

Rafał M. WOJCIECHOWSKI*
Sławomir WALKOWIAK*

POŁOWA ANALIZA SILNIKA INDUKCYJNEGO O MASYWNYM WIRNIKU HYBRYDOWYM

W artykule przedstawiono wyniki polowej analizy silnika indukcyjnego o masywnym wirniku hybrydowym. W rozpatrywanej konstrukcji zastosowano stojan istniejącego silnika indukcyjnego klatkowego, a fabryczny wirnik zastąpiono masywnym wirnikiem hybrydowym dwuwarstwowym. Rdzeń wirnika wykonano z proszkowego materiału kompozytowego (SMC) typu Somaloy 500, na powierzchni którego umieszczono cylindryczną tuleję z materiału przewodzącego. W badaniach autorzy skoncentrowali się przede wszystkim na analizie wpływu zmian grubości warstwy przewodzącej δ wirnika na rozkład pola elektromagnetycznego i parametrów funkcjonalnych silnika. Obliczenia wykonano w oprogramowaniu wykorzystującym dwuwymiarowe ujęcie metody elementów skończonych w połączeniu z metodą potencjału zespolonego.

1. WPROWADZENIE

Silniki indukcyjne są jednymi z najczęściej stosowanych maszyn elektrycznych. Wykorzystuje się je powszechnie w przemyśle jak i w sprzęcie gospodarstwa domowego. Silniki te zawdzięczają popularność prostej budowie i dużej niezawodności. Zaletą silników indukcyjnych jest to, że do rozruchu i prawidłowej pracy nie potrzebują one specjalistycznych elektronicznych układów zasilających – falowników. Silniki indukcyjne ze względu na budowę wirnika dzieli się na: (a) silniki indukcyjne pierścieniowe i (b) silniki indukcyjne klatkowe. Najczęściej spotykanymi w gospodarstwach domowych i przemyśle są silniki klatkowe. Najmniej rozpowszechnione są natomiast silniki indukcyjne, w których wirnik wykonano jako element masywny. Silniki tego typu stosuje się przede wszystkim w przemyśle chemicznym, naftowym, lub w aparaturze fizycznej. Najczęściej są one wykorzystywane jako napędy urządzeń pracujących w środowisku o podwyższonym ciśnieniu i wysokiej temperaturze. Silniki o masywnym wirniku znajdują także zastosowanie w aparaturze medycznej, np. aparaty rentgenowskie [4], jak również w układach pracujących z dużymi prędkościami obrotowymi, jako silniki momentowe w układach żyroskopowych [1, 8]. Z grupy silników indukcyjnych o masywnym wirniku najczęściej spotykana

* Politechnika Poznańska.

i stosowana jest konstrukcja silnika z wirnikiem dwuwarstwowym [1]. W silniku tym jedna z warstw stanowi niemagnetyczną warstwę przewodzącą, np. aluminium, a druga warstwę magnetyczną nazywaną rdzeniem wirnika. W konstrukcji, dzięki zastosowaniu litego wirnika, udało się ograniczyć drgania pochodzenia magnetycznego i hałas [12]. Wadą silników z masywnymi wirnikami jest mniejsza moc, sprawność i moment w odniesieniu do silników klatkowych o podobnych gabarytach. Zaletą silników o wirnikach masywnych jest prostsza konstrukcja wirnika.

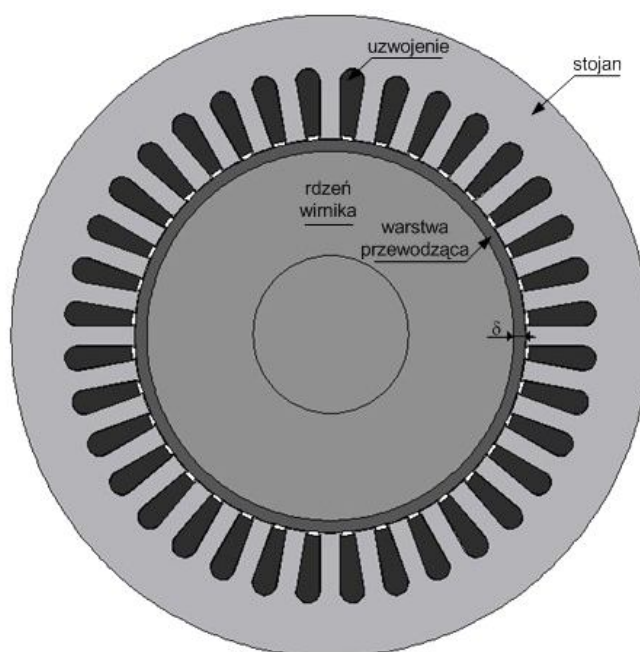
W ostatnim czasie coraz częściej elementy konstrukcyjne silników elektrycznych, np. stojan bądź wirnik, wykonuje się z materiałów proszkowych [10, 13]. Możliwość stosowania kompozytów proszkowych lub spieków do wyrobu elementów silników pozwala na łatwiejsze kształtowanie geometrii tych elementów oraz parametrów magnetycznych i elektrycznych obwodu magnetycznego. Obecnie w wielu jednostkach naukowych na świecie rozwijana jest technologia produkcji wielowarstwowych elementów hybrydowych stosowanych do budowy maszyn elektrycznych. Jednym z krajowych ośrodków naukowych specjalizujących się w produkcji wspomnianych elementów hybrydowych jest Instytut Tele- i Radiotechniczny z Warszawy [6, 10]. Rozwijana w Instytucie technologia proszków pozwala na łączenie ze sobą dowolnych materiałów magnetycznych, przewodzących jak i nieprzewodzących. Przeprowadzone w tym ośrodku badania pozwalają wskazać przydatne materiały w produkcji obwodów magnetycznych silników elektrycznych. Technologia wytwarzania materiałów proszkowych oraz ich łączenie z masywnymi elementami konstrukcyjnymi w jednym procesie technologicznym to sposób na znaczną redukcję kosztów i czasu produkcji komponentów silników.

W artykule omówiono konstrukcję silnika indukcyjnego o masywnym wirniku dwuwarstwowym, którego obwód magnetyczny wirnika wykonano z kompozytu proszkowego Somaloy 500 [5, 9]. Przedstawiono model polowy rozpatrywanej maszyny. Badania symulacyjne przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania, w którym zaimplementowano dwuwymiarowe ujęcie metody elementów skończonych i metodę potencjałów zespolonych [2, 7]. W pracy badano wpływ grubości warstwy przewodzącej δ wirnika na rozkład pola elektromagnetycznego i parametrów funkcjonalnych silnika. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych.

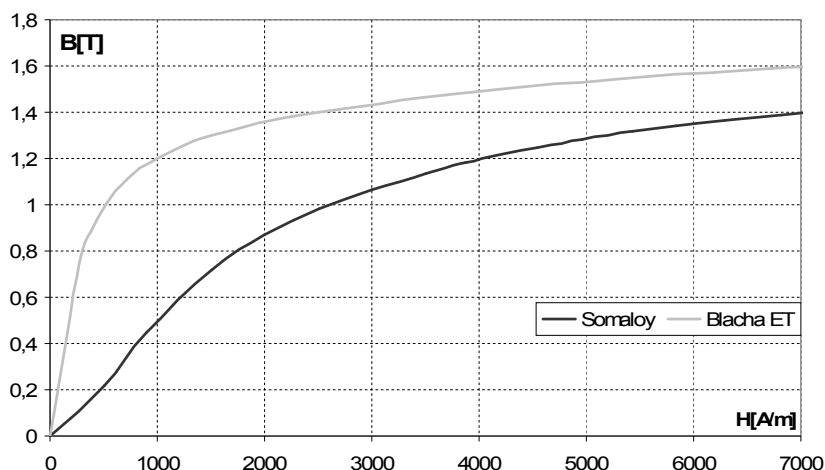
2. KONSTRUKCJA SILNIKA INDUKCYJNEGO O HYBRYDOWYM WIRNIKU

Budowę maszyny indukcyjnej o masywnym wirniku hybrydowym przedstawiono na rys. 1. W rozpatrywanej konstrukcji silnika wykorzystano stojan istniejącego silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 3kW i prędkości obrotowej

