

Marian Łukaniszyn, Marcin Kowol  
Politechnika Opolska, Opole

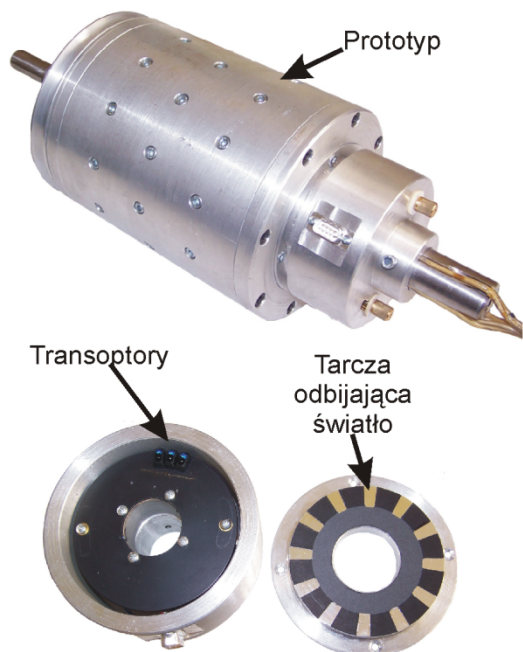
## ZASTOSOWANIE MAGNESÓW TRWAŁYCH W SILNIKU RELUKTANCYJNYM ZE STRUMIENIEM POPRZECZNYM

### APPLICATION OF PERMANENT MAGNETS IN THE TRANSVERSE FLUX MOTOR

**Abstract:** In the paper the influence of application of permanent magnets in the new construction of the modular reluctance motor (Transverse Flux Motor – TFM) is presented. The calculation of the magnetic field and electromagnetic torque were performed using Flux3D package based on the finite element method. The influence of magnetic circuit modification on the torque produced by the motor and its pulsations was investigated. Two motor version with six and twelve teeth were considered. The calculations presented enable to determine the output electromechanical parameters already being in the stage of design. Several computer simulations were carried out and the results were compared with the previous prototype versions of the motor.

#### 1. Wstęp

Maszyny reluktancyjne o budowie modułowej z wirnikiem zewnętrznym stosowane są głównie jako generatory [2, 6]. W ostatnich czasie maszyny tego rodzaju coraz częściej wykorzystuje się jako napędy pojazdów elektrycznych [7].



Rys. 1. Prototyp silnika TFM.

Silniki te powinny charakteryzować się dużą sprawnością w szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej oraz dużym momentem elektromagnetycznym. Wymagane parametry silnika są jednak ściśle zależne od konstrukcji pojazdu oraz jego przeznaczenia. Przedstawio-

ny w pracy silnik składa się z trzech takich samych modułów, w których stojany są przesunięte względem siebie o dwadzieścia stopni geometrycznych (rys. 1). Moduły wirnika są ułożone symetrycznie względem siebie. Każdy segment ma sześć zębów oraz zawiera jedno pasmo uzwojenia w postaci solenoidalnej cewki. Poszczególne moduły są oddzielone od siebie przekładkami niemagnetycznymi. Szczegółową analizę własności elektromechanicznych, zasadę działania oraz wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych silnika na jego moment elektromagnetyczny i pulsacje przedstawiono w pracach [3, 5]. W pracy [4] dokonano pełnej optymalizacji obwodu magnetycznego silnika TFM za pomocą algorytmu ewolucyjnego.

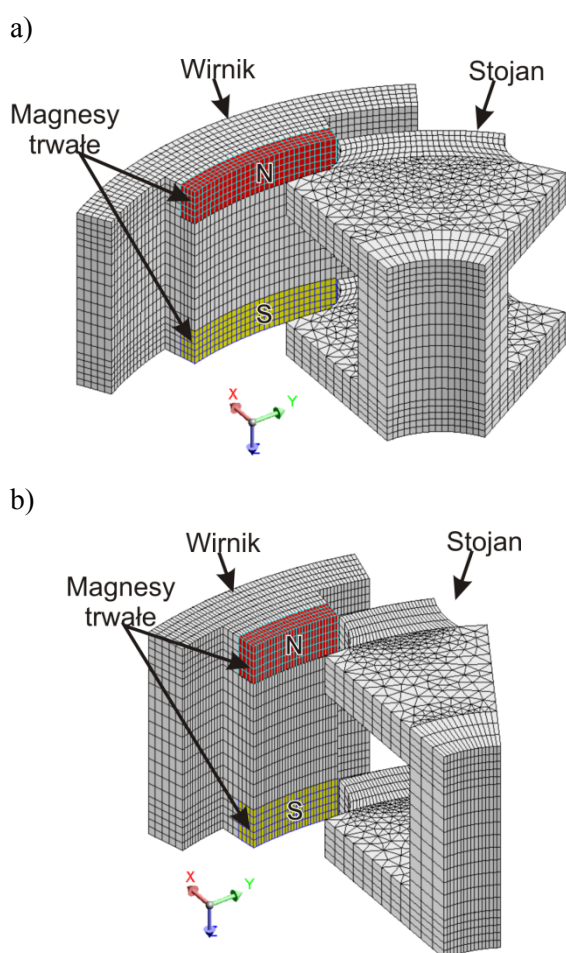
W celu poprawienia parametrów elektromechanicznych oraz sprawności silników reluktancyjnych ze strumieniem poprzecznym, dodatkowo w obwodzie magnetycznym stosuje się magnesy trwałe, wytwarzane na bazie pierwiastków ziem rzadkich. Niniejsza praca jest kontynuacją tematyki prezentowanej w [3, 4, 5]. Poddano badaniom rozwiązania konstrukcyjne silnika reluktancyjnego modułowego z magnesami trwałymi.

W silnikach z magnesami trwałymi, poza momentem elektromagnetycznym, dodatkowo występuje moment zaczepowy (moment od zębów), który wpływa na własności elektromechaniczne przetwornika [1, 6]. Moment ten powstaje w wyniku współdziałania pola magnetycznego wirnika ze stojanem o kątowej zmien-

ności reluktancji. W wielu zastosowaniach silników z magnesami trwałymi, wymaga się bardzo niskiego poziomu pulsacji momentu elektromagnetycznego. Obecnie istnieje wiele technik redukcji amplitudy momentu zaczepowego opartych na modyfikacjach obwodu magnetycznego przetwornika. W artykule ograniczono się tylko do przedstawienia wybranych konstrukcji silnika TFM z magnesami trwałymi, bez przeprowadzania analizy zmniejszania pulsacji momentu zaczepowego.

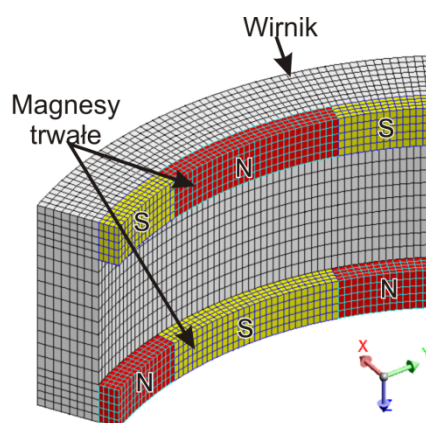
## 2. Opis wybranych konstrukcji maszyn

Poniżej przedstawiono różne rozwiązania konstrukcyjne silnika TFM z magnesami trwałymi. Modele wybranych silników bazują na dwóch modelach podstawowych silników TFM (moduły z sześcioma i dwunastoma zębami).



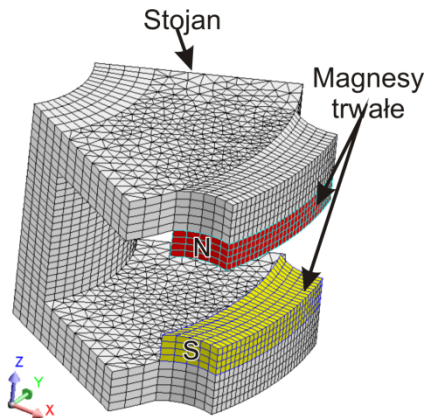
Rys. 2. Trójwymiarowe modele modułu silnika wraz z siatką dyskretyzacyjną: a) dla 1/6 modelu silnika ( $M_{6a}$ ); b) dla 1/12 modelu silnika ( $M_{12a}$ )

W przeprowadzonej analizie wpływu parametrów konstrukcyjnych na wielkości całkowite silnika trójmodułowego, czy też w optymalizacji parametrów konstrukcyjnych silnika pod kątem zwiększenia średniej wartości momentu elektromagnetycznego, wprowadzono uproszczenie modelu polowego dotyczące braku występowania sprzężeń magnetycznych pomiędzy modułami. Takie założenie pozwoliło na ograniczenie obliczeń polowych do jednego modułu [4]. W przypadku modeli z magnesami trwałymi istnieje również możliwość ograniczenia obliczeń do jednego modułu, ale w przypadku wyznaczania momentu elektromagnetycznego należy uwzględnić wypadkowy moment zaczepowy pochodzący od pozostałych modułów.



