

Piotr Paplicki
Politechnika Szczecińska, Szczecin

KONFIGURACJE MASZYN ELEKTRYCZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI W UKŁADZIE PRZECIWBIEŻNYCH WIRNIKÓW DO NAPĘDÓW OBIEKTÓW TECHNIKI MORSKIEJ

CONFIGURATIONS OF PERMANENT MAGNET MOTORS WITH COUNTER-ROTATING ROTORS FOR SHIP PROPULSION DRIVES

Abstract: This paper describes configurations of permanent magnet motors with counter-rotating rotors. This machine topology can find applications in marine propulsion systems that use additional counter-rotating propeller in order to recover energy from the rotational flow of main propeller stream. In this case the use of a PM motor having counter-rotating rotors allows the elimination of the motion reversal epicyclical gear. For these kinds of motors, the ship propulsion drives is a very interesting application, especially for contra-rotating propeller. PM rotors do not have magnetisation losses, which simplifies the rotor construction and cooling. This can be very useful in slow speed and podded drives where a motor is installed in the propeller pod, and where space savings can bring significant benefits. Innovative applications of maritime object's drives constructions with slotless disc and two type cylindrical counter-rotating electrical machines based on permanent magnets were proposed. In this study, different permanent magnet motor configurations were analyzed. Numerical calculations of motor characteristics were performed with a three-dimensional finite element, timestepping simulation program (Flux3D). Results of simulations of disc type machine were verified with experimental measurements conducted on physical model.

1. Wstęp

Intensywny rozwój techniki i nowych technologii, w połączeniu z osiągnięciami w dziedzinie elektroenergetyki, materiałoznawstwa, technik symulacyjnych i systemów sterowania, obserwowany w ostatnich dekadach, przyniósł nowe możliwości konstruowania nowych typów silników elektrycznych o wysokiej sprawności, płynnej regulacji prędkości obrotowej o niskim poziomie hałasu i wibracji przy możliwie najmniejszej masie i gabarytach. Największy udział, w tym procesie odegrał powszechny dostęp wysokoenergetycznych magnesów trwałych, który umożliwił konstruktorom opracowanie niekonwencjonalnych maszyn elektrycznych specjalnego zastosowania.

Artykuł prezentuje trzy konfiguracje maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi w układzie przeciwbieżnych wirników do napędów obiektów techniki morskiej. Pierwsza z nich jest konfiguracją tarczową, która zawiera dwa niezależne wirniki tarczowe, pomiędzy którymi znajduje się toroidalny stojan. Pozostałe dwie konfiguracje tworzy struktura cylindryczna dwuwirnikowa; pierwsza o różnych średnicach, między którymi osadzony jest stojan z dwustronnym ułożeniem uzwojeń; druga z dwustronne ułożonymi magnesami trwałymi, które

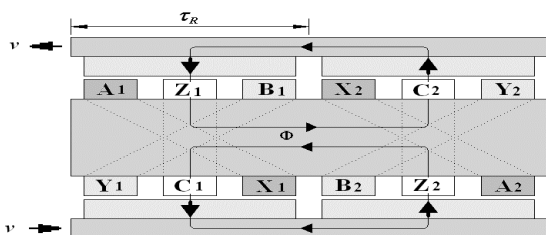
obejmują części czynne uzwojeń stojana w wykonaniu bezrdzeniowym.

Specyficzna budowa oraz działanie tego typu maszyn umożliwia realizację bezprzekładniowych układów napędowych dwóch śrub przeciwbieżnych, o podwyższonej sprawności (do 25%), do napędu różnych obiektów techniki morskiej.

Analizę otrzymanych charakterystyk prezentowanych struktur silników o ruchu przeciwbieżnym przeprowadzono na podstawie wyników badań symulacyjnych otrzymanych trójwymiarowymi metodami polowymi.

2. Zasada budowy magnetowodu w maszynach o ruchu przeciwbieżnym

Przeciwbieżny ruch obrotowy, dwóch wirników maszyny elektrycznej, realizowany jest poprzez współdziałanie pola magnetycznego od magnesów trwałych na wirnikach z polem magnetycznym od stojana, który posiada dwie niezależne powierzchnie aktywne.



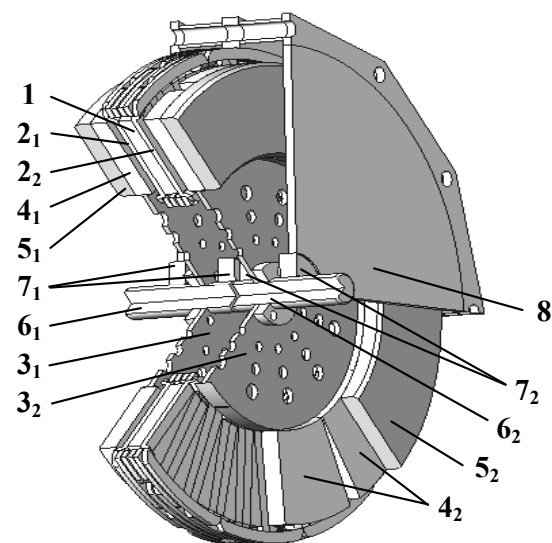
Rys. 1. Obwód magnetyczny elektromechanicznego przetwornika energii o ruchu przeciwbieżnym

Na każdej z nich rozmieszczane są trójfazowe uzwojenia w sposób pokazany na rysunku 1. Warstwy prądowe należące do fazy A i B rozmieszczone na jednej części stojana, posiadają przesunięcie kątowe $\pm 120^\circ$ el. względem warstw prądowych tych faz na jego części drugiej. Warstwy prądowe fazy C po obu stronach stojana pozostają bez przesunięcia kąтового. W ten sposób dwie aktywne powierzchnie uzwojeń stojana, zasilane z jednego układu sterowania, wytwarzają przeciwbieżnie wirujące, synchroniczne pole magnetyczne w dwóch szczelinach powietrznych.

3. Konfiguracja tarczowa

Budowa, zasada działania i właściwości silnika tarczowego z magnesami trwałymi, stwarza nowe możliwości rozwoju niekonwencjonalnych wysokosprawnych napędów w obiektach techniki morskiej. Zastosowanie dwóch wirników tarczowych rozmieszczonych pomiędzy toroidalnym stojanem, zapewni realizację przeciwbieżnych, wolnoobrotowych bezprzekładniowych, napędów zarówno dużych jednostek pływających jak i małych łodzi i aparatów podwodnych. Zasada budowy maszyny elektrycznej typu tarczowego z magnesami trwałymi, która realizuje ruch przeciwbieżny dwóch wirników przedstawiona jest na rysunku 2.

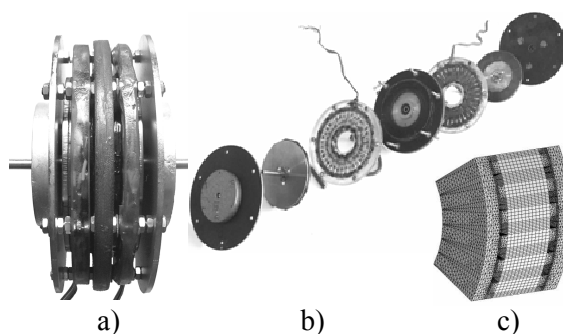
Stojan 1 w postaci tarczy toroidalnej zawiera uzwojenia sterowania faz 2₁, 2₂, rozmieszczone po obu jego stronach. Wirnik posiada dwie tarcze 3₁, 3₂, zawierające magnesy trwałe 4₁, 4₂, i jarzma ferromagnetyczne 5₁, 5₂. Moment obrotowy silnika przekazywany jest na zewnątrz poprzez dwa niezależne wały 6₁, 6₂, osadzone na łożyskach 7₁, 7₂. Obudowa silnika 8 tworzy hermetyczną całość. Zaletą tego rozwiązania jest możliwość zwiększania mocy maszyny poprzez rozbudowę kolejnych warstw prądowych stojana oraz dodatkowych tarcz wirników z magnesami w kierunku osiowym, bez powiększania silnika w kierunku promieniowym.



Rys. 2. Zasada budowy maszyny elektrycznej typu tarczowego o ruchu przeciwbieżnym

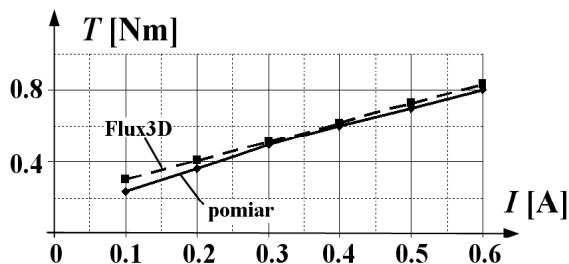
3.1 Model doświadczalny

Na podstawie rozważań teoretycznych opracowano symulacyjny model 3D pokazany na rysunku 3c i eksperymentalny silnika tarczowego o ruchu przeciwbieżnym przedstawiony na rysunku 3a-b.



Rys. 3. Widok modelu: doświadczalnego silnika tarczowego o ruchu przeciwbieżnym -a); w postaci rozłożonej -b); polowego -c)

Prezentowana konstrukcja silnika zawiera wirnik w postaci dwóch stalowych tarcz, na obwodzie których naklejono 12 magnesów trwałych oraz toroidalny stojan wykonany z nawiniętej stalowej taśmy. Trójfazowe uzwojenie stojana zawiera 72 cewki (po 36 na każdej stronie tarczy stojana), skojarzone w trójkąt. Parametry znamionowe silnika: $U_N = 120$ V, $P_N = 50$ W, $\eta_N = 83$ [%]. Na podstawie wyników badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych wyznaczono przebieg momentu elektromagnetycznego pokazany na rysunku 4. Moment silnika jest sumą momentów dwóch wirników tarczowych $T = T_1 + T_2$.

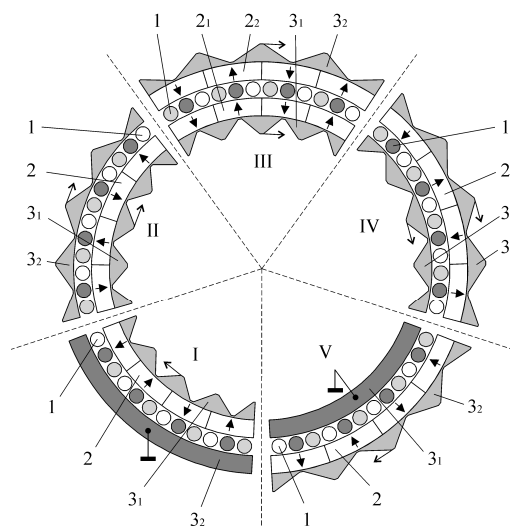


Rys. 4. Przebieg sumy momentów elektromagnetycznych wirników w zależności od prądu zasilania

W celu zachowania ciągłości procesu (synchronicznego, przeciwbieżnego ruchu obrotowego wirników) do zasilania silnika wykorzystano serwowzmacniacz BLDC zawierający elementy kluczące (tranzystory typu MOSFET) wyzwlane za pośrednictwem trzech czujników hallotronowych, rozmieszczonych na obwodzie stojana przesuniętych między sobą o kąt 120° el.

4. Konfiguracje cylindryczne

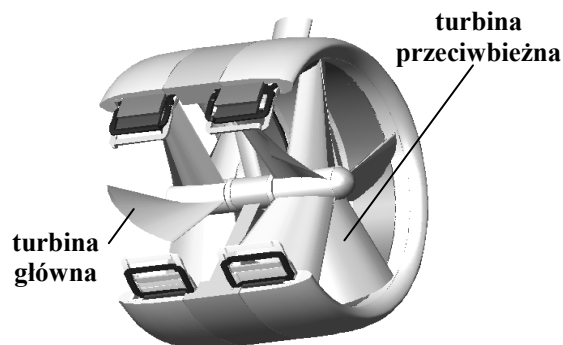
Topologia silnika cylindrycznego umożliwia konfiguracje wydrążonych maszyn elektrycznych, w których przestrzeń wewnętrzna, nie biorąca udziału w elektromechanicznym przetwarzaniu energii, może być przeznaczona dla elementów konstrukcyjnych urządzenia wykonawczego. Na rysunku 5 przedstawiono pięć wariantów rozmieszczenia magnesów trwałych na wirniku względem stojana w EMPE typu cylindrycznego: wariant I - stojan zewnętrzny 3_2 z warstwami prądowymi 1 oraz wirnik wewnętrzny z magnesami 2 i jarzmami 3_1 , (struktura klasyczna); wariant II - bezrdzeniowy stojan z warstwami prądowymi 1 oraz wirnik z magnesami od strony wewnętrznej 2 i jarzmem 3_1 oraz wirującym jarzmem zewnętrznym 3_2 ; wariant III - struktura bezrdzeniowa stojana z uzwojeniami 1 z obustronnym wirnikiem z magnesami 2_1 , 2_2 , i jarzmami $3_1, 3_2$; wariant IV - bezrdzeniowy stojan z warstwami prądowymi 1 oraz wirnik z magnesami po stronie zewnętrznej 2 i jarzmem 3_2 oraz wirującym jarzmem wewnętrznym 3_1 ; wariant V - rdzeniowy stojan wewnętrzny 3_1 z warstwami prądowymi 1 oraz wirnik zewnętrzny z magnesami 2 i jarzmami 3_2 .



Rys. 5. Pięć wariantów rozmieszczenia magnesów trwałych względem stojana w silniku o strukturze cylindrycznej

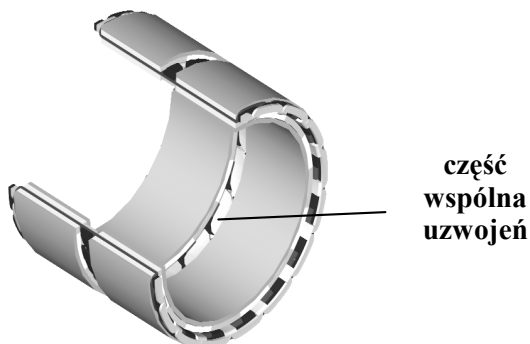
4.1 Struktura silnika bezrdzeniowego w koncepcji nowego pędnika dla obiektów techniki morskiej

Na podstawie wyników badań wydrążonych struktur silnika cylindrycznego największe zainteresowanie wzbudza wariant III (rysunek 5), w którym obustronne umieszczenie źródeł sił magnetomotorycznych (magnesów trwałych) umożliwia konstrukcję bezrdzeniowego silnika elektrycznego, który charakteryzuje się m.in. minimalną pulsacją momentu elektromagnetycznego i wysoką sprawnością. Odpowiedni układ połączeń dwóch struktur bezrdzeniowych silnika umożliwia opracowanie pędnika do napędów obiektów morskich, którego koncepcja prezentowana jest na rysunku 6. Przedstawiona struktura silnika zawiera dwa układy uzwojeń, tworząc połączenie dwóch niezależnych maszyn elektrycznych.



Rys. 6. Koncepcja pędnika dla obiektów morskich na bazie układu dwóch niezależnych silników bezrdzeniowych

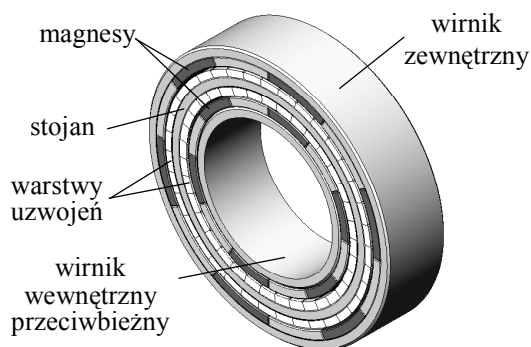
Odpowiednio opracowany układ połączeń wspólnych uzwojeń, dla obu obwodów magnetycznych, zmniejszy ich długość połączeń czołowych i umożliwi sterowanie z jednego układu zasilania. Koncepcja wspólnego układu uzwojeń dla dwóch niezależnych obwodów magnetycznych silnika pokazana jest na rysunku 7.



Rys. 7. Koncepcja wspólnego układu uzwojeń dla dwóch niezależnych obwodów magnetycznych silnika

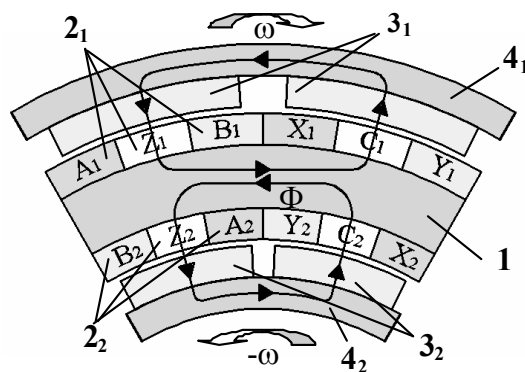
4.2 Struktura dwuwirnikowa

Właściwości maszyn dwuwirnikowych z magnesami trwałymi, które m.in. posiadają wysoką sprawność oraz zwiększoną gęstość przetwarzanej energii, w połączeniu z ich specyficzną budową, umożliwiają konstrukcję silnika w układzie przeciwbieżnych wirników. Widok struktury obwodu magnetycznego tego typu maszyny przedstawiona jest na rysunku 8.

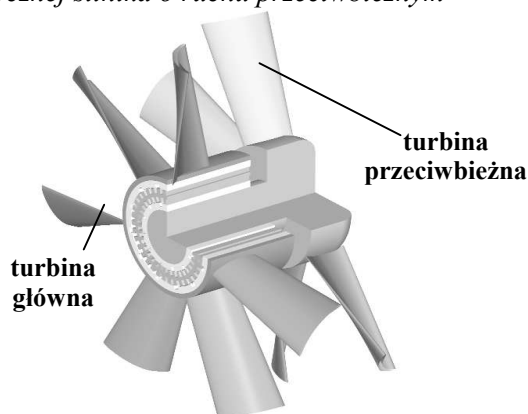


Rys. 8. Struktura obwodu magnetycznego maszyny cylindrycznej dwuwirnikowej

Dla realizacji ruchu przeciwbieżnego rozmieszczenie warstw prądowych w obwodzie magnetycznym silnika pokazano na rysunku 9. Na rysunku 10 przedstawiony jest zarys koncepcji układu dwóch pędników przeciwbieżnych z wykorzystaniem maszyny cylindrycznej dwuwirnikowej.



Rys. 9. Obwód magnetyczny struktury cylindrycznej silnika o ruchu przeciwbieżnym



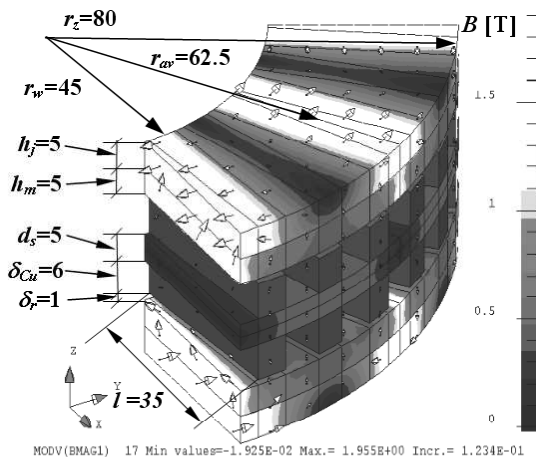
Rys. 10. Zarys koncepcji pędnika dla obiektów morskich na bazie maszyny cylindrycznej dwuwirnikowej

Moment obrotowy rozwijany przez wirnik wewnętrzny przekazywany jest na turbinę (lub śrubę) główną, natomiast wirnik zewnętrzny przekazuje moment na pędnik przeciwbieżny. W tym układzie, momenty elektromagnetyczne działające na wirniki nie będą sobie równe. Wynika to z różnic promienia działania siły $R_{avw} \neq R_{avz}$ oraz z różnic wartości indukcji magnetycznej w szczelinach powietrznych (rysunek 13), które wynikają z powiększonej szczeliny powietrznej od strony wirnika wewnętrznego, w stosunku do zewnętrznego, przy założeniu stałego okładu prądowego A stojana.

4.3 Analiza konfiguracji maszyn elektrycznych o ruchu przeciwbieżnym

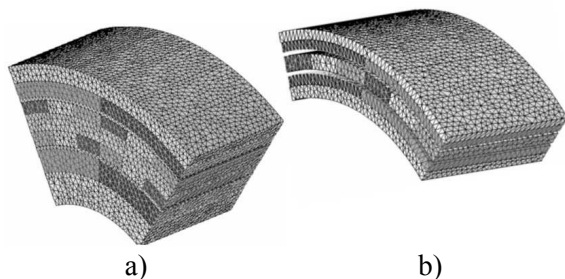
Na podstawie rozważań teoretycznych opracowano modele połowe maszyn o ruchu przeciwbieżnym w wyżej przedstawionych konfiguracjach. W celu porównania prezentowanych struktur wyznaczono średnie wartości wytwarzanych momentów elektromagnetycznych T oraz średnie wartości składowej użytecznej indukcji magnetycznej B w szczelinach powietrz-

nych. Za model wyjściowy, przy analizie porównawczej wszystkich struktur obwodu magnetycznego silników, przyjęto model konfiguracji tarczowej pokazanej na rysunku 11.



Rys. 11. Rozkład indukcji magnetycznej w modelu polowym struktury tarczowej silnika o ruchu przeciwbieżnym

Na podstawie topologicznego przekształcenia struktury tarczowej do cylindrycznej w konfiguracji dwuwirnikowej i bezrdzeniowej, które uwzględniały założenie: $2p=12$, $m=3$, stałej wartości okładu prądowego, długości czynnej uzwojeń, stałej masy magnesów o parametrach $B_r=1.28$ T, $H_{CB}=990$ kA/m oraz podstawowych gabarytów maszyn, opracowano ich modele polowe przedstawione na rysunku 12.



Rys. 12. Widok modelu polowego struktury silnika cylindrycznego ruchu przeciwbieżnym: dwuwirnikowego -a); bezrdzeniowego -b)

W celu wyznaczenia wartości momentu elektromagnetycznego T_e w zależności od kąta położenia wirników względem stojana α , zgodnie z algorytmem zasilania, realizującym ruch przeciwbieżny pola magnetycznego w szczelinach roboczych, wymuszono przebieg zmienności gęstości prądów $j=f(\alpha)$, w uzwojeniach poszczególnych pasm, zgodnie z zależnością 1.

$$\begin{aligned} A: j_A(\alpha) &= 10 \cdot \cos(\omega_e); \\ B: j_B(\alpha) &= 10 \cdot \cos(\omega_e + 2\pi/3); \\ C: j_C(\alpha) &= 10 \cdot \cos(\omega_e + 4\pi/3); \end{aligned} \quad (1)$$

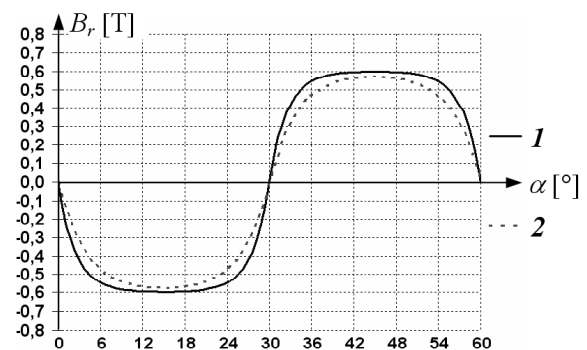
gdzie: $\omega_e = 2\pi\alpha/60^\circ$ – kąt elektryczny zależny od położenia kąтового wirnika α .

Na podstawie wyników badań symulacyjnych, dla każdej konfiguracji maszyny, wyznaczono: średnią wartość momentu elektromagnetycznego działającego na każdy z wirników odpowiednio; T_{1av} , T_{2av} – dla struktury tarczowej i cylindrycznej bezrdzeniowej; T_{1av} – dla wirnika zewnętrznego i T_{2av} – dla wirnika wewnętrznego struktury cylindrycznej dwuwirnikowej. Ponadto wyznaczono wartości średnie składowej użytecznej indukcji magnetycznej B pośrodku każdej szczeliny powietrznej. Wyniki zawarto w tabeli 1.

Tabela 1.

	Konfiguracja		
	tarczowa	cylindryczna	
		dwuwirnikowa	bezrdzeniowa
T_{sum} [Nm]	44.76	45.6	59.77
T_{1av} [Nm]	22.3	22.8	32.6
T_{2av} [Nm]	22.46	22.8	27.17
B_{1av} [T]	0.36	0.32	0.49
B_{2av} [T]	0.36	0.32	0.43

Na rysunku 13 przedstawiono przebieg składowej radialnej (użytecznej) indukcji pola magnetycznego pośrodku zewnętrznej szczeliny powietrznej (krzywa 1) oraz wewnętrznej (krzywa 2) w funkcji kąta $\alpha=60^\circ$ (dwa bieguny) dla konfiguracji cylindrycznej dwuwirnikowej.



Rys. 13. Rozkład indukcji magnetycznej B_r pośrodku szczeliny powietrznej w strukturze cylindrycznej dwuwirnikowej

Wyniki badań pokazują, że najwyższy współczynnik wyzyskania maszyny szacowany jest dla struktury cylindrycznej dwuwirnikowej i preferowana jest do układów napędowych dużych mocy, natomiast konfiguracje bezrdzeniowe, ze względu na małe masy i gabaryty

przeznaczone będą głównie do napędów małych pojazdów podwodnych o wysokiej sprawności. Maszyny o ruchu przeciwbieżnym w konfiguracji tarczowej, ze względu na stosunkowo prostą budowę i dobre parametry eksploatacyjne, mogą znaleźć szerokie zastosowanie do napędu większości występujących obecnie obiektów techniki morskiej.

5. Literatura

- [1]. Rosu M., Arkkio A., Jokinen T., Nahkuri V., Mantere J., Westerlund J.: *Permanent magnet synchronous motor for ship propulsion drive*. ICEM'98, Istanbul, Turkey, 2-4 September 1998, p. 702-705
- [2]. Paplicki P.: *Elektromechaniczny przetwornik energii z przeciwbieżnym ruchem wirników*. Przegląd Elektrotechniczny, 82 (2006), nr 3, s. 25-27
- [3]. Matusiak J.: *Hydrodynamic aspects of hybrid propulsors using the contra-rotating propeller concept*, *Marine News*, (2004) No.1, p.12-13
- [4]. Qu, R., Lipo A.: *Design and Parameter Effect Analysis of Dual-Rotor, Radial-Flux, Toroidally-Wound, Permanent-Magnet Machines*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Bol. 40, (2004), No. 3, p. 771-779

Autor

Piotr Paplicki, Politechnika Szczecińska,
Instytut Elektrotechniki, 70-313 Szczecin,
ul. Sikorskiego 37, e-mail: paplicki@ps.pl