

Napęd i zasilanie hybrydowe niewielkich jednostek pływających

Wojciech Leśniewski, Wojciech Litwin

Wstęp

W ostatnich latach jesteśmy świadkami niezwykle rozwoju praktycznie wszystkich dziedzin nauki. Dzięki temu zwłaszcza w krajach wysoko rozwiniętych projektowane i produkowane są nowe maszyny i urządzenia o coraz bardziej niezwykłych możliwościach.

Postęp nie ominął okrętownictwa. Coraz ostrzejsze normy dotyczące ochrony środowiska oraz rosnące ceny paliw spowodowały, że podczas projektowania nowych jednostek oraz modernizacji starszych coraz większą wagę przywiązuje się do ich konstrukcji oraz przewidywanych kosztów eksploatacji. Należy również pamiętać o tym, że rodzaj zastosowanego napędu może mieć decydujący wpływ na to, czy jednostka zostanie dopuszczona do eksploatacji zwłaszcza na obszarach objętych ochroną, na przykład programem Natura 2000. Przeglądając literaturę fachową dotyczącą okrętownictwa, coraz częściej można znaleźć artykuły, w tytułach których pojawiają się zwroty *no emission*, *zero emission* bądź *green ship*. Świadczy to o tym, że większą niż kiedyś wagę przywiązuje się do tak zwanych „czystych technologii”.

W większości budowanych obecnie statków stosuje się napęd konwencjonalny wykorzystujący spalinowy silnik wysokoprężny. Nowoczesne silniki tego typu wyposażone są w skomplikowany osprzęt, umożliwiający ograniczenie emisji szkodliwych związków do atmosfery. Czasem ogranicza się emisję szkodliwych związków nawet kosztem powiększonego zużycia paliwa. Nowoczesne silniki spalinowe często dostosowane są do spalania paliw, takich jak oleje pochodzenia roślinnego czy sprężony gaz ziemny. Nie bez znaczenia w przypadku napędu konwencjonalnego jest tak zwane „skażenie hałasem”. Niestety nawet najlepiej skonstruowany układ wydechowy silnika nie jest w stanie całkowicie go wyeliminować. Spaliny, hałas i drgania mogą mieć negatywny wpływ na samopoczucie członków załogi i pasażerów, zwłaszcza podczas dłuższej żeglugi.

