

*silnik reluktancyjny przełączalny,  
SRM, pojazd elektryczny*

Piotr BOGUSZ\*, Mariusz KORKOSZ\*,  
Jan PROKOP\*

## **SILNIK RELUKTANCYJNY PRZEŁĄCZALNY PRZEZNACZONY DO NAPĘDU MAŁEGO MOBILNEGO POJAZDU ELEKTRYCZNEGO**

W artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych opracowanej przez autorów konstrukcji czteropasmowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej o konfiguracji 8/6, której wymiary wyznaczono na podstawie wielowariantowych obliczeń polowych. W ramach badań wyznaczono charakterystyki statyczne maszyny oraz przebiegi czasowe prądów i momentu elektromagnetycznego. Wyznaczono również zakres pracy ze stałą mocą silnika oraz możliwą do uzyskania wartość przeciążalności.

### 1. WSTĘP

W ostatnich latach prowadzone są intensywne badania nad napędami elektrycznymi przeznaczonymi dla pojazdów elektrycznych. Badania te mają wykazać, które napędy i w jakich pojazdach mogą zostać zastosowane [1]–[3]. W przypadku napędów pojazdów samochodowych hybrydowych istnieje konieczność zastosowania napędu o jak najmniejszych gabarytach oraz jak najlepszych osiągnięciach [1]. Do tego typu pojazdów zwykle są stosowane maszyny z magnesami trwałymi, których cena jest bardzo wysoka. W przypadku pojazdów elektrycznych, w których ilość miejsca potrzebnego do zamontowania silnika elektrycznego nie jest wymaganiem krytycznym możliwe jest zastosowanie maszyn bez magnesów trwałych, np. indukcyjnych lub reluktancyjnych przełączalnych. Tego typu napędy zwykle są tańsze i charakteryzują się nieco mniejszą sprawnością. Należy jednak brać pod uwagę nie tylko sprawność wypadkową napędu, ale również koszt jego wykonania oraz niezawodność pracy. Jednymi z najbardziej niezawodnych maszyn elektrycznych są silniki reluktancyjne przełączalne nie posiadające żadnego uzwojenia ani magnesów trwałych na wirniku [4].

---

\* Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, mkosz@prz.edu.pl

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań symulacyjnych zaprojektowanej przez autorów czteropasmowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej o konfiguracji 8/6 przeznaczonej do napędu małego mobilnego pojazdu elektrycznego.

## 2. WYMAGANIA UKŁADU NAPĘDOWEGO

Układ napędowy dla którego zaprojektowano maszynę SRM posiadał następujące wymagania ogólne:

- moc na wale silnika przy prędkości 4500 obr/min nie mniejsza niż 3,3 kW,
- napięcie zasilające silnik 48 V,
- maksymalna wartość średnia prądu pobieranego ze źródła nie większa niż 130 A,
- minimalny moment rozruchowy nie mniejszy niż 19 Nm bez przekraczania dopuszczalnej wartości prądu źródła,
- sprawność wypadkowa w znamionowych warunkach pracy ( $P_N = 3,3$  kW,  $n_N = 4500$  obr/min) nie mniejsza niż 85%.

Ponadto projektowana maszyna musiała spełniać następujące wymagania gabarytowe:

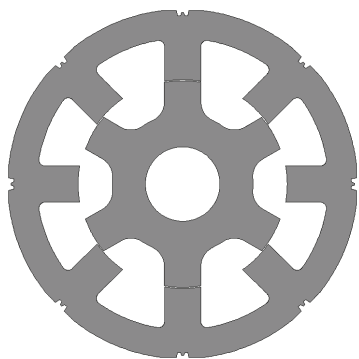
- maksymalna średnica rdzenia stojana nie większa niż 169 mm,
- maksymalna długość rdzenia stojana nie większa niż 125 mm,
- średnica wałka równa 38 mm.

## 3. PROJEKTOWANA MASZYNA RELUKTANCYJNA PRZEŁĄCZALNA 8/6

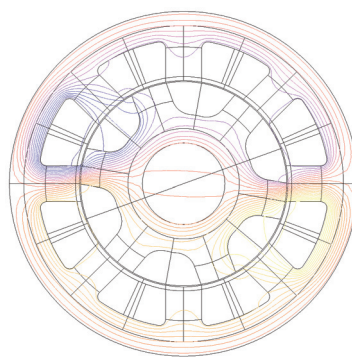
Uwzględniając wymagania co do punktu pracy silnika oraz ograniczeń co do wymiarów, na podstawie wielokrotnych obliczeń połowych, dobrano następujące wymiary geometryczne maszyny:

- szczelina powietrzna  $g = 0.5$  mm,
- kąt bieguna stojana  $\beta_s = 20^\circ$ ,
- kąt bieguna wirnika  $\beta_r = 20.5^\circ$ ,
- grubość jarzma stojana  $h_{ys} = 14$  mm,
- grubość jarzma wirnika  $h_{yr} = 16$  mm.

Geometrię stojana i wirnika zaprojektowanego silnika reluktancyjnego przełączalnego 8/6 przedstawiono na rysunku 1. Natomiast na rysunku 2 przedstawiono rozkład strumienia magnetycznego w obwodzie magnetycznym maszyny przy zasileniu uzwojenia jednego pasma.



Rys. 1. Przekrój silnika SRM 8/6  
Fig. 1. SRM 8/6 cross section

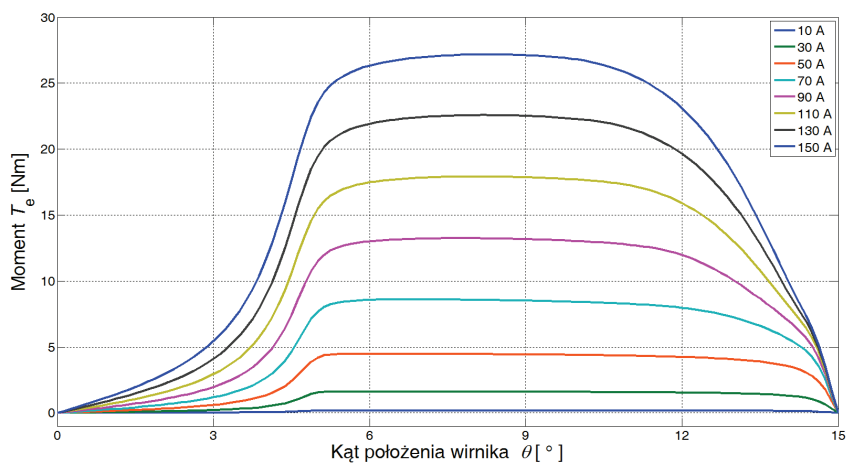


Rys. 2. Rozkład strumienia  
Fig. 2. Flux linkage distribution

## 4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH PROJEKTOWANEGO SILNIKA SRM

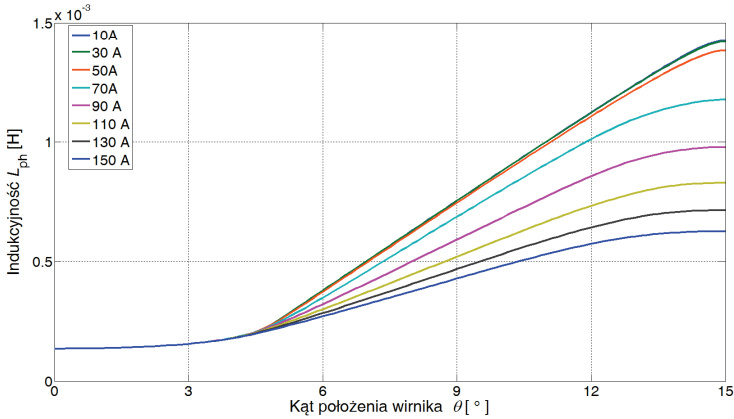
### 4.1. CHARAKTERYSTYKI STATYCZNE

Na bazie modelu polowego wyznaczono charakterystyki statyczne zaprojektowanego silnika SRM 8/6. Na rysunku 3 przedstawiono zależności momentu elektromagnetycznego pasma  $T_e$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  dla ośmiu różnych wartości prądów zasilających dane pasmo.



Rys. 3. Moment elektromagnetyczny  $T_e$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  silnika SRM 8/6  
Fig. 3. Electromagnetic torque vs. rotor position for SRM 8/6

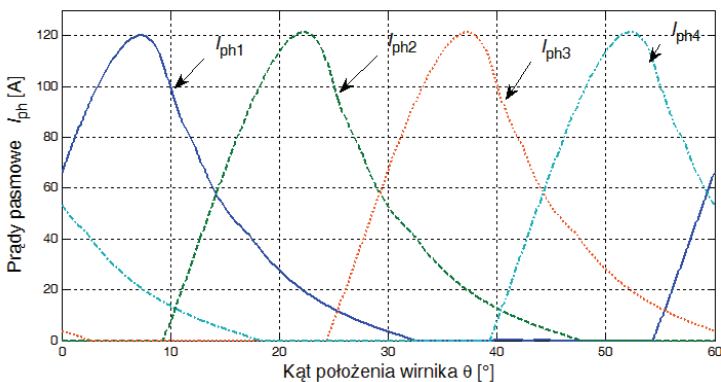
Zależności indukcyjności własnej pasma  $L_{ph}$  w funkcji kąta położenia wirnika dla różnych wartości prądu projektowanego silnika przedstawiono na rysunku 4.



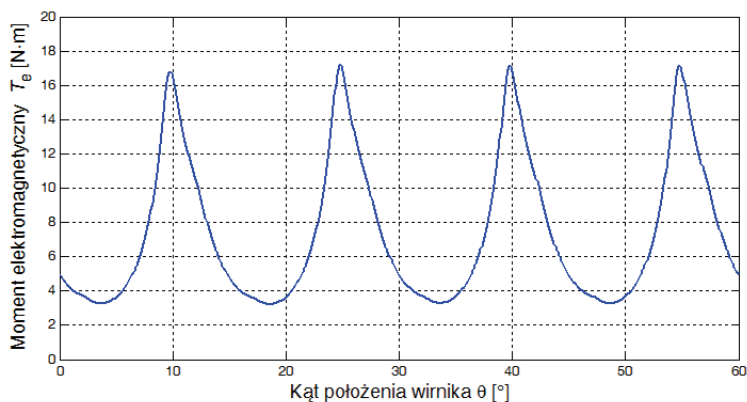
Rys. 4. Indukcyjność własna pasma  $L_{ph}$  w funkcji kąta położenia wirnika  $\theta$  silnika SRM 8/6  
Fig. 4. Self-inductance vs. rotor position for SRM 8/6

#### 4.2. PRZEBIEGI PRĄDÓW I MOMENTU

Na podstawie modelu polowo-obwodowego wyznaczono zależności przebiegów prądów pasmowych oraz momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta położenia wirnika. Na rysunku 5 przedstawiono zależność prądów pasmowych silnika w funkcji kąta położenia wirnika dla prędkości  $n = 4500$  obr/min. Przebieg momentu elektromagnetycznego w tym punkcie pracy przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Zależności prądów pasmowych w funkcji kąta położenia wirnika dla znamionowych warunków pracy silnika  
Fig. 5. Phase currents vs. rotor position for rated working conditions of motor

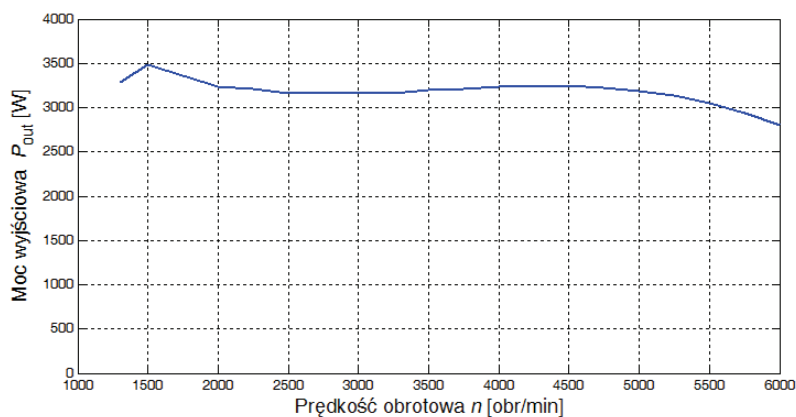


Rys. 6. Moment elektromagnetyczny w funkcji kąta położenia wirnika dla znamionowych warunków pracy silnika

Fig. 6. Electromagnetic torque vs. rotor position for rated working conditions of motor

#### 4.3. WYZNACZENIE ZAKRESU STAŁEJ MOCY

Na podstawie opracowanego przez autorów oryginalnego algorytmu sterowania bazującego na odpowiedniej zmianie kątów sterujących, wyznaczono możliwy do uzyskania zakres pracy silnika ze stałą mocą. Algorytm ten ma na celu utrzymanie mocy wyjściowej silnika na określonym poziomie przy jednoczesnym nie przekraczaniu dopuszczalnej wartości średniej prądu źródła  $I_{dcmax}$ . Na rysunku 7 przedstawiono zależność mocy wyjściowej  $P_{out}$  zaprojektowanego silnika uzyskaną po zastosowaniu opracowanego algorytmu sterowania pracą silnika w zakresie stałej mocy.



Rys. 7. Zależność mocy wyjściowej w funkcji prędkości obrotowej w zakresie pracy ze stałą mocą

Fig. 7. Output power vs. speed in constant power operating range

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych zaprojektowanego silnika można stwierdzić, że spełnia on postawione wymagania projektowe, gdyż:

- minimalną wartość momentu rozruchowego można uzyskać przy amplitudzie prądu nie przekraczającej 130 A,
- sprawność wypadkowa układu napędowego wynosi 86% przy prędkości znamionowej,
- silnik jest w stanie pracować ze stałą mocą (3.3 kW) w zakresie prędkości od 1300 obr/min do prędkości znamionowej tj. 4500 obr/min.

Możliwe jest również chwilowe dwukrotne przeciążenie silnika.

*Praca wykonana w ramach projektu badawczego NN511 308438.*

*Badania przeprowadzono z zastosowaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 „Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007–2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.*

## LITERATURA

- [1] XUE X.D., CHENG K., CHEUNG N.C., *Selection of electric motor drives for electric vehicles*, Power Engineering Conference, AUPEC '08. Australasian Universities, 2008, 1–6.
- [2] HODKINSON R., FENTON J., *Lightweight Electric/ Hybrid Vehicle Design*, Reed Educational and Professional Publishing Ltd 2001.
- [3] HUSAIN I., *Electric and hybrid vehicles Design Fundamentals*, CRC PRESS LLC 2003.
- [4] KRISHNAN R., *Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications*, CRC Press LLC, 2001.

### SWITCHED RELUCTANCE MOTOR 8/6 USED FOR SMALL ELECTRIC VEHICLE DRIVE

The simulation research results of four-phase 8/6 switched reluctance machine which its dimensions were received by multi-variant field calculations have been presented in the paper. Static characteristics of designed motor and time waveforms of current and electromagnetic torque have been determined. Operating range with constant power of motor and possible to obtain value of overload capacity have been also determined.