

# Projekt małego promu pasażerskiego z napędem hybrydowym – koncepcja napędu i wybrane problemy gospodarowania energią

Magdalena Kunicka, Wojciech Litwin

## 1. Wstęp


Na przestrzeni ostatnich lat wzrosło zainteresowanie ekologicznymi układami napędowymi jednostek pływających. Wynika to między innymi z nowych przepisów regulujących dopuszczalny poziom emisji związków szkodliwych zawartych w spalinach [1] oraz większej świadomości społeczeństwa odnośnie zanieczyszczeń środowiska. W ciągu kilku najbliższych lat konwencjonalne układy napędowe, oparte o silniki wysokoprężne, wykorzystywane przez ostatnie dziesięciolecia, będą wymagały modernizacji lub zostaną wycofane z eksploatacji, gdyż mogą nie spełnić rygorystycznych limitów emisji zawartych w przepisach.

Wiadomo już dziś, że w ciągu kilku najbliższych lat w Amsterdamie, który ma wyjątkowo gęstą i ciągle zatłoczoną sieć dróg wodnych, wprowadzony zostanie zakaz żeglugi dla jednostek rekreacyjnych z napędem konwencjonalnym.

Związki szkodliwe obciążają środowisko do tego stopnia, iż niektórych zmian spowodowanych przez zanieczyszczenie nie da się już cofnąć. Świadomość tego zjawiska wzbudza chęć poszukiwania innych rozwiązań napędowych, uwzględniając przy tym względy ekonomiczne. Problemy związane z poszukiwaniem sposobów na obniżenie kosztów eksploatacji jednostek oraz możliwości zastosowania nowoczesnych i zaawansowanych technologicznie rozwiązań jest obecnie przedmiotem licznych badań [2, 3, 4]. Przepisy dotyczące ochrony środowiska z roku na rok stają się coraz bardziej restrykcyjne, skupiając się na ograniczeniu emisji takich związków toksycznych, jak  $\text{NO}_x$ , związki siarki czy  $\text{CO}_2$  [5, 6], która jest ściśle powiązana ze zużyciem paliwa. Pozwala to wysnuć wniosek, iż w przyszłości względy ekologiczne mogą stać się na tyle ważne, iż obecnie wykorzystywane układy napędowe mogą nie zostać dopuszczone do dalszej eksploatacji. Sytuacja ta wymusza poszukiwanie alternatywnych rozwiązań dla klasycznego, konwencjonalnego układu napędowego statku. Jednym z proponowanych jest napęd hybrydowy, który – w porównaniu z klasycznym układem – emituje mniej związków szkodliwych [7]. Zdecydowaną zaletą tego rozwiązania jest również kwestia ekonomiczna. Pomimo iż koszt budowy jednostki z napędem hybrydowym jest wyższy, to z analiz wynika, że eksploatacja jednostki napędzanej energią elektryczną jest tańsza od jednostki napędzanej silnikiem spalinowym [3].

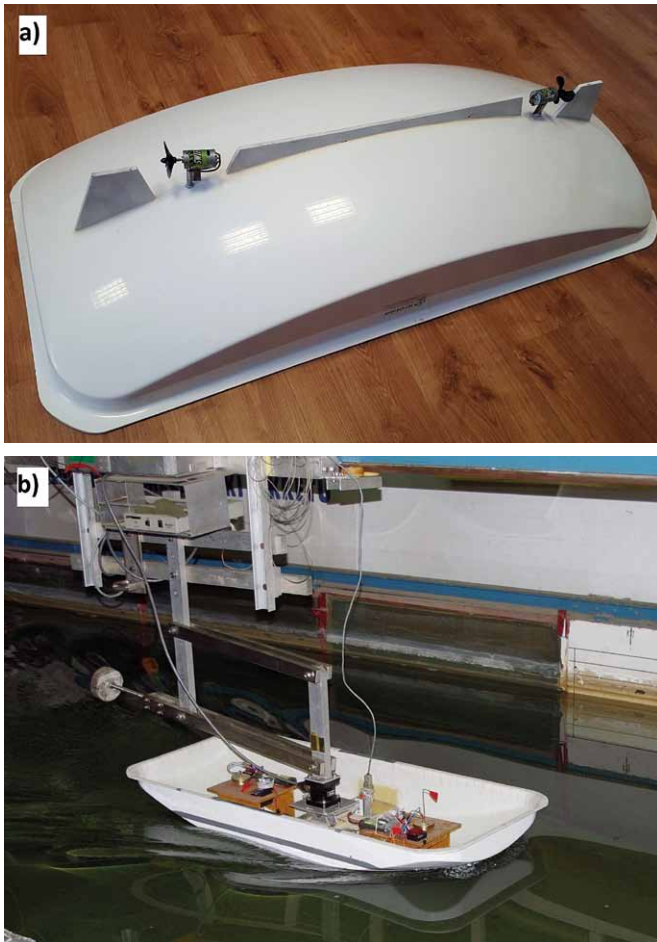
Przed dobraniem odpowiedniego rozwiązania konstrukcyjnego napędu konkretnej jednostki pływającej eksploatowanej na danym akwenu należy najpierw ocenić wszystkie wady

**Streszczenie:** Nowoczesne i ekologiczne układy napędowe zyskują coraz większą popularność. Ze względu na wzrost świadomości społeczeństwa oraz restrykcyjne przepisy odnośnie ochrony środowiska w najbliższych latach konwencjonalne układy napędowe mogą nie zostać dopuszczone do dalszej eksploatacji. Dobór alternatywnego rozwiązania jest zależny od wielu czynników, jak na przykład od rodzaju akwenu, po którym porusza się jednostka pływająca, jej przeznaczenia, autonomiczności czy stylu pływania. Dla małego promu pasażerskiego, poruszającego się w wąskim kanale wodnym, można wybrać jedno z nowoczesnych rozwiązań, jakim jest zastosowanie napędu hybrydowego szeregowego. Poprzez badania oporowe przeprowadzone na basenie modelowym, możliwe jest również dobranie korzystnej strategii pływania, pozwalającej na ograniczenie zużycia energii, a tym samym poniesionych kosztów.

 **Abstract:** Modern and eco-friendly propulsion systems are gaining more and more popularity. Due to the increase of public awareness and stringent environmental regulations, classic, conventional propulsion systems may not be allowed to use. Choosing another solution depends on many different factors, such as kind and size of water area, ship's autonomy/destination or movement strategy. For a small inland ferry, it's possible to choose one of the modern solutions, which is serial hybrid propulsion. Also through a research based on a ship's resistance (hydromechanics), it is possible to select profitable movement strategy that causes decrease in costs.

i zalety konkretnego rozwiązania. Już dla niewielkiej jednostki można wybrać jedno z nowoczesnych rozwiązań, jakim jest napęd hybrydowy równoległy lub szeregowy.

Układ hybrydowy równoległy, zaprojektowany i zastosowany po raz pierwszy do napędu okrętu podwodnego, liczy sobie już ponad sto lat. Układ tego typu składa się z silnika spalinowego oraz silnika elektrycznego. Co ważne, oba silniki są połączone sprzęgłami sterowanymi z wałem napędowym. Rozwiązanie takie charakteryzuje się wysoką sprawnością energetyczną i jest coraz częściej stosowane na jednostkach śródlądowych, które



Rys. 1. Model kadłuba statku w skali 1:10 (a); model podczas badań w basenie holowniczym (b)

poruszają się na różnorodnych akwenach z różnymi prędkościami. Wówczas, podczas manewrów w porcie, śluzowań oraz na obszarach z ograniczeniem prędkości – poruszają się, wykorzystując napęd elektryczny zasilany z akumulatorów. Na otwartych akwenach, gdzie prędkość żeglugi jest zazwyczaj wyższa i zapotrzebowanie na moc gwałtownie rośnie, uruchamiany jest silnik spalinowy. Dodatkowo zazwyczaj silnik elektryczny może pracować w trybie generatorowym podczas pracy silnika spalinowego i możliwe jest ładowanie akumulatorów. W szczególnych sytuacjach napędy tego typu mogą współdziałać tak, aby można było wykorzystać sumaryczną moc maksymalną obu silników. Rozwiązanie takie nie jest pozbawione ograniczeń i wad. Główne z nich to zazwyczaj znaczne rozmiary. Dodatkowo układ taki jest pożądany w przypadku konwencjonalnego rozwiązania układu napędowego z siłownią na rufie statku oraz linią wału przekazującą moc do śruby napędowej.

W układzie napędowym hybrydowym szeregowym pędnik, czyli śruba napędowa, napędzany jest przez silnik elektryczny. Zasilanie jednak pochodzi zazwyczaj z kilku źródeł. Powszechnie jako źródło zasilania stosuje się pakiety akumulatorów, generatory prądotwórcze, panele fotowoltaiczne i ogniwa paliwowe. W niektórych przypadkach źródłem energii do ładowania akumulatorów jest sieć energetyczna i wówczas taki układ nazywany jest *plug in hybrid*.

## 2. Projekt koncepcyjny promu „Motława 2”

Nowo zaprojektowana jednostka ma zastąpić obecnie eksploatowany w Gdańsku prom „Motława”. Jednostka ta charakteryzuje się przestarzałym technicznie układem napędowym, przez co koszty jej eksploatacji ciągle rosną. Pomimo iż wciąż jest wykorzystywana – zarówno względy estetyczne, jak i techniczne (np. układ napędowy) odbiegają od dzisiejszych standardów.

W procesie planowania założeń projektowych nowej jednostki należało uwzględnić ograniczenia zewnętrzne dotyczące wymiarów jednostki, wynikające z charakteru akwenu, po którym ma się poruszać, oraz sposobu eksploatacji jednostki. Ostatecznie przyjęto następujące dane: długość kadłuba  $L = 12,00$  m; szerokość statku  $B = 5,00$  m; zanurzenie całkowite  $T_{max} = 1,30$  m. Dodatkowym założeniem jest zdolność przewiezienia 36 pasażerów podczas całorocznej żeglugi, nawet gdy temperatura otoczenia spadnie poniżej zera i wystąpi zalodzenie.

W początkowej fazie procesu projektowania poszukiwano najlepszego rozwiązania i aby to osiągnąć, zaprojektowano kilka odmiennych geometrii kadłuba. Wyniki uzyskane z tego etapu prac pozwoliły wytypować kształt do dalszej optymalizacji [8].

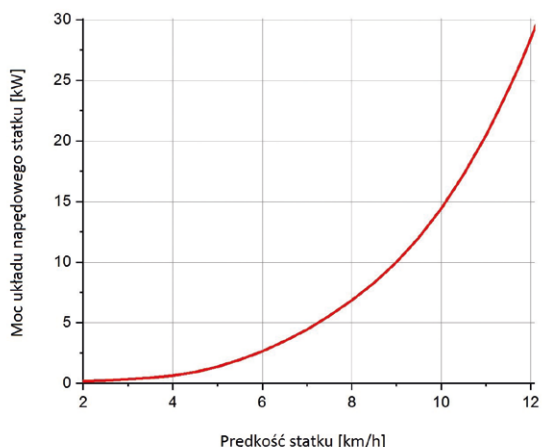
Jako podstawę dalszych działań przyjęto kadłub, który wykazał optymalne własności dla przyjętych kryteriów projektowych, dotyczących wymiarów jednostki, takich jak niskie opory kadłuba w wodzie, od których zależy zapotrzebowanie na moc napędu, a więc i zużycie energii. Od tego momentu prace projektowe biegnęły wielotorowo. Zaprojektowano kadłub, bryłę jednostki, układ napędu, zagospodarowano pokład i sterówkę.

## 3. Badania oporowe modelu jednostki

Badania eksperymentalne przeprowadzono na basenie holowniczym Katedry Teorii i Projektowania Okrętów Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej w warunkach wody spokojnej (rys. 1).

Opór całkowity modelu został przeliczony na skalę statku przy pomocy badań hydromechanicznych, opierających się na wykorzystaniu liczb Froude’a i Reynoldsa [9]. Przebieg funkcji zapotrzebowania na moc przedstawiono poniżej (rys. 2). Charakterystyka uwzględnia przybliżoną sprawność silnika (90%), sterownika (95%), śruby (60%) i przekładni kątowej redukcyjnej (0,95%).

Warto zwrócić uwagę, że przy niewielkich prędkościach (obecnie ok. 4 km/h), które są osiągane na obecnie eksploatowanej jednostce, opór podwodnej części kadłuba jest bardzo mały, z czego wynika znikome zapotrzebowanie na moc (około 0,5 kW). Uzyskane wyniki nie obejmują jednak uwzględnienia warunków atmosferycznych i oporów powietrza działających na kadłub, które nie zawsze mogą zostać pominięte. Dodatkowo, prom „Motława” porusza się w specyficznym akwenu wodnym, który jest niewielki. Pomiędzy brzegami jest tylko kilkadziesiąt metrów odległości. Trasa jednostki jest krótka, wymaga jednak precyzyjnego manewrowania. Szczególnie w okresie letnim, kiedy z akwenu korzysta również wiele innych jednostek. Dlatego najbardziej energochłonne są manewry statku, a nie żegluga ze stałą prędkością.



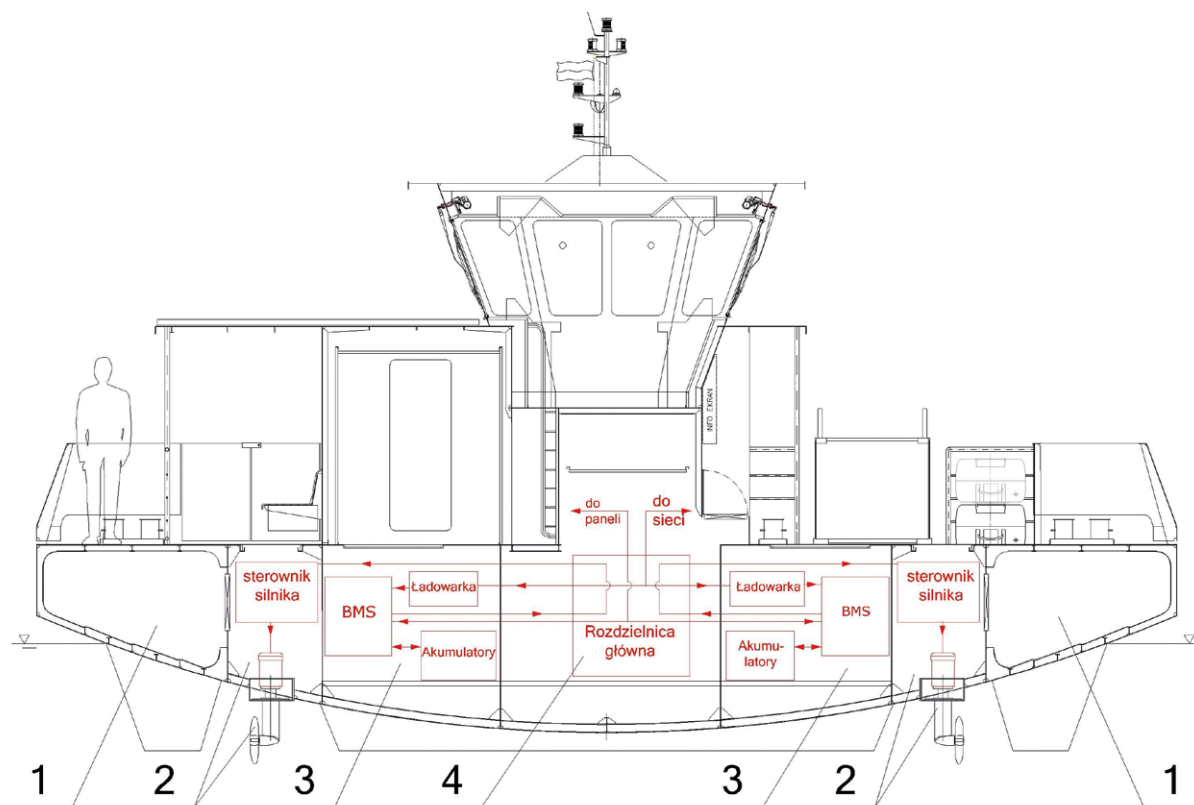
Rys. 2. Wyznaczone na podstawie badań modelowych przewidywane zapotrzebowanie na moc rzeczywistą napędu statku, w funkcji prędkości

#### 4. Projekt koncepcyjny układu napędowego i zasilania

Całoroczna żegluga po specyficznym, ciasnym i sezonowo zatłoczonym akwenie w centrum miasta Gdańska nie jest łatwa. Od sternika wymaga się doświadczenia i ciągłej koncentracji na wykonywanej pracy. Dodatkowo należy pamiętać, że priorytetem jest przewiezienie maksymalnej liczby pasażerów przy jak najniższym zużyciu energii. Należy dodać, że podczas żeglugi wahadłowej pomiędzy oboma brzegami rzeki Motławy

jednostka nie obraca się. Byłoby to niepotrzebna strata czasu oraz energii. Dlatego statek ma specyficzny kształt podobny do większych promów kursujących wahadłowo, gdzie brak jest klasycznego dziobu i rufy. Jednostka musi mieć zatem tak samo dobre własności manewrowe podczas pływania w obu kierunkach.

Na podstawie wcześniejszych doświadczeń uznano, że dla analizowanego statku najlepiej sprawdzi się układ napędowy hybrydowy szeregowy oparty o dwa elektryczne pędniki azymutalne. Doświadczenia z eksploatacji obiektów rzeczywistych oraz wyniki badań zdalnie sterowanego modelu promu wskazują, że jednostka tego typu ma bardzo dobre własności manewrowe, gdy wykorzystywany jest jeden z dwóch pędników – pędnik ciągnący. Rozwiązanie takie może mieć dodatkową zaletę. Chodzi o wysoki poziom bezpieczeństwa żeglugi, jaki można osiągnąć, stosując dwa niezależne układy napędowe oraz niezależne układy zasilania. W takim przypadku, gdy dojdzie do awarii jednego z systemów, można kontynuować żeglugę, wykorzystując drugi układ napędu i zasilania. Warto dodać, że zazwyczaj jednostki, które mają bardzo dobre własności manewrowe, a do ich napędu zastosowano pędniki azymutalne, mają problemy z utrzymaniem stałego kursu. Na projektowanej jednostce zredukowano ten problem do minimum, instalując tzw. skegi, czyli elementy kadłuba, które dają odpowiedni opór boczny i jednocześnie stabilizują ruch jednostki podczas żeglugi (widoczne na zdjęciu modelu rys. 1 a).



Rys. 3. Przekrój wzdłużny przez prom „Motława II” ze schematem układu napędowego i zasilania; 1 – komory zderzeniowe; 2 – komory pędników azymutalnych, silników oraz sterowania; 3 – komory akumulatorów, ładowarek oraz zabezpieczeń (BMS); 4 – komora centralna z rozdzielnicą



Mając na względzie:

- planowaną wieloletnią eksploatację jednostki (pożądaną możliwie wysoką trwałość akumulatorów);
- całodzienny charakter żeglugi, praktycznie bez dłuższych przerw – brak czasu na doładowywanie akumulatorów z brzegu;

ustalono, że akumulatory muszą mieć pojemność gwarantującą niezawodne zasilanie podczas całodziennego żeglugi. Ładowanie akumulatorów ma odbywać się tylko podczas nocnych postojów jednostki.

Na rysunku przedstawiającym przekrój wzdłużny przez zaprojektowaną jednostkę zaprezentowano proponowane rozwiązanie układu napędu i zasilania oraz rozmieszczenie najważniejszych komponentów (rys. 3).

## 5. Problem gospodarowania energią

Istotnym problemem jest ustalenie strategii, według której prom miałby poruszać się zarówno jak najbardziej efektywnie, czyli przy jak najmniejszym zużyciu energii, a przy tym również jak najbardziej wydajnie, czyli jak najszybciej, aby w jak najkrótszym czasie przewieźć jak najwięcej pasażerów. W zależności od określonych warunków, jak np. stylu pływania, można osiągnąć zróżnicowane zużycie energii.

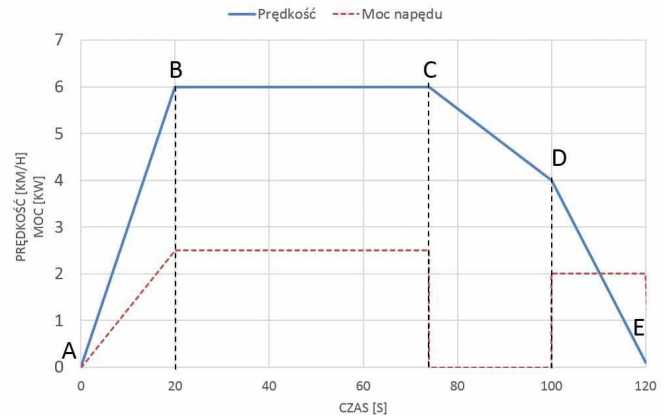
Rys. 4 obrazuje przewidywane przybliżone zapotrzebowanie na moc jednostki w warunkach podobnych do tych jak na obecnie stosowanej jednostce z napędem konwencjonalnym (dla stałej prędkości). Dla uzyskanych wyników zapotrzebowanie energetyczne jest relatywnie małe, co wynika z niewielkiego oporu jednostki poruszającej się prędkością nie większą niż 6 km/h (założona wyższa prędkość niż na obecnie eksploatowanej jednostce).

Po analizie różnych możliwości pokonania trasy autorzy pracy doszli do wniosku, że inna strategia będzie bardziej efektywna energetycznie. Polega ona na rozpędzeniu jednostki do prędkości około 8 km/h, a następnie szybowaniu z wyłączonym napędem, zakończonym hamowaniem. Przewiduje się, że zmiana strategii pozwoli zaoszczędzić około 30% energii (rys. 5).

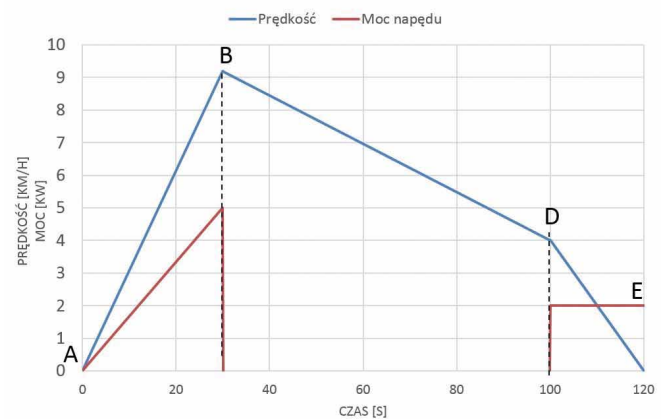
Wyznaczenie dokładnej wartości zapotrzebowania na energię jest obecnie niemożliwe. Wynika to między innymi z tego, że basen modelowy przystosowany jest do badań kiedy obiekt porusza się ze stałą prędkością. Próby jego wykorzystania do pomiarów siły oporu w warunkach rozpędzania się lub hamowania zakończyły się połowicznym sukcesem. Uzyskane wyniki jakościowo wydają się prawdopodobne, ale są pewne wątpliwości dotyczące otrzymanych wartości mocy potrzebnej do rozpędzania i hamowania statku. Dlatego obecnie powstaje specjalne oprzyrządowanie, które pozwoli na prowadzenie badań w warunkach zmiennej prędkości i mocy napędu.

## 6. Podsumowanie

Wiele czynników ma wpływ na wybór koncepcji i dobór komponentów układu napędowego statku. Podstawowe to typ jednostki oraz jej specyfika pływania. Obecnie dostępnych jest wiele nowoczesnych rozwiązań, które mogą zapewnić wysoką sprawność energetyczną w określonych warunkach



Rys. 4. Prędkość statku oraz zapotrzebowanie na moc napędu. Strategia pokonania trasy podobna do tej, jaka jest stosowana na obecnym promie z napędem konwencjonalnym: A – start; B – koniec rozpędzania; C – wyłączenie napędu; D – początek hamowania



Rys. 5. Prędkość statku oraz zapotrzebowanie na moc napędu; proponowana strategia pokonania trasy, optymalna pod względem energetycznym: A – start; B – koniec rozpędzania i wyłączenie napędu; D – początek hamowania

eksploatowania. Dodatkowo spełniają coraz bardziej restrykcyjne normy odnośnie do ochrony środowiska oraz mają wpływ na względy estetyczne jednostki. Coraz mniejsze gabaryty nowoczesnych układów napędowych pozwalają na lepsze zagospodarowanie zaoszczędzonego miejsca.

Dla promu „Motława” ważnym czynnikiem jest również styl pływania jednostki, z którego wynika zużycie energii elektrycznej. Badania modelowe oraz obliczenia hydromechaniczne przeprowadzone dla różnych strategii pływania pozwalają oszacować zapotrzebowanie energetyczne rzeczywistej jednostki. Przy wstępnych badaniach ustalono, iż możliwe różnice mogą sięgać nawet 30%. Ma to duże znaczenie przy układaniu strategii pływania, w której założono, iż w trakcie jednego cyklu poruszania się prom nie będzie dodatkowo ładowany z żadnego źródła zasilania i zgromadzona energia musi wystarczyć na całodzienną eksploatację. Panele fotowoltaiczne

zainstalowane na pokładzie, dają niewielką moc i nie uwzględniono ich w bilansie energetycznym.

Warto dodać, że zaproponowany układ napędu i zasilania jest całkowicie bezemisyjny i praktycznie bezgłośny. Chcąc jednak sumiennie przeprowadzić bilans oddziaływania na środowisko, należałoby przyjrzeć się dokładnie procesowi produkcji i utylizacji akumulatorów litowych. Trudno jednak w literaturze dotrzeć do wiarygodnych danych.

Prace nad projektem promu „Motława II” dla armatora, którym ma być Narodowe Muzeum Morskie w Gdańsku sfinansowane zostały z grantu przyznanego przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Gdańsku. Projekt powstał przy pomocy i pod nadzorem Polskiego Rejestru Statków.

### Literatura

- [1] SIHN W., PASCHER H., OTT K., STEIN S., SCHUMACHER A., MASCOLO G.: *A green and economic future of inland waterway shipping*. Procedia CIRP (2015).
- [2] DEDES E.K., HUDSON D.A., TURNOCK S.R.: *Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping*. „Energy Policy” 40/2012.
- [3] GEERTSMA R.D., NEGENBORN R.R., VISSER K., HOPMAN J.J.: *Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments*. „Applied Energy” 194/2017.
- [4] GRAUERS A., UPENDRA K.: *Energy based method to analyse fuel saving potential of hybrid vehicles for different driving cycles*. „IFAC – PapersOnLine” 49/2016.
- [5] The International Chamber of Shipping (ICS), 2014. *Shipping, World Trade and the Reduction of CO<sub>2</sub> Emissions*. ICS.
- [6] International Maritime Organization (IMO), 2011. *Technical and operational measures to improve the energy efficiency of international shipping and assessment of their effect on future emissions*. IMO.
- [7] SICK N., NIENABER A., LIESENKOTTER B., VOM STEIN N., SCHEWE G., LEKER J.: *The legend about sailing ship effects – Is it true or false? The example of cleaner propulsion technologies diffusion in the automotive industry*. „Journal of Cleaner Production” 137/2016.
- [8] GELESZ P., KARCZEWSKI A., KOZAK J., LITWIN W., PIĄTEK Ł.: *Design methodology for small passenger ships on the example of the ferryboat MOTŁAWA 2 driven by hybrid propulsion system*. „Polish Maritime Research”, Special Issue S1 (93) 2017, Vol. 24.
- [9] DUDZIAK J.: *Teoria okrętu*. Wyd II, 2008, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej.
- [10] PRS, 2016. *Register of inland waterway vessels 2016*, PRS, Poland. II-74.
- [11] MARPOL, 2005. *MARPOL 73/78 revised ANNEX VI*, MEPC59. IMO.

Magdalena Kunicka, Wojciech Litwin – Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, Katedra Mechatroniki Morskiej

artykuł recenzowany

reklama



Preferujesz internet?

Wypromuj się na [www.nis.com.pl](http://www.nis.com.pl)