



Model polowy zjawisk elektromechanicznych napędu liniowego z magnesami trwałymi

KRZYSZTOF JUST*, WOJCIECH TARNOWSKI

Politechnika Koszalińska, Instytut Technologii i Edukacji,
75-453 Koszalin, ul. Śniadeckich 2

*autor korespondencyjny: justk5@op.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę modelowania i analizy liniowego napędu elektromagnetycznego z magnesami trwałymi z uwzględnieniem podstawowych zjawisk fizycznych. W modelu do analizy pola magnetycznego wykorzystano środowisko Comsol Multiphysics oparte na metodzie elementów skończonych (MES), którego zastosowanie umożliwia przeprowadzenie stosunkowo szybkiego modelowania struktury obiektu oraz wykonanie obszernej analizy zjawisk elektromagnetycznych w celu wyznaczenia parametrów całkowitego pola. Na podstawie analizy dwuwymiarowego pola magnetycznego wyznaczono charakterystyki statyczne napędu, takie jak: siła elektromagnetyczna, indukcyjność uzwojeń oraz strumień magnetyczny.

Słowa kluczowe: mechatronika, modelowanie i symulacja, napęd elektromagnetyczny, metoda elementów skończonych, analiza pola, model polowy

DOI: 10.5604/01.3001.0010.5396

1. Wprowadzenie

Postęp technologiczny na przestrzeni ostatnich lat wymusił wzrost zapotrzebowania na elektryczne układy wykonawcze o coraz lepszych parametrach i niewielkich kosztach budowy. Przyczyniło się do tego w dużym stopniu wdrożenie na masową skalę materiałów magnetycznych opartych na pierwiastkach ziem rzadkich (NdFeB) — o dużych wartościach indukcji remanentu i dużych gęstościach energii.

We współczesnych układach napędowych coraz częściej wykorzystuje się maszyny elektryczne z magnesami trwałymi, takie jak: silniki synchroniczne (*Permanent Magnet Synchronous Motors* — PMSM), bezszczotkowe silniki prądu stałego

(*BrushLess Direct Current Motors* — BLDCM), silniki krokowe (*Stepper Motors*), a także cylindryczne silniki liniowe (*Permanent Magnet Tubular Linear Motors* — PMTLM) [1].

Wszystkie wymienione typy silników mają podobną strukturę i zasadę działania. Elektromagnetyczny moment (w silnikach obrotowych) lub siła (w silnikach liniowych) są wytwarzane w wyniku oddziaływania pola magnetycznego generowanego przez uzwojony stojan na wirnik (biegnik) z zamontowanym układem magnesów trwałych. Uzwojenie stojana może być rozłożone w żłobkach lub nawinięte w sposób „skupiony” na wydatnych szerokich zębach (biegunach). Części ruchome silników są wykonywane w postaci ferromagnetycznych rdzeni z magnesami trwałymi umieszczonymi na zewnętrznej powierzchni lub magnesami umieszczonymi wewnątrz rdzenia.

Wśród przetworników energii elektrycznej na mechaniczną szeroką klasę stanowią cylindryczne przetworniki o ruchu liniowym, które posiadają wiele zalet, między innymi jest to eliminacja mechanizmów przekładniowych oraz sprzęgających do realizacji ruchu postępowego. Dzięki temu układ jest znacznie prostszy, wzrasta jego sztywność, eliminowane są luzy i podatność elementów pośredniczących.

Pojawianie się nowych konstrukcji przetworników liniowych i ich różnorodność wymaga opracowywania nowych, dokładnych, ale jednocześnie obliczeniowo efektywnych metod analizy ich stanów pracy oraz metod projektowania i optymalizacji. Dotychczas analiza układów elektromagnetycznych była przeprowadzana głównie za pomocą metod analitycznych, które przy założeniu wielu uproszczeń pozwalają na określenie tylko przybliżonych rozkładów pola magnetycznego oraz istotnych parametrów całkowitych pola.

Obecnie w projektowaniu maszyn elektrycznych w szerokim zakresie wykorzystuje się symulację komputerową opartą na analizie pola elektromagnetycznego. Pozwala ona uniknąć kosztownego i czasochłonnego etapu budowy rzeczywistych obiektów. Zastosowanie symulacji komputerowej umożliwia znacznie precyzyjniejsze wyznaczenie interesujących parametrów obwodu magnetycznego, a także zbadanie wpływu zmian geometrii magnetowodu na charakterystyki statyczne i dynamiczne napędu, co jest trudne albo wręcz niemożliwe przy wykorzystaniu metod analitycznych.

Elektromagnetyczne układy wykonawcze z magnesami trwałymi stanowią złożone, silnie nieliniowe obiekty fizyczne, w których generowana siła zależy nie tylko od parametrów konstrukcyjnych, lecz także od sposobu sterowania, czego efektem jest skomplikowany model matematyczny. Dlatego do zbudowania takiego modelu wymagane jest wykorzystanie środowiska komputerowego posiadającego w swojej strukturze rozbudowane procedury różniczkowania i całkowania. Utworzenie modelu polowego jest więc możliwe przy użyciu jednego z szerokiej gamy pakietów komercyjnych dostępnych obecnie na rynku, posiadających możliwości analizy pól elektromagnetycznych. Spośród wielu metod rozwiązywania zagadnień brzegowych: pierwszego rodzaju – Dirichleta lub drugiego rodzaju – Neumannna (warunek symetrii), takich jak: metoda rozdzielania zmiennych, metoda

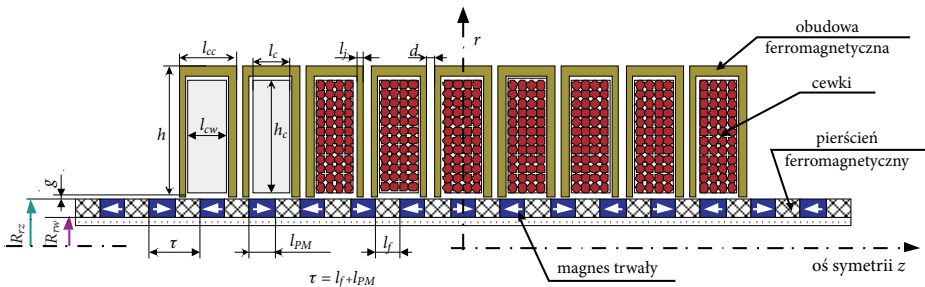
przekształceń całkowych, metody wariacyjne, metoda różnic skończonych, metoda równań całkowych oraz metoda elementów skończonych (MES), do zbudowania modelu komputerowego łączącego istotne zjawiska fizyczne wybrano ostatnią z wymienionych. Wybór podyktowany został dostępnością oraz możliwościami tej metody. MES jest uniwersalną metodą w rozwiązywaniu problemów o złożonej geometrii i niejednorodnych środowiskach.

Spośród wielu dostępnych środowisk programistycznych opartych na metodzie elementów skończonych do badań wybrano oprogramowanie Comsol Multiphysics, ze względu na posiadane liczne zalety przydatne w analizie obiektu badań. Program umożliwia analizę dwuwymiarowego pola magnetostaticznego i harmonicznego, dużą i nieodzowną zaletą programu jest możliwość uruchamiania własnych skryptów obliczeniowych pisanych w środowisku Matlab, co znacząco poprawia automatyzację obliczeń i jest szczególnie istotne w przypadku obliczeń iteracyjnych.

We wspomnianym środowisku wykonano model połowy napędu liniowego z magnesami trwałymi, w oparciu o który zbadano rozkład pola magnetycznego oraz wyznaczono istotne parametry całkowite niezbędne do przeprowadzenia analizy właściwości dynamicznych napędu.

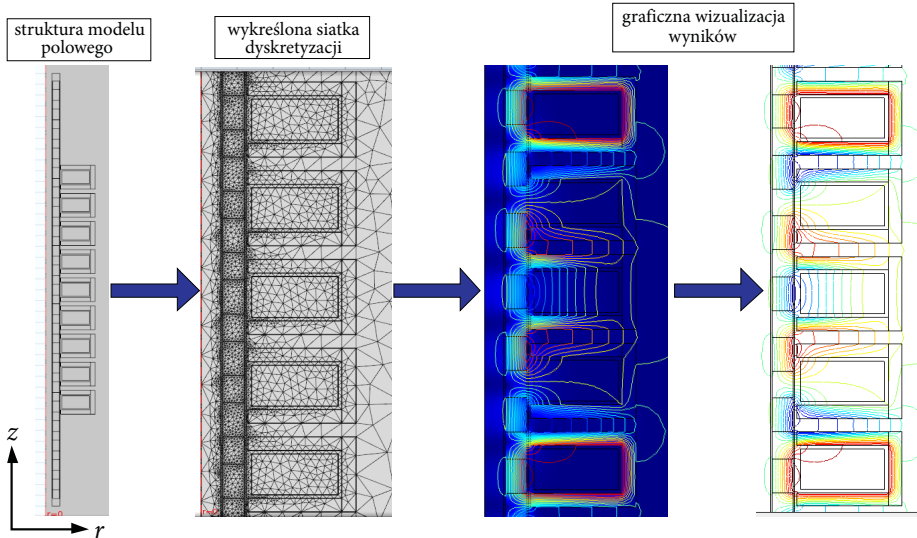
2. Struktura modelu obliczeniowego

Badaniom poddano napęd ruchu liniowego z magnesami trwałymi o budowie cylindrycznej, składający się z dziewięciu segmentów (modułów). W modelu można wyróżnić kilka obszarów: rdzeń magnetyczny (który stanowią neodymowe magnesy trwale połączone z pierścieniami ferromagnetycznymi), uzwojenia cewek (obudowane osłoną ferromagnetyczną) oraz szczelinę powietrzną (rys. 1). Urządzenie odznacza się separacją magnetyczną poszczególnych cewek stojana względem siebie. W celu zachowania symetrii mechanicznej, magnetycznej oraz centrowania biegnika w osi symetrii stojana, jego elementy konstrukcyjne zamocowano w łożyskach liniowych wykonanych z materiału diamagnetycznego.



Rys. 1. Połowa przekroju osiowego napędu wraz z oznaczeniami wymiarowymi

Model geometryczny sparametryzowano następującymi wielkościami: R_{rz} , R_{rw} — promienie biegnika: zewnętrzny, wewnętrzny; l_{PM} , l_f — szerokość magnesów trwałych, pierścieni ferromagnetycznych; τ — podziałka biegunowa; l_{cw} , h_c — wymiary cewek: szerokość i wysokość; l_j — grubość obudowy; d — odległość między cewkami; h , l_{cc} — wysokość oraz szerokość segmentów stojana; g — szczelina powietrzna.



Rys. 2. Etapy obliczeń polowych silnika liniowego z magnesami trwałymi

Na rysunku 2 przedstawiono etapy obliczeń modelu polowego silnika stanowiącego bazę wyjściową do obliczeń i analizy pola magnetycznego. Siatka dyskretyzacji została dobrana na podstawie prób i obliczeń numerycznych w taki sposób, aby spełnić wymagania dotyczące dokładności i czasu obliczeń. Obliczanie siły z wykorzystaniem tensora naprężeń Maxwella wymaga miejscowego zagęszczenia siatki. Dlatego też szczególną uwagę zwrócono na dyskretyzację szczeliny powietrznej. Poprawne zdefiniowanie siatki dyskretyzacji ogranicza błąd procesu iteracyjnego oraz skraca czas obliczeń, który jest istotny w procesie symulacji obiektu. Można zauważyć, że w miejscach, gdzie można się spodziewać większych wartości indukcji magnetycznej (szczelina powietrzna), siatka elementów skończonych została zagęszczona. W przypadku generowania siatki MES dla czasu dyskretnego zmiana położenia węzłów może być zdefiniowana za pomocą funkcji przemieszczeń Laplace'a:

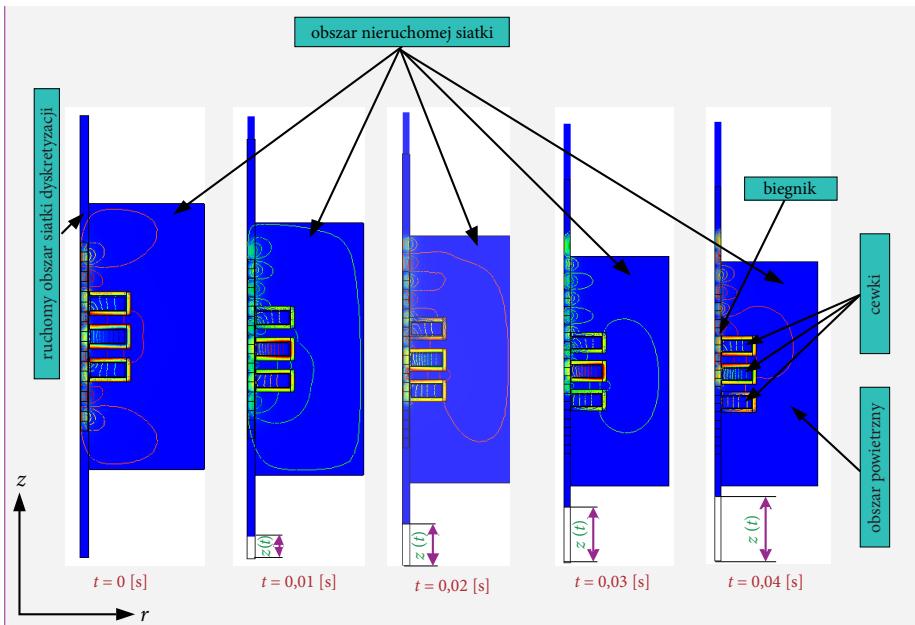
$$\frac{\partial^2 r}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial Z^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 z}{\partial R^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial Z^2} = 0. \quad (1)$$

Natomiast dla stanów przejściowych przemieszczenie siatki dyskretyzacji określa wzór:

$$\frac{\partial^2}{\partial R^2} \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \frac{\partial r}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial^2}{\partial R^2} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \frac{\partial z}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

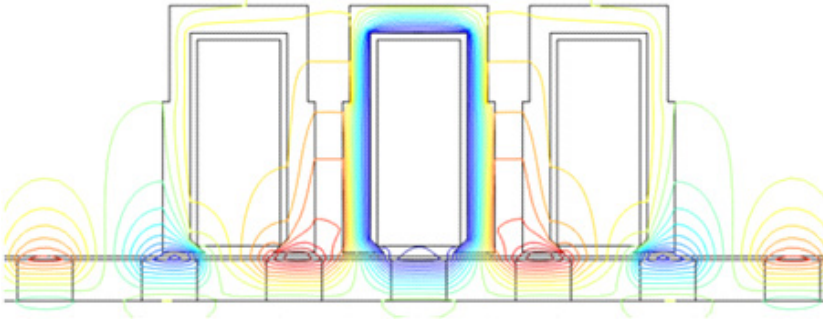
Zdefiniowanie ruchu węzłów siatki dyskretyzacji wykonywane jest metodą *Lagrange'a-Eulera* (ALE, ang. *Arbitrary Lagrangian-Eulerian*). Ponieważ ruch obszaru zajmowanego przez ferromagnetyk odbywa się pod wpływem sił pochodzenia magnetycznego, zatem funkcja opisująca położenie tych elementów nie jest określona przed wyznaczeniem rozkładu pola.

Na rysunku 3 przedstawiono model przetwornika liniowego w układzie osiowo-symetrycznym z dwoma podobszarami dyskretyzowanymi siatką MES. W jednym podobszarze znajduje się biegnik, w drugim natomiast są cewki. Ruch elementów skończonych otaczających biegnik wyznaczany jest za pomocą zależności (1), w której pochodne cząstkowe po zmiennej niezależnej promieniowej w układzie (r, z) są równe zero. Wewnątrz ruchomego obszaru węzły siatki zachowują stałą odległość względem siebie. Pod wpływem oddziaływania pola magnetycznego generowanego przez kolejne cewki ferromagnetyk, a wraz z nim otaczający go obszar, zmienia swoje położenie o wartość $z(t)$.



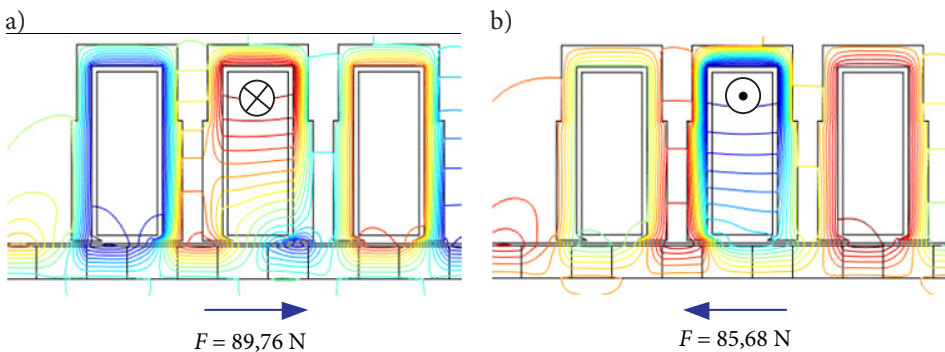
Rys. 3. Dyskretyzacja metodą Lagrange'a-Eulera z nieruchomą siatką MES w ruchomym obszarze

Na rysunku 4 przedstawiono rozkład linii strumienia magnetycznego przy braku wymuszenia prądowego. Biegnik jest w pozycji neutralnej, czyli centrycznej. Oznacza to, że środki ciężkości części ruchomej i nieruchomej pokrywają się. Linie sił pola są wynikiem namagnesowania magnesów trwałych. Widoczna jest wyraźna symetria w rozkładzie pola magnetycznego między lewą a prawą stroną silnika, dlatego też na biegnik nie działa siła.



Rys. 4. Rozkład linii strumienia magnetycznego w stanie bezprądowym

Na rysunku 5a przedstawiono rozkład pola przy zasilaniu cewki nr 2 (patrząc od lewej) prądem maksymalnym. Przepływ prądu osłabia pole magnesów trwałych w tej części silnika liniowego, wynikająca z przepływu nierównowaga w rozkładzie pola między częścią lewą a prawą powoduje powstanie siły skierowanej w prawo ($F = 89,76$ N). Układ dąży do nowego stanu równowagi. Rysunek 4.5b różni się od poprzedniego jedynie zwrotem prądu w cewce. Przepływ prądu wzmacnia pole od magnesów trwałych, a powstała nierównowaga w rozkładzie pola wywołuje siłę skierowaną w lewo ($F = 85,68$ N). Zmiana zwrotu prądu w cewce pozwala więc na zmianę znaku siły, co z kolei oznacza, że istnieje możliwość sterowania ruchem biegnika poprzez odpowiednią (płynną) zmianę prądu w tej cewce.



Rys. 5. Rozkład linii sił pola: a) przy zasilaniu cewki 2 prądem o wartości +6 A;
b) przy zasilaniu cewki 2 prądem o wartości -6 A

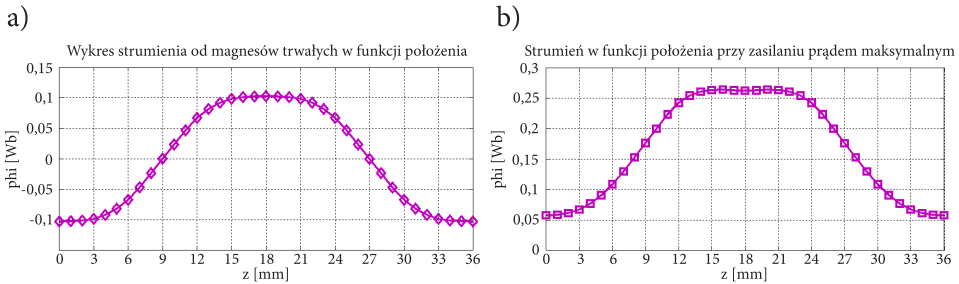
3. Obliczenia parametrów całkowych pola elektromagnetycznego

Na podstawie numerycznej analizy rozkładu pola magnetycznego wyznaczono indukcyjność poszczególnych uzwojeń w rozważanym obiekcie. Strumień skojarzony z uzwojeniami obliczono jako sumę całek ze składowej normalnej indukcji magnetycznej po powierzchni ograniczonej poszczególnymi zwojami cewki:

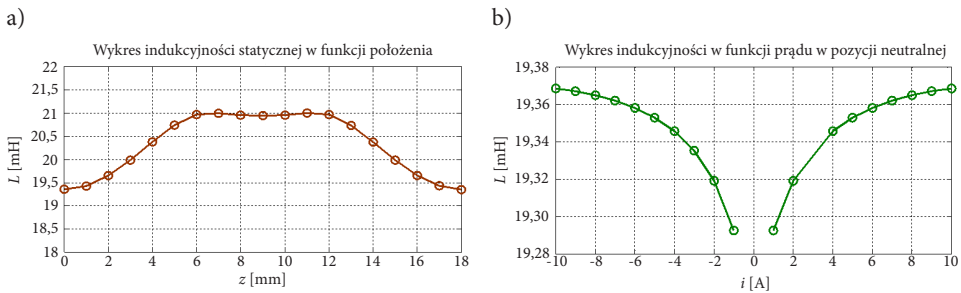
$$\Psi = \oint B \cdot dS = \sum_{k=1}^N \int_S B_n \cdot dS. \quad (3)$$

Przy wyznaczaniu strumienia magnetycznego należy wziąć pod uwagę obecność magnesów trwałych (rys. 6a) generujących strumień magnetyczny punktu pracy. Na podstawie określonej wartości strumienia skojarzonego można obliczyć dwa rodzaje indukcyjności: indukcyjność statyczną L_s oraz dynamiczną L_d cewek, w których płynie prąd:

$$L_s = \frac{\Psi(i, z)}{i}, \quad L_d = \frac{\partial \Psi(i, z)}{\partial i}. \quad (4)$$



Rys. 6. Rozkład strumienia magnetycznego w funkcji położenia: a) od magnesów trwałych; b) przy zasilaniu cewki środkowej prądem znamionowym



Rys. 7. Wykres indukcyjności w cewce środkowej stojana: a) w funkcji położenia biegnika przy zasilaniu prądem znamionowym; b) w funkcji prądu przy położeniu neutralnym biegnika

Wartość indukcyjności statycznej w funkcji prądu (rys. 7b), jak wynika ze wzoru definicyjnego, zmierza monotonicznie do nieskończoności, w pobliżu zerowej wartości prądu. Wartość indukcyjności statycznej zmienia się w niewielkim zakresie zarówno w funkcji zmiany pozycji rdzenia (o około 2 mH), jak i w funkcji zmiany prądu (o 0,1 mH). Pomimo zerowej wartości prądu, strumień skojarzony z uzwojeniem istnieje, gdyż wynika to z obecności strumienia od magnesów trwałych.

Parametry konstrukcyjne napędu można stosunkowo dokładnie wyznaczyć po wykonaniu analizy numerycznej pola. Do obliczania sił generowanych przez pole elektromagnetyczne stosowane są zasadniczo dwie metody:

- tensora naprężeń Maxwella,
- pracy wirtualnej.

Przy znanym rozkładzie pola w obszarze biegnika siłę elektromagnetyczną można wyznaczyć, wykorzystując metodę bazującą na **tensorze naprężeń Maxwella**. Całkowita siła elektromagnetyczna wyraża się jako całka po obszarze nad biegnikiem:

$$F = \oint_s T ds = \frac{1}{2} \oint_s (H(n \cdot B) + B(n \cdot H) - n(H \cdot B)) ds, \quad (5)$$

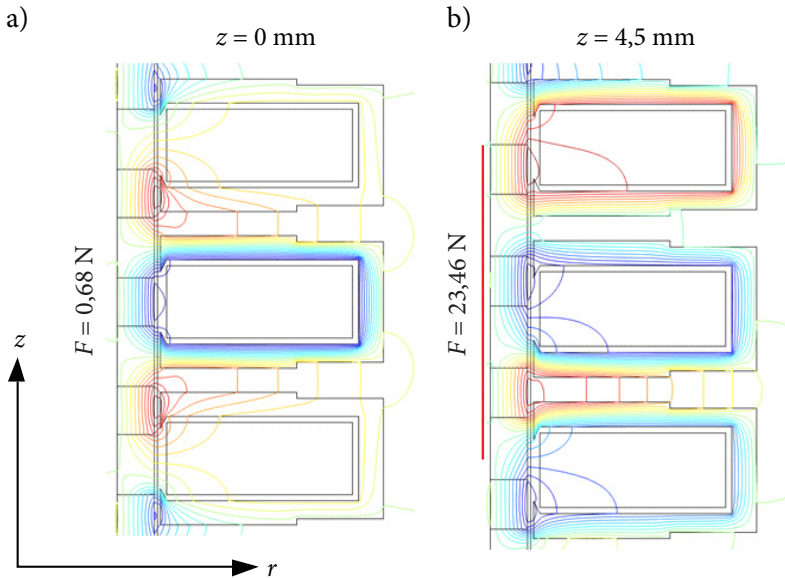
gdzie: T — tensor naprężeń Maxwella,
 n — wektor normalny do powierzchni całkowania,
 H — wektor natężenia pola magnetycznego,
 B — wektor indukcji pola.

W modelu dwuwymiarowym bazującym na przekroju poprzecznym maszyny, obszar całkowania redukuje się do całki wzdłuż szczeliny powietrznej. Tensor naprężeń Maxwella wyraża się jako gęstość magnetycznych sił objętościowych sprowadzonych do naprężeń powierzchniowych. W obszarze ferromagnetyka nie da się jednoznacznie określić sił objętościowych, dlatego w celu wyznaczenia tensora naprężeń obszar ferromagnetyczny otaczany jest ośrodkiem nieferromagnetycznym, wówczas sprowadzając siły do naprężeń, wypadkowe oddziaływania siłowe pola na ferromagnetyk można obliczyć, całkując odpowiednie składowe tensora Maxwella, określone dla środowiska nieferromagnetycznego, po powierzchni granicznej [5].

Metoda pracy wirtualnej wynika ze zmiany koenergii pola magnetycznego w wyniku zmiany położenia ferromagnetyka. Siłę działającą na ferromagnetyk oblicza się jako pochodną koenergii pola magnetycznego:

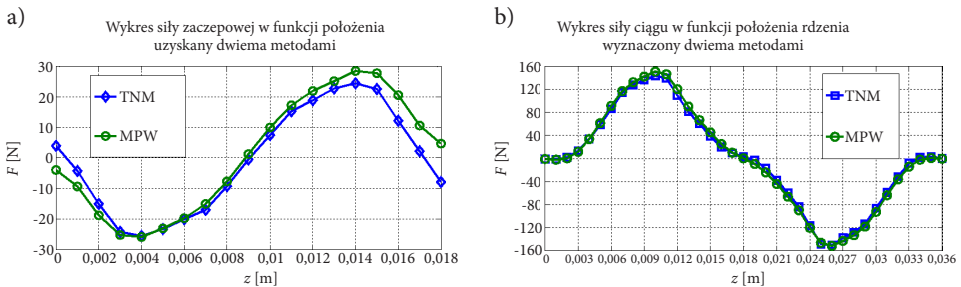
$$F = - \frac{\partial W_c(i, z)}{\partial z}, \quad (6)$$

gdzie: z — przemieszczenie;
 $W_c(i, z)$ — koenergia układu;
 i — prąd w uzwojeniach.

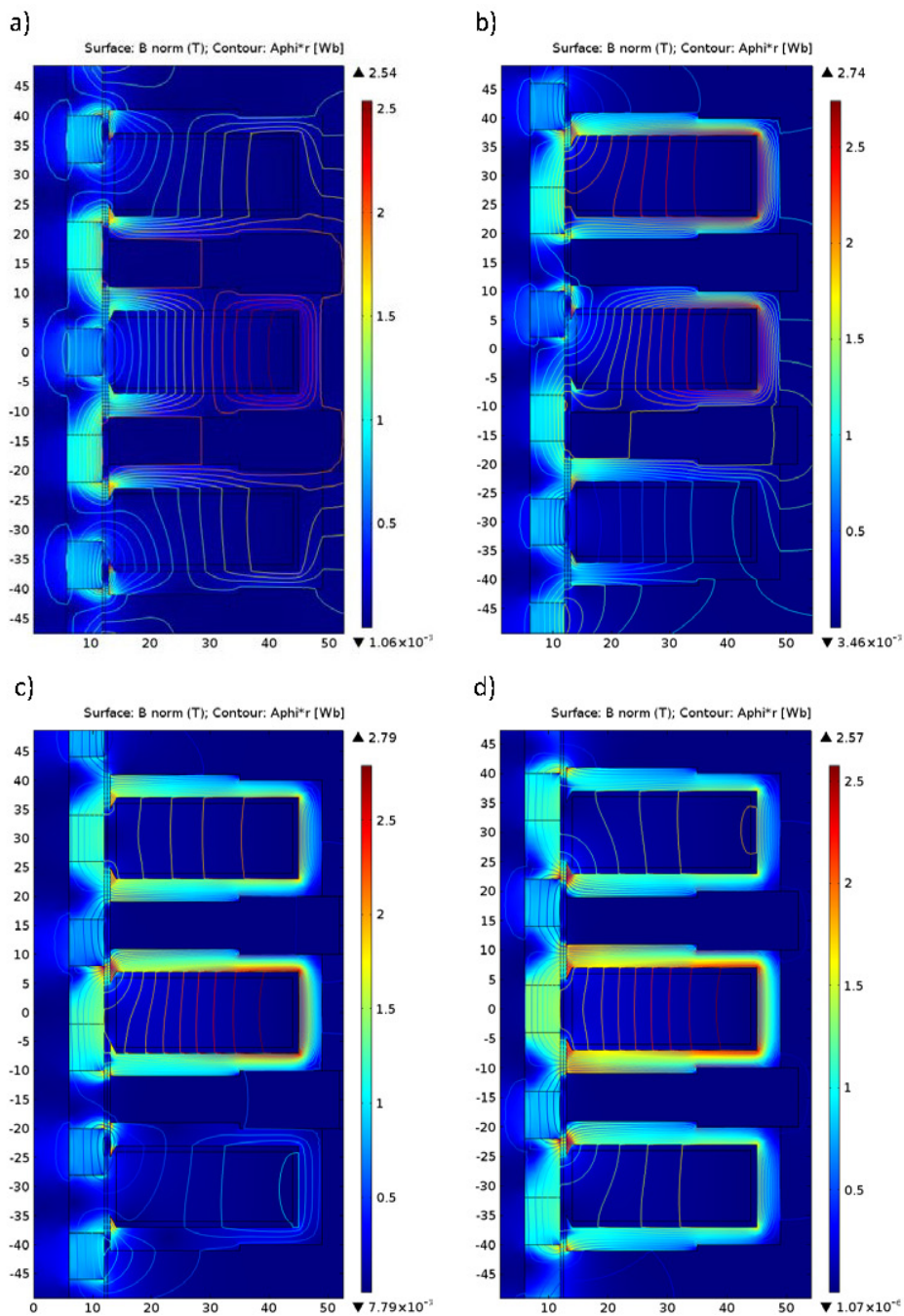


Rys. 8. Rozkład linii pola magnetycznego w stanie bezprądowym: a) w położeniu równowagi — siła zaczepowa zbliżona do zera; b) w położeniu niestabilnym — siła zaczepowa różna od zera

Ze względu na obecność magnesów trwałych mamy do czynienia z dwoma rodzajami sił: siłą zaczepową oraz siłą ciągu. Siła zaczepowa (rys. 8a) powstaje w wyniku współdziałania pola magnetycznego wytworzonego przez magnesy trwałe z elementami ferromagnetycznymi stojana. Wyznaczana jest w stanie bezprądowym, a jej średnia wartość w zakresie podziałki biegunowej jest bliska zera. Siła ta dąży do ustawienia biegnika w stabilnym położeniu równowagi zapewniającym maksymalną przewodność magnetyczną (minimalny opór magnetyczny). W innym położeniu powstaje niezrównoważona siła starająca się przywrócić stabilne położenie równowagi (rys. 8b).



Rys. 9. Wykres siły zaczepowej (a) i ciągu (b) w funkcji położenia wyznaczony dwiema metodami



Rys. 10. Rozkład pola magnetycznego przy zasilaniu cewki środkowej prądem 8A oraz pozycji biegnika względem środka solenoidu: a) 0 mm; b) 6 mm; c) 12 mm; d) 18 mm

Z kolei siłę ciągu (przy zasilaniu uzwojeń prądem znamionowym) tworzy kilka składowych, wśród których występują:

- siła generowana w wyniku współdziałania prądu twornika z polem magnetycznym biegnika. Składnik ten stanowi dominującą wartość siły elektromagnetycznej w większości maszyn z magnesami trwałymi;
- siła reluktancyjna powstająca w wyniku współdziałania prądu płynącego w uzwojeniu z biegnikiem o zmiennej reluktancji magnetycznej. Stanowi ona nieznaczną część siły elektromagnetycznej;
- siła wynikająca z komutacji, powstająca w trakcie zmian prądu w uzwojeniach stojana. Spowodowana jest opóźniającym wpływem indukcyjności uzwojeń na przebiegi prądu po załączeniu lub wyłączeniu pasma uzwojenia.

W oparciu o zbudowany model polowy napędu z wykorzystaniem powyższych zależności określone zostały wartości siły elektromagnetycznej działającej na biegnik. W wyniku symulacji otrzymano wykresy siły elektromagnetycznej (rys. 9): metodą tensora naprężeń Maxwella (TNM — krzywa koloru niebieskiego) oraz metodą prac wirtualnych (MPW — krzywa koloru zielonego).

Na rysunku 10 przedstawiono rozkład indukcji magnetycznej w napędzie trzysegmentowym, przy zasilaniu cewki środkowej prądem o wartości 8A oraz różnych pozycjach biegnika względem osi symetrii stojana. W obliczeniach przyjęto nieliniową charakterystykę $B(H)$ elementów ferromagnetycznych, pozwalającą na realistyczne odwzorowanie efektu lokalnego nasycania magnetycznego materiału.

W pozycji początkowej biegnika (rys. 10a) pole magnetyczne cewki zasilanej odejmuje się z polem wytworzonym przez magnes trwały, wówczas najbardziej nasycają się jarzma cewki górnej i dolnej w pobliżu szczeliny powietrznej. Po przemieszczeniu magnesu ze środka cewki o 12 mm (rys. 10c) największe nasycenie występuje w jarzmie zasilanego segmentu stojana. Po przemieszczeniu o 18 mm strumień magnetyczny rozkłada się symetrycznie w elementach biegnika i jarzmie cewki środkowej, przepływy od magnesów trwałych i uzwojeń stojana sumują się, dlatego najbardziej nasycą się jarzma zasilanej cewki, ponadto widoczne są lokalne nasycenia obwodu magnetycznego w obszarze szczeliny powietrznej.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono bardzo skrótowo budowę modelu polowego zjawisk fizycznych liniowego przetwornika elektromagnetycznego z magnesami trwałymi na przykładzie silnika liniowego oraz sposoby wyznaczania podstawowych charakterystyk statycznych modelu z wykorzystaniem dostępnych metod. Obliczenia charakterystyk statycznych strumienia, indukcyjności oraz siły elektromagnetycznej w funkcji pozycji i prądu płynącego w uzwojeniach stanowią bazę wyjściową do budowy modelu polowo-obwodowego pozwalającego na badanie właściwości

dynamicznych napędów z magnesami trwałymi. Taka metoda umożliwia uwzględnienie nieliniowości magnetycznych wynikających z nierównomiernego rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej silnika, jest więc dokładniejsza niż modelowanie w oparciu o zależności analityczne.

W modelu polowym do zdefiniowania siatki dyskretyzacji wykorzystano z metody *Lagrange'a-Eulera*, której zastosowanie pozwala na symulowanie ruchu rdzenia. Zależność siły elektromagnetycznej wyznaczono dwiema dostępnymi metodami: metodą prac wirtualnych oraz z tensora naprężeń Maxwella. Obie metody dają bardzo podobne wyniki, jednak charakterystyka otrzymana metodą tensora naprężeń Maxwella jest nieco „gładsza”. Wadą metody prac wirtualnych jest konieczność obliczenia całki po objętości całego rozpatrywanego obszaru, co przy dużym modelu polowym może znacznie wydłużyć czas obliczeń.

Podobieństwo otrzymanych charakterystyk pozwala wnioskować o poprawności przyjętego modelu obliczeniowego, a także stwierdzić, że prezentowany model polowy może być przydatny w procesie modelowania i symulacji stanów dynamicznych napędów z magnesami trwałymi.

Źródło finansowania — środki własne autorów.

Artykuł wpłynął do redakcji 18.04.2017 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 7.09.2017 r.

LITERATURA

- [1] KNYPIŃSKI Ł., *Optymalizacja silników o magnesach trwałych na podstawie polowo-obwodowego modelu zjawisk elektromagnetycznych*, praca doktorska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2016.
- [2] GIERAS J., *Silniki indukcyjne liniowe*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1990.
- [3] MICHNA M., *Silnik bezszczotkowy z magnesami trwałymi*, Politechnika Gdańska 2010, <http://www.ely.pg.gda.pl/emechatronika/dydaktyka/spzpe/labo/2010/Projekt%20silnika%20z%20magnesami%20trwalymi%20v9.pdf>.
- [4] MILEJ W., *Modele o parametrach zmiennych maszyn indukcyjnych, ich własności i zastosowanie*, rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2007.
- [5] POCHANKE Z., *Modelowanie silowników elektromagnesowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [6] TOMCZUK B., WAINDOK A., *Wizualizacja wyników obliczeń polowych przyjaznych środowisku silowników elektromagnetycznych*, *Chemia, Dydaktyka, Ekologia, Metrologia*, r. 10, nr 1-2, 2005.
- [7] TOMCZUK B., WAINDOK A., WAJNERT D., *Obliczenia pola magnetycznego i jego parametrów całkowych w aktuatorze liniowym oscylacyjnym z magnesami trwałymi*, *Zeszyty Problemowe — Maszyny Elektryczne*, 87, 2010.
- [8] KONDRATIUK M., GOSIEWSKI Z., *Comparison of Simulated and Measured Signals of the Electromagnetic Coil Launcher for Micro Aerial Vehicles*, 2013 International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic System (SELM 2013), 2013, pp. 57-58.

K. JUST, W. TARNOWSKI

**Field model of electromechanical phenomena in the linear drive
with permanent magnets**

Abstract. The article presents problems of modelling and analysis of a linear permanent magnet electromagnetic drive taking into account basic physical phenomena. The Comsol Multiphysics environment based on the finite element method (FEM) is used in the magnetic field analysis, which allows for a relatively fast modelling of the object's structure and performs extensive analysis of electromagnetic phenomena to determine the field integration parameters. Based on the analysis of the two-dimensional magnetic field, the static characteristics of the drive were determined, such as electromagnetic force, winding inductance, and magnetic flux.

Keywords: mechatronics, modelling and simulation, electromagnetic drive, finite element method, field analysis, field model

DOI: 10.5604/01.3001.0010.5396

