

**Tomasz Wolnik**  
BOBRME KOMEL, Katowice

## ANALIZA PORÓWNAWCZA WYBRANYCH MODELI SILNIKÓW TARCZOWYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

### ANALYSIS AND COMPARISON OF SELECTED MODELS OF AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET MOTORS

**Streszczenie:** W niniejszym artykule przedstawiono analizę porównawczą dwóch wybranych konstrukcji silników tarczowych z magnesami trwałymi, które zdaniem autora cechują się najwyższymi współczynnikami gęstości momentu oraz gęstości mocy. W publikacji omówiono budowę obwodu elektromagnetycznego obu silników, przedstawiono wyniki analitycznych obliczeń obwodowych oraz wyniki trójwymiarowych obliczeń MES, które zweryfikowano z wynikami badań laboratoryjnych. W podsumowaniu zawarto wnioski i uwagi do tematu.

**Abstract:** This paper presents analysis and comparison of two selected construction of axial flux permanent magnet motors, which according to the author are characterized by the highest ratio of the torque density and power density. In this article author presents the construction of an electromagnetic circuits of these motors. The analytical circuit calculations have been described and the results of three-dimensional field calculations have been presented. The calculation results were verified with the result of the test bench. The summary contains the conclusions and comments.

**Słowa kluczowe:** silniki tarczowe, silniki z magnesami trwałymi  
**Keywords:** Axial flux motors, motors with permanent magnet

#### 1. Wprowadzenie

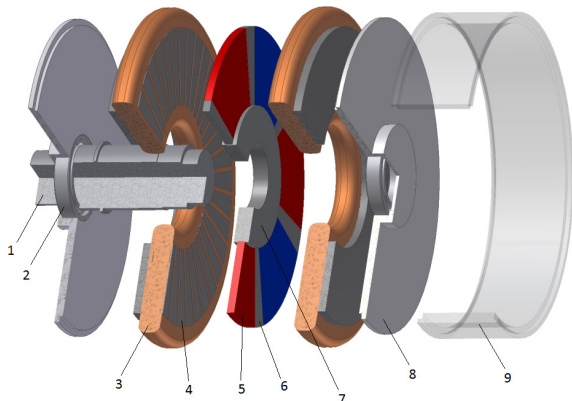
Silniki tarczowe z magnesami trwałymi są konstrukcjami cechującymi się wysokimi współczynnikami gęstości momentu oraz gęstości mocy. Jedną z ich głównych zalet jest ograniczona długość osiowa, która w pewnych przypadkach może być kryterium decydującym o doborze jednostki napędowej do odpowiedniego rodzaju napędu. Moment elektromagnetyczny tego typu konstrukcji zależy w dużej mierze od wymiarów średnicy zewnętrznej i wewnętrznej tarcz stojana i wirnika. Obwód elektromagnetyczny silników tarczowych może być wykonany w wielu konfiguracjach różniących się strukturą maszyny, jak również sposobem wykonania poszczególnych jej elementów. Wyróżnia się maszyny, w których wirnik jest elementem zewnętrznym, bądź też wewnętrznym. Rdzeń stojana może być ułożkowy, bezłożkowy lub też silnik może być wykonany jako bezrdzeniowy. Struktura maszyny zależy przede wszystkim od zastosowania i pożądanych właściwości [1]. W niniejszym artykule przedstawiono dwie konstrukcje silników tarczowych, które cechują się najwyższymi współczynnikami gęstości mocy i momentu spośród rodziny maszyn tarczowych z magne-

sami trwałymi. Są to silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym oraz silnik tarczowy typu TORUS S-NS. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń oraz wyniki badań laboratoryjnych zaprojektowanych i wykonanych modeli silników, jak również omówiono konstrukcję obwodu elektromagnetycznego każdego z silników.

#### 2. Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym

Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym zbudowany jest z dwóch rdzeni stojana stanowiących zewnętrzną część obwodu elektromagnetycznego oraz wewnętrznego wirnika. Cechą charakterystyczną tego typu rozwiązania jest wirnik z magnesami trwałymi umieszczony między dwoma stojanami (rys.1). Tarcza wirnika składa się z magnesów magnesowanych w kierunku osiowym i elementu wsporczo umożliwiającego odpowiednie usytuowanie magnesów. Przestrzeń wolna pomiędzy magnesami, a elementem wsporczym wypełniona jest materiałem niemagnetycznym, który jednocześnie tworzy sztywną strukturę wytrzymałą mechanicznie [2]. Na rysunku 2 przedstawiono

wykonany model wirnika silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym. Brak ferromagnetycznego jarzma wirnika sprawia, że taka konstrukcja cechuje się niewielką masą i niewielkim momentem bezwładności.



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



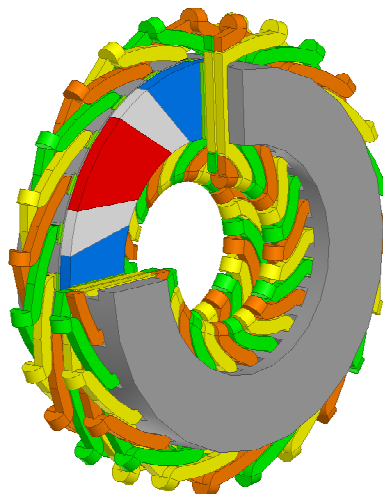
Rys. 2. Model wykonanego wirnika silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym

Rdzeń stojana silnika wykonany jest w postaci zwijki z taśmy prądnicowej przymocowanej do pierścienia umożliwiającego montaż z tarczą łożyskową. Takie wykonanie pociąga za sobą pewne trudności dotyczące między innymi utrzymania odpowiedniego współczynnika pakietowania oraz wykonania żłobków [4].

Kształt żłobka (żłobek otwarty) wybrano ze względu na dostępne techniczne możliwości wykonania modelu. W celu zmniejszenia pulsacji momentu oraz poprawy rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej do zamknięcia żłobków użyto klina magnetycznego o niewielkiej przenikalności magnetycznej

względnej [2]. Okazuje się bowiem, że zastosowanie klinów magnetycznych w pewnym przedziale ich przenikalności magnetycznej nie powoduje obniżenia momentu elektromagnetycznego, ograniczając jednocześnie wartość momentu zaczepowego i poprawiając rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie [2].

Kształt magnesów trwałych zaprojektowano tak, aby do minimum ograniczyć wartość momentu zaczepowego, który w silniku z otwartymi żłobkami może mieć znaczny udział w pulsacjach momentu elektromagnetycznego [2]. Uzwojenie stojana jest uzwojeniem trójfazowym i składa się z dwóch odrębnych uzwojeń umieszczonych w dwóch rdzeniach stojana.



Rys. 3. Model obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym

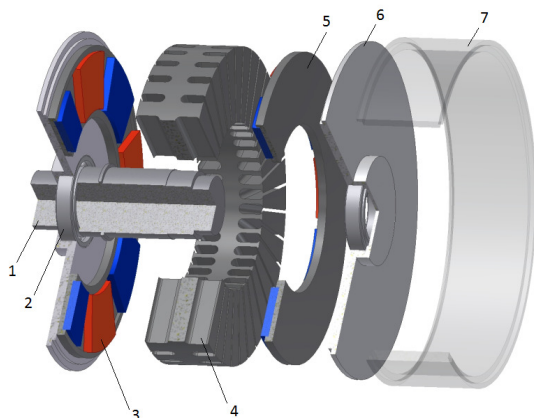
Na podstawie powyżej przedstawionej koncepcji zaprojektowano i wykonano model silnika tarczowego o danych znamionowych oraz gabarytach przedstawionych w tabeli nr 1.

Tabela 1. Podstawowe dane zaprojektowanego silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym

Dane znamionowe silnika	
Moc znamionowa silnika	10 kW
Prędkość znamionowa	2000 obr/min
Moment znamionowy	48 Nm
Prąd znamionowy	115 A
Gabaryty	
Średnica zewnętrzna silnika	342 mm
Wznios osi wału	180 mm
Długość silnika bez wału	117 mm
Długość silnika łącznie z wałem	194 mm
Masa silnika	35 kg

### 3. Silnik tarczowy typu TORUS S-NS

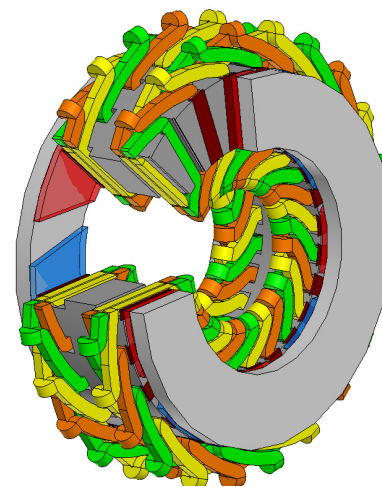
Silnik tarczowy TORUS S-NS jest odwróconą konstrukcją silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym. Obwód elektromagnetyczny zbudowany jest z dwóch zewnętrznych, stalowych tarcz wirnika z magnesami trwałymi oraz wewnętrznego, uzłobkowanego rdzenia stojana, w którym znajduje się uzwojenie (rys.4). Rdzeń stojana podobnie jak rdzeń silnika z wirnikiem wewnętrznym wykonany jest z warstwowo nawiniętego paska blachy, w którym wykonane są żłobki. Różnica pomiędzy nimi jest taka, że w przypadku silnika TORUS S-NS żłobki wykonane są po obu stronach rdzenia. W środkowej części rdzenia znajduje się pierścień umożliwiający mechaniczne połączenie stojana z kadłubem silnika. Wirnik maszyny składa się ze stalowych tarcz połączonych z wałem, do których przymocowane są magnesy trwałe (rys.5). Magnesy mocowane są w taki sposób, że na przeciw magnesu biegunowości "N" jednej tarczy wirnika leży magnes biegunowości "S" drugiej tarczy [3]. Sugeruje to również człon "NS" w nazwie silnika, mówiący o różnoimiennych magnesach naprzeciw siebie. TORUS S w nazwie silnika, a właściwie sama litera "S" oznacza stojan uzłobkowany (ang. slotted). Zaprojektowany kształt magnesów trwałych jest taki sam, jak kształt magnesów silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym.



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



Rys. 5. Model wykonanego wirnika silnika tarczowego TORUS S-NS



Rys. 6. Model obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego TORUS S-NS

Na podstawie powyższej koncepcji zaprojektowano model silnika, którego podstawowe wymiary obwodu elektromagnetycznego podano w tabeli nr 2.

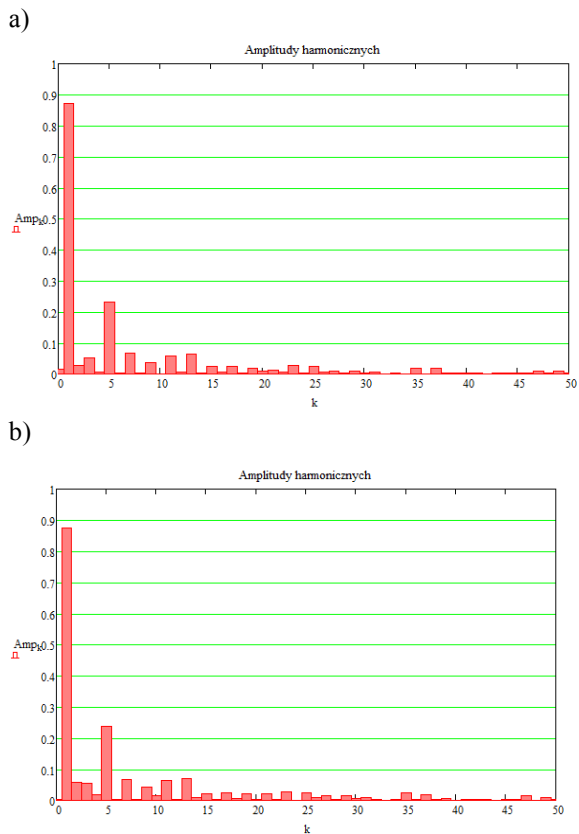
Tabela 2. Podstawowe dane zaprojektowanego silnika tarczowego TORUS S-NS

Dane znamionowe silnika	
Moc znamionowa silnika	10 kW
Prędkość znamionowa	2000 obr/min
Moment znamionowy	48 Nm
Prąd znamionowy	120 A
<b>Gabaryty</b>	
Średnica zewnętrzna silnika	342 mm
Wznios osi wału	180 mm
Długość silnika bez wału	127 mm
Długość silnika łącznie z wałem	217 mm
Masa silnika	37.1 kg

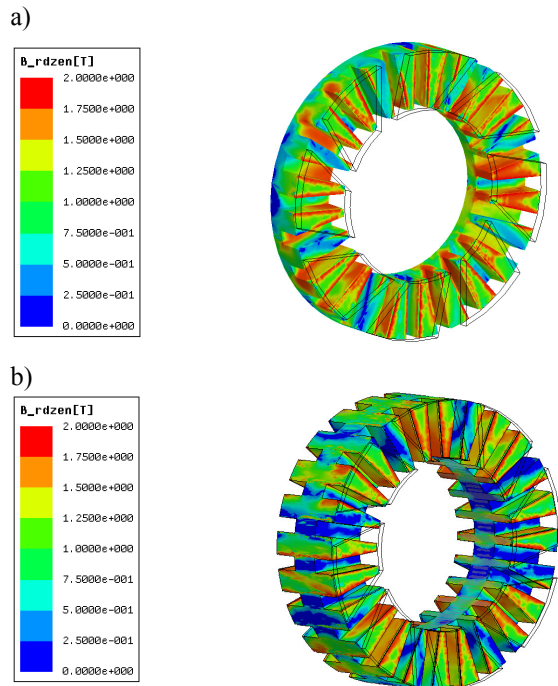
### 4. Wyniki obliczeń oraz wyniki badań laboratoryjnych

Przed przystąpieniem do projektowania silników założono dwuetapowy proces obliczeń. Ponadto przyjęto, że zaprojektowane silniki będą posiadały następujące dane:  $P=10$  kW,  $n=2000$  obr/min,  $2p=8$ .

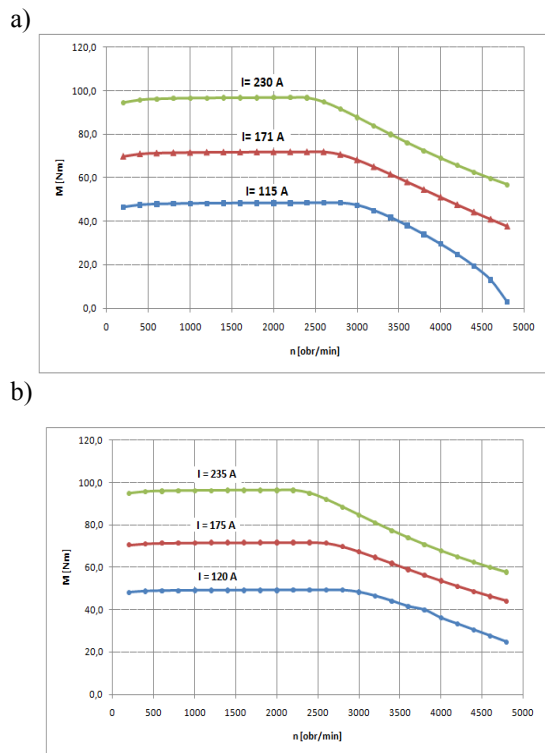
W pierwszej kolejności został opracowany algorytm umożliwiający przeprowadzenie obliczeń analitycznych silników. Na podstawie otrzymanych wyników analitycznych zaprojektowano trójwymiarowe modele silników do obliczeń MES i przeprowadzono wielowariantowe obliczenia obwodu elektromagnetycznego. Na rysunkach 7-9 oraz w tabeli 3 przedstawiono porównanie wybranych wyników obliczeń silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym oraz silnika tarczowego TORUS S-NS.



Rys. 7. Porównanie wyników obliczeń amplitud poszczególnych harmonicznych indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej dla silnika tarczowego: a) z wirnikiem wewnętrznym, b) TORUS S-NS



Rys. 8. Porównanie wyników obliczeń rozkładu indukcji magnetycznej w rdzeniu stojana dla znamionowego punktu pracy dla silnika tarczowego: a) z wirnikiem wewnętrznym, b) TORUS S-NS



Rys. 9. Porównanie wyników obliczeń momentu na wale w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości prądów fazowych dla silnika tarczowego: a) z wirnikiem wewnętrznym, b) TORUS S-NS



Tabela 3. Wyniki obliczeń dla znamionowego punktu pracy silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym oraz silnika tarczowego TORUS S-NS

Parametr	Silnik z wirnikiem wewnętrznym	Silnik TORUS - NS
Moc mechaniczna [W]	10 114	10 289
Prędkość obrotowa [obr/min]	2000	2000
Moment na wale [Nm]	48,3	49,1
Prąd [A]	115	120
Napięcie zasilania [V]	57,4	57,9
Moc dostarczana do silnika [W]	10 920	11 087
Sprawność [%]	92,6	92,8
Pulsacje momentu [%]	10,38	13,3
Straty w miedzi [W]	632,5	688,7
Straty w żelazie [W]	78,8	32,8

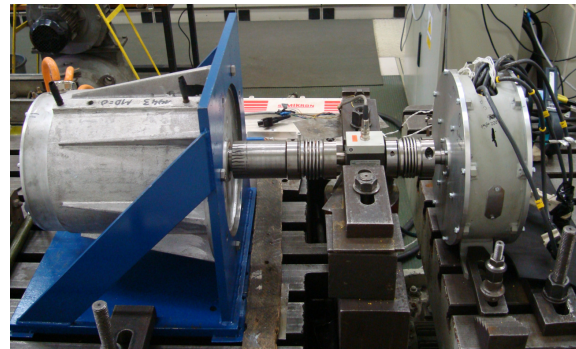
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń zaprojektowano i wykonano modele fizyczne silników. Należy zaznaczyć, że maszyny zaprojektowano tak, aby moc znamionowa obu wynosiła  $P=10$  kW, a prędkość  $n=2000$  obr/min. W związku z tym, wartość znamionowa prądu silnika TORUS S-NS podana w tabeli 3 jest nieco wyższa, niż wartość znamionowego prądu silnika z wirnikiem wewnętrznym. Uwzględniając, że dane nawojowe obu maszyn są takie same, gęstość prądu dla znamionowego punktu pracy w uzwojeniu silnika tarczowego TORUS S-NS jest nieznacznie większa, niż gęstość prądu silnika z wirnikiem wewnętrznym. Aby prawidłowo porównać współczynniki gęstości momentu oraz gęstości mocy obu maszyn w tabeli 4 podano wyniki badań laboratoryjnych dla takich samych wartości prądu stojana.

Tabela 4. Wyniki badań laboratoryjnych silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym oraz silnika tarczowego TORUS S-NS dla prądu stojana  $I=115$  A

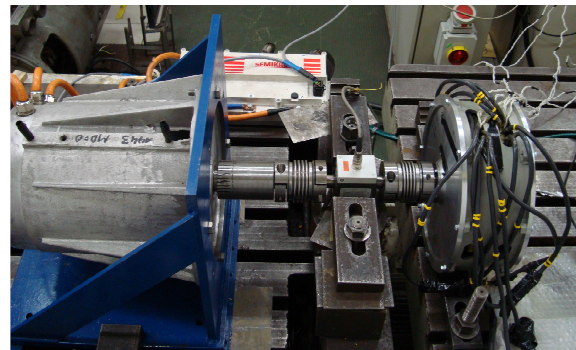
Parametr	Silnik z wirnikiem wewnętrznym	Silnik TORUS - NS
Prąd [A]	115	115
Prędkość obrotowa [obr/min]	2000	2000
Napięcie zasilania [V]	79,5	81,3
Moc dostarczana do silnika [W]	11093	11607
Moc na wale silnika [W]	9885	10470
Moment na wale [Nm]	47,2	50
Sprawność [%]	89,1	90,2

Na rysunku 10 przedstawiono modelowe silniki tarczowe na stanowisku badawczym.

a)



b)



Rys. 10. Modele silników tarczowych na stanowisku badawczym a) silnik z wirnikiem wewnętrznym, b) silnik Torus S-NS

## 5. Porównanie konstrukcji silników

Porównania konstrukcji silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym oraz silnika tarczowego typu TORUS S-NS dokonano w oparciu o wykonane modele silników w ramach projektu badawczego. Silniki zostały zaprojektowane tak, aby możliwym było porównanie współczynników gęstości momentu i mocy. W tym celu założono wartości indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej oraz gęstości prądu w uzwojeniu stojana na podobnym poziomie (rys.7). Ponadto kształt i wymiary zębów, dane nawojowe (tzn. ilość zwojów, średnica drutu nawojowego itp.) oraz kształt magnesów trwałych dla obydwu silników są takie same.

Porównania i oceny obu przedstawionych konstrukcji silników dokonano głównie w zakresie uzyskanych współczynników gęstości mocy oraz gęstości momentu. W związku z tym, zsumowano masy poszczególnych elementów konstrukcyjnych każdego z silników z podziałem na elementy czynne obwodu elektromagnetycznego oraz podzespoły mechaniczne.

Wartości masy obu grup, każdego z silników przedstawiono w tabeli 5. Dla obu grup bazując na danych z tabeli 4 oraz 5 wyznaczono współczynniki gęstości mocy (momentu) dające podstawę do oceny porównywanych konstrukcji (tabela 6).

*Tabela 5. Porównanie masy elementów konstrukcyjnych silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym oraz silnika tarczowego TORUS S-NS*

	Silnik z wirnikiem wewnętrznym	Silnik TORUS - NS
Rodzaj podzespołów	Masa [kg]	Masa [kg]
Obwód elektromagnetyczny	12.7	17.5
Podzespoły mechaniczne	22.3	19.6
Razem	35.0	37.1

*Tabela 6. Obliczone współczynniki gęstości mocy oraz gęstości momentu dla silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym oraz silnika tarczowego TORUS S-NS*

	Silnik z wirnikiem wewnętrznym	Silnik TORUS - NS
Współczynnik gęstości mocy (uwzględniając jedynie masę obwodu elektromagnetycznego)	0,778 kW/kg	0,598 kW/kg
Współczynnik gęstości mocy (uwzględniając masę całego silnika)	0,282 kW/kg	0,282 kW/kg
Współczynnik gęstości momentu (uwzględniając jedynie masę obwodu elektromagnetycznego)	3,72 Nm/kg	2,86 Nm/kg
Współczynnik gęstości momentu (uwzględniając masę całego silnika)	1,35 Nm/kg	1,35 Nm/kg

## 6. Podsumowanie

Analizując wyniki przedstawione w tabeli 6 można zauważyć, że silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym posiada wyższe współczynniki gęstości mocy oraz gęstości momentu, niż silnik TORUS S-NS, biorąc pod uwagę jedynie elementy czynne obwodu elektromagnetycznego. Porównując te same współczynniki, ale

z uwzględnieniem masy całego silnika okazuje się, że są one takie same dla obu konstrukcji silników. W związku z powyższym można stwierdzić, że nie należy pomijać udziału podzespołów mechanicznych w końcowej ocenie współczynników gęstości mocy i momentu danego silnika. Masa elementów mechanicznych (niezbędnych) w przypadku silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym jest o prawie 80 % większa od masy elementów obwodu elektromagnetycznego odpowiedzialnych za wytworzenie odpowiedniego momentu elektromagnetycznego. W przypadku silnika TORUS S-NS różnica ta jest mniejsza i wynosi ok. 12%. Analizując otrzymane wyniki należy mieć na uwadze, że wykonane modele silników są jedynie prototypami, w związku z powyższym możliwym jest zoptymalizowanie ich konstrukcji w celu zmniejszenia masy silników, a tym samym zwiększenia ich współczynników gęstości mocy i momentu. Dotyczy to głównie podzespołów mechanicznych. W tabeli 7 podano szacunkowe wartości masy poszczególnych grup podzespołów konstrukcyjnych jakie można uzyskać między innymi poprzez zastąpienie części stalowych elementów mechanicznych elementami aluminiowymi.

*Tabela 7. Porównanie masy elementów konstrukcyjnych silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym oraz silnika tarczowego TORUS S-NS po przeprowadzeniu modyfikacji*

	Silnik z wirnikiem wewnętrznym	Silnik TORUS - NS
Rodzaj podzespołów	Masa [kg]	Masa [kg]
Obwód elektromagnetyczny	12.7	16.0
Podzespoły mechaniczne	13.5	14.8
Razem	26.2	30.8

Dla danych przedstawionych w tabeli 7 oraz w tabeli 4 otrzymuje się następujące współczynniki gęstości mocy oraz gęstości momentu uwzględniając masę całego silnika - tabela 8.

*Tabela 8. Obliczone współczynniki gęstości mocy oraz gęstości momentu dla silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym oraz silnika tarczowego TORUS S-NS po przeprowadzeniu modyfikacji*

	Silnik z wirnikiem wewnętrznym	Silnik TORUS - NS
Współczynnik gęstości mocy (uwzględniając masę całego silnika)	0,377 kW/kg	0,340 kW/kg
Współczynnik gęstości momentu (uwzględniając masę całego silnika)	1,8 Nm/kg	1,62 Nm/kg

## 7. Literatura

- [1]. Glinka T., Król E., Białas A., Wolnik T.: *Silniki tarczowe z magnesami trwałymi jako napęd pojazdów wolnobieżnych - przegląd rozwiązań konstrukcyjnych*, Przegląd Elektrotechniczny 3/2011, 1–4.
- [2]. Glinka T., Wolnik T., Król E.: *Projekt silnika tarczowego z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny 11/2011, str. 95–99.
- [3]. Glinka T., Wolnik T., Król E.: *Silnik tarczowy typu TORUS S-NS - obliczenia obwodu elektromagnetycznego*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne 91/2011 str. 81-86.
- [4]. Glinka T., Wolnik T., *Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym*, Napędy i sterowanie 12/2011, str. 18–22.
- [5]. Gieras J., Wang R., Kamper M.: *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London 2004.

### Autor

mgr inż. Tomasz Wolnik  
 E-mail t.wolnik@komel.katowice.pl  
 Branżowy Ośrodek Badawczo Rozwojowy  
 Maszyn Elektrycznych KOMEL  
 40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188