

**Tadeusz Glinka, Emil Król, Andrzej Białas, Tomasz Wolnik**  
**BOBRME Komel, Katowice**

## **SILNIKI TARCZOWE Z MAGNESAMI TRWAŁYMI**

### **AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTORS**

**Abstract:** Presently, most relevant applications use radial flux machines. Design and production of these machines have been made both efficient and economical in the past few decades and now this type of electrical machine is used in almost every industry. However for some applications where the limiting factor is the length of the machine, better option might be to use axial flux permanent magnet machines. This type of machine is very highly efficient and provides very good power/mass and moment/mass ratio. Discussed in this paper are selected types of axial flux permanent magnet machines. Presented characteristics of disc-type motors include: TORUS NS, TORUS S, disc – type motor with salient poles, machines with an inner rotor and coreless machines.

#### **1. Wstęp**

Silniki elektryczne stanowiące napęd pojazdów drogowych lub szynowych powinny charakteryzować się jak największym momentem z jednostki masy lub jak największą mocą z jednostki objętości. Minimalizacja masy silnika elektrycznego jest istotna, gdyż wpływa to na masę pojazdu i na energię zużywaną na ruch pojazdu. Problem masy silnika jest jeszcze bardziej istotny w statkach powietrznych takich jak: parolotnie, samoloty bezzałogowe, szybowce, motolotnie. Poszukując dobrego rozwiązania maszyny elektrycznej o minimalnej masie przy założonych parametrach należy wziąć pod uwagę silniki tarczowe. Kolejną zaletą silników tarczowych, która decyduje o stosowaniu tych silników w pojazdach i statkach powietrznych jest ograniczenie długości osiowej silnika. Pojazdy drogowe wymagają dużego momentu chwilo-owego np. przy ruszaniu na miękkim podłożu lub wjeżdżaniu na krawężniki podczas parkowania. Przy pokonywaniu przeszkód konieczny jest moment kilkukrotnie większy od tego rozwijanego przez napęd w czasie jazdy ustalonej pojazdu po płaskim i utwardzonym terenie. Wymaganie dużego momentu obrotowego dotyczy krótkich przedziałów czasu. Rozwiązanie tego problemu przy pomocy wysokoobrotowych silników walcowych wymaga stosowania przekładni mechanicznych i sprzęgieł. Komplikuje to układ napędowy, zmniejsza sprawność, podwyższa cenę i obniża niezawodność pracy. Dlatego, w pojazdach wolnobieżnych, jako napęd coraz częściej stosuje się wolnoobrotowe silniki tarczowe zabudowane w kołach jezdnych. Zastosowanie silników tarczowych zabudowanych bezpośrednio w kołach pojazdów elektrycznych

poruszających się ze znaczną prędkością powoduje niekorzystny wzrost masy nieresorowanej pojazdu, co pogarsza amortyzację pojazdu.

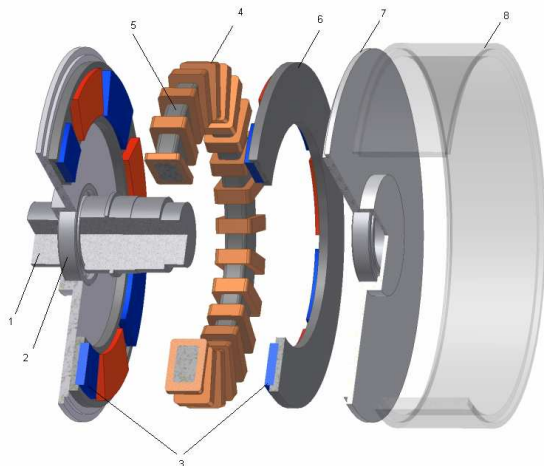
Obecnie na rynku dominującymi są maszyny o strumieniu promieniowym, których proces projektowania i produkcji został poznany w przeciągu kilku ostatnich dziesięcioleci. Dla niektórych zastosowań, gdzie czynnikiem ograniczającym jest na przykład długość osiowa maszyny, trafniejszym wyborem mogą być silniki o strumieniu osiowym. Szczególną zaletą tego typu maszyn jest ich kompaktowa konstrukcja oraz niewielki wymiar w kierunku osiowym, co w niektórych przypadkach może mieć znaczenie decydujące.

Silniki tarczowe mogą być wykonane w wielu różnych konfiguracjach różniących się geometrią maszyny, jak również sposobem wykonania poszczególnych jej elementów. Wyróżnia się maszyny, w których wirnik w postaci stalowej tarczy z magnesami jest elementem zewnętrznym, bądź też wewnętrznym. Rdzeń stojana może być uzłobkowany, bezzłobkowy lub też silnik może być wykonany jako bezrdzeniowy. Struktura maszyny zależy przede wszystkim od rodzaju zastosowania i pożądaných właściwości.

W niniejszym artykule przedstawiono charakterystykę wybranych typów silników tarczowych z magnesami trwałymi. Omówiono bezzłobkowy silnik typu Torus NS, silnik typu Torus S - NN, silnik typu Torus S - NS, silnik z biegunami wydatnymi w stojanie, silnik z wirnikiem wewnętrznym oraz silnik bezrdzeniowy.

## 2. Torus NS

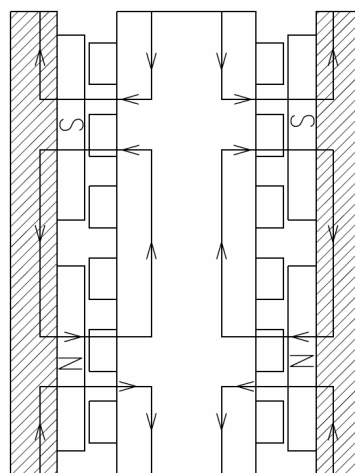
Silnik tarczowy typu Torus NS (rys. 1) jest jedną z podstawowych a zarazem najprostszych konstrukcji silników o strumieniu osiowym. Człon NS w nazwie pochodzi od angielskiego słowa „Non Slotted” i oznacza „nie użłobkowany”.



Rys.1. Model silnika tarczowego typu Torus NS: 1 - wał, 2 - łożysko, 3 - magnesy jednakowej biegunowości, 4 - cewka uzwojenia, 5 - rdzeń stojana, 6 - tarcza wirnika, 7 - tarcza łożyskowa, 8 - kadłub

Obwód elektromagnetyczny tego typu silnika składa się z dwóch tarcz wirnika i umieszczonego pomiędzy nimi stojana. Rdzeń stojana wykonany jest z warstwowo nawiniętej taśmy z blachy elektrotechnicznej. Cechą charakterystyczną tego typu maszyn jest uzwojenie zbudowane z oddzielnych cewek, nawiniętych wokół toroidalnego rdzenia. Cewki mogą być ze sobą łączone w różny sposób tworząc wielofazowe uzwojenie. Tarcze wirnika wykonane są z litej stali. Na ich wewnętrznej powierzchni zamocowane są magnesy trwałe, które wytwarzają strumień w kierunku osiowym. Ze względu na zastosowany rodzaj uzwojenia, magnesy umieszczone muszą być w ten sposób, że naprzeciw magnesu jednej tarczy polaryzacji N leży magnes drugiej tarczy również polaryzacji N. Taki sposób ułożenia magnesów powoduje, że strumienie magnetyczne wytworzone przez magnesy o polaryzacji N z obu tarcz po przejściu przez szczeliny powietrzne sumują się w rdzeniu stojana i następnie po ponownym przejściu przez szczeliny wracają do tarcz wirnika poprzez magnesy o polaryzacji S. Ze względu na sumowanie się strumieni w rdzeniu stojana, grubość tarczy rdzenia stojana jest około dwa

razy większa od grubości każdej z tarcz wirnika. Rozpływ strumienia magnetycznego przedstawiono na rysunku 2.

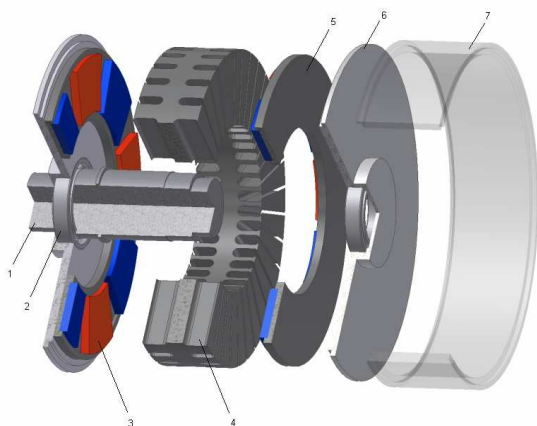


Rys 2. Rozpływ strumienia magnetycznego w silniku tarczowym typu Torus NS

Krótkie połączenia czołowe uzwojenia w silniku typu Torus NS ograniczają straty w miedzi, co przyczynia się do poprawy sprawności. Dzięki wyeliminowaniu zębów to się negatywnych zjawisk takich jak pulsacje w rozkładzie przestrzennym indukcji magnetycznej w szczelinie oraz nasycanie się zębów. Z uwagi na dość dużą efektywną szczelinę powietrzną ograniczony został efekt rozmagnesowującego oddziaływania twornika na magnesy trwałe, jednakże duża szczelina powietrzna ogranicza też wytwarzanie strumienia głównego w maszynie.

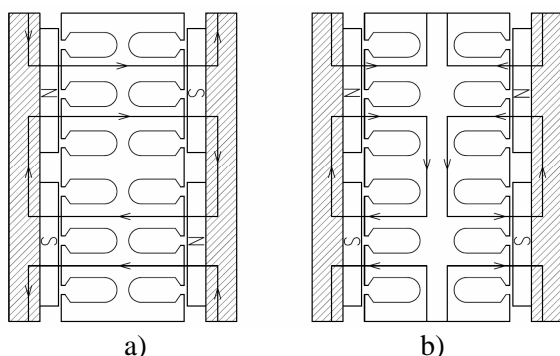
## 3. Torus S

Silnik typu Torus S ma budowę podobną do omawianego wcześniej silnika typu Torus NS. Jediną różnicą jest rdzeń stojana, który w przypadku silnika Torus S wykonywany jest jako użłobkowany ( człon S w nazwie – „Slot- ted” ). Wirnik ma konstrukcję identyczną jak w maszynie bezżłobkowej tzn. składa się z dwóch stalowych tarcz, do których przymocowane są magnesy trwałe. Model silnika tarczowego Torus S przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Model silnika tarczowego typu Torus S - NN: 1 - wał, 2 - łożysko, 3 - magnes trwały, 4 - rdzeń stojana, 5 - tarcza wirnika, 6 - tarcza łożyskowa, 7 - kadłub

W silniku typu Torus S dopuszcza się dwa sposoby rozmieszczenia magnesów na tarczach wirnika. Pierwszy to magnesy różnej biegunowości umieszczone naprzeciw siebie i wówczas silnik określamy jako Torus S - NS, natomiast drugi to umieszczenie naprzeciw siebie magnesów tej samej biegunowości i wtedy silnik określamy jako Torus S - NN. Różne warianty umiejscowienia magnesów wiążą się z różnym rozplywem strumienia magnetycznego. W silniku Torus S - NS strumień magnetyczny wytworzony przez magnes N przynależny do jednej tarczy wirnika płynie w kierunku osiowym przez całą szerokość maszyny do magnesu polaryzacji S na drugiej tarczy wirnika, natomiast w maszynie typu Torus S - NS rozplyw strumienia jest identyczny jak dla silnika Torus NS.



Rys 4. Rozplyw strumienia magnetycznego w silniku tarczowym typu: a) Torus S - NS, b) Torus S - NN

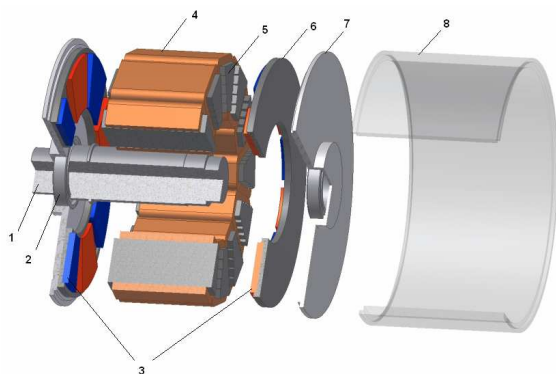
Różny rozplyw strumienia wiąże się też z różnicami w wymiarach gabarytowych poszczególnych elementów maszyny.

W przypadku silnika Torus S - NS przez jarzmo stojana nie przepływa strumień główny, więc może być ono cieńsze niż w przypadku silnika Torus S - NN. Ta różnica powoduje, że maszyny typu Torus S - NS charakteryzują się mniejszymi stratami w żelazie oraz lepszym stosunkiem mocy do masy. Pomiędzy maszynami Torus S - NS a Torus S - NN istnieje też różnica w rodzaju uzwojenia. O ile w maszynach Torus S - NN można stosować zarówno cewki nawijane wokół rdzenia, jak i cewki nawijane z poskokiem w sąsiadujących żłobkach przy tej samej tarczy wirnika, to w silnikach typu Torus S - NS możliwe jest tylko zastosowanie tych drugich.

#### 4. Silnik z biegunami wydatnymi

Kolejnym rodzajem silnika tarczowego jest silnik z biegunami wydatnymi (rys.5). Składa się on z dwóch tarcz wirnika z magnesami trwałymi będących elementem zewnętrznym maszyny oraz wewnętrznego stojana. Stojan zbudowany jest z rdzeni ferromagnetycznych o kształcie trapezowym i nawiniętych na nich cewek. Cewki stojana mogą łączone być w różne układy tworząc tym samym uzwojenie jednopasmowe lub wielopasmowe.

Silniki z uzwojeniem jednopasmowym posiadają liczbę wydatnych biegunów stojana równą liczbie biegunów wirnika, natomiast dla silnika z uzwojeniem trójpasmowym liczba biegunów wirnika różni się od liczby biegunów stojana w stosunku np. 3/2 [5]. Istotnym zagadnieniem dla tego typu maszyn jest prawidłowy dobór szerokości magnesów na podziałce biegunowej. Poszukując optymalnego przekroju bieguna i wymiarów uzwojenia należy przeprowadzić wielowariantowe obliczenia modelu matematycznego, a następnie obliczenia z wykorzystaniem trójwymiarowej metody elementów skończonych.

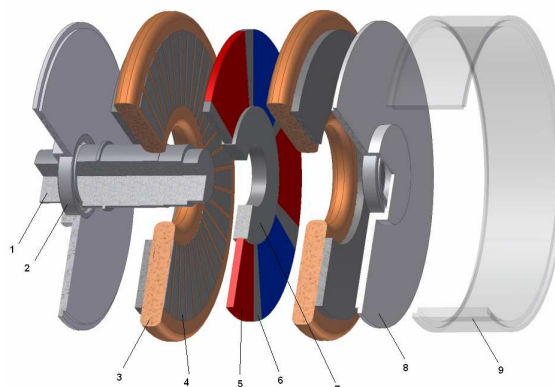


Rys.5. Model silnika tarczowego z biegunami wydatnymi: 1 - wał, 2 - łożysko, 3 – magnesy trwałe różnej biegunowości, 4 – cewka uzwojenia, 5 – rdzeń stojana, 6 – tarcza wirnika, 7 – tarcza łożyskowa, 8 - kadłub

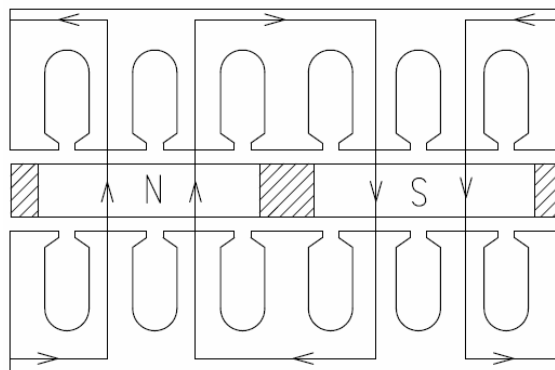
### 5. Silnik z wewnętrznym wirnikiem

Analizując różne rozwiązania silników tarczowych należy rozpatrzyć także silnik z dzielonym twornikiem (rys.6). Silnik dwutwornikowy ma wirnik z magnesami trwałymi połączony mechanicznie z wałem i umieszczony w środku między stojanami. „Tarcza” wirnika maszyny składa się jedynie z magnesów magnesowanych w kierunku osiowym. Przestrzeń pomiędzy magnesami różnoimiennych biegunów magnetycznych wypełniona jest materiałem niemagnetycznym, który jednocześnie powinien tworzyć sztywną strukturę wytrzymałą mechanicznie. Materiałem tym może być stal niemagnetyczna, aluminium bądź materiał z włókna szklanego lub węglowego nasyconego (utwardzonego) żywicą. Brak rdzenia magnetycznego wirnika sprawia, że maszyny te charakteryzują się bardzo wysokim stosunkiem osiąganej mocy do momentu bezwładności.