2905 rpm, natomiast jako wirnik zastosowano masywny wirnik dwuwarstwowy. Średnica zewnętrzna stojana silnika wynosiła 155 mm, wewnętrzna 94 mm, a długość pakietu 125 mm. Stojan maszyny składający się z 36 zębów wykonano z pakietowanych blach elektrotechnicznych o charakterystyce magnesowania pokazanej na rys. 2. W zębach stojana umieszczono uzwojenie jednowarstwowe połączone w gwiazdę o liczbie par biegunów p równej 1, liczbie zębów na biegun i fazę $q = 6$, i całkowitej liczbie zwojów fazowych z_f równej 180. Wirnik badanej maszyny składał się z przyszczelinowej warstwy przewodzącej o grubości δ (nazywanej w dalszej części artykułu także tuleją) i rdzenia magnetycznego wykonanego z kompozytu proszkowego typu Somaloy 500. Charakterystykę magnesowania zastosowanego materiału proszkowego przedstawiono na rys. 2. W badaniach przyjęto, że średnica zewnętrzna wirnika będzie stała i równa 93.8 mm niezależnie od grubości warstwy przewodzącej δ , której wartość zmieniano w zakresie od 0.5 mm do 5 mm z inkrementem równym 0.5 mm, uzmienniając tym samym wymiar średnicy zewnętrznej rdzenia wirnika. Długość czynną wirnika przyjęto równą 125mm, a średnicę wału 36 mm.



Rys. 1. Widok silnika indukcyjnego z hybrydowym wirnikiem dwuwarstwowym



Rys. 2. Charakterystyka magnesowania: a) blachy elektrotechnicznej i b) Solmaloy'u 500

3. MODEL POŁOWY BADANEJ MASZYN

W pracy analizowano ustalony stan pracy silnika indukcyjnego o masywnym wirniku hybrydowym. Dlatego do analizy rozkładu pola elektromagnetycznego zastosowano oprogramowanie, w którym zaimplementowano dwuwymiarowe ujęcie metody elementów krawędziowych i sformułowania wykorzystujące zespolony potencjał wektorowy \underline{A} . Uzyskano następujące równania macierzowe:

$$(\mathbf{R}_\mu + i\omega_s \mathbf{G})\underline{\phi} = \mathbf{K}\underline{\theta}, \quad (1)$$

w których: i jest jednostkowym wektorem urojonym, \mathbf{R}_μ jest macierzą reluktancji oczkowych określanych na podstawie efektywnych wartości przenikalności [7], wektor $\underline{\phi}$ reprezentuje krawędziowe wartości potencjału wektorowego \underline{A} , \mathbf{K} jest macierzą parametrów wagowych, a $\underline{\theta}$ wektorem przepływów w uzwojeniach silnika określanych na podstawie iloczynu macierzy \mathbf{z} opisującej rozłożenie zwojów w żłobkach stojana i wektora prądów \underline{i}_u w uzwojeniach maszyny. Symbolem \mathbf{G} oznaczono macierz konduktancji dla obszaru z prądami wirowymi (prądami indukowanymi) [3], a przez ω_s pulsację elektryczną prądów indukowanych w przewodzącej warstwie przyszczelinowej.

W celu odwzorowania ruchu wirnika posłużono się uproszczoną metodą, polegającą na uwzględnieniu tylko pierwszej harmonicznej siły elektromotorycznej przestrzennego rozkładu gęstości strumienia magnetycznego, tj. uwzględniono, że pomiędzy pulsacją ω_s prądów indukowanych w tulei, a pulsacją ω źródła zasilania zachodzi następująca relacja:

$$\omega_s = s\omega, \quad (2)$$

po zastosowaniu której równania (1) można zapisać następująco:

$$(\mathbf{R}_\mu + i\omega s \mathbf{G}) \underline{\phi} = \mathbf{K} \underline{\theta}. \quad (3)$$

Występujący w powyższym równaniu symbol s jest poślizgiem silnika indukcyjnego wyznaczanym z zależności:

$$s = \frac{n_o - n}{n_o}, \quad (4)$$

w której: n_o jest prędkością synchroniczną silnika, a n aktualną prędkością wirnika.

Ponieważ większość maszyn i urządzenia elektrycznych jest zasilane ze źródła napięcia, otrzymane równania (3) uzupełniono o równania opisujące rozptyw prądów w uzwojeniach stojana:

$$\underline{u}_z = (\mathbf{R} + i\omega \mathbf{L}) \cdot \underline{i}_u - \underline{e}, \quad (5)$$

i warunek, że suma prądów w uzwojeniach jest równa zeru:

$$\underline{i}_a + \underline{i}_b + \underline{i}_c = 0. \quad (6)$$

Wielkość \underline{u}_z jest wektorem fazowych napięć zasilających, \underline{i}_u wektorem prądów w uzwojeniach ($\underline{i}_u = [\underline{i}_a \quad \underline{i}_b \quad \underline{i}_c]^T$). Wektor \mathbf{R} reprezentuje rezystancje uzwojeń stojana, a wektor \mathbf{L} indukcyjności połączeń czołowych uzwojeń. Wielkość \underline{e} jest wektorem reprezentującym fazowe siły elektromotoryczne w uzwojeniach wyznaczanych z zależności:

$$\underline{e} = -i\omega z \underline{\phi}. \quad (7)$$

Z równań (3) i (5) otrzymano układ równań zespolonych opisujących rozkład pola elektromagnetycznego w silniku indukcyjnym o masywnym wirniku hybrydowym o postaci:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_\mu + i\omega s \mathbf{G} & \mathbf{K} z \\ i\omega z & \mathbf{R} + i\omega \mathbf{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{\phi} \\ \underline{i}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\theta} \\ \underline{u}_z \end{bmatrix}. \quad (8)$$

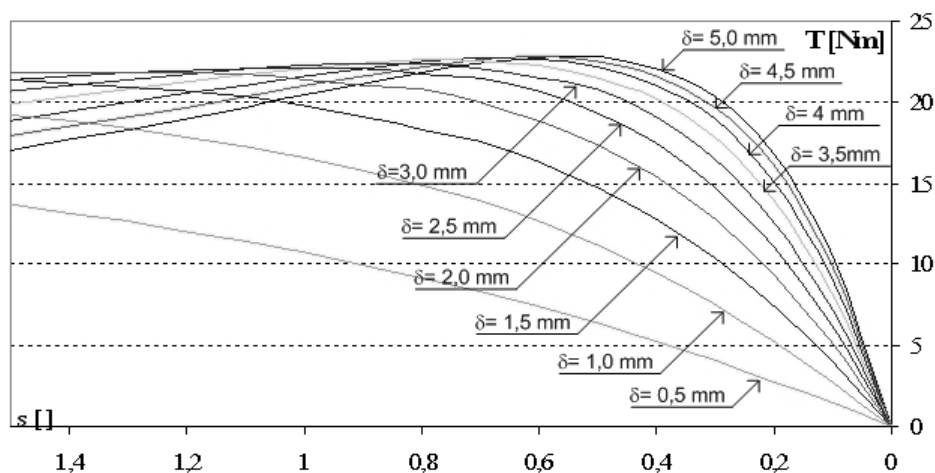
Układ równań (8) rozwiązywano iteracyjnie.

Wartość momentu elektromagnetycznego w badanym silniku wyznaczono na podstawie otrzymanego rozkładu pola elektromagnetycznego i całki z tensora naprężeń Maxwell obliczanej po cylindrycznej powierzchni obejmującej wirnik rozpatrywanej maszyny [11].

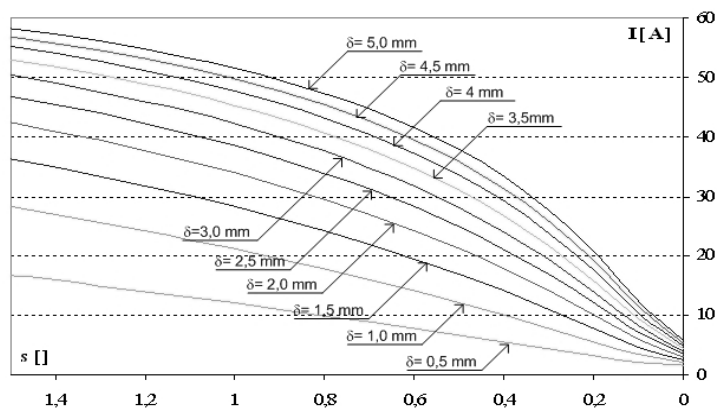
4. WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

W pracy zbadano wpływ: (a) zmian grubości warstwy przewodzącej δ i (b) rodzaju zastosowanego materiału przewodzącego w wirniku na parametry funkcjonalne analizowanej maszyny. W ramach badań przeprowadzono dużą liczbę symulacji, w których nie tylko wyznaczano parametry całkowite silnika, ale także obserwowano zmiany w rozkładzie pola elektromagnetycznego. W artykule

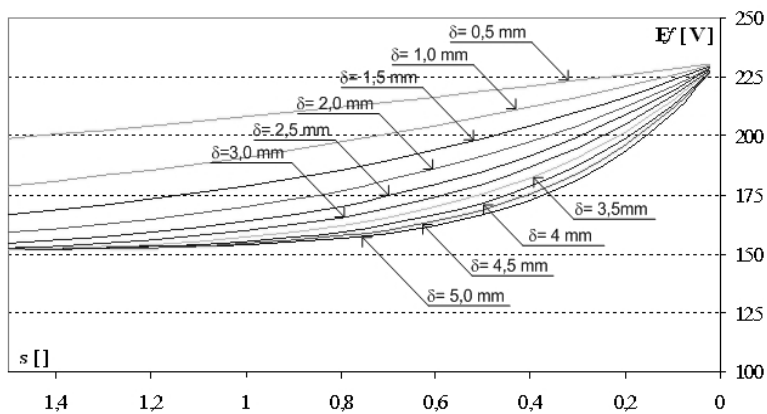
ograniczono się jednak do zaprezentowania charakterystyk wybranych wielkości w funkcji poślizgu silnika dla zadanych grubości warstwy δ , w zakresie od 0.5 mm do 5 mm z inkrementem równym 0.5 mm. Otrzymane charakterystyki pokazano na zamieszczonych poniżej rysunkach. Na rysunku 3 zestawiono charakterystyki przedstawiające moment elektromagnetyczny w funkcji poślizgu silnika. Następnie zamieszczono charakterystyki przedstawiające wartości skuteczne prądów w uzwojeniach i indukowanych sił elektromotorycznych (odpowiednio rys. 4 i 5). Na rysunku 6 przedstawiono charakterystyki mocy mechanicznej na wale silnika w zależności od aktualnej wartości poślizgu s . Prezentowane w artykule charakterystyki otrzymano jako wyniki symulacji numerycznej dla przypadku, w którym warstwa przewodząca w wirniku była wykonana z aluminium elektrotechnicznego. Obliczenia przeprowadzono dla silnika zasilanego ze źródła napięcia przemiennego o częstotliwości 50 Hz i wartości napięcia fazowego równego 230V. Na rysunku 7 i 8 przedstawiono natomiast rozkłady wektora gęstości strumienia magnetycznego wraz z naniesionymi mapami linii sił pola dla dwóch wybranych wartości poślizgów $s = 0$ i $s = 1$, tj. dla stanu zwarcia silnika i idealnego biegu jałowego przy $\delta = 1$ mm. Rozkłady wykreślono dla chwili czasowej, w której wartość prądu w fazie A jest maksymalna, a w pozostałych fazach równa połowie wartości maksymalnej ze znakiem ujemnym.



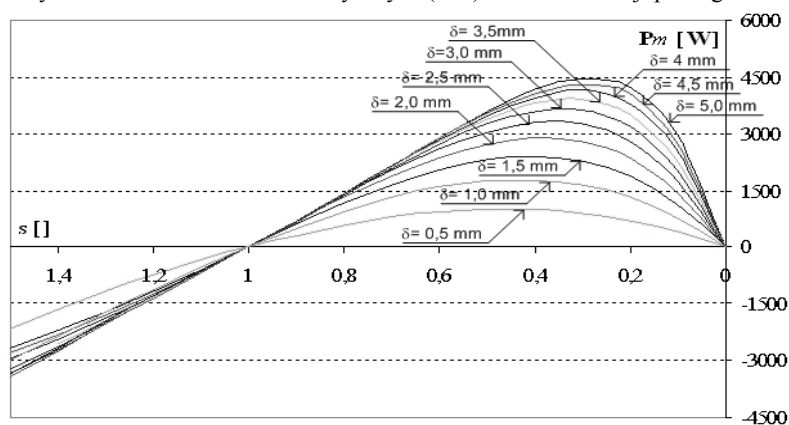
Rys. 3. Charakterystyki momentu elektromagnetycznego w funkcji poślizgu s dla wybranych wartości δ



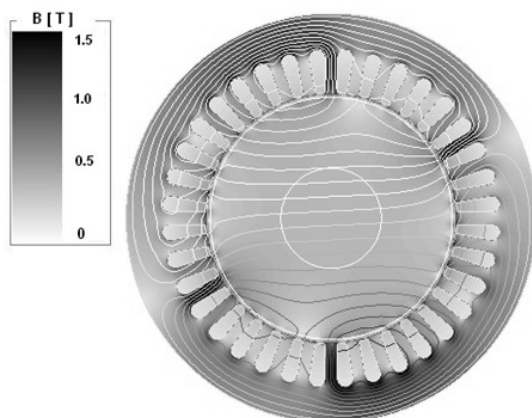
Rys. 4. Skuteczne wartości prądów w uzwojeniach silnika w funkcji poślizgu s



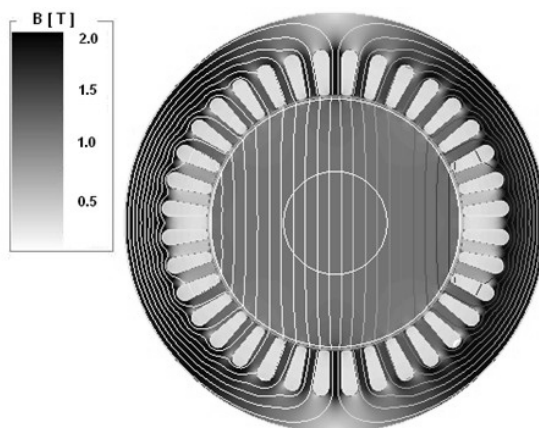
Rys. 5. Wartości sił elektromotorycznych (sem) silnika w funkcji poślizgu s



Rys. 6. Charakterystyki mocy mechanicznej na wale silnika w funkcji poślizgu s



Rys. 7. Rozkład modułu wektora gęstość strumienia magnetycznego i linii sił pola dla poślizgu $s = 1$ i $\delta = 1\text{mm}$



Rys. 8. Rozkład modułu wektora gęstość strumienia magnetycznego i linii sił pola dla poślizgu $s = 0$ i $\delta = 1\text{mm}$

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że zmiana grubości δ warstwy przewodzącej w wirniku wpływa znacząco na wartość parametrów funkcjonalnych silnika. W przypadku momentu elektromagnetycznego zwiększenie wartości δ poza zmianą wartości momentu maksymalnego powoduje jego przesunięcie na charakterystyce w kierunku mniejszych wartości poślizgów. Zwiększanie wartości δ powoduje wzrost wartości prądów. Zwiększa się także wartość prądu magnesującego, ponieważ strumień magnetyczny musi pokonać większą szczelinę zastępczą obwodu. Wartość mocy mechanicznej na wale wzrośnie. Zmniejszeniu ulega natomiast wartość siły elektromotorycznej.

5. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano polowy model silnika indukcyjnego o masywnym wirniku hybrydowym, którego konstrukcję opracowano korzystając z istniejącego silnika klatkowego. W rozważanej konstrukcji fabryczny wirnik zastąpiono masywnym wirnikiem dwuwarstwowym. Rdzeń magnetyczny wirnika wykonano z materiału proszkowego Somaloy 500, a przyszczelinową warstwę przewodzącą z aluminium elektrotechnicznego. Odmienność rozpatrywanej konstrukcji silnika polegała na zastosowaniu nowego typu materiału kompozytowego na obwód magnetyczny i na nowym technologicznie łatwiejszym procesie kształtowania i wytwarzania elementów maszyn elektrycznych. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych rozpatrywanej konstrukcji silnika. W pracy skoncentrowano się na analizie wpływu zmian grubości warstwy przewodzącej δ wirnika na rozkład pola elektromagnetycznego i parametrów funkcjonalnych silnika. Symulacje przeprowadzono za pomocą oprogramowania wykorzystującego dwuwymiarowe ujęcie metody elementów skończonych i wektorowy potencjał zespolony \underline{A} .

LITERATURA

- [1] M. Dąbrowski, J. Gieras, *Maszyny indukcyjne o wirniku masywnym*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa – Poznań 1977.
- [2] Y. Du Terrail, J. Sabonnadiere, P. Masse, J. Coulomb, Nonlinear complex finite elements analysis of electromagnetic field in steady-state AC devices, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1984, vol. 20, no. 4, pp. 549-552.
- [3] Demenko A., *Symulacja dynamicznych stanów pracy maszyn elektrycznych w ujęciu polowym*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
- [4] D. Gerling, Design of fan induction motor with multilayer rotor structure and large gap, *International Conference on electrical machines (ICEM 2000)*, Helsinki, Finland, pp. 458-461.
- [5] L. Hultman, O. Andersson, Advances in SMC Technology – Materials and Applications, in: XVIth International Congress and Exhibition EURO PM2009, 13 October 2009, Copenhagen, Denmark, [online] www.hoganas.com.
- [6] D. Kapelski, B. Slusarek, B. Jankowski, M. Karbowski, M. Przybylski, Powder magnetic circuits in electric machines, *XIV International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies AMPT 2011*, 13–16 July 2011, Istanbul, Turkey.
- [7] G. Paoli, O. Biro, G. Buchgraber, Complex Representation in Nonlinear Time Harmonic Eddy Current Problems, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, vol. 34, no. 5, pp. 2625-2628.
- [8] J. Pyrhönen, J. Nerg, P. Kurronen, Solid rotor end effects-analytic and experimental results for high-power high speed machines, *IEEE Eurocom 2009*, pp 688-695.
- [9] H. Skarrie, *Design of powder core inductors*, Lund university, Lund 2001.

- [10] B. Slusarek, L. Długiewicz, Powder magnetic materials - area of application, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2006, 23-26 May 2006, ITALY, Taormina.
- [11] D. Stachowiak, Wyznaczanie momentu elektromagnetycznego maszyn magneto-elektrycznych metodą węzłowych i krawędziowych elementów skończonych, Rozprawa Doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2004.
- [12] J. Staszak, B. Węgliński, Badanie silników asynchronicznych o litych wirnikach, Wiadomości Elektrotechniczne Nr 16, 1980.
- [13] R. Wojciechowski, C. Jedryczka, P. Łukaszewicz, D. Kapelski, Analysis of high speed permanent magnet motor with powder core material, XIV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, ISEF 2011, 1-3 September 2011, Funchal, Madeira, Materiały na CD, OS3_05, (4 strony).

THE FIELD ANALYSIS OF INDUCTION MOTOR WITH A SOLID HYBRID ROTOR

In the paper the results of field analysis of the induction motor with a solid hybrid rotor have been presented. The stator construction has been based on the existing induction motor, in which a classical squirrel-cage rotor has been replaced with a solid hybrid rotor. In considered motor the hybrid rotor consist of a magnetic core made of soft magnetic composite material Somaloy 500 and a conductive layer made of aluminum. In the investigations, authors concentrated primarily on the change influence of conductive layer thickness δ of rotor on the electromagnetic field distributions and functional parameters in considered motor. The calculations have been performed using the 2D FEM software, in which the complex potential vector \underline{A} has been applied. The selected results of analysis are compared and discussed.