

WYBRANE SPOSOBY POPRAWY WSKAŹNIKÓW EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ STATKU

THE SELECTED WAYS OF IMPROVING THE FACTORS OF ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS

Wojciech Zeńczak

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 41,
71-065 Szczecin, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, Katedra Inżynierii Bezpieczeństwa
i Energetyki, e-mail: wojciech.zenczak@zut.edu.pl

Streszczenie: W dążeniu do ograniczenia emisji dwutlenku węgla wszystkie obecnie nowo budowane statki większe niż 400 BRT muszą mieć określony Projektowy Wskaźnik Efektywności Energetycznej (*Energy Efficiency Design Index* – EEDI). Ponadto wprowadzono dobrowolnie określany Eksploatacyjny Wskaźnik Efektywności Energetycznej (*Energy Efficiency Operational Indicator* – EEOI), pozwalający na bieżącą ocenę efektywności transportowej statku. Korzystne wartości wskaźników możliwe są do osiągnięcia przez redukcję emisji CO₂ m.in. dzięki zastosowaniu niekonwencjonalnych źródeł energii w układach energetycznych statków. W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania na statkach takich źródeł, w tym odnawialnych źródeł energii. Spośród wielu różnych źródeł rozważono tylko te, których zastosowanie jest najintensywniej rozwijane, tj. energię wiatru i promieniowania słonecznego.

Słowa kluczowe: ochrona środowiska, odnawialne źródła energii, siłownie okrętowe.

Abstract: The aim to reduce the carbon dioxide emissions, for all newly built vessels of more than 400 GRT the Energy Efficiency Design Index (EEDI) must be determined. In addition, a voluntary determined Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI) was introduced to allow continuous assessment of the ship's transport efficiency. Favourable values of indicators are possible to achieve by reducing CO₂ emissions, among others thanks to the use of unconventional energy sources in ship power systems. In the article an analysis of the possibilities of using such sources on ships, including renewable energy sources is presented. From many different energy sources, only those whose application is most intensively developed, i.e. wind energy and solar radiation, were considered.

Keywords: environment protection, renewable energy sources, ship power systems.

1. WSTĘP

Aktualnie światowa żegluga morska odpowiedzialna jest za emisję 2,2% światowej emisji CO₂ [<http://www.pgt.pl>]. Nie jest to dużo, a zważywszy dodatkowo emisję CO₂ ze statków, przypadającą na jednostkę przewiezionego ładunku na dystansie 1 km, okazuje się, że statki należą do najefektywniejszych środków transportu. Pomimo to oraz faktu, że w porównaniu do 2007 roku, kiedy udział emisji ze statków stanowił 2,8%, uzyskano wyraźny postęp, perspektywa obowiązku redukcji emisji CO₂ o 40% do roku 2050 w porównaniu z rokiem 2005 wymaga podejmowania różnych działań, dotyczących wprowadzania nowych rozwiązań siłowni statków, w tym wprowadzania paliw alternatywnych. Działania te są wymuszane przez wprowadzanie coraz to nowych standardów i przepisów.

Obecnie wszystkie nowo budowane statki większe niż 400 BRT muszą mieć określony Projektowy Wskaźnik Efektywności Energetycznej (*Energy Efficiency Design Index* – EEDI), wszystkie zaś statki, tj. nowe i wybudowane przed 1 stycznia 2013 roku objęte są Planem Zarządzania Efektywności Energetycznej Statku (*Ship Energy Efficiency Management Plan* – SEEMP), zapewniającym optymalną eksploatację statku [<http://www.imo.org>]. Ujmując najogólniej, EEDI stanowi pewien dopuszczalny dla statków standard obciążenia środowiska emisją CO₂, mierzoną w odniesieniu do korzyści dla społeczeństwa (pracy transportowej) [IMO 2016]:

$$\text{projektowy wskaźnik CO}_2 = \frac{\text{obciążenie dla środowiska}}{\text{korzyści dla społeczeństwa}}$$

Osiągnięcie małej wartości EEDI, który definiuje się dokładniej jako stosunek całkowitej emisji CO₂ ze spalania paliwa w silnikach głównych, pomocniczych i kotłach do pracy transportowej, jest możliwe poprzez wszelkie przedsięwzięcia, sprzyjające obniżeniu zużycia paliwa przez statek. Praca transportowa jest tu określana jako iloczyn projektowej nośności statku (dwt) i projektowej prędkości zmierzonej w warunkach maksymalnego załadowania przy 75% mocy nominalnej na wale [<http://www.imo.org>].

Do podstawowych działań zmniejszających EEDI należy np. wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin. Na jego obniżenie ma również wpływ zastosowanie odnawialnych źródeł energii, np. wiatru lub energii słonecznej, a także paliw alternatywnych jak LNG czy metanol. Te właśnie paliwa zostały określone jako najlepsze paliwa alternatywne w transporcie morskim według raportu Wspólnego Centrum Badawczego UE. Zostały one także uznane za najistotniejsze w drodze przejścia na biopaliwa [www.gospodarkamorska.pl]. Zarówno LNG, jak i metanol mają bowiem swoje odpowiedniki w postaci biopaliw, tj. biometanu i biometanolu, zaliczanych do odnawialnych źródeł energii jako gazowa lub ciekła postać biomasy. Ich użycie sprzyja nie tylko ograniczeniu emisji CO₂, ale także innych toksycznych składników spalin.

