

## Koncepcja i obliczenia parametrów przełączalnego silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym do napędu roweru

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono założenia konstrukcyjne napędu elektrycznego do pojazdu elektrycznego. W pracy dokonano porównania zmienności momentu elektromagnetycznego i indukcyjności własnej w funkcji kąta obrotu wirnika dla modelu trójwymiarowego (3D) bazującego na metodzie elementów skończonych. Przedstawiono układ sterowania silnika oraz wyniki obliczeń przebiegów prądów oraz momentu elektromechanicznego badanego przetwornika.

**Abstract.** The paper presents the preliminary design of the electric drive for a bicycle using 4-phase 8/10 poles switched reluctance motor (SRM) with an external-rotor. Electromagnetic field analysis for the considered motor is carried out using 3D FEM. The electromagnetic torque and self-inductance characteristics as a function of the rotor angle position are shown in the paper. The paper contains also the motor control system and calculation results of the currents and electromagnetic torque waveforms for the steady state. (The concept and calculation of switched reluctance motor with external-rotor designed for the electric bike).

**Słowa kluczowe:** napęd elektryczny roweru, przełączalny silnik reluktancyjny, metoda elementów skończonych.

**Keywords:** electric drive for a bicycle, switched reluctance motor, finite element method.

### Wstęp

Na przestrzeni ostatnich lat można zauważyć duży wzrost zainteresowania rowerami jako środkami lokomocji w centrach miast. Ciągły rozwój infrastruktury rowerowej w miastach sprawia, że rower staje się coraz bardziej konkurencyjny względem transportu samochodowego. Zastosowanie dodatkowego napędu elektrycznego w rowerach pozwala na zwiększenie dynamiki przemieszczania się dając lepsze rezultaty niż poruszanie się tradycyjnym rowerem. Poza tym napęd elektryczny charakteryzuje się w dalszym ciągu cichą pracą w przeciwieństwie do silników spaliniowych, wysoką sprawnością napędu oraz niezależnością od paliw kopalnianych [1, 2, 3].

Przeglądając dostępne rozwiązania rowerów elektrycznych można zauważyć, że występują trzy różne koncepcje montowania silników mających na celu wspomaganie lub bezpośrednie napędzanie roweru. Pierwszym wariantem jest zintegrowanie silnika z mechanizmem korbowym i pedałami. W tym rozwiązaniu moc z silnika przenoszona jest bezpośrednio na łańcuch napędzający, a centralne umiejscowienie silnika pozwala zachować właściwy środek ciężkości konstrukcji roweru. Dodatkowymi elementami wyposażenia roweru w powyższej konfiguracji jest -manetka gazu, dzięki której można sterować mocą wspomagania oraz specjalna kłamka hamulca, odcinająca zasilanie silnika podczas hamowania.

Drugim dostępnym i najczęściej spotykanym wariantem w produkcji seryjnej rowerów elektrycznych jest silnik montowany w piaście przedniego koła. Z racji miejsca montażu napędu należy zachować ostrożność podczas zakrętów lub nawrotów, gdyż każdy obrót pedałami powoduje uruchomienie silnika i istnieje możliwość w przypadku śliskiej nawierzchni utracenia panowania nad pojazdem.

Trzecim sposobem montowania silnika w rowerze elektrycznym jest piaśta tylnego koła. Jest to rozwiązanie zbliżone do przedstawionego wcześniej z tym, że rower jest stabilniejszy i może być wykorzystywany do jazdy w terenie. Dodatkowo montaż napędu w tylnym kole zapewnia lepsze przenoszenie momentu oraz pozwala na zastosowanie wolnobiegu lub bębna na kasetkę zmieniając tym samym przełożenie [4, 5, 6].

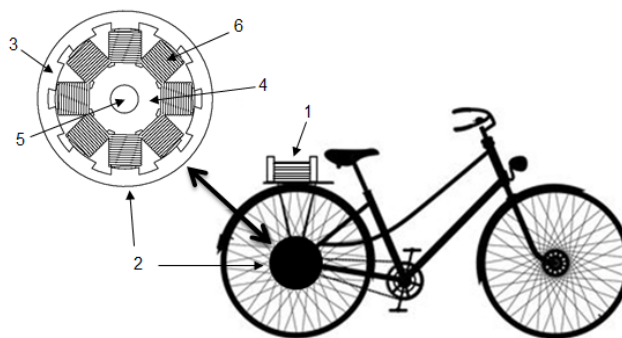
Większość dostępnych pojazdów elektrycznych wyposażonych jest w silniki prądu stałego (DC) lub silniki

bezszcotkowe BLDC. Jednak z racji występowania szczotek w przypadku silników prądu stałego, silniki te nie spełniają wymogów stawianych dla nowoczesnych pojazdów elektrycznych [10]. Natomiast silniki BLDC, których warunki eksploatacji są lepsze niż silników DC, wymagają stosowania magnesów neodymowych, co powoduje wzrost kosztów maszyny [2, 7].

Alternatywą dla tych dwóch typów silników są przełączalne silniki reluktancyjne (SRM). Silniki SRM charakteryzują się wysoką gęstością momentu obrotowego przy niskich prędkościach, charakterystyką pracy podobną do silnika szeregowego oraz prostą konstrukcją [8, 9]. Dlatego też w niniejszej pracy przedstawiono projekt silnika SRM do napędu roweru elektrycznego.

### Założenia konstrukcyjne roweru elektrycznego

W pracy skupiono się na konstrukcji roweru, którego koła posiadają 28 calowe obręcze. Miejscem zamontowania silnika elektrycznego jest piaśta tylnego koła, z którego wytwarzany przez silnik moment będzie przekazywany bezpośrednio na koło napędzające rower. Ponadto tylne koło, po dociążeniu przez masę rowerzysty, charakteryzuje się lepszą przyczepnością do jezdni oraz pozwala na uzyskanie wyższej sprawności przenoszenia momentu generowanego przez silnik na koło [3].



Rys.1. Silnik SRM z wirnikiem zewnętrznym umieszczony wewnątrz koła napędzającego rower oraz miejsce zamontowania baterii zasilającej (1-bateria zasilająca, 2-silnik SRM, 3-wirnik, 4-stojan, 5-wał, 6-uzwojenia)

Z racji miejsca mocowania silnika, jego średnica i szerokość są ograniczone. Prezentowane w artykule rozwiązanie posiada średnicę wirnika zewnętrznego 250 mm.

Jest to konstrukcja większa niż stosowane w rozwiązaniach dostępnych na rynku [10]. Do zasilania silnika zastosowano akumulator litowo-jonowy o napięciu 24V, który został umieszczony na tylnym bagażniku (rysunek 1).

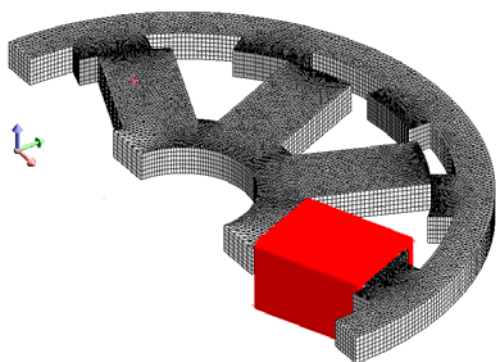
Aby rower mógł zostać dopuszczony do ruchu drogowego, prędkość poruszania się pojazdu przy zasilaniu silnikiem elektrycznym nie może przekroczyć 25 km/h.

Ograniczenia narzucone przez prawo sprawiają, że maksymalna prędkość obrotów silnika jest stosunkowo mała i w przypadku zastosowania kół 28 calowych nie może ona przekraczać 200 obr/min.

W pracy zajęto się konstrukcją o 8 biegunach stojana i 10 zębach wirnika (8/10). Taki stosunek liczby zębów stojana do liczby biegunów wirnika umożliwia ograniczenia tętnień wytwarzanego momentu elektromagnetycznego [11, 12, 13].

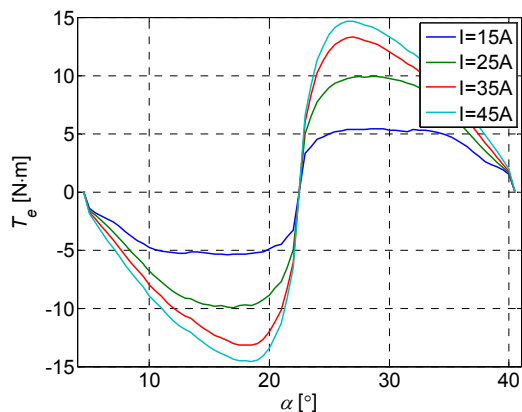
### Analiza statyczna badanego silnika

W pierwszym etapie pracy został opracowany trójwymiarowy model badanego silnika w celu obliczenia parametrów całkowitych. W modelu połowym przyjęto następujące założenia upraszczające: pominięto histerezę magnetyczną, pominięto zjawisko prądów wirowych oraz przyjęto stałą gęstość prądu w całym przekroju cewek. Ze względu na występującą symetrię obrotową wzdłuż długości czynnej stojana, obszar obliczeniowy ograniczono do jednej czwartej obszaru całej maszyny (rysunek 2).



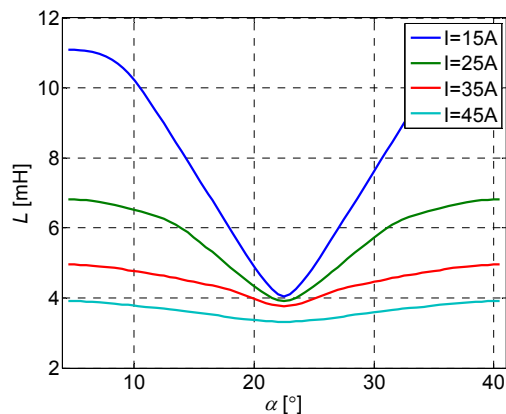
Rys.2. Trójwymiarowy model numeryczny

Na rysunku 3 przedstawione zostały charakterystyki momentu elektromagnetycznego ( $T_e$ ) w funkcji kąta położenia wirnika, przy stałej wartości prądu w danym paśmie.



Rys.3. Zmienność momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta położenia wirnika

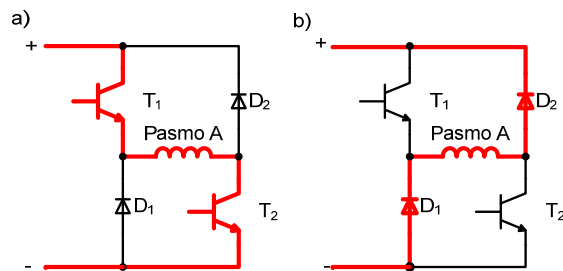
Wyznaczone zależności indukcyjności własnej pasma od kąta położenia wirnika przy stałych wartościach pasma przedstawiono na rysunku 4.



Rys.4. Zależność indukcyjności własnej od kąta położenia wirnika

### Układ sterowania

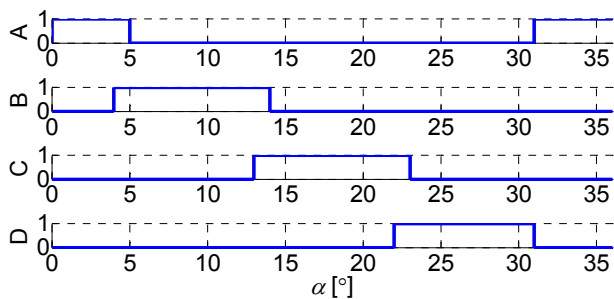
Analizowany przełączalny silnik reluktancyjny wymaga elektronicznego układu komutacyjnego. W przedstawionym modelu wykorzystano półmostek typu H, który jest podstawowym i najczęściej stosowanym układem sterowania w takich rozwiązaniach [14]. W pracy wykorzystano tylko dwa stany pracy półmostka typu H. Pierwszy stan przedstawiony został na rysunku 5a. Przy załączonych tranzystorach T1 i T2 następuje zasilanie pasma stojana. W tym czasie wirnik ma się obrócić w taki sposób, aby dążyć do osiągnięcia położenia o najmniejszej reluktancji magnetycznej dla danego pasma. Drugi ze stanów przedstawiony na rysunku 5b, daje możliwość zwrotu części energii zgromadzonej w napędzie do źródła zasilania.



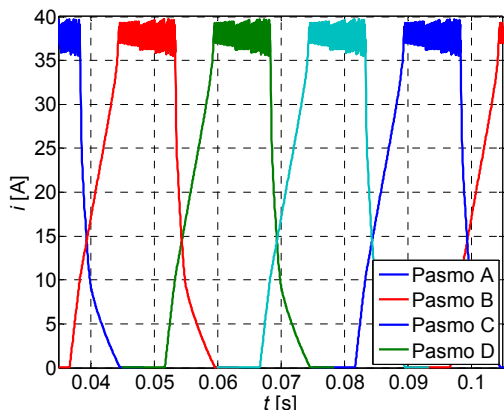
Rys.5. Stany pracy półmostka typu H

### Analiza stanów ustalonych

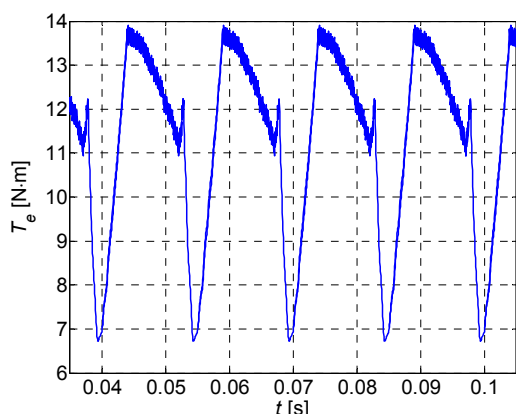
W następnym etapie badań autorzy przeprowadzili, w oparciu o model połowo-obwodowy, obliczenia mające na celu wyznaczenie przebiegów chwilowych prądów i momentu w stanie ustalonym. Na rysunkach 7-10 przedstawiono przykładowe przebiegi prądu w poszczególnych pasmach silnika oraz wytwarzany moment elektromagnetyczny przy zasilaniu napięciem  $U=24V$ . Do sterowania zasilaniem poszczególnych pasm zastosowano algorytm zilustrowany na rysunku 6.



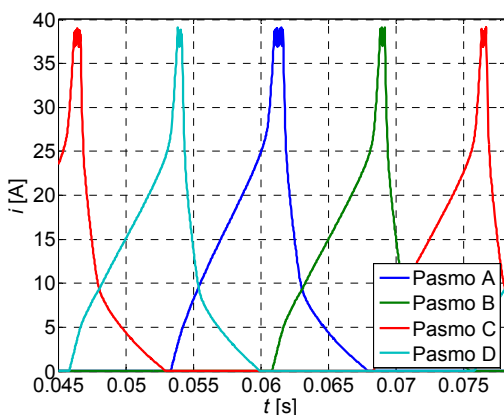
Rys.6. Sekwencja załączania poszczególnych pasm silnika SRM



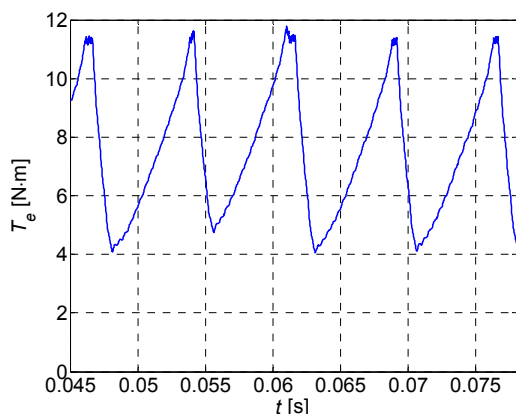
Rys.7. Przebiegi prądu w analizowanym silniku SRM przy prędkości silnika  $n=100\text{obr/min}$



Rys.8. Wytwarzany moment elektromagnetyczny przy prędkości silnika  $n=100\text{obr/min}$



Rys.9. Przebiegi prądu w analizowanym silniku SRM przy prędkości silnika  $n=200\text{obr/min}$



Rys.10. Wytwarzany moment elektromagnetyczny przy prędkości silnika  $n=200\text{obr/min}$

W układzie zasilania wykorzystano ograniczenie prądowe na poziomie 38A, co można zaobserwować na rysunkach 7 i 9. Wartość średnia momentu przedstawionego na rysunkach 8 i 10 wynosi odpowiednio 11,58 N·m i 7,87N·m. Natomiast współczynnik tętnień, który został obliczony na podstawie zależności (1) [15], wynosi odpowiednio  $\varepsilon = 30\%$  i  $\varepsilon = 48\%$ .

$$(1) \quad \varepsilon = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2T_{av}} \cdot 100\%$$

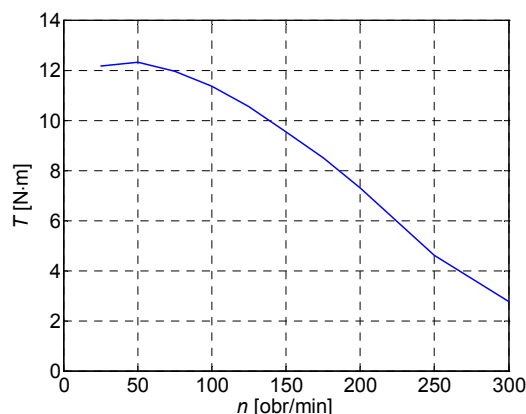
gdzie:  $T_{\max}$  – wartość maksymalna,  $T_{\min}$  – wartość minimalna,  $T_{av}$  – wartość średnia momentu elektromagnetycznego.

W kolejnym etapie badań wyznaczono charakterystyki elektromechaniczne badanej maszyny. W analizowanych przypadkach sprawność silnika wraz z układem przekształtnikowym wyznaczono zgodnie z zależnością (2) [16]:

$$(2) \quad \eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_s + \Delta P_u}$$

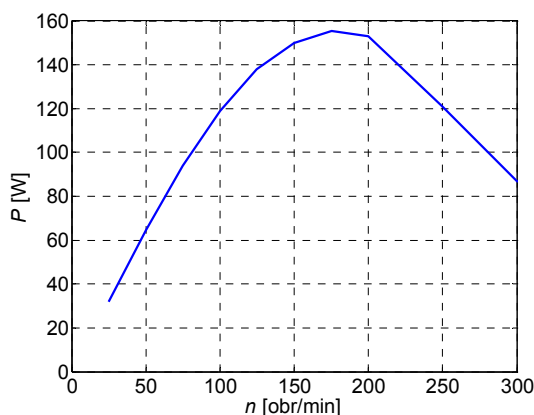
gdzie:  $P_2$  – moc silnika na wale,  $\Delta P_s$  – straty mocy w silniku,  $\Delta P_u$  – straty mocy w układzie zasilania silnika.

Na rysunkach 11-13 przedstawiono charakterystyki elektromechaniczne badanego silnika przy napięciu zasilania  $U=24\text{V}$ . Na wykresach tych wykreślono, odpowiednio moment, moc na wale oraz sprawność w zależności od prędkości obrotowej silnika ( $n$ ). Na przedstawionych charakterystykach można zauważyć, że prezentowana konstrukcja przełączalnego silnika z wirnikiem zewnętrznym charakteryzuje się stosunkowo dużym momentem przy niskich prędkościach obrotowych. Dla prędkości silnika  $n=25\text{ obr/min}$ , a więc przy prędkości roweru około 3,5 km/h wartość momentu wytwarzanego przez silnika wynosi 12,2 N·m. Jest to wartość, która powinna zapewnić odpowiednie przyspieszenie podczas rozpędzania się. Poza tym w zakresie prędkości roweru 13-25 km/h (prędkość silnika  $n=100-175\text{ obr/min}$ ) moment utrzymuje się powyżej 8 N·m, a tym samym powinien zapewnić odpowiedni komfort jazdy.

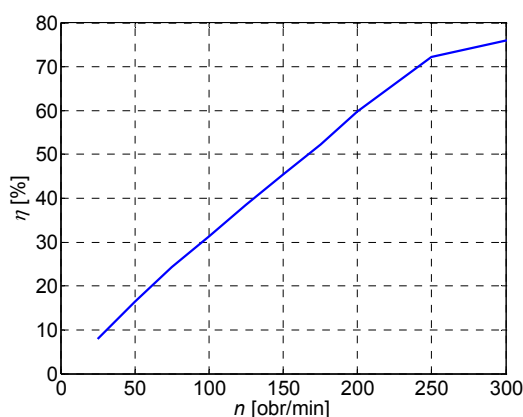


Rys.11. Zależność momentu wytwarzanego przez silnik w funkcji prędkości obrotowej silnika

Maksymalna moc wytwarzana przez silnik wynosi 155 W, a więc silnik spełnia wymagania jakie stawiane są przez prawo drogowe odnośnie dopuszczalnej mocy napędu elektrycznego dla roweru elektrycznego i nie przekracza ona 250W. Dodatkowo można zauważyć, że przedział w którym moc przekracza 130W odpowiada docelowemu zakresowi prędkości roweru, a więc 13-25 km/h (rysunek 10).



Rys.12. Zależność mocy silnika w funkcji prędkości obrotowej silnika



Rys.13. Zależność sprawności silnika wraz z układem zasilania w funkcji prędkości obrotowej silnika

Sprawność silnika wraz z układem zasilania w docelowym przedziale prędkości roweru jest stosunkowo niska i nie przekracza 60%. Większe wartości sprawności można uzyskać przy wyższych prędkościach obrotowych silnika. Dla 300 obr/min, sprawność ta wynosi już ok. 78%. Jednak, aby silnik mógł pracować z taką prędkością, konieczne byłoby zastosowanie odpowiedniej przekładni, tak aby prędkość roweru nie przekraczała dopuszczalnej granicy 25km/h.

#### Podsumowanie

W pracy przedstawiono wstępne badania przełączalnego silnika reluktancyjnego przeznaczanego do napędu roweru. Dla opracowanego modelu trójwymiarowego wykonano szereg obliczeń rozkładu pola magnetycznego. Wyznaczono parametry całkowite silnika oraz przedstawiono wstępną analizę stanów ustalonych, która wykazała znaczne tętnienia momentu elektromagnetycznego. Zaprezentowano podstawowe charakterystyki elektromechaniczne analizowanego silnika.

W dalszych badaniach przeprowadzona zostanie optymalizacja konstrukcji silnika oraz układu sterowania silnika, mającą na celu uzyskanie wyższej wartości średniej momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik oraz ograniczenie jego tętnień. Dodatkowo autorzy podejmą pracę dotyczącą zastosowania przekładni mechanicznej w celu uzyskania lepszych parametrów napędu.

**Autorzy:** mgr inż. Rafał Gabor, dr inż. Piotr Mynarek, dr inż. Marcin Kowol, Politechnika Opolska Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej, ul. Prószkowska 76 (budynek 1), 45-758 Opole, e-mail: p.mynarek@po.opole.pl, m.kowol@po.opole.pl, rafal.gabor@doktorant.po.edu.pl.

#### LITERATURA

- [1] Juda Z.: Zastosowanie zaawansowanych źródeł energii w miejskich pojazdach elektrycznych z funkcją odzysku energii. *Czasopismo Techniczne*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Zeszyt 10, 2012.
- [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] <http://www.gnomon.pl/artukul,Drive.html>, dostęp 2016.
- [4] Evtimov I., Ivanov R., Staneva G., Kadikyanov G.: A Study on electric bicycle energy efficiency, *Transport Problems*, Volume 10 Issue 3, 2015.
- [5] Chlebosz W., Ombach G., Junak J.: Analysis and optimization of drive system used in electric bike, *Journal of Electrical Engineering*, 2010.
- [6] Muetze A., Tan Y. C.: Electric bicycles, *IEEE Industry Magazine*, July/August 2007.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Chan C. C., Chau K. T.: Modern Electric Vehicle Technology, Oxford University Press, 2001.
- [10] 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.
- [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] 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.
- [13] Miller T.J.E.: Optimal Design of Switched Reluctance Motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 49, Number 1, February 2002.
- [14] Tomczuk K., Wybrane metody sterowania silnika reluktancyjnego przełączalnego (SRM). *elektro.info* 5/2010, 2010.
- [15] Kołodziej J.: Analiza dynamicznych i ustalonych stanów pracy silnika reluktancyjnego ze strumieniem poprzecznym, *Rozprawa doktorska*, Opole, 2010.
- [16] Tomczewski K., Wach P.: Control characteristics for quasi-optimal operation of switched reluctance motors, *Springer*, 2003, Electrical Engineering 85, pp. 275–281.
- [17] Mehrdad Ehsani, et al.: Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design, *CRC Press*, 2005.
- [18] 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.
- [19] Gabor R., Mynarek P., Kowol M.: Analiza pracy silnika SRM z wirnikiem zewnętrznym przeznaczonym do napędu roweru elektrycznego, *ŻKwE 2016*, Poznań, 2016.