

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów
Krzysztof Tomczewski, Krzysztof Wróbel, Politechnika Opolska, Opole

WERYFIKACJA POMIAROWA WYNIKÓW OBLICZEŃ POLOWYCH SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZEŁĄCZALNEGO

EXPERIMENTAL VERIFYFICATION OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR FIELD CALCULATIONS

Abstract: The paper shows some chosen static characteristics of a switched reluctance motor 8/6 received by field calculation method. The structure of specialized measurement stand to appoint static characteristics of an electronic switched motor was discussed. Results of some laboratory measurements for a given researched SRM motor were included. The results received by field accounts method were compared with the results of laboratory research and some conclusions were enclosed.

1. Wstęp

Podstawą procesu projektowania nowych maszyn elektrycznych [1] czy też optymalizacji konstrukcji już istniejących [6] są badania symulacyjne. Jednym z pierwszych etapów badań symulacyjnych są obliczenia numeryczne z zastosowaniem metody elementów skończonych (ang. Finite Element Method - FEM). Obliczenia FEM pozwalają na dobór kształtu obwodu magnetycznego, a także na estymację parametrów maszyny niezbędnych do budowy, tzw. obwodowego modelu symulacyjnego [5]. Za pomocą modeli obwodowych można badać zachowanie się maszyny zarówno w stanach ustalonych, jak też w stanach dynamicznych. Niezbędnym etapem cyklu badawczego jest weryfikacja pomiarowa otrzymanych wyników obliczeń polowych.

W pracy porównano wyniki obliczeń polowych oraz badań laboratoryjnych podstawowych charakterystyk, tj. zależności strumienia i momentu od prądu i kąta obrotu wirnika dla silnika z komutacją elektroniczną. Jako obiekt badań wybrano silnik reluktancyjny przełączalny SRM (ang. Switched Reluctance Motor) o konstrukcji 8/6, którego widok przedstawiono na rysunku 1. W tabeli 1 zamieszczono podstawowe parametry badanego silnika SRM. W pracy omówiono budowę specjalistycznego stanowiska badawczego do wyznaczania charakterystyk statycznych maszyn z komutacją elektroniczną. Zamieszczono wnioski dotyczące zbieżności uzyskanych wyników.



Rys. 1. Widok badanego silnika SRM o konstrukcji 8/6

Tabela 1. Parametry badanego silnika SRM 8/6

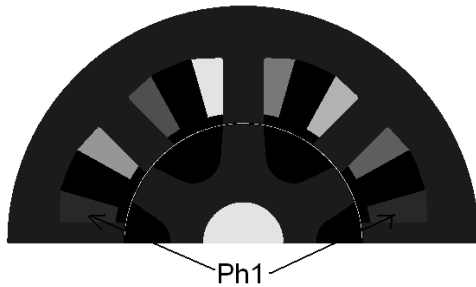
Moc znamionowa [kW]	0.75
Moment znamionowy [N·m]	2.5
Prędkość znamionowa [obr/min]	3000
Moment rozruchowy [N·m]	13
Rodzaj pracy	S2 – 1h
Napięcie znamionowe [V]	24
Maksymalna wartość prądu źródła [A]	150

Obliczenia metodą elementów skończonych prowadzono dla celów estymacji parametrów niezbędnych do budowy obwodowych modeli symulacyjnych.

2. Badania symulacyjne silnika SRM

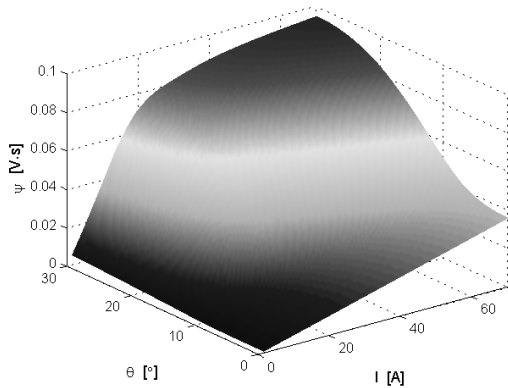
Obliczenia numeryczne przeprowadzono w komercyjnym programie Flux [4]. Dedykowany jest on szczególnie do obliczeń przetworników elektromechanicznych o ruchu obrotowym i liniowym z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Na rysunku 2 przedstawiono po-

łową geometrii badanego silnika reluktancyjnego przełączalnego o konstrukcji 8/6.



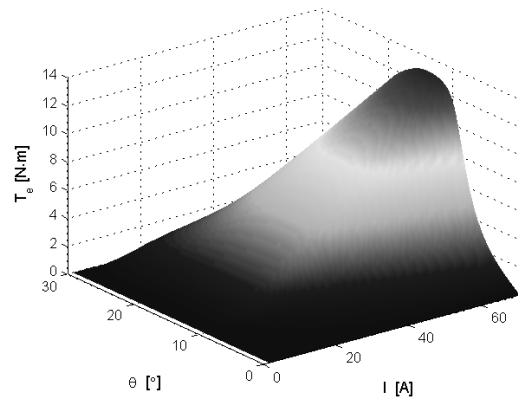
Rys. 2. Geometria silnika SRM 8/6 utworzona w programie Flux

Jako materiał magnetyczny obwodu stojana i wirnika przyjęto izotropową blachę prądnicową o symbolu M800-65A. Charakterystykę magnesowania $B=f(H)$ blachy zaimplementowano w bazie materiałowej programu Flux. Przeprowadzono obliczenia statyczne dla umownego pasma Ph1 badanego silnika (rys.1). Wirnik silnika obracano ze skokiem co 1° w zakresie od położenia niewspółosiowego (umowne 0°) do położenia współosiowego (30°). Wartości prądu wzbudzenia dla badanego pasma zmieniano w przedziale od 1A do 70A. Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykę magnesowania badanego silnika SRM, tj. zależność strumienia ψ w funkcji prądu I i kąta obrotu wirnika θ .

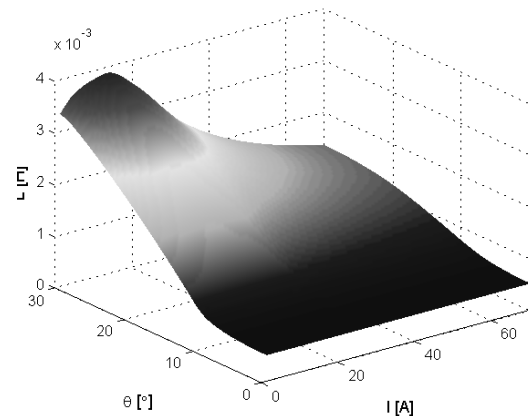


Rys. 3. Zależność strumienia ψ od prądu I oraz kąta obrotu wirnika θ

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono odpowiednio zależności momentu elektromagnetycznego T_e oraz indukcyjności własnej uzwojenia pasma L w funkcji prądu I oraz kąta obrotu wirnika θ . Weryfikacji obliczeń symulacyjnych w warunkach laboratoryjnych dokonano na specjalistycznym stanowisku badawczym [2,3].



Rys. 4. Zależność momentu silnika T_e od prądu I oraz kąta obrotu wirnika θ



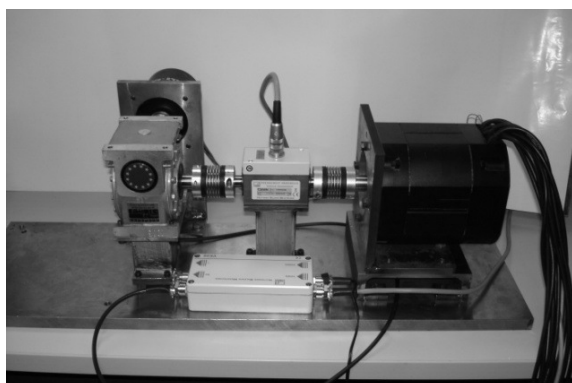
Rys. 5. Zależność indukcyjności własnej L od prądu I oraz kąta obrotu wirnika θ

3. Badania laboratoryjne silnika SRM

• Stanowisko do badań laboratoryjnych

Stanowisko badawcze do wyznaczenia charakterystyk statycznych maszyn z komutacją elektroniczną zostało zrealizowane w oparciu o silnik skokowy, przekładnię oraz przetwornik momentu firmy HBM (rys.6). Poszczególne elementy składowe umieszczono na platformie montażowej przystosowanej do mocowania różnego typu maszyn elektrycznych. Silnik skokowy wchodzący w skład omawianego stanowiska badawczego posiadał skok znamionowy 1.8° . Sterowanie silnika skokowego zaprojektowano tak, że można było programowo dokonać podziału wartości skoku znamionowego na 2, 4 lub 8 części w ramach, tzw. sterowania mikroskokowego. Przekładnia samohamowna o przełożeniu 1:66 pozwalała przy zastosowaniu skoku znamionowego na uzyskanie skoku o wartości 0.02727° . Przy takiej konfiguracji na połowę cyklu elektrycznego badanego silnika przypadało 1100 skoków. Wartość

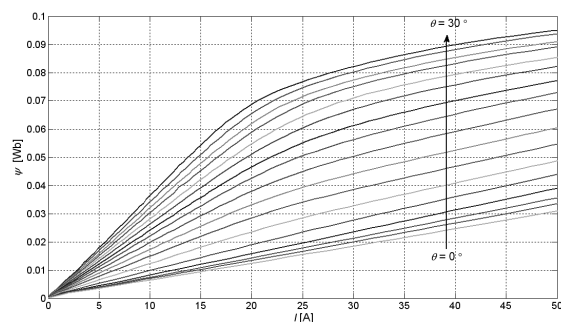
ta była zupełnie wystarczająca do prawidłowego wyznaczenia charakterystyk statycznych badanej maszyny.



