

Projekt i budowa regatowo-badawczej łodzi zasilanej energią słoneczną

Wojciech Litwin

Studenci Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej oraz członkowie Koła Naukowego KORAB od kilku lat budują nietypowe jednostki pływające i biorą udział w międzynarodowych regatach.

W bieżącym roku odbędzie się 33 edycja regat łodzi napędzanych siłą ludzkich mięśni – International Waterbike Regatta Hamburg 2011. Ekipa z Politechniki Gdańskiej wystartuje w tych regatach po raz ósmy. Po ubiegłorocznym zwycięstwie studenci z Gdańska wystąpią w roli faworytów i obrońców pucharu.

W czerwcu 2011 r. w Holandii odbędzie się trzecia edycja regat łodzi zasilanych energią słoneczną Dutch Open Solar Boats Challenge. Polska ekipa ma już duże doświadczenie w takiej rywalizacji, gdyż bierze udział w tego typu regatach od 2006 r. Najnowsza łódź z Gdańska, zaprojektowana i zbudowana od podstaw w zaledwie cztery miesiące, jednokadłubowa ENERGASOLAR wystąpi w roli faworyta po ubiegłorocznym zwycięstwie w regatach Frisian Solar Challenge 2010. Proces jej projektowania i budowy opisano w niniejszym artykule.

Regaty łodzi solarnych – najważniejsze zasady rywalizacji

Regaty łodzi zasilanych energią słoneczną odbyły się już w Europie kilkukrotnie. Zdaniem autora najważniejsze cykliczne regaty corocznie odbywają się w Holandii. Biorą w nich udział ekipy z Belgii, Brazylii, Holandii, Niemiec, USA oraz Polski. Na przemian co dwa lata odbywają się regaty Frisian Solar Challenge oraz Dutch Open Solar Boats Challenge. Obie imprezy mają specyfikę długodystansowego wyścigu wieloetapowego, podczas którego jedynym źródłem energii jest energia słoneczna. O zwycięstwie decyduje suma czasu, w jakim pokonano wszystkie etapy. Na podstawie bardzo szczegółowego regulaminu dopuszcza się do regat łodzi w trzech klasach. Dwie podstawowe, najliczniej reprezentowane to tzw. klasy A i B, czy-

li łodzi standardowych, jedno- i dwuosobowych, wyposażonych w klasyczne krzemowe panele fotowoltaiczne dostarczane przez organizatora. Dzięki temu większe szanse mają ekipy o mniejszych budżetach, a rywalizacja jest bardziej wyrównana. Trzecia klasa, w regulaminie oznaczona jako C, tzw. *open* lub *top*, to łodzie jednoosobowe, które w przeciwieństwie do klas A i B mogą zostać wyposażone w dowolne panele fotowoltaiczne o wyższej mocy niż w przypadku klas standardowych (szczegółowe dane w tabeli 1). Budżet ekip startujących w tej klasie jest często kilkukrotnie wyższy niż tych z klas A czy B.

Bardzo szczegółowy, wielostronicowy regulamin określa m.in. minimalną wagę członków załogi, która nie może być mniejsza niż 70 kg. Limitowana jest maksymalna waga akumulatorów, co często zmusza ekipy do długich poszukiwań akumulatorów o maksymalnej dopuszczalnej pojemności (1 kWh). Regulamin nie określa maksymalnej wagi łodzi w myśl zasady, że nadwaga zmniejsza szanse na odniesienie sukcesu. Dla przykładu – ciężar łodzi klasy B podczas regat w 2010 r. wynosił od 190 do blisko 400 kg (90 kg to masa paneli fotowoltaicznych).

Obserwując regaty łodzi solarnych od 2006 r., można zauważyć znaczący postęp i wysokie zawansowanie technologiczne czołowych zespołów ubiegających się o miejsca na podium. O ile na początku łodzie często powstawały poprzez adaptację innych jednostek pływających, obecnie dominują wyspecjalizowane konstrukcje zaprojektowane z myślą o regatach. Budżety liderów często przekraczają 100 tys. euro. Można dyskutować, czy to dużo, czy mało. Jak jednak wykazują własne doświadczenia, jest to poziom praktycznie nieosiągalny w Polsce. Budżet zaprojektowanej i zbudowanej w Polsce łodzi ENERGASOLAR, która odniosła zwycięstwo w klasie B podczas regat Frisian Solar Challenge 2010, wynosił 15 tys. euro (ENERGA SA). Pokrył on około połowę kosztów, resztę wzięli na siebie pozostali sponsorzy, którzy wykonali kopyto i formę kadłuba (Model Art Ostróda), udostępnił kompozyty do budowy kadłuba (Magnum Venus Polska), wyposażyli ekipę w przyczepę (Niewiadów) oraz wykonali śrubę napędową (Centrum Techniki Okrętowej w Gdańsku).

Założenia projektowe

Aby odnieść sukces w regatach łodzi zasilanych energią słoneczną, należy zbudować starannie przemyślaną konstrukcję o możliwie małej masie, wyposażoną w wysokosprawny układ zasilania i napę-

Tabela 1. Podstawowe dane z regulaminu

	klasa		
	A	B	Open/Top
liczba członków załogi	1	2	2
maksymalne wymiary dł./szer. [m]	6/2,4	8/2,6	8/2,6
maksymalna pojemność akumulatorów	1 [kWh]		
liczba paneli fotowoltaicznych × moc szczytowa	5 × 175 [Wp]	6 × 175 [Wp]	nie określono × 1750 [Wp]
maksymalne napięcie instalacji elektrycznej	52 DC [V] lub AC RMS		
maksymalne napięcie znamionowe akumulatorów	48 [V]		



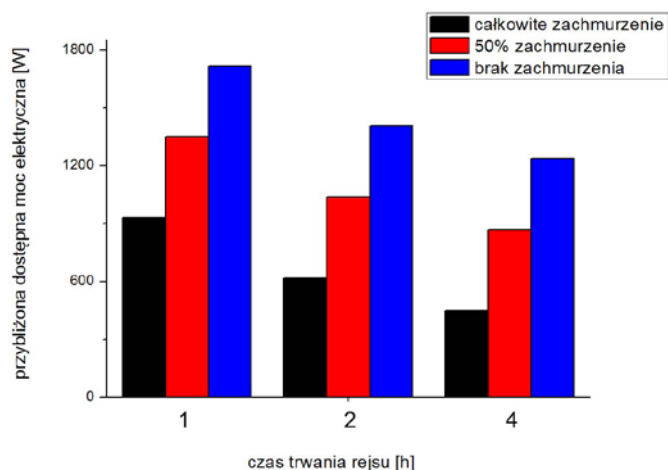
Rys. 1. Katamaran ENERGIASOLAR podczas regat Dutch Open Solar Boats Challenge 2009

du. Łódź musi przebyć bez defektu dystans często przekraczający 200 km po bardzo zróżnicowanych wodach śródlądowych bez względu na warunki pogodowe. Jak pokazuje doświadczenie, warunki pogodowe w Holandii są trudne do przewidzenia. Mimo tego że regaty odbywają się na ogół w pierwszych dniach lata, trzeba liczyć się nawet z kilkudniowymi opadami deszczu. Uzyskuje się wtedy minimalne ilości energii słonecznej i często ciężko jest dobrać do mety, nie uszkadzając akumulatora poprzez tak zwane „głębokie rozładowanie”. Czasami jednak jest bardzo słonecznie, ale silny wiatr wywołuje wysokie fale, szczególnie na dużych, niesłoniętych jeziorach. Dlatego w przeszłości łódzie przewracały się czy wręcz tonęły. Wymusiło to pewne zmiany w regulaminie, zwłaszcza dotyczące bezpieczeństwa i stateczności łodzi. Niezbędny jest również doświadczony sternik i przysłowiowe trochę szczęścia, aby na przykład udało się uniknąć zderzenia z przeszkodami pod powierzchnią wody. W przeszłości zdarzało się, że lider utknął kilkadziesiąt metrów od mety z powodu przegrzania układu napędowego

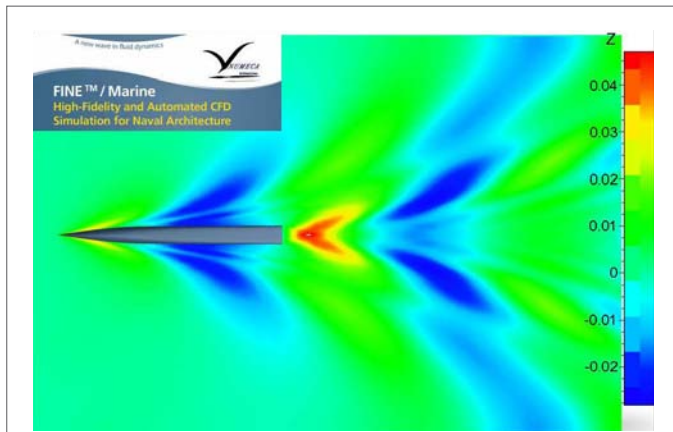
czy zablokowania śruby napędowej przez worek foliowy dryfujący pod powierzchnią wody.

Bazując na własnych doświadczeniach, postanowiono zaprojektować smukłą jednostkę jednokadłubową o długości ośmiu metrów. Po raz pierwszy zdecydowano się na takie rozwiązanie, gdyż wcześniej studenci budowali tzw. katamarany, czyli jednostki dwukadłubowe (rys. 1). Decyzja ta podyktowana była chęcią zredukowania oporów pływania, co miało pozwolić na uzyskanie większej szybkości jednostki. Kadłub miał zostać wykonany z włókien węglowych, dzięki czemu możliwe było znaczące zredukowanie jego masy. Do napędu miał posłużyć wysokosprawny silnik napędowy z magnesami trwałymi współpracujący ze specjalnie zaprojektowaną śrubą napędową. Ze względu na ograniczony budżet postanowiono zastosować klasyczny akumulator ołowiowy (żelowy) współpracujący z panelami fotowoltaicznymi poprzez typowe regulatory procesu ładowania wykorzystujące technologię MPPT (*Maximum Power Point Tracker*).

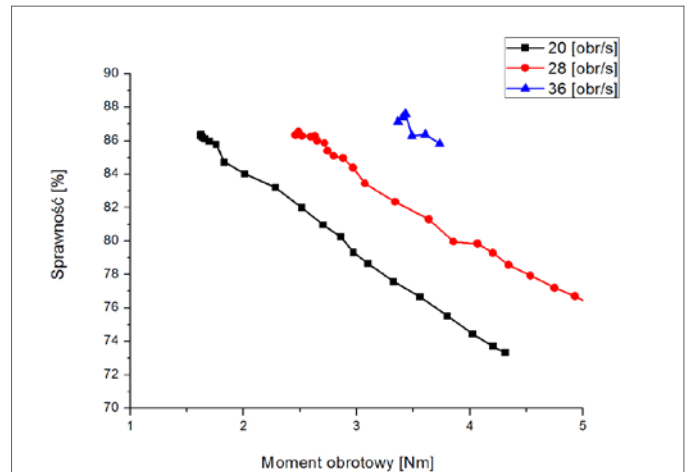
Poważny problem stanowiło przyjęcie wielkości prędkości, z jaką powinna poruszać się jednostka. Z doświadczenia wynikało, że średnia prędkość jednostek solarnych klasy B podczas regat na dystansie wynoszącym ponad 30 km rzadko przekraczała 12 km/h. Z drugiej strony należało pamiętać, że pojemność akumulatora jest ograniczona i wielkość mocy, jaką można wykorzystać do napędu, silnie zależy od warunków pogodowych (rys. 2). Okazuje się, że zwłaszcza w przypadku kilkudniowego wyścigu o zróżnicowanej długości etapów, moc



Rys. 2. Wykres mocy elektrycznej z paneli fotowoltaicznych i akumulatora w funkcji długości trwania rejsu oraz warunków pogodowych



Rys. 3. Obliczony układ falowy wokół kadłuba regatowej łodzi ENERGASOLAR przy prędkości 3,5 [m/s]; wysokość fali wyrażono w metrach, obliczenia dla niepofalowanej powierzchni wody



Rys. 4. Sprawność zespołu silnik-falownik dla wybranych prędkości obrotowych w funkcji momentu obrotowego

elektryczna, jaką można wykorzystać do napędu, może różnić się blisko trzykrotnie. Dlatego trudno jest stworzyć wysokosprawny elastyczny system napędowy. Przede wszystkim związane jest to z tym, że śruba napędowa projektowana jest na konkretne parametry (moc, prędkość obrotowa i prędkość jednostki). Rozwiązaniem optymalnym byłoby zastosowanie śruby nastawnej, czyli ze sterowanym zdalnie położeniem skrzydeł, jednak przy średnicy pędnika rzędu 300 mm wykonanie takiego rozwiązania byłoby bardzo kosztowne. Regulamin dopuszcza wymianę pędników podczas trwania regat, dlatego też na ogół zaawansowane ekipy dysponują kilkoma śrubami, które można wymieniać w zależności od specyfiki konkretnego etapu. Z tych względów założono, że łódź ma osiągać prędkość podróżną równą 3,5 [m/s] (12,6 [km/h]).

Prace projektowe

Przygotowania do regat Frisian Solar Challenge 2010 rozpoczęto jesienią 2009 r. Trzy osoby zaprojektowały trzy odmienne wersje kadłuba. Należy dodać, że zaprojektowanie kadłuba jest przedsięwzięciem tylko z pozoru prostym. Aby uzyskać możliwie niskie opory pływania, kadłub ma często złożony kształt, a prace utrudnia zaplanowane wcześniej rozmieszczenie mas, a więc członków załogi, akumulatorów, napędu i paneli fotowoltaicznych, wymuszające właściwe ukształtowanie kadłuba pod względem koniecznej wyporności.

Prowadzone w przeszłości badania teoretyczne i eksperymentalne [1] wykazały, że współczesne programy obliczeniowe bazujące na metodach numerycznej mechaniki płynów (CFD – *Computatio-*

nal Fluid Dynamic) w rękach wykształconego specjalisty pozwalają na szybkie i często tańsze uzyskanie zadowalająco dokładnych wyników. Rezultatem obliczeń może być tzw. układ falowy (rys. 3), trym naturalny – czyli naturalne ułożenie oporów pływania niezbędna do obliczenia zapotrzebowania na moc napędu przy założonej prędkości pływania jednostki.

Obliczenia oporów i układu falowego wykonano dla przyjętej prędkości pływania jednostki wynoszącej 3,5 [m/s] (ok. 12,6 km/h).

Po wykonaniu obliczeń okazało się, że proponowane trzy odmienne koncepcje kształtu kadłuba mają zbliżone własności. Postanowiono zbudować zaprojektowany przez jednego ze studentów kadłub, który – jak wynikało z obliczeń – stawał opór 86 [N]. Jest to wartość bardzo niska, gdy weźmie się pod uwagę założoną wagę łodzi wraz z członkami załogi wynoszącą łącznie 330 [kg]. Z wyników obliczeń wynika, że do osiągnięcia złożonej prędkości pływania niezbędna jest moc mechaniczna około 330 W. Jest to jednak idealny przypadek. W obliczeniach nie uwzględniono jednak falowania wody, wiatru, siły oporu pochodzącego od układu napędowego itp.

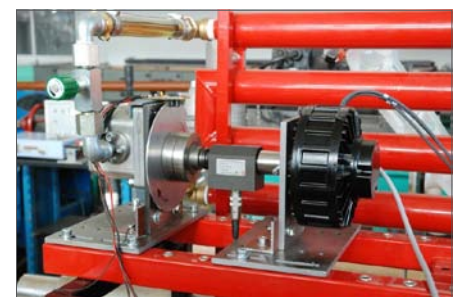
Nie mając pewności, jak dokładny wynik obliczeń udało się uzyskać oraz obawiając się niedoszacowania zapotrzebowania na moc mechaniczną postanowiono ją powiększyć z 330 do 500 W. Po uwzględnieniu sprawności wszystkich komponentów układu napędowego, a więc śruby napędowej (60%), przekładni (96%) oraz silnika z magnesami trwałymi wraz z falownikiem (75–80%) okazało się, że zapotrzebowanie na moc elektryczną wynosi ok. 1150 W. Przy za-

silaniu silnika prądem stałym o napięciu 24 V należało spodziewać się prądów osiągających 50 A.

Do planowanej jednostki wytypowano silnik elektryczny prądu przemiennego z magnesami trwałymi o mocy 1,2 kW zasilany napięciem stałym 24 V poprzez dedykowany falownik. Przeprowadzone badania zespołu silnik-falownik na stanowisku badawczym wykazały, że osiąga on żądaną moc, a sprawność w przewidywanych warunkach pracy przekracza 80% (rys. 4 i 5).

Do napędu łodzi posłużył specjalnie zaprojektowany i zbudowany układ napędowy nazywany w okrętownictwie „pędnikiem azymutalnym” (rys. 6). Ma on zwartą budowę oraz łatwo go zainstalować w jednostce pływającej. Znaczącą zaletą takiego rozwiązania jest również to, że możliwe dzięki temu jest tzw. aktywne sterowanie, które zapewnia jednostce bardzo dobre własności manewrowe. Jest to szczególnie ważne dla smukłej osmiometrowej łodzi.

Ze względu na ograniczony budżet jednostkę wyposażono w dwa klasyczne akumulatory żelowe o napięciu 12 V i pojemności 40 Ah połączone szeregowo. Układ ładowania akumulatorów z paneli



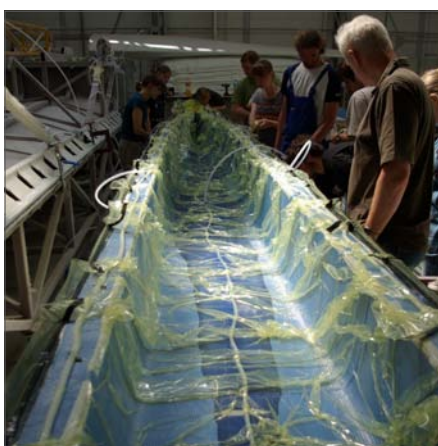
Rys. 5. Stanowisko do badania silników napędowych (Fot. W. Leśniewski)



Rys. 6. Wodowanie łodzi solarnej ENERGASOLAR, po prawej stronie widać pędnik azymutalny



Rys. 7. Polerowanie idealnie gładkiej formy (Fot. W. Leśniewski)



Rys. 8. Forma z kadłubem w trakcie procesu infuzji (Fot. W. Leśniewski)

fotowoltaicznych opierał się na trzech regulatorach wykorzystujących technologię MPPT współpracujących łącznie z sześcioma panelami fotowoltaicznymi.

Budowa łodzi

W efekcie różnych trudności związanych z finansowaniem przedsięwzięcia prace projektowe zostały zawieszono w okresie zimowym 2009–2010 r. Podjęto je ponownie dopiero w marcu 2010 r. po rozwiązaniu problemów formalnych. Na dokończenie prac projektowych i budowę łodzi zostały jedynie cztery miesiące. Było to bardzo niewiele czasu i wszyscy członkowie zespołu byli pełni obaw, czy uda się zrealizować projekt na czas.

Po zakończeniu prac projektowych związanych z modernizacją kształtu kadłuba pod względem technologicznym, niezwłocznie przystąpiono do budowy tzw. kopyta, czyli wiernego modelu kadłuba w skali 1:1. Dopiero po jego ukończeniu możliwe stało się wykonanie formy. Był to bardzo skomplikowany i kosztowny etap prac. Dzięki jednak dużemu zaangażowaniu sponsora – Stoczni Model-Art z Ostródy prace zakończono w ciągu zaledwie czterech tygodni.

Po zakończeniu prac nad formą do pracy nad kadłubem ponownie włączyli się studenci. W ciągu czterech dni wypolerowano formę (rys. 7) oraz ułożono składniki kompozytu. Kadłub wykonany został z najnowszych kompozytów węglowo-epoksydowych dzięki pomocy firmy Magnum Venus Polska. Po raz kolejny wykorzystano bardzo nowoczesną technologię infuzji próżniowej [3]. Polega ona na samoczynnym przesączaniu żywicy ułożonych wcześniej składników kompozytu, w efekcie wytworzonego podciśnienia przez pompę próżniową (rys. 8).

Po wyjęciu ośmiometrowego kadłuba z formy okazało się, że waży on zaledwie 17 kg. Wkrótce potem w kadłubie zainstalowano niezbędne usztywnienia oraz pokład. Podwodną część kadłuba pomalowano, a następnie wypolerowano.

Niezależnie wykonano wszystkie podzespoły układu napędowego oraz mechanizmu sterowania pędnikiem azymutalnym.

Układ pomiarowy

W razie potrzeby na łodzi ENERGASOLAR można zainstalować dość złożony układ pomiarowy. Dzięki autonomicznemu układowi rejestrującemu możliwe jest zapisywanie wielu różnych parametrów, takich jak:

- warunki pogodowe (prędkość i kierunek wiatru, nasłonecznienie, falowanie);
- moc mechaniczną (prędkość pływania względem wody oraz GPS, siłę naporu pędnika, prędkość obrotowa wału, moment obrotowy na wale);
- parametry elektryczne (napięcie zasilające układ napędowy, prąd płynący z paneli fotowoltaicznych, prąd pobierany przez silnik);
- poza tym zapisywana jest trasa pokonana przez łódź (GPS) wraz z prędkością chwilową łodzi oraz prowadzony jest ciągły zapis wideo przez kamerę cyfrową.



Rys. 9. Łodzie przygotowują się do startu, na pierwszym planie ENERGASOLAR



Rys. 10. Ekipa z Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej na podium końcowym regat Frisian Solar Challenge 2010

Układ pomiarowy został zaprojektowany tak, aby po regatach możliwe było przeprowadzenie analizy wyścigu oraz przyjętej strategii. Analiza wyników ma pomóc w zaprojektowaniu systemu do wspomagania procesu racjonalnego zarządzania energią.

Testy i start w regatach

Finalny montaż łodzi przeprowadzono na kilka dni przed wyjazdem na regaty. Niestety nie starczyło czasu na wcześniejsze testy, a łódź zwodowano po raz pierwszy dopiero w Holandii. Ekipa wyjechała na regaty pełna obaw. Wydaje się jednak, że zapocentrowało doświadczenie z budowy poprzednich konstrukcji oraz na pewno nie zabrakło szczęścia. Łódź przeszła szczęśliwie przez obowiązkowe procedury kontrolne i została dopuszczona do startu w regatach.

Doskonałe własności łodzi potwierdzono, wygrywając prolog. Zdobytego na pierwszym etapie zwycięstwa i prowadzenia w klasyfikacji generalnej ekipa nie dała sobie odebrać aż do mety. Po pokonaniu blisko 240 km przewaga łodzi ENERGASOLAR nad najlepszym z konkurentów wynosiła blisko jedną godzinę. Zapewniło to zajęcie wymarzonego pierwszego miejsca na podium.

Podsumowanie

Mimo tego że start w regatach można uznać za bardzo udany, to studenci planują przeprowadzenie pewnych modernizacji łodzi przed regatami Dutch Open Solar Boats Challenge 2011.

Silnik napędowy o mocy 1,2 kW nie pozwalał na wykorzystanie dostępnej mocy w warunkach wyścigu na krótkich dystansach wynoszących poniżej 10 km, zwłaszcza jeśli była bardzo dobra, słoneczna pogoda. Dysponowano wówczas mocą przekraczającą 2 kW. W praktyce łódź pływała często wyłącznie na energii wytwarzanej przez panele fotowoltaiczne, nie pobierając energii z akumulatora.

Poważny problem stanowiło nagrzewanie się silnika grożące automatycznym awaryjnym wyłączeniem napędu. W praktyce temperatura obudowy mimo bardzo starannie zainstalowanego układu chłodzenia powietrzem – obcej wentylacji – osiągała 85°C.

W 2011 r. odbędą się regaty Dutch Open Solar Boats. Przyjdzie nam zmagać się m.in. na dużych, wietrznych, słonowodnych akwenach. Mamy nadzieję, że przetrwamy regaty i zajmiemy dobre miejsce na podium.

Bardzo cieszy też fakt, że starania studentów z Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej doceniają sponsorzy, którzy zadeklarowali już chęć pomocy ekipie z Politechniki Gdańskiej w 2011 r. Uzyskane środki pozwolą na budowę nowej łodzi do mocno obsadzonej klasy łodzi jedno-

osobowych. Szczegóły oraz zawansowanie prac można sprawdzić na stronie internetowej www.solarboats.eu.

Trudno autorowi powstrzymać się przed podzieleniem się z czytelnikami pewną refleksją. Osobiście bardzo się cieszę, że w czasach kiedy coraz bardziej oszczędza się na procesie kształcenia inżynierów, redukując liczbę godzin zajęć podczas studiów, oraz że mimo licznych „pokus”, jakie ma dzisiejsza młodzież, jest corocznie grono osób, studentów, członków Koła Naukowego, którzy nie boją się wyzwania. Potrafią i chcą wiele prac wykonać samodzielnie, nie bojąc się ubrudzenia sobie rąk. Poświęcają na pracę swój prywatny czas, często kosztem dobrego przygotowania się do egzaminów, gdyż regaty na ogół odbywają się w okresie sesji. Praca z nimi daje mi wiele radości i satysfakcji.

Literatura

- [1] DYMARSKI P., GRYGOROWICZ M., LEŚNIEWSKI W., LITWIN W.: *Projekt i badania jednostki pływającej zasilanej energią słoneczną*. „Napędy i Sterowanie” nr 2, 2010.
- [2] DYMARSKI C., LEŚNIEWSKI W.: *Numerical investigations of the engine cooling system in a small power vessel pod propulsion system*. „Polish Maritime Research” – Vol. 15, nr 4(58), 2008.
- [3] DUDA D., LITWIN W.: *The catamarans George and Energa Solar*. „Polish Maritime Research” – Vol. 14, nr 3(53), 2007.

dr inż. Wojciech Litwin – Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej