

Andrzej Herbst, Grzegorz Kamiński
Politechnika Warszawska, Zakład Maszyn Elektrycznych

PORÓWNANIE WYNIKÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH OBLICZEŃ POLOWYCH 2D I 3D DLA JEDNOSTRONNEGO INDUKCYJNEGO SILNIKA LINIOWEGO

COMPARISON OF THE RESULTS OF 2D AND 3D FINITE ELEMENT ELECTROMAGNETIC MODELING OF ONE-SIDE INDUCTION MOTOR

Abstract: This article shows differences in results obtained by two way of FEM: 2D and 3D. Authors used one-side induction linear motor as a object for modeling. First part of the article describes the problems with 2D and 3D finite element modeling some special cases of the machine. Middle part shows the results of the electromagnetic modeling induction linear motor. The last part takes into consideration possible reason of the differences.

1. Wstęp

Polowe obliczenia magnetyczne metodą elementów skończonych są efektywnym narzędziem wspomagającym projektowanie różnego rodzaju maszyn elektrycznych [1]. Zwiększając dokładność modelu i analizy, wydłuża się czas obliczeń. Rozwiązanie prostych zadań może trwać kilka sekund, natomiast bardzo skomplikowanych – nawet kilka dni. Z racji tego, że ilość elementów siatki w największej mierze wpływa na szybkość rozwiązania, dąży się do wykonywania analizy jedynie przekroju maszyny – czyli analizy 2D [2]. Gdy dokładność nie jest priorytetem, można zmniejszyć gęstość siatki, co również przyspieszy wykonywanie obliczeń. Jednak pewne rodzaje maszyn nie posiadają płaszczyzn symetrii (np. silniki z toczącymi się wirnikami dyskowymi) lub nawet, jeśli posiadają takowe – to obliczenia na jednej tylko płaszczyźnie są pewnym uproszczeniem teoretycznym. Grupa tego typu maszyn nie jest liczna. Przykładem mogą tu być silniki indukcyjne z litą warstwą przewodzącą w bieźniku. Problem analizy polowej silnika z warstwą litą polega na tym, że jedynie w płaszczyźnie symetrii wirnika lub bieźnika można z góry określić kierunek prądu – będzie on prostopadły do płaszczyzny przekroju. Jednak w miarę oddalania się od tej płaszczyzny kierunek prądu będzie ulegał zmianie. Przy zbliżaniu się do skrajnego pakietu blach, składowa normalna prądu będzie zanikać. Zatem dla silników z litą warstwą przewodzącą analiza dwuwymiarowa jest poprawna jedynie dla fragmentu bieźnika położonego w płaszczyźnie symetrii. Można stwierdzić, że wyniki obliczeń dwuwymiarowych wykonanych dla tego typu silnika dadzą

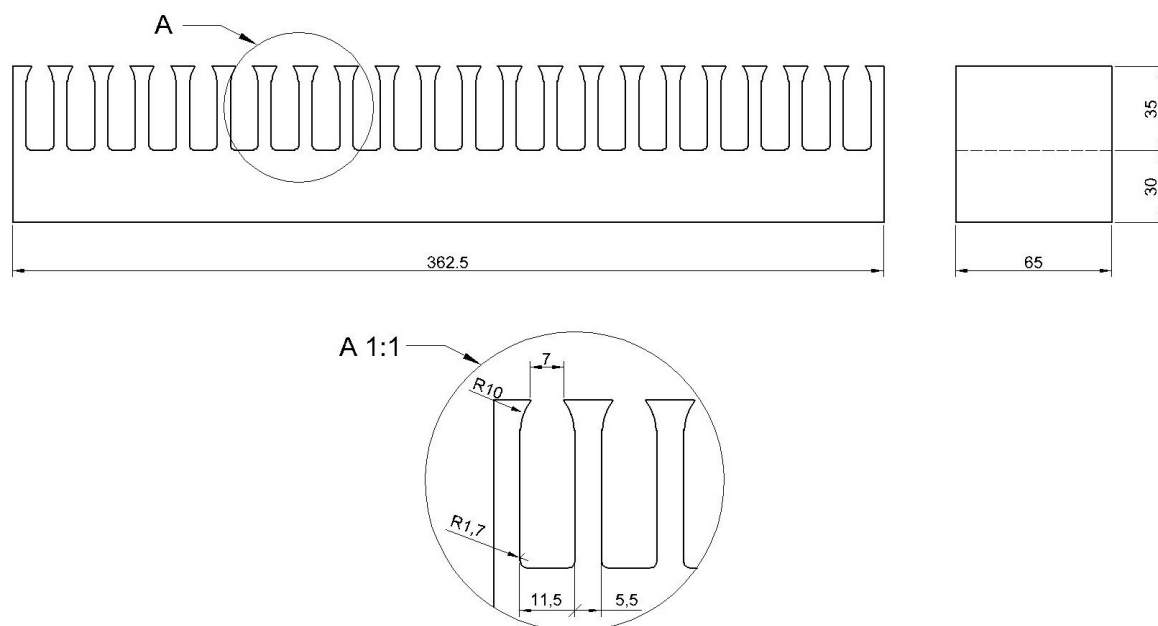
zawyżoną wartość siły. Zatem jako poprawna merytorycznie powinna być wykonana analiza nie w przekroju maszyny, lecz w całej jej objętości, czyli analiza trójwymiarowa. Analiza trójwymiarowa wymaga jednak przestrzennej sieci o wielokrotnie większej ilości węzłów niż w przypadku sieci dwuwymiarowej. Do rozwiązania tego problemu potrzeba proporcjonalnie więcej mocy obliczeniowej, zatem pojawia się problem wspomniany na początku [3]. Zwykle analiza polowa sformułowana jest, jako jedno zadanie. Takie zadanie jest jednym wątkiem obliczeniowym dla systemu komputerowego i wykonywane jest na jednym tylko rdzeniu procesora [4]. Programy do obliczeń magnetycznych dotychczas nie używały jeszcze wielu rdzeni lub procesorów do rozwiązania jednego zadania. Jednak inżynier mając do dyspozycji komputer wyposażony w wiele rdzeni można tak sformułować problem, aby podzielić go na wiele zadań już od samego początku. Zatem można korzystać z całych zasobów sprzętowych komputera do rozwiązania pewnej grupy zadań, które składają się na większą całość. Obliczenia trójwymiarowe, które są bazą tego artykułu zostały wykonane właśnie w ten sposób. W omawianym przypadku, charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego liniowego składa się z 16 punktów równomiernie rozmieszczonych w przedziale poślizgu od 0 do 1. Każdy z punktów charakterystyki był autonomicznym zadaniem, któremu został przydzielony jeden rdzeń procesora.

2. Wyniki obliczeń polowych

Zagadnienie modelowania polowego silnika liniowego jest elementem projektu maszyny

przeznaczonej do napędu pojazdu szynowego o masie całkowitej ok. 1-2 tony i prędkości maksymalnej na poziomie 60 km/h. Z racji minimalizacji kosztów ewentualnej produkcji

i napraw, wybór padł na jednostronny indukcyjny silnik liniowy z bieżnią litą umieszczoną w torze [5]. Przekrój wzbudnika tego silnika pokazany jest na rysunku 1.



Rys. 1. Przekrój wzbudnika silnika liniowego. Wymiary w milimetrach.

W trakcie prac projektowych zostały zauważone rozbieżności w wynikach obliczeń elektromagnetycznych tego typu silnika. Wyniki pochodziły z dwóch modeli tej maszyny – dwu i trójwymiarowego. Z racji tego, że oprogramowanie do obliczeń trójwymiarowych posiadane przez autorów umożliwia jedynie analizę silników wirujących a nie liniowych – konstrukcja silnika liniowego została zamodelowana, jako silnik łukowy o dużym promieniu. Parametry symulacji zostały zestawione w tabeli 1. W tabeli 2. przedstawiono parametry silnika, jaki został zamodelowany. Obie analizy były analizami typu harmonicznego z wymuszeniem prądowym. Skuteczna gęstość prądu była stała i niezależna od poślizgu.

Tab. 1. Parametry symulacji.

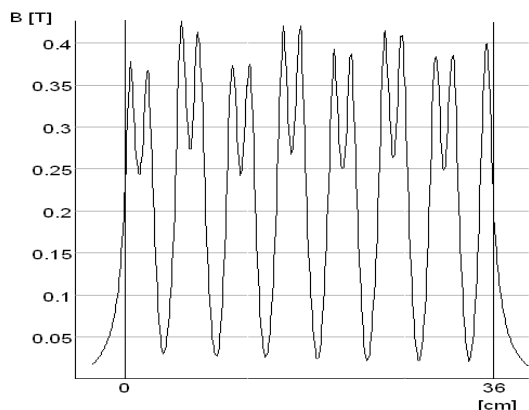
Parametr	Model 2D	Model 3D
Liczba elementów	112000	846000
Liczba węzłów	56700	146500
Krok obliczeń	2e-4 sek.	2e-4 sek.
Czas obliczenia jednego zadania	ok. 10 min.	ok. 5 godz.

Pierwsze wyniki porównania modeli przedstawione są na rysunku 2 i 3: na rysunku 2. poka-

zany jest rozkład indukcji w szczelinie powietrznej silnika – model 2D natomiast na rysunku 3. pokazany jest rozkład indukcji w szczelinie modelu 3D. Wartości indukcji w modelu 2D są nieznacznie większe (ok. 0,05 T) niż w modelu 3D. Wykresy zostały opracowane dla pracy silnika przy poślizgu wynoszącym 1.

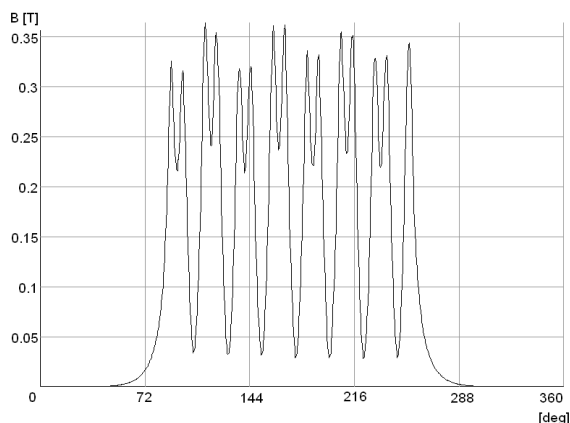
Tab. 2. Parametry badanej konstrukcji.

Parametr	Wartość
Długość wzbudnika	36,25 cm
Szerokość pakietu	65 mm
Wysokość zęba	35 mm
Szerokość zęba	5,5 mm
Szerokość żłobka	11,5 mm
Wysokość jarzma stojana	30 mm
Wysokość szczeliny powietrznej	3 mm
Wysokość warstwy przewodzącej	2 mm
Wysokość jarzma bieżnika	10 mm
Szerokość warstwy przewodzącej	85 mm
Gęstość prądu w żłobku	6 A/mm ²
Częstotliwość	50 Hz
Ilość żłobków na biegun	3
Prędkość synchroniczna	5,1 m/s
Zakładany poślizg znamionowy	0,3
Promień zagięcia (model 3D)	0,125 m



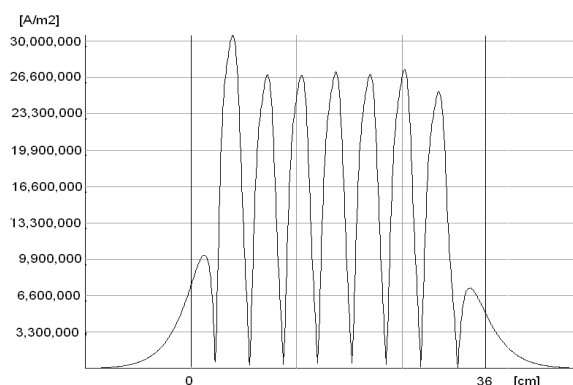
Rys. 2. Indukcja w szczelnie – model 2D.

Kształt rozkładu pola również jest zbliżony. Prowadzi to do wniosku, że w obu przypadkach na bieznik oddziałuje pole elektromagnetyczne o takim samym kształcie i amplitudzie.



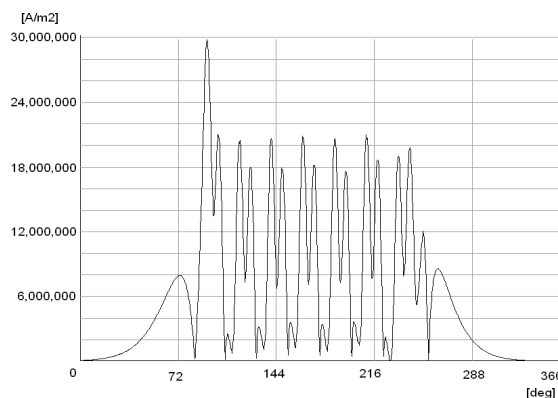
Rys. 3. Indukcja w szczelnie – model 3D.

Kolejnym krokiem analizy jest analiza rozplądów prądów wirowych indukowanych w biezniku. Na rysunku 4. pokazany jest rozkład prądów wirowych w litej warstwie przewodzącej wzбудnika. Należy nadmienić, że prądy te, według upraszczających założeń modelu 2D, płyną równoległe do kierunku żłobków.

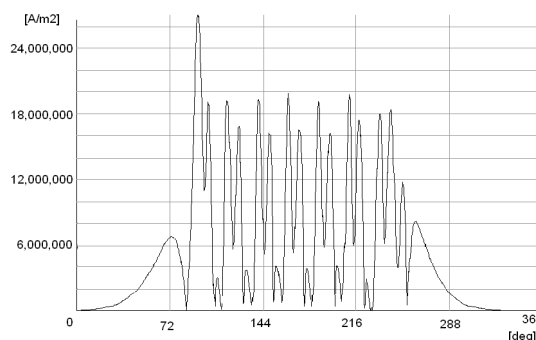


Rys. 4. Prądy wirowe w warstwie przewodzącej – model 2D.

Powoduje to, iż cały prąd bierze udział w powstawaniu siły ciągu. Z kolei na rysunku 5. pokazany jest rozkład prądów wirowych w modelu 3D. Rozkład ten występuje na połowie szerokości pakietu bieznika. W tym miejscu – podobnie jak to miało miejsce w analizie 2D – cały prąd ma jedynie składową równoległą do żłobków.

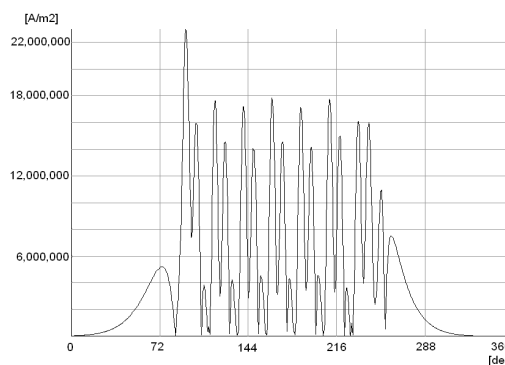


Rys. 5. Prądy wirowe w warstwie przewodzącej – model 3D; $\frac{1}{2}$ szerokości bieznika.

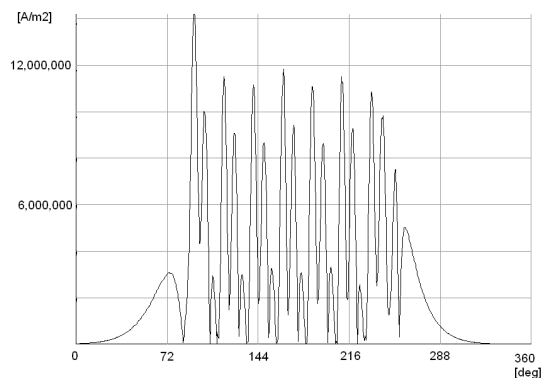


Rys. 6. Prądy wirowe w warstwie przewodzącej – model 3D; $\frac{1}{4}$ szerokości bieznika.

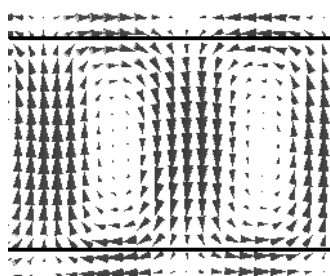
Na rysunku 6. pokazany jest rozkład w $\frac{1}{4}$ szerokości bieznika – w miejscu gdzie prąd posiada już dwie składowe – prostopadłą oraz równoległą do żłobków.



Rys. 7. Prądy wirowe w warstwie przewodzącej – model 3D; $\frac{1}{8}$ szerokości bieznika.



Rys. 8. Prądy wirowe w warstwie przewodzącej – model 3D; skraj bieznika.



Rys. 9. Trajektoria prądów wirowych w warstwie przewodzącej – model 3D.

Na rysunkach 7. i 8. pokazane są odpowiednio rozkłady prądów dla 1/8 oraz skraj bieznika (miejsce odpowiadające początkowi pierścienia zwierającego w silnikach wirujących). Ostatnim rysunkiem jest trajektoria prądu w warstwie przewodzącej – rysunek 9. Poziome linie oddzielają część warstwy przewodzącej przebiegającej w polu wzbudnika od części połączeń czołowych. Istotne jest porównanie obliczonej siły rozruchowej dla obu modeli. Siła ta dla modelu 2D wyniosła około 260 N, a modelu 3D jedynie 200 N.

3. Wnioski

Analizując wyniki symulacji można postawić tezę, że wykonując modelowanie dwuwymiarowe należy być ostrożnym i mieć na względzie uproszczenia modelu. Różnice między modelami 2D i 3D są szczególnie widoczne przy badaniu konstrukcji silników, w których stosunek długości pakietu do średnicy jest znacznie mniejszy od jedności oraz w silnikach indukcyjnych z warstwą litą. Różnice w maksymal-

nych gęstościach prądów wirowych w skrajnych częściach warstwy litej są blisko dwukrotne (22 i 12 A/mm²). Aby zwiększyć dokładność obliczeń, ale zbytnio nie wydłużyć czasu, można wstępnie przeprowadzić analizę na modelu 2D obliczeń na modelu dwuwymiarowym, a na finalnym wariancie maszyny dokonać obliczeń w całej jej objętości [6].

Artykuł współfinansowany z pracy ECO-Mobilność WND-POIG.01.03.01-14-154/09.



INNOWACYJNA
GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

4. Literatura

- [1] Sheppard J. S.: *Finite element analysis of electrical machines*. 1995, wyd. Kluwer Academic Publishers.
- [2] Jian-Ming J.: *The finite element method in electromagnetics*. 2002, JOHN WILEY & SONS, INC.
- [3] Bianchi N.: *Electrical Machines Analysis using finite elements*. 2005, Taylor and Francis Group.
- [4] Wiak S., Napieralska E.: *Computational Methods for the Innovative Design*. 2010, Springer.
- [5] Woronowicz K., Pałka R.: *Optimised Thrust Control of Linear Induction Motors by a Compensation Approach*. 2003, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 18, str. 533-536.
- [6] Joao P.: *Electromagnetic Modeling by Finite Elements Method*. 2003, Marcel Dekker, Inc.
- [7] Gieras J. F.: *Axial Flux Permanent Magnets Brushless Machines*. 2008, Springer.
- [8] Vector Fields Opera: *Users Manual – Documentation*. 2006 r.

Autorzy

- 1) mgr inż. Andrzej Herbst, ZME PW, ul. Nowowiejska 20A, 00-661 Warszawa, tel: (22) 234-74-59, e-mail: blau-punkt@poczta.onet.pl.
- 2) prof. dr hab. inż. Grzegorz Kamiński, ZME PW, ul. Nowowiejska 20A, 00-661 Warszawa, tel: (22) 234-73-35, e-mail: g.kaminski@ime.pw.edu.pl.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka