

Wojciech Szelaąg, Marcin Antczak, Mariusz Barański, Piotr Szelaąg, Piotr Sujka
Politechnika Poznańska

NUMERYCZNA METODA ANALIZY SILNIKA O BIEGUNACH WPISYWANYCH

NUMERICAL METHOD OF ANALYSIS OF WRITTEN POLE MOTOR

Abstract: In the paper an electric motor with written poles has been presented. The mathematical model of coupled electromagnetic, thermal and mechanical motion phenomena in the motor with written poles has been proposed. The nonlinearity of the magnetic soft material, induced eddy currents and influence of temperature on magnetic and electric properties of materials have been taken into account. For the mapping of magnetic hysteresis, Jiles-Atherton model has been applied. The numerical implementation of the mathematical model is based on the finite element method and a step-by-step algorithm. In order to solve the equations of the discrete model of coupled phenomena, the iterative Newton-Raphson combined with the block over relaxation method have been applied. Elaborated special software has been successfully applied to the simulation of the start-up of the written pole motor.

1. Wstęp

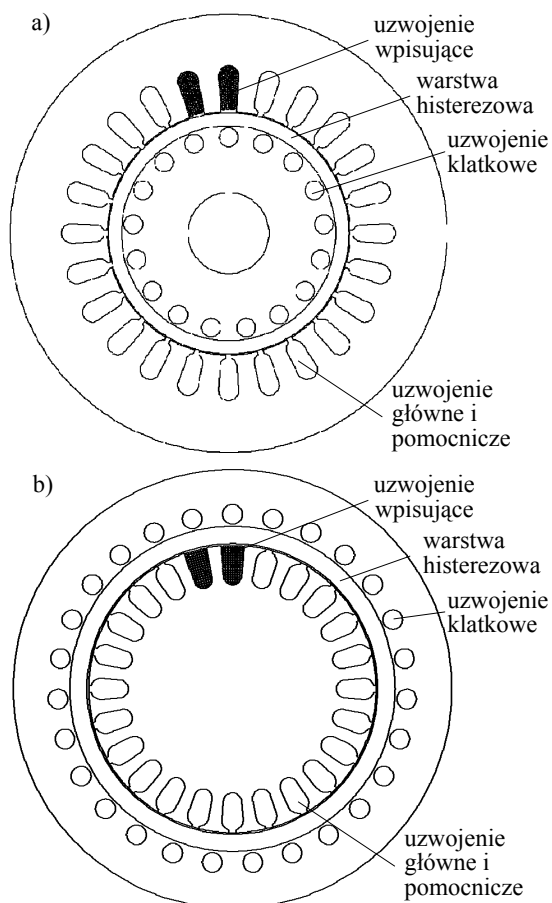
Silnik o biegunach wpisywanych został opracowany w Stanach Zjednoczonych na początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia [5]. Jest on przystosowany do rozruchu bezpośredniego, tj. powstaje w nim moment rozruchowy po przyłożeniu napięcia sieci zasilającej do uzwojeń twornika. W stanie pracy ustalonym silnik zachowuje się jak maszyna synchroniczna magnetoelektryczna. Jego zaletą w porównaniu z silnikami synchronicznymi magnetoelektrycznymi jest brak w przebiegu momentu elektromagnetycznego rozruchowego składowej przemiennej wytwarzanej przez magnesy trwałe. Składowa ta utrudnia rozruch bezpośredni maszyn o magnesach trwałych. W celu uzyskania pożądanego przebiegu momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu bezpośredniego silników synchronicznych magnetoelektrycznych stosuje się w ich wirnikach uzwojenia klatkowe. Wadą takiego rozwiązania są bardzo duże przetężenia prądowe podczas rozruchu. Osiągają one wartość od 4 do 10 razy większą od prądu znamionowego. Dużym przetężeniem prądowym towarzyszą udary elektromagnetycznego momentu obrotowego, co stwarza zagrożenie dla napędzanych przez te silniki układów. Sytuacja taka nie ma miejsca przy rozruchu silników o biegunach wpisywanych. Względny prąd rozruchowy jest w nich najczęściej mniejszy od 2, a w wyniku płaskiego przebiegu charakterystyki momentu rozruchowego w funkcji prędkości nadwyżka tego momentu nad momentem oporowym jest niewielka [4]. Prowadzi to do powstania w układzie napędowym niewielkiego momentu dynamicznego i wydłużenia czasu rozruchu. Z porównania ka-

talogowych wartości sprawności oraz współczynników mocy silników indukcyjnych i silników o biegunach wpisywanych wynika, że przy tej samej mocy i prędkości obrotowej wyższe wartości tych parametrów uzyskuje się dla silników o biegunach wpisywanych [3, 4, 7]. Z tego względu silniki te bardzo dobrze nadają się m.in. do napędu pomp i wentylatorów pracujących w kopalniach.

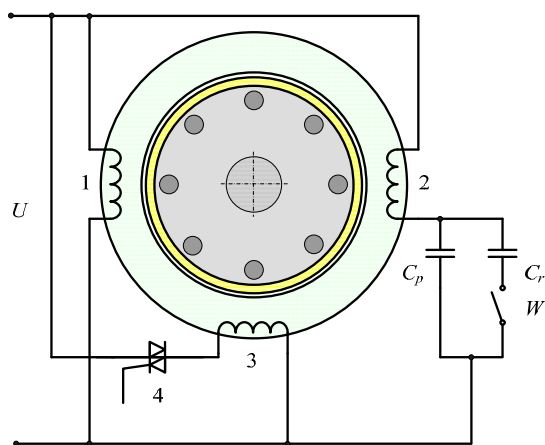
2. Budowa silnika o biegunach wpisywanych

W klasycznej maszynie synchronicznej bieguny wirnika nie zmieniają położenia względem magnetycznej. W maszynie o biegunach wpisywanych może się zmieniać zarówno położenie jak i liczba biegunów wzdłuż obwodu wirnika. W literaturze prezentowane są konstrukcje o wirniku wewnętrznym i wirniku zewnętrznym (rys. 1) [4]. Silniki tego typu najczęściej przystosowane są do zasilania z sieci jednofazowej, rzadziej trójfazowej. W Stanach Zjednoczonych buduje się silniki jednofazowe o biegunach wpisywanych na moce od 15 do kilkudziesięciu, a nawet kilkuset koni mechanicznych [5]. Schemat połączeń silnika jednofazowego o biegunach wpisywanych zamieszczono na rys. 2. Uzwojenia główne (1) i pomocnicze (2) wzniesające wirujące pole magnetyczne umieszczone są w żłobkach stojana. Uzwojenie pomocnicze działa w taki sam sposób jak w klasycznym silniku jednofazowym, tj. kondensator C_r jest załączony przez wyłącznik W tylko podczas procesu rozruchu. Oprócz uzwojenia głównego i pomocniczego w żłobkach stojana znajduje się dodatkowe uzwojenie (3) służące do magnesowania warstwy materiału magnetycznie twardego znajdującego się na powierzchni wirnika.

Magnesowanie to wiąże się z formowaniem wzdłuż obwodu wirnika w warstwie materiału o szerokiej pętli histerezy nowego rozkładu wektora namagnesowania.



Rys. 1. Struktury silników jednofazowych o biegunach wpisywanych: a) silnik o wirniku wewnętrznym, b) silnik o wirniku zewnętrznym



Rys. 2. Schemat połączeń silnika jednofazowego o biegunach wpisywanych – objaśnienia w tekście

Liczba oraz rozpiętość kątowa utworzonych w ten sposób biegunów zależy od prędkości wirowania

wirnika względem stojana. Przy prędkości synchronicznej wirnika liczba utworzonych w ten sposób biegunów jest równa liczbie biegunów uzwojenia stojana. Dodatkowe uzwojenie stojana ze względu na specyficzny sposób działania nazywane jest uzwojeniem „wpisującym”. Jest ono zasilane napięciem o takiej samej częstotliwości jak uzwojenie główne. Rdzenie stojana i wirnika złożone są z wykrojów wykonanych z blach elektrotechnicznych. W wirniku oprócz warstwy materiału magnetycznego o szerokiej pętli histerezy znajduje się uzwojenie klatkowe. Wykonane jest ono z materiału o dużej rezystywności. Po załączeniu silnika do sieci powstają w nim momenty obrotowe asynchroniczny oraz histerezowy. Moment histerezowy jest spowodowany przemagnesowywaniem przez wirujące pole magnetyczne powierzchniowej warstwy wirnika wykonanej z materiału o szerokiej pętli histerezy. Po uzyskaniu przez wirnik 0,8-0,9 prędkości synchronicznej załączane jest uzwojenie wpisujące (3) za pomocą włącznika (4) – rys. 2. 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 wejściu silnika w synchronizm uzwojenie wpisujące jest odłączane od sieci i silnik pracuje jak silnik magnetoelektryczny synchroniczny. Po wyłączeniu silnika pierścień wykonany z materiału o szerokiej pętli histerezy jest namagnesowany. Liczba biegunów wirnika jest równa liczbie biegunów uzwojenia stojana. Przy ponownym rozruchu silnika, bezpośrednio po złączeniu napięcia zasilającego, udarowy przepływ uzwojenia głównego niszczy poprzedni rozkład wektora namagnesowania i przemagnesowuje na nowo wirnik.

Do projektowania silników o biegunach wpisywanych są potrzebne wnikliwe metody analizy ustalonych i nieustalonych stanów pracy, w pełni uwzględniające zjawiska elektromagnetyczne, cieplne oraz dynamikę elementów ruchomych silnika. Analiza tych zjawisk jest bardzo złożona z uwagi na nieliniowe właściwości materiałów magnetycznie miękkich, histerezę magnetyczną materiału, z którego wykonana jest powierzchniowa warstwa wirnika, indukowane prądy wirowe oraz zależność parametrów materiałowych od temperatury. Wiarygodność obliczeń projektowych zależy przede wszystkim od dokładności,

z jaką stosowany model matematyczny odwzorowuje istotne dla pracy przetwornika zjawiska. Stąd do analizy i projektowania silników o bardzo dobrych parametrach są potrzebne jak najdokładniejsze modele matematyczne zachodzących w nich zjawisk. Mają one charakter polowy i są wzajemnie powiązane [1, 8, 9].

3. Polowy model zjawisk sprzężonych

W artykule do opisu zjawisk sprzężonych zaproponowano model polowo-obwodowo [8]. W modelu tym przyjmuje się, że pole w części elektromagnetycznie czynnej maszyny 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]. Podobne, w sposób uproszczony odwzorowuje się zjawiska cieplne w obszarze połączeń czołowych [1].

Polowo-obwodowy model nieustalonych zjawisk sprzężonych w silniku o biegunach wpisywanych obejmuje równania opisujące:

– pole magnetyczne

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1)$$

– pole elektryczne

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2)$$

– prądy w oczkach obwodu elektrycznego

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} + \frac{d}{dt}\Psi + \mathbf{L}\frac{d}{dt}\mathbf{i} \quad (3)$$

– pole temperatury

$$c\rho\frac{d\vartheta}{dt} = \nabla \cdot (\mathbf{k}\nabla\vartheta) + p_c \quad (4)$$

oraz dynamikę układu

$$J_b\frac{d\omega}{dt} + T_o + T_t = T \quad (5)$$

gdzie: \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{E} , \mathbf{J} – odpowiednio wektory indukcji i natężenia pola magnetycznego, natężenia pola elektrycznego, gęstość prądów, \mathbf{u} – wektor napięć zasilających, \mathbf{i} – wektor prądów w uzwojeniach, \mathbf{R} – macierz rezystancji uzwojeń, \mathbf{L} – macierz indukcyjności połączeń czołowych, Ψ – wektor strumieni skojarzonych, \mathbf{k} – tensor przewodności cieplnej, ϑ – temperatura, p_c – gęstość mocy źródeł ciepła, c – ciepło właściwe, J_b – moment bezwładności mas wirujących, ω – prędkość kątowa wirnika, T_o –

moment oporowy, T_t – moment oporowy związany z tarciem, T – moment elektromagnetyczny. Przy odwzorowywaniu właściwości magnetycznych materiałów magnetycznie miękkich przyjęto, że

$$\mathbf{H} = \nu\mathbf{B} \quad (6)$$

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

$$\mathbf{H} = \nu_0\mathbf{B} - \mathbf{H}_i \quad (7)$$

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

W modelu matematycznym właściwości magnetycznych magnesu trwałego upraszcza się zjawiska związane z anizotropią strukturalną oraz z anizotropią spowodowaną wektorem magnetyzacji \mathbf{H}_i i przyjmuje, że materiał magnetycznie twardy charakteryzuje się anizotropią prostokątną [8, 9].

Rezystywność materiałów, reluktywność magnetyczna ν oraz właściwości magnetyczne magnesów trwałych zależą od temperatury [1, 6, 9]. Komplikuje to model matematyczny właściwości elektrycznych i magnetycznych materiałów. Wpływ temperatury na właściwości elektryczne i magnetyczne materiałów omówiono m.in. w pracy [9]. Rozwiązanie równań (1)-(5) jest jednoznacznie określone przez warunki brzegowe i początkowe [1, 8, 9].

Autorom nie jest znany z literatury tak kompleksowe ujęcie zjawisk sprzężonych w silnikach o biegunach wpisywanych. Brak jest również oprogramowania komercyjnego umożliwiającego analizę nieustalonych sprzężonych zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych w powiązaniu z ruchem wirnika i uwzględnieniem histerezy magnetycznej materiałów magnetycznie twardych.

3. Model dyskretny zjawisk sprzężonych

W celu uproszczenia algorytmu rozwiązywania równań (1) i (2) opisujących pole elektromagnetyczne wykorzystuje się potencjały skalarne i wektorowe [1, 9]. Z powodu nieliniowych właściwości środowisk, prądów wirowych indukowanych w elementach masywnych oraz złożonej struktury silników o biegunach wpisywanych równania sformułowanego kompleksowego polowego modelu zjawisk sprzężonych nie można rozwiązać analitycznie. Wykorzystuje się do tego

celu metody przybliżone, polegające na dyskretyzacji przestrzeni i czasu. Poszukuje się w nich wartości funkcji opisującej rozkład wielkości polowych na zbiorze punktów węzłowych lub na krawędziach siatki dyskretyzującej rozpatrywany obszar. Do formowania równań modelu polowego po dyskretyzacji przestrzeni i czasu wykorzystano metody elementów skończonych węzłowych i krawędziowych. W wyniku uzyskano układ równań macierzowych opisujących: (a) wartości krawędziowe ϕ wektorowego potencjału magnetycznego \mathbf{A} w węzłach siatki dyskretyzującej oraz prądy w uzwojeniach

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}^n + \mathbf{G}(\mathbf{I} - \mathbf{C}_k)\Delta t^{-1} & -\mathbf{z} \\ -\mathbf{z}^T & -(\mathbf{R}\Delta t + \mathbf{L}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}^n \\ \mathbf{i}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^n \\ -\Delta t \mathbf{U}^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}(\mathbf{I} - \mathbf{C}_k)\Delta t^{-1} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{z}^T & -\mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}^{n-1} \\ \mathbf{i}^{n-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

(b) rozkład temperatury

$$(\mathbf{S}_\theta^n + \mathbf{K}_{\theta b}^n + \mathbf{G}_\theta^n \Delta t^{-1}) \boldsymbol{\theta}^n = \mathbf{F}_\theta \mathbf{P}^n + \mathbf{K}_{\theta 0}^n + \mathbf{G}_\theta^n \Delta t^{-1} \boldsymbol{\theta}^{n-1} \quad (9)$$

oraz (c) położenie i prędkość kątową wirnika

$$\alpha^{n+1} = (\Delta t)^2 \frac{T^n - T_o^n - T_t^n}{J_b} + 2\alpha^n - \alpha^{n-1} \quad (10)$$

$$\omega(t_n + 0,5\Delta t) = \left. \frac{d\alpha}{dt} \right|_{t_n + 0,5\Delta t} = \frac{(\alpha^{n+1} - \alpha^n)}{\Delta t} \quad (11)$$

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 związany z namagnesowaniem warstwy histerezowej, \mathbf{S}_θ – macierz przewodności cieplnych, \mathbf{G}_θ – macierz pojemności cieplnych, $\boldsymbol{\theta}$ – wektor poszukiwanych temperatur, \mathbf{P} – wektor źródeł ciepła, \mathbf{C}_k , $\mathbf{K}_{\theta b}$, $\mathbf{K}_{\theta 0}$, \mathbf{F}_θ – macierze współczynników.

W powyższych zależnościach $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ jest długością kroku czasowego, indeksem n oznaczono wielkości dla chwili $t = t_n$, a indeksem $n-1$ wielkości związane z chwilą $t = t_{n-1}$. Przykładowo $\mathbf{S}^n = \mathbf{S}(t_n)$, $\boldsymbol{\phi}^n = \boldsymbol{\phi}(t_n)$.

W opracowanym kompleksowym dyskretnym modelu zjawisk sprzężonych w silniku o biegunach wpisujących do odwzorowywania histerezowych właściwości materiału, z którego wykonano powierzchniową warstwę wirnika wykorzystuje się model odwrotny Jiles-Athertona [2]. Za jego pomocą wyznacza się

magnetyzację w poszczególnych elementach siatki dyskretyzującej obszar z materiałem magnetycznie twardym. Korzysta się przy tym z przebiegu i rozkładu indukcji magnetycznej w poszczególnych elementach siatki. Na podstawie magnetyzacji oblicza się elementy wektora \mathbf{M} w równaniu (8).

4. Algorytm rozwiązywania równań

Przedstawiony kompleksowy model dyskretny zjawisk sprzężonych składa się z układów nieliniowych równań algebraicznych (8), (9) opisujących zjawiska polowe oraz równań algebraicznych (10), (11) określających położenie i prędkość wirnika. Występujące w tych równaniach nieliniowości związane są m.in. z zależnością właściwości fizycznych użytych materiałów od wyznaczanych pól. W szczególności reluktywność materiałów magnetycznie miękkich, jak i magnetyzacja materiałów magnetycznie twardych zależy zarówno od pola indukcji magnetycznej, jak i temperatury. Również od temperatury zależy rezystywność oraz przewodność cieplna materiałów. Równania modelu poprzez wpływ pól na właściwości fizyczne materiałów są ze sobą sprzężone. Różna jest przy tym intensywność tych sprzężeń i szybkość odpowiedzi materiału na zmianę pól. W prezentowanym modelu zjawisk równania (10) i (11) opisujące dynamikę elementów ruchomych są sprzężone, poprzez zależność momentu elektromagnetycznego od rozkładu i przebiegu pola magnetycznego, z równaniem (8) opisującym zjawiska elektromagnetyczne. Od rozkładu i przebiegu pola magnetycznego oraz od prądu w uzwojeniach zależą odpowiednio straty mocy w rdzeniu i uzwojeniach, a więc i temperatura oraz wspomniane wcześniej właściwości materiałów. Zmiana parametrów materiałowych pod wpływem temperatury, przy zadanych wymuszeniach, ma wpływ na uzyskiwane prądy i moment elektromagnetyczny. Dynamika tych zmian, podobnie jak zmian temperatury w przetworniku, jest jednak znacznie mniejsza od dynamiki procesów elektromagnetycznych czy mechanicznych. Dlatego przy krótkotrwałych stanach niestabilnych silnika towarzyszące im zmiany temperatury w niewielkim stopniu wpływają na dynamikę pozostałych pól.

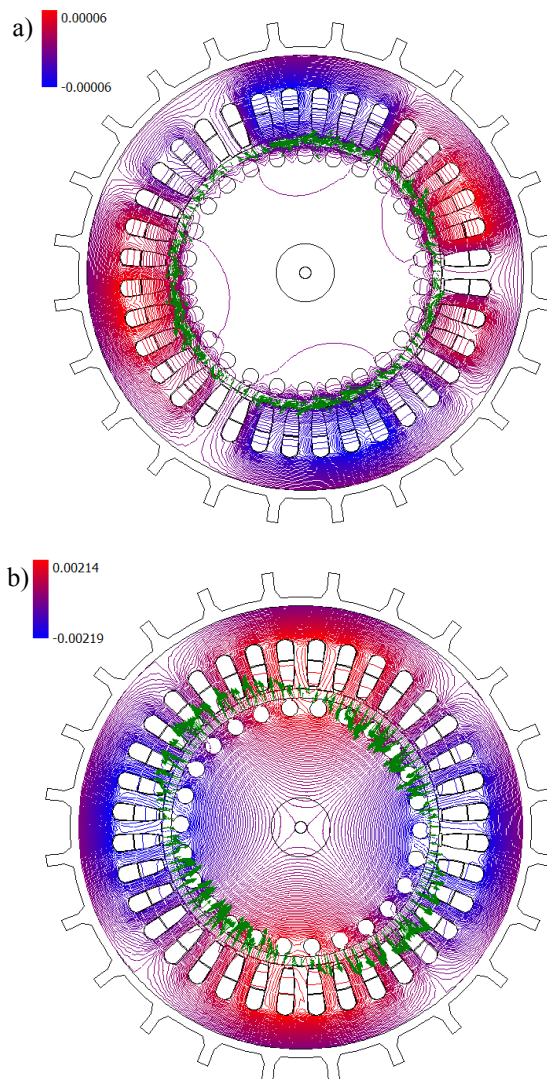
Wzajemne złożone powiązania rozpatrywanych zjawisk sprawiają, że wszystkie równania sformułowanych modeli zjawisk w silnikach o biegunach wpisujących trzeba rozwiązywać jednocześnie. Nastęcza to wiele problemów natury numerycz-

nej, programowej oraz sprzętowej. Przy rozwiązywaniu jednoczesnym równania modeli po dyskretyzacji są traktowane, jako jeden układ nieliniowych równań algebraicznych. Bezpośrednie rozwiązanie utworzonych w ten sposób bardzo dużych układów równań jest złożone i czasochłonne [6]. Z tego względu wykorzystano do tego celu metodę relaksacji blokowej [6, 9]. Przyjęto, że bloki obliczeń odpowiadają poszczególnym równaniom macierzowym dyskretnego modelu zjawisk. Bardzo cenną zaletą metody relaksacji blokowej jest możliwość wykorzystania opracowanych specjalizowanych i efektywnych algorytmów rozwiązywania równań opisujących poszczególne zjawiska.

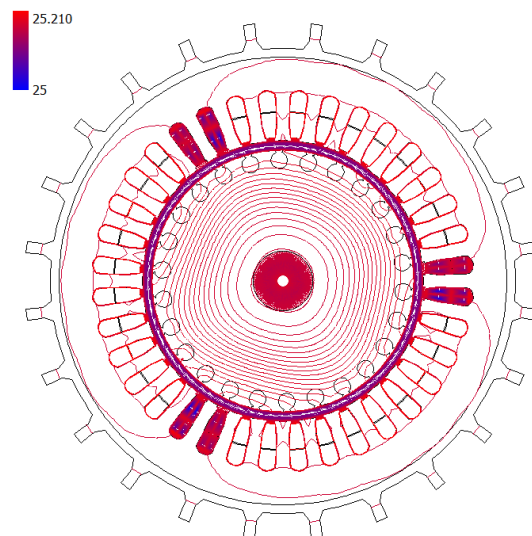
Przy dyskretyzacji czasu wygodnie jest stosować taką samą długość kroku czasowego dla wszystkich rozpatrywanych zjawisk. W celu skrócenia czasu obliczeń dogodnie jest uzależnić długość kroku od dynamiki zmian stanu układu. Strategia taka umożliwia skracanie kroku przy dużej dynamice zjawisk lub wydłużenie kroku czasowego przy zbliżaniu się układu do stanu ustalonego.

5. Analiza procesu rozruchu silnika

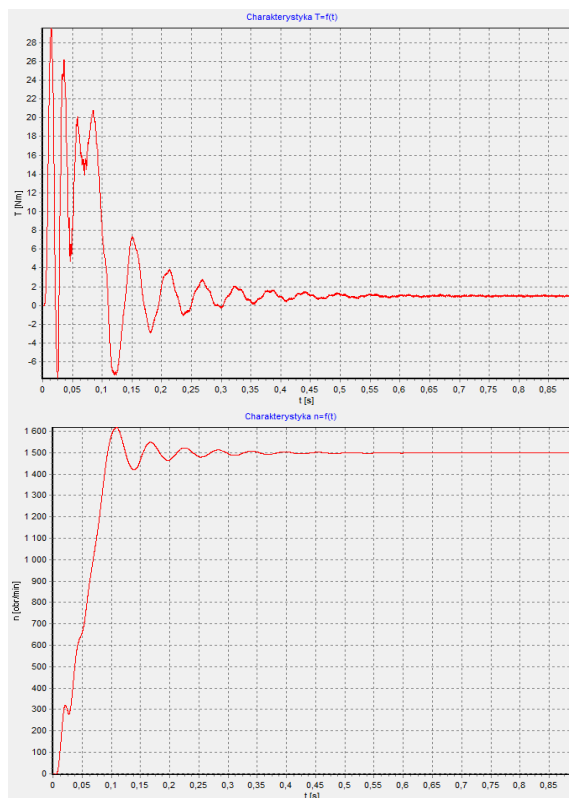
Na podstawie przedstawionego algorytmu rozwiązywania równań kompleksowego modelu zjawisk sprzężonych opracowano oprogramowanie do analizy niestabilnych stanów pracy silników o biegunach wpisywanych. Ze względu na brak prototypu takiego silnika przyjęto, że rozpatrywany silnik ma strukturę jak na rys. 3. Założono, że do jego budowy wykorzystano podzespoły trójfazowego silnika indukcyjnego typu Sg 100L-4B o mocy 3kW, a warstwę histerezową w wirniku wykonano z materiału ferrytowo-strontowego. Uzwojenie trójfazowe rozmieszczono w 30, a na uzwojenie wpisujące przeznaczono 6 żłobków stojana. W celu przetestowania oprogramowania analizowano wybrane stany pracy silnika. Rozpatrzono m.in. rozruch bezpośredni silnika nieobciążonego bez załączania uzwojenia wpisującego. Rozkład pola magnetycznego bezpośrednio po załączeniu napięcia oraz po wejściu silnika w synchronizm pokazano na rys. 3. Strzałki w warstwie histerezowej obrazują rozkład wektora indukcji magnetycznej. Rozkład temperatury w silniku dla chwili $t = 0,85$ s pokazano natomiast na rys. 4. Uzyskane przebiegi momentu elektromagnetycznego oraz prędkości obrotowej zamieszczono na rys. 5. Na rysunku 6 przedstawiono uzyskaną podczas rozruchu silnika trajektorie punktu pracy podobszaru w warstwie histerezowej leżącego przy szczelinie powietrznej.



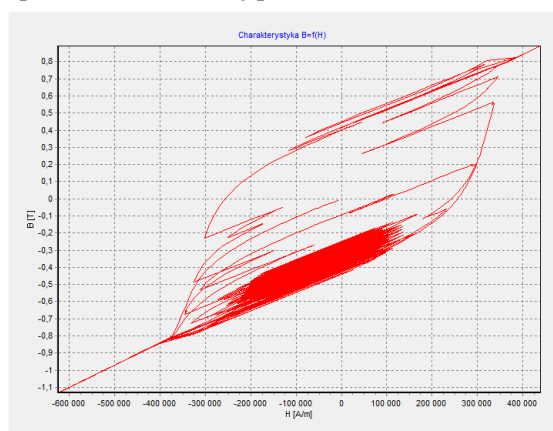
Rys. 3. Rozkład linii pola magnetycznego w silniku a) bezpośrednio po załączeniu napięcia, b) dla $t = 0,85$ s



Rys. 4. Rozkład temperatury dla $t = 0,85$ s



Rys. 5. Przebiegi momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej podczas rozruchu silnika



Rys. 6. Trajektoria punktu pracy podobszaru w warstwie histerezowej leżącego przy szczelinie powietrznej

6. Uwagi końcowe

Z analizy wyników obliczeń wynika, że opracowane oprogramowanie można wykorzystać do rozpatrywania niestabilnych sprzężonych zjawisk elektromagnetycznych i ciepłych powiązanych z ruchem w silnikach o biegunach wpisywanych. W rozważaniach uwzględniono nieliniowe właściwości magnetyczne materiałów magnetycznie miękkich, histerezę magnetyczną materiału magnetycznie twardego, prądy wirowe indukowane w elementach litych oraz wpływ temperatury na

rezystywność i przewodność cieplną materiałów. Przewiduje się, że oprogramowanie będzie wykorzystane do projektowania prototypowego silnika o biegunach wpisywanych. Po zaprojektowaniu uzwojenia do wpisywania biegunów zostanie rozpatrzony jego wpływ na pracę silnika.

7. Literatura

- [1] Barański M.: *Polowo-obwodowa analiza niestabilnych stanów elektromagnetycznych i ciepłych w silniku indukcyjnym*, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, maj 2010r.
- [2] Jędrzycka C., Sujka P., Szelaż W.: *The influence of magnetic hysteresis on magnetorheological fluid clutch operation*, COMPEL, Vol. 28 No. 3, 2009, pp. 711-721.
- [3] Jouanne A., Enjeti P.N., Banerjee B.: *Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable-Speed Drives*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 4, July/August 1999, pp. 908-916.
- [4] Layton L.: *Written-Pole Motors*, 2009, <http://www.pdengineer.com/courses/e/E-3023.pdf>, s. 30, dostęp 13.10.2010.
- [5] *Materiały informacyjne firmy Precise Power Corporation*: www.written-pole.com, dostęp 8.05.2010.
- [6] Skoczowski T.: *Modelowanie i symulacja sprzężonych zjawisk polowych w urządzeniach elektrotermicznych. Podstawy teoretyczne*, Instytut Naukowo-Badawczy ZTUREK, Warszawa 2000.
- [7] Smart D.E.: *Written Pole Motors - a practical solution to large HP motor needs?*, Rural Electric Power Conference, 1999, pp. B4/1-B4/6.
- [8] Szelaż W.: *Analiza stanów pracy i synteza silników synchronicznych magnetoelektrycznych – ujęcie polowe*, Rozprawy nr 331, Politechnika Poznańska, Poznań 1998.
- [9] Szelaż W.: *Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magnetoreologiczną*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.

Pracę zrealizowano w ramach projektu POIG.01.01.02-00-113/09 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Autorzy

dr hab. inż. Wojciech Szelaż, prof. PP, Politechnika Poznańska, IEiEP, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A, tel. 616652116, wojciech.szelaż@put.poznan.pl

mgr inż. Marcin Antczak, doktorant, Politechnika Poznańska, marcin.antczak@doctorate.put.poznan.pl

dr inż. Mariusz Barański, Politechnika Poznańska, IEiEP, tel. 616652636, mariusz.baranski@put.poznan.pl

mgr inż. Piotr Szelaż, Politechnika Poznańska, Projekt nr POIG.01.01.02-00-113/09-01, piotr.szelaż@put.poznan.pl

dr inż. Piotr Sujka, Politechnika Poznańska, IEiEP, tel. 616652125, piotr.sujka@put.poznan.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn