

Marcin ANTCZAK*
Dariusz KAPELSKI**
Jerzy SIWIEC***
Wojciech SZELĄG*

ANALIZA OBWODU ELEKTROMAGNETYCZNEGO SILNIKA O BIEGUNACH WPISYWANYCH

Przedstawiono budowę i zasadę działania silników o biegunach wpisywanych. Do analizy silnika zaproponowano dwuwymiarowy połowy model zjawisk elektromagnetycznych uwzględniający histerezę magnetyczną materiałów magnetycznie twardych. W rozważaniach uwzględniono ruch wirnika, nieliniowe właściwości materiałów magnetycznie miękkich oraz prądy wirowe indukowane w elementach masywnych przewodzących. Do rozwiązania równań modelu wykorzystano metodę elementów skończonych krawędziowych oraz algorytm kolejnych kroków czasowych. Opracowaną metodę oraz oprogramowanie wykorzystano do analizy silnika o biegunach wpisywanych.

1. WPROWADZENIE

Silniki o biegunach wpisywanych opracowano w ostatniej dekadzie ubiegłego wieku w Stanach Zjednoczonych. W stanie pracy ustalonej zachowują się one jak silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi. Są one przystosowane do rozruchu bezpośredniego polegającego na załączeniu na uzwojenia stojana napięcia zasilającego. Po załączeniu napięcia, powstaje w silniku moment elektromagnetyczny histerezowy oraz moment asynchroniczny. Zaletą tych silników w porównaniu z silnikami synchronicznymi magnetoelektrycznymi o rozruchu asynchronicznym jest brak w przebiegu momentu elektromagnetycznego rozruchowego składowej przemiennej wytwarzanej przez magnesy trwałe. Składowa ta utrudnia rozruch silników o magnesach trwałych. Silniki o biegunach wpisywanych charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami rozruchowymi. Projektuje się je tak, by względny prąd rozruchowy był nie większy od 2 i by nadwyżka momentu elektromagnetycznego nad momentem oporowym w zakresie zmian prędkości od zera do synchronicznej była niewielka [2, 3, 4]. Prowadzi to do powstania w układzie

* Politechnika Poznańska.

** Instytut Tele- i Radiotechniczny, Warszawa.

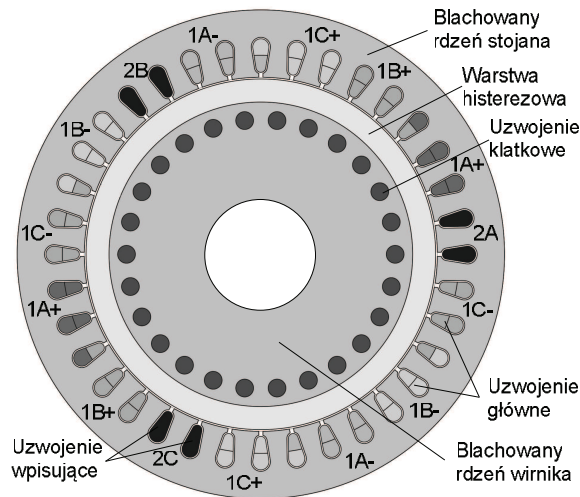
*** Wyższa Szkoła Gospodarki w Bydgoszczy.

napędowym niewielkiego momentu dynamicznego i wydłużenia czasu rozruchu. Z porównania katalogowych wartości sprawności oraz współczynników mocy silników indukcyjnych i silników o biegunach wpisywanych wynika, że przy tej samej mocy i prędkości obrotowej większe wartości tych parametrów uzyskuje się dla silników o biegunach wpisywanych [2, 4]. Aktualnie produkuje się na świecie silniki biegunach wpisywanych przystosowane do zasilania z sieci jednofazowej. Znajdują one zastosowanie w układach napędowych o nieregulowanej prędkości obrotowej, np. w napędach pomp i wentylatorów.

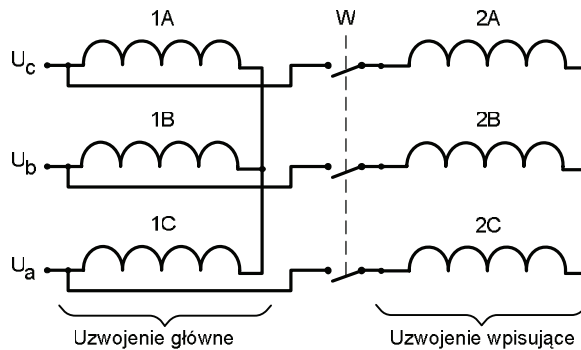
W literaturze jest bardzo mało informacji o silnikach o biegunach wpisywanych. Dotyczy to zwłaszcza silników trójfazowych [5]. Prezentowane są budowa, zasada działania oraz parametry funkcjonalne silników jednofazowych [3, 4, 6]. Badania nad silnikami o biegunach wpisywanych są w początkowym stadium rozwoju. Nie opracowano jeszcze dla tych silników metod kompleksowej analizy sprzężonych zjawisk elektromagnetycznych, cieplnych i mechanicznych. Nie ma również komercyjnego oprogramowania do analizy i projektowania tych silników z uwzględnieniem zjawiska histerezy magnetycznej. Z powyższych względów autorzy opracowali algorytm i oprogramowanie bazujące na polowym modelu zjawisk elektromagnetycznych uwzględniającym zjawisko histerezy magnetycznej. Oprogramowanie to wykorzystano do analizy obwodu elektromagnetycznego silnika o biegunach wpisywanych.

2. SILNIKI O BIEGUNACH WPISYWANYCH

W odróżnieniu od klasycznych maszyn synchronicznych w silnikach o biegunach wpisywanych może zmieniać się zarówno liczba jak i położenie biegunów wzdłuż obwodu wirnika. W literaturze prezentowane są głównie silniki o biegunach wpisywanych przystosowane do zasilania z sieci jednofazowej [2, 6, 7]. Autorzy w ramach prac prowadzonych na tego typu silnikami opracowali silnik trójfazowy o strukturze pokazanej na rys. 1 [1]. Schemat połączeń uzwojeń przedstawiono na rys. 2. W żłobkach stojana rozmieszczone jest uzwojenie główne wytwarzające pole wirujące oraz uzwojenie dodatkowe. Uzwojenia fazowe 1A, 1B, 1C uzwojenia głównego oraz cewki 2A, 2B, 2C uzwojenia dodatkowego połączone w gwiazdę. Uzwojenie dodatkowe z powodu specyficznego sposobu działania nazywane jest uzwojeniem „wpisującym”. Jest ono przeznaczone do formowania wzdłuż obwodu wirnika w warstwie materiału o szerokiej pętli histerezy pożądanego rozkładu wektora namagnesowania. Warstwa ta znajduje się na powierzchni wirnika. Liczba oraz rozpiętość kątowa utworzonych przez to uzwojenie biegunów zależy od prędkości wirowania wirnika względem stojana. Rdzenie stojana i wirnika złożone są z wykrojów wykonanych z blachy elektrotechnicznej. W wirniku oprócz warstwy materiału magnetycznego o szerokiej pętli histerezy znajduje się uzwojenie klatkowe. W celu ograniczenia prądu rozruchowego wykonane jest ono z materiału o dużej rezystywności.



Rys. 1. Struktura silnika trójfazowego o biegunach wpisywanych



Rys. 2. Schemat połączeń uzwojeń silnika o biegunach wpisywanych

Po załączeniu napięcia zasilającego, silnik przyspiesza pod wpływem momentu obrotowego asynchronicznego oraz histerezowego. Moment histerezowy powstaje w wyniku przemagnesowywania przez pole wirujące powierzchniowej warstwy wirnika wykonanej z materiału o szerokiej pętli histerezy. Po uzyskaniu przez wirnik 0,7-0,9 prędkości synchronicznej załączane jest uzwojenie wpisujące bieguny. Pole wytworzone przez to uzwojenie współdziała z polem wirującym wytworzonym przez uzwojenie główne. W wyniku czego w materiale magnetycznie twardym uzyskuje się większe wartości wektora namagnesowania niż przy oddziaływaniu tylko pola wirującego. Prowadzi to do wzrostu momentu elektromagnetycznego, przyspieszenia wirnika i wpadu w synchronizm. Po wpadzie w synchronizm warstwa materiału o szerokiej pętli histerezy jest namagnesowana w taki sposób, że liczba biegunów wirnika jest równa liczbie biegunów uzwojenia stojana.

W chwili po wejściu silnika w synchronizm uzwojenie wpisujące jest odłączane od sieci i silnik pracuje jako silnik synchroniczny magnetoelektryczny. Przy ponownym rozruchu silnika, bezpośrednio po złączeniu napięcia zasilającego, udarowy przepływ uzwojenia głównego niszczy poprzedni rozkład wektora namagnesowania i przemagnesowuje na nowo wirnik.

Przebieg zjawisk elektromagnetycznych i mechanicznych w silniku o biegunach wpisywanych jest bardzo złożony. Ich analizę komplikują nieliniowe właściwości materiałów magnetycznie miękkich, histereza magnetyczna warstwy materiału na powierzchni wirnika, indukowane prądy wirowe oraz ruch środowisk [1, 8]. Zjawiska te trudno jest odwzorować w modelu obwodowym maszyny elektrycznej [4]. Dlatego w artykule do analizy silnika o biegunach wpisywanych wykorzystuje się model połowo-obwodowy zjawisk sprzężonych. W modelu tym przyjmuje się, że pole magnetyczne w części elektromagnetycznie czynnej silnika jest niezmiennie wzdłuż osi wału, a trójwymiarowość pola w obszarze połączeń czołowych uwzględnia się w sposób uproszczony przez wprowadzenie ich rezystancji i indukcyjności [1, 8].

3. ALGORYTM ANALIZY ZJAWISK SPRZEŻONYCH

Połowy model nieustalonych zjawisk sprzężonych w silniku o biegunach przedstawiono w pracy [1]. Do formowania równań modelu dyskretnego zjawisk sprzężonych wykorzystano metodę elementów skończonych krawędziowych [8]. Zagadnienie trójwymiarowe sprowadzono do dwuwymiarowego. Przy opisie pola elektromagnetycznego posłużono się wektorowym potencjałem magnetycznym \mathbf{A} oraz skalarnym potencjałem elektrycznym V [1, 8]. W wyniku dyskretyzacji przestrzeni i czasu uzyskano układ równań macierzowych opisujących wartości krawędziowe ϕ wektorowego potencjału magnetycznego \mathbf{A} oraz prądy w uzwojeniach

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}^n + \mathbf{G}(\mathbf{I} - \mathbf{C}_k)\Delta t^{-1} & -\mathbf{z} \\ -\mathbf{z}^T & -(\mathbf{R}\Delta t + \mathbf{L}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}^n \\ \mathbf{i}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^n \\ -\Delta t \mathbf{U}^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}(\mathbf{I} - \mathbf{C}_k)\Delta t^{-1} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{z}^T & -\mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}^{n-1} \\ \mathbf{i}^{n-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

oraz położenie α i prędkość kątową ω wirnika

$$\alpha^{n+1} = (\Delta t)^2 (T^n - T_o^n - T_t^n) J_b^{-1} + 2\alpha^n - \alpha^{n-1} \quad (2)$$

$$\omega(t_n + 0,5\Delta t) = \left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{t_n+0,5\Delta t} = \frac{(\alpha^{n+1} - \alpha^n)}{\Delta t} \quad (3)$$

gdzie: \mathbf{S} – macierz reluktancji, $\boldsymbol{\phi}$ – wektor potencjałów krawędzi siatki, \mathbf{z} – macierz określająca liczbę zwojów przyporządkowaną krawędziom, \mathbf{G} – macierz zastępczych konduktancji, \mathbf{M} – wektor przepływów odwzorowujący namagnesowanie warstwy histerezy, \mathbf{U} – wektor napięć zasilających, \mathbf{i} – wektor prądów w uzwojeniach, \mathbf{R} – macierz rezystancji uzwojeń, \mathbf{L} – macierz indukcyjności połączeń czołowych, \mathbf{C}_k – macierz współczynników, $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ –

długość kroku czasowego, n oraz $n-1$ – odpowiednio indeksy wyróżniające wielkości dla chwil $t = t_n$ i $t = t_{n-1}$. Przykładowo $\mathbf{S}_n = \mathbf{S}(t_n)$, $\varphi_n = \varphi(t_n)$.

Przy odwzorowywaniu właściwości magnetycznych materiałów magnetycznie miękkich przyjęto, że

$$\mathbf{H} = \nu \mathbf{B} \quad (4)$$

przy czym reluktywność ν wyznacza się z jednoznacznej charakterystyki magnesowania materiału. Natomiast dla potrzeb analizy zjawiska przemagnesowywania warstwy powierzchniowej wirnika wykonanej z materiału magnetycznego twardego założono, że

$$\mathbf{H} = \nu_0 \mathbf{B} - \mathbf{H}_i \quad (5)$$

gdzie \mathbf{H}_i jest wektorem magnetyzacji, a ν_0 reluktywnością próżni.

W modelu matematycznym właściwości magnetycznych magnesu trwałego przyjmuje się, że materiał magnetycznie twardy charakteryzuje się anizotropią prostokątną oraz uwzględnia się zjawisko histerezy magnetycznej [8, 9]. W opracowanym modelu dyskretnym do odwzorowywania histerezowych właściwości materiału, z którego wykonano powierzchnią warstwę wirnika, wykorzystano model odwrotny Jilesa-Athertona [9].

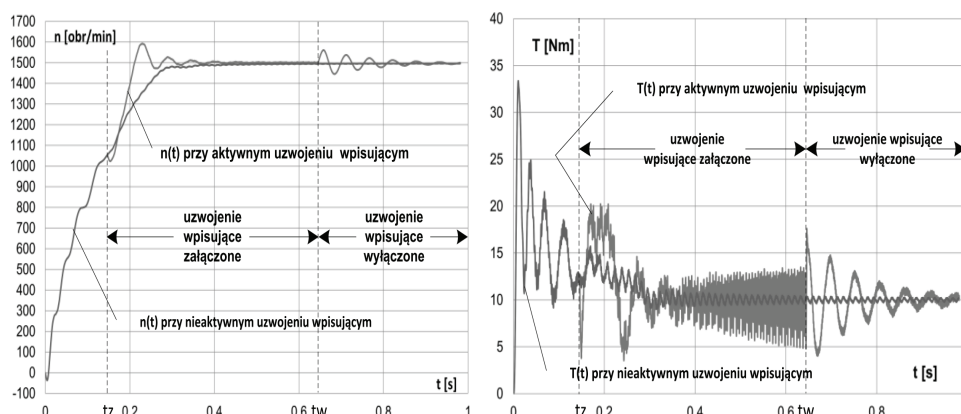
Układ równań (1)-(3), w zależności od gęstości dyskretyzacji przestrzeni, może zawierać od kilkunastu do kilkudziesięciu tysięcy nieliniowych równań algebraicznych. Do jego rozwiązania wykorzystuje się metodę Newtona-Raphsona. [8]. Na podstawie przedstawionego modelu dyskretnego zjawisk opracowano program komputerowy w środowisku programistycznym Delphi XE do analizy ustalonych i nieustalonych stanów pracy silników o biegunach wpisywanych.

4. ANALIZA OBWODU ELEKTROMAGNETYCZNEGO

W celu przetestowania opracowanego oprogramowania przeprowadzono analizę obwodu elektromagnetycznego silnika o strukturze pokazanej na rys. 1. Przyjęto, że do budowy silnika wykorzystano pakiet stojana trójfazowego silnika indukcyjnego typu Sg 100L-4B o napięciu zasilania $U = 400$ V, mocy 3kW. Warstwę histerezową w wirniku zrobiono z dielektromagnesu, o indukcji remanencji 0,73 T oraz natężeniu koercji 464 kA/m, opracowanego w Instytucie Tele- i Radiotechnicznym z Warszawy. Prętowe uzwojenie klatkowe wykonano z aluminium. Obliczenia przeprowadzono na komputerze o dwu procesorach czterordzeniowych - Intel XENON W5580 3,2Ghz 64bit. Czas obliczeń dla jednego kroku czasowego wynosił ok. 90 sekund.

Analizowano wybrane stany pracy silnika. Przedstawiono wyniki symulacji procesu rozruchu silnika. Rozpatrzono rozruch bezpośredni silnika obciążonego momentem oporowym $T_0 = 10$ Nm. W rozważaniach przyjęto, że przed załączeniem silnika do sieci materiał magnetycznie twardy był rozmagnesowany. Uzyskany przykładowy przebieg momentu elektromagnetycznego oraz prędkości obrotowej przedstawiono odpowiednio na rys. 3. Widoczny jest wpływ załączenia uzwojenia

wpisującego na przebiegi momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej. Uzwojenie wpisujące załączone do sieci przy osiągnięciu przez wirnik prędkości 1050 obr/min, tj. w chwili $t = t_z$. Załączeniu uzwojenia towarzyszy stan nieustalony. Można zaobserwować zwiększenie momentu elektromagnetycznego i szybsze osiągnięcie prędkości synchronicznej w porównaniu z rozruchem przeprowadzonym bez załączania uzwojenia wpisującego.



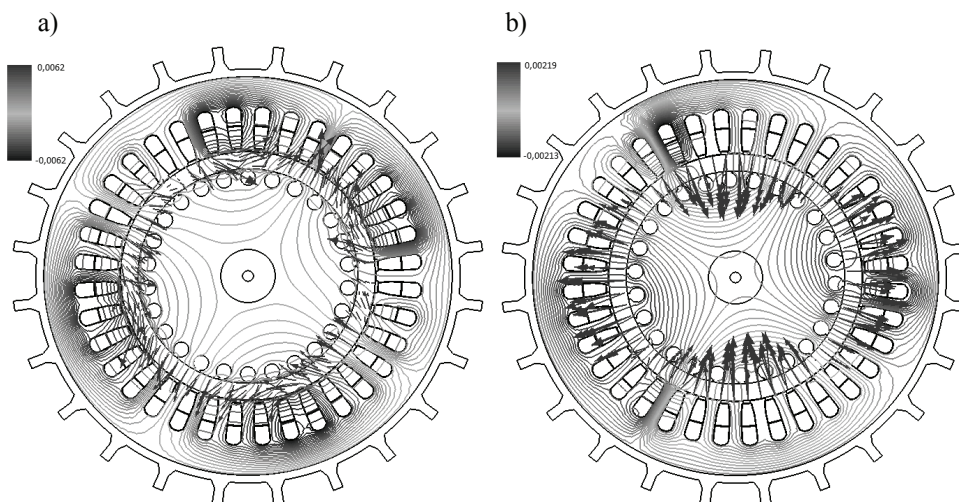
Rys. 3. Przebiegi prędkości oraz momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu silnika o biegunach wpisywanych

Stan nieustalony związany jest również z wyłączeniem uzwojenia wpisującego. Świadczą o tym pulsacje w przebiegach momentu i prędkości obrotowej dla $t > t_w$. Przykładowe rozkłady linii sił pola magnetycznego oraz rozkłady wektora namagnesowania w warstwie o szerokiej pętli histerezy bezpośrednio po rozruchu i wstanie pracy ustalonej pokazano na rys. 4. Wyniki analizy wpływu liczby zwojów uzwojenia głównego przy aktywnym i nieaktywnym uzwojeniu wpisującym na przebieg procesu rozruchu zestawiono na rys. 5. Natomiast wpływ uzwojenia wpisującego na przemagnesowywanie warstwy materiału o szerokiej pętli histerezy w podobszarach usytuowanych przy szczelinie powietrznej oraz przy rdzeniu wirnika podczas rozruchu silnika pokazano na rys. 6. Na rysunku umieszczono również graniczną pętlę histerezy materiału zastosowanego na warstwę histerezową.

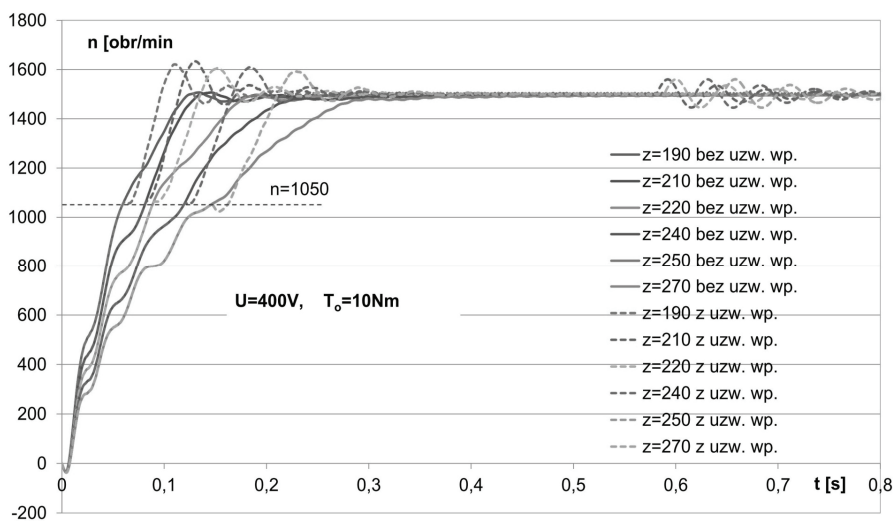
5. UWAGI KOŃCOWE

Z przeprowadzonych rozważań i analizy wyników obliczeń wynika, że opracowane oprogramowanie można wykorzystać do analizy zjawisk elektromagnetycznych powiązanych z ruchem w silnikach o biegunach wpisywanych. Przewiduje się zastosowanie opracowanego oprogramowania do zaprojektowania silnika modelowego o biegunach wpisywanych. Po zbudowaniu i przeprowadzeniu

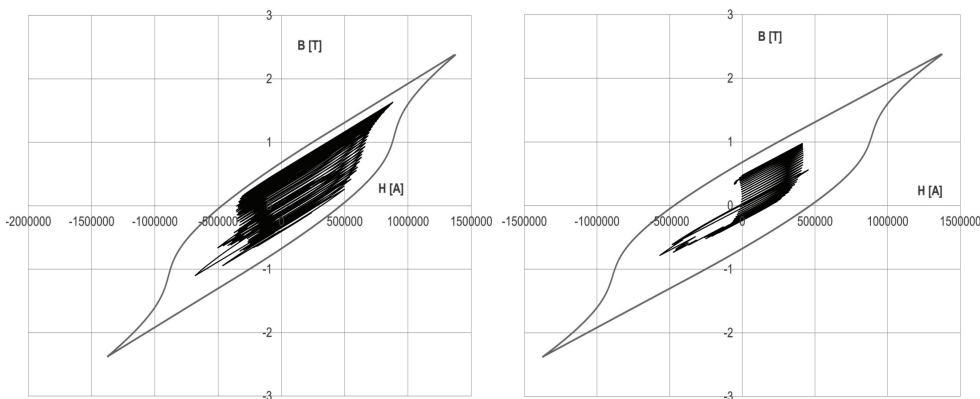
badan laboratoryjnych tego silnika autorzy ostatecznie zweryfikują przydatność opracowanej metody i oprogramowania do analizy zjawisk sprzężonych, symulacji stanów pracy i projektowania silników o biegunach wpisywanych.



Rys. 4. Rozkład linii sił pola magnetycznego w silniku i wektora namagnesowania w warstwie histerezy a) bezpośrednio po załączeniu silnika do sieci oraz b) w stanie pracy ustalonej



Rys. 5. Wpływ liczby zwojów uzwojenia głównego na przebieg procesu rozruchu



Rys. 6. Historia magnesowania podobszarów w warstwie histerezowej leżących (po lewej) przy szczelinie powietrznej oraz (po prawej) przy powierzchni rdzenia wirnika podczas rozruchu silnika przeprowadzonego z załączeniem uzwojenia wpisującego

LITERATURA

- [1] Antczak M., Szelaĝ W., Polowo-obwodowa analiza silnika trójfazowego o biegunach wpisywanych, *Przegląd Elektrotechniczny*, NR 4a, 2012, s. 10-13. 120-125.
- [2] Layton L., Written-Pole Motors, <http://www.pdhengineer.com/courses/e/E-3023.pdf>, (dostęp 2010.10.13), 1-30.
- [3] Materiały informacyjne firmy Precise Power Corporation, www.written-pole.com, (dostęp 2011.03.05).
- [4] Zabet Khosousi H., Mirsalim M., Dynamic modeling of a 20-Horsepower single-phase written pole motor, *IEEE Trans. Magn.*, 40, (2004), No. 4, 1901–1904.
- [5] Menzies R. W., Ge L., Theory investigation of 3-phase written pole motors, *Proc. IEEE Can. Conf.*, 2002, 162-165.
- [6] Hannah A., Electrical field measurements on an EPRI two-pole, 20-HP written pole motor, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 33, 1997, No. 2, 408–414.
- [7] Byung-Taek K., Dae-Kyong K., Se-Hyun R., Duck-Shick S., Byung K., Exciter Design and Characteristic Analysis of a Written-Pole Motor, *IEEE Trans. Magn.*, 45, 2009, No.3, 1768-1771.
- [8] Szelaĝ W., *Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magnetoreologiczną*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
- [9] Torre E.D., *Magnetic Hysteresis*, Wiley-IEEE Press, New York 2000.

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC CIRCUIT OF WRITTEN POLE MOTOR

In the paper an electric motor with written poles has been presented. To the analysis of electromagnetic and mechanical motion phenomena in the motor the field-circuit model has been proposed. In the consideration the magnetic hysteresis of permanent magnet material has been taken into account. The numerical implementation of proposed model is based on the FEM and a step-by-step algorithm. Elaborated method and software has been applied to the analysis of written pole motor. Chosen results of analysis of electromagnetic circuit of a written pole motor have been presented.