Ponadto wprowadzono dobrowolnie określany Eksploatacyjny Wskaźnik Efektywności Energetycznej (*Energy Efficiency Operational Indicator* – EEOI), pozwalający na bieżącą ocenę efektywności transportowej statku na podstawie danych eksploatacyjnych statku. EEOI definiowany jest jako

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j C_{Fj}}{m_{cargo} D}, \quad (1)$$

gdzie:

- FC_j – masa zużytego paliwa w czasie podróży (jazda w morzu i postój w porcie) przez silniki główne i pomocnicze, kotły oraz spalarkę,
- J – rodzaj paliwa,
- C_{Fj} – współczynnik konwersji, wyrażony stosunkiem masy CO₂, powstałego ze spalania zużytego paliwa rodzaju j ,
- m_{cargo} – masa przewiezionego ładunku (tony) lub wykonana praca (liczba kontenerów TEU lub pasażerów) albo pojemność (GT) dla statków pasażerskich,
- D – dystans w milach morskich, na którym przewieziono ładunek lub wykonano pracę transportową.

Wartości współczynnika konwersji C_F zależne są od zawartości węgla w paliwie. Przykładowo dla oleju napędowego $C_F = 3,206$ [t CO₂ / t paliwo], a dla LNG $C_F = 2,75$ [t CO₂ / t paliwo] [*Guidelines for Voluntary Use...*].

Między innymi ze względu na małą wartość C_F LNG jest silnie promowanym paliwem dla statków w UE.

Osiągnięcie małej wartości EEOI jest możliwe głównie poprzez wszelkie przedsięwzięcia, sprzyjające obniżeniu zużycia paliwa przez statek, także w porcie. Do podstawowych działań zmniejszających EEOI w czasie jazdy w morzu należy np. zmniejszenie prędkości, wykorzystanie ciepła odpadowego ze spalin podobnie jak w przypadku EEDI, ale także zastosowanie odnawialnych źródeł energii, na którym skupiono główną uwagę w artykule. Niniejszy materiał opiera się w dużej części na wcześniejszych publikacjach autora, poświęconych tym zagadnieniom i stanowi podsumowanie tamtego etapu badań.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

Jedną z cech fizycznych energii odnawialnej jest mała gęstość jej strumienia w porównaniu z energią konwencjonalną. Przykładowo promieniowanie słoneczne charakteryzuje się gęstością strumienia <1,33 kW/m², wiatr gęstością strumienia

$< 3 \text{ kW/m}^2$, podczas gdy np. konwencjonalne spalanie węgla w komorze spalania kotła to wartość 500 kW/m^2 [Szargut i Ziębik 1998]. Ta cecha energii odnawialnej sprawia, że jej wykorzystanie na statkach, gdzie mamy do czynienia z ograniczoną powierzchnią, jest mało efektywne. Tym niemniej postęp technologiczny, jaki ma miejsce w zakresie wykorzystania energii odnawialnych na lądzie, sprawia, że coraz częściej sięga się po te źródła na statkach, aby zmniejszyć zużycie paliwa konwencjonalnego i ograniczyć negatywne konsekwencje, wynikające z jego spalania.

Kierując się własnymi doświadczeniami oraz faktami znanymi z literatury przedmiotu w zakresie zastosowania odnawialnych źródeł energii na statkach, przyjęto do rozważań dwa najważniejsze źródła energii odnawialnej, tj. energię wiatru i energię promieniowania słonecznego.

3. SPOSOBY WYKORZYSTANIA ENERGII WIATRU

3.1. Wprowadzenie

W energetyce wiatrowej z punktu widzenia możliwej do wykorzystania energii wiatru przez siłownię wiatrową największe znaczenie ma średnioroczna prędkość wiatru na danym terenie na określonej wysokości nad powierzchnią ziemi. Wraz ze wzrostem wysokości nad powierzchnią ziemi rośnie średnia prędkość wiatru.

Profil prędkości wiatru, czyli wykres przedstawiający średnią prędkość wiatru wiejącego z danego kierunku jako funkcję wysokości nad terenem ziemi lub wodą, silnie zależy od ukształtowania terenu i chropowatości podłoża, a także czasu uśredniania prędkości. Badania wykazują, że wpływ tarcia na poziome ruchy powietrza istotny jest w warstwie powietrza, stykającej się bezpośrednio z ziemią, o grubości rzędu 1 km [Flaga 2008]. Według wszelkich klasyfikacji szorstkości terenu powierzchnia wody, jak otwarte morze, należy do terenów o najniższych wartościach szorstkości. Poznanie tych cech wiatru spowodowało rozwój nowych technologii wykorzystania wiatru obok znanego ze starożytności pędnika żaglowego.

3.2. Pędnik żaglowy

Do czasów wynalezienia maszyny parowej tłokowej pędnik żaglowy był podstawowym źródłem napędu na statkach, by później stać się ewentualnie pędnikiem pomocniczym. Stosunkowo długo żagle utrzymywały się w tej roli na kutrach oraz statkach rybackich i to nawet w czasach, kiedy do napędu stosowano już powszechnie spalinowy silnik tłokowy. Wzrost mocy i sprawności silników spalinowych, stosunkowo niskie ceny paliwa, a także kłopotliwa obsługa i ograniczenia, wynikające z podstawowej wady pędnika żaglowego, jaką jest konieczność

halsowania w przypadku niesprzyjającego kierunku wiatru, spowodowały, że żagle na długo znikły ze statków.

Światowe kryzysy paliwowe i związane z tym wzrosty cen ropy naftowej przywróciły zainteresowanie żaglem jako wspomagającym pędnikiem wiatrowym. Tradycyjne typy ożaglowania ulegały przy tym znacznym modernizacjom, ukierunkowanym na uproszczenie obsługi. Stosowano ożaglowania zarówno z żaglami prostokątnymi, jak i trójkątnymi. W porównaniu do rozwiązań tradycyjnych charakteryzowały się one korzystniejszymi właściwościami aerodynamicznymi i całkowicie zmechanizowanymi sposobami refowania i brasowania żagli, sterowanymi z mostka z wykorzystaniem komputera. Żagle, takielunek i omasztowanie wykonane były z nowych materiałów konstrukcyjnych.

Zastosowanie żagli jako wspomagającego napędu na statkach motorowych łączy się jednak z wieloma ograniczeniami na różnych typach statków jak np. trudności w za- i wyładunku przy użyciu portowych urządzeń przeładunkowych czy też ograniczenia wykorzystania wiatru w zależności od trasy żeglugi. Być może są to przyczyny tego, że mimo korzystnego wpływu tych rozwiązań na wartości EEDI czy EEOI nie znajdują się one w powszechnym użyciu. Nie ustają jednak prace, mające na celu poprawienie właściwości pędników żaglowych, np. poprzez wykorzystanie wiatrów wiejących z większą prędkością na dużej wysokości. Przykładem jest cargoproa, której koncepcja oparta jest na tradycyjnej proa z wysp Mikronezji czyli jednokadłubowej łodzi z bocznym pływakiem. Zastosowanie bocznego płwaka pozwala na zastosowanie masztów o wysokości 100–150 m bez obawy o utratę stateczności statku [Laursen 2014].

Koncepcję tego rozwiązania przedstawia rysunek 1.



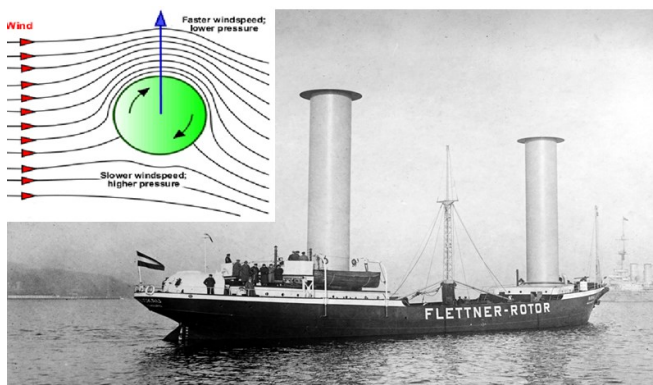
Rys.1. Cargoproa

Fig.1. Cargoproa

Źródło: [Laursen 2014].

3.3. Rotory Flettnera

Rotory Flettnera, wykorzystujące efekt Magnusa, po raz pierwszy zastosowano w 1920 roku na niemieckim statku „Buckau” (rys. 2). Rozwiązanie to nie cieszyło się jednak zbyt dużym zainteresowaniem aż do roku 2010, kiedy to oddano do eksploatacji w Niemczech innowacyjny statek lo-ro „E-ship-1” z napędem spalinowo-elektrycznym wspomaganym czterema rotorami. Każdy z nich ma wysokość 27 m i średnicę 4 m. Optymalną siłę ciągu rotorów zyskuje się przy kącie wiatru 100–130° w stosunku do kursu [Shiffbau & Schiffstechnik 2013]. Przy wietrze przeciwnym do ruchu statku, aby w pełni móc wykorzystać rotory, niezbędne jest halsowanie jak na tradycyjnym statku żaglowym. Jak pokazuje praktyka, zastosowanie rotorów pozwala na 30% redukcję zużycia paliwa, co bardzo korzystnie wpływa na wskaźnik EEOI.



Rys. 2. Niemiecki statek „Buckau” z napędem spalinowym wspomaganym rotorami Flettnera

Fig. 2. German motor ship “Buckau” with assisted Flettner rotors

Źródło: <http://www.wikiwand.com>.

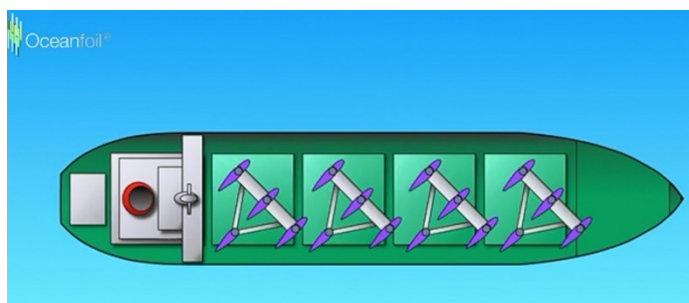
W rotor Flettnera wyposażono także na wiosnę 2018 roku prom „Viking Grace”, który znany jest z tego, że jest pierwszym dużym statkiem pasażerskim napędzanym LNG. Zastosowanie tego wspomagającego pędnika wiatrowego powinno obniżyć emisję CO₂ przez ten statek o 900 Mg rocznie [<http://www.hansaonline.de>].

3.4. Technologia Oceanfoil

Technologia wykorzystania wiatru pozwalająca na uzyskanie 20% redukcji zużycia paliwa przez statek, opracowana przez brytyjską firmę Oceanfoil, oparta jest na zastosowaniu skrzydłożagli. Siła ciągu skrzydłożagli generowana jest na takiej samej zasadzie jak siła nośna na skrzydle samolotu. Statek handlowy płynący

ze średnią prędkością 17–18 w może mieć wiatr od dziobu średnio nawet więcej niż przez 50% czasu podróży. Wiatrowy system energetyczny wykorzystuje wiatr pozorny i generuje siłę wzdłuż osi statku, której wartość zależy od kąta natarcia. Można oczekiwać pojawienia się dodatkowej siły ciągu przy kierunku wiatru pozornego w sektorze 18–180°, co jest ogromnym osiągnięciem, eliminującym wady innych pędników wiatrowych. Zespoły skrzydłożagli ustawione są pionowo na obrotowych platformach, obracających się optymalnie w stosunku do kierunku wiatru. Dla uzyskania optymalnych osiągnięć duże statki mogą mieć do sześciu, a małe 2–3 platformy ze skrzydłami. Całość sterowana jest z mostka za pośrednictwem komputera i nie wymaga ingerencji członków załogi. System dostępny jest od roku 2015 i możliwe jest jego instalowanie na statkach wcześniej wybudowanych [<http://www.oceanfoil.com>].

Na rysunku 3 przedstawiono widok statku ze skrzydłożaglami Oceanfoil oraz możliwe ich rozmieszczenie na masowcu.



Rys. 3. Technologia skrzydłożagli Oceanfoil

Fig. 3. Oceanfoil Technology of Wings

Źródło: <http://www.oceanfoil.com>.

3.5. Pędnik wysokościowy

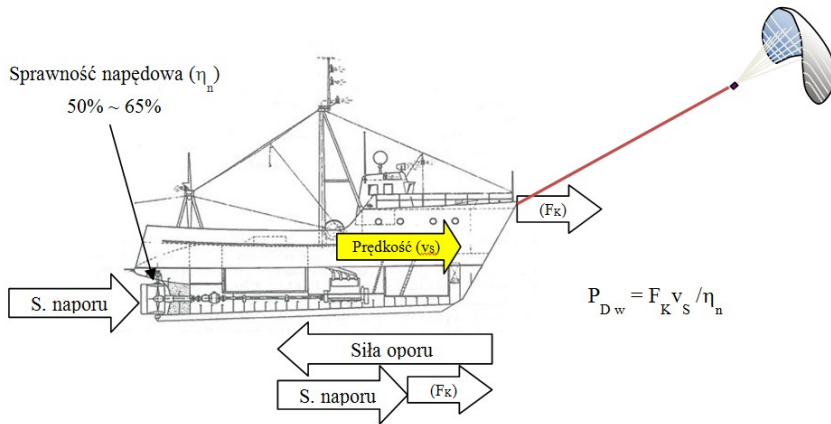
Współczesny pędnik wysokościowy stanowi latawiec, połączony ze statkiem liną o długości 100–500 m, który konstrukcyjnie przypomina paralotnię. W rozwiązaniu tym wykorzystuje się większe prędkości wiatrów wiejących na wysokościach od 100 do 500 m n.p.m. Wykorzystanie latawca sprowadza się wyłącznie do użycia go jako wspomagającego napędu statku [Zeńczak 2012].

Najbardziej zaawansowany, przetestowany i oferowany już na rynku jest system firmy Sky Sails. W tym przypadku latawiec przypomina dwupowłokową paralotnię nadmuchiwaną powietrzem. Dzięki odpowiedniemu profilowi, na latawcu, podobnie jak na skrzydle samolotu, pojawia się siła nośna ułatwiająca jego wzniesienie. Wewnątrz liny holującej znajduje się kabel, zasilający umieszczoną pod latawcem gondolę z elektronicznym układem sterującym. Dzięki utrzymywaniu

latawca w ciągłym ruchu po torze w kształcie „ósemki” wzrasta siła nośna, rozwijająca dużą siłę holującą. Całość operacji nadzoruje komputer. Rozwiązania te znalazły zastosowanie na dużych statkach morskich, ale mogą być też adaptowane dla mniejszych jednostek jak np. kutry rybackie.

Latawiec jest atrakcyjnym pędnikiem, ponieważ siła, z jaką działa na statek bezpośrednio, generuje moc holowania bez dodatkowych strat energii, wynikających z jej konwersji. Przyjmując przeciętną wartość sprawności napędowej statku motorowego jako stosunek mocy holowania do mocy doprowadzonej do stożka śruby, równą ok. 0,5, ekwiwalentna moc silnika dla nadania tej samej prędkości statkowi musi być dwukrotnie większa od mocy latawca.

Na przykładzie kutra rybackiego na rysunku 4 przedstawiono schemat układu sił działających na statek [Zeńczak 2014].



Rys. 4. Układ sił działających na kuter oraz moc holowania wiatru P_{dw}

Fig. 4. Forces system acting on the cutter and the towing power of wind P_{dw}

Źródło: [Zeńczak 2014].

Mimo że użycie latawca sprowadza się nie tylko do wiatru pełnego, ale także do półwiatru, a nawet do jednej czwartej wiatru, to podobnie jak pędnik żaglowy tak i pędnik wysokościowy ma podstawową wadę, tj. konieczność halsowania w przypadku niesprzyjającego kierunku wiatru.

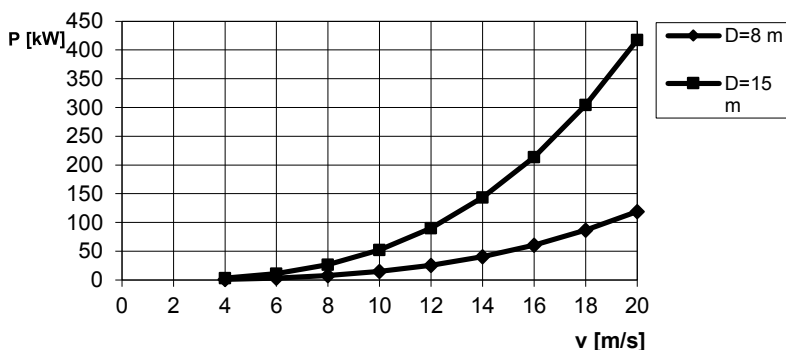
Pierwszym na świecie towarowym statkiem z pełnym sterowaniem automatycznym latawca był zwodowany w 2007 roku kontenerowiec 475 TEU, MS „Beluga SkySails”. Statek rozwijał prędkość 15,5 w przy mocy silnika głównego równej 3840 kW. Według zapewnień producenta przy powierzchni latawca równej 160 m² można osiągnąć ok. 15–20% oszczędność w zużyciu paliwa, a w przypadku latawca o powierzchni dwukrotnie większej, operującego na wysokości do 420 m, przewidzianego dla masowca o nośności 25 000 DWT, nawet do 35% [Zeńczak 2012].

3.6. Turbiny wiatrowe

Ponieważ moc turbiny wiatrowej wzrasta z kwadratem średnicy wirnika, to dąży się do stosowania jak największych średnic. Wymiary turbin na statku muszą być jednak ograniczone w stosunku do tych, jakie spotyka się na lądzie ze względu na stateczność statku. W przypadku instalacji kilku turbin dodatkowo należy zachować między nimi odległość nie mniejszą niż cztery średnice wirnika w celu uniknięcia wzajemnego zakłócania strumienia wiatru. Moce osiągnane przez turbiny o wymiarach adekwatnych do wymiarów statku mogą jedynie poprawić bilans energetyczny przez częściowe odciążenie elektrowni okrętowej ze spalinowymi zespołami prądotwórczymi i na ogół nie są w stanie pokryć całkowitego zapotrzebowania na energię elektryczną. Na małych jednostkach, jak jachty czy kutry, wykorzystywane są do ładowania akumulatorów, co także przyczynia się do pewnych oszczędności w zużyciu paliwa.

Jednym z największych statków, zbudowanych w jednej z polskich stoczni, był produktowiec B573 o długości całkowitej 183 m i szerokości 32,2 m. Spełniając wspomniane wcześniej kryteria, zakładając instalację turbin wiatrowych w najkorzystniejszym rejonie, tj. na nadbudówce, możliwe byłoby zastosowanie np. dwóch turbin o średnicach wirnika 8 m.

Wykres przedstawiający zależność mocy pojedynczej turbiny od prędkości wiatru przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Moc turbiny w funkcji prędkości wiatru

Fig. 5. Turbine power as a function of wind speed

Źródło: [Zeńczak 2012].

Jak widać z wykresu, przy założonej średnicy wirnika 8 m uzyskiwane moce nie są duże. Z dwóch turbin przy sile wiatru odpowiadającej 6 do 7 w skali Beauforta (ok. 16 m/s) można uzyskać moc ok. 120 kW. Stanowi to około 30% zapotrzebowania na moc elektryczną w czasie postoju tej jednostki na redzie. Można zatem uzyskać pewne odciążenie spalinowego zespołu prądotwórczego oraz pewne

oszczędności oleju napędowego rzędu 20 kg w ciągu godziny. Zastosowanie wirnika o średnicy ok. 15 m dałoby przy takiej samej sile wiatru ok. 210 kW mocy z jednej turbiny. Przy dwóch turbinach nastąpiłoby zatem pełne pokrycie potrzeb na energię elektryczną w czasie postoju na redzie. Taka wielkość średnicy wirnika jest akceptowalna pod warunkiem usytuowania turbin w większej odległości od siebie, np. na rufie i na dziobie statku. Można także rozważyć przyjęcie innej ich liczby, np. cztery turbiny – po jednej na dziobie i na rufie oraz na skrzydłach nadbudówki.

Możliwe jest wykorzystanie na statkach także turbin o osi pionowej. Przykładem udanej aplikacji jest rozwiązanie zastosowane w 2011 roku przez Stena Lines. Polega ono na umieszczeniu na pokładzie dziobowym promu „Stena Jutlandica” dwóch czterometrowych turbin wiatrowych o osi pionowej typu Darrieusa, osiągających łącznie moc 8 kW. W ciągu roku produkują one 23 000 kWh energii elektrycznej, która służy do oświetlenia pokładu samochodowego.

Najistotniejszą zaletą zastosowanych turbin tego typu jest nie tyle produkcja energii elektrycznej, co obniżenie czołowego oporu powietrza stawianego przez nadbudówkę. Pozwala to na uzyskanie oszczędności od ok. 80 do 90 Mg paliwa w ciągu roku przez silniki główne [*Wind Turbine Power...* 2011].

Na rysunku 6 przedstawiono widok turbin umieszczonych na dziobie promu.



Rys. 6. Turbiny Darrieusa na dziobie promu „Jutlandica”

Fig. 6. Darrieus turbines on the bow of the “Jutlandica” ferry

Źródło: [*Wind Turbine Power, „World First” for Ferry, 2011, Motorship, nr 7–8*].

Turbiny wiatrowe przeznaczone do zastosowań na małych jednostkach pływających napędzają najczęściej generatory prądu przemiennego, który następnie zamieniany jest na prąd stały 12, 24 lub 48 V.

Na jednostkach o długości w przedziale 17–24 m można przyjąć, że realnie możliwe jest zainstalowanie turbiny o średnicy wirnika równej nawet 2 m.

Przykładem takiej turbiny może być bardzo wydajna turbina japońskiej firmy Zephyr typu Airdolphin Mark-Zero/Pro (Z-1000-24/Z-1000-48) o średnicy wirnika 1,8 m. Przy prędkości wiatru 12,5 m/s generuje ona 1 kW mocy elektrycznej.

W tabeli 1 przedstawiono roczną teoretyczną ilość wyprodukowanej energii elektrycznej w zależności od prędkości wiatru i możliwe do zaoszczędzenia przez jednostkę ilości paliwa przy założeniu jednostkowego zużycia paliwa przez silnik 0,240 kg/kWh [Zeńczak 2014]. Na większych jednostkach celowe może być rozmieszczenie większej liczby takich turbin.

Tabela 1. Roczna produkcja energii elektrycznej przez jedną turbinę Airdolphin Mark-Zero/Pro i możliwe oszczędności paliwa

Table 1. Annual electricity production from one Airdolphin Mark-Zero / Pro turbine and possible fuel savings

Średnioroczna prędkość wiatru [m/s]	3	4	5	6	7	8
Roczna produkcja energii elektrycznej [kWh]	260	660	1260	2050	2970	3930
Zaoszczędzona ilość paliwa [kg]	62	158	302	492	713	943

Źródło: [Zeńczak 2014].

4. TECHNIKA SOLARNA NA STATKACH

Natężenie promieniowania słonecznego, jakie dociera do Ziemi wskutek odbić, absorpcji i rozproszenia w atmosferze, nie przekracza 1 kW/m². Średnio, największa gęstość tego strumienia energii na Ziemi występuje w strefie tropikalnej. W praktyce energia promieniowania słonecznego najczęściej przetwarzana jest na ciepło (konwersja fototermiczna) lub na energię elektryczną (konwersja fotowoltaiczna). W przypadku jednostek pływających jak dotąd zastosowanie znajduje konwersja fotowoltaiczna. Początki jej wykorzystania do napędu statków miały miejsce w końcu XX wieku. Dotychczasowe zastosowania skupiały się przede wszystkim na użyciu ogniw fotowoltaicznych do wytwarzania prądu elektrycznego, zasilającego silniki elektryczne, napędzające pędniki niewielkich jednostek rekreacyjnych, głównie śródlądowych. Pierwszym statkiem wykorzystującym energię słoneczną do napędu był elektryczny katamaran konstrukcji Lana Freemana, wybudowany w 1975 roku w Anglii. Silnik o mocy 750 W zapewniał prędkość 5 km/h [Szymczak 2002].

Największym do tej pory wybudowanym statkiem solarnym jest katamaran „Mobicat” o długości 33 m, zabierający 150 pasażerów. Jest to statek śródlądowy, eksploatowany na jeziorze Bielersee w Szwajcarii. Moduły fotowoltaiczne o wysokiej sprawności rozmieszczone są na dachu o powierzchni 180 m². Osiągana moc elektryczna z ogniw 20 kW zapewnia pływanie z prędkością 14 km/h [Minder i Vollenweider 2004].

Największy statek solarny pod względem powierzchni paneli to „PlanetSolar”, który w 2012 roku zakończył, trwającą 18 miesięcy, podróż dookoła świata. Powierzchnia paneli o sprawności 18,8% wynosi 537 m², a ich moc – 93,5 kW. Jego budowa, jak i rejs, mają głównie znaczenie marketingowe i promocyjne, ale pokazują także szczyt możliwości napędu solarnego [<http://www.planetsolar.org>].

Obecnie na świecie eksploatowanych jest też wiele małych łodzi i jachtów, wykorzystujących ogniwa fotowoltaiczne do zasilania układu napędowego z silnikiem elektrycznym lub tylko do ładowania akumulatorów. Wspólną cechą tych jednostek są niewielkie wymiary, eksploatacja przy braku kołysań i mała prędkość pływania, z czym wiąże się niewielkie zapotrzebowanie na moc do napędu. Zapotrzebowanie mocy przez pędnik wzrasta z prędkością statku do potęgi trzeciej, a zatem dla większych statków i większych prędkości wykorzystanie energii promieniowania słonecznego jako jedyne źródła energii do napędu statku jest obecnie nierealne, gdyż wymagałoby zastosowania bardzo dużych powierzchni ogniw, co potwierdza konstrukcja statku „PlanetSolar”.

Niekiedy celowo wyposaża się statek w dodatkowe powierzchnie, pełniące funkcję skrzydłożagli, które pokryte są ogniwami fotowoltaicznymi. Przykładem takiej jednostki jest statek „Solar Sailor”, wprowadzony do eksploatacji w roku 2000 i przeznaczony do wykonywania rejsów wycieczkowych po porcie Sydney (rys.7).



Rys. 7. „Solar Sailor” – pierwszy statek z napędem hybrydowym wiatrowo-słonecznym

Fig. 7. “Solar Sailor” – the first wind-/solar-powered hybrid vessel

Źródło: <http://www.solarsailor.com/solar-sails>.

Innym przykładem, gdzie zastosowano skrzydłożagle, jest wybudowany później również przez firmę Solar Sailor statek „Solar Albatros” [<http://www.solar-sailor.com/solar-sails>]. Są to więc jednostki o napędzie hybrydowym wiatrowo-

słonecznym, które najczęściej są przedstawiane wśród rozwiązań dla statków przyszłości.

Na pełnomorskich statkach towarowych, wymagających większych mocy napędu głównego, nawet panele fotowoltaiczne o stosunkowo dużej powierzchni nie będą w stanie zaspokoić zapotrzebowania na energię elektryczną do napędu. Celowe natomiast jest wykorzystanie energii promieniowania słonecznego do wspomaganie produkcji energii elektrycznej na potrzeby ogólnookrętowe. Wśród dużych statków jest już wiele takich przykładów. Najbardziej spektakularnym przykładem jest samochodowiec „Emerald Ace” o zainstalowanej całkowitej mocy ogniw równej 160 kW i akumulatorach o pojemności 2,2 MWh. Pozwala to na korzystanie w porcie wyłącznie z energii elektrycznej, wyprodukowanej przez ogniwa fotowoltaiczne. Jest to pierwszy w świecie statek oceaniczny o zerowej emisji spalin podczas postoju w porcie [<http://www.mol.co.jp>].

Ogniwa fotowoltaiczne na statkach towarowych muszą być tak usytuowane, aby możliwe było prowadzenie przeładunków i aby nie były przy tym narażone na uszkodzenia mechaniczne. Stosunkowo najłatwiej jest rozmieścić moduły ogniw na masowcach i drobnicowcach na pokrywach luków ładowni, a także na zbiornikowcach na skrzydłożaglach (rys. 8).



Rys. 8. Wizja zbiornikowca wyposażonego w skrzydłożagle pokryte ogniwami fotowoltaicznymi

Fig. 8. The vision of a tanker equipped with wing wings covered with photovoltaic cells

Źródło: [Dawning of the Age of Aquarius 2012].

Projektanci systemu skrzydłożagli z panelami fotowoltaicznymi dla zbiornikowca, przedstawionego na rysunku 8, zapewniają redukcję w zużyciu paliwa na poziomie 20%. Nadają się do tego także inne statki, np. typu ro-ro z dodatkowo

wykonanymi zadaszzeniami, natomiast praktycznie nie nadają się do tego kontenerowce, na których kontenery ładowane są ponad pokład główny.

Przykładowe obliczenia możliwej do wyprodukowania ilości energii elektrycznej przy wykorzystaniu modułów ogniw fotowoltaicznych, rozmieszczonych w nadających się do tego miejscach, wykonano także dla trzech statków wybudowanych w jednej z polskich stoczni. W każdym przypadku przyjęto ten sam typ modułu solarnego o sprawności 14%.

Wyniki obliczeń dla wybranych statków przedstawia tabela 2 [Zeńczak 2004]. Uzyskane z modułów moce prądu porównano z zapotrzebowaniem na moc elektryczną w dwóch charakterystycznych stanach eksploatacyjnych, tj. w czasie postoju i podczas jazdy w morzu. Jak widać, największe pokrycie potrzeb można uzyskać na zbiornikowcu ze względu na największą powierzchnię ogniw. Na tym statku uzyskać można też największe oszczędności paliwa.

Tabela 2. Wyniki obliczeń dla wybranych typów statków

Table 2. Calculation results for selected ship types

Typ statku	Powierzchnia pod moduły [m ²]	Moc łączna modułów [kW]	Pokrycie potrzeb [%]		Oszczędność paliwa [kg/h]
			Reda	Morze	
Masowiec	672	83,0	28,2	16	11
Zbiornikowiec	2304	308,1	88,3	47,3	58
Statek typu ro-ro	1817	160,5	44,2	11,7	8

Źródło: [Zeńczak 2002].

Ogniwa fotowoltaiczne mają jednak pewne wady, w szczególności istotne, gdy przewidywane są jako podstawowe źródło energii do napędu, np. na wspomnianych jednostkach śródlądowych. Podstawową wadą jest brak możliwości produkcji energii elektrycznej w nocy, a także niska sprawność i wyłączanie się przy przeciążeniach.

Nad poprawą sprawności ogniw fotowoltaicznych trwają nieustanne prace. Aktualny rekord sprawności należy do nowego typu ogniw, wykorzystujących technologię skupiania na nich promieni (ogniwa CPV) i wynosi 46%. Osiągnięcie to należy do francuskiej firmy Soitec, a jej celem jest teraz uzyskanie 50-procentowej wydajności ogniwa [<http://www.gramwzielone.pl>]. Zastosowanie tych ogniw na statkach pozwoliłoby na nieomal potrojenie produkowanej energii z tej samej powierzchni co obecnie.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione sposoby wykorzystania energii wiatru i promieniowania słonecznego na statkach przyczyniają się do poprawy wskaźników EEDI oraz EEOI. Trudno jednoznacznie wskazać, które z nich powinny być w pierwszym rzędzie brane pod uwagę, ponieważ zależy to od rodzaju statku, a także od jego wielkości. Każdy statek należy zatem traktować indywidualnie. Może być także zasadne w niektórych przypadkach jednoczesne zastosowanie różnych źródeł i instalacji wykorzystujących wiatr, jak np. skrzydłożagli pokrytych ogniwami fotowoltaicznymi, zaangażowanych bezpośrednio do napędu statku i produkcji energii elektrycznej oraz turbin wiatrowych do produkcji energii elektrycznej.

Wskazane byłoby zalecenie stosowania układów hybrydowych wiatrowo słonecznych, ponieważ ta sama powierzchnia na statku jest najczęściej wykorzystywana jednocześnie przez dwa źródła, co umniejsza istotną wadę źródeł energii odnawialnych, jaką jest mała gęstość strumienia energii.

Na statkach możliwe jest także wykorzystanie innych źródeł energii odnawialnej, w szczególności różnych postaci biomasy. Pierwsze pozytywne doświadczenia ze statkami napędzanymi LNG czy metanolem otwierają drogę do szerokiego wykorzystania biometanu i biometanolu. Celowe może być zastosowanie w siłowni turboparowej biomasy stałej w postaci peletu, szczególnie toryfikowanego, o wysokiej wartości opałowej. Zastosowanie kotła fluidalnego zasilanego peletem jest wyjątkowo ekologiczne [Zeńczak 2010].

LITERATURA

- Dawning of the age of Aquarius*, 2012, *Motorship*, nr 3.
- Flaga, A., 2008, *Inżynieria wiatrowa*, Arkady Sp z o.o., Warszawa.
- Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)* MEPC.1/circ.684.
- IMO, 2016, *Methanol as Marine Fuel: Environmental Benefits, Technology Readiness, and Economic Feasibility*, Report No. 2015–1197, Rev.
- Laursen, W., 2014, *Wind Propulsion Designers Wait on Shipowner Participation*, *Motorship*, nr 9.
- Minder, R., Vollenweider, J., 2004, *MobiCat- das Zurzeit Größte Solarschiff der Welt*, *Bulletin SEV/AES*, nr 9.
- Schiffbau & Schiffstechnik, *Schiffsbeschreibung*, 2011, *Innovatives Spezialschiff mit kombiniertem Antriebssystem*, *Schiff & Hafen*, nr 1, s. 28–33.
- Szargut, J., Ziębik, A., 1998, *Podstawy energetyki cieplnej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Szymczak, P., 2002, *Energy-Efficient Electric Drive for Floating Vessels Supplied with Solar Batteries*, Proceedings of the 9th International Symposium on Heat Transfers and Renewable Sources of Energy, Szczecin.
- Wind Turbine Power „World First” for Ferry*, 2011, *Motorship*, nr 7–8.
- Zeńczak, W., 2004, *The Possibility of Renewable Energy Use on Ships*, Proceedings of the 10th International Symposium on Heat Transfers and Renewable Sources of Energy, Szczecin.

- Zeńczak, W., 2010, *The Concept of Ship's Power Plant Arrangement Involving Biomass Fired Boiler*, Journal of Polish CIMAC, vol. 5, no.1, Energetic Aspects, Gdańsk, s. 205–212.
- Zeńczak, W., 2012, *The Selected Methods of Utilizing the Wind Power as the Auxiliary Source of Energy on Diesel Engine Powered Ships*, Journal of Polish CIMAC, vol. 7, no. 1, Energetic Aspects, Gdańsk, s. 305–314.
- Zeńczak, W., 2014, *The Possibilities of Fishing Cutter Energetic Efficiency Improvement through the Application of the Renewable Energy Sources*, Journal of Polish CIMAC, vol. 9, no. 1, Energetic Aspects, Gdańsk, s.145–154.

Źródła internetowe

- www.gospodarkamorska.pl (dostęp 13.05.2016).
- www.gramzielone.pl (dostęp 13.09.2016).
- www.hansaonline.de (dostęp 17.04.2018).
- www.imo.org (dostęp 15.06.2013).
- www.mol.co.jp (dostęp 13.09.2016).
- www.oceanfoil.com/technology/ (dostęp 09.09.2016).
- www.pgt.pl (dostęp 07.09.2016).
- www.planetsolar.org (dostęp 13.09.2016).
- www.solarsailor.com/solar-sails (dostęp 25. 04.2014).
- www.wikiwand.com (dostęp 10.09.2016).