W silnikach z wirnikiem wewnętrznym istnieje kilka wariantów wykonania uzwojenia twornika. Każdy z dwóch rdzeni stojana może mieć strukturę pierścieniową ze żłobkami otwartymi po jednej stronie. Wielofazowe, symetryczne uzwojenie umieszczone jest wtedy w żłobkach stojanów zabudowanych w jednej obudowie. Innym wariantem jest bezżłobkowe wykonanie rdzenia stojana z owiniętymi wokół cewkami podobnie jak w silniku typu Torus NS. Brak żłobków stojana eliminuje wówczas występowanie momentu zaczepowego i przyczynia się do cichej pracy napędu.



Rys. 6. Model silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym: 1 - wał, 2 - łożysko, 3 – uzwojenie stojana, 4 – rdzeń stojana, 5 – magnesy trwałe, 6 – przekładka między magnesami, 7 – pierścień pod wał, 8 – tarcza łożyskowa, 9 – kadłub



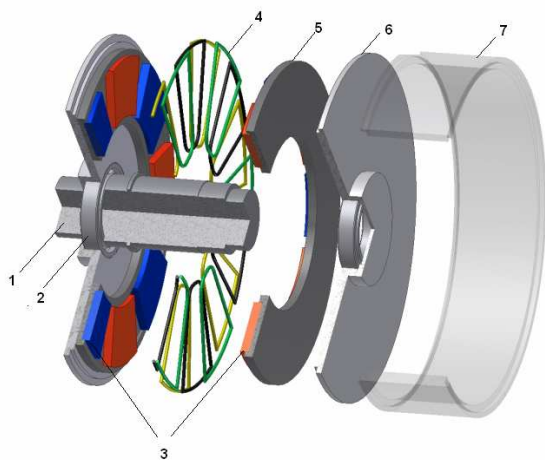
Rys. 7. Rozpływ strumienia magnetycznego w silniku tarczowym z wirnikiem wewnętrznym oraz użłobkowanym rdzeniem stojana.

### 6. Bezrdzeniowy silnik tarczowy

Ciekawą konstrukcją silników tarczowych, z uwagi na właściwości jakimi się cechuje, jest silnik bezrdzeniowy (rys.8). Zbudowany jest on z dwóch tarcz wirnika z zamontowanymi magnesami trwałymi oraz z bezrdzeniowego uzwojenia umieszczonego pomiędzy nimi.

Brak rdzenia stojana powoduje, że silnik ten nie wytwarza momentu zaczepowego, co może być szczególnie korzystne w zastosowaniach takich jak precyzyjne serwonapędy, urządzenia pozycjonujące czy różnego rodzaju obrabiarki. Poza tym, wyeliminowane zostały straty w żelazie, straty histerezowe oraz straty od prądów wirowych, co znacznie wpływa na poprawę sprawności silnika. Wadą silnika bezrdzeniowego jest duża grubość efektywnej szczeliny powietrznej, co uniemożliwia osiągnięcie wysokich wartości indukcji magnetycznej w szczelinie. Model bez-

rdzeniowego silnika tarczowego przedstawiono na rysunku 8.



Rys 8. Model bezrdzeniowego silnika tarczowego: 1 - wał, 2 - łożysko, 3 – magnesy różnej biegunowości, 4 - bezrdzeniowe uzwojenie, 5 - tarcza wirnika, 6 – tarcza łożyskowa, 7 – kadłub

## 7. Silnik tarczowy o konstrukcji wielostopniowej

W przypadku konieczności uzyskania dużej wartości momentu, dobrym rozwiązaniem jest wielostopniowa konfiguracja maszyny tarczowej. W tym rozwiązaniu występuje kilka segmentów złożonych z tarcz wirnika oraz rdzeni stojana. Wartość wytwarzanego momentu elektromagnetycznego dla tego rodzaju konstrukcji silników tarczowych ograniczona jest przez osiowe siły przenoszone przez łożyska, integralność połączeń pomiędzy wałem a tarczą i sztywnością dysku.

## 8. Podsumowanie

Silniki o strumieniu osiowym stanowią alternatywne rozwiązanie do powszechnie stosowanych dziś silników cylindrycznych. Dla niektórych zastosowań wykorzystanie silników tarczowych wydaje się być rozwiązaniem niosącym szereg korzyści między innymi ograniczenie długości osiowej maszyny.

Z uwagi na fakt, że są to konstrukcje o dużym promieniu, szczególnie ważnym a zarazem trudnym zagadnieniem jest utrzymanie stałej grubości szczeliny powietrznej realizowane to jest poprzez odpowiednią konstrukcję mechaniczną wirnika i stojana. Kolejnym trudnym zagadnieniem w silnikach tarczowych jest odprowadzanie ciepła, problem ten uwidacznia się

szczególnie w bezrdzeniowych silnikach tarczowych gdzie uzwojenie jest zalane żywicą epoksydową.

Przedstawione w artykule wybrane rodzaje rozwiązań silników tarczowych stanowią tylko część zbioru możliwych do wykonania konstrukcji. Każdy z omówionych silników cechuje się wysoką sprawnością, wysokim współczynnikiem moc/masa oraz moment/masa.

Moment elektromagnetyczny silnika tarczowego o strukturze „double - side” ogólnie opisuje zależność [5]:

$$M_{em} = 2 \cdot \pi B_m A_w r_z^3 k_D \cdot (1 - k_D^2) \quad (1)$$

gdzie:

$$k_D = \frac{r_w}{r_z} \quad (2)$$

$r_w$  – promień wewnętrzny stojana,

$r_z$  – promień zewnętrzny stojana,

$B_m$  – maksymalna wartość indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej,

$A_w$  – okład prądowy na promieniu wewnętrznym stojana,

$$A_w = \frac{m \cdot N_1 \cdot I}{\pi \cdot r_w} \quad (3)$$

$m$  – liczba faz uzwojenia,

$N_1$  – liczba zwojów fazowych,

$I$  – prąd znamionowy.

W celu jednoznacznej odpowiedzi na pytanie, która z konstrukcji cechuje się najwyższym stosunkiem uzyskiwanej mocy (momentu) do masy silnika należy przeprowadzić wielowariantowe obliczenia z wykorzystaniem trójwymiarowych modeli polowych oraz wykonać badania laboratoryjne omawianych rodzajów silników.

## Literatura

- [1]. Cierzniewski P.: *Bezrdzeniowy silnik tarczowy z magnesami trwałymi*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr.77 – 2007.
- [2]. Glinka T., Tomaszewicz W.: *Silniki tarczowe*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr.80 – 2008
- [3]. Gieras J., Wang R, Kamper M.: *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 2004.
- [4]. Łukaniszyn M., Wróbel R., Jagieła M.: *Komputerowe modelowanie bezszczotkowych silników tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi*. Studia i monografie, Politechnika Opolska, 2002.

[5]. Mendrela E., Łukaniszyn M., Macek Kamińska K.: *Tarczowe silniki prądu stałego z komutacją elektroniczną*. Wydawnictwo Gnome, 2002.

[6]. Parviainen A.: *Design of Axial-Flux Permanent Magnet low-speed machines and performance comparison between radial – flux and axial – flux machines*. Lappeenranta teknillinen yliopisto, Digipaino 2005..

[7]. Wolnik T.: *Modelowanie polowe silnika bezszczotkowego tarczowego do napędu pojazdów samochodowych*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Zakład Maszyn i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, Gliwice 2009.

[8]. Wiak S., Welfe H.: *Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2001.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy*

### **Autorzy**

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka

[tadeusz.glinka@polsl.pl](mailto:tadeusz.glinka@polsl.pl)

Mgr inż. Emil Król

[e.krol@komel.katowice.pl](mailto:e.krol@komel.katowice.pl)

Mgr inż. Andrzej Białas

[a.bialas@komel.katowice.pl](mailto:a.bialas@komel.katowice.pl)

Mgr inż. Tomasz Wolnik

[t.wolnik@komel.katowice.pl](mailto:t.wolnik@komel.katowice.pl)

Branżowy Ośrodek Badawczo Rozwojowy  
Maszyn Elektrycznych „KOMEL”

40-203 Katowice,

Al. Roździeńskiego 188.

### **Recenzent**

Prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk