

Andrzej Łebkowski
Akademia Morska w Gdyni, Gdynia

BADANIA EKSPLOATACYJNE ELEKTRYCZNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO ŁODZI

UTILIZATION RESEARCH OF AN ELECTRIC POWERTRAIN FOR A BOAT

Streszczenie: Współczesny transport przybrzeżny i śródlądowy w Polsce realizowany jest głównie w celach rekreacyjnych i turystycznych. Dla wielu zbiorników wodnych wprowadza się strefy ciszy, wyłączające z eksploatacji jednostki z napędem spalinowym. Opracowanie i wdrożenie elektrycznego układu napędowego dla jednostek pływających, może przyczynić się do rozwoju turystyki, pozostawiając środowisko naturalne w niezmienionej postaci. W artykule przedstawiono konstrukcję elektrycznego układu napędowego, jaka została opracowana w Akademii Morskiej w Gdyni, który może być zastosowany na pokładzie jednostki rekreacyjnej lub komercyjnej do przewozu pasażerów lub towarów, na wodach przybrzeżnych i śródlądowych. W publikacji omówiono autorskie rozwiązania technologiczne, które zostały zrealizowane na pokładzie ośmioosobowej łodzi rekreacyjnej. Przedstawiono konstrukcję poszczególnych elementów wchodzących w skład elektrycznego układu napędowego łodzi, a także uwarunkowania środowiskowe związane z eksploatacją takiej jednostki. Zaprezentowano wyniki badań eksploatacyjnych elektrycznego układu napędowego zrealizowane na wodach Zatoki Gdańskiej oraz omówiono koszty związane z eksploatacją łodzi z napędem elektrycznym.

Abstract: Modern coastal and inland waterway transport in Poland is conducted mostly in recreational and tourist purpose. Many of reservoirs had special "silence zones" put in place, effectively excluding the operation of vessels powered by internal combustion engines. Designing and implementing an electric powertrain for vessels could result in growth in tourism, without damaging the environment at the same time. The article presents the design of such electric powertrain, which was developed in the Gdynia Maritime University. It can be used in a personal or commercial vessel, either passenger and cargo type, in inland or coastal waters. The paper discusses a proprietary solution which was implemented on board of 8-passenger recreational boat. The construction of each boat powertrain element is presented, as well as environmental conditions related to such vessel's operation. Contained, are the results of utilization tests run on the Gdańsk Bay waters, and discussion of operational costs of an electric powered boat.

Słowa kluczowe: *łódź elektryczna, napęd elektryczny, silnik synchroniczny*

Keywords: *electric boat, electric powertrain, synchronous motor*

1. Wstęp

Od początku istnienia ludzkości, człowiek wykorzystywał różne środki transportu, które zapewniały mu korzystniejsze warunki przetrwania. Wraz ze wzrostem cywilizacyjnym transformowały się także zachowania i potrzeby ludzi. Aktualnie transport przybrzeżny i śródlądowy realizowany jest głównie w celach rekreacyjnych i turystycznych. Dzięki temu przybrzeżny i śródlądowy transport wodny w polityce UE, uważany jest za system zachowujący największe rezerwy. Cechy transportu wodnego predestynują jego rozwój w ramach zalecanej polityki zrównoważonego rozwoju. Jednocześnie dla coraz większej ilości zbiorników wodnych, wprowadza się strefy ciszy wyłączające z eksploatacji jednostki z napędem spalinowym. Rozwiązaniem, które można było by wdrożyć na szeroką skalę jest zastosowanie napędu

elektrycznego do łodzi. Aktualnie w ofercie wielu firm możemy znaleźć elektryczne układy napędowe, które można zastosować do napędu jednostek rekreacyjnych i transportowych [2,3,4,6,7]. Głównie są to elektryczne silniki doczepne do burt łodzi, pontonów, barek lub małych jachtów o mocy ok. 3kW oraz większe elektryczne silniki doczepne do jachtów motorowodnych o mocach sięgających 25kW. Niektórzy producenci proponują rozwiązania z użyciem elektrycznego silnika stacjonarnego, czyli silnika mocowanego wewnątrz kadłuba statku, gdzie moce jednostek napędowych sięgają nawet 50kW [6]. O ile w przypadku pierwszych, wspomnianych małych układów napędowych, wymagane jest zasilanie na poziomie 12-48VDC, to w wypadku dużych elektrycznych silników zaburtowych i stacjonarnych po-

ziom napięcia zasilającego może wynosić nawet 390VDC. Tak wysoka wartość napięcia (gdy dostęp do styków nie jest odpowiednio zabezpieczony mechanicznie lub nie zastosowano wyłączników samoczynnych), może zagrażać bezpieczeństwu użytkowników przy kontakcie bezpośrednim, gdyż przekracza przyjęty dopuszczalny poziom długotrwałego napięcia dotykowego 120VDC, uważany jako poziom bezpieczny [8]. Bazując na doświadczeniach związanych z elektrycznymi układami napędowymi, w Akademii Morskiej w Gdyni opracowano konstrukcję stacjonarnego elektrycznego układu napędowego przeznaczonego do łodzi i jachtów.

2. Elektryczny układ napędowy

Do testowania elektrycznego układu napędowego wybrany został kadłub łodzi Admiral 560 z serii Admiral Line [5]. Długość jednostki wynosi 5,6m, szerokość 2,03m, masa ok. 690kg, załoga do 8 osób.



Rys. 1. Widok łodzi podczas ładowania pakietu akumulatorów

Kategoria projektowa jednostki określona została na C, D, co oznacza, że łódź zaprojektowana została do rejsów po wodach przybrzeżnych, dużych zatokach, zalewach, jeziorach, rzekach i kanałach, przy wietrze o maksymalnej sile do 6°B (prędkość wiatru ok. 40-50km/h) i fali o wysokości do 2m [9].

Na pokładzie łodzi zamontowano 30 sztuk akumulatorów litowo - fosforowo - żelazowych o łącznej pojemności 15,8kWh, które zostały ulokowane w dwóch pakietach po 15 sztuk, w bakistach burtowych, w środkowej części kadłuba łodzi. Energia elektryczna z pakietu akumulatorów o napięciu ok. 100VDC, zasilają falownik własnej konstrukcji zamontowany na specjalnie skonstruowanym stelażu, umiejscowionym pod obudową sterówki. Do ładowania pakietu akumulatorów zastosowano ładowarkę o mocy 4kW, co umożliwia pełne naładowanie pakietu w czasie ok. 5 godzin.

W dolnej części stelaża zamontowany jest elektryczny silnik napędowy, który poprzez sprzęgło podatne skrętne przekazuje moment obrotowy na linię wału zakończoną śrubą napędową.



Rys. 2. Widok stelaża z ładowarką, silnikiem i sprzęgłem podatnym skrętnym

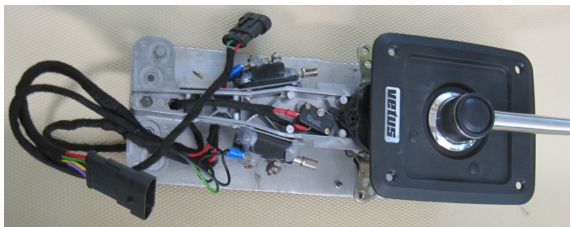
W górnej części sterówki zamontowane jest koło sterowe, które poprzez pompę hydrauliczną i siłownik steruje wychyleniem płetwy sterowej.



Rys. 3. Widok pokładu łodzi ze sterówką

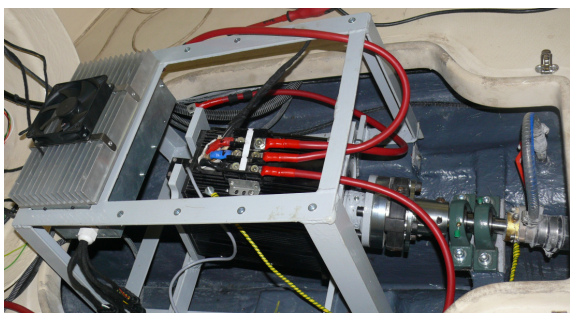
Powyżej koła sterowego zlokalizowany jest wskaźnik przedstawiający położenie płetwy sterowej. Obok wskaźnika płetwy sterowej znajduje się wyświetlacz przedstawiający parametry pracy elektrycznego układu napędowego (aktualna wartość prądu, procentowy stan naładowania pakietu akumulatorów, minimalne i maksymalne napięcia na celach). Z prawej strony sterówki zamontowana jest manetka współpracująca z falownikiem, służąca do zadawania prędkości i kierunku obrotów dla silnika elektrycznego.

ktrycznego. Manetka została zrealizowana z wykorzystaniem efektu Halla w układzie scalonym AS5030, który w swojej strukturze posiada między innymi procesor, dekodery oraz generator sygnału PWM.



Rys. 4. Widok manetki służącej do zadawania kierunku i prędkości obrotowej

Silnik synchroniczny z sinusoidalnym przebiegiem siły elektromotorycznej (PMSM, ang. *Permanent Magnet Synchronous Motor*), zamontowany jest za pomocą dwóch płyt montażowych ustalonych prostopadle do osi linii wału, na konstrukcji stelaża.



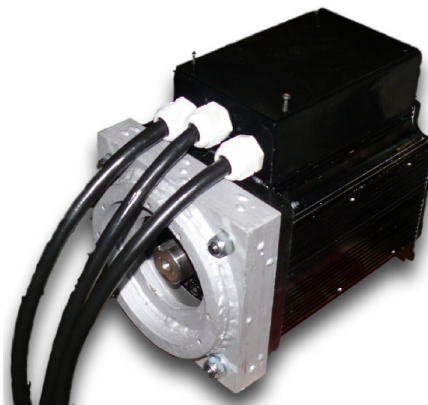
Rys. 5. Sposób montażu silnika synchronicznego

Powyżej silnika zainstalowana jest ładowarka akumulatorów. Na tym samym poziomie co ładowarka, w niewielkiej odległości od silnika, zamontowany jest falownik z radiatorem i wentylatorem. Bezpośrednio na wałku wirnika silnika, zamontowane jest sprzęgło podatne skrętne, które przenosi moment napędowy na linię wału z smarowaniem wodnym, zakończoną śrubą napędową.

Cały układ napędowy zamontowany na stelażu stanowi litą prostopadłościenną konstrukcję, którą w bardzo prosty sposób można odkręcić od kadłuba i zdemontować z łodzi (sezonowanie, serwis). Ponadto w obudowie sterówki znajdują się otwory wlotowe i wylotowe, przez które w wymuszonym obiegu powietrza z udziałem wentylatorów realizowane jest chłodzenie układu napędowego i ładowarki pakietu akumulatorów.

Głównym elementem napędowym układu jest silnik synchroniczny z sinusoidalnym przebiegiem siły elektromotorycznej, z ośmiobiegunowym wirnikiem i dwunastoma cewkami skupionymi na obwodzie stojana.

Jest to najmniejsza jednostka napędowa jaka została skonstruowana w Akademii Morskiej w Gdyni z przeznaczeniem dla układów napędowych w pojazdach. Widok silnika przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Silnik synchroniczny PMSM

Podstawowe dane silnika PMSM:

- moc znamionowa 8,5 kW,
- moc maksymalna 13 kW,
- prąd znamionowy 45 A,
- prąd maksymalny 65 A,
- moment znamionowy 65 Nm,
- moment maksymalny 100 Nm,
- prędkość obrotowa znamionowa 1250 RPM,
- wymiary: dł. 240mm, szer. - wys. 190mm,
- typ chłodzenia: strumień powietrza.

Falownik jaki został użyty do sterowania pracą silnika synchronicznego skonstruowany został przy wykorzystaniu tranzystorów mocy MOSFET.

Podstawowe dane falownika:

- moc znamionowa 18 kW,
- moc maksymalna 30 kW,
- prąd znamionowy 150 A,
- prąd maksymalny 250 A,
- zakres napięcia wejściowego: 12-120 VDC,
- typ chłodzenia: strumień powietrza.

Dodatkowo łódź została wyposażona w system automatycznego odpompowywania nadmiaru wody z jej dna. Dzięki temu użytkownik nie musi martwić się o możliwość uszkodzenia układu napędowego w wyniku jego zalania wodą.

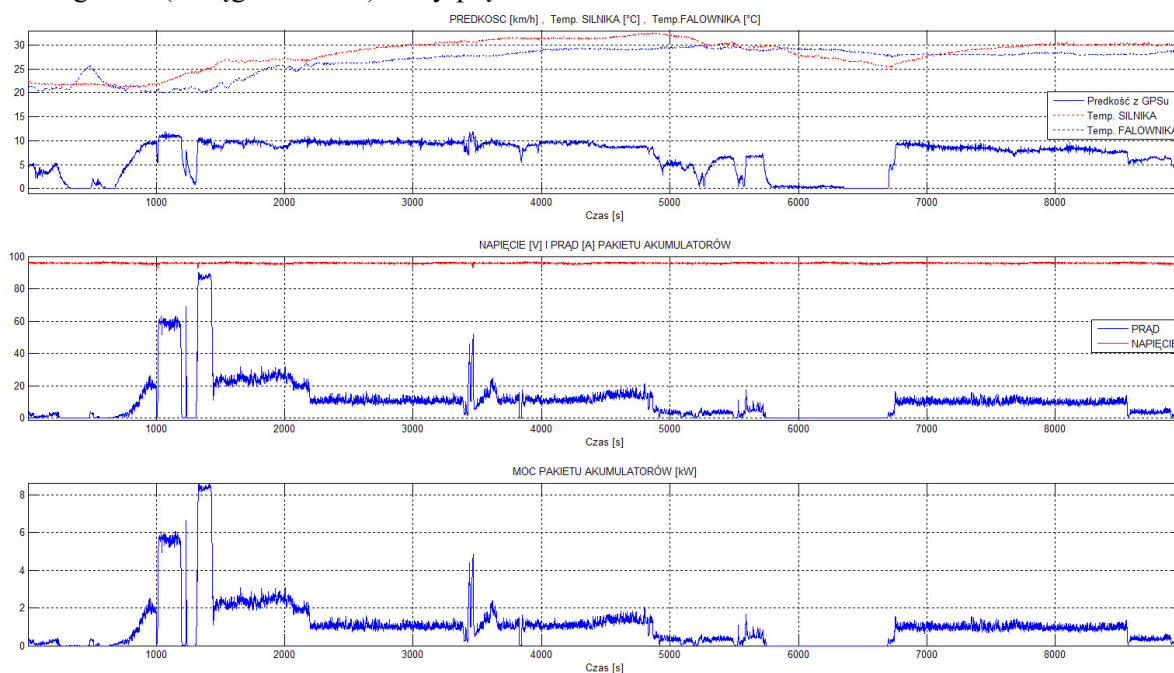
3. Wyniki badań eksploatacyjnych

Opracowany prototyp łodzi z napędem elektrycznym przeszedł szereg testów w warunkach rzeczywistych. Badania eksploatacyjne prowadzone były na wodach Jeziora Żarnowieckiego, akwenie Zatoki Gdańskiej oraz rejonie Martwej Wisły z przyległymi dopływami. Podczas badań panowały normalne warunki atmosferyczne, stan morza ok. 2÷3^B (prędkość wiatru ok. 7÷20km/h), fala do 0,5m wysokości. W trakcie badań mierzone były takie parametry eksploatacyjne jak: napięcie i prąd pakietu akumulatorów, prędkość przemieszczania się łodzi, a także temperatury falownika i silnika. Parametry były rejestrowane za pomocą opracowanego urządzenia do monitoringu pojazdu [1] bez aktywacji funkcji sterowania podzespołami pojazdu na odległość. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 7.

4. Dyskusja wyników

W trakcie prowadzenia testów, weryfikacji poddano zasięg pływania łodzi oraz rozwijane prędkości. Otrzymane wyniki pomiarów potwierdziły przyjęte założenia projektowe. Przykładowo dla prędkości marszowej w granicach 5÷6km/h jednostkę można eksploatować nieprzerwanie przez czas ok. 48 godzin (zasięg do 250km). Założona prędkość maksymalna dla prototypu łodzi ustalona została na poziomie 12km/h i pozwala na jej eksploatację w ciągu ok. 5 godzin (zasięg ok. 50km). Przy prędkości

ok. 8÷9km/h, jednostka może być eksploatowana przez ok. 14 godzin (zasięg ok. 110km). Wzrost prędkości łodzi powyżej 12km/h niesie za sobą konieczność bardzo dużego wzrostu mocy jednostki napędowej, co powoduje, iż podróżowanie tego typu łodzią (jednostka wypornościowa) z większymi prędkościami staje się niemożliwe i nieopłacalne. Na podstawie prowadzonych badań, należy zwrócić uwagę, iż eksploatacja łodzi lub jachtu z napędem elektrycznym, stanowi zupełnie inny rodzaj obiektu dla układu napędowego, niż pojazdy kołowe. W wypadku łodzi, napęd elektryczny pracuje praktycznie przez cały czas z niezmiennym obciążeniem. Nie występują tutaj takie stany eksploatacyjne jak „toczenie się pojazdu siłą rozpędu” czy „hamowanie odzyskowe”. Aby utrzymać stałą prędkość eksploatacyjną, układ napędowy musi pracować nieustannie. Opory hydrodynamiczne działające na kadłub jednostki, znacznie zwiększające się ze wzrostem prędkości, powodują, iż w wypadku wyłączenia układu napędowego, łódź wytraca bardzo szybko prędkość. Średnie zużycie energii przy tego typu łodziach i jachtach na poziomie ok. 150Wh/km jest kilkadziesiąt razy mniejsze, niż w wypadku identycznych łodzi i jachtów z silnikami spalinowymi (ok. 4500Wh/km). Maksymalny czas ładowania akumulatorów wraz z wyrównywaniem poziomów napięć na poszczególnych celach wynosi ok. 5 godzin. Zastosowanie silnika elektrycznego wpłynęło na



Rys. 7. Przykładowe przebiegi wielkości zarejestrowanych podczas testów na akwenie Zatoki Gdańskiej

zmniejszenie poziomu hałasu emitowanego przez układ napędowy. Jednocześnie brak spalin wydostających się z silnika cieplnego, jaki zwyczajowo jest aktualnie stosowany na tego typu jednostkach, eliminuje konieczność ich wdychania przez członków załogi, a także sprowadza do zera zużycie tlenu oraz emisję szkodliwych gazów do atmosfery. Poprzez brak emisji hałasu, wibracji i gazów spalinowych, jednostka może być praktycznie eksploatowana w każdym rejonie żeglugi, łącznie ze strefami ciszy i akwenami, na których użytkowanie głośnych jednostek spalinowych jest zabronione. Ważnym aspektem, wynikającym z zastosowania opracowanej innowacyjnej technologii dla łodzi z napędem elektrycznym jest fakt, iż jest ona przyjazna dla środowiska naturalnego i wpisuje się w ramy projektów proekologicznych.

5. Podsumowanie

Stosując napęd elektryczny w jednostkach pływających:

- znacznie obniżamy koszty eksploatacji (koszt eksploatacji elektrycznej łodzi lub jachtu wynosi ok. 6zł/100km, koszt eksploatacji spalinowej łodzi lub jachtu przy podobnej prędkości wynosi ok. 200zł/100km (średnie zużycie Pb 4l/godz.)).
- znacznie obniżamy poziom emisji hałasu w stosunku do poziomu emitowanego przez spalinowe jednostki napędowe (nie płoszymy zwierząt i ptaków, nie przeszkadzamy innym użytkownikom danego akwenu),
- nie zużywamy tlenu i sprowadzamy do zera lokalną emisję szkodliwych gazów, jakie są generowane w wypadku spalinowych jednostek napędowych,
- pozostajemy obojętni dla środowiska poprzez wykluczenie możliwości skażenia otoczenia w przypadku rozlewu paliwa lub oleju z układu napędowego,
- uzyskujemy znaczne ograniczenie zużycia energii (ok. 150Wh/km) przeznaczanej na przemieszczanie w stosunku do łodzi lub jachtów z napędem spalinowym (ok. 4500Wh/km),

Zerowy poziom emisji spalin oraz ultra cichy układ napędowy powodują, iż opracowany układ napędowy może być bardzo atrakcyjnym produktem na rynku krajowym, jak i światowym.

Literatura

- [1]. Łebkowski A.; „Układ monitorowania parametrów pakietu akumulatorów pojazdu z napędem elektrycznym z wykorzystaniem technik GSM/GPS”, Przegląd Telekomunikacyjny - Wiadomości Telekomunikacyjne, Nr 11/2014.
- [2]. Król E.: „Silniki synchroniczne w napędach pojazdów sportowo-rekreacyjnych”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 2/2014.
- [3]. Rossa R., Król E.: „Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „E-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych”, Zeszyty Problemowe - Zeszyty Problemowe, Nr 4/2012 (97).
- [4]. Rossa R., Król E.: „Badanie napędu elektrycznego E-kit w małym samochodzie osobowym w aspekcie zwiększenia zasięgu jazdy”, Zeszyty Problemowe - Zeszyty Problemowe, Nr 2/2015 (106).
- [5]. www.admiral-boats.com/pl/modele.
- [6]. www.electracraft.com.
- [7]. www.torqueedo.com.
- [8]. Normy: PN-IEC 60364-4-41, PN-EN 61140, PN-HD 60364-4-41.
- [9]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 31 marca 2003 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla rekreacyjnych jednostek pływających, Dz. U. z 2003r. Nr 91 poz. 857.

Autor

dr inż. Andrzej Łebkowski
Katedra Automatyki Okrętowej
Akademia Morska w Gdyni
ul. Morska 83, 81-225 Gdynia
andrzej1@am.gdynia.pl