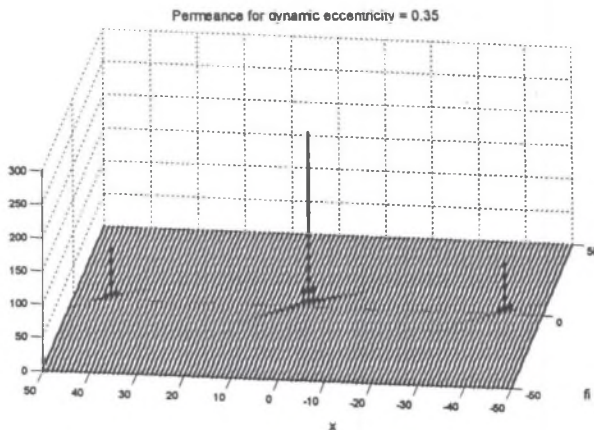
Obiektem badań był silnik indukcyjny w.n.: SYJe 132s, prod. DOLMEL Wrocław, 6 kV, 2000 kW, 2980 obr/min, 227A, 42 zębów na stojanie i 36 zębów na wirniku. Współczynniki Fouriera funkcji permeancji obliczono dla względnej ekscentryczności dynamicznej równej 0.35, przy uwzględnieniu użłobkowania powierzchni stojana i wirnika oraz z nienasyconym (rys.5) bądź nasyconym głównym obwodem magnetycznym (rys.6). Na osiach umieszczono wskaźniki harmonicznym odpowiadające x oraz φ . Na rysunkach widać, że współczynniki Fouriera permeancji dla ekscentryczności dynamicznej rozkładają się w sposób charakterystyczny wzdłuż przekątnej.



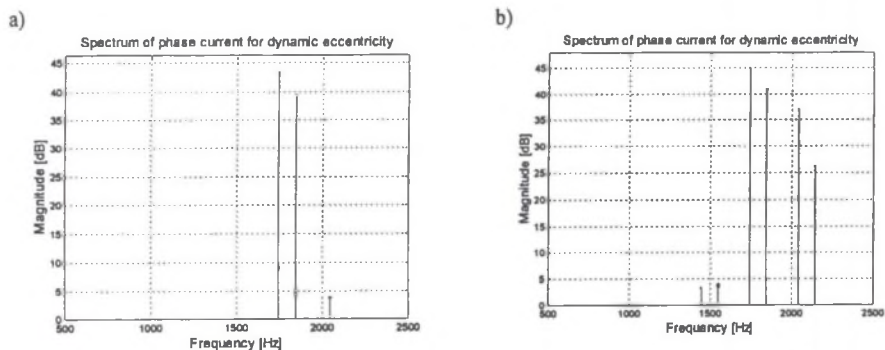
Rys.5. Harmoniczne permeancji bez uwzględnienia nasycenia obwodu głównego
Fig.5. Harmonics of permeance without taking into consideration saturation effect

Uwzględnienie nasycenia głównego obwodu magnetycznego wytwarza dodatkowe harmoniczne wzdłuż tych przekątnych, co poprzez dodatkowe sprzężenia elektromagnetyczne prowadzi do powstania nowych i istotnych zmian (głównie podbicia) pozostałych harmonicznym składowych widma prądu fazowego stojana.

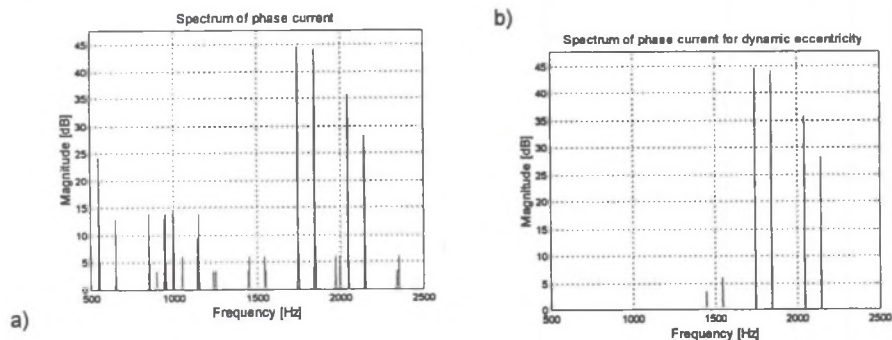
Wyniki testu numerycznego dla względnym poziomu ekscentryczności dynamicznej wirnika równym 0.35 prowadzonego w pakiecie programów MATLAB dla poślizgu $s=0.035$, co odpowiada rzeczywistemu obciążeniu badanego silnika, są przedstawione na rys.7. Analizowano widmo w zakresie od 500 do 2500 Hz celem uwzględnienia harmonicznym prądu właściwych dla silnika symetrycznego.



Rys.6. Harmoniczne permeancji z uwzględnieniem nasycenia obwodu głównego
Fig.6. Harmonics of permeance with taking into consideration saturation effect



Rys.7. Widma Fouriera prądu fazowego: a) bez uwzględnienia b) z uwzględnieniem efektów nasyceniowych
Fig.7. Fourier spectrum of the phase currents: a) without and b) with saturation effects



Rys.8. Widma Fouriera prądu fazowego zmierzone: a) pełne widmo; b) widmo charakterystyczne dla ekscentryczności dynamicznej

Fig.8. Measured Fourier spectrum of the phase current: a) full spectrum; b) spectrum being the characteristic one for dynamic eccentricity

Pomiary widma prądu fazowego stojana wykonano za pomocą rejestratora cyfrowego - analizatora widmowego PL 31, prod. Diagnostic Instruments UK. Do oceny widma wykorzystano pomiary widma prądu w zakresie do 5 kHz, przy ilości 8192 punktów w całym cyklu pobierania próbki. Wyniki pomiarów przedstawione są na rys.8. Wyznaczone z widma pomiarowego średnie obroty wynoszą 2989.7 min^{-1} . Wyniki obliczeń i pomiarów odniesione są do tego samego poziomu t i przedstawione w skali półlogarytmicznej.

4. WNIOSKI

W artykule zostały przedstawione widma Fouriera prądów stojana, wyznaczone numerycznie metodą bilansu harmonicznych z uwzględnieniem nasycenia obwodu głównego, dla przykładowego wysokonapięciowego silnika asynchronicznego klatkowego z ekscentrycznością dynamiczną wirnika. Nasycenie uwzględnia się przez lokalne deformacje geometrii szczeliny powietrznej w obszarach występowania maksymalnych wartości wypadkowego prądu magnesującego.

W celu poprawności określenia poziomu ekscentryczności i wykreowania odpowiednich wskaźników ilościowych oceny widma prądu stojana wyniki obliczeń zostaną odniesione dwójako:

- do rezultatów uzyskanych drogą pomiarową,
- do obliczeń nie uwzględniających efektów nasyceniowych.

Praca ta jest konsekwencją działań autorów polegających na ograniczaniu założeń występujących w matematycznych modelach dla celów diagnostyki. Dotychczasowe doświadczenia autorów w zakresie analizy modeli diagnostycznych maszyn asynchronicznych z ekscentrycznością wirnika prowadzą do stwierdzenia, że dla analiz widma prądów w stanach pracy maszyny z ekscentrycznym wirnikiem uwzględnienie efektów wywołanych nasyceniem obwodu głównego silnika prowadzi do zasadniczego przybliżenia wyników symulacji numerycznych i pomiarów.

LITERATURA

1. Sobczyk T.J., Drozdowski P., Inductances of electrical machine winding with a nonuniform air-gap, *Archiv für Elektrotechnik*, Vol. 76, 1993, pp.213-218.
2. Sobczyk T., Węgiel T., Algorytm wyznaczania indukcyjności uzwojeń przetworników elektromechanicznych z uwzględnieniem ekscentryczności, XXI Seminarium z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów - SPETO'98, Ustroń 1998.
3. Sobczyk T.J., Weinreb K., Węgiel T., Sułowicz M.: Theoretical study of effects due to rotor eccentricities in induction motors, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED'99), Gijon, (Spain), 1-3. 09.1999, pp.289-295.
4. Sobczyk T.J., Weinreb K., Sułowicz M.: Diagnostyka silników klatkowych bazująca na składowych symetrycznych prądach stojana, Materiały XXXVI Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych 2000, Szklarska Poręba, 13-16.06.2000.
5. Węgiel T., Weinreb K., Sułowicz M.: Wpływ harmonicznych żłobkowych przewodności na kształt widma prądu stojana w maszynie indukcyjnej z ekscentrycznym wirnikiem, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej* Nr50, Seria: Studia i materiały Nr22, SME 2000 „Modelowanie maszyn elektrycznych”, Wrocław 2000, str.236-244.
6. Warzecha A.: Wyznaczenie efektów nasyceniowych w silniku asynchronicznym na podstawie obliczeń polowych, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej* Nr50, Seria: Studia i materiały Nr22, SME 2000 „Modelowanie maszyn elektrycznych”, Wrocław 2000, str.198-206.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Wach

Abstract

Deep knowledge of the phenomena in induction machines is necessary to predict precisely machine properties, as well as to recognise the machine condition during operation. So called on-line, current based systems are a topic of research reported at many international conferences nowadays. The saturation of the machine main magnetic circuit causes some Fourier components in the stator phase current. They are well known for the symmetrical case, but the effects due to saturation in abnormal states are not deeply recognised. To predict the additional Fourier components in the stator phase current it is necessary to have mathematical models of induction machines taking into account rotor eccentricities, air gap slotting and saturation effects.

The paper presents the mathematical modeling of induction motors with rotor eccentricities, applied to study of the effects in the stator currents caused by saturation of the main magnetic coil.

The paper describes the way of calculating the winding inductances and the permeance function when taking into account the saturation effects for cases of rotor dynamic eccentricities. The permeance function was determined by the simplified method from the air gap geometry. First, the approximate function of a magnetic field line length in the air gap along the circumference was found. Next, it was corrected by slots and saturation effects (1). The formulas for all inductances were derived from the general expression for inductances of two arbitrary coils "a" and "b" (6).

To predict qualitatively and quantitatively the spectra of currents the special harmonic balance method is used. The data necessary for computation were fixed basing on the design data of the SYJe 132s cage motor manufactured in Poland. Its number of pole-pairs $p=1$ and number of slots: of a stator 42, of a rotor 36. The rated values of this motor are: 2000kW, 6kV, 227 A, 2980 rpm. The computations were performed under the following assumptions: the stator phases were connected in star without neutral, they were supplied by balanced mono-harmonic voltages and the motor operated at slip $s=0.0035$.

The chosen calculation results are presented in the form of the permeance functions (Fig.5-6) and the stator currents (Fig.7.) in steady state for the rotor relative dynamic eccentricity equal to 0.35. (Fig.8.). The comparison of the computational results with measurement ones is given in the paper as well.