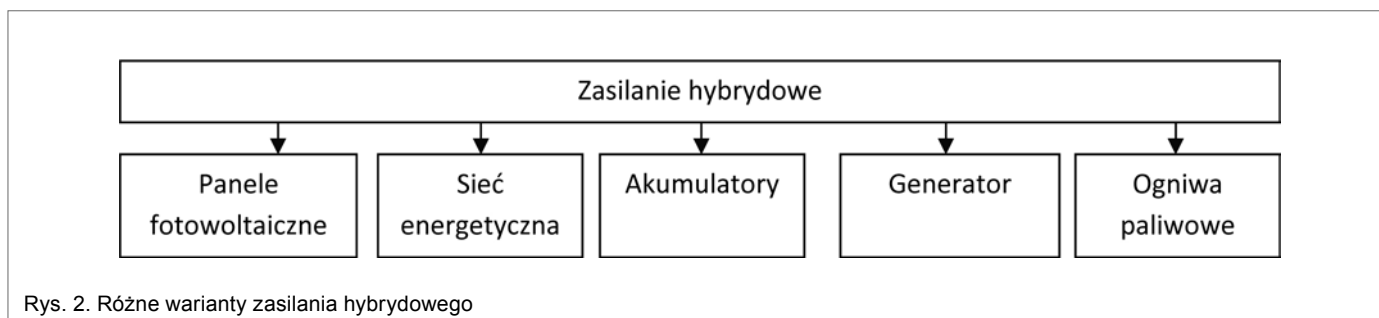
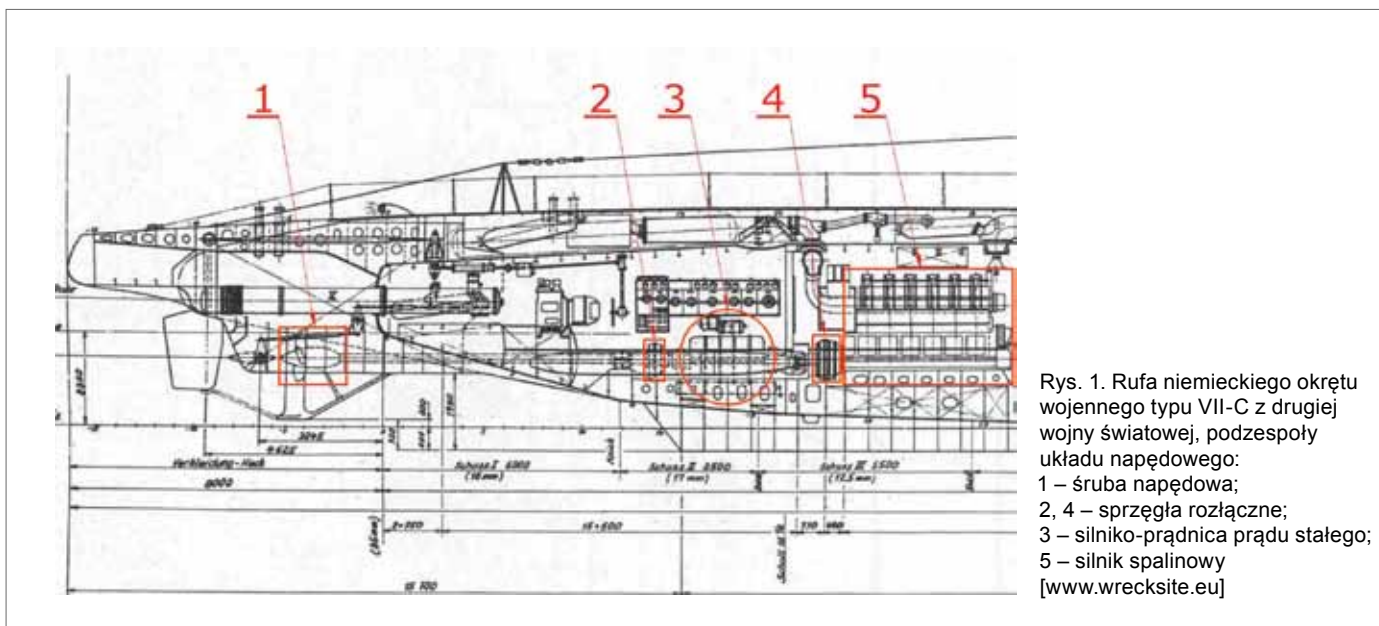
Opisanych wad nie posiada silnik elektryczny. Pracuje cicho i na ogół nie jest źródłem wibracji. Dodatkowo najnowsze konstrukcje mają wysoką sprawność przekraczającą 90%. Idea, aby do napędu statku wykorzystać silnik elektryczny, nie jest nowa [1, 2]. W literaturze można znaleźć informacje, że już w 1838 roku przeprowadzono udane próby z tego typu napędem. Powstał jednak problem zasilania silnika elektrycznego. Źródłem energii mógł być generator lub wynaleziony w 1859 r. akumulator ołowiowy. Dzięki temu możliwe stało się zbudowanie praktycznie bezgłośnego układu napędowego. Walory takiego rozwiązania dostrzegła jako jedna z pierwszych amerykańska marynarka wojenna, testując niewielką łódź podwodną już w 1863 r., czyli w trakcie trwania wojny secesyjnej. Gdy w 1870 r. ukazała się wizjonerska powieść Juliusa Verne

20 tysięcy mil podwodnej żeglugi, potraktowano ją powszechnie jako absolutną fikcję.

Czterdzieści lat później wynaleziono napęd hybrydowy. Układ określany jako „hybrydowy równoległy” zastosowany został przypuszczalnie po raz pierwszy na jachcie ELLEN w 1907 r. [1]. Stał się on typowym rozwiązaniem na konwencjonalnych okrętach podwodnych podczas pierwszej i drugiej wojny światowej. Większe okręty miały napęd dwuśrubowy, a wtedy cały układ napędowy był zdublowany (rys. 1). Napęd hybrydowy równoległy stosuje się chętnie do dziś między innymi do napędu pojazdów (np.: w samochodzie Toyota Prius).

Cechą charakterystyczną napędu „hybrydowego równoległego” jest możliwość napędzania jednostki pływającej (bądź pojazdu) przez silnik spalinowy lub elektryczny w zależności od potrzeb. W przypadku okrętu podwodnego do napędu podczas podwodnej żeglugi wykorzystywano silniki elektryczne. Podczas żeglugi po powierzchni, do napędu wykorzystywano silniki spalinowe, a umieszczone na wspólnym wale silnikoprądnice pracowały w trybie generatorowym, ładując akumulatory – niezbędne źródło energii pod wodą. Do załączania napędu, a zwłaszcza odłączania silnika spalinowego, stosowano sprzęgło sterowane (rys. 1, element nr. 4). Stosowane obecnie rozwiązania pozwalają na równoległą pracę silnika elektrycznego i spalinowego, dzięki czemu pojazd czy statek może dysponować większą mocą maksymalną. Dlatego napęd hybrydowy równoległy jest rozwiązaniem niezwykle elastycznym. Łącząc silniki o różnych mocach można uzyskać porządny efekt, którym w przypadku pojazdu, może być na przykład wysoka prędkość maksymalna oraz energooszczędność podczas powolnej jazdy w korku. Jednostka pływająca dzięki silnikowi spalinowemu o dużej mocy może mieć wysoką prędkość maksymalną oraz duży uciąż, a napęd elektryczny może być szczególnie użyteczny podczas precyzyjnego manewrowania (port, śluzę itp.) oraz podczas żeglugi przez rejony objęte ochroną czy na przykład strefą ciszy. Ważną zaletą takiego rozwiązania jest też niezawodność oraz wysoka sprawność napędu.

Odmiernym rozwiązaniem, ale czasem nie do końca poprawnie określanym jako napęd hybrydowy, jest rozwiązanie, kiedy napęd przekazywany jest wyłącznie przez silnik elektryczny zasilany z wielu źródeł (rys. 2). W okrętownictwie statek, którego jedynym źródłem napędu jest silnik elektryczny, nazywany jest „all electric ship” co można przetłumaczyć jako „całkowicie elektryczny”. Silnik elektryczny małego statku może być zasilany z akumulatorów, jednak w sytuacji, gdy wzrośnie zapotrzebowanie na moc, uruchamiany jest generator prądotwórczy napędzany najczęściej silnikiem spalinowym. Roz-



wiązanie takie w porównaniu do napędu hybrydowego równoległego ma niższą sprawność. Wynika to z pracy silnika elektrycznego na różnym poziomie mocy, co często odbywa się kosztem sprawności. Ponadto trzykrotna konwersja mocy pomiędzy silnikiem spalinowym napędzającym prądnicę, prądnicą a silnikiem napędowym decyduje o finalnie mniejszej sprawności takiego napędu.

Najprostszą odmianą zasilania hybrydowego jest układ akumulatorowo-generatorowy. W najnowocześniejszych konstrukcjach rozwiązanie takie często bywa rozbudowywane o panele fotowoltaiczne. Powszechnie stosuje się też urządzenia umożliwiające ładowanie akumulatorów z lądowej sieci energetycznej. W języku angielskim taki układ nazywany jest *plug-in hybrid*, czyli hybryda podłączana do sieci. Rozwiązania tego typu można spotkać w samochodach Toyota Prius drugiej generacji czy statkach śródlądowych, jak Gdański SOLAR [3]. Statkiem, który ma aż cztery źródła zasilania, jest statek SŁONECZNIK, który od 2008 r. wchodzi w skład komunikacji miejskiej Bydgoszczy (rys. 3). Jego dwa silniki napędowe o mocy 12 kW każdy zasilane są z oddzielnych baterii akumulatorów. Dodatkowo źródło zasilania podczas rejsu stanowią panele fotowoltaiczne. W przypadku większego zapotrzebowania na energię można uruchomić generator prądotwórczy. W nocy, podczas postoju, akumulatory statku ładowane są z sieci energetycznej. Chcąc zaszerzować ten statek, można zaliczyć go do grupy *all-electric* z zasilaniem hybrydowym (czterozródłowym).



Rys. 3. W 2008 r. w Bydgoszczy statek z zasilaniem hybrydowym „Słonecznik” zaczął obsługiwać regularną linię komunikacji miejskiej

W najnowocześniejszych statkach będących na etapie prac studialno-projektowych bądź też już wybudowanych można znaleźć jeszcze inne źródła energii, które mogłyby zostać zastosowane na statku śródlądowym.

Jednym z najbardziej nowoczesnych rozwiązań są ogniwa paliwowe. Wytwarzają one energię elektryczną z paliwa, którym w zależności od typu urządzenia najczęściej jest wodór bądź alkohol metylowy. Ich sprawność przekracza obecnie 50%, ale za-

letą jest brak emisji szkodliwych związków do atmosfery oraz cicha praca. Jednym z najbardziej znanych statków śródlądowych z napędem elektrycznym zasilanym z ogniw paliwowych i akumulatorów jest niemiecki statek turystyczny ALSTERWASSER (rys. 4), który można zobaczyć w Hamburgu [4, 5, 6].

Statek ten, o długości ponad 25 metrów, może zabrać na swój pokład 100 pasażerów. Jego napęd stanowi silnik elektryczny o mocy 100 kW (czyli jest to jednostka typu *all-electric*). Głównym źródłem energii są dwa wodorowe ogniwa paliwowe o łącznej mocy około 96 kW. Akumulatory pełnią funkcję buforową i mają relatywnie małą pojemność w porównaniu do mocy napędu. Jak wynika z nieoficjalnych informacji, statek przygotowany jest do konwersji na napęd konwencjonalny po wyeksploatowaniu ogniw paliwowych. Wynika to z ogromnych kosztów inwestycyjnych, które podczas budowy statku sfinansowano z projektu badawczego.

Obecnie statków, na których instaluje się ogniwa paliwowe, jest coraz więcej i można oczekiwać, że ich liczba będzie rosła [7, 8, 9, 10].

Na statkach pływających po większych akwenach spotyka się różne formy pozyskiwania energii wiatru. Dla przykładu najnowszy statek dla organizacji Greenpeace, zbudowany w Polsce – Rainbow Warrior III, jest wręcz jachtem żaglowym (rys. 5).

Nowoczesne układy napędowe niewielkich jednostek pływających

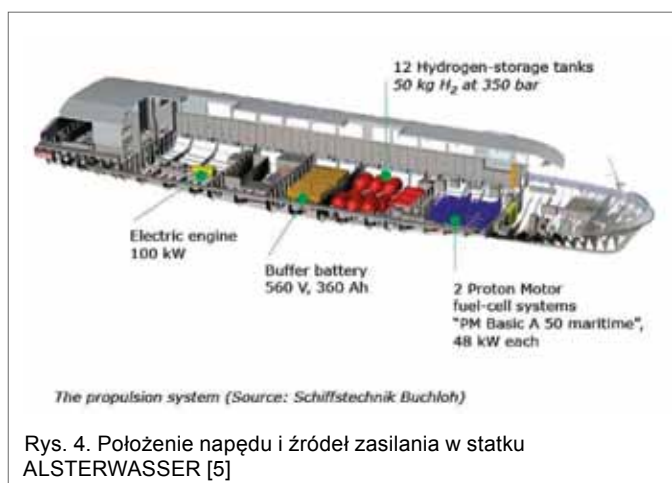
Napędy wykorzystujące silniki elektryczne opierają się na najnowocześniejszych rozwiązaniach z zakresu elektrotechniki i elektroniki. Istnieje wiele różnych rodzajów silników elektrycznych, do których należą:

- silniki PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motors*), trójfazowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi;
- trójfazowe silniki asynchroniczne indukcyjne;
- silniki BLDC (*Brushless DC motors*), bezszczotkowe silniki prądu stałego;
- silniki szczotkowe prądu stałego.

Najczęściej w napędach niewielkich jednostek pływających spotyka się silniki szczotkowe prądu stałego oraz silniki synchroniczne trójfazowe. Do ich budowy wykorzystuje się magnesy trwałe zawierające pierwiastki ziem rzadkich. Pozwala to znacząco zmniejszyć wielkość silnika w stosunku do jego mocy. Silniki takie charakteryzują się wysoką sprawnością w szerokim zakresie prędkości obrotowej oraz efektywną regulacją prędkości obrotowej, zwłaszcza gdy współpracują z enkoderem. Ich wadą jest stosunkowo wysoka cena.

W celu uzyskania maksymalnych sprawności często niezbędne okazuje się zainstalowanie w układzie napędowym przekładni redukcyjnej. Śruby napędowe o wyższych sprawnościach mają stosunkowo małą prędkość obrotową i dużą średnicę, a więc potrzebują znacznego momentu obrotowego. W układach napędowych stosuje się często różnego typu przekładnie pasowe, zębate kątowe, walcowe, jak również planetarne. W niektórych układach stosowane są nawet dwustopniowe reduktory planetarne.

O ile to tylko jest możliwe, dobiera się silnik tak, aby nie wymagał dodatkowych przekładni, które mogą podnieść cenę układu oraz zwiększyć awaryjność układu. Można to osiągnąć przez zwiększenie liczby par biegunów w silniku lub rozmieszczenie magnesów na wirującej obudowie, jak to ma miejsce w silnikach typu BLDC outrunner.



Rys. 4. Położenie napędu i źródeł zasilania w statku ALSTERWASSER [5]



Rys. 5. Jacht żaglowy organizacji Greenpeace Rainbow Warrior III [11]



Rys. 6. Silnik elektryczny synchroniczny 20 [kW] chłodzony wodą z zespołem wału umieszczony na poduszkach amortyzujących [www.kraeutler.at]

Nowoczesny układ napędowy niewielkiej jednostki pływającej może być zbudowany z silnika elektrycznego o wysokiej sprawności i mocy dobranej na podstawie przeprowadzonych wcześniej badań oporowych (teoretycznych bądź modelowych). Może on pełnić funkcję napędu pomocniczego (np. jachty za-



Rys. 7. Silnik elektryczny synchroniczny 11,6 [kW] chłodzony wodą z układem napędowym *saildrive* [www.kraeutler.at]



Rys. 8. Silnik elektryczny BLDC o mocy 6,5 kW z przekładnią planetarną zamknięty w obrotowej gondoli wypełnionej cieczą chłodzącą, zaprojektowany i przebadany przez autorów:
1 – silnik BLDC;
2 – przekładnia planetarna



Rys. 9. Wizualizacja zaprojektowanego przez autorów artykułu układu hybrydowego napędu: 1 – silnik spalinowy; 2 – silnik elektryczny; 3 – przekładnia pasowa; 4 – sprzęgło sterowane



Rys. 10. Zaprojektowany przez autorów artykułu prototypowy układ napędowy podczas badań laboratoryjnych; w miejscu sprzęgła sterowanego zainstalowano momentomierz niezbędny do wyznaczenia charakterystyki układu napędowego [12]

głowe) lub napędu głównego. Niewielkie gabaryty silników stosowanych do nowoczesnych napędów pozwalają na dużą swobodę w ich umiejscowieniu. Silnik może znajdować się w linii wału wewnątrz kadłuba (rys. 6), napędzać układ tzw. *saildrive*, tworząc pędnik azymutalny (rys. 7), może być umieszczony w gondoli podwieszanej na stałe pod kadłubem lub wewnątrz pędnika będącego także sterem aktywnym (rys. 8). Układy napędowe, w których silnik elektryczny umieszczony jest wewnątrz kadłuba i wykorzystują klasyczną linię wałów bądź zespoły *saildrive*, dają możliwość rozbudowy o kolejne silniki elektryczne lub spalinowe, tworząc układ hybrydowy pracujący na wspólny wał napędowy. Dostępne są zestawy do instalacji na nowo budowanych jednostkach, ewentualnie do przeprowadzenia konwersji z napędu konwencjonalnego (rys. 9, 10).

Na szczególną uwagę zasługują zintegrowane układy hybrydowe o niezwykle kompaktowej budowie (rys. 11).

Źródła zasilania układu napędowego nowoczesnego statku śródlądowego

Akumulatory

Akumulatory służące do zasilania układu napędowego można spotkać na większości statków śródlądowych z napędem elektrycznym bądź hybrydowym. Mogą one pełnić funkcję głównego źródła energii, zwłaszcza jeśli na statku zainstalowane są panele fotowoltaiczne bądź też istnieje możliwość ich regular-



Yanmar SD20 Hybrid Saildrive

Rys. 11. Silnik elektryczny szczotkowy prądu stałego 10 kW może pracować jako prądnica 5 kW z przekładnią pasową, zamocowany do bloku silnika napędza wał przed przekładnią *saildrive* [www.yanmarmarine.co.uk]



Rys. 12. Ogniwo paliwowe firmy Proton zasilane wodorem o mocy 48 kW, stanowiące źródło zasilania silnika statku ALSTERWASSER zwodowanego w Hamburgu w 2010 r. [www.proton-motor.de]

nego ładowania z sieci energetycznej. W innych rozwiązaniach akumulator może pełnić funkcję buforową, czyli stabilizuje źródło zasilania, którym mogą być ogniwa paliwowe.

Obecnie najczęściej, podobnie jak w lądowych instalacjach solarnych, na jednostkach pływających stosuje się bezobsługowe, szczelne akumulatory ołowiowe (żelowe lub AGM). Wynika to z ich relatywnie niskiej ceny i zadawalającej trwałości sięgającej dziesięciu lat. Niewątpliwą wadą są znaczne gabaryty i masa. Kolejną wadą jest spadek pojemności wyrażonej w amperogodzinach [Ah] wraz ze wzrostem prądu rozładowującego. Dla przykładu akumulator o pojemności 230 Ah rozładowywany prądem 230 A (rozładowywanie prądem 1C, C to pojemność akumulatora) zostanie rozładowany w pełni w około 35 min. Dodatkowo akumulator rozładowywany w 100% może przejść około 200 cykli pracy, a układ rozładowywany w 30% może pracować do 1200 cykli. Najczęściej nie dopuszcza się rozładowania akumulatorów poniżej 50%, co pozwala zwiększyć żywotność układu.

Właściwy wybór typu akumulatorów dla jednostki pływającej nie jest łatwy. W przypadku instalacji lądowych zasilanych z akumulatorów ich masa nie ma na ogół szczególnego znaczenia. Inaczej jest w przypadku, gdy akumulatory muszą zostać zainstalowane na statku. Zazwyczaj okazuje się, że dodatkowy balast w postaci źródła zasilania ogranicza możliwości jednostki pływającej. Wynika to z tego, że zwiększenie masy statku pociąga za sobą wzrost zanurzenia, które z kolei ma negatywny wpływ na opory pływania. Wysokie opory stwarzają konieczność zainstalowania układów napędowych o wysokiej mocy. Duża moc to z kolei duży pobór prądu, a w rezultacie często okazuje się, że akumulatory nie mają wystarczającej rezerwy energii.

Najbardziej pożądanym typem akumulatorów, jakie można by było zainstalować na statku, to akumulatory litowo-żelazo-

zowe (LiFePo₄). Mają one korzystną relację pomiędzy masą a pojemnością, są bezpieczne w użytkowaniu (są o około trzy razy lżejsze od akumulatorów ołowiowych). Obecnie szeroko się je stosuje jako źródło zasilania komputerów przenośnych czy telefonów komórkowych. Niestety ich wadą jest bardzo wysoka cena.

Generatory prądotwórcze

Generator prądotwórczy zainstalowany na statku z napędem elektrycznym zdecydowanie podnosi bezpieczeństwo żeglugi oraz zwiększa jego możliwości. Chodzi przede wszystkim o sytuację, kiedy jednostce zaczyna brakować energii, a jest na nią duże zapotrzebowanie, co może wynikać między innymi z niesprzyjających warunków żeglugi.

Nowoczesne, kompaktowe, chłodzone cieczą generatory są ciche (około 54 dB), zajmują mało miejsca i mogą być stosowane nawet na niewielkich jednostkach pływających. Ważne jest również to, że dostępne są urządzenia napędzane silnikami Diesla, co jest niezwykle ważne podczas uzgadniania dokumentacji i odbioru statku przez towarzystwo klasyfikacyjne.

Ogniwa paliwowe

Ogniwo paliwowe (FC – od angielskiego *Fuel cell*) to ogniwo generujące energię elektryczną z reakcji utleniania stale dostarczanego do niego z zewnątrz paliwa. W odróżnieniu od ogniów galwanicznych (akumulatory, baterie), w których energia wytwarzanego prądu musi zostać wcześniej zgromadzona wewnątrz tych urządzeń (co znacznie ogranicza czas ich pracy), ogniwa paliwowe nie muszą być wcześniej ładowane. Wystarczy tylko doprowadzić do nich paliwo. W przypadku ogniów galwanicznych ładowanie może być procesem trwającym wiele godzin, a ogniwa paliwowe są gotowe do pracy po niewielkim czasie wymaganym do ich nagrzania [13].

Większość obecnie używanych ogniw paliwowych do produkcji energii elektrycznej wykorzystuje wodór. Odmianą ich zaletą jest znikome zanieczyszczenie powietrza, gdyż powstające w nich spaliny składają się wyłącznie z obojętnej dla środowiska pary wodnej.

Jedną z pierwszych jednostek, do zasilania napędu której wykorzystano wodorowe ogniwa paliwowe, był opisywany już wcześniej statek ALSTERWASSER (rys. 4). Zainstalowany na jednostce moduł zasilający o mocy 48 kW ma wymiary 220 × 110 × 90 cm i masę 500 kg (rys. 12).

Niewątpliwą wadą ogniwa paliwowego tego typu jest problematyczne paliwo. Wodór jest bezwonny i niezwykle wybuchowy. Dodatkowo jego cząstki są tak niewielkie, że łatwo uwalnia się do atmosfery nawet przy minimalnych nieszczelnościach instalacji. Problemem jest też jego pobieranie oraz przechowywanie w wysokociśnieniowych zbiornikach. Dlatego eksperymentuje się z innymi rodzajami paliwa, z których jednym z najważniejszych jest alkohol metylowy.

Ogniwo paliwowe zasilane metanolem (DMFC) jest szczególnym przypadkiem ogniwa z elektrolitem polimerowym. Jego budowa jest podobna do budowy klasycznego ogniwa typu PEMFC. Paliwem jest metanol (CH₃OH), będący cieczą w stosunkowo szerokim zakresie temperatur (od -97 do 64°C przy ciśnieniu atmosferycznym, 1013 hPa), co jest jego olbrzymią zaletą. Metanol można zatem łatwo magazynować i transportować. Obecnie trwają intensywne prace, których celem jest podwyższenie sprawności oraz poziomu mocy tego typu ogniwa.

Obecnie technologię ogniw paliwowych rozwija wiele firm na świecie. Dlatego zaskakującą informacją była ta, że koncern SIEMENS, produkujący ogniwa na przykład dla okrętów podwodnych, wycofał się z rynku.

Panele fotowoltaiczne

Najpowszechniej stosowanym obecnie typem paneli fotowoltaicznych są panele krzemowe. Wynika to przede wszystkim z ich relatywnie niskiej ceny, która już w 2010 roku osiągnęła poziom 2,50 euro za każdy wat mocy maksymalnej. Sprawność typowych, powszechnie stosowanych paneli to około 14%, choć jak wynika z badań, sprawność tego typu ogniwa osiąga w warunkach laboratoryjnych ponad 30% [14].

Przeglądając ofertę rynkową, trudno jednak znaleźć panele krzemowe o sprawności wyższej niż 20%. Jednym z najbardziej wydajnych jest SunPower 315 o sprawności 19,7%, co znacząco przekracza parametry powszechnie dostępnych paneli firm SUNTECH, KYOCERA czy SHARP, których sprawność wynosi około 14%. Cena typowych rozwiązań maleje z roku na rok i na ogół podawana jest jako „cena jednego wata mocy”. W ciągu ostatnich czterech lat cena obniżyła się blisko o połowę. To właśnie wzrost sprawności paneli i malejąca cena pozwoliły na postrzeganie energii słonecznej jako realnego źródła energii nie tylko w instalacjach lądowych, ale również w aplikacjach mobilnych.

Zasilanie z sieci energetycznej

Statek, którego napęd zasilany jest z baterii akumulatorów, może ładować je z lądowej sieci energetycznej podczas postojów. Podczas kilkugodzinnego nocnego postoju na ogół można całkowicie naładować akumulatory. Problem pojawia się w przypadku krótszych postojów. Nowoczesne akumulatory litowe mogą być ładowane prądem 0,5 C (niektóre nawet większym). Akumulatory ołowiowe nie tolerują zbyt szybkiego pro-

cesu. Maksymalny prąd ładowania, przy którym nie dochodzi do szkodliwych procesów ograniczających trwałość, to około 0,1 C do 0,3 C. Oznacza to, że aby naładować całkowicie rozładowany akumulator, potrzeba między 4 a 5 godziny. Godzinny postój pozwala więc na uzupełnienie 20 do 25% energii. Nie jest to mało, więc takie rozwiązanie powinno być brane pod uwagę. Problemem jest jednak moc ładowarki oraz wynikająca z niej obciążenie sieci energetycznej. Dla przykładu na katamaranie SOLAR zainstalowano pakiet akumulatorów 48 V 460 Ah. Aby je ładować wolniej, na przykład nocą, moc ładowarki powinna wynosić około 2,6 kW. Chcąc mieć możliwość szybkiego ładowania, moc wzrasta trzykrotnie. Prąd pobierany z sieci to aż 36 A – czyli za dużo dla typowych instancji z zabezpieczeniami 16 lub 25 A. Dlatego wskazane jest zastosowanie urządzenia trójfazowego. W przypadku większych jednostek może zachodzić konieczność przygotowania specjalnego przyłącza energetycznego, co trzeba wziąć pod uwagę na etapie przygotowania przedsięwzięcia.

Literatura

- [1] URBAŃSKI P.: *Dwa wieki napędu mechanicznego statków*, Wydawnictwo MARPRES, Gdańsk 1997.
- [2] SZMIT E.: *Napęd elektryczny na morzu*, „Napędy i Sterowanie” 7–8/2007.
- [3] DYMARSKI P., GRYGOROWICZ M., LEŚNIEWSKI W., LITWIN W.: *Projekt i badania jednostki pływającej zasilanej energią słoneczną*, „Napędy i Sterowanie” 2/2010.
- [4] *Fuel cell ship In the Real Word*, „The Naval Architect” November 2008.
- [5] http://www.naiades.info/innovations/index.php5/Zemships_-_Zero_Emission_Ships
- [6] *German Island waterways set to expand In 2010*, „The Naval Architect”, November 2009.
- [7] *Fuel cell moves towards reality*, „The Naval Architect”, May 2008.
- [8] *Norwegian hybrid ship aims to cut CO₂ emissions by 50 percent*, <http://www.ekopolitan.com/>
- [9] *Fuel cell Power Marine applications*, „Fuel Cell Bulletin”, September 2005.
- [10] *Now voyager? The increasing Marine use of fuel cells*, „Fuel Cell Bulletin”, May 2005.
- [11] *Fassmer lands contract for Green Warrior*, „The Naval Architect”, September 2009.
- [12] KOWALSKI J., LEŚNIEWSKI W., LITWIN W.: *Hybrid propulsion of a small inland ship – design and research*, Polish Maritime Research 2013.
- [13] <http://www.ogniwa-paliwowe.com/>
- [14] www.nrel.gov

Wojciech Leśniewski – Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej;
Wojciech Litwin – Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej