

Porównanie współczynnika gęstości momentu silnika tarczowego oraz silnika cylindrycznego z magnesami trwałymi

Streszczenie. W artykule przedstawiono dwie konstrukcje silników z magnesami trwałymi. Pierwsza z nich to klasyczny silnik cylindryczny z magnesami trwałymi (IPM) o promieniowym rozkładzie linii głównego strumienia magnetycznego, natomiast drugi to silnik tarczowy z magnesami trwałymi o osiowym strumieniu głównym pola magnetycznego. W publikacji dokonano porównania współczynnika gęstości momentu obu konstrukcji, który definiowany jest jako moment na wale silnika uzyskany z jednostki masy lub jednostki objętości. Równolegle dokonano analizy uwzględniając masę jedynie obwodu elektromagnetycznego, jak również masę całego silnika. Porównania dokonano z uwzględnieniem porównywalnych warunków pracy obu maszyn. Ponadto, w publikacji przedstawiono najważniejsze wady i zalety obu konstrukcji pozwalające określić przydatność do zastosowania w wybranych aplikacjach.

Abstract. This paper presents two constructions of permanent magnet motors. The first one is cylindrical motor with permanent magnet (IPM), with radial distribution of the main lines of magnetic flux, while the second is axial flux permanent magnet motor. The article compares the ratio of torque density of two constructions, which is defined as torque on the motor shaft obtained from units of mass or volume. The analysis was made having regard to the weight of only the magnetic circuit, as well as the weight of the entire motors. Comparisons were made with regard to comparable working conditions of both machines. In addition, the paper presents the main advantages and disadvantages of both construction for determining the usefulness for use in some applications. **Comparison of the ratio of torque density of two designs of permanent magnet motors**

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, silniki tarczowe, silniki z magnesami trwałymi.

Keywords: electrical machines, axial flux motors, permanent magnet motors.

doi:10.12915/pe.2014.01.02

Wprowadzenie

W nowoczesnych napędach elektrycznych dużą uwagę poświęca się zagadnieniu minimalizacji masy i objętości jednostek napędowych. Istnieją aplikacje (np. takie jak bezzałogowe samoloty, parolotnie itp.), dla których masa oraz gabaryt jednostki napędowej (przy zachowaniu odpowiedniej wartości momentu znamionowego) są parametrami kluczowymi, decydującymi w głównej mierze o możliwości jej zastosowania. Poza tym, bardzo istotną kwestią jest również zachowanie wysokiego współczynnika sprawności maszyny, szczególnie w przypadku jednostek zasilanych ze źródeł bateryjnych o ograniczonej pojemności. Obecnie silnikami o najwyższym współczynniku gęstości momentu oraz najwyższym współczynniku sprawności są maszyny z magnesami trwałymi. Istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych obwodu elektromagnetycznego maszyn z magnesami trwałymi. Prowadzone prace badawczo - rozwojowe w głównej mierze skupiają się na opracowywaniu rozwiązań pozwalających na uzyskanie wyższych wartości momentu elektromagnetycznego z danej objętości i masy elementów konstrukcyjnych przy jednoczesnej maksymalizacji sprawności maszyny.

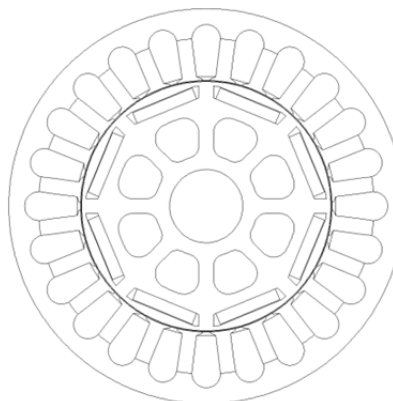
Silniki z magnesami trwałymi w ostatnim czasie cieszą się dużą popularnością. Oprócz klasycznych silników cylindrycznych projektowane są również silniki tarczowe z magnesami trwałymi o osiowym strumieniu głównym pola magnetycznego. Ograniczona długość osiowa obwodu elektromagnetycznego tego typu maszyn jest cechą, która w pewnych przypadkach może być decydującym kryterium doboru tego rodzaju jednostki napędowej do danego napędu. W przypadku jednak, gdy przestrzeń do zabudowy silnika nie jest ograniczona oraz gdy nie są narzucone inne ograniczenia dyskwalifikujące dane rozwiązanie powstaje pytanie, która konstrukcja obwodu elektromagnetycznego silnika - cylindryczna czy tarczowa pozwala na uzyskanie wyższych współczynników gęstości momentu przy zachowaniu takiej samej wartości współczynnika sprawności.

W niniejszym artykule przedstawiono i porównano dwie konstrukcje silników z magnesami trwałymi. Pierwszą z nich jest silnik cylindryczny z magnesami trwałymi, wykorzystywany w napędzie elektrycznej parolotni

plecakowej, natomiast druga to modelowy silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym, wykonany w ramach projektu badawczego. Głównym przyjętym kryterium porównawczym obu maszyn jest współczynnik gęstości momentu, którego wartość obliczono w dwojaki sposób. W pierwszym przypadku współczynnik ten wyznaczono uwzględniając masę jedynie elementów konstrukcyjnych wykorzystanych do budowy obwodu elektromagnetycznego, natomiast w drugim uwzględniono masę całego silnika łącznie z wszystkim podzespołami mechanicznymi. Takie podejście pozwala na szerszą analizę i ocenę obu konstrukcji. Porównania obu maszyn dokonano z uwzględnieniem porównywalnych warunków ich pracy tzn. pod uwagę wzięto rodzaj zastosowanych materiałów, wartości maksymalnej indukcji w szczelinie powietrznej, stopnia obciążenia prądowego, zakresu prędkości obrotowych i rodzaju zasilania.

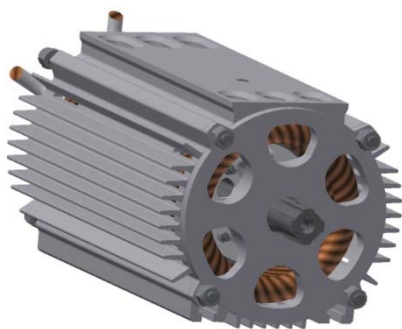
Silnik cylindryczny z magnesami trwałymi

Pierwszą z porównywanych konstrukcji jest silnik cylindryczny z magnesami trwałymi w wersji IPM (Interior Permanent Magnet). Obwód elektromagnetyczny silnika przedstawiono na rysunku 1. Silnik ten wykorzystywany jest w napędzie elektrycznej parolotni plecakowej produkowanej w Instytucie Komel.



Rys. 1. Model obliczeniowy obwodu elektromagnetycznego silnika cylindrycznego z magnesami trwałymi.

Obwód elektromagnetyczny silnika zbudowany jest podobnie jak klasyczny obwód silników z magnesami trwałymi. Stojan silnika wykonany jest ze spakietowanych blach prądnicowych. W żłobkach umieszczone zostało trójfazowe uzwojenie. Wirnik wykonany jest również jako pakiet blach elektrotechnicznych, w którym umieszczono 8 biegunów magnetycznych.



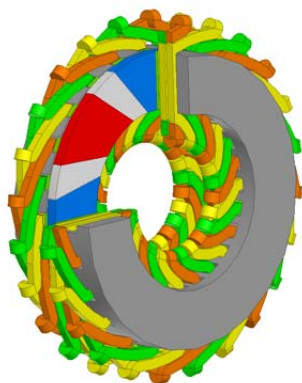
Rys.2. Model wykonanego silnika cylindrycznego z magnesami trwałymi.

Tabela 1. Podstawowe dane zaprojektowanego silnika cylindrycznego z magnesami trwałymi.

Gabaryty	
Średnica zewnętrzna silnika	185 mm
Wznios osi wału	90 mm
Długość silnika bez wału	274.5 mm
Długość silnika łącznie z wałem	310.5 mm
Moment bezwładności	0.04 kgm ²

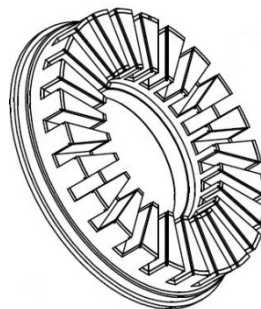
Silnik tarczowy z magnesami trwałymi

Spośród wielu konstrukcji silników tarczowych najwyższym współczynnikiem gęstości momentu cechuje się silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym [6]. Obwód elektromagnetyczny tego silnika zbudowany jest z dwóch rdzeni stojana oraz wirnika umieszczonego pomiędzy nimi. Model obliczeniowy obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym przedstawiono na rysunku 3. Tarcza wirnika składa się z magnesów magnesowanych w kierunku osiowym i elementu wsporczego umożliwiającego odpowiednie usytuowanie magnesów. Przestrzeń pomiędzy magnesami, a elementem wsporczym wypełniona jest materiałem niemagnetycznym, który jednocześnie tworzy sztywną strukturę wytrzymałą mechanicznie [3]. Brak ferromagnetycznego jarzma wirnika sprawia, że taka konstrukcja cechuje się niewielką masą i niewielkim momentem bezwładności wynoszącym 0.06 kgm².



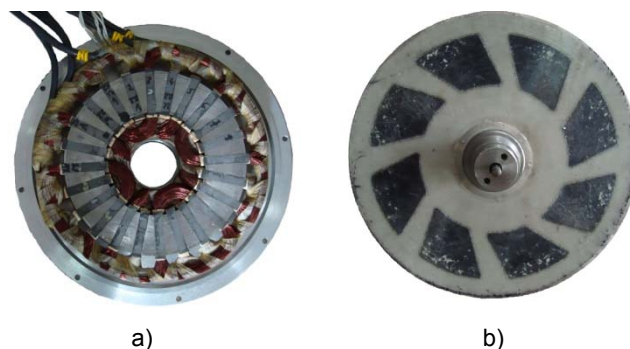
Rys.3. Model obliczeniowy obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym.

Rdzeń stojana wykonany w postaci zwijki z taśmy prądnicowej przymocowany do tarczy łożyskowej. Model wykonanego rdzenia stojana przedstawiono na rysunku 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 Vetroferit o niewielkiej przenikalności magnetycznej względnej [4]. 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 [4].



Rys.4. Model rdzenia stojana silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym.

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 [3]. Uzwojenie stojana jest uzwojeniem trójfazowym i składa się z dwóch odrębnych uzwojeń umieszczonych w dwóch rdzeniach stojana.



Rys.5. Model wykonanego a) uzwojonego stojana, b) wirnika 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 2.

Tabela 2. Podstawowe dane zaprojektowanego silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym.

Gabaryty	
Średnica zewnętrzna silnika	342 mm
Wznios osi wału	180 mm
Długość silnika bez wału	117 mm
Długość silnika łącznie z wałem	194 mm
Moment bezwładności	0.06 kgm ²

Wyniki obliczeń oraz wyniki badań laboratoryjnych

Prawidłowego porównania współczynnika gęstości momentu dwóch wybranych konstrukcji można dokonać jedynie wtedy, gdy warunki pracy obu maszyn są podobne. Oczywiście jest, że zastosowanie w jednej z konstrukcji np. materiałów o lepszych właściwościach magnetycznych (np. blach o lepszych charakterystykach magnesowania czy magnesów o większej gęstości energii) będzie miało bezpośrednie przełożenie na uzyskany współczynnik gęstości momentu. Poza rodzajem zastosowanych materiałów warunki pracy maszyny w znacznej mierze określone są przez: wartość indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej, poziom nasycen magnetycznych blachy stojana i wirnika, gęstość prądu w uzwojeniu stojana, rodzaj zasilania, zakres prędkości obrotowej oraz rodzaj chłodzenia.

Zarówno przedstawiony silnik tarczowy jak i silnik cylindryczny są maszynami synchronicznymi chłodzonymi powietrzem, wzbudzonymi magnesami trwałymi. Obie maszyny zasilane są z tego samego przemiennika częstotliwości (rys.6), który z kolei zasilany jest ze źródła napięcia stałego o maksymalnej wartości napięcia zasilania $U_{dc_{max}} = 140 \text{ V}$. Zastosowany falownik nie umożliwia realizacji tzw. "odwzbudzenia", dlatego też zakres prędkości obrotowej dla obu maszyn ograniczony jest maksymalną wartością napięcia zasilania DC. Dla obu maszyn znamionowa prędkość obrotowa wynosi $n = 2000 \text{ obr/min}$.



Rys 6. Przemiennik częstotliwości zasilający silnik tarczowy oraz silnik cylindryczny z magnesami trwałymi.

Parametrami maszyny elektrycznej najbardziej interesującymi z punktu widzenia użytkownika są uzyskiwana wartość momentu elektromagnetycznego oraz sprawność. Moment elektromagnetyczny maszyn cylindrycznych można opisać równaniem (1), natomiast maszyn tarczowych równaniem (2) [1,2].

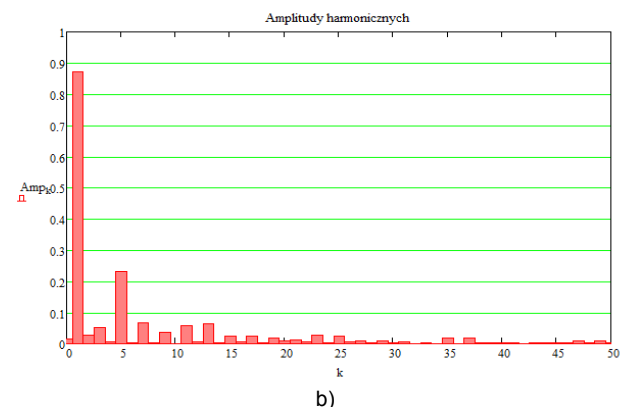
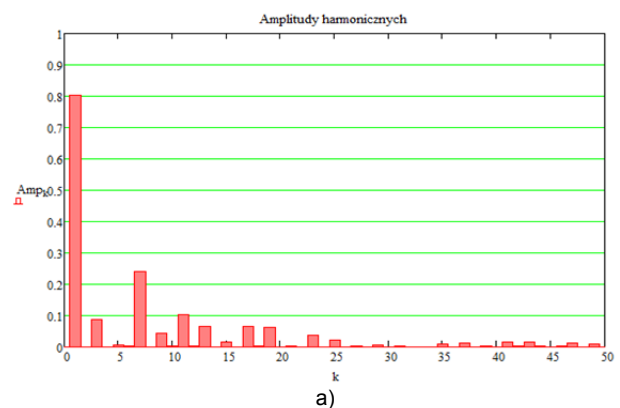
$$(1) \quad T_{emC} = \pi \cdot \alpha_i \cdot k_w \cdot m \cdot N_1 \cdot B_m \cdot I_{RMS} \cdot r \cdot L$$

$$(2) \quad T_{emT} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \alpha_i \cdot k_w \cdot m \cdot N_1 \cdot B_m \cdot I_{RMS} \cdot r_{sr}^2$$

gdzie:

- α_i - współczynnik określający stosunek wartości średniej indukcji magnetycznej B_{sr} do indukcji maksymalnej B_m w szczelinie powietrznej,
- k_w - współczynnik uzwojenia stojana,
- m - liczba faz,
- N_1 - liczba zwojów fazowych,
- L - długość czynna pakietu stojana i wirnika,
- r - promień wewnętrzny stojana,
- r_{sr} - średni promień tarcz wirnika i stojana,
- I_{RMS} - wartość skuteczna prądu fazowego stojana,
- B_m - maksymalna wartość indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.

Na rysunku 7 przedstawiono obliczony rozkład harmoniczných indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej dla obu silników. Można zauważyć, że wartość maksymalna pierwszej harmonicznej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej dla silnika tarczowego wynosi $B_{mT} = 0.87 \text{ T}$, podczas gdy dla silnika cylindrycznego $B_{mC} = 0.81 \text{ T}$. Wynika to między innymi z faktu, że dla silnika tarczowego zastosowano magnesy typu N42, natomiast w silniku cylindrycznym typu N33. Z równań (1) i (2) wynika, że wartość momentu elektromagnetycznego dla obu maszyn jest wprost proporcjonalna do wartości indukcji w szczelinie (przy założeniu niezmiennych pozostałych wielkości). W związku z powyższym celowym wydaje się być wprowadzenie współczynnika korygującego $k_{Bm} = B_{mC} / B_{mT}$ pozwalającego na porównanie maszyn dla przy jednakowych wartości maksymalnej indukcji w szczelinie powietrznej.



Rys 7. Amplitudy poszczególnych harmoniczných indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej a) dla silnika cylindrycznego, b) dla silnika tarczowego z magnesami trwałymi.

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie rozkładu indukcji magnetycznej w elementach konstrukcyjnych silnika cylindrycznego (rys. 8a) oraz silnika tarczowego (rys. 8b). Z uwagi na specyfikę konstrukcji silnika tarczowego rozkład indukcji magnetycznej przedstawiono na modelu trójwymiarowym. Indukcje w zębach i jarzmie stojana dla obu maszyn są na podobnym poziomie i wynoszą:

- indukcja w jarzmie stojana silnika cylindrycznego:

$$B_{jSC} = 1.1 - 1.5 \text{ T}$$

- indukcja w jarzmie stojana silnika tarczowego:

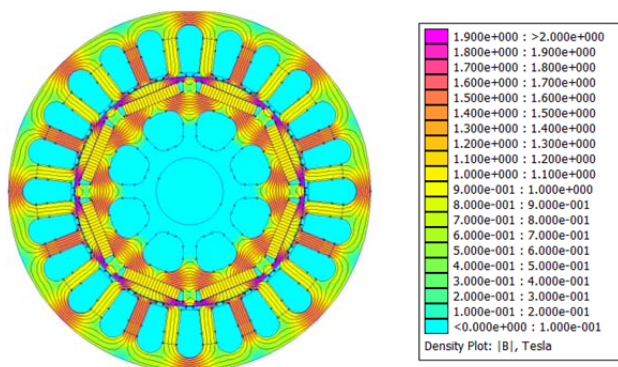
$$B_{jST} = 1.0 - 1.5 \text{ T}$$

- indukcja w zębach stojana silnika cylindrycznego:

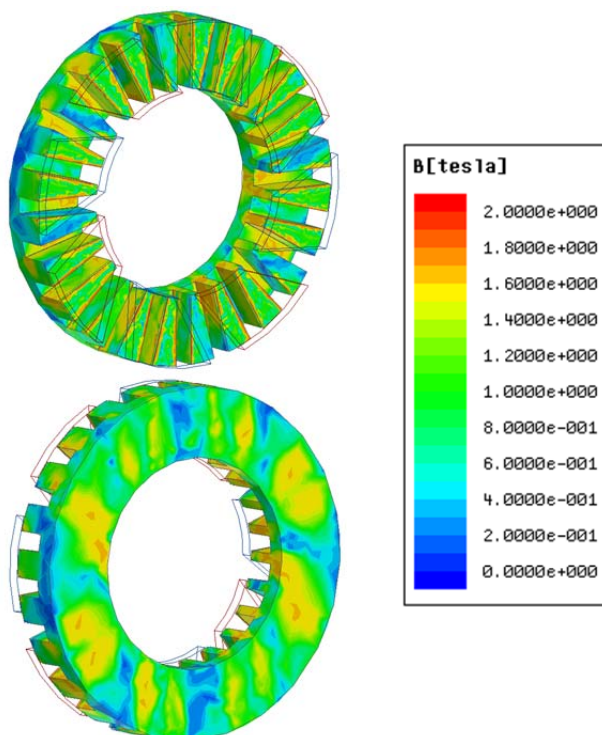
$$B_{zC} = 1.3 - 1.5 \text{ T}$$

- indukcja w zębach stojana silnika tarczowego:

$$B_{zT} = 1.0 - 1.6 \text{ T}$$



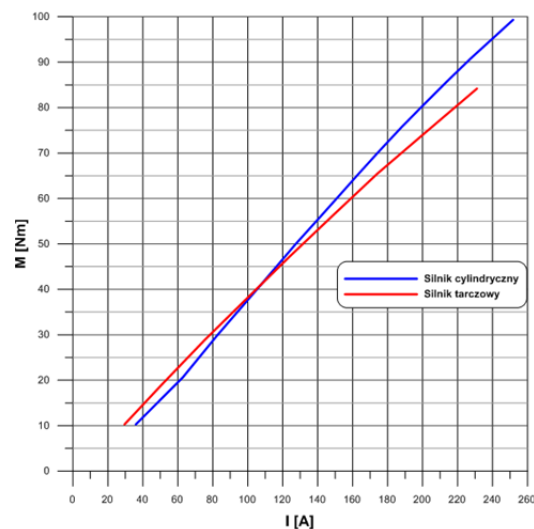
a)



b)

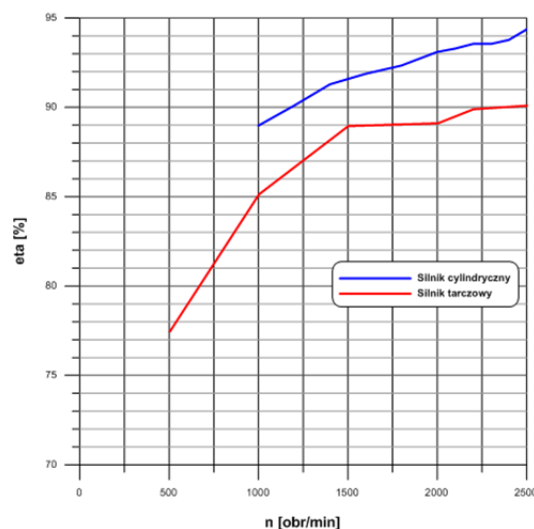
Rys 8. Rozkład indukcji magnetycznej od magnesów trwałych w elementach konstrukcyjnych a) silnika cylindrycznego, b) silnika tarczowego.

Kluczowym zagadnieniem niniejszej pracy jest porównanie współczynnika gęstości momentu dla omawianych konstrukcji silników z magnesami trwałymi. Na rysunku 9 przedstawiono wykres zależności uzyskiwanego momentu na wale maszyn w funkcji prądu stojana dla znamionowej prędkości obrotowej $n = 2000 \text{ obr/min}$. Dla silnika tarczowego rzeczywiste wartości momentu uzyskane z badań laboratoryjnych zostały pomnożone przez współczynnik $k_{Bm} = 0.931$. Z wykresu wynika, że w zakresie prądów stojana od $I = 30 \text{ A}$ do $I = 110 \text{ A}$ moment uzyskiwany na wale silnika tarczowego jest większy o ok. 3 Nm, w stosunku do momentu na wale silnika cylindrycznego, natomiast dla wyższych wartości prądów stojana od $I = 110 \text{ A}$ do $I = 230 \text{ A}$ moment na wale silnika cylindrycznego jest wyższy niż silnika tarczowego, osiągając dla $I = 230 \text{ A}$ maksymalną różnicę ok. 7 Nm. W dalszych rozważaniach do wyznaczenia współczynnika gęstości momentu przyjęto wartości dla punktu pracy $I = 110 \text{ A}$.



Rys 9. Wyniki badań laboratoryjnych przedstawiające zależność uzyskiwanego momentu na wale maszyny w funkcji prądu stojana dla prędkości obrotowej $n = 2000 \text{ obr/min}$. Wartość momentu dla silnika tarczowego skorygowana o współczynnik $k_{Bm} = 0.931$.

Poza kwestią współczynnika gęstości momentu istotnym zagadnieniem jest sprawność omawianych konstrukcji. Na rysunku 10 przedstawiono wykres wartości współczynnika sprawności w funkcji prędkości obrotowej silników dla prądu stojana $I = 110 \text{ A}$. Dla znamionowej prędkości obrotowej $n = 2000 \text{ obr/min}$ sprawność silnika cylindrycznego jest wyższa o ok. 4 punkty procentowe w stosunku do silnika tarczowego.



Rys 10. Wyniki badań laboratoryjnych przedstawiające zależność sprawności w funkcji prędkości obrotowej dla prądu stojana $I = 110 \text{ A}$.

Porównanie konstrukcji silników

Bazując na wynikach przedstawionych na rysunku 9 oraz na dokumentacji konstrukcyjnej omawianych silników z magnesami trwałymi, w niniejszym rozdziale wyznaczono współczynniki gęstości momentu obu maszyn. W tabeli 3 zamieszczono dane dotyczące masy poszczególnych podzespołów konstrukcyjnych. Podzespoły te podzielono na dwie grupy. Pierwsza z nich to elementy obwodu elektromagnetycznego silników, natomiast druga to podzespoły mechaniczne, takie jak kadłub, łożyska, tarcze łożyskowe wał itp. Masa obwodu elektromagnetycznego obu porównywanych konstrukcji jest podobna, natomiast masa podzespołów mechanicznych silnika cylindrycznego

jest wyraźnie mniejsza od masy podzespołów mechanicznych silnika tarczowego. Wynika to między innymi z faktu, że silnik tarczowy był silnikiem modelowym, w którym kadłub i tarcze łożyskowe z uwagi na technologię wykonania są stalowe, podczas gdy dla silnika cylindrycznego aluminiowe.

Tabela 3 -Porównanie masy elementów konstrukcyjnych silnika cylindrycznego oraz silnika tarczowego.

Rodzaj podzespołów	Silnik cylindryczny	Silnik tarczowy
	Masa [kg]	Masa [kg]
Obwód elektromagnetyczny	12.9	12.7
Podzespoły mechaniczne	8.1	22.3
Razem	21.0	35.0

W związku z powyższym w tabeli 4 przedstawiono dane dotyczące masy poszczególnych grup podzespołów z uwzględnieniem modyfikacji wybranych elementów konstrukcyjnych silnika tarczowego np. poprzez zmianę rodzaju materiału obudowy i innych elementów mechanicznych.

Tabela 4 -Porównanie masy elementów konstrukcyjnych silnika cylindrycznego oraz silnika tarczowego po modyfikacji.

Rodzaj podzespołów	Silnik cylindryczny	Silnik tarczowy
	Masa [kg]	Masa [kg]
Obwód elektromagnetyczny	12.9	12.7
Podzespoły mechaniczne	8.1	13.5
Razem	21.0	26.2

Dla danych z tabeli 4 obliczono wartość współczynnika gęstości momentu dla obu maszyn, dla prądu $I = 110$ A, który zarówno dla jednej jak i drugiej maszyny jest punktem pracy w okolicach znamionowego. Współczynnik gęstości momentu dla obu maszyn obliczono uwzględniając masę jedynie obwodu elektromagnetycznego silnika, jak również masę całego silnika. Wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5 - Obliczone wartości współczynnika gęstości mocy dla silnika cylindrycznego oraz silnika tarczowego z magnesami trwałymi.

	Silnik cylindryczny	Silnik tarczowy
Współczynnik gęstości momentu (obwód elektromagnetyczny).	3.29 Nm / kg	3.35 Nm / kg
Współczynnik gęstości momentu (cały silnik).	2.02 Nm / kg	1.62 Nm / kg

Podsumowanie

W artykule przedstawiono dwie konstrukcje silników z magnesami trwałymi: silnika cylindrycznego oraz silnika tarczowego. Głównym celem pracy była próba oceny współczynnika gęstości momentu obu maszyn. Zagadnienie to jest o tyle skomplikowane, że porównując wartość współczynnika gęstości momentu maszyny cylindrycznej i tarczowej należy uwzględnić szereg aspektów, tak aby porównanie to było jak najbardziej "sprawiedliwe". Dlatego też, przyjęto określone założenia zapewniające porównywalne warunki pracy obu maszyn, a współczynnik gęstości momentu określono dla punktu pracy zbliżonego do znamionowego.

Z wyników przedstawionych na rysunkach 9 i 10 oraz w tabelach 3 - 5 wynika, że przedstawiony silnik cylindryczny cechuje się wyższym współczynnikiem sprawności oraz wyższym współczynnikiem gęstości momentu uwzględniając masę całego silnika. Przy rozpatrywaniu masy jedynie elementów czynnych obwodu elektromagnetycznego obydwie konstrukcje cechują się podobnym współczynnikiem gęstości momentu, który dla punktu pracy w okolicach znamionowego wynosi $k_g=3.29$ dla silnika cylindrycznego i $k_g=3.35$ dla silnika tarczowego. Z punktu widzenia potencjalnego użytkownika silników, nie jest jednak istotnym masa samego obwodu elektromagnetycznego, a masa całego silnika, dlatego bardziej celowym wydaje się porównanie obu konstrukcji z uwzględnieniem masy wszystkich koniecznych do zastosowania podzespołów.

LITERATURA

- [1] Gieras J., Wang R., Kamper M., Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht/Boston/London 2004
- [2] Gieras J., Wing M., Permanent Magnet Motor Technology - Design and Applications, *Marcel Dekker INC*, 2002.
- [3] Glinka T., Wolnik T., Król E.: Projekt silnika tarczowego z magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny nr 11 2011*
- [4] Glinka T., Król E., Wolnik T., Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym - obliczenia obwodu elektromagnetycznego, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 92 2011*
- [5] 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
- [6] Wolnik T., Analiza porównawcza wybranych modeli silników tarczowych z magnesami trwałymi, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 1/2013, str. 239-245*.
- [7] Wiak S., Welfe H., Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych, *Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej*, 2001.

Autorzy:

mgr inż. Tomasz Wolnik

E-mail: t.wolnik@komel.katowice.pl

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL,
Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice