

Adam WARZECHA¹⁾, Konrad WEINREB²⁾, Tomasz WĘGIEL³⁾

MODYFIKACJA FUNKCJI PERMEANCJI SZCZELINY POWIETRZNEJ UWZGLĘDNIAJĄCA EFEKTY NASYCENIOWE W SILNIKU ASYNCHRONICZNYM Z EKSCENTRYCZNOŚCIĄ WIRNIKA

Streszczenie. W artykule określono funkcję jednostkowej permeancji zastępczej szczeliny powietrznej silnika asynchronicznego uwzględniającą nieliniowość głównego obwodu magnetycznego. Modyfikacja permeancji jednostkowej szczeliny polega na zmniejszeniu jej wartości w strefach nasycenia poprzez współczynnik nasycenia. Wyraża on stosunek permeancji wyznaczonej na podstawie geometrii szczeliny do permeancji wyznaczonej na podstawie rozkładu pola szczelinowego obliczonego MES. Proponowany algorytm wyznaczania rozkładu współczynnika nasycenia obejmuje również silniki o nierównomiernej szczelinie. Wyniki obliczeń wykonanych dla silnika asynchronicznego ilustrują wpływ ekscentryczności wirnika i nieliniowości obwodu magnetycznego na wartości współczynnika nasycenia. Można je wykorzystać w modelach obwodowych silników asynchronicznych.

MODIFICATION OF AIR GAP PERMEANCE FUNCTION TAKING INTO ACCOUNT SATURATION EFFECTS IN ASYNCHRONOUS MOTOR WITH ROTOR ECCENTRICITY

Summary. In the paper an air gap permeance function taking into account nonlinearity of a magnetic circuit has been defined and described. Modification of the linear permeance consists in reducing its values in saturation areas by the saturation coefficient. It expresses a ratio of the linear permeance to the nonlinear one calculated by FEM. The proposed algorithm of calculating the saturation coefficient distribution is also correct for motors with non-uniform air-gap. The results obtained for an asynchronous motor show the influence of the rotor eccentricity and magnetic circuit nonlinearity on the saturation coefficient values. They can be used in circuit models of asynchronous motors.

Key words: asynchronous machines, eccentricity, permeance

1. WSTĘP

Indukcyjności uzwojeń w modelach maszyn elektrycznych sformułowanych przy pominięciu spadków napięć magnetycznych w stojanie i wirniku są wyznaczone na podstawie rozkładu permeancji jednostkowej szczeliny powietrznej. Jej wartości są równe odwrotności promieniowego wymiaru szczeliny, w którym składowa promieniowa natężenia pola magnetycznego jest w przybliżeniu stała. Zależą zatem wyłącznie od ukształtowania powierzchni przyszczelinowej stojana i wirnika i zmieniają się wraz z jego położeniem. Poprawę dokładności modelowania maszyn poprzez uwzględnienie napięć magnetycznych w stojanie i wirniku uzyskuje się w wyniku wprowadzenia współczynnika nasycenia pomniejszającego permeancję jednostkową. Ten praktyczny sposób modelowania nieliniowości obwodu magnetycznego wymaga znajomości rozkładu współczynnika nasycenia. W ogólnym przypadku jest on wieloargumentową funkcją: współrzędnej punktu na obwodzie szczeliny, kąta położenia wirnika oraz wszystkich prądów żłobkowych. Należy go zatem wyznaczać metodami połowymi dla wybranych stanów prądowych i pozycji wirnika. Celem pracy jest przedstawienie algorytmu wyznaczania rozkładu nieliniowej permeancji jednostkowej i rozkładu współczynnika nasycenia na podstawie obliczeń połowych.

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

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

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

Wykonane obliczenia testujące zostały potraktowane jako przygotowanie danych do uwzględnienia nieliniowości obwodu magnetycznego w obliczaniu stanów ustalonych silnika klatkowego z ekscentrycznym wirnikiem.

2. PERMEANCJA JEDNOSTKOWA SZCZELINY UWZGLĘDNIAJĄCA NAPIĘCIA MAGNETYCZNE W STOJANIE I WIRNIKU

Prawo przepływu zapisane dla zamkniętego konturu przechodzącego przez szczelinę w punktach o współrzędnych „ x_0 ” oraz „ x ” prowadzi do funkcji rozkładu indukcji w szczelinie w postaci:

$$B_0(x, \varphi, i) = \mu_0 \Lambda(x, \varphi) [\Theta(x, \varphi, i) - U_{Fe}(x, \varphi, i) - C(x_0, \varphi, i)], \quad (1)$$

przy czym

$$U_{Fe}(x, \varphi, i) = U_z(x, \varphi, i) + U_j(x - x_0, \varphi, i), \quad (2)$$

$$C(x_0, \varphi, i) = \Theta(x_0, \varphi, i) - U_z(x_0, \varphi, i) - H_0(x_0, \varphi, i) \delta(x_0, \varphi), \quad (3)$$

gdzie:

$\Lambda(x, \varphi) = \frac{1}{\delta(x, \varphi)}$ - funkcja przewodności jednostkowej szczeliny powietrznej,

$\Theta(x, \varphi, i)$ - rozkład przepływu wypadkowego stojana i wirnika,

$U_{Fe}(x, \varphi, i)$ - rozkłady napięć magnetycznych w zębach U_z i w jarzmach U_j - stojana i wirnika,

x - współrzędna na obwodzie szczeliny, φ - kąt położenia wirnika,

$i = [i_1, i_2, \dots, i_N]$ - wektor prądów obwodowych stojana i wirnika.

Wprowadzenie współczynnika nasycenia jako stosunku sumy napięć magnetycznych do napięcia magnetycznego w szczelinie:

$$k_n(x, \varphi, i) = \frac{\Theta(x, \varphi, i)}{\Theta(x, \varphi, i) - U_{Fe}(x, \varphi, i)} \quad (4)$$

pozwala zapisać wzór (1) w postaci:

$$B_0(x, \varphi, i) = \mu_0 \frac{\Lambda(x, \varphi)}{k_n(x, \varphi, i)} [\Theta(x, \varphi, i) - C(x_0, \varphi, i) k_n(x, \varphi, i)]. \quad (5)$$

Występujący w nim iloraz permeancji jednostkowej i współczynnika nasycenia może być traktowany jako permeancja jednostkowa zastępczej szczeliny, uwzględniająca napięcia magnetyczne w stojanie i w wirniku.

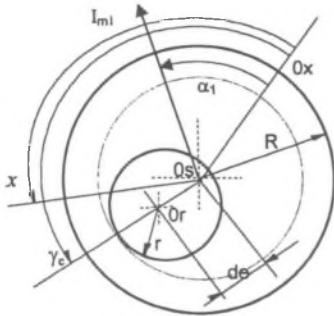
$$\Lambda_n(x, \varphi, i) = \frac{\Lambda(x, \varphi)}{k_n(x, \varphi, i)}. \quad (6)$$

Gdy stała „C” jest różna od zera, współczynnik nasycenia występuje dodatkowo w drugim składniku wzoru (5). Wzór ten jest przydatny do obliczania indukcji w szczelinie i współczynników indukcyjności uzwojeń z uwzględnieniem nieliniowości obwodu magnetycznego, gdy znany jest rozkład współczynnika nasycenia. Dla konkretnego silnika można go wyznaczyć stosując następujący algorytm obliczeń:

1. Wyznaczenie rozkładu indukcji w szczelinie powietrznej maszyny z wykorzystaniem MES dla zadanych prądów obwodowych oraz kąta położenia wirnika.
2. Określenie rozkładu przepływu wypadkowego jako całki z zadanego okładu prądowego.
3. Obliczenie rozkładu permeancji nieliniowej wg wzoru

$$\Lambda_n(x, \varphi, i) = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_0(x, \varphi, i)}{\Theta(x, \varphi, i) - C(x_0, \varphi, i) k_n(x, \varphi, i)} \quad (7)$$

przy pominięciu miejsc zerowych mianownika. Wartość stałej „C” wynikająca z warunku bezźródłowości pola magnetycznego może być w tym przypadku określona wg wzoru (5) na podstawie wartości przepływu w miejscu zerowym indukcji:



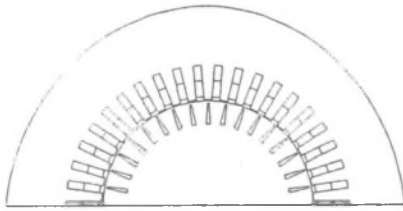
Rys. 1. Uproszczony przekrój maszyny z ekscentrycznie usytuowanym wirnikiem
 Fig. 1. Simplified cross-section of a motor with rotor eccentricities

kierunek wychodzenia i wchodzenia linii sił pola magnetycznego ze szczeliny powietrznej do materiału ferromagnetycznego. Dla miejsc na obwodzie szczeliny, gdzie występują łobki, są dodawane poprawki $\delta_{2s}(x), \delta_{2r}(x)$.

5. Obliczenie rozkładu współczynnika nasycenia wg przekształconego wzoru (6).
6. Skorygowanie przyjętych w punkcie 3 współczynników i powtórzenie obliczeń.
7. Uśrednienie wartości współczynnika nasycenia na szerokości każdego zęba i aproksymacja otrzymanego rozkładu wzdłuż obwodu szczeliny.

Rozkład współczynnika nasycenia otrzymuje się też wprost z porównania rozkładów indukcji pola szczelinowego wyliczonego przy materiale ferromagnetycznym liniowym i nieliniowym, co jest poprawne, gdy stała „C” ma wartość równą zero. Wyniki otrzymane w ten sposób są jednak zaniżone z powodu skończonej wartości przyjmowanej przenikalności magnetycznej materiału.

Przy określaniu reprezentatywnego zbioru zadawanych prądów obwodowych dla obliczeń połowych oraz w analizie wyników



Rys. 2. Obwód magnetyczny modelowanego silnika
 Fig. 2. Magnetic circuit of the modelled motor

3. ROZKŁADY PERMEANCJI NIELINIOWEJ I WSPÓŁCZYNNIKA NASYCENIA SILNIKA Z EKSCENTRYCZNYM WIRNIKIEM PRZY ZNAMIONOWYM PRĄDZIE MAGNESUJĄCYM

Wyznaczenie rozkładu nieliniowej permeancji jednostkowej dla konkretnego silnika wymaga znajomości geometrii całego stojana i wirnika oraz charakterystyki magnesowania zastosowanej blachy prądnicowej i rozkładu uzwojeń. Danymi do obliczeń połowych są prądy żłobkowe wyznaczone w modelu obwodowym silnika oraz kąt położenia wirnika. Obliczenia rozkładu pola powinny być prowadzone z dokładnością ok. 1 %, co wiąże się bardzo dużą liczbą elementów siatki w MES. Możliwa do uzyskania dokładność zależy od zastosowanego pakietu do modelowania pól

$$C(x_0, \varphi, i) = \frac{\Theta(x_0, \varphi, i)}{k_n(x_0, \varphi, i)}; \quad \text{gdy } B_0(x_0) = 0. \quad (8)$$

Występujący we wzorze (7) iloraz $\frac{k_n(x)}{k_n(x_0)}$ w pierwszym kroku obliczeń należy przyjąć równy 1.

4. Aproksymacja rozkładu liniowej permeancji jednostkowej szczeliny dla zadanych położenia wirnika. W tym punkcie obliczeń można wykorzystać przybliżony sposób wyznaczania długości linii sił pola magnetycznego w szczelinie powietrznej dla ekscentrycznego ustawienia wirnika względem stojana przedstawiony w [4]. Zakłada on prostopadły

$$I_{mp} = f(\varphi, i_1, i_2, \dots, i_N); \quad \alpha_p = f(\varphi, i_1, i_2, \dots, i_N). \quad (9)$$

Powyższy algorytm został przetestowany w obliczeniach rozkładu nieliniowej permeancji i współczynnika nasycenia dla silnika asynchronicznego klatkowego z ekscentrycznością wirnika.

magnetycznych. W używanym przez autorów programie MagNet 2D niezbędne było z tego względu uproszczenie kształtu żłobków oraz modelowanie tylko jednej podziałki biegunowej. Ograniczyło to możliwości obliczeń z ekscentrycznością wirnika do silników dwubiegunowych w przypadku, gdy oś pola pokrywa się z osią ekscentryczności wirnika ($\alpha_1 = \gamma_e = 0$) lub gdy osie te są prostopadłe ($\alpha_1 = \pi/2$; $\gamma_e = 0$). W pierwszym przypadku należy zadać zerowe warunki brzegowe na wszystkich krawędziach zewnętrznych modelowanego obwodu magnetycznego, w drugim przypadku warunek brzegowy w osi symetrii obwodu należy zmienić na jednorodny warunek Neumanna. Dla pośrednich pozycji osi pola konieczne jest modelowanie pełnego obwodu magnetycznego maszyny.

Aby oszacować wpływ nasycenia na rozkłady nieliniowej permeancji jednostkowej i współczynnika nasycenia silnika z ekscentrycznym wirnikiem przyjęto następujące uproszczenia:

- prądy fazowe stojana są symetryczne, co jest spełnione dla ekscentryczności dynamicznej, gdy

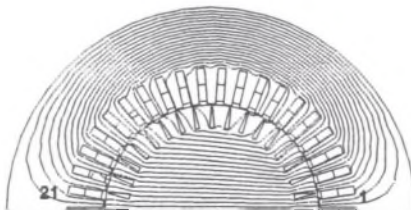
$$\gamma_e = \varphi$$

- stan nasycenia obwodu magnetycznego silnika pracującego z poślizgiem nie większym niż znamionowy jest zbliżony do stanu przy idealnym biegu jałowym, co pozwoliło ograniczyć się do obliczeń połowych przy magnesowaniu silnika tylko przez prądy w stojanie.

Zamieszczone wyniki dotyczą wysokonapięciowego silnika asynchronicznego klatkowego SYJe-132s o mocy 2000kW, 2980 obr/min, jedna para biegunów, 42 żłobki w stojanie, 36 w wirniku, uzwojenie dwuwarstwowe, liczba żłobków na biegun i fazę 7, poskok żłobkowy 16, o obwodzie magnetycznym przedstawionym na rys. 2. Wirnik przesunięty w prawo o 1/3 szerokości szczeliny (ekscentryczność = 0.33). Wartość prądu magnesującego była równa prądowi biegu jałowego przy napięciu znamionowym.

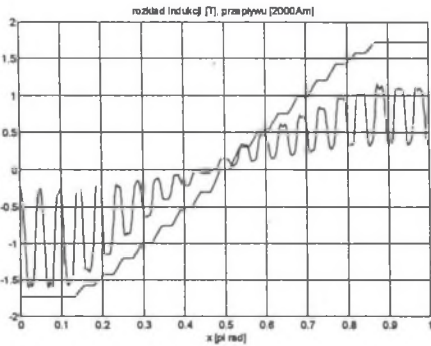
3.1. Przypadek, gdy oś przepływu jest zgodna z osią ekscentryczności wirnika

Rozkład permeancji jednostkowej szczeliny nie uwzględniającej spadków napięć magnetycznych w stojanie i wirniku dla silnika z wirnikiem o ekscentryczności równej 0.33 jest przedstawiony na rys.5. Przepływ o osi zgodnej z osią ekscentryczności wytwarza w tych warunkach pole magnetyczne o zdesymetryzowanym rozkładzie indukcji w szczelinie. Miejsce zerowe rozkładu indukcji jest przesunięte względem miejsca zerowego przepływu, a wartości ekstremalne indukcji w dodatnim i ujemnym półokresie nie są jednakowe, rys.4. W tym przypadku stała C określona wzorem (8) ma wartość różną od zera. Dokładność wyznaczenia permeancji nieliniowej wg wzoru (7) wzrasta, gdy rozkład indukcji jest aproksymowany szeregiem Fouriera, a rozkład przepływu uwzględnia wpływ szerokość żłobków. Otrzymany rozkład jest przedstawiony na rys.6. Wartości permeancji w zakresie zerowych wartości przepływu są wyznaczone z najmniejszą dokładnością i nie powinny być uwzględniane w dalszych obliczeniach. Rozkład współczynnika nasycenia pod kolejnymi zębami stojana obliczony wg wzoru (6) po uśrednieniu w obrębie każdego zęba i aproksymacji eliminującej rozrzut wyników jest przedstawiony na rys.7. Charakteryzuje się on podwyższonymi wartościami w pobliżu osi poprzecznej do osi pola, co jest efektem silniejszego nasycenia jarzma stojana w stosunku do nasycenia w strefie zębów. Brak symetrii tego rozkładu jest spowodowany ekscentrycznością wirnika.

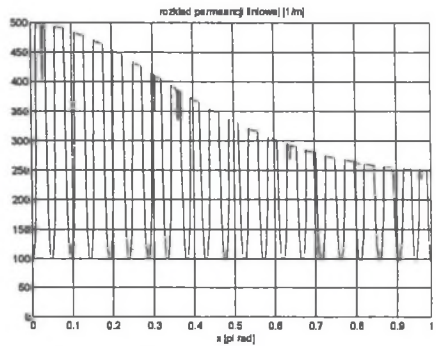


Rys.3. Pole magnetyczne dla $\alpha_1 = \gamma_e = 0$

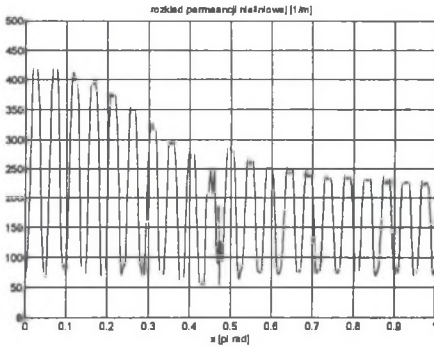
Fig.3. Magnetic field for $\alpha_1 = \gamma_e = 0$



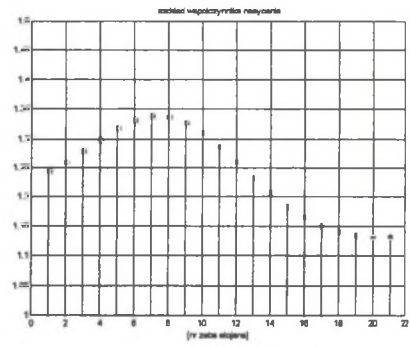
Rys. 4. Rozkład indukcji i przepływu dla $\alpha_1 = \gamma_e = 0$
 Fig. 4. Magnetic field and air-gap MMF distributions for $\alpha_1 = \gamma_e = 0$



Rys. 5. Rozkład permeancji liniowej dla $\gamma_e = 0$
 Fig. 5. Distribution of linear permeance function for $\gamma_e = 0$



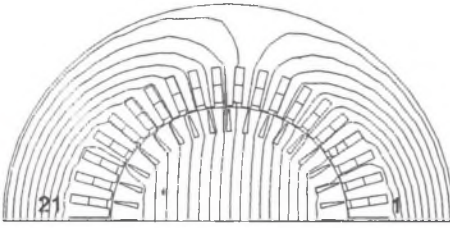
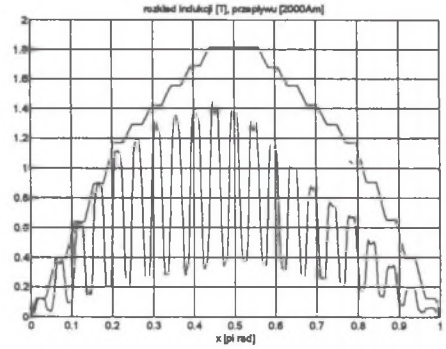
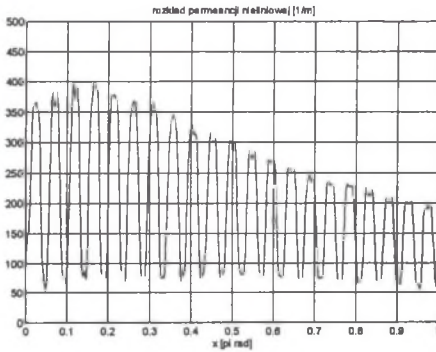
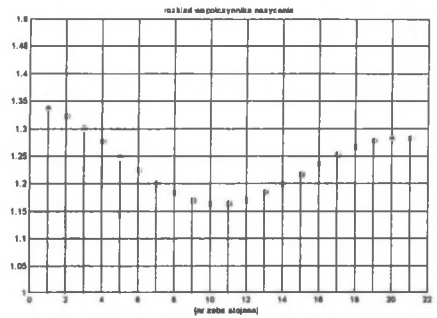
Rys. 6. Rozkład permeancji nieliniowej dla $\alpha_1 = \gamma_e = 0$
 Fig. 6. Distribution of nonlinear permeance function for $\alpha_1 = \gamma_e = 0$



Rys. 7. Rozkład średnich wartości współczynnika nasycenia pod zębami stojana dla $\alpha_1 = \gamma_e = 0$
 Fig. 7. Distribution of average values of saturation coefficient at the stator teeth for $\alpha_1 = \gamma_e = 0$

3.2. Przypadek, gdy osь przepływu jest prostopadła do osi ekscentryczności wirnika

W tym przypadku rezultaty nie odbiegają od analogicznych przedstawionych powyżej z uwzględnieniem przesunięcia rozkładów o połowę podziałki biegunowej. Porównanie widm amplitudowych rozkładu permeancji liniowej (rys.5) i nieliniowej (rys.10) wskazuje, że nieliniowość materiału stojana i wirnika magnesowanego symetrycznym układem prądów nie wnosi nowych harmonicznych do rozkładu permeancji jednostkowej. Modyfikacji ulegają jedynie amplitudy harmonicznych permeancji wywołanych ekscentrycznością.

Rys. 8. Pole magnetyczne dla $\alpha = \pi/2$; $\gamma_e = 0$ Fig. 8. Magnetic field for the $\alpha = \pi/2$; $\gamma_e = 0$ Rys. 9. Rozkład indukcji i przepływu dla $\alpha = \pi/2$; $\gamma_e = 0$ Fig. 9. Magnetic field and air-gap MMF distribution for $\alpha = \pi/2$; $\gamma_e = 0$ Rys. 10. Rozkład permeancji nieliniowej dla $\alpha = \pi/2$; $\gamma_e = 0$ Fig. 10. Distribution of nonlinear permeance function for $\alpha = \pi/2$; $\gamma_e = 0$ Rys. 11. Rozkład średnich wartości współczynnika nasycenia pod zębami stojana dla $\alpha = \pi/2$; $\gamma_e = 0$ Fig. 11. Distribution of average values of saturation coefficient at the stator teeth for $\alpha = \pi/2$; $\gamma_e = 0$

3.3. Przypadek z wirnikiem centrycznym

Dla wirnika usytuowanego centrycznie rozkład współczynnika nasycenia jest symetryczny niezależnie od położenia osi przepływu wypadkowego. Wyższe wartości współczynnika występujące w osi poprzecznej do osi pola zarówno dla silnika o $p=1$, jak i dla podobnego silnika o $p=4$ wskazują na przeważający wpływ nasycenia w jarzmie stojana obu silników. Indukcja o maksymalnej wartości ok. 2T występuje przy dnach zębów o największym układzie prądowym. Efekt ten zanika przy prądzie magnesującym zmniejszonym do ok. 50% wartości znamionowej. Rozkład współczynnika nasycenia ma wtedy stałą wartość równą ok. 1.15.

4. PODSUMOWANIE

Wprowadzenie funkcji jednostkowej permeancji szczeliny zastępczej uwzględniającej spadki napięć magnetycznych w stojanie i wirnika pozwala na przybliżone modelowanie nieliniowości głównego obwodu magnetycznego. Przy nierównomiernej szczelinie, gdy występuje drugi składnik we wzorze (5), potrzebna jest jeszcze znajomość funkcji rozkładu współczynnika nasycenia. Obie funkcje można wyznaczyć metodą modelowania pola magnetycznego korzystając z algorytmu zaproponowanego w pracy. Przedstawione rozkłady permeancji nieliniowej i współczynnika nasycenia dla wybranego silnika zasilanego od strony stojana znamionowym prądem magnesującym wskazują na jego poprawność i mogą być wykorzystane do korekty indukcyjności obliczanych w modelu obwodowym. W celu uchwycenia ewentualnych dodatkowych efektów nasyceniowych w silniku z ekscentrycznością wirnika należałoby wyznaczyć te funkcje na podstawie pola wymuszonego zarówno prądami stojana, jak i wirnika obliczonymi dla poślizgu różnego od zera. Następnym etapem może być aproksymacja wyznaczonych wieloargumentowych funkcji rozkładu permeancji i współczynnika nasycenia względem wybranych zmiennych.

LITERATURA

1. Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, WNT Warszawa 1988.
2. Sobczyk T.J., Drozdowski P., Inductances of electrical machine winding with a nonuniform air-gap, Archiv für Elektrotechnik, Vol. 76, 1993, pp.213-218.
3. Warzecha A.: Wyznaczanie efektów nasyceniowych w silniku asynchronicznym na podstawie obliczeń polowych. Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2000, Modelowanie maszyn elektrycznych, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, zeszyt 50, seria Studia i Materiały nr 22, Wrocław 2000, str.198-206.
4. Węgiel T., Weinreb K., Sułowicz M.: Wpływ harmonicznych żłobkowych przewodności na kształt widma prądu stojana w maszynie indukcyjnej z ekscentrycznym wirnikiem, Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2000, Modelowanie maszyn elektrycznych, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, z. 50, s. Studia i Materiały nr 22, Wrocław 2000, str.237-244.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Piotr Wach

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 lutego 2001 r.

Abstract

In the paper an air gap permeance function taking into account nonlinearity of a magnetic circuit has been defined and described. Modification of the linear permeance consists in reducing its values by the saturation coefficient. It expresses a ratio of the linear permeance to the nonlinear permeance calculated by FEM. The algorithm of calculating the saturation coefficient distribution for a motor with eccentric rotor consists of the following steps:

- calculation of the magnetic field distribution in of the motor air gap by FEM,
- calculation of the total MMF distribution along the circumference of the air gap,
- determination of the nonlinear permeance distribution according to the relation (7)
- determination of the linear permeance based on the air gap dimension,
- calculation of the saturation coefficient distribution according to the relation (6).

The above distributions have been determined for a large power asynchronous motor (Fig.2.) supplied by a set of the stator currents only. The results for two positions of the total MMF have

been shown in the figures 6,7,10,11. In the both cases the saturation coefficient values increase in the region across the MMF axis. It is an effect of the saturation in the stator yoke, which dominates over the saturation into the stator and rotor teeth. The asymmetrical distribution of the saturation coefficient results from the rotor eccentricity. The obtained results can be used in the asynchronous motor circuit models of including the described phenomenon.