

Piotr PAPLICKI¹

ELEKTROMECHANICZNY PRZETWORNIK ENERGII Z PRZECIWBIEŻNYM RUCHEM WIRNIKÓW

W artykule przedstawiono budowę i zasadę działania elektromechanicznego przetwornika energii typu tarczowego z magnesami trwałymi o dwóch wirnikach przeciwbieżnych. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych przeprowadzonych na modelu fizycznym. Wykazano, że silnik tarczowy o ruchu przeciwbieżnym w sposób szczególny może być stosowany w wolnoobrotowych, bezprzekładniowych układach napędowych obiektów morskich z dwoma pędnikami przeciwbieżnymi dla podwyższenia sprawności napędu rzędu 15÷27%, przy jednoczesnym obniżeniu poziomu hałasu i wibracji.

1 WSTĘP

W obecnych czasach obserwuje się wzrastające zainteresowanie silnikami bezszczotkowymi z magnesami trwałymi wynikające z bardzo dobrych parametrów elektromechanicznych tych maszyn jako napędów o regulowanej prędkości.

Ponadto rozwój technologii: elementów elektronicznych, wytwarzania wysokoenergetycznych magnesów trwałych, metalurgii proszkowej do budowy magnetowodów maszyn elektrycznych oraz stosowanie technik komputerowych z wykorzystaniem nowoczesnych metod i algorytmów sterowania, umożliwił projektowanie nowych typów elektromechanicznych przetworników energii (EMPE) z komutacją elektroniczną do zastosowania w przemyśle samochodowym, komputerowym w robotyce, automatyce oraz w technice morskiej [1].

2 EMPE TYPU TARCZOWEGO O RUCHU PRZECIWBIEŻNYM W OBIEKTACH TECHNIKI MORSKIEJ

Rzeczywisty rozwój napędów w obiektach morskich ściśle związany jest z poszukiwaniem nowych typów silników elektrycznych bardziej ekonomicznych, zapewniających dużą koncentrację mocy oraz powiększonym zasięgiem pływania.

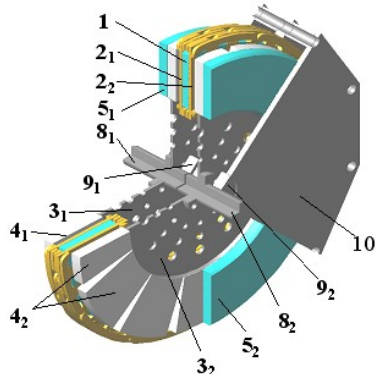
Specyficzne właściwości, zasada działania i cechy konstrukcyjne silników tarczowych pretendują je w sposób szczególny do wykorzystania w obiektach techniki mor-

¹ Politechnika Szczecińska, Instytut Elektrotechniki, Zakład Urządzeń Elektrycznych i Elektrotechniki Morskiej, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel.: (091) 449-45-45; e-mail: paplik@o2.pl

skiej. Maszyny tego typu posiadają dwie powierzchnie aktywne, z których każda może być wykorzystana do realizacji potrzebnego rodzaju ruchu (np. synchronicznie przeciwbieżnego).

Badania w zakresie zasad hydrodynamiki i teorii pędników wykazały, że w sposób znaczący, rzędu 15÷27%, można podwyższyć sprawność układów napędowych obiektów techniki morskiej poprzez zastosowanie wolnoobrotowego, bezprzekładniowego układu z dwoma pędnikami przeciwbieżnymi [2]. Wykazano, że wysoko-momentowe o regulowanej prędkości silniki tarczowe z osiowym strumieniem magnetycznym, w których pomija się przekładnie mechaniczne osiągają dużą sprawność i niezawodność napędu przy jednoczesnym obniżeniu poziomu hałasu i wibracji.

Koncepcja EMPE o ruchu przeciwbieżnym typu tarczowego, przedstawiona jest na rys.1. Silnik posiada stojan oraz dwu tarczowy wirnik. W stojanie 1 (wykonany w postaci tarczy toroidalnej) umieszczone są uzwojenia sterowania faz 2_1 , 2_2 . Wirnik zbudowany jest z dwóch tarcz obrotowych 3_1 , 3_2 , które zawierają magnesy trwałe 4_1 , 4_2 , o wektorach namagnesowania w kierunku osiowym, ułożone z naprzemienną polaryzacją w kierunku azymutalnym oraz jarzma ferromagnetyczne 5_1 , 5_2 . Powierzchnie stojana oddzielone są od tarcz wirnika szczelinami powietrznymi. Moment obrotowy silnika wyprowadza się na zewnątrz poprzez dwa niezależne wały 8_1 , 8_2 , umieszczone w łożyskach 9_1 , 9_2 . Całość zamyka hermetyczna obudowa 10.



Rys.1. Konstrukcja EMPE o ruchu przeciwbieżnym typu tarczowego

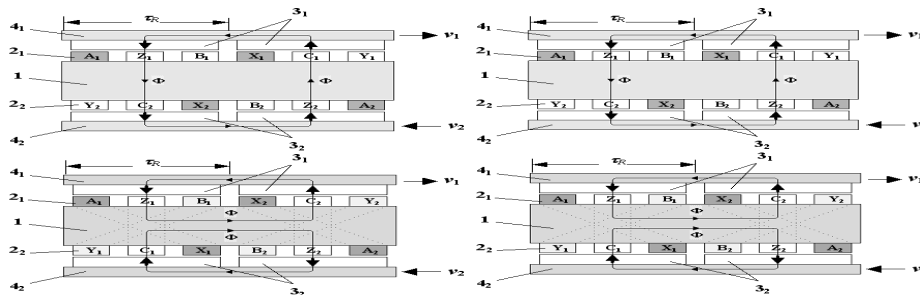
Przedstawiona konstrukcja silnika umożliwia wytworzenie przeciwnie wirującego strumienia magnetycznego stojana w dwóch szczelinach powietrznych, który reagując z polem magnetycznym od magnesów trwałych realizuje przeciwbieżny ruch wirników.

2.1 Zasada kształtowania obwodu elektromagnetycznego EMPE

Ruch przeciwbieżny fali pola magnetycznego w stojanie osiąga się przez odpowiednie wykonanie, rozmieszczenie i zasilenie uzwojeń stojana. Dwa sposoby rozmieszczenia poszczególnych uzwojeń na tarczy stojana schematycznie pokazano na rys.2.

Stojan posiada kształt toroidalny 1 i zawiera trójfazowe uzwojenia sterowania 2_1 , 2_2 . Każde z uzwojeń posiada dwie aktywne powierzchnie z okładem prądowym, które współdziałają z polem magnetycznym, wytworzonym od magnesów trwałych. Wirnik

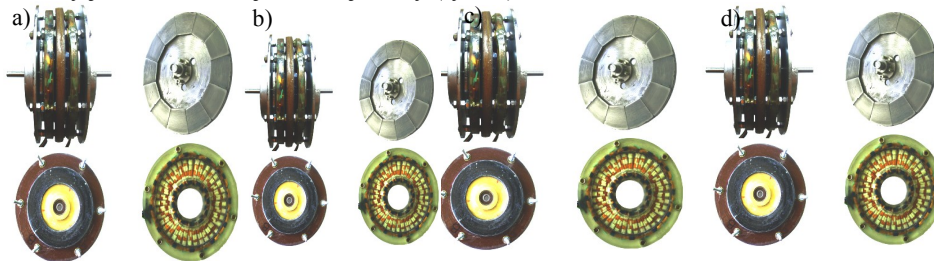
wykonany w postaci dwóch tarcz, które zawierają zestaw magnesów trwałych $3_1, 3_2$ i ferromagnetyczne jarzma $4_1, 4_2$. Tarcze wirnika zajmują synchroniczne położenie względem pola magnetycznego stojana (zasilanego z trójfazowego układu sterowania) i posiadają tą samą prędkość lecz o przeciwnych kierunkach wirowania v_1 i v_2 .



Rys.2. Schemat obwodu elektromagnetycznego EMPE o ruchu przeciwbieżnym przedstawiający dwa sposoby formowania uzwojeń stojana

2.2 Konstrukcja EMPE o ruchu przeciwbieżnym typu tarczowego

Na rys.3a zaprezentowano wykonany model fizyczny silnika tarczowego o ruchu przeciwbieżnym z rdzeniem toroidalnym o strukturze gładkiej. Silnik składa się z dwóch jednakowych tarcz wirnika z litej stali na których naklejone są magnesy trwałe tworzące bieguny wzbudzenia o osiowym wektorze magnetyzacji (rys.3b). Rdzeń stojana wykonany jest z nawiniętej stalowej taśmy (rys.3c).



Rys.3. Model fizyczny silnika tarczowego o ruchu przeciwbieżnym a), widok: tarcze wirnika z magnesami trwałymi b), stojana c) uzwojeń silnika d)

Uzwojenie składa się z 72 cewek (po 36 na każdej stronie tarczy stojana) skojarzonych w trójkąt. W celu uzyskania zwartej konstrukcji, każda z wykonanej tarczy na stojanie wypełniona jest żywicą (rys.3d). Współdziałanie pola magnetycznego wytworzonego przez magnesy trwałe z prądem cewek powoduje powstawanie siły elektrodynamicznej. W celu zachowania ciągłości procesu (synchronicznego, przeciwbieżnego ruchu obrotowego wirników) silnik zawiera układ zmieniający zwrot wektora gęstości prądu pod kolejnymi biegunami magnesów. W tym przypadku zastosowano serwowzmacniacz jako elektroniczny komutator zawierający elementy kluczące (tranzystory typu MOSFET) wyzwalamy za pośrednictwem trzech czujników hallotronowych, rozmieszczonych na obwodzie magnesów trwałych przesuniętych między sobą o kąt 120° .

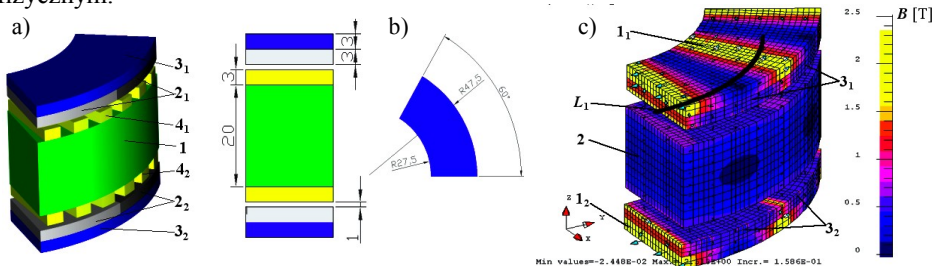
Podstawowe dane konstrukcyjne i parametry elektromechaniczne EMPE o ruchu przeciwbieżnym przedstawione są w tab.1.

Tab. 1. Dane konstrukcyjne i parametry elektromechaniczne EMPE o ruchu przeciwbieżnym

Napięcie zasilania:	$U_n = 120 \text{ V}$
Prąd znamionowy:	$I_n = 0,5 \text{ A}$
Moc znamionowa:	$P_n = 50 \text{ W}$
Prędkość obrotowa:	$n = 600 \text{ obr/min}$
Uzwojenie:	trójfazowe, pasma skojarzone w trójkąt
Stojan	
Srednica zewnętrzna:	$D_z = 95,0 \text{ mm}$
Srednica wewnętrzna:	$D_w = 55,0 \text{ mm}$
Szerokość:	$d_s = 20,0 \text{ mm}$
Liczba cewek na pasmo:	$q = 24$
Liczba zwojów w cewce:	$N = 50$
Rezystancja pasma:	$R = 30,7 \ \Omega$
Indukcyjność pasma:	$L = 4,6 \text{ mH}$
Grubość szczeliny	$\delta_r = 1,0 \text{ mm}$
Wirnik	
Liczba par biegunów:	$p = 6$
Grubość tarczy (jarzma):	$D_j = 3,0 \text{ mm}$
Magnesy trwałe:	$Nd_2Fe_{14}B$ ($B_r = 1,2 \text{ T}$; $H_c = -970 \text{ kA/m}$)
Grubość magnesu:	$d_m = 3,0 \text{ mm}$

2.3 Badania symulacyjne modelu fizycznego EMPE o ruchu przeciwbieżnym

Adekwatny modelu polowy przetwornika pozwala otrzymać prawidłowy rozkład pola magnetycznego i analizować procesy elektromagnetyczne zachodzących w modelu fizycznym.



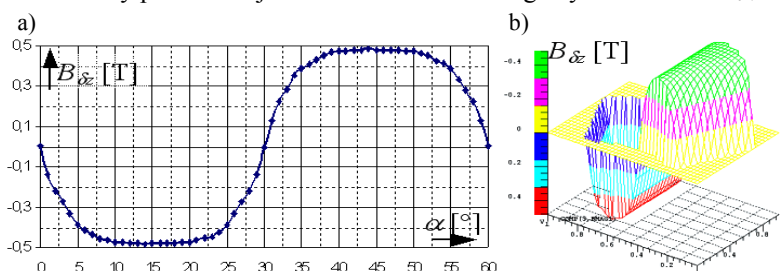
Rys.4. Widok i wymiary części aktywnych uwzględnionych w modelu polowym a),b) oraz rozkład indukcji magnetycznej B w częściach aktywnych modelu polowym silnika o ruchu przeciwbieżnym c)

Na tej podstawie został opracowany trójwymiarowy model polowy silnika tarczowego o ruchu przeciwbieżnym przy użyciu programu Flux3D. Podstawowe wymiary części aktywnych modelu silnika pokazano na rys.4a. Ze względu na symetrię układu analizie została poddana 1/6 części rzeczywistego silnika. Odpowiada to szerokości

dwóch podziałek biegunowych $2\tau_{rav}=39,3\text{mm}$ (na promieniu $r_{av}=37,5\text{mm}$), w mierze kątowej: $\alpha=60^\circ$ (rys.4b).

Na rys. 4c przedstawiono połowy model silnika tarczowego o ruchu przeciwbieźnym na którym pokazano siatkę dyskretyzacji i rozkład indukcji magnetycznej B w elementach ferromagnetycznych: jarzmach wirników 3₁, 3₂ i rdzeniu stojana 1 oraz w magnesach trwałych 2₁, 2₂.

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano: rozkład indukcji magnetycznej B w elementach czynnych maszyny, przebieg składowej osiowej indukcji magnetycznej $B_{\delta z}$ w środku szczeliny powietrznej oraz moment elektromagnetyczny silnika M_{em} .

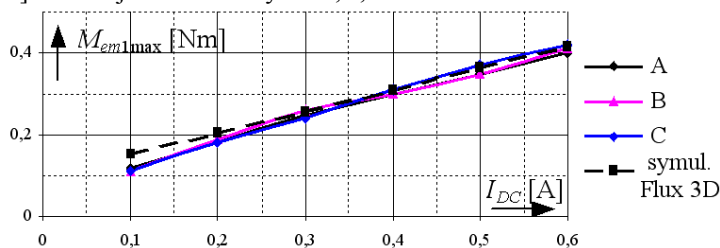


Rys.5. Przebieg składowej osiowej $B_{\delta z}$ indukcji pola magnetycznego w połowie grubości szczeliny powietrznej; wzdłuż linii L_1 na promieniu r_{av} a), na płaszczyźnie biegunów b)

Na rys.5a przedstawiony jest rozkład składowej osiowej $B_{\delta z}$ indukcji pola magnetycznego w połowie grubości szczeliny powietrznej dla promienia r_{av} , na linii L_1 (rys.4c) dla $\alpha = 60^\circ$. Wartość średnia składowej osiowej indukcji magnetycznej wzdłuż jednej podziałki biegunowej, która wynosi $B_{\delta av} = 0,37 \text{ [T]}$ wpływa na wytwarzany moment elektromagnetycznym rozwijanym w silniku zgodnie z równaniem 1.

Na rys.5b przedstawiono w postaci trójwymiarowej rozkład składowej osiowej $B_{\delta z}$ indukcji pola magnetycznego w środku szczeliny powietrznej na płaszczyźnie dwóch biegunów.

Na rys.6 przedstawiono charakterystyki statyczne maksymalnego momentu elektromagnetycznego działającego na jedną z tarcz wirnika - $M_{em1max} \text{ [Nm]}$ w funkcji prądu $I_{DC} \text{ [A]}$ w uzwojeniach fazowych: A,B,C.



Rys.6. Charakterystyki statyczne maksymalnego momentu elektromagnetycznego działającego na jedną z tarcz wirnika w funkcji prądu w uzwojeniach poszczególnych faz: A,B,C

Moment elektromagnetyczny wytwarzany w silniku tarczowym równy jest:

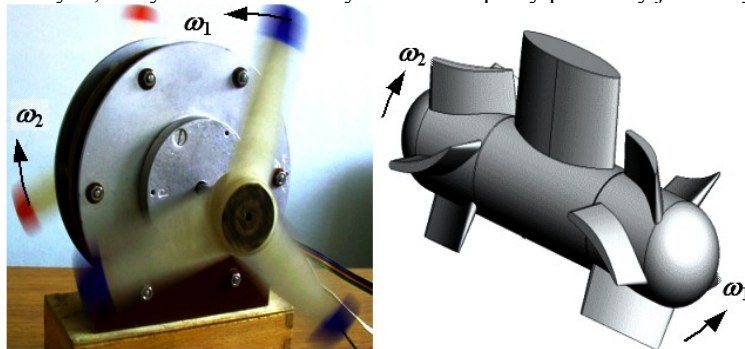
$$M_{em} = \frac{P_{em}}{n_s} = \frac{\pi^2}{60} \cdot \alpha_p \cdot \eta \cdot B_{\sigma av} \cdot A_{av} \cdot D_{av}^2 \cdot l_{Aef} \quad (1)$$

gdzie: M_{em} – moment elektromagnetyczny silnika [Nm], P_{em} – moc znamionowa silnika [W], α_p – współczynnik łuku podziałki biegunowej stojana, η – sprawność silnika, $B_{\sigma av}$ – indukcja magnetyczna [T] w szczelinie na promieniu r_{av} , A_{av} – okład prądowy na r_{av} [A/m], D_{av} – przeciętna średnica stojana $R_z + R_w$ [m], l_{Aef} – efektywna długość promieniowa stojana $R_z - R_w$ [m].

Całkowity moment rozwijany przez silnik jest sumą momentów poszczególnych tarcz wirnika:

$$M_c = M_1 + M_2 \quad (2)$$

Przedstawiony model doświadczalny silnika tarczowego o ruchu przeciwbieżnym może posłużyć rekomendacji w opracowaniu bezprzekładniowego, bezpośredniego napędu małych autonomicznych pojazdów podwodnych o dwóch turbinach lub śrubach przeciwbieżnych, których zasada budowy i charakter pracy pokazany jest na rys.7.



Rys.7. Widok układu napędowego o ruchu przeciwbieżnym do bezpośredniego napędu pojazdów podwodnych

3 LITERATURA

1. Gieras J. F., Wing R. Kamper M. J.: *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London. 2004.
2. Szymczak P., Barciński T., Świerczyński M.: *Aparaty podwodne- energooszczędne układy napędowe i wybrane sposoby sterowania*, IV Symposium Sterowanie i Monitorowanie układów przemysłowych, Maj 9-10, 2001, s. 46-51.

ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTER WITH COUNTER-ROTATING MOTION OF ROTORS

The structure, principle of operation of disk type electromechanical energy converter with counter-rotating motion of two rotors with permanent magnets are presented. Simulating and experimental results of physical model of the machine have been presented. It is proved that disc type machine in special way can be implemented in slow-speed, gearless ship propulsion drive which use an additional counter-rotating propeller for increasing of efficiency of drive about 15÷27 and simultaneously decreasing noise level and vibrations.