

Bronisław Tomczuk i Andrzej Waindok

Katedra Automatykacji i Diagnostyki Układów Elektromechanicznych
Politechnika Opolska
ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole
tel. 077 453 84 47 w. 148, fax 077 453 84 47 w. 139
e-mail: b.tomczuk@po.opole.pl

WIZUALIZACJA WYNIKÓW OBLICZEŃ POLOWYCH PRZYJAZNYCH ŚRODOWISKU SIŁOWNIKÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH**VISUALISATION OF THE CALCULATION RESULTS FOR THE HABITAT FRIENDLY ELECTROMAGNETIC SERVO-MOTORS**

Streszczenie: Przedstawiono wybrane konstrukcje silników liniowych, które pracują na zasadzie oddziaływania pola magnesów na pole uzwojenia wzbudzającego. Wykonano model obliczeniowy silnika liniowego, którego konstrukcja była opracowana przez autorów. Przedstawiono obrazy pola magnetycznego dla różnych położeń biegnika.

Słowa kluczowe: wizualizacja pola magnetycznego, silniki liniowe, magnesy trwałe

Summary: Selected construction types of linear motors have been presented. They operate on the basis of interaction between permanent magnet, and a field excited by the current. The calculation model of the linear motor has been obtained. Its construction was worked out by the authors. The distribution of the magnetic field for various positions of the moving armature was presented.

Keywords: magnetic field visualisation, linear actuators, permanent magnets

Wstęp

Silniki liniowe wytwarzają zmienną siłę wzdłuż jednego kierunku (linii prostej), bez potrzeby stosowania dodatkowych urządzeń, np. zmieniających ruch obrotowy na liniowy. Sam pomysł stworzenia silnika liniowego sięga końca XIX wieku. Został on jednak zarzucony i dopiero w latach 50. XX wieku zaczęto się nim na powrót interesować [1]. Szczególnie szybki rozwój tego typu maszyn nastąpił w latach 90. zeszłego wieku i trwa do dzisiaj. Wynika to z bardzo dynamicznie postępującej automatyzacji przemysłu i produkcji. Istnieje tam zapotrzebowanie na precyzyjne maszyny i roboty, które z kolei wymagają precyzyjnych i wysoko sprawnych urządzeń wykonawczych o ruchu obrotowym lub liniowym.

W przypadku ruchu obrotowego, w napędach elektrycznych, najczęściej stosowane są precyzyjne silniki krokowe, silniki tarczowe, komutatorowe silniki prądu stałego lub silniki reluktancyjne. Ruch liniowy w napędach elektrycznych jest bardzo często realizowany z wykorzystaniem przekładni lub (coraz częściej) za pomocą silnika liniowego [2].

Nie należy także zapominać o postępującej automatyzacji gospodarstw domowych. Na rynku jest obecnie dostępnych coraz więcej urządzeń mających ułatwić wykonywanie codziennych czynności. Dotyczy to

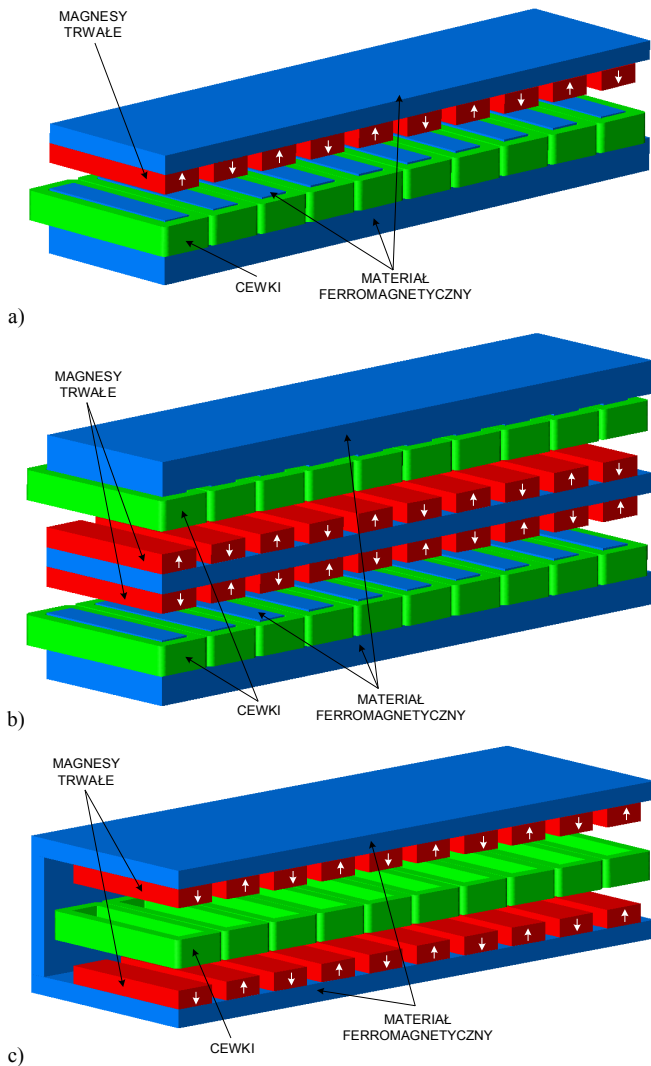
szczególnie ludzi niepełnosprawnych i starszych, którzy stale potrzebują pomocy. Silniki (albo siłowniki) liniowe mogą w takich przypadkach ułatwić zautomatyzowanie otwierania drzwi czy okien oraz innych czynności [1].

W niniejszej pracy przedstawiono podstawowe rozwiązania konstrukcyjne silników liniowych z magnesami trwałymi (w skrócie PMLM - Permanent Magnet Linear Motor), stosowanymi bądź mogącymi w przyszłości znaleźć zastosowanie w napędach maszyn i robotów.

Podstawowe konstrukcje PMLM***Płaskie silniki liniowe***

W tego typu silnikach powierzchnia czynna (wytwarzająca siłę) jest płaska. Rozróżnia się tu dwa podstawowe rodzaje tego typu silników: jednostronne (rys. 1a) i dwustronne magnetycznie (rys. 1b, 1c). Jednostronne silniki liniowe mają tylko po jednej powierzchni aktywnej dla części pierwotnej i wtórnej [3]. Dwustronne zaś mają w części wtórnej dwie powierzchnie aktywne. Zarówno w jednym, jak w drugim przypadku częścią ruchomą może być część z magnesami trwałymi lub część z uzwojeniem. Magnesy mogą być umieszczone między cewkami lub cewka może być umieszczona między magnesami. Podział ten

zawiera w sobie zarówno silniki liniowe prądu stałego, silniki liniowe krokowe, jak i silniki liniowe synchroniczne z magnesami trwałymi. Przykładowe rozwiązania tego typu silników przedstawiono na rysunku 1, natomiast na rysunku 2 pokazano silnik liniowy płaski produkowany przez firmę Aerotech [8]. Jest to silnik o budowie przedstawionej szkicowo na rysunku 1c.

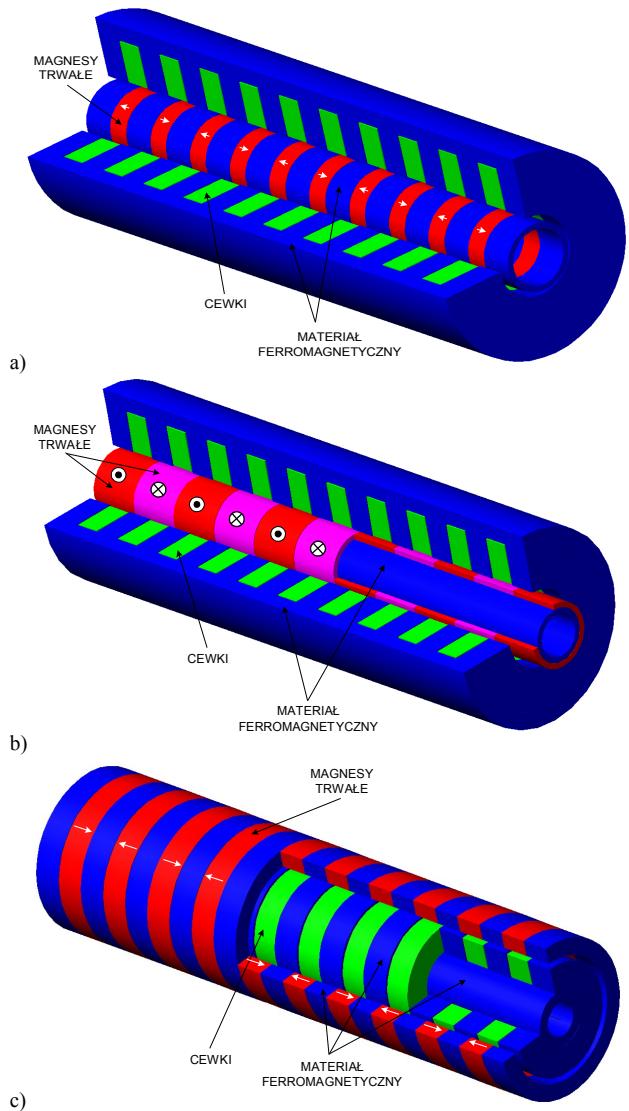


Rys. 1. Szkice konstrukcji silników liniowych płaskich: a) jednostronny magnetycznie, b) dwustronny magnetycznie - magnesy umieszczone między cewkami, c) dwustronny magnetycznie - cewki umieszczone między magnesami



Rys. 2. Silnik liniowy płaski produkowany przez firmę Aerotech
Tubowe silniki liniowe

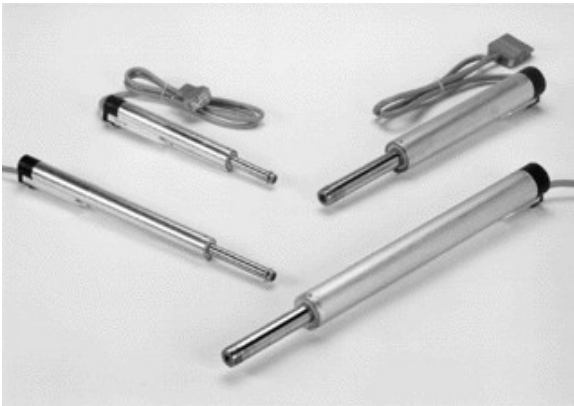
W tego typu silnikach część robocza ma kształt cylindra (symetria osiowa). Są to obecnie coraz częściej stosowane silniki liniowe. Wynika to przede wszystkim z ich parametrów technicznych oraz poręczności (zamknięta budowa, kształt przypominający siłowniki hydrauliczne, łatwa zabudowa). Jedną z firm produkujących tego typu silniki na masową skalę jest LinMot [7]. Zdjęcie silnika o budowie tubowej produkowanego przez tę firmę przedstawiono na rysunku 4. Podobnie jak w przypadku silników o płaskiej części roboczej, ruchoma może być cewka lub magnesy. Magnesy mogą być umieszczone wewnątrz cylindra z cewką (cewkami) [4] lub też cewki mogą być umieszczone wewnątrz cylindra posiadającego magnesy trwałe. Przykładowe rozwiązania przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Szkice konstrukcji tubowych silników liniowych: a) magnesy umieszczone na wewnętrznym cylindrze (magnesowanie osiowe), b) magnesy umieszczone na wewnętrznym cylindrze, c) magnesy umieszczone na zewnętrznym cylindrze

(magnesowanie radialne), c) cewki umieszczone na wewnętrznym cylindrze (magnesowanie osiowe)

W obu poprzednio wymienionych rodzajach silników liniowych magnesy trwałe mogą mieć magnesowanie wzdłuż kierunku ruchu elementu wykonawczego, czyli tzw. biegnika (magnesowanie osiowe [4]), lub też prostopadłe do kierunku ruchu (w przypadku silników tubowych mówi się wówczas o magnesowaniu radialnym [5]). Rozróżnia się dwa przypadki uzwojenia wzbudzającego umieszczonego na rdzeniu ferromagnetycznym: uzwojenie niedzielone [5] oraz uzwojenie dzielone [3]. Również ww. rdzeń może być wykonany w postaci dzielonej [4] oraz niedzielonej [3].



Rys. 4. Silnik liniowy tubowy produkowany przez firmę LinMot

Model połowy silnika liniowego

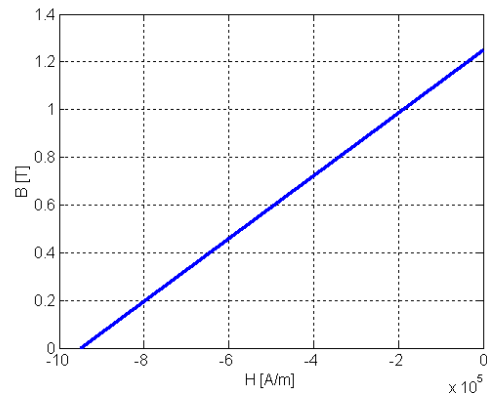
W celu prezentacji rozkładu pola magnetycznego stworzono model połowy tubowego silnika liniowego z magnesami trwałymi umieszczonymi na wewnętrznym, ruchomym cylindrze. Uzwojenia i rdzeń wykonano jako dzielone (rys. 7).

Kierunek magnesowania magnesów przyjęto jako osiowy. Charakterystykę magnesów trwałych NdFeB (wybranych do obliczeń) przedstawia rysunek 5, natomiast nieliniową charakterystykę rdzenia rysunek 6.

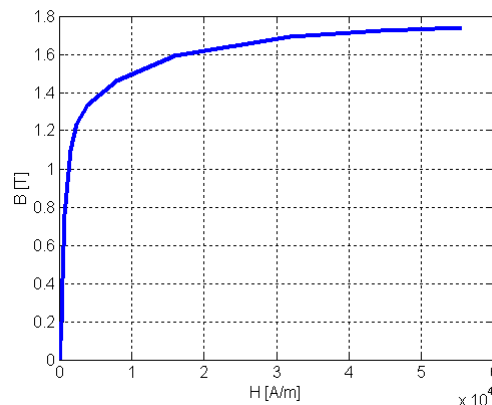
W obliczeniach założono, że uzwojenia są zasilane prądem stałym, przy czym są możliwe trzy stany zasilania uzwojenia:

- brak zasilania,
- zasilanie prądem dodatnim o wartości 8 A,
- zasilanie prądem ujemnym o wartości 8 A,

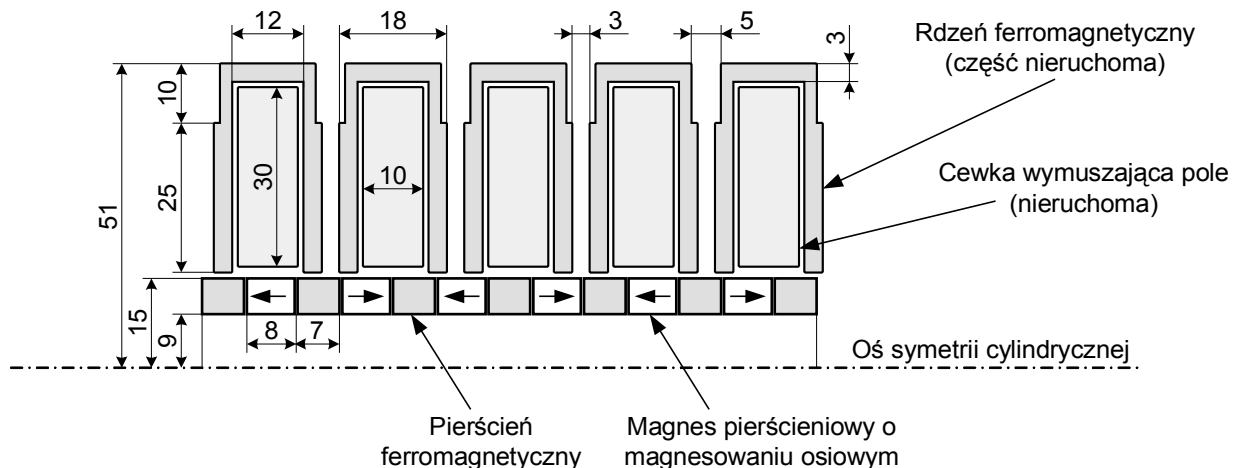
Uzwojenie składa się z 280 zwojów o przekroju $0,75 \text{ mm}^2$ każdy, co przy wymuszeniu ww. prądem daje przepływ 2240 A. Oczywiście, podana wartość prądu jest wartością występującą tylko przy zmianie położenia biegnika. Nie jest to wartość ciągła prądu, gdyż wówczas uzwojenie uległoby przegrzaniu. Wymiary modelowanego silnika przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 5. Charakterystyka odmagnesowania modelowanych magnesów trwałych



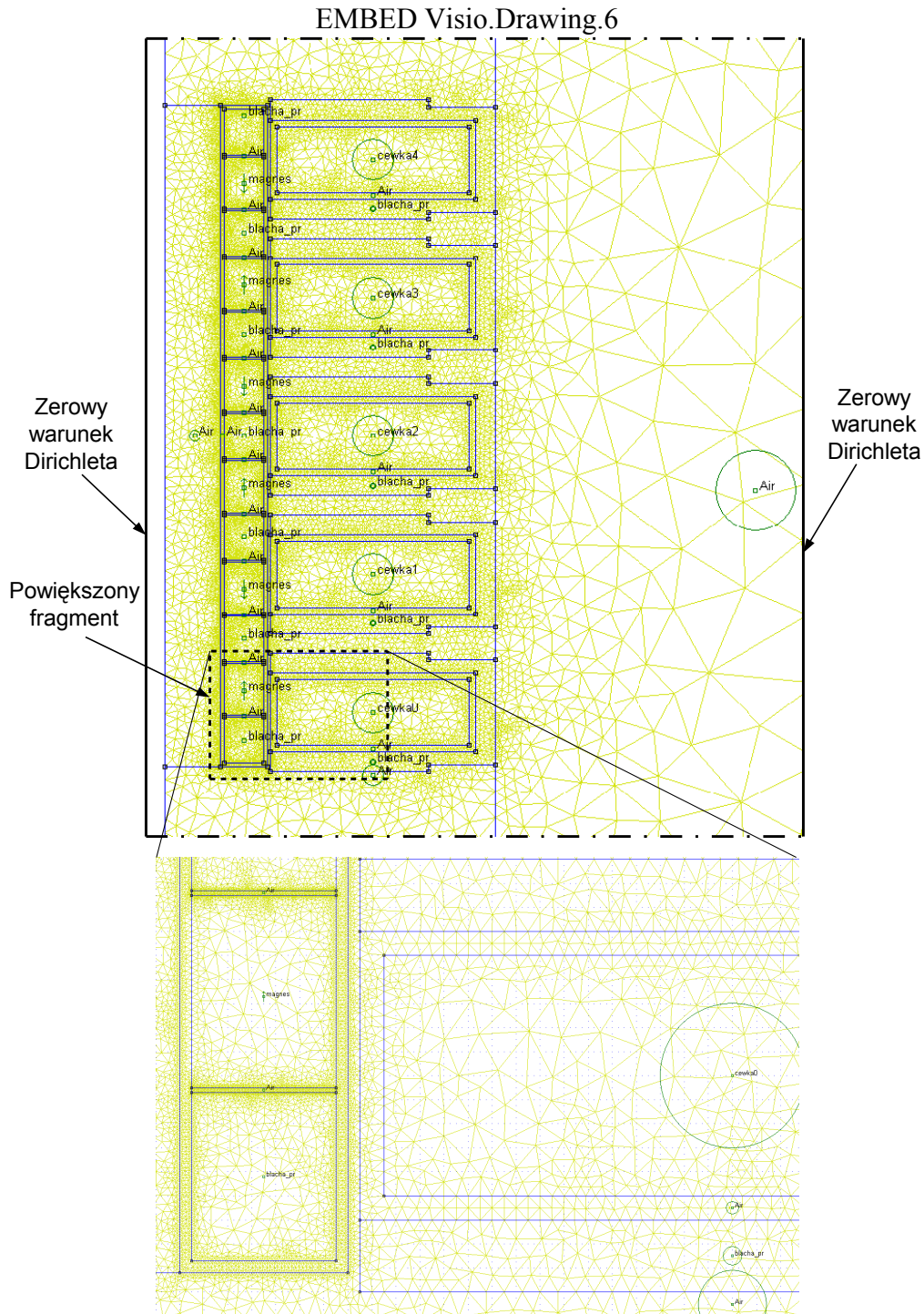
Rys. 6. Charakterystyka magnesowania rdzenia wykorzystana w obliczeniach



Rys. 7. Przekrój modelowanego silnika liniowego wraz z wymiarami

Na rysunku 8 przedstawiono fragment zdyskretyzowanego (siatką elementów skończonych) obszaru obliczeniowego wraz z zaznaczonymi warunkami brzegowymi. Można zauważyć, że w miejscach, gdzie należy się spodziewać większych wartości indukcji magnetycznej, siatka elementów została zagęszczona. Powiększony wycinek siatki dyskretyzacyjnej przedstawia podział na elementy szczelin powietrznych oraz obszaru otaczającego biegnik, stworzonego w celu obliczenia siły z wykorzystaniem tensora naprężeń Maxwella.

Obliczenia prezentowane w artykule wykonano za pomocą programu FEMM. Wyniki obliczeń przedstawiono w formie rozkładu linii sił pola. Siłę działającą na biegnik wyliczono dodatkowo z ważonego tensora naprężeń Maxwella (oprócz wspomnianego wcześniej tensora naprężeń Maxwella) [4]. Obie metody dały praktycznie identyczne wyniki. Należy zaznaczyć, że analizowane siły są siłami występującymi przy zmianie położenia biegnika.



Rys. 8. Dyskretyzacja obszaru obliczeniowego wraz z zadanymi warunkami brzegowymi (45 362 węzły)

Wyniki obliczeń

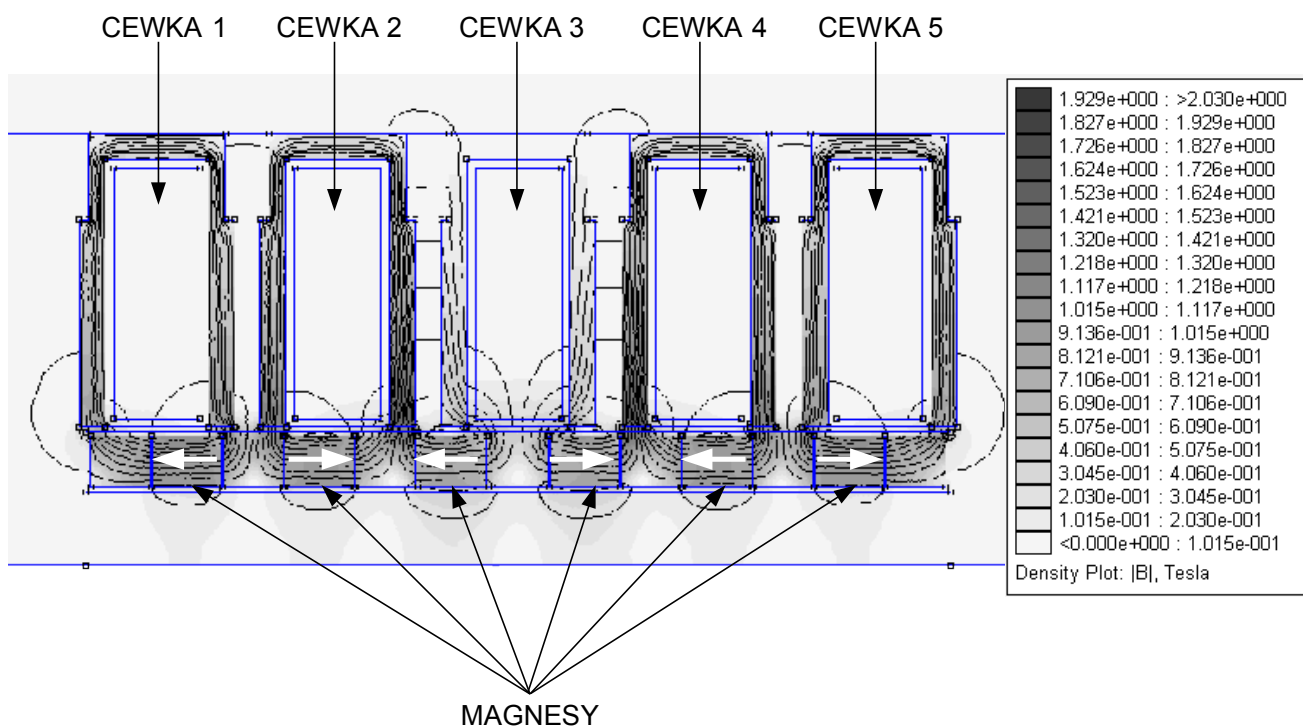
Na rysunku 9 przedstawiono rozkład izol linii potencjału przy braku wymuszenia prądowego. Biegnik jest w pozycji neutralnej, czyli centrycznej. Oznacza to, że środki ciężkości części ruchomej i nieruchomej się pokrywają. Linie sił pola są wynikiem namagnesowania magnesów trwałych. Widoczna jest wyraźna symetria w rozkładzie pola magnetycznego między lewą a prawą stroną silnika, dlatego też na biegnik nie działa siła.

Na rysunku 10 przedstawiono rozkład pola dla położenia jak poprzednio, przy zasilaniu cewki 2 prądem o wartości 8 A. Prąd płynie za płaszczyznę rysunku i osłabia pole magnesów trwałych w tej części silnika liniowego. Nierównowaga w rozkładzie pola między częścią lewą a prawą powoduje powstanie siły skierowanej w lewo. Układ dąży do nowego stanu równowagi.

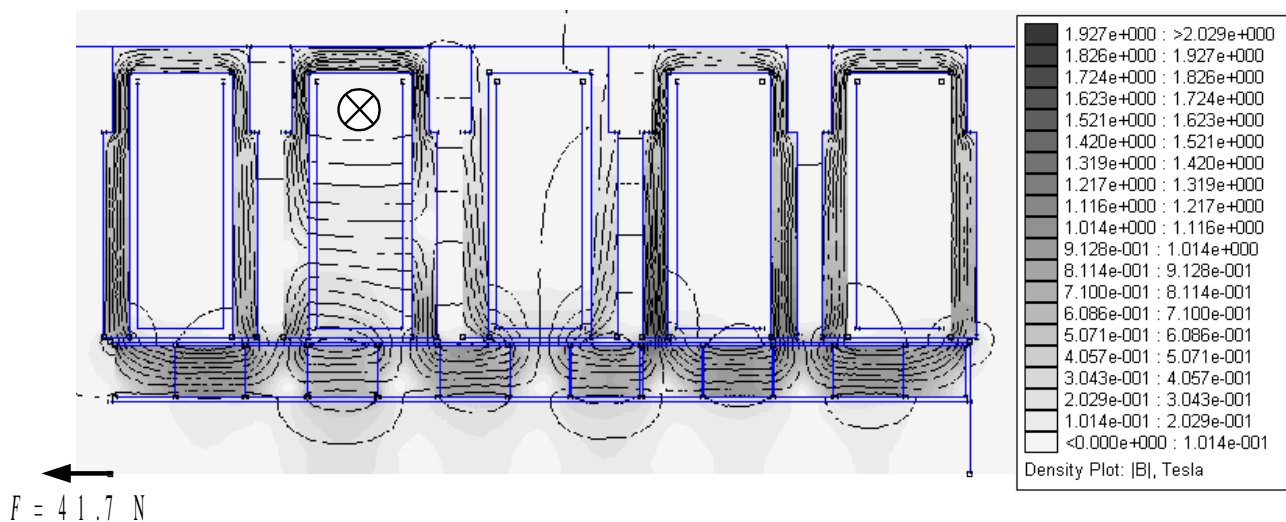
Rysunek 11 różni się od poprzedniego jedynie zwrotem prądu w cewce. Prąd płynie do czytelnika i wzmacnia pole od magnesów. Powstała w wyniku tego nierównowaga

w rozkładzie pola wywołuje siłę skierowaną w prawo. Zmiana zwrotu prądu w wybranej cewce pozwala więc na zmianę znaku siły działającej na biegnik, co z kolei oznacza,

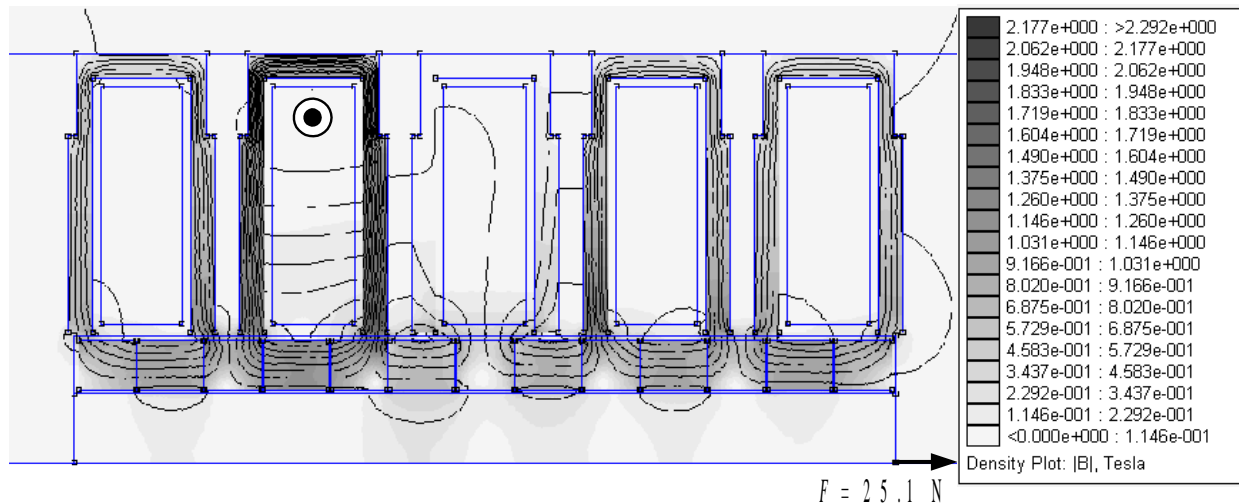
że istnieje możliwość sterowania ruchem biegnika poprzez odpowiednią (płynną) zmianę prądu w tej cewce.



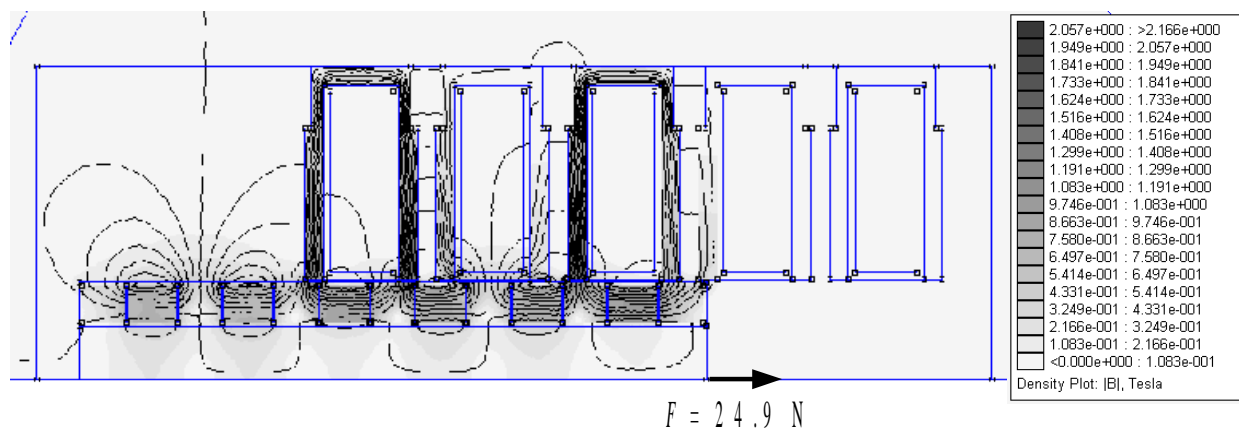
Rys. 9. Rozkład linii sił pola w położeniu neutralnym biegnika



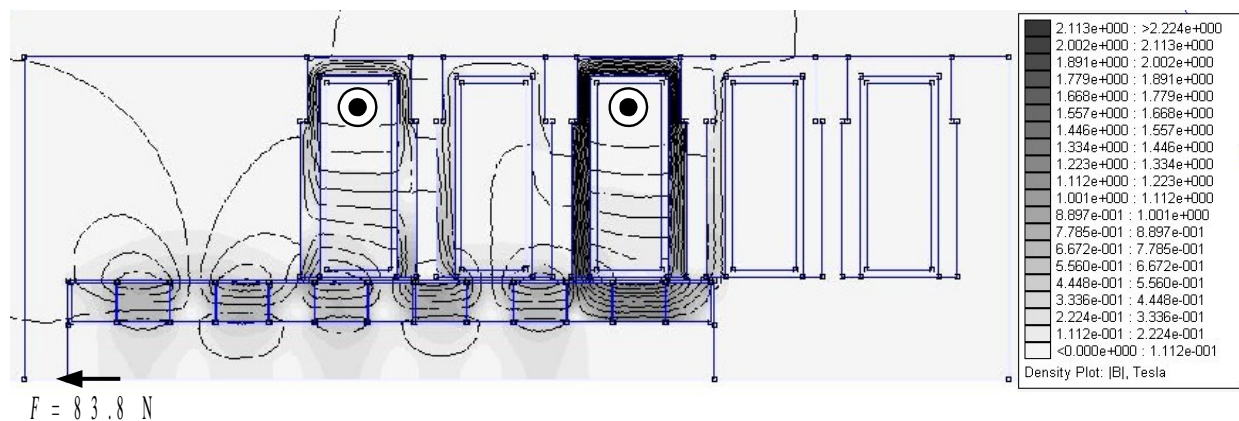
Rys. 10. Rozkład linii sił pola w położeniu neutralnym biegnika przy zasilaniu cewki 2 prądem o wartości 8 A



Rys. 11. Rozkład linii sił pola w położeniu neutralnym biegnika przy zasilaniu cewki 2 prądem o wartości 8 A (zwrot prądu przeciwny niż na rys. 9)



Rys. 12. Rozkład izolines potencjału przy wysunięciu biegnika o 37 mm z pozycji neutralnej i braku wymuszenia prądowego

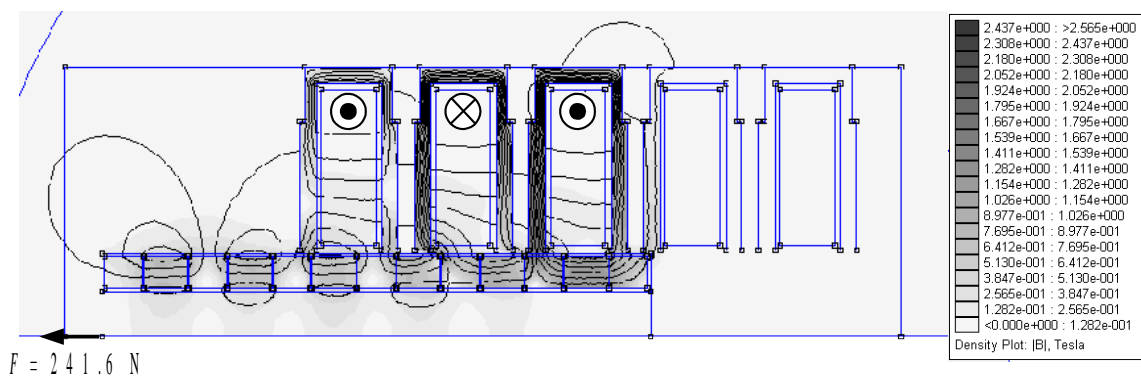


Rys. 13. Rozkład izolines potencjału przy wysunięciu biegnika o 37 mm z pozycji neutralnej i zasilaniu cewek 1 i 2 prądem o wartości 8 A

Rysunek 12 przedstawia przypadek, gdy biegnik jest wysunięty o 37 mm w lewo z pozycji neutralnej i w cewkach nie płynie prąd. Pole magnetyczne pochodzi więc jedynie od magnesów. W modelowanym obiekcie na biegnik działa siła skierowana w prawo. W ogólnym przypadku zwrot tej siły zależy od stopnia wysunięcia biegnika. W zaprezentowanym modelu przesunięcie biegnika o 5 mm w prawo (wysunięcie

o 32 mm z pozycji neutralnej) powoduje zmianę zwrotu działającej nań siły na przeciwną.

Na rysunku 13 pokazano rozkład linii sił pola przy wysunięciu biegnika jak wyżej, gdy zasilane są dwie cewki (cewka 1 i cewka 3). W obu cewkach płynie prąd o tej samej wartości 8 A i tym samym zwrocie. Wzbudzenie od prądu płynącego w cewce 1 osłabia pole magnesu, natomiast



Rys. 14. Rozkład izolinii potencjału przy wysunięciu biegnika o 37 mm z pozycji neutralnej i zasilaniu cewek 1, 2 i 3 prądem o wartości 8 A

w przypadku cewki 2 następuje wzajemne wzmocnienie pól pochodzących od magnesu i od prądu. Ponieważ (zgodnie z zasadą Hamiltona) układ dąży do zajęcia możliwie najniższego stanu energetycznego, to przesunięcie elementu ruchomego następuje w kierunku większego zagęszczenia linii sił pola. Zmniejsza się wówczas energia układu. Zgodnie z rysunkiem (i obliczeniami), siła działająca na układ jest skierowana w lewo.

Rysunek 14 przedstawia przypadek, gdy zasilane są pierwsze trzy cewki z lewej strony. Wartość prądu dla każdej z cewek wynosi 8 A. Z obliczeń wynika, że przepływ prądu w cewce drugiej przyczynia się do blisko trzykrotnego wzrostu siły działającej w lewo. W analizowanym położeniu prąd w cewce 2 ma więc największy wpływ na zwrot i wartość siły działającej na biegnik.

Wnioski

W artykule rozpatrzono 2-wymiarową wizualizację rozkładu pola magnetycznego. Wizualizacja 3-wymiarowa jest znacznie trudniejsza [6] i najczęściej sprowadza się do przedstawiania wyników w przekrojach analizowanego obiektu, a więc na płaszczyźnie 2-wymiarowej. Nie znaczy to, że obliczenia w przestrzeni 3-wymiarowej są niepotrzebne. Wręcz przeciwnie, większość problemów spotykanych w praktyce inżynierskiej można rozwiązać jedynie z wykorzystaniem metod obliczeń 3-wymiarowych. Zagadnienia polowe, które można modelować 2-wymiarowo, nie powinno się analizować przy wykorzystaniu programów komercyjnych przeznaczonych do analizy 3-wymiarowej, ponieważ podraża to znacznie koszty analizy. Przede wszystkim główną zaletą obliczeń 2-wymiarowych jest znacznie krótszy czas obliczeń (o 2 rzędy wielkości).

Na przykładzie silnika liniowego pokazano, że interpretacja otrzymanych wyników obliczeń w postaci rozkładów linii sił pola wymaga pewnej wprawy. Wiele zjawisk zachodzących w badanym obiekcie można przewidzieć, analizując wyłącznie rozkład pola. Mapa indukcji pozwala np. wykryć „gorące punkty”, czyli miejsca w obiekcie, gdzie występuje największe nasycenie materiału, a więc także największe blokowanie przepływu strumienia magnetycznego. Zagęszczenia linii sił pola pozwalają przewidzieć zwroty sił działających na poszczególne elementy układu, jak również wykryć „wąskie gardła” dla

strumienia magnetycznego. Tego typu jakościowa analiza wyników, wsparta analizą ilościową, umożliwia poprawę (optymalizację) kształtu obiektu w celu poprawy jego parametrów.

Każda analiza matematyczna generuje mniej lub więcej danych, które należy zinterpretować. Najdogodniejszym sposobem analizy tych danych jest ich odpowiednia wizualizacja. W przypadku obliczeń polowych dobrze wykonana wizualizacja pozwala na znaczne przyspieszenie analizy wyników obliczeń numerycznych.

Jeśli chodzi o przedstawione w pracy rozwiązania konstrukcyjne, to należy stwierdzić, że są one przede wszystkim bezpieczniejsze niż napędy zamieniające ruch obrotowy na wymagany ruch liniowy. Dlatego też w urządzeniach powszechnego użytku, tam gdzie to możliwe, stosuje się ww. konstrukcje. Podobnie, w przypadku manipulatorów, które są pomocne osobom niepełnosprawnym, zmniejsza się ryzyko obrażeń ciała. W stosunku do napędów hydraulicznych nie ma konieczności stosowania olejów, które po zużyciu zanieczyszczają środowisko. Wobec powyższego można tego typu urządzenia zakwalifikować do urządzeń przyjaznych środowisku.

Literatura

- [1] Basak A.: Permanent-magnet DC linear motors. Clarendon Press, Oxford 1996.
- [2] Morecki A. i Knapczyk J.: Podstawy robotyki. Teoria i elementy manipulatorów i robotów. WNT, Warszawa 1999.
- [3] Chung M.J. i Gweon D.G.: Modeling of the armature slotting effects in the magnetic field distribution of a linear permanent magnet motor, Electrical Engineering. Springer-Verlag, 2002, Berlin, 84, 101-108.
- [4] Zhu Z.Q., Hor P.J., Howe D. i Rees-Jones J.: Calculation of cogging force in a novel slotted linear tubular brushless permanent magnet motor. IEEE Trans. on Magnetics, 1997, 33, 5, 4098-4100.
- [5] Choi H.Y., Jung S.Y., Jung H.K.: Performance Evaluation of Permanent Magnet Linear Generator for Charging the Battery of Mobile Apparatus. 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM), Brugge, Belgium, August 25-28, 2002, paper 234 (on CD).
- [6] Królewiak A.: Stereoskopowa i interaktywna wizualizacja pól elektromagnetycznych w środowisku rzeczywistości wirtualnej. Praca doktorska, Wydział Informatyki i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 16.03.2004.

- [7] www.linmot.com
- [8] www.aerotech.com