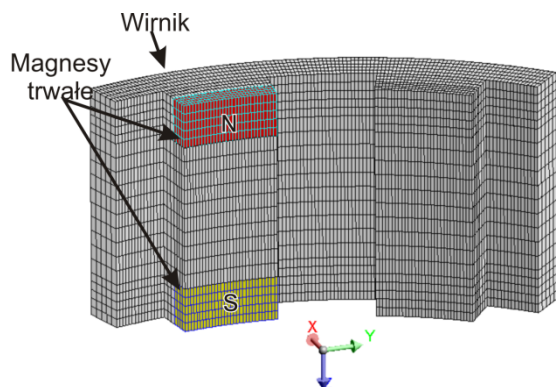
Rys. 3. Model polowy wirnika dla wersji silnika  $M_{6b}$

Strukturę pierwszego modelu ( $M_{6a}$ ) przedstawiono na rysunku 2a. W tym modelu silnika, na zęby wirnika dodatkowo zostały zamontowane magnesy trwałe o odpowiednim kierunku magnetyzacji. Budowa stojana nie uległa zmianie i jest dokładnie taka sama, jak w modelu podstawowym. Wersja ( $M_{6b}$ ) silnika charakteryzuje się tym, że na całym obwodzie wirnika zamontowano magnesy trwałe. Kawałki magnesów o rozpiętości zęba wirnika i odpowiednim kierunku wektora magnetyzacji tworzą dwa pierścienie, które są umieszczone nad zębami stojana (rys. 3). W kolejnym modelu ( $M_{6c}$ ) przedstawionym na rysunku 4, wirnik nie uległ zmianie, jest taki sam jak w modelu podstawowym, natomiast w stojanie zastosowano nabiegunki wykonane z magnesu trwałego.



Rys. 4. Model połowy stojana dla wersji silnika  $M_{6c}$

W przedstawionych modelach należy spodziewać się znacznych wartości momentu zaczepowego w stosunku do momentu elektromagnetycznego, co wynika z konstrukcji tych modeli oraz bardzo małej szczeliny powietrznej. Dlatego też wykonano wersje silnika  $M_{6d}$  i  $M_{6e}$  odpowiadające odpowiednio wersjom  $M_{6a}$  i  $M_{6c}$ , w których to magnesy trwałe zastosowano na co drugie zębie. Zabieg taki powinien prowadzić do zmniejszenia momentu zaczepowego o połowę, jak również przyczynia się do zmniejszenia kosztów budowy takiej maszyny. Model silnika  $M_{12d}$  zilustrowano na rysunku 5.



Rys. 5. Model połowy wirnika dla wersji silnika  $M_{12d}$

Przedstawione modele silników TFM z magnesami trwałymi odnoszą się do modelu z sześcioma zębami w module. Dla porównania wykonano podobne modele silnika lecz o zwiększonej liczbie zębów w module, która wynosi dwanaście (rys. 2b). W opisie wersji silnika liczba w indeksie oznacza liczbę zębów modułu, a litera oznacza konkretną strukturę silnika, np. wersja silnika  $M_{6a}$  odpowiada wersji  $M_{12a}$ ,

z taką różnicą, że w modelach została przyjęta inna liczba zębów.

### 3. Wyniki obliczeń

Wykorzystując program Flux3D dla przedstawionych modeli wykonano szereg obliczeń parametrów całkowych. W modelach zastosowano magnesy trwałe typu NDFE30, gdzie  $B_r = 1,1$  T i  $H_c = 838$  kA/m. Obliczenia momentu elektromagnetycznego wykonano przy zasilaniu pasma uzwojenia prądem o natężeniu wynoszącym 12 A.

Obliczenia parametrów całkowych, dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych silnika o liczbie zębów w module wynoszącym sześć, zestawiono w tabeli 1.

W obliczeniach wprowadzono dodatkowy parametr określający tętnienia momentu elektromagnetycznego wg zależności:

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

gdzie:  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_{av}$  – oznacza wartość maksymalną, minimalną i średnią momentu elektromagnetycznego (w przedziale załączenia pasma).

Dodatkowo w celu wyznaczenia miary zawartości momentu zaczepowego w momencie użytecznym zdefiniowano następującą zależność:

$$\tau = \frac{T_{zmax}}{T_{max}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Tabela 1. Wyniki obliczeń parametrów całkowych dla silnika z sześcioma zębami

Model	$T_{max}$ [Nm]	$T_{min}$ [Nm]	$T_{av}$ [Nm]	$\Delta T_{av}$ [%]	$T_{zmax}$ [Nm]	$\varepsilon$ [%]	$\tau$ [%]
$B_{pod}$	2,01	1,27	1,74	-	0	42,7	0
$M_{6a}$	2,49	0,39	1,39	-19,8	1,19	150	47,0
$M_{6b}$	4,50	2,10	3,20	84,2	1,22	75,1	27,1
$M_{6c}$	2,78	1,17	1,85	6,67	0,42	87,1	15,1
$M_{6d}$	2,21	0,95	1,58	-9,12	0,60	80,1	27,1
$M_{6e}$	2,59	1,18	1,85	6,88	0,21	75,8	8,20

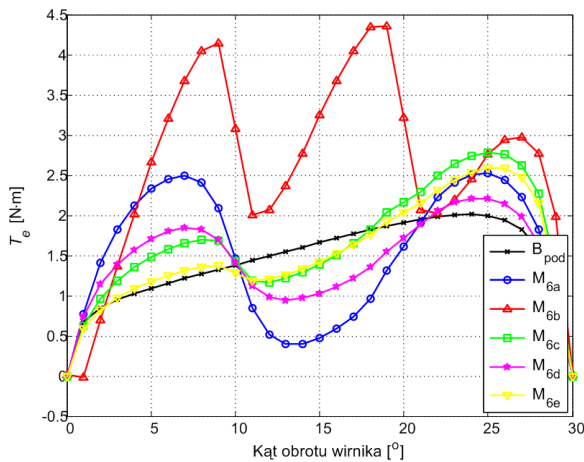
Wyniki obliczeń momentu elektromagnetycznego oraz momentu zaczepowego dla różnych wersji silnika w funkcji kąta obrotu przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Analizując poszczególne wersje silnika z sześcioma zębami, można zaobserwować duży wzrost pulsacji momentu elektromagnetycznego. Najlepsze rozwiązanie uzyskano dla wersji silnika  $M_{6b}$ . Średnia wartość momentu elektromagnetycznego wzrosła o 84%. Dla pozostałych modeli nie

uzyskano tak znacznej poprawy parametrów całkowych silnika, a w przypadku wersji silnika  $M_{6a}$  i  $M_{6d}$  średnia wartość momentu elektromagnetycznego okazała się mniejsza niż w modelu podstawowym ( $B_{pod}$ ), w którym nie zastosowano magnesów trwałych.

Podobna sytuacja ma miejsce dla rozwiązań konstrukcyjnych silników z dwunastoma zębami w module (tabela 2), gdzie również najlepszy rezultat pod kątem zwiększenia momentu elektromagnetycznego uzyskano dla konstrukcji modułu  $M_{12b}$ . Wyniki obliczeń parametrów elektromechanicznych silnika zestawiono w tabeli 2. Zmienność momentu elektromagnetycznego i momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika zilustrowano na rysunkach 8 i 9.

Tabela 2. Wyniki obliczeń parametrów całkowych dla silnika z dwunastoma zębami

Model	$T_{max}$ [Nm]	$T_{min}$ [Nm]	$T_{av}$ [Nm]	$\Delta T_{av}$ [%]	$T_{zmax}$ [Nm]	$\varepsilon$ [%]	$\tau$ [%]
$C_{pod}$	3,45	2,17	2,99	-	0	42,8	0
$M_{12a}$	3,44	1,01	2,31	-22,6	1,51	104,6	43,9
$M_{12b}$	7,04	3,58	5,12	71,1	1,44	67,5	20,5
$M_{12c}$	4,15	2,15	3,13	4,75	0,57	63,8	13,8
$M_{12d}$	3,20	1,82	2,51	-16,1	0,76	54,9	23,7
$M_{12e}$	3,79	2,10	2,90	-3,04	0,28	58,3	7,50

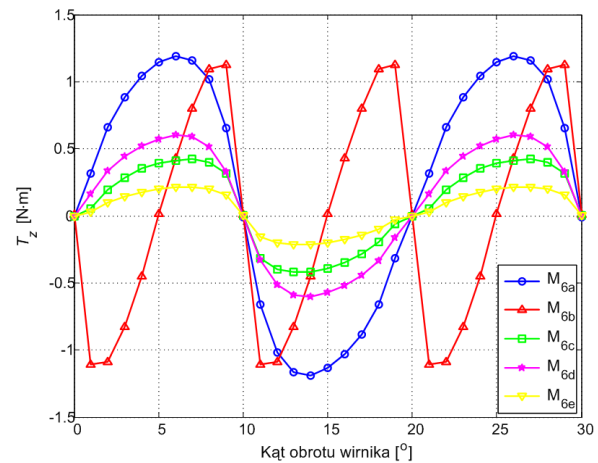


Rys. 6. Kątowa zmienność momentu elektromagnetycznego dla różnych konstrukcji silnika (silnik trójmodułowy z sześcioma zębami w module)

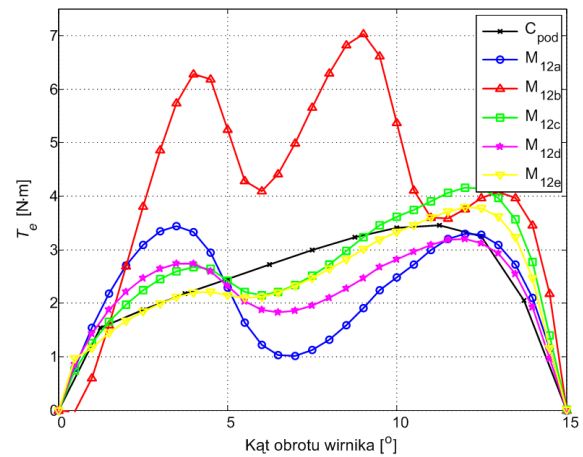
Dodatkowo, obliczając strumień skojarzony, wyznaczono kątową zmienność pasmowej siły elektromotorycznej rotacji dla prędkości obrotowej wynoszącej 300 obr/min. Siłę elektromotoryczną rotacji obliczono na podstawie zależności:

$$e(t) = N \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3)$$

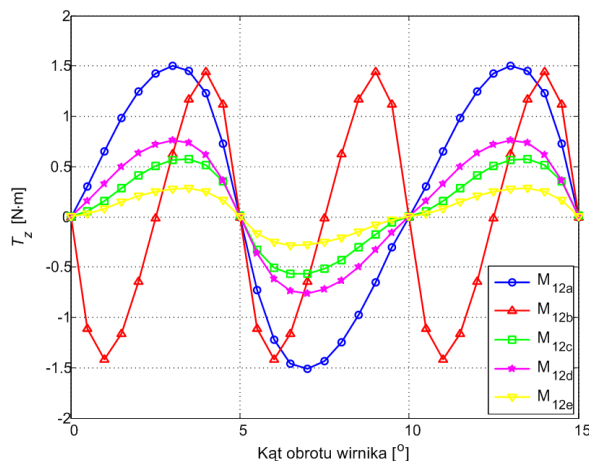
gdzie:  $N$  – oznacza liczbę zwojów,  $\phi$  – strumień skojarzony.



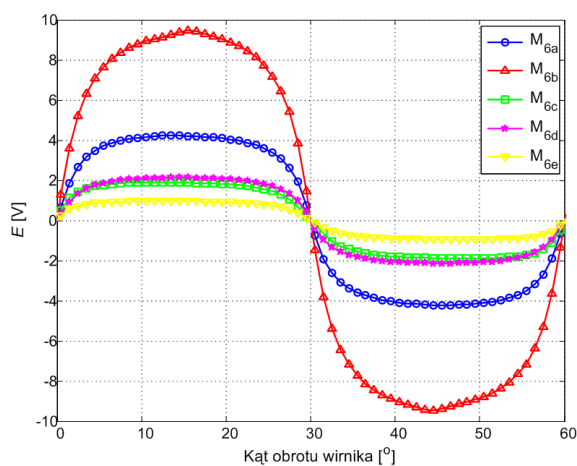
Rys. 7. Kątowa zmienność momentu zaczepowego dla różnych konstrukcji silnika (silnik trójmodułowy z sześcioma zębami w module)



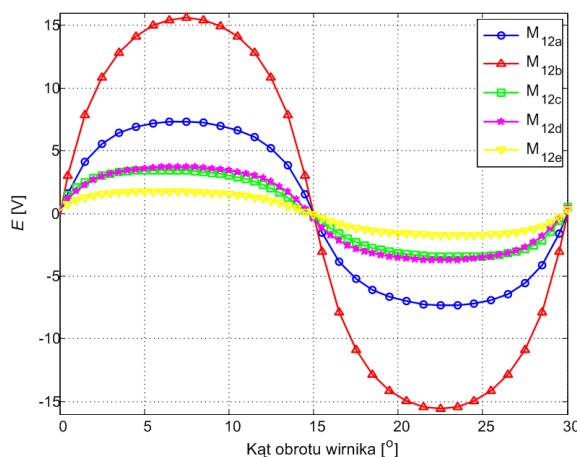
Rys. 8. Kątowa zmienność momentu elektromagnetycznego dla różnych konstrukcji silnika (silnik trójmodułowy z dwunastoma zębami w module)



Rys. 9. Kątowa zmienność momentu zaczepowego dla różnych konstrukcji silnika (silnik trójmodułowy z dwunastoma zębami w module)



Rys. 10. Kątowa zmienność pasmowej siły elektromotorycznej rotacji (moduł z sześcioma zębami,  $n = 300$  obr/min)



Rys. 11. Kątowa zmienność pasmowej siły elektromotorycznej rotacji (moduł z dwunastoma zębami,  $n = 300$  obr/min)

#### 4. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie magnesów trwałych w obwodzie magnetycznym nie musi wpłynąć na poprawę parametrów elektromechanicznych przetwornika. Przy czym, w przypadku nieznacznej poprawy parametrów całkowych silnika, z punktu widzenia kosztów budowy maszyny, konstrukcja takiego typu silnika może być nieopłacalna.

Dodatkowo w celu poprawy parametrów całkowych danej konstrukcji silnika, z magnesami trwałymi, można zastosować algorytm optymalizacyjny, który został przedstawiony w pracy [4].

#### 7. Literatura

- [1] Isastia V., Bellulcci M.: *A New Configuration of a TFPM Machine for a Wheel Motor*, ICEM, 5-8 September, Cracow, 2004, Vol. 1, pp. 139-140
- [2] Kastinger G.: *Design of a novel transverse flux machine*, ICEM 2002, Brugge, August 2002
- [3] Łukaniszyn M., Kowol M.: *Analiza pracy modułowego silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym*, Śląskie Wiadomości Elektryczne, 4'2005, ss. 4-7
- [4] Łukaniszyn M., Kowol M.: *Optymalizacja obwodu magnetycznego silnika reluktancyjnego modułowego z wirnikiem zewnętrznym*, XLIII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME'2007, Poznań, 2007, ss.191-194
- [5] Łukaniszyn M., Kowol M.: *Wpływ zmian konstrukcyjnych na parametry elektromechaniczne silnika reluktancyjnego z wirnikiem zewnętrznym*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol. LXXXII, No. 11, Sigma-NOT, 2006, pp. 43-45
- [6] Peethamparam A.: *Design of Transverse Flux Machines using Analytical Calculations & Finite Element Analysis*, March 2001 PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm
- [7] Ritchie E., Tutelea L.: *An overview of electric vehicle in-wheel drive systems*, XXXIX Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, 9-11 June 2003, Gdańsk-Jurata, pp. 1-21

#### Autorzy

prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn,

e-mail: [m.lukaniszyn@po.opole.pl](mailto:m.lukaniszyn@po.opole.pl)

dr inż. Marcin Kowol,

e-mail: [m.kowol@po.opole.pl](mailto:m.kowol@po.opole.pl)

Politechnika Opolska,

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki,

ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole