

Piotr SZYMCZAK¹
Jacek BARAŃSKI²
Michał WAWROWICZ²
Paweł PRAJZENDANC²

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie,
Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych (1)
Akademickie Koło SEP przy WE ZUT – Oddział Szczeciński SEP (2)

Wybrane rozwiązania energooszczędnych napędów do obiektów nawodnych i podwodnych

Abstract. *W pracy zaprezentowano nowoczesne rozwiązania stosowane do napędów obiektów nawodnych i podwodnych. Przedstawiono rozwiązania pędników pozwalające uzyskiwać zwiększone sprawności i przytoczono ocenę porównawczą różnych wariantów. Omówiono różne układy napędowe z zastosowaniem silników synchronicznych, szczególnie zwrócono uwagę na rozwiązania silników dyskowych z magnesami trwałymi z magnetowodem lub w wariacie bezrdzeniowym. Skomentowano wybrane problemy związane z doбором silnika dyskowego do energooszczędnego bezprzekładniowego napędu z układem śrub przeciwbieżnych. W zakończeniu pracy sformułowano wnioski.*

Keywords: energooszczędny napęd, magnesy trwałe, silnik synchroniczny dyskowy, pędnik, układ przeciwbieżny,

Wstęp

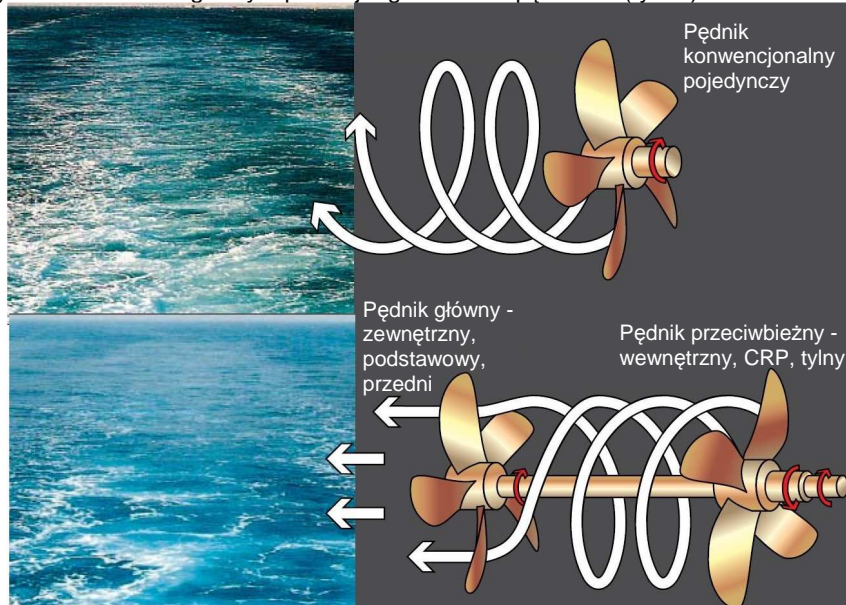
Intensywny rozwój technologii morskich, zastosowanie nowych materiałów oraz wymogi w zakresie ochrony środowiska i zwiększenia efektywności spowodował poszukiwanie nowych bardziej energooszczędnych rozwiązań do napędów obiektów pływających, zarówno nawodnych jak i podwodnych. Interesującą propozycję stanowią silniki synchroniczne prądu przemiennego o konfiguracji cylindrycznej i dyskowej z wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi, z przeciwbieżnym układem pędników, pozwalające zmniejszyć gabaryty i masę oraz istotnie poprawić sprawność układu napędowego.

Nowe rozwiązania układu napędowego

Pędnik pracujący w sąsiedztwie kadłuba przetwarza energię mechaniczną napędzających go mechanizmów na energię kinetyczną ruchu obiektu pływającego. Ogólna sprawność napędowa, w zależności od typu i warunków pracy kadłuba i pędnika oraz rodzaju transmisji mocy, może przyjmować wartości – w granicach 0,35 – 0,75 [3]. Widać stąd, jak ważną rzeczą, z punktu widzenia ponoszącego koszty eksploatacji, jest właściwe zaprojektowanie napędu, tj. zarówno kadłuba, pędnika, jak i silnika napędowego obiektu pływającego. Największy wpływ na sprawności śruby mają straty osiowe oraz straty obwodowe (rys. 1). Podwyższenie sprawności zapewniają śruby typu tandem – przeciwbieżne. Odzyskuje się część energii traconej na skręcenie strumienia zaśrubowego [3]. Zaletami śrub przeciwbieżnych przedewszystkim są: istotnie zwiększona sprawność, według różnych źródeł rzędu 15÷27% oraz wzajemne

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

zrównoważenie się momentów reakcji [5,6,8-10]. Pewnym niedostatkim są trudności w wykonaniu technologicznym podwójnego wału dla pędników (rys. 2).



Rys. 1 Ilustracja zasady działania dwóch pędników w układzie przeciwbieżnym [13]

Zastosowanie śrub przeciwbieżnych

Śruby przeciwbieżne, współosiowo obracające się w przeciwnych kierunkach pędniki, zastosował po raz pierwszy działający w Angli i w USA szwedzki inżynier John Ericsson w 1836 roku [10]. Z uwagi na trudności typu konstrukcyjnego zrezygnował z promowania swojego rozwiązania. Do koncepcji zastosowania śrub przeciwbieżnych powróciła w 1984 roku Japońska stocznia *IHI* na masowcu *Juno* oraz koncern *Mitsubishi Heavy Industries* na statku *Toyofuji 5* oraz *Cosmos Delphinus*. Rozwiązania te pozwoliły uzyskać 15% oszczędności paliwa w porównaniu z innymi statkami tego armatora [10]. Układy śrub przeciwbieżnych z silnikami elektrycznymi specjalnej konstrukcji są stosowane również na okrętach i aparatach podwodnych, torpedach.



Rys. 2 Schemat konstrukcyjny klasycznego układu przeciwbieżnego [13]

W Rosji dokonano analizy porównawczej [5], z punktu widzenia uzyskania maksymalnej sprawności, wybranych czterech wariantów układów pędników śrubowych współczesnego statku o mocy 11MW przy prędkości obrotowej 120 obr/min, prędkości

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

postępowej $V_p=8,2$ m/s, sile pociągowej $P=13\ 700$ kG. Wariant 1. obejmuje rozwiązanie klasyczne z prędkością 120 obr/min (przyjęte za bazowe), w wariantcie 2. obniżono prędkość do 60 obr/min, z kolei w wariantcie 3. zastosowano układ przeciwbieżny, natomiast w wariantcie 4. Obniżono prędkość i zastosowano układ przeciwbieżny. Wyniki zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1 Dane porównawcze czterech wariantów napędu [5]

Wariant	Srednica D	Liczba obrotów n	Liczba śrub napędowych	Indukowana osiowa prędkość $\omega_a=V_{A0}$	Indukowana obwodowa prędkość $\omega_o=V_{T0}$	Sprawność pędnika w swobodnej wodzie η_r	Współczynnik porównawczy η_{pr}/η_{pl}
-	m	obr/min	-	m/s	m/s	-	-
1	5,8	120	1	4,8	0,88	0,69	1,00
2	9,0	60	1	2,1	0,66	0,78	1,13
3	4,4	120	2	4,1	0,09	0,79	1,14
4	6,7	60	2	1,9	0,06	0,88	1,27

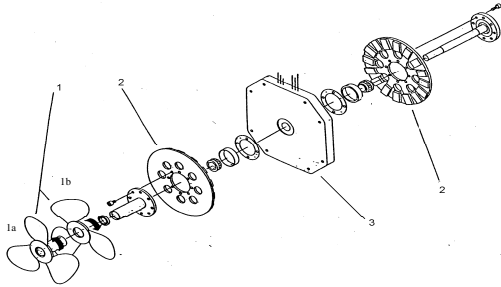
Uzyskano interesujące wyniki. Porównywanie pędnika śrubowego, będącego już w eksploatacji (wariant 1) z perspektywicznymi układami napędowymi (warianty 2-4) dobitnie pokazuje, że tzw. wolnoobrotowość i układ przeciwbieżny zwiększa istotnie sprawność napędu. Porównując warianty 1 i 4 widzimy, że przy prędkości obrotowej wałów napędowych 60 obr/min indukowana osiowa prędkość zmniejsza się do 1,9 m/s, a obwodowa do 0,06 m/s. W rezultacie sprawność pędnika śrubowego osiąga 0,88; co stanowi wzrost o 27% w porównaniu do wariantu bazowego - pierwszego.

Silnik dyskowy w układzie przeciwbieżnym

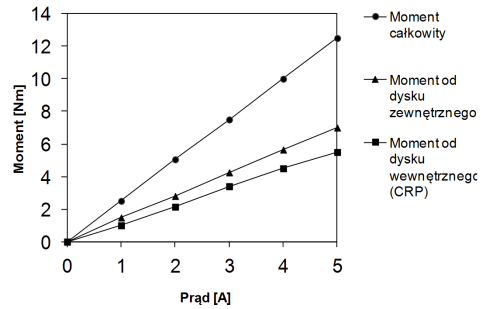
Początki rozwoju maszyn dyskowych rozpoczynają się od lat 30-tych XIX wieku. Ich rozwój związany jest z wielkimi nazwiskami nauki o elektryczności, m.in. : Faraday M. (1832), Ritchie W.(1833), Jacobi B. (1834) oraz Murygin A.I. (1970-72); Pałastin L.M. (1972); But D.A. (1990); Chalmers B.J (1993-97), D.C.Hanselman (1994); Gieras J.F (1996-2010). Maszyny te posiadają zalety jak i niedostatki oraz mają pewną specyfikę przy ich projektowaniu i analizie pracy w stanach ustalonych i przejściowych. Oryginalną propozycję przedłożył włoski zespół pod kierownictwem prof. F. Caricchio [2], który zaproponował w 1995 r. model laboratoryjny napędu bezprzekładniowego, składającego się z 16- biegunowego prototypu silnika tarczowego, pozwalającego na pracę przeciwbieżną (rys.3). Tarcze wirnika zbudowane były z osiowo namagnesowanymi wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi (MT) o danych: $B_r = 1,2T$ i $H_c = 900kA/m$. Uzyskanie ruchu przeciwbieżnego wirników wymagało specjalnego rozwiązania zasilania uzwojeń stojana, tak aby w szczelinach powietrznych wytworzyć dwa przeciwnie biegnące pola magnetyczne. Moment całkowity układu napędowego jest sumą momentów pędnika głównego i CRP – rys. 4

W pracy [6] przedstawiono porównanie różnych silników do napędów bezzałogowych zdalnie sterowanych pojazdów głębinowych, gdzie pokazano korzystne współczynniki efektywności konstrukcji silników dyskowych. Natomiast w publikacjach [1,4] przedstawiono konstrukcje bezrdzeniowych silników dyskowych z MT w tzw. układzie Halbacha. Przy indukcji w szczelinie $B=0,6$ T uzyskano dwukrotnie wyższą gęstość mocy (0,254 kW/kg). Silnik bezrdzeniowy okazał się lżejszy o 50% w porównaniu do jego odpowiednika z pakietowanym stojaniem i wirnikiem.

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014



Rys. 3 Prototyp silnika tarczowego z CRP
1a–śruba główna i 1b-CRP, 2–wirnik -tarcze z magnesami trwałymi, 3–stojan [2]



Rys. 4 Zależności momentów każdej z tarcz w funkcji prądu [2]

Dobór układu napędowego

Intensywny rozwój techniki morskiej wymaga nowego podejścia do projektowania optymalnych napędów. Zmiany te muszą iść w kierunku poprawy sprawności, zmniejszenia gabarytów i masy silnika napędowego, a także powinny uwzględniać w coraz większym stopniu wymogi ochrony środowiska. W ostatnim okresie intensywnie rozwija się transport z wykorzystaniem napędu elektrycznego zasilanego z paneli słonecznych [7] – umownie nazwany „heliotransportem” (w jęz. ang. Solar Boat)



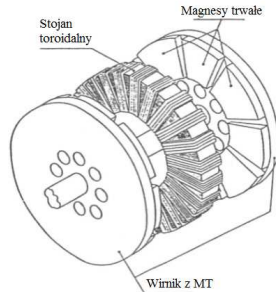
Rys 5. Wodny tramwaj w Bydgoszczy [11]



Rys 6. PlanetSolar z Nowej Zelandii [12]

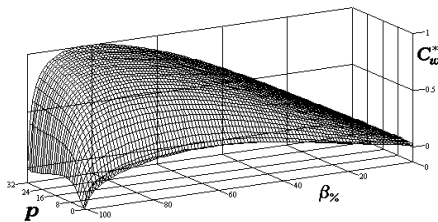
Przy doborze układu napędowego przede wszystkim korzystamy z gotowej oferty kompletnego zespołu dostępnego na rynku, a w drugim przypadku przeprowadzamy indywidualną procedurę projektowania silnika wg. metodyk określonej w specjalistycznej literaturze, posługując się przy tym najczęściej stosowanymi kryteriami: jednostkowym momentem $C_w=M/m$, współczynnikiem sprawności η i maksymalnym momentem elektromagnetycznym M_e . W ramach tej procedury przeprowadzono, m.in. przykładowe obliczenia optymalizacyjne [7,9] współczynnika sprawności η , jednostkowego momentu C_w , w funkcji par biegunów p i względnej średnicy $\beta_{\%}$ dla silnika dyskowego (rys. 7) o mocy znamionowej $P=1500$ W, prędkości obrotowej $n_n=375$ obr/min, częstotliwości $f_n=50$ Hz i prądzie fazowym $I_n=2,4$ A. Rezultaty przedstawiono na rysunkach – rys. 8 do rys. 11.

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

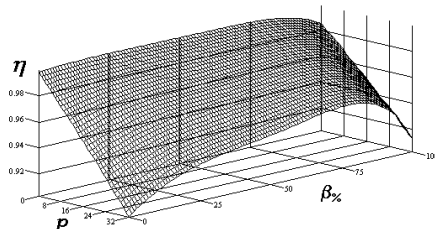


Rys. 7 Ogólny schemat silnika dyskowego z MT

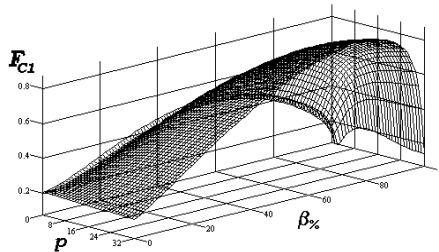
Funkcja celu F_c miała postać $F_c = w_1 C_w + w_2 \eta + w_3 M_e$, gdzie w_i – współczynniki wagowe w zależności od rangi danego kryterium. Na rys. 8 przedstawiono rezultaty zmiany jednostkowego momentu w funkcji liczby par biegunów i względnej średnicy (β), natomiast na rys. 9 pokazano współczynnik sprawności (η) w funkcji par biegunów (p) i względnej średnicy (β). Na kolejnych – rys. 10 i 11 pokazano funkcję celu F_c dla różnych współczynników wagowych i dla równych współczynników wagowych.



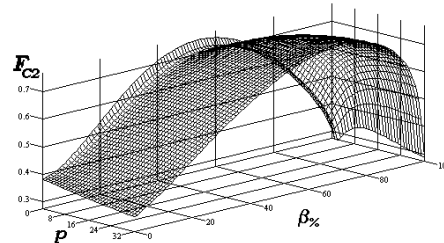
Rys.8 Jednostkowy moment elektromagnetyczny C_w w funkcji liczby par biegunów (p) i względnej średnicy (β).



Rys.9. Współczynnik sprawności (η) w funkcji par biegunów (p) i względnej średnicy (β)



Rys.10 Celowa funkcja dla różnorodnych współczynników wagowych $w_1=4/6$, $w_2=w_3=1/6$



Rys.11 Funkcja celowa dla równych współczynników wagowych $w_1=w_2=w_3=1/3$

Wnioski

1. Uzyskanie wzrostu sprawności układów napędowych jest zagadnieniem szczególnie ważkim zarówno w napędach morskich, jak i śródlądowych. Budowa systemów energooszczędnych jest możliwa poprzez zastosowanie układów wolnoobrotowych i przeciwbieżnych. Do tych celów z powodzeniem może być zastosowany bezprzekładniowy silnik tarczowy o nieruchomym stojanie i dwóch obracających się w przeciwne strony dyskach.

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

2. W pracy pokazano, że zastosowanie układu wolnoobrotowego pozwoli powiększyć sprawność o 13%, natomiast systemu przeciwbieżnego da wzrost o 14 %. Największy efekt można osiągnąć w przypadku zastosowania współosiowych pędników śrubowych o ruchu przeciwbieżnym z równoczesnym zmniejszeniem prędkości obrotowej pędnika śrubowego, co na podstawie literatury szacuje się, że nastąpi wzrost sprawności do 27%.
3. W napędach specjalnych, w których wymagana jest minimalna masa interesującą propozycją do układu napędowego mogą być silniki synchroniczne dyskowe, zwłaszcza bezrdzeniowe, zapewniające zmniejszenie o połowę masy, a także duży moment elektromagnetyczny, jak i stosunkowo mały moment bezwładności oraz dobre własności dynamiczne.

Literatura

1. Afonin A., Gieras J., Szymczak P., Permanent magnet brushless motors with innovative excitation system, Proc. of 6th UEES'04, Alushta, Ukraine, 24-29.08.2004, vol.1 pp. 27-38,
2. Caricchi F., Crescimbeni F., Santini E.: „Basic principle and design criteria of axial-flux PM machines having counterrotating rotors”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, No. 5, September/October 1995, pp. 1062-1068
3. Dudziak J., Teoria okrętu, Wyd. Fundacja PPOiGM, Wyd. II, Gdańsk 2008
4. Gieras J.F., Gieras I. A., Szymczak P., *Is the ferromagnetic core in PM brushless motors necessary?*, Proc. Of the 5th Inter. Conf. on UEES'01, Poland 2001, vol. 1, pp. 59-70
5. Rubinraut A.M., Perspektivy primeneniya sverohprovodnikovoykh elektrodvigatelye dlya dvizheniya sudov, Elektriciestvo nr 9, 1996 s. 42+47
6. Szymczak P., Unconventional electric driver Basic on the contactless motor with a counterrotating rotor designed for multipurpose remotely operated vehicles, Proc. of 3rd UEES'97, Alushta, Ukraine, 19-21.09.1997, vol.2 pp. 459-461,
7. Szymczak P., Dyskowyje elektrodvigateli dlya privoda malych morskich ob'ektov, Proc. of the 12th Conf. „Alternative current electrical driver” ACED'01, 13-16.03.2001, USTU, Ekaterinburg, Russia, pp. 15-18
8. Szymczak P., Energy-efficient electric driver for floating vessels supplied with solar batteries, Heat Transfer and Renewable Sources of Energy 2002, pp. 295 - 302
9. Szymczak P., Silniki elektryczne w aparatach podwodnych - tendencje rozwoju oraz wybrane problemy doboru układu napędowego, Wiadomości Elektrotechniczne nr 12, 2011, s. 45-51
10. Urbański P., Pędniki okrętowe. Historia i rozwój., Wyd. Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk 2001
11. www.bydgoszcz.pl
12. www.solarboat.com
13. www.wartsila.com/

Autorzy: dr inż. Piotr Szymczak; Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: piotr.szymczak@zut.edu.pl, mgr inż. Jacek Barański, doktorant WE ZUT, Akademickie Koło SEP przy WE ZUT, e-mail: j.h.baranski@gmail.com; inż. Michał Wawrowicz, Akademickie Koło SEP przy WE ZUT, e-mail: kuba.wawrowicz@gmail.com, inż. Paweł Prajzendanc, Akademickie Koło SEP przy WE ZUT – Oddział Szczeciński SEP, e-mail: pawel.prajzendanc@gmail.com