Rys. 6. Stanowisko badawcze do wyznaczania charakterystyk statycznych silnika SRM

• Wyniki badań laboratoryjnych

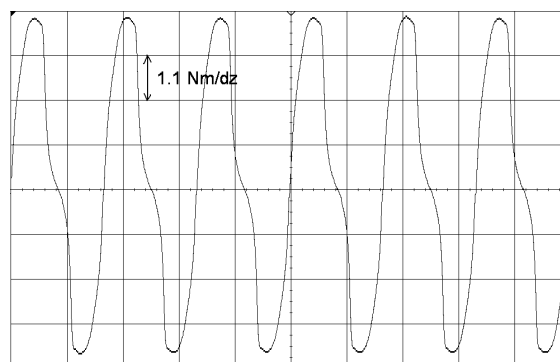
W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono serię pomiarów silnika reluktancyjnego przełączalnego dla różnych położenia wirnika i różnych wartości prądu. Pomiar strumienia sprzężonego odbywał się przy nieruchomym wirniku, którego położenie zmieniano skokowo. Metodę pomiaru strumienia opisano w [2-3]. Zależność wyznaczonego eksperymentalnie strumienia sprzężonego ψ w funkcji prądu wzbudzenia I dla różnych kątów położenia wirnika θ z przedziału od 0 do 30° przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Wyniki pomiaru strumienia ψ w funkcji prądu I dla różnych kątów położenia wirnika θ

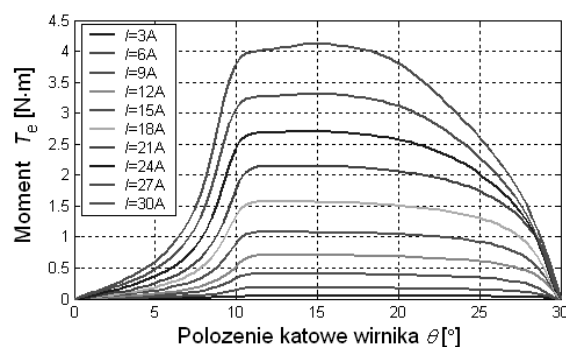
Pomiar momentu elektromagnetycznego odbywał się każdorazowo przy określonej wartości prądu I przy zasilaniu wybranego pasma silnika. Z uwagi na dopuszczalne parametry pracy przetwornika momentu ($T_N=5 \text{ N}\cdot\text{m}$) pomiary przeprowadzono przy mniejszych wartościach prądu niż w przypadku badań symulacyjnych. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowy wynik pomiaru momentu w funkcji kąta obrotu w zakresie pełnego obrotu wirnika. Jak można zauważyć powtarzalność charakterystyk mome-

ntowych silnika jest duża, niemniej jednak dla każdej wartości prądu pomiar momentu rozpoczynał się w tym samym położeniu wirnika.



Rys. 8. Zależność momentu T_e od kąta obrotu dla pełnego obrotu wirnika silnika

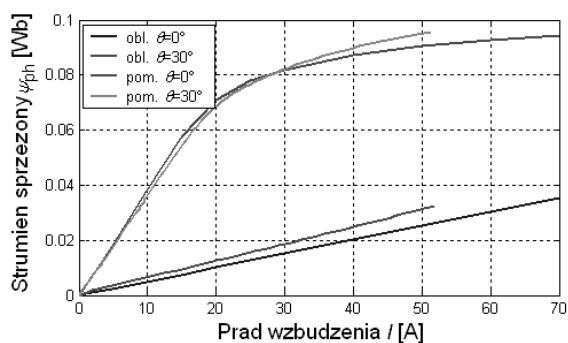
Na rysunku 9 przedstawiono wyniki pomiaru zależności momentu elektromagnetycznego T_e silnika od położenia wirnika θ dla różnych wartości prądu I dla połowy cyklu elektrycznego (30° mechanicznych).



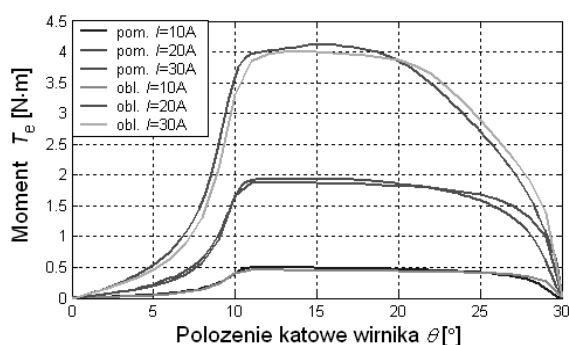
Rys. 9. Wyniki pomiaru momentu T_e w funkcji kąta obrotu θ dla różnych wartości prądu I

4. Porównanie wyników badań symulacyjnych i laboratoryjnych

Na rysunku 10 porównano wyniki obliczeń i pomiarów strumienia w funkcji prądu I dla dwóch charakterystycznych położenia wirnika, tj. dla kątów $\theta=0^\circ$ oraz $\theta=30^\circ$. Pomiary ze względów technicznych przeprowadzono dla mniejszych wartości prądu niż obliczenia symulacyjne. Na rysunku 11 przedstawiono porównanie wyników obliczeń i pomiaru momentu T_e w funkcji kąta położenia wirnika θ dla trzech różnych wartości prądu I (10A, 20A, 30A).



Rys. 10. Wyniki obliczeń i pomiaru strumienia w funkcji prądu I dla kątów $\theta = 0^\circ$ oraz $\theta = 30^\circ$



Rys. 11. Porównanie wyników obliczeń i pomiaru momentu T_e w funkcji kąta wirnika θ dla trzech różnych wartości prądu I

Otrzymana zbieżność wyników pomiarowych i numerycznych jest zadawalająca. Odrębnym problemem w obliczeniach symulacyjnych jest implementacja charakterystyki magnesowania zastosowanej blachy obwodu magnetycznego silnika w bazie materiałowej programu FEM. Każdy program posiada w tym zakresie swoją specyfikę i pewne ograniczenia. Zazwyczaj dostępne charakterystyki pomiarowe $B=f(H)$ blach magnetycznych są podawane dla wartości indukcji maksymalnej 1.7T (wyjątkowo 1.9T). Jest to niestety pewien problem dla metod numerycznych, które wymagają najczęściej zdefiniowania charakterystyki $B=f(H)$ blachy magnetycznej w zdecydowanie szerszym zakresie.

5. Podsumowanie

W pracy dokonano weryfikacji pomiarowej obliczeń polowych wybranego silnika reluktancyjnego przełączalnego. W obliczeniach numerycznych zastosowano analizę 2D, która pozwala stosunkowo dokładnie wyznaczyć statyczne charakterystyki momentowe silnika (rys.11). W zakresie charakterystyk strumieniowych zgodność wyników obliczeń i pomiarów jest nieco gorsza (rys.10). Wyniki badań

eksperymentalnych potwierdzają, że metody numeryczne są niezwykle przydatne w procesie projektowania nowych maszyn czy też optymalizacji już istniejącej konstrukcji.

6. Literatura

- [1]. Anawar M.N., Husain I., Radun A. V.: *A comprehensive desing methodology for switched reluctance machines*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, November/December 2001, pp. 1684-1692
- [2]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Stanowisko do badań silników reluktancyjnych przełączalnych z zastosowaniem procesora sygnałowego*, Maszyny elektryczne, Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, KOMEL, Zeszyty problemowe, Nr 69, 2004, str. 7-12
- [3]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: *Wyznaczanie charakterystyk statycznych maszyn reluktancyjnych przełączalnych*, Maszyny elektryczne, Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych, KOMEL, Zeszyty problemowe, Nr 69, 2005, str. 7-12.
- [4]. Flux 10.3 *Documentation*, 2009, Cedrat Group.
- [5]. Krishnan R.: *Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2001.
- [6]. Wu W. Dunlop J. B., Collocoott S. J. Kalan B.: *Desing optimization of a switched reluctance motor by electromagnetic and thermal finite-element analysis*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 5, September 2003, pp.3334- 3336

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-595 Rzeszów, pbogu@prz.edu.pl

dr inż. Mariusz Korkosz, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-595 Rzeszów, mkosz@prz.edu.pl

dr inż. Jan Prokop, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-595 Rzeszów, jprokop@prz.edu.pl

dr inż. Krzysztof Tomczewski, Politechnika Opolska, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole, k.tomczewski@po.opole.pl

dr inż. Krzysztof Wróbel, Politechnika Opolska, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole, k.wrobel@po.opole.pl