

Rafał GABOR\*  
Piotr MYNAREK\*  
Marcin KOWOL\*

## **ANALIZA PRACY SILNIKA SRM Z WIRNIKIEM ZEWNĘTRZNYM PRZEZNACZONYM DO NAPĘDU ROWERU ELEKTRYCZNEGO**

W artykule przedstawiono założenia konstrukcyjne napędu elektrycznego do roweru. W pracy zaprezentowano wyniki obliczeń parametrów elektromagnetycznych kilku konstrukcji przełączalnego silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym (SRM). Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem dwuwymiarowych modeli numerycznych, rozwiązywanych przy pomocy metody elementów skończonych. Wyznaczono charakterystyki statyczne momentu elektromagnetycznego, indukcyjności własnej pasma w funkcji kąta położenia wirnika względem stojana.

**SŁOWA KLUCZOWE:** napęd elektryczny roweru, przełączalny silnik reluktancyjny, metoda elementów skończonych

### **1. WSTĘP**

W ciągu ostatnich lat można zaobserwować wzrost zainteresowania niewielkimi pojazdami elektrycznymi, a w szczególności rowerami elektrycznymi [5]. Zainteresowanie to wynika przede wszystkim, z poszukiwania alternatywnego środka transportu dla samochodów osobowych w aglomeracjach miejskich. Wzmożony ruch samochodowy w centrum miast powoduje coraz większe utrudnienia w komunikacji. Poza tym, coraz częściej wprowadzane są strefy ograniczenia w ruchu samochodowym, mające na celu zmniejszenie emisji spalin i walki ze smogiem [3]. Wykorzystanie roweru elektrycznego do transportu jest bardzo atrakcyjne, ze względu na jego liczne zalety. Rower elektryczny pozwala przede wszystkim na zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska przy jednoczesnym utrzymaniu niezależności i dużej mobilności osób na nim jeżdżących. Zastosowanie w rowerze elektrycznego napędu niesie za sobą dodatkowe zalety: większa dynamika przemieszczania się niż tradycyjnym rowerem, cicha praca w przeciwieństwie do silników spalinowych, wysoka sprawność napędu oraz niezależność od paliw kopalnianych [1, 7, 9].

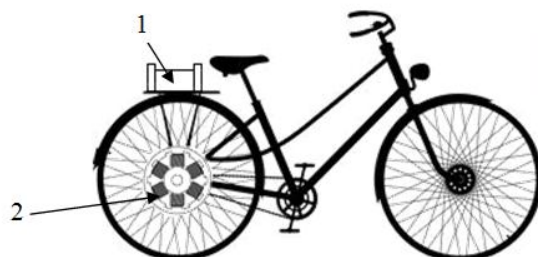
---

\* Politechnika Opolska.

W rozwiązaniach technicznych pojazdów elektrycznych występujących na rynku, do napędu wykorzystywane są głównie silniki prądu stałego (DC) oraz silniki bezszczotkowe BLDC [5]. Jednak silniki prądu stałego ze względu na mniejszą sprawność oraz występujące szczotki nie spełniają w pełni wymogów, jakie stawiane są napędowi wykorzystywanym w lekkich pojazdach elektrycznych. Silniki BLDC charakteryzują się w przeciwieństwie do silników DC dobrymi warunkami eksploatacyjnymi. Jednak poprzez konieczność stosowania dodatkowego układu sterowania oraz magnesów neodymowych, koszt tych silników jest znacznie większy niż silników DC [2, 9]. Alternatywą dla tych dwóch typów silników są przełączalne silniki reluktancyjne (SRM). Silniki SRM charakteryzują się wysoką gęstością momentu obrotowego przy niskich prędkościach, prostotą konstrukcji, a ze względu na brak zastosowania magnesów trwałych niskimi kosztami produkcji [1, 4]. W niniejszym artykule podjęto próbę zaprojektowania silnika SRM do napędu roweru elektrycznego.

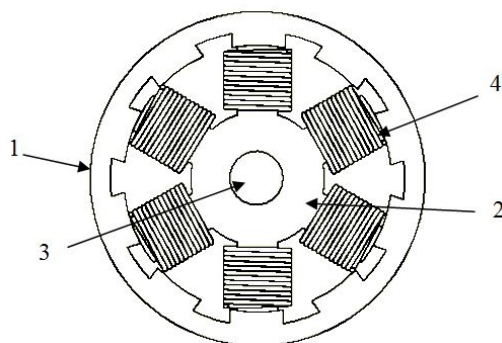
## **2. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE ROWERU ELEKTRYCZNEGO**

Na podstawie literatury [1, 3, 5] oraz przeglądu istniejących rozwiązań technicznych na rynku, w pracy skupiono się na rowerze, którego koła posiadają 28 calowe obręcze. Docelowym miejscem montażu silnika jest piasta koła tylnego, z którego wytwarzany przez silnik moment będzie przekazywany bezpośrednio na koło napędzające rower. Z racji miejsca mocowania silnika, jego średnica i szerokość są ograniczone. Prezentowane w artykule rozwiązanie posiada średnicę wirnika zewnętrznego 250 mm, co jest konstrukcją większą niż prezentowane rozwiązania dostępne na rynku [5]. Napęd zasilany jest akumulatorem litowo-jonowym o napięciu 48 V oraz pojemności 16 Ah i umieszczonym na tylnym bagażniku (rys. 1). Uwzględniając fakt, że rower elektryczny według przepisów nie może, przy pracującym napędzie elektrycznym, przekroczyć prędkości 25 km/h, maksymalna prędkość silnika elektrycznego, przy 28 calowych kołach roweru, nie będzie większa niż 200 obr/min. Rower posiada pedały i silnik elektryczny co czyni go pojazdem hybrydowym i daje możliwość napędu szeregowego i równoległego. Takie rozwiązanie techniczne sprawia, że rower ma szersze zastosowanie i alternatywę pracy napędów. W prezentowanej konstrukcji pojazdu elektrycznego napędzane jest tylnie koło, ponieważ obciążając rower masą użytkownika tylne koło znajduje się bliżej środka ciężkości co przenosi się na jego dociążenie i lepszą przyczepność do jezdni. Pozwala to na większą sprawność przenoszenia momentu generowanego przez silnik na obrót koła [14].



Rys. 1. Silnik SRM z wirnikiem zewnętrznym umieszczony wewnątrz koła napędzającego rower oraz miejsce zamontowania baterii zasilającej (1-bateria zasilająca, 2-silnik SRM)

Jako napęd roweru przewiduje się silnik SRM z wirnikiem zewnętrznym. Z powodu wymaganej małej prędkości obrotowej, konstrukcja silnika może charakteryzować się dużą liczbą par biegunów w stojanie oraz wirniku. Większa liczba biegunów zwiększa niezawodność, gęstość mocy maszyny oraz ogranicza tętnienia momentu wytwarzanego przez silnik [8, 11, 13]. Jednak należy też pamiętać, że wzrost liczby par biegunów generuje konieczność stosowania dodatkowych elementów energoelektronicznych powodujących zmniejszenie sprawności całego układu [4]. Na rysunku 2 przedstawiono przykładową konstrukcję silnika SRM 6/10.



Rys. 2. Konstrukcja silnika SMR z wirnikiem zewnętrznym (1-wirnik, 2-stojan, 3-wał, 4-uzwojenia)

### 3. ANALIZA ELEKTROMAGNETYCZNA

W pracy poddano dwuwymiarowej analizie elektromagnetycznej kilka konstrukcji silników SRM, różniących się między sobą liczbą biegunów oraz ich rozpiętością kątową. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wybranych parametrów badanych prototypów silników.

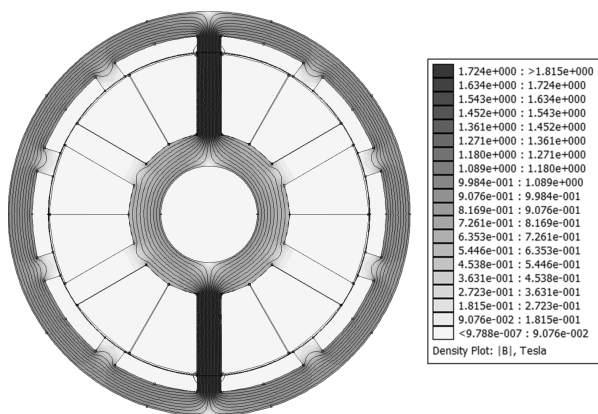
Tabela. 1. Parametry konstrukcyjne badanych silników

Model	Silnik SRM 6/10		Silnik SRM 8/10	
	A	B	C	D
Liczba biegunów w stojanie	6	6	8	8
Liczba biegunów w wirniku	10	10	10	10
Rozpiętość kątowa nabiegunnika stojana	9°	11,5°	9°	11,5°
Rozpiętość kątowa nabiegunnika wirnika	9°	9°	9°	9°
Wsp. wypełnienia uzwojenia	0,7	0,7	0,7	0,7
Ilość zwoi	96	96	66	66

W modelach polowych przyjęto następujące założenia upraszczające:

- przyjęto nieliniowe, jednowartościowe charakterystyki magnesowania,
- założono zerową konduktywność blachy elektrotechnicznej,
- przyjęto stałą gęstość prądu w całym przekroju cewek.

Na podstawie opracowanych modeli polowych silników przeprowadzono szereg symulacji komputerowych. Poniżej na rysunku 3 przedstawiono przykładowy rozkład pola otrzymany dla modelu A zasilanego prądem  $I = 35$  A i kąta położenia  $\alpha = 0^\circ$ . W pierwszej etapie badań wyznaczono rozkład indukcji magnetycznej i linie pola w analizowanych maszynach.

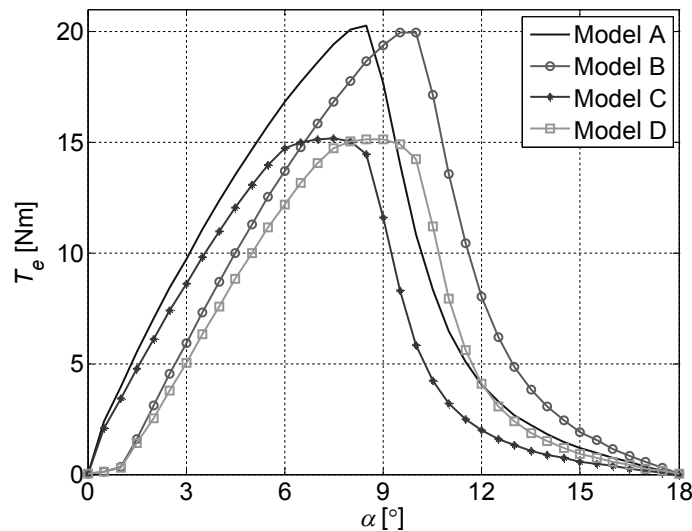


Rys. 3. Linie pola oraz rozkład indukcji pola magnetycznego przy prądzie  $I = 35$  A zasilania cewek oraz kącie położenia wirnika względem stojana  $\alpha = 0^\circ$ , dla modelu A

W kolejnym etapie badań wyznaczono charakterystyki momentu elektromagnetycznego ( $T_e$ ) w zależności od kąta położenia wirnika, przy stałej wartości prądu w danym paśmie (rys. 4). Moment elektromagnetyczny został obliczony na podstawie tensora naprężeń Maxwella:

$$T_e = \frac{L_r}{\mu_0} \int_{\Gamma} B_x B_y d\Gamma \quad (1)$$

gdzie:  $T_e$  – moment elektromagnetyczny,  $B_x$ ,  $B_y$  – składowa wektora indukcji magnetycznej,  $r$  – promień krzywej całkowania,  $L_r$  – długość czynna maszyny,  $\Gamma$  – krzywa całkowania po konturze,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni.



Rys. 4. Zależność momentu elektromagnetycznego od kąta położenia wirnika, dla  $I = 35$  A

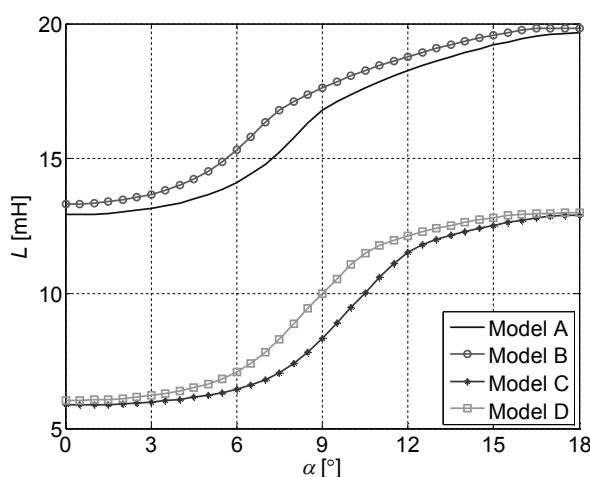
Na podstawie rysunku 4 można zaobserwować, że konstrukcja silnika 6/10 charakteryzuje się wyższym maksymalnym momentem elektromagnetycznym (20,3 N·m) niż konstrukcja 8/10 (15,1 N·m). Natomiast wartość średnia momentu w przedziale od 0° do 18° wynosi odpowiednio 8,1 N·m i 6,1 N·m. Dodatkowo, zmiana rozpiętości kątowej nabiegunków wprowadza jedynie przesunięcie kątowe dla maksymalnej wartości momentu. Jednak uwzględniając najprostsze sterowanie sekwencyjne pasmami typu A-B-C dla silnika 6/10 oraz A-B-C-D dla silnika 8/10 różnica w wartości średniej momentów w przedziale kątowym jego załączenia już zmniejsza się między tymi dwoma konstrukcjami. Wartości średnie momentów wynoszą odpowiednio 11,5 N·m i 10,9 N·m. Dodatkowo konstrukcja 8/10 będzie się charakteryzować mniejszymi pulsacjami momentu, ale też większymi stratami w układzie sterowania.

Wyznaczając zależności indukcyjności własnej pasma od kąta położenia wirnika przy stałej wartości prądu w danym paśmie posłużono się zależnością:

$$L_s = \frac{\int_V \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} dV}{I^2} \quad (2)$$

gdzie:  $\mathbf{A}$  – wektorowy potencjał magnetyczny,  $\mathbf{J}$  – gęstość prądu,  $V$  – objętość cewki,  $L_s$  – indukcyjność własna,  $I$  – prąd zasilania pasma

Na rysunku 5 przedstawiono zależność indukcyjności własnej pasma od kąta położenia wirnika, przy stałej wartości prądu  $I = 35$  A dla modelu A.



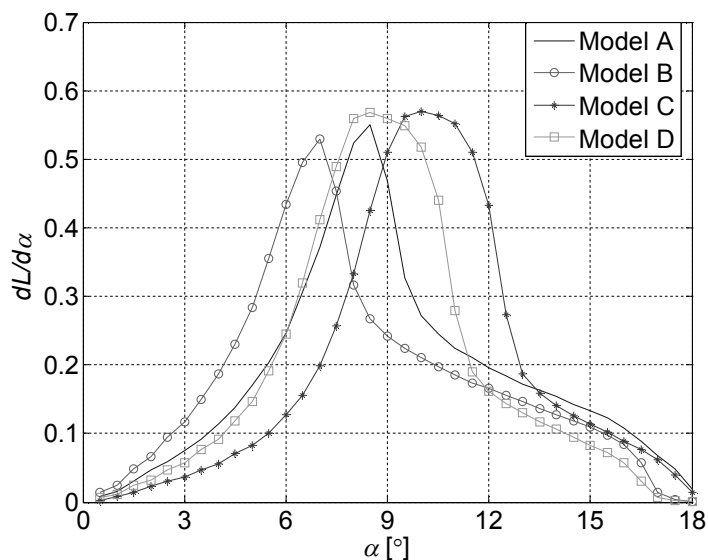
Rys. 5. Zależność indukcyjności własnej pasma od kąta położenia wirnika dla  $I = 35$  A

Analizując zależność indukcyjności własnej pasma od kąta położenia wirnika można zauważyć, że w każdej z analizowanych konstrukcji silnika otrzymuje się podobną amplitudę. Dlatego też pochodna indukcyjności po kącie położenia wirnika jest na podobnym poziomie (rys. 6).

W analizowanych modelach silnika wyznaczono także indukcyjności wzajemne pasm zgodnie z zależnością (3) [6]. Jednak wpływ tej wielkości na indukcyjność pasma jest minimalna, ponieważ otrzymane wielkości nie przekraczały 5% indukcyjności własnej.

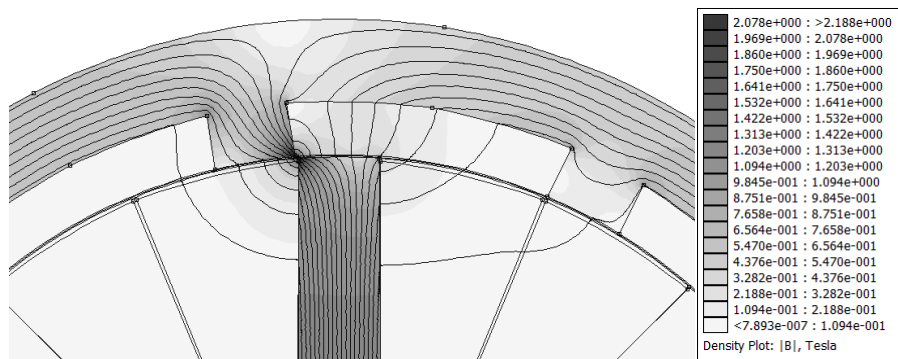
$$L_{m A-B} = \frac{z_2}{I_1 a_2} \left( \int_{J_{2+}} \mathbf{A} dV_2 - \int_{J_{2-}} \mathbf{A} dV_2 \right) \quad (3)$$

gdzie:  $\mathbf{A}$  – wektorowy potencjał magnetyczny,  $V_2$  – objętość uzwojenia pasma niezasilonego,  $L_m$  – indukcyjność wzajemna pasma,  $I_1$  – prąd zasilania pasma,  $z_2$  – liczba zwojów niezasilanego pasma,  $a_2$  – pole powierzchni niezasilanej cewki.



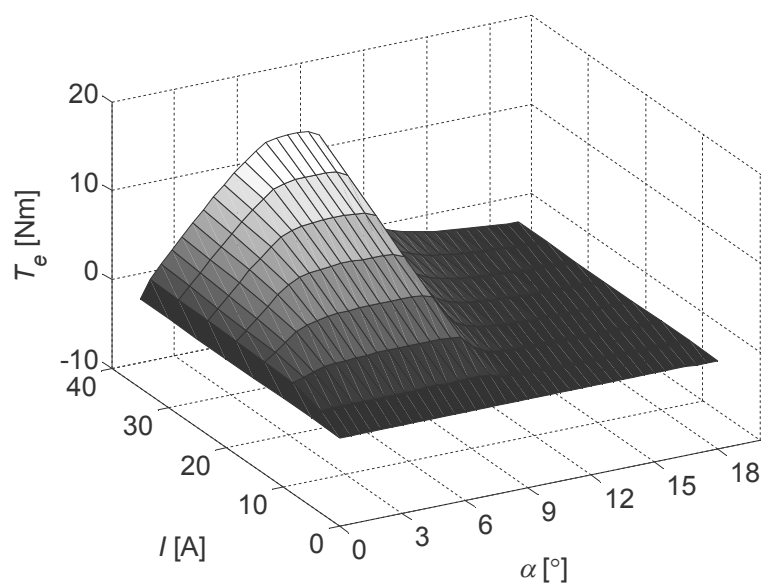
Rys. 6. Pochodne indukcyjności w funkcji kąta obrotu wirnika dla analizowanych modeli silnika SRM

Poniższy rysunek 7 przedstawia rozkład indukcji przy położeniu granicznym pomiędzy nabiegownikami stojana i wirnika

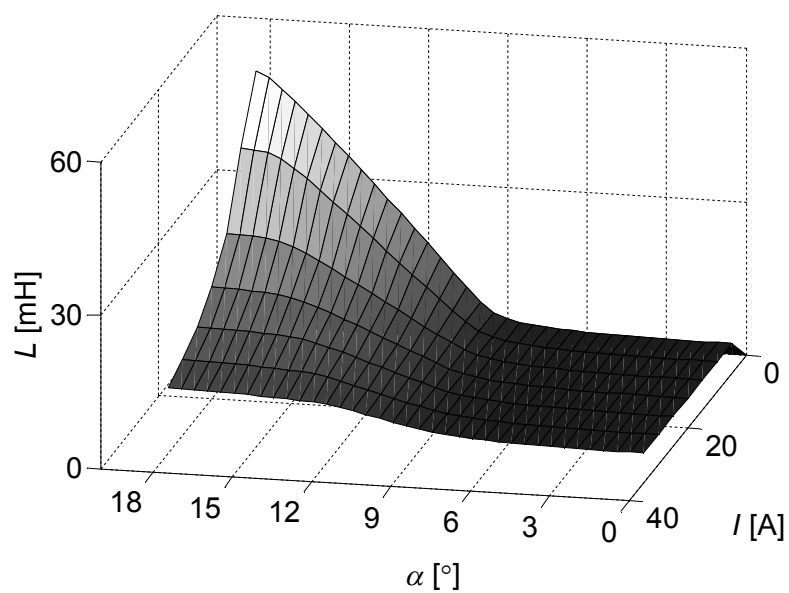


Rys. 7. Rozkład indukcji przy styku wierzchołków nabiegownika stojana i wirnika dla  $I = 35 \text{ A}$  – model C

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono odpowiednio zmienność momentu elektromagnetycznego oraz indukcyjności własnej wybranego pasma silnika w funkcji kąta położenia wirnika i prądu (model C).



Rys. 8. Zmienność momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta i prądu dla modelu C



Rys. 9. Zmienność indukcyjności pasma w funkcji kąta i prądu dla modelu C



#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wstępną analizę kilku konstrukcji przełączalnego silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym, przeznaczonego do napędu roweru. Wyznaczono moment elektromagnetyczny, indukcyjności własne oraz wzajemne w funkcji zmiany kąta położenia wirnika oraz prądu płynącego w danym paśmie w badanych konstrukcjach silników. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że optymalną konstrukcją pod względem wartości momentu elektromagnetycznego oraz jego tętnień wydaje się konstrukcja 8/10. W dalszym etapie prac autorzy zamierzają przeprowadzić optymalizację wybranej konstrukcji silnika pod kątem otrzymania maksymalnych parametrów całkowitych, a następnie przeprowadzić analizę dynamiczną maszyny i dobrać odpowiedni układ sterowania badanego silnika reluktancyjnego.

#### LITERATURA

- [1] Chan C. C., Chau K. T., *Modern Electric Vehicle Technology*, Oxford University Press, 2001.
- [2] Chen H., Gu J. J., *Switched Reluctance Motor Drive with External Rotor for Fan in Air Conditioner*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Volume 18, Number 5, October 2013.
- [3] Çınar M.A., Kuyumcu F. E., *Design and Drives Simulation of an In-Wheel Switched Reluctance Motor for Electric Vehicle Applications*, Engineering Faculty Kocaeli University Izmit, Kocaeli 41100 TURKEY, 2007.
- [4] Lin J., Cheng K. W.E., Zhang Z. Xue X., *Experimental investigation of in-wheel switched reluctance motor driving system for future electric vehicles*, Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, 2009.
- [5] Lin J., Schofield N., Emadi A., *External-Rotor 6-10 Switched Reluctance Motor for an Electric Bicycle*. McMaster Institute for Automotive Research and Technology McMaster University, Hamilton, ON, L8P 0A6, Canada, 2015.
- [6] Meeker D., *Finite Element Method Magnetics*, Version 4.2, s.41, August 25, 2013.
- [7] Mehrdad Ehsani, et al., *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design*, CRC Press, 2005.
- [8] Miller T.J.E., *Optimal Design of Switched Reluctance Motors*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 49, Number 1, February 2002.
- [9] Peng F., Lin J., Ye J., Emadi A., *Optimal Calculation Method for Control of Switched Reluctance Motor*. McMaster Institute for Automotive Research and Technology (MacAUTO) McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, 2015.
- [10] Shoujun S., Zekun X., Shuo C., Runyn S., Qingyu W., *Computer Aided Design, Analysis, Optimization and Manufacturing of Switched Reluctance Machine*,

- 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, Oct. 26-29, Busan, Korea, 2013.
- [11] Tomczewski K., Wach P., Wróbel K., Badania modelowe i eksperymentalne oscylacyjnego, przełączalnego silnika reluktancyjnego SRM, Przegląd Elektrotechniczny, 10'2005, s. 41-45, 2005
- [12] Vazquez J.R., Salmerón P.R., Three-phase Active Power Filter Control Using Neural Networks. 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELeCon 2000, Volume III, 2000.
- [13] Wróbel K., Tomczewski K., Wpływ doboru funkcji celu na parametry optymalizowanego przełączalnego silnika reluktancyjnego. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 4/2014 (104), s. 243-246, 2014.
- [14] <http://www.gnomon.pl/artukul,Drive.html>

#### **ANALYSIS OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (SRM) WITH EXTERNAL-ROTOR DESIGNED FOR THE ELECTRIC BIKE**

The paper presents the preliminary design of the electric drive for a bicycle. The designed drive bases on utilizing the 3-phase switched reluctance motor (SRM) with an external-rotor. The authors analyse two motor configurations - the first one of 10/6 rotor/stator poles and the second one of 10/8 poles. This paper contains also the integral parameters calculation results. Electromagnetic field analysis for the considered motor is carried out using 2D FEM (Matlab/Femm). The electromagnetic torque, self and mutual inductance characteristics as a function of the rotor angle position for the each phase are also shown in the paper.

*(Received: 12. 02. 2016, revised: 3. 03. 2016)*