

dr hab. inż. Jerzy Garus, prof. AMW
Akademia Marynarki Wojennej
Wydział Mechaniczno-Elektryczny
81-127 Gdynia, ul. Śmidowicza 69

Gdynia, dnia 20.10.2025 r.

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Kaczmarczyka
pt. „Effectiveness of waterjet propulsors in underwater vehicle propulsion”**

Promotor: dr hab. inż. Lech Rowiński, prof. PG

Recenzja wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej z dnia 21.05.2025 r.

I. Ocena problematyki pracy

Wśród różnorodnych środków technicznych służących do penetrowania mórz i oceanów znaczącą rolę odgrywają bezzałogowe pojazdy głębinowe (ang. UUV – Unmanned Underwater Vehicle). Wyposażone w pędniki i posiadające zdolności manewrowe przeznaczone są do wykonywania zadań w toni wodnej na głębokości od kilku do kilku tysięcy metrów.

W procesie projektowania pojazdu głębinowego jako złożonego systemu technicznego ważny problem stanowi zagadnienie zapewnienia mu założonych parametrów eksploatacyjnych oraz bezpiecznej pracy w zmiennych warunkach środowiskowych. Powyższe jest nierozdzielnie związane z doбором układu napędowego, którego zadaniem jest generowanie sił, pozwalających na wywołanie ruchu jednostki. Dobór ten zależy od wielu czynników, m.in. takich jak przeznaczenie pojazdu, wymagania operacyjne czy dostępne źródło energii. W praktyce często skutkuje to koniecznością indywidualnego podejścia do tego zagadnienia dla nowoprojektowanego pojazdu.

Najczęściej wybieranym rozwiązaniem układu napędowego dla bezzałogowego pojazdu głębinowego jest układ oparty na pędnikach śrubowych, charakteryzujących się prostą konstrukcją i stosunkowo niskim jednostkowym kosztem wytworzenia. Pędniki te, choć sprawdzone i powszechnie stosowane, nie są jednak idealne w zastosowaniach gdzie liczy się cicha praca, wysoka wydajność energetyczna, bezpieczeństwo mechaniczne i odporność na zanieczyszczenia środowiskowe.

Stąd, w wielu ośrodkach badawczych i przemysłowych, zarówno zagranicznych jak i krajowych, intensywnie poszukuje się rozwiązań będących alternatywą dla pędników śrubowych. Dla potrzeb oceny funkcjonalności tych rozwiązań niezbędne są badania i analizy pozwalające ocenić zdolność zaproponowanego układu napędowego do zapewnienia jednostce podwodnej założonych prędkości poruszania się w różnych kierunkach i odpowiedniej manewrowości w warunkach zmiennego środowiska morskiego.

Autor rozprawy podjął w pracy temat właśnie z tego zakresu, stawiając sobie za cel opracowanie efektywnej metodyki prognozowania sprawności układu napędowego zbudowanego z pędników strugowodnych dla małogabarytowego pojazdu głębinowego. Tym samym tematyka rozprawy podjęta przez Doktoranta jest aktualna i zgodna z bieżącymi potrzebami.

II. Analiza rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji praca, napisana w języku angielskim, ma objętość 150 stron i składa się z 11 rozdziałów numerowanych, spisu cytowanej literatury zawierającego 150 pozycji (w tym jednej autorstwa Doktoranta) oraz 5 załączników. Na początku rozprawy umieszczono jej streszczenia w języku polskim i języku angielskim, spis treści oraz listę symboli.

W rozdziale 1 „Objective of this work” Doktorant przedstawia cel pracy, którym jest określenie użyteczności wybranych półempirycznych oraz numerycznych algorytmów do:

1. analizy zjawisk zachodzących wewnątrz poszczególnych elementów konstrukcyjnych pędnika strugowodnego;
2. oceny doboru parametrów geometrycznych pędnika strugowodnego zapewniających osiągnięcie wysokiej sprawności w warunkach eksploatacyjnych typowych dla małogabarytowego pojazdu głębinowego.

W rozdziale 2 „Thesis” Autor przedstawia tezy rozprawy, które przyjęły następujące brzmienie:

1. Możliwym jest zastosowanie pędnika strugowodnego, jako zamiennika tradycyjnych pędników śrubowych do napędu małogabarytowego pojazdu głębinowego.
2. Możliwym jest przeprowadzenie całego procesu projektowania pędnika strugowodnego w oparciu o obliczeniową mechanikę płynów.

W rozdziale 3 „Introduction” Doktorant charakteryzuje podstawowe typy podwodnych jednostek pływających, w tym pojazdy zdalnie sterowane oraz pojazdy autonomiczne, ze szczególnym ukierunkowaniem na charakterystykę ich układów napędowych. Przybliży

również najważniejsze zagadnienia związane z pędnikami strugowodnymi opisując mechanizm ich funkcjonowania i główne elementy składowe. Rozdział kończy wskazaniem wybranych prac naukowych zawierających szczegółowe informacje dotyczące zasady działania pędnika strugowodnego i modelowania zjawisk w nim zachodzących, w tym opartych na obliczeniowej mechanice płynów CFD (ang. CFD - Computational Fluid Dynamics).

W rozdziale 4 „Objective of investigation” Autor rozprawy przedstawia opis małego zdalnie sterowanego pojazdu głębinowego GŁUPTAK, zaprojektowanego i zbudowanego w Politechnice Gdańskiej, będącego przedmiotem rozważań w dysertacji. Szczególną uwagę poświęca układowi napędowemu zastosowanemu w tym pojeździe do ruchu w płaszczyźnie poziomej, a opartemu na czterech pędnikach śrubowych. Podaje najważniejsze parametry tego układu, które wykorzystywane są jako punkty referencyjne dla analiz przeprowadzonych w kolejnych rozdziałach pracy doktorskiej.

W rozdziale 5 „Theoretical performance of waterjet propulsor” Doktorant zamieszcza zestaw analitycznych zależności wykorzystywanych w procedurze projektowania pędnika strugowodnego. Pozwalają one na określenie jego podstawowych parametrów pracy, takich jak:

- a) siła odrzutu strumienia wody;
- b) masa wody, której przepływ musi wygenerować pompa dla pożądanej siły odrzutu;
- c) prędkości wylotowe, które należy uzyskać, aby otrzymać pożądaną siłę odrzutu;
- d) moc strumienia wylotowego;
- e) sprawność pędnika strugowodnego.

Rozdział 6 „Semi-empirical description of the waterjet propulsor” Doktorant poświęcił metodom obliczeń strat w przepływie wody przez pędnik strugowodny. W tym celu podzielił pędnik na niezależne elementy (komponenty), wg międzynarodowego standardu ITTC (23rd International Towing Tank Committee), wyróżniając w nim:

- 1. wlot do pędnika,
- 2. dyfuzor (wlot do pompy),
- 3. pompę,
- 4. konfuzor (dyszę wylotową).

Dla każdego z ww. elementów przedstawia szczegółowe zależności analityczne pozwalające na wyznaczenie strat przepływu cieczy, a tym samym ich wpływu na sprawność pędnika i generowany napór.

W rozdziale 7 „Performance calculation of the submersible waterjet propulsor using semiempirical description”, w oparciu o zależności zamieszczone w rozdziale 6, Doktorant przedstawia opis autorskiej dwuetapowej procedury wyznaczania parametrów geometrycznych pędnika strugowodnego dla założonych warunków pracy.

W etapie pierwszym, dla wybranych średnic wirnika pompy, (30 [mm], 40 [mm] oraz 50 [mm]), możliwych do zabudowy w rufowej części pojazdu GŁUPTAK, oblicza ich sprawność energetyczną dla oczekiwanego naporu pędnika. Na tej podstawie wyznacza średnicę wirnika zapewniającą pożądany napór przy minimalnych stratach przepływu wody w kanale. W etapie drugim, dla tak dobranej średnicy wirnika, wyznacza średnicę dyszy wylotowej zapewniającej wytworzenie zadanej siły odrzutu.

W rozdziale 8 „Investigation of possible improvements of the waterjet propulsion efficiency with use of CFD methods”, kluczowym dla pracy, Doktorant prezentuje własną metodykę podejścia do projektowania pędnika strugowodnego.

Przedstawia, uzyskane z wykorzystaniem metod CFD, wyniki symulacji oporu pojazdu GŁUPTAK dla konfiguracji układu napędowego z pędnikami śrubowymi i pędnikami strugowodnymi. Dokonuje ich porównania z rezultatami badań eksperymentalnych dla pojazdu rzeczywistego, co pozwala mu na walidację parametrów nowoprojektowanego pędnika strugowodnego. Następnie, na modelu reprezentującym docelową geometrię pędnika, przeprowadza ocenę wpływu kształtu:

- a) wlotu do pędnika na prędkość wody oraz charakter jej dopływu do wlotu pompy;
- b) tunelu pędnika na charakter przepływu wody;
- c) dyszy wylotowej na rozkład prędkości i prędkość wylotową wody.

W końcowej części rozdziału zamieszcza wyniki szeregu symulacji CFD ilustrujących napór generowany przy różnych prędkościach obrotowych wirnika pompy i prędkościach przepływu wody. Ich analiza pozwoliła Doktorantowi na wstępną ocenę efektywności nowoprojektowanego pędnika strugowodnego oraz wskazanie miejsc potencjalnej poprawy parametrów jego pracy mających wpływ na sprawność i generowany napór.

W rozdziale 9 „The experimental evaluation of waterjet propulsion system theoretical investigation” Autor przedstawia wyniki badań eksperymentalnych ukierunkowanych na weryfikację otrzymanych wyników obliczeń numerycznych i symulacji komputerowych. Badania te przeprowadzone zostały na pojeździe GŁUPTAK dla układów napędowych opartych o standardowe śruby (nieosłonięte i osłonięte kratką) oraz pędniki strugowodne. Prezentuje wybrane wyniki, dla pędnika pracującego wprzód i wstecz, w tym:

- a) napór pędnika w funkcji obrotów wirnika,

- b) zmiana naporu pędnika w funkcji czasu,
- c) zmiana ciśnienia za wirnikiem w funkcji czasu,
- d) wpływ średnicy wylotowej dyszy wylotowej na napór pędnika.

Zamieszczone wyniki wskazują jednak, że pędnik strugowodny nie w pełni osiągnął dwa wymagane parametry pracy, a mianowicie napór oraz pobór mocy.

W rozdziale 10 „The experimental results discussion” Doktorant poddaje analizie wyniki otrzymane w trakcie badań eksperymentalnych, a uzyskane dla tego samego punktu pracy, ale dla różnych konfiguracji napędu. Na tej podstawie wskazuje na potencjał pędnika strugowodnego, jako zamiennika dla tradycyjnych pędników śrubowych.

Wyjaśnia także, skąd wzięły się różnice pomiędzy oczekiwanymi parametrami pracy, a ich wielkościami uzyskanymi podczas badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Jako możliwą przyczynę tych rozbieżności wskazuje tu m.in. na przyjęte założenie, że wielkość pędnika ma być dostosowana do gabarytów jednostki referencyjnej, tj. pojazdu GŁUPTAK. Powyższe spowodowało iż badania ukierunkowano na pędniki strugowodne wykorzystujące pompy o średnicy wirnika nie większej niż 50 [mm].

Zakończenie dysertacji stanowi rozdział 11 „Conclusion”. Doktorant zamieszcza w nim wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz, które stanowią podsumowanie badań potwierdzających tezy założone w dysertacji. Przedstawia także propozycje dalszych kierunków badań w rozważanej w pracy tematyce.

Na końcu rozprawy Autor zamieszcza 5 załączników będących uzupełnieniem pracy. Zawarto w nich szczegółowe dane dotyczące stanowisk wykorzystywanych zarówno do badań laboratoryjnych w kanale obiegowym, jak i badań w warunkach rzeczywistych na akwenie otwartym oraz tabelaryczne zestawione obliczone i pomierzone współczynniki porównawcze wszystkich badanych konfiguracji napędu.

III. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedmiotem recenzowanej rozprawy jest problematyka naukowa dotycząca zagadnień związanych z projektowaniem i eksploatacją podwodnych jednostek pływających, a ukierunkowanych na zastosowanie pędnika strugowodnego o niewielkich rozmiarach do napędu małogabarytowego pojazdu głębinowego.

Recenzowaną pracę oceniam wysoko ze względu zarówno na jej potencjał aplikacyjny, wynikający z aktualnych potrzeb związanych z projektowaniem układu napędowego dla małej głębinowej jednostki pływającej, jak i – przede wszystkim – ze

względu na innowacyjny sposób potraktowania rozpatrywanej tematyki. Uważam, że cel pracy został osiągnięty, a postawione tezy udowodnione.

Na szczególne wyróżnienie, upoważniające mnie do takiej oceny rozprawy, zasługują następujące elementy:

1. Poprawne zdefiniowanie przedmiotu badań i celu dysertacji, wynikające zarówno z rozpoznania rozważanych problemów i jak własnego doświadczenia Doktoranta. Zaproponowany temat jest aktualny w kontekście potrzeb związanych z projektowaniem i wykorzystaniem bezzałogowych pojazdów głębinowych do realizacji misji podwodnych.
2. Umiejętność korzystania z literatury specjalistycznej oraz formułowania oryginalnych wniosków, co dowodzi dojrzałości naukowej Autora.
3. Przyjęcie oryginalnego programu badań numerycznych i empirycznych.
4. Możliwość wykorzystania wyników rozprawy do celów praktycznych, w kontekście zwiększenia niezawodności i bezpieczeństwa operacyjnego pojazdów głębinowych.

Spośród wymienionych wyżej elementów rozprawy na szczególną uwagę zasługuje nowatorska metodyka projektowania układu napędowego opartego o pędniki strugowodne. Metodyka ta jest unikatowa w warunkach zarówno krajowych jak i zagranicznych. Doktorant w oryginalny sposób dokonał analizy wpływu konfiguracji geometrycznej poszczególnych elementów pędnika na jego całkowitą sprawność, co pozwala uznać Go za specjalistę w tym obszarze badań.

IV. Uwagi ogólne i zapytania

Praca jest napisana właściwie pod względem stylistycznym i ortograficznym. Zastosowano poprawne słownictwo naukowe i techniczne. Układ treści, podział na rozdziały i punkty jest generalnie logiczny oraz adekwatny do prowadzonych rozważań. Wykaz źródeł literaturowych jest w zasadzie odpowiedni i reprezentatywny dla dziedziny wiedzy obejmującej zagadnienia analizowane w pracy. Bibliografia w zdecydowanej większości obejmuje publikacje naukowe, podręczniki akademickie, akty prawne, dokumentacje techniczne, materiały informacyjne oraz strony internetowe, na które powoływano się w treści pracy.

Zwraca uwagę fakt iż opis bibliograficzny nie jest jednolity i ustandaryzowany (brak konsekwentnego stosowania zasady jednego stylu), co utrudnia czytelność. Kilka z pozycji to odwołania do treści zamieszczonych w Wikipedii, a tym samym prawdopodobnie nie poddanych zewnętrznej ocenie merytorycznej, co nie wydaje się być właściwym w publikacji

naukowej (np. pozycje: 1, 3, 10, 14, 43, 76, 139). Ponadto żadna ze stron internetowych nie jest opatrzona datą dostępu.

Jako zagadnienia dyskusyjne, proszę Doktoranta o odniesienie się do poniższego:

1. Czy badania opisane w rozdziałach merytorycznych 7-9 mogą być odniesione do pojazdów głębinowych o innych gabarytach i prędkościach pływania, a tym samym czy możliwe będzie opracowanie dla nich spójnej, ujednoliconej procedury projektowej układu napędowego z pędnikami strugowodnymi?
2. W celu bezpośredniego porównania ze sobą różnych typów napędów w pracy przeprowadzono badania symulacyjne i eksperymentalne. Jednak brakuje, dla wszystkich analizowanych typów napędów, kompletu badań przeprowadzonych w tych samych warunkach pracy, w szczególności zbliżonych do rzeczywistych warunków operacyjnych. Czy planowane jest rozszerzenie eksperymentów w przyszłości, tak aby uzupełnić walidację dla pełniejszego zakresu warunków?
3. Zamieszczone w pracy wyniki badań pojazdu głębinowego GŁUPTAK z układem napędowym opartym o pędniki strugowodne nie odnoszą się bezpośrednio do jego manewrowości. Czy były zatem przeprowadzane jakieś badania w kierunku oceny własności ruchowych pojazdu? Jeżeli tak, to jakie uzyskano rezultaty.

V. Podsumowanie

Na podstawie analizy treści ocenianej rozprawy doktorskiej stwierdzam, iż stanowi ona istotny wkład w rozwój wiedzy w zakresie metod projektowania i modelowania podwodnych bezzałogowych jednostek pływających, ze względu na wysoki poziom merytoryczny oraz osiągnięcia użyteczne w zakresie rozpatrywanych problemów. Praca jest dobrym przykładem zastosowania nowoczesnych metod naukowych, zarówno teoretycznych jak i empirycznych, do rozwiązywania zadań w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna.

VI. Konkluzja

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Kaczmarczyka pt. „Effectiveness of waterjet propulsors in underwater vehicle propulsion” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2021 poz. 478 z późn. zm.). W związku z tym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.