

Rafał GABOR\*, Marcin KOWOL\*

## PRZEŁĄCZALNY SILNIK RELUKTANCYJNY O ZMIENIONEJ GEOMETRII STOJANA

W pracy przedstawiono propozycję zastosowania silnika SRM o zmodyfikowanej geometrii stojana do napędu pojazdów elektrycznych, a w szczególności do roweru elektrycznego. W artykule zostały zaprezentowane wyniki obliczeń pola elektromagnetycznego dwóch konstrukcji silnika reluktancyjnego. Wstępną analizę badanych konstrukcji przeprowadzono za pomocą dwuwymiarowych modeli numerycznych (2D), wykorzystując metodę elementów skończonych (MES).

SŁOWA KLUCZOWE: przełączalny silnik reluktancyjny, napęd elektryczny, pojazd elektryczny, metoda elementów skończonych.

### 1. WSTĘP

Badania dotyczące napędów stosowanych w pojazdach elektrycznych, będących alternatywą dla silników spalinowych, są wciąż prowadzone. Realizacja takich badań ma na celu rozwiązanie problemów związanych z ochroną środowiska tj. eksploatacja paliw kopalnianych, globalne ocieplenie i zanieczyszczenie powietrza [1]. Pojazdy posiadające napęd elektryczny mogą być zasilane energią, pochodzącą z odnawialnych źródeł energii lub wykorzystywać energię kinetyczną, odzyskaną podczas hamowania. Zastosowanie silnika elektrycznego eliminuje emisję spalin oraz zmniejsza hałas akustyczny [2, 3, 4]. Pomimo wielu zalet, pojazdy elektryczne posiadają krótki zasięg pomiędzy ładowniami [5]. Rozwiązaniem tego problemu może być m.in. udział państw w tworzeniu nowoczesnej infrastruktury stacji do ładowania energią elektryczną. Według danych Obserwatorium Rynku Paliw Alternatywnych w Polsce obecnie znajduje się ok. 150 stacji ładowania energią elektryczną [6].

W zależności od wielkości pojazdu elektrycznego istnieje konieczność dopasowania jednostki napędowej do konstrukcji. W samochodach elektrycznych lub hybrydowych dąży się do stosowania napędu, o jak największej gęstości momentu [7]. Na obecną chwilę najbardziej rozpowszechnionymi konstrukcjami są silniki z magnesami trwałymi, które charakteryzują się dobrymi warunkami eksploatacyjnymi, lecz wymagają dużych nakładów finansowych ze względu na wysoką cenę pierwiastków ziem rzadkich [4,7,8]. Innymi maszynami wykorzy-

---

\* Politechnika Opolska

stywanymi do napędu pojazdów są silniki indukcyjne, tradycyjne silniki synchroniczne oraz silniki reluktancyjne.

Tradycyjne silniki SRM charakteryzują się wysoką gęstością momentu obrotowego, szerokim zakresem regulacji prędkości, charakterystyką pracy podobną do silnika szeregowego oraz prostą konstrukcją [9, 10]. Tego typu silniki można stosować w konstrukcjach, w których miejsce montażowe nie jest warunkiem krytycznym. Zdecydowanie najczęściej silnik SRM w pojazdach elektrycznych montowany jest bezpośrednio w kołach napędzających [1, 8].

W artykule zaproponowano wykorzystanie zmodyfikowanej budowy silnika SRM do wspomagania napędu w rowerze. Budowa przełączalnego silnika reluktancyjnego o zmienionym kształcie konstrukcji stojana skutkuje zmniejszeniem jego objętości i masy.

## 2. KONSTRUKCJA SILNIKA SRM

Struktura SRM została zilustrowana na rysunku 1 i w odróżnieniu od podstawowych silników tego typu dokonano modyfikacji w obwodzie magnetycznym stojana.

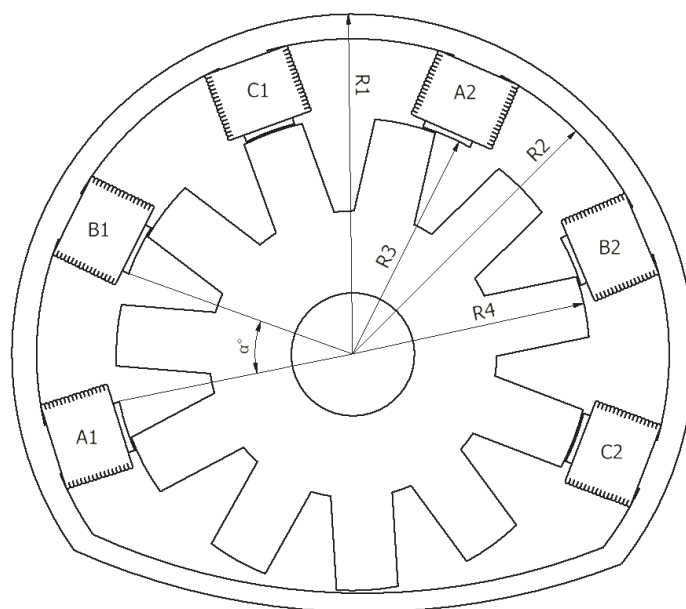
W niniejszej pracy, przedstawiono silnik SRM, w którym dokonano zmiany geometrii stojana poprzez zredukowanie ilości biegunów zasilających oraz zmniejszenie promienia stojana w miejscu modyfikacji.

Zachowując wymiary przestrzeni montażowej silnika w pojeździe możliwe jest zwiększenie promienia wirnika, a tym samym zwiększenie wartości osiąganego momentu obrotowego. Modyfikacja przełączalnego silnika reluktancyjnego umożliwia również zastosowanie w pojazdach i urządzeniach o ograniczonej przestrzeni montażowej, w tym osadzenie go w najniższym punkcie konstrukcyjnym pojazdów lekkich, zwłaszcza rowerów. Wykonanie zwory z materiału ferromagnetycznego, nie tylko zabezpiecza przed zanieczyszczeniami, ale i ma korzystny wpływ na pracę silnika.

Dzięki charakterystycznej geometrii stojana, zaproponowano umieszczenie silnika w suporcie roweru. Założenia konstrukcyjne nie wykluczają zastosowania przełożenia pomiędzy wałem silnika, a wałem napędzającym łańcuch pojazdu.

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wybranych parametrów badanego silnika.

W prezentowanym rozwiązaniu przełączalny silnik reluktancyjny posiada stojan z niezależnie uzwojonymi biegunami, którego pasma połączone są z energoelektronicznym układem zasilania. Część stojana jest zworą zamykającą obwód magnetyczny pomiędzy dwoma granicznymi biegunami stojana.



Rys. 1. Konstrukcja zmodyfikowanego stojana silnika SRM

Tabela 1. Wybrane parametry silnika SRM.

Promień zewnętrzny stojana, $R1$ [mm]	83
Liczba biegunów w stojanie	6
Promień wewnętrzny stojana, $R2$ [mm]	77
Promień od środka do powierzchni bieguna stojana, $R3$ [mm]	58
Rozpiętość kątowa biegunów stojana, $\alpha$ [°]	43.63
Promień wirnika, $R4$ [mm]	57.6
Liczba biegunów w wirniku	11
Szczelina powietrzna [mm]	0.4
Ilość zwojów	40
Długość czynna silnika [mm]	50
Masa [kg]	6.5

### 3. ANALIZA POLA MAGNETYCZNEGO

W pracy opracowano dwa modele numeryczne silników: pierwszy zgodnie z przedstawioną konstrukcją posiadający zwory (rys. 2.) i drugi bez zwory (rys. 3.). Celem porównania było sprawdzenie wpływu zwory na parametry całkowite konstrukcji.

W modelach polowych uwzględniono nieliniową charakterystykę magnesowania oraz przyjęto stałą gęstość prądu w całym przekroju cewek.

Dla dwóch konstrukcji stojana zostały wyznaczone charakterystyki momentu elektromagnetycznego ( $T_e$ ) w zależności od kąta położenia wirnika ( $\alpha$ ) przy stałej wartości prądu w danym paśmie. Moment elektromagnetyczny wyznaczono na podstawie tensora naprężeń Maxwella:

$$T_e = \frac{r}{\mu_0} \int_{\Gamma} B_r B_\theta d\Gamma \quad (1)$$

gdzie:  $T_e$  – moment elektromagnetyczny,  $B_r$ ,  $B_\theta$  – składowa styczna i normalna indukcji magnetycznej,  $r$  – promień krzywej całkowania,  $\Gamma$  – krzywa całkowania,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni.

Obliczona została gęstość momentu z zależności (2)

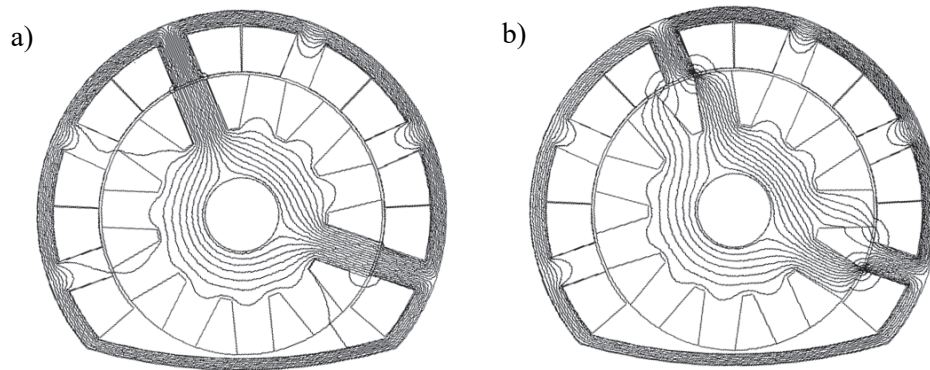
$$T_d = \frac{T_{av}}{V} \quad (2)$$

gdzie:  $T_d$  – gęstość momentu,  $T_{av}$  – wartość średnia momentu elektromagnetycznego,  $V$  – objętość silnika.

Współczynnik tętnień wyznaczono na podstawie zależności (3)[11, 12, 13].

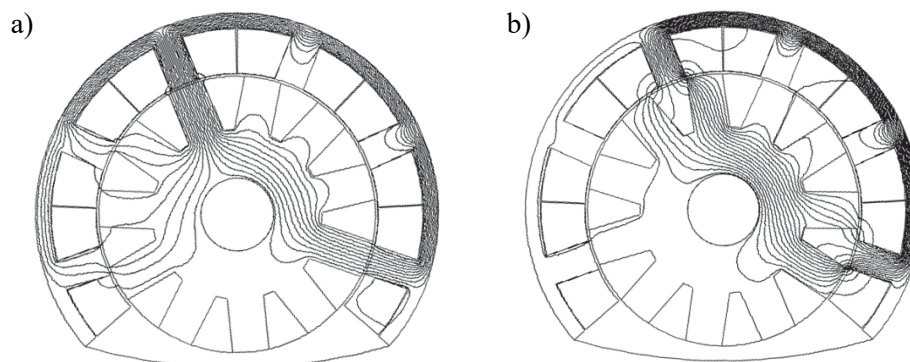
$$\varepsilon = \frac{T_{max} - T_{min}}{2T_{av}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:  $T_{max}$  – wartość maksymalna,  $T_{min}$  – wartość minimalna.



Rys. 2. Linie pola magnetycznego silnika nr 1 dla  $I=35A$ : a) przy kącie położenia wirnika względem stojana  $\alpha=0^\circ$ , b) przy kącie położenia wirnika względem stojana  $\alpha=14^\circ$

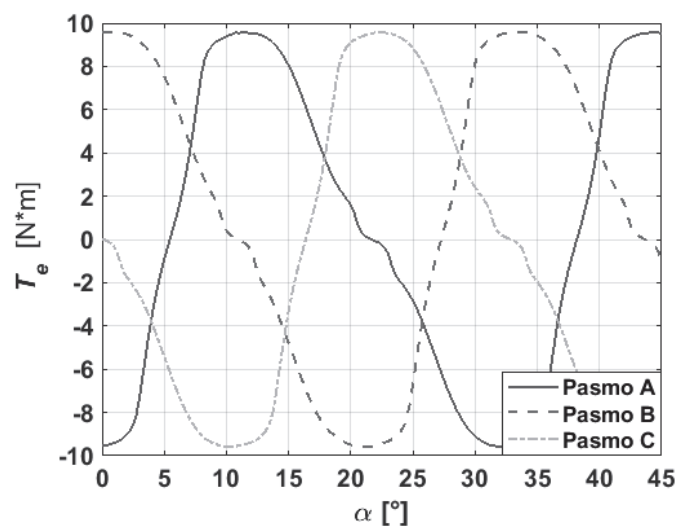
Zastosowanie zwory w stojanie działa jak niezwojony biegun, co umożliwia zamknięcie się przez nią pola magnetycznego.



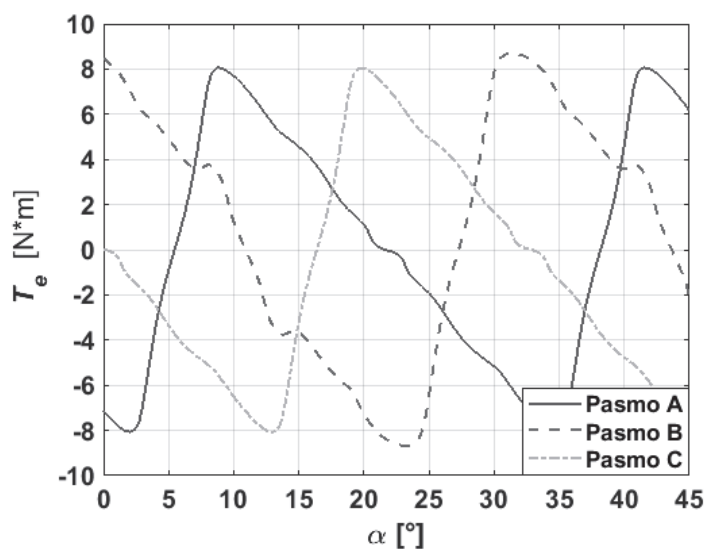
Rys. 3. Linie pola magnetycznego silnika nr 2 dla  $I=35A$ : a) przy kącie położenia wirnika względem stojana  $\alpha=0^\circ$ , b) przy kącie położenia wirnika względem stojana  $\alpha=14^\circ$

Przeprowadzenie wstępnych obliczeń pola elektromagnetycznego wykazało, że zwora pełni rolę niezwojonego bieguna (rys. 2.). Brak zwory przerywa magnetowód, czego efektem jest spadek uzyskanego momentu. Istotnym elementem konstrukcji stojana jest długość zwory, która nie powinna być większa niż średnica stojana.

Na rysunkach 4 i 5 przedstawione zostały charakterystyki momentu dla poszczególnych konstrukcji stojana silnika SRM. Przełączalny silnik reluktancyjny został zasilony trzema pasmami o maksymalnym prądzie 35 A.



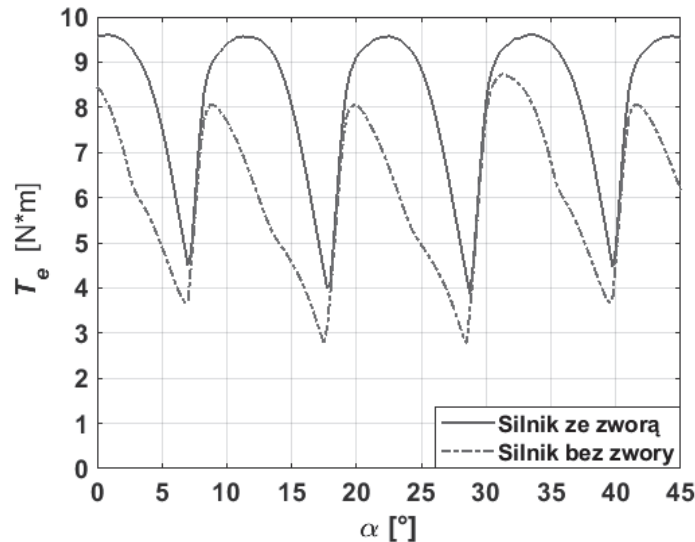
Rys. 4. Zależność momentu elektromagnetycznego od kąta położenia wirnika dla trzech pasm, przy stałej wartości prądu  $I=35 A$  w konstrukcji silnika ze zworą



Rys. 5. Zależność momentu elektromagnetycznego od kąta położenia wirnika dla trzech pasm, przy stałej wartości prądu  $I=35\text{A}$  w konstrukcji silnika bez zwory

Dokonując porównania powyższych wykresów zauważyć można, że charakterystyki uzyskanych momentów dla silnika ze zworą są symetryczne (rys. 4.) Wartość maksymalnego momentu wynosi  $T_{emax1}=9,6\text{ N}\cdot\text{m}$ . W przypadku silnika bez zwory (rys. 5.) pasmo B posiada wyższą wartość momentu oraz różni się kształtem w stosunku do pasma A i C. W tej konstrukcji widoczne jest zmniejszenie wartości uzyskanego momentu maksymalnego  $T_{emax2}=8,73\text{ N}\cdot\text{m}$ , względem silnika posiadającego zworę.

Uwzględniając najprostszy algorytm sterowania silnikiem, polegający na załączaniu się pasm w sekwencji A C B A, na rysunku 6 zilustrowano obliczoną zmienność momentu elektromagnetycznego dla dwóch rozpatrywanych struktur.



Rys. 6. Wytwarzany moment elektromagnetyczny w zależności od kąta obrotu wirnika dla podstawowego sterowania przy  $I=35A$

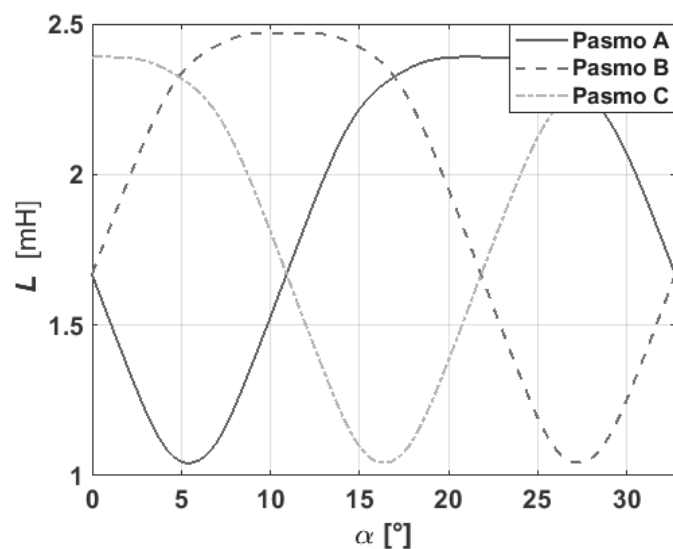
Dokonyjąc porównania uzyskanego momentu przedstawionego na rysunku 6 odczytano średnią wartość momentu, która dla silnika ze zwoją wynosi  $T_{av1}=8,16$  N·m. Dla silnika SRM posiadającego zwoję współczynnik tętnień równy jest  $\varepsilon_1=35\%$ . W przypadku silnika bez zwoju, wartość średnia momentu wynosi  $T_{av2}=6,11$  N·m, natomiast współczynnik tętnień wzrasta do  $\varepsilon_2=48\%$  względem pierwszej konstrukcji. Korzystając ze wzoru 2, obliczone zostały gęstości momentu obrotowego pierwszej konstrukcji  $T_{d1}=8,5$  kN·m/m<sup>3</sup> oraz dla drugiej konstrukcji  $T_{d2}=6,8$  kN·m/m<sup>3</sup>.

W kolejnym etapie badań wyznaczono zależność indukcyjności własnej pasma od kąta położenia wirnika przy stałej wartości prądu w danym paśmie. Zależność wyznaczono zgodnie ze wzorem (4)

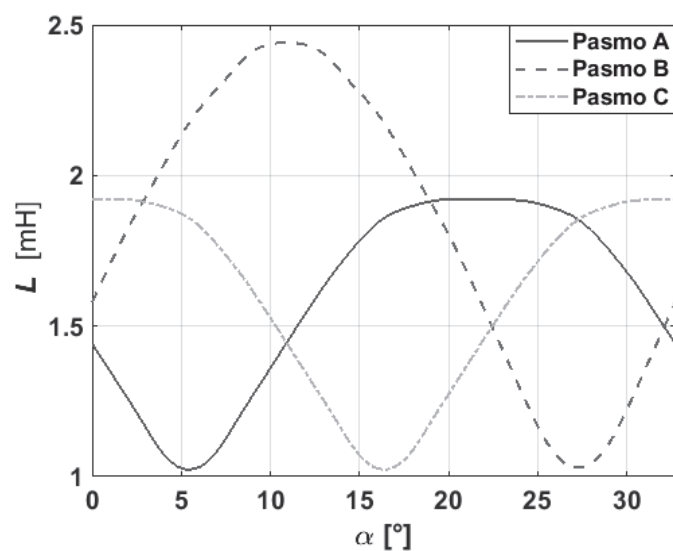
$$L_s = \frac{\int \vec{A} \cdot \vec{J} dV}{i^2} \quad (4)$$

gdzie:  $\mathbf{A}$  – wektorowy potencjał magnetyczny,  $\mathbf{J}$  – wektor gęstości prądu,  $V$  – objętość,  $L_s$  – indukcyjność własna,  $i$  – prąd cewki.

Na poniższych rysunkach przedstawiono przebieg indukcyjności własnej dla trzech pasm zasilających silnik SRM przy różnych konstrukcjach stojana. Na rysunku 7 zilustrowano przebiegi dla silnika ze zwoją, natomiast na rysunku 8 wyniki uzyskane dla silnika bez zwoju.



Rys. 7. Zależność indukcyjności własnej pasm od kąta położenia wirnika dla  $I=35$  A



Rys. 8. Zależność indukcyjności własnej pasm od kąta położenia wirnika dla  $I=35$  A

Analizując uzyskane wyniki, zauważyć można, że indukcyjności pasm A i C dla obu konstrukcji są symetryczne względem siebie. W przypadku silnika ze zwoją, maksymalne wartości indukcyjności poszczególnych pasm są wyższe



aniżeli dla konstrukcji stojana bez zwory o ok. 20%. Zasilone pasmo B dla silnika ze zworą posiada nieznacznie wyższą wartość maksymalną w porównaniu do pasm A i C. W przypadku silnika bez zwory również występuje różnica pomiędzy pasmem B a pasmami A i C i wynosi ok 0,5 mH.

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy autorzy przeprowadzili wstępną analizę dwóch konstrukcji przełączalnego silnika reluktancyjnego o zmienionej geometrii stojana. Przeprowadzone badania pokazują, że zastosowanie zwory zamykającej magnetowód stojana wpływa korzystnie na wartość wytwarzanego momentu dodatkowo stanowiąc ochronę wirnika. Po przeprowadzeniu symulacji został określony moment jaki musi być dostarczony na koło, aby poruszać się z zadaną prędkością. Według obliczeń należy dostarczyć moment o wartości  $T_e \approx 3$  N·m, aby poruszać się rowerem z prędkością  $v \approx 20$  km/h. Dodatkowo należy wspomnieć, że zadaniem silnika jest wspomaganie użytkownika w 50% potrzebnej całkowitej mocy.

W dalszym etapie prac autorzy zamierzają przeprowadzić optymalizację wybranej konstrukcji silnika pod kątem otrzymania maksymalnych parametrów całkowitych, a następnie przeprowadzić analizę dynamiczną maszyny w celu doboru odpowiedniego układu sterowania badanego silnika reluktancyjnego.

#### LITERATURA

- [1] Murakami S., Goto H., Ichinokura O., A Study about Optimum Stator Pole Design of Axial-Gap Switched Reluctance Motor, IEEE, 2014.
- [2] Chan C. C., Chau K. T., Modern Electric Vehicle Technology, Oxford University Press, 2001.
- [3] Mehrdad Ehsani, et al., Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press, 2005
- [4] 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.
- [5] Sun M., Chen H., Yan W., Cheng H., Liu Z., Design and Optimization of Switched Reluctance Motor for Propulsion System of Small Electric Vehicle, School of Information and Electrical Engineering China University of Mining and Technology Xuzhou, China, IEEE, 2016.
- [6] <http://www.orpa.pl>
- [7] Argiolas O., Nazeraj E., Hegazy O., De Backer J., Mohammadi A., Van Mierlo J., Design Optimization of a 12/8 Switched Reluctance Motor for Electric and Hybrid Vehicles, Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, 2017.
- [8] Anvari B., Toliyat H. A., Fahimi B., Simultaneous Optimization of Geometry and Firing Angles for In-Wheel Switched Reluctance Motor, IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017

- [9] Miller T.J.E., Optimal Design of Switched Reluctance Motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 49, Number 1, February 2002.
- [10] Çinar 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.
- [11] Tomczewski K., Wach P., Wróbel K.: Badania modelowe i eksperymentalne oscylacyjnego, przełączalnego silnika reluktancyjnego SRM, Przegląd Elektrotechniczny, 10'2005.
- [12] Kowol M., Łukaniszyn M., Latawiec K. J.: Modeling and construction optimization of a modular TFM with an outer rotor, Electrical Engineering, Archiv fur Elektrotechnik, Volume 92, Number 3, 2010.
- [13] Łukaniszyn M., Kowol M., Kołodziej J., Modelowanie i optymalizacja silnika reluktancyjnego dwumodułowego, Przegląd Elektrotechniczny, 11'2011.

#### **SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WITH CHANGED STATOR GEOMETRY**

This paper presents the stator structure design of SRM to use in electric vehicles in particular for an electric bicycle. The article presents the results of electromagnetic calculations of two reluctance motor designs. Initial analysis of the studied structures was carried out using two-dimensional numerical models (2D) solved using the finite element method (FEM).

*(Received: 06.02.2018, revised: 12.03.2018)*