

Recenzja
pracy doktorskiej Pana mgr inż. Macieja Kaczmarczyka
pt. „Effectiveness of waterjet propulsors in underwater vehicle propulsion”

Podstawa prawna. Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej prof. dr hab. inż. Michała Wasilczuka z dnia 16.06.2025 r. o wyznaczeniu recenzenta w przewodzie doktorskim Pana mgr inż. Macieja Kaczmarczyka Uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Zagadnienie naukowe przedstawione w pracy

Do oceny przedstawiono pracę pod tytułem „Effectiveness of waterjet propulsors in underwater vehicle propulsion”, który w języku polskim otrzymał brzmienie „Efektywność wodnych pędników odrzutowych w napędach pojazdów głębinowych”. Zagadnienie naukowe poruszone w pracy dotyczy oceny przydatności istniejących metod analitycznych, półempirycznych oraz algorytmów numerycznych do projektowania napędu strugowodnego o zadanej konfiguracji, dla małego, zdalnie sterowanego pojazdu podwodnego w kształcie torpedy. Praca ma charakter analityczno-badawczy - opiera się na analizie zjawisk występujących w poszczególnych częściach projektowanego pędnika strugowodnego i analizie właściwości oporowo-napędowych dedykowanego do badań pojazdu „Głuptak”. Podstawę oceny wybranych metod stanowiła analiza porównawcza, oparta na badaniach empirycznych, numerycznych i eksperymentalnych. Przeprowadzone badania są ważne ze względu na szybki rozwój i duże zapotrzebowanie na zdalnie sterowane pojazdy podwodne. Praca mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Treść i zakres pracy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim, liczy 150 stron, zawiera streszczenia w języku angielskim i polskim, spis oznaczeń i skrótów, 11 rozdziałów merytorycznych, bibliografię obejmującą 150 pozycji - literatury naukowej i adresów stron internetowych oraz cztery załączniki. Tytuł przetłumaczony na język polski otrzymał brzmienie: „Efektywność wodnych pędników odrzutowych w napędach pojazdów głębinowych”.

W pierwszym rozdziale Autor sformułował cel naukowy pracy, jako ocenę przydatności wybranych algorytmów opartych na modelach empirycznych i numerycznych, do szczegółowej analizy zjawisk związanych z opływem elementów pędnika strugowodnego oraz dobór (optymalizację) parametrów geometrycznych napędu, zapewniających wysoką sprawność w warunkach eksploatacyjnych małego pojazdu podwodnego.

W drugim rozdziale, zatytułowanym „Teza”, założył, że możliwa jest optymalizacja parametrów geometrycznych napędu strugowodnego w określonej konfiguracji, przy wykorzystaniu metod numerycznej mechaniki płynów i zachowaniu dużej dokładności obliczeń, i postawił następującą tezę, mającą charakter użyteczny: możliwe jest osiągnięcie porównywalnej sprawności napędowej dla napędu strugowodnego i napędu referencyjnego, przy czym napęd referencyjny to standardowy napęd śrubowy pojazdu podwodnego w precyzyjnie określonej konfiguracji.

W rozdziale 3 „Wprowadzenie”, w oparciu o przykłady dostępne w Internecie, Autor przedstawił problemy występujące podczas eksploatacji napędów śrubowych małych pojazdów podwodnych i wyszczególnił zalety napędu strugowodnego. Podkreślił brak dostępnych informacji dotyczących rozwiązań konstrukcyjnych napędów strugowodnych, ze względu na tajemnicę handlową producentów. W dalszej części opisał zasadę działania napędu strugowodnego, zaznaczył występowanie trudności przy modelowaniu przepływu, ze względu na złożoną konstrukcję urządzenia i przytoczył opisane w

literaturze badania fizyczne i numeryczne pędników strugowodnych stosowanych na statkach. Uzasadnił w ten sposób możliwości wykorzystania metod numerycznych do oceny efektywności napędu strugowodnego na małym pojeździe podwodnym. Jako dodatkową motywację podjęcia tematu badań uznał podawaną w literaturze dobrą zgodność wyników modelowania numerycznego z wynikami badań na modelach fizycznych. W podsumowaniu oceny stanu wiedzy znalazły się tytuły prac naukowych poświęconych badaniom zjawisk zachodzących wewnątrz pędnika strugowodnego i podstawom projektowania napędów strugowodnych.

W rozdziale 4, zatytułowanym „Badania obiektu”, przedstawione zostały podstawowe charakterystyki istniejącego systemu „GLUPTAK”, przyjętego przez Doktoranta jako obiekt badawczy. Zdefiniowane zostały warunki eksploatacyjne obiektu na wodzie spokojnej i przy występowaniu prądu wodnego. Podane zostały charakterystyki geometryczne i hydrodynamiczne pędników śrubowych, będących podstawowym wyposażeniem napędowym „GLUPTAKA”. Przedstawiono porównanie krzywych oporu pojazdu z napędem śrubowym bez osłony, z osłoną umieszczoną za śrubami oraz z napędami strugowodnymi z pędnikami Graupnera WJ39G i oryginalnie zaprojektowanymi dla „Głuptaka” pędnikami WJ50. Podane zostały parametry oporowo-napędowe przy prędkości postępowej 3 m/s. Doktorant podkreślił, że celem badań była analiza charakterystyk geometrycznych i parametrów eksploatacyjnych pędników, ze względu na sprawność napędu strugowodnego pojazdu przy pracy naprzód na wodzie spokojnej.

Rozdział 5 Doktorant poświęcił analizie teoretycznej sprawności napędu strugowodnego. Opierając się na znanych zależnościach podał wzory na sprawność, wyróżnił sprawność kanału pędnika strugowodnego i maksymalną sprawność napędu w zależności od współczynnika strat energii w przepływie.

W rozdziale 6, zatytułowanym „Półempiryczny opis pędnika strugowodnego” Autor przytoczył dwie metody oceny strat energii w pędniku strugowodnym: ogólną metodę opisującą straty w przepływie dla pompy i metodę Fliegnera, opracowaną dla pędników strugowodnych. Wyróżnione zostały charakterystyczne przekroje napędu ze względu na wzdlużny rozkład ciśnienia i prędkości oraz elementy odpowiadające tym przekrojom. Do opisu strat występujących w kanale, złożonych ze strat liniowych i lokalnych, zaproponował wzór Weisbacha na zmianę ciśnienia, oparty na współczynniku strat, zależnym od geometrii pędnika.

Bazując na modelach przepływu znanych z literatury, modelu przepływu dla płynu idealnego, modelu przepływu laminarnego i turbulentnego, przedstawił ogólny model strat w kanale pędnika strugowodnego. Podał wzór Blasiusa na liniowy współczynnik oporu tarcia λ dla gładkiego kanału o przekroju kołowym, w zależności od liczby Reynoldsa i wzór Mises’a, uwzględniający szorstkość ścianki kanału. Zamieścił wykres współczynnika λ dla rur przemysłowych, w zależności od chropowatości względnej ścianki kanału i liczby Reynoldsa - oraz tabelę chropowatości względnej dla 5 wybranych materiałów. W dalszej części rozdziału przytoczył wzory empiryczne dla gładkich rur i przepływu turbulentnego, dla różnych zakresów liczb Reynoldsa oraz dla rur o szorstkiej powierzchni wewnętrznej, wykonanych z tworzywa sztucznego (wzory 6.11 - 6.19). Podał również zależności dla rur żeliwnych i stalowych. W podsumowaniu przedstawionego stanu wiedzy stwierdził, że wymienione zależności nie spełniają warunków modelowania przepływu w pędniku strugowodnym, ponieważ pozwalają one obliczyć współczynnik λ tylko dla przepływu ustalonego. Potwierdzają jednak konieczność zapewnienia możliwie gładkiej powierzchni wnętrza kanału pędnika.

Przedstawiając model przepływu dla badanego napędu Doktorant wyróżnił elementy pędnika zgodnie z zaleceniami 23 Międzynarodowej Konferencji Basenów Modelowych ITTC.

Do obliczeń współczynnika oporów liniowych λ , na odcinku prostoliniowym, dla liczb Reynoldsa bliskich 10^5 , przyjął wzór Leesa. Oceniał, że wpływ efektu Coandy, zmniejszający straty przy wlocie do kanału jest trudny do ilościowego oszacowania i przyjął znane z literatury wzory empiryczne do obliczenia wysokości strat miejscowych przy zmianie kierunku przepływu dla dyfuzora – wzory odpowiednio 6.26 i 6.27. Opisując straty przepływu dla konfuzora podał jako przydatny do późniejszych obliczeń wzór Weisbacha 6.28, w którym stała 0,04 odpowiada stratom spowodowanym oddziaływaniem krawędzi dławiącej strumień cieczy, natomiast człon $(1/\chi - 1)^2$ uwzględnia straty wywołane zwężeniem się strugi, gdzie χ - jest współczynnikiem kontrakcji. Wzory empiryczne dla strat energii w poszczególnych fragmentach pędnika Doktorant oparł na metodzie Fliegner’a.

Analizując znane metody obliczania sprawności pompy, jako elementu pędnika strugowodnego, stwierdził, że nie są one właściwe do oceny sprawności rozpatrywanego małego napędu strugowodnego. Ze względu na brak informacji o prędkości referencyjnej pompy, obliczył sprawności dla wybranych średnic pomp, w zakresie 10-100 mm korzystając z uproszczonego wzoru, opracowanego przez firmę Byron Jackson i arbitralnie przyjął, że dla średnic w zakresie 30 mm - 60 mm sprawności będą niższe od teoretycznych i będą wynosiły od 60% do 67%.

W dalszej kolejności Pan mgr inż. Maciej Kaczmarczyk określił wpływ oddziaływania warstwy przyściennej na prędkość wody dopływającej do wlotu pędnika strugowodnego. Porównał grubość turbulentnej warstwy przyściennej obliczoną ze wzoru empirycznego 6.51 i uzyskaną z symulacji CFD, uzyskując podobne wyniki i przyjął na tej podstawie grubość warstwy przyściennej w miejscu wlotu pędnika strugowodnego 19 mm - 20 mm. Rozważając wpływ wału wirnika na sprawność podał trzy możliwe rozwiązania pozwalające zmniejszyć niekorzystny wpływ wału na sprawność pędnika.

W rozdziale 7 Doktorant przedstawił obliczenia sprawności pędnika strumieniowego z wykorzystaniem metody półempirycznej, przyjęte założenia upraszczające i algorytm wyznaczania głównych parametrów projektowych pędnika. Podał wzór na optymalną średnicę wirnika pompy i wykres zależności średnicy wirnika od jego prędkości obrotowej - dla rozwiązania z jednym pędnikiem i 4 pędnikami o takiej samej mocy sumarycznej. Wyprowadził wzór na średnicę dyszy wylotowej i podał wykres zależności tej średnicy od bezwymiarowego współczynnika prędkości przepływu, dla prędkości pojazdu równej 3 m/s.

Przeprowadził analizę parametryczną pędnika o naporze 14 N dla wybranych średnic wirnika pompy a następnie pędnika o naporze 14 N o średnicy wirnika 50 mm, dla wybranych prędkości wylotu wody z pędnika. Wyniki analizy podał w tabelach 7.1, 7.2 i przedstawił wynikające z niej wnioski. Dla założonej prędkości pojazdu przyjął optymalną średnicę wirnika równą 50 mm i uzasadnił względami projektowo-konstrukcyjnymi i technologicznymi zastosowanie pompy osiowej.

Rozdział 8, w którym Autor poszukuje możliwości poprawy sprawności napędu strugowodnego z wykorzystaniem metod CFD, obejmuje badania wpływu geometrii wybranych elementów pędnika na ogólną sprawność napędową. Poprzez porównanie z wcześniejszymi obliczeniami, na podstawie wzorów empirycznych, Autor ocenił przydatność symulacji numerycznej do badania przepływu w projektowanym pędniku i porównał pędniki dostępne komercyjnie z nowo zaprojektowanym urządzeniem WJ50.

Badania skoncentrowane zostały na projektowaniu geometrii kanału pędnika, począwszy od rozważań teoretycznych w rozdziale 6 i następnie symulacjach CFD. W ocenie wyników obliczeń Doktorant wykorzystał swoje doświadczenie w modelowaniu przepływów. Uzasadnił uproszczenia przyjęte w pierwszym przybliżeniu przy modelowaniu oporu dla jednego pędnika, bez uwzględnienia części wystających pojazdu i przyjął domenę obliczeniową dla wybranej dolnej ćwiartki pojazdu, co uznał za wystarczające do badania warstwy przyściennej przed wlotem pędnika.

Przedstawione zostały możliwe podejścia, stosowane przy modelowaniu pojazdów wyposażonych w pędniki strugowodne, w tym uproszczenia stosowane przy modelowaniu opisane w literaturze.

Ponownie opierając się na posiadanym doświadczeniu w modelowaniu przepływów Doktorant wybrał do dalszych badań model całościowy obejmujący jednocześnie kadłub „Głuptaka” i pędnik. Jako kluczowe problemy, związane z modelowaniem, wymienione zostały: korelacja pomiędzy strumieniem pędnika i opływem osłony sonaru oraz właściwy wybór modelu turbulencji. Do obliczeń wykorzystano sprzężone symulacje numeryczne. Autor określił wrażliwe obszary, w których może wystąpić oderwanie, tłumienie lub blokowanie przepływu wewnątrz pędnika.

Wstępna, pomyślna weryfikacja modelu CFD została przeprowadzona w oparciu o porównanie wyników symulacji numerycznych z wynikami pomiarów rzeczywistych oporu „Głuptaka” w czterech konfiguracjach napędu – śrubowego z osłoną i bez osłony pędników oraz strugowodnego złożonego z czterech pędników w układzie x, posiadających rotor o średnicy 39 mm i 50 mm. Uzyskano dobrą zgodność dla prędkości obiektu 3,0 m/s z dokładnością do 6% dla wszystkich konfiguracji.

W dalszej kolejności analizie numerycznej poddano rozkład prędkości w kanale, w zależności od kształtu otworu wlotowego do pędnika, przedstawiono rozkłady prędkości w przekrojach otworu wlotowego, gardzieli wlotowej kanału i w miejscu dopływu wody do pompy. Kolejny etap analizy wykazał negatywny wpływ wyprowadzenia wlotu kanału ponad powierzchnię poszycia.

Na podstawie obserwacji pola prędkości wewnątrz kanału i uzyskanego naporu, Doktorant wybrał do dalszych badań rzeczywistych jedną z przebadanych wersji, z których 15 zostało przedstawionych w pracy. Ostatnim krokiem w ocenie wpływu geometrii pędnika na jego sprawność była analiza kształtu otworu wylotowego. Analiza numeryczna została w tym przypadku wsparta analizą inżynierską.

Projekt pompy pędnika WJ50, zaprojektowanego dla „Głuptaka”, oparto na badaniach teoretycznych i eksperymentalnych. Założono podstawowe parametry i wykonano prototyp na drukarce 3D. Obliczenia CFD dotyczyły wybranego punktu pracy pompy dla prędkości obrotowej 4500 obr/min. Wyniki obliczeń przedstawione w rozprawie na rysunkach 8.24-8.27 obejmowały rozkład ciśnień na elementach pompy oraz rozkład ciśnień i prędkości w płaszczyźnie symetrii pompy. Napór obliczony na podstawie symulacji był prawie o 1/3 mniejszy od przewidywanego, dla którego zaprojektowano geometrię pompy.

W zintegrowanej analizie pojazdu i pędnika zastosowano cztery modele pojazdu: ćwiartki, połowy i całego pojazdu swobodnego oraz całego pojazdu zamocowanego na stanowisku testowym. Umożliwiło to zbadanie wpływu przyjętego modelu na dokładność obliczeń. Obliczenia w programie Ansys CFX wykonano wprowadzając domeny obliczeniowe: statyczną dla kadłuba pojazdu i części nieruchomych pędnika - kanału i statora oraz ruchomą dla wirnika.

Wyniki otrzymane dla założonych modeli były podobne. Różnice pomiędzy wynikami obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych wyniosły około 30%. Założenie, że im bardziej płynny przepływ w kanale pędnika tym większy powinien być napór ponownie nie zostało potwierdzone. Wpływ średnicy dyszy przy jednoczesnym jej skróceniu, na napór pędnika i sprawność napędową został zilustrowany poprzez rozkład ciśnień w kanale pędnika przy prędkościach pojazdu 1,5 m/s, prędkości obrotowej wirnika 3000 obr/min oraz przy prędkości 3 m/s i prędkości obrotowych 4200 obr/min, 5000 obr/min i 7000 obr/min. W pierwszym przypadku podano zależność naporu pędnika i sprawności napędowej od średnicy dyszy. W drugim, wartości ciśnień w wybranych przekrojach pędnika i napór. Ogólne wnioski, dotyczące możliwości udoskonalenia pędnika Autor sformułował w oparciu o rozkład prędkości i ciśnień względem osi wzdłużnej pędnika, interpolując wartości pomiędzy przekrojami obliczeniowymi.

W rozdziale 9 zostały omówione badania eksperymentalne, które obejmowały badania laboratoryjne w kanale obiegowym i badania na akwenie nieograniczonym - na jeziorze, z wykorzystaniem pomostu holowniczego. Wykorzystano w nich obiekt rzeczywisty, wyposażony w oryginalny napęd czterośrubowy z osłoną i bez osłony oraz napędy strugowodne: pojedynczy z pędnikiem G29 oraz pędnikami G39, G49 i WJ50 w układzie x. Doktorant rzetelnie przedstawił plan badań, stanowiska badawcze, urządzenia pomiarowe i wyniki badań, odwołując się do załączników.

W rozdziałach 10 i 11 podsumował przeprowadzone badania, przedstawił wnioski i zaproponował kierunki dalszych prac badawczych. Omówienie wyników badań eksperymentalnych i ogólne wnioski z przeprowadzonych obliczeń i badań zostały zawarte w rozdziale 10. Doktorant zaznaczył, że w praktyce, akceptowalny nowy napęd, niezależnie od jego sprawności, powinien dostarczyć wystarczającą siłę naporu, przy nieprzekroczeniu dopuszczalnego zużycia energii z akumulatorów pojazdu. Biorąc pod uwagę zakres sprawności, w którym powinna mieścić się sprawność napędu strugowodnego, w stosunku do napędu referencyjnego, można uznać, że postawiona teza została udowodniona.

We Wnioskach, w rozdziale 11, Doktorant odniósł się oddzielnie do metody empirycznej i numerycznej modelowania pędnika strugowodnego. Wnioski te, po części oczywiste, dotyczyły superpozycji sił generowanych na poszczególnych częściach pędnika strugowodnego, przy pominięciu interakcji a także uproszeń modelu przez nieuwzględnienie części wystających pojazdu. Metoda półempiryczna została uznana za przydatną do wstępnych obliczeń, jednak nieprzydatną do badania geometrii kanału pędnika. Rozbieżności między wynikami eksperymentalnymi a przewidywanymi na podstawie symulacji CFD zostały przypisane niskiej jakości wykonania napędu. Nie uwzględniono błędów modelowania i możliwości poprawy modelu numerycznego.

Jako kierunki dalszych badań w zakresie poprawy sprawności pędnika Autor uznał udoskonalenie pompy, mającej największy wpływ na jego sprawność. Dodatkowo zaplanował prace związane ze sterowaniem kierunkiem naporu pędnika strugowodnego.

W konkluzji Pan mgr inż. Maciej Kaczmarczyk stwierdził, że na podstawie eksperymentów opisanych w rozprawie, przy przyjętych ograniczeniach, napęd strugowodny może stanowić odpowiednik napędu śrubowego.

Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Pan mgr inż. Maciej Kaczmarczyk wykorzystał bibliografię zawierającą 150 pozycji, z których większość została wydana po 2010 roku. W spisie znajduje się tylko jedna współautorska publikacja Doktoranta z 2012 roku. Nie znalazł się tam artykuł opublikowany w Polish Maritime Research w 2021 roku. Cytowane w pracy pozycje oddają obecny stan wiedzy w zakresie tematyki poruszanej przez Doktoranta. Dotyczą one metod oceny właściwości przepływów w rurach, zaleceń publikowanych przez Międzynarodową Konferencję Basenów Modelowych ITTC, modelowania opływu z wykorzystaniem numerycznej mechaniki płynów i sprzężonej symulacji FSI.

Ocena metod badawczych

Do obliczeń numerycznych opływu CFD wykorzystano dwurównaniowy model turbulencji SST (Shear Stress Transport) dostępny w programie Ansys CFX, który wykorzystuje model k- ω w wewnętrznych częściach warstwy przyściennej i przełącza się na model k- ϵ w zewnętrznych obszarach warstwy i strumieniu swobodnym. Razem z funkcją mieszania, która płynnie łączy oba modele, tworzą dokładny model dla szerokiego zakresu przepływów.

Dane eksperymentalne do walidacji obliczeń numerycznych uzyskano na podstawie badań laboratoryjnych w kanale obiegowym i na akwieńie otwartym. W obu przypadkach szczegółowo przedstawiono zakres badań, stanowiska badawcze i urządzenia pomiarowe.

Projektowany pędnik WJ50, dedykowany dla „Głuptaka” został wykonany metodą szybkiego prototypowania na drukarce 3D.

Ocena praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Praca w założeniu posiada wartość użytkową. Wnioski z przeprowadzonych badań mogą być przydatne przy opracowaniu procedur badawczych. Rzetelne podejście do badań i ich analiza pozwalają ocenić zalety i wady zaproponowanego podejścia, przydatne przy kontynuacji prac badawczych. Praktyczny cel badań wynikał ze względów eksploatacyjnych - konieczności zabezpieczenia kabla sterującego pojazdem przed wkręceniem się w śruby napędowe, bez wykorzystania osłony, znacznie zwiększającej opór pojazdu. Cel ten został osiągnięty.

Informacja o ewentualnych nieprawidłowościach występujących w pracy

Uwagi ogólne

Tytuł pracy przetłumaczony na język polski różni się od tytułu w języku angielskim. „Efektywność wodnych pędników odrzutowych w napędach pojazdów głębinowych” sugeruje badania wodnych pędników odrzutowych w pojazdach, eksploatowanych na dużych głębokościach (ang. deep-sea), podczas gdy w tytule angielskim występuje określenie „underwater”.

Cel pracy i teza zostały wyodrębnione jako dwa rozdziały na początku pracy, które zawierają odpowiednio jedno zdanie i dwa zdania. Powinny być umieszczone po zdefiniowaniu problemu badawczego np. we „Wstępie” lub bardziej obszernym rozdziale „Cel i zakres pracy”. Podobnie podrozdziały 6.4.8 i 6.4.9 powinny zostać połączone, ponieważ w podrozdziale 6.4.9 znalazło się tylko równanie 6.33.

Symbole i skróty zdefiniowane zostały w spisie na początku pracy. Brak objaśnień oznaczeń stosowanych we wzorach lub w tekście przy ich pierwszym pojawieniu się znacząco utrudnia czytanie pracy, ponieważ oznaczenia we wzorach nie zawsze pokrywają się z przedstawionymi w spisie i na rysunku ilustrującym wzór.

Autor konsekwentnie umieszcza jednostki występujące po liczbach w nawiasach kwadratowych.

W wielu miejscach brakuje odstępów pomiędzy liczbą i jednostką miary.

Brakuje przywołania w tekście rysunków i tabel przed ich pierwszym wystąpieniem np. rys. 3.11, rysunki 9.1 – 9-5, pojawiają się bezpośrednio pod tytułem rozdziału.

Doktorant opiera wnioski na obserwacji symulacji CFD, nie uzasadnia bardzo obszernego programu badań numerycznych, przedstawia systematyczne obliczenia, uwzględniając także urządzenia, których nie zakładano (pędniki typu RIM).

Eksperyment został właściwie wykorzystany do walidacji metod półempirycznych i symulacji numerycznej, nie wykorzystano jednak możliwości poprawy modelowania numerycznego, przy równolegle prowadzonych badaniach rzeczywistych. W pracy zamieszczono tylko domeny przyjęte w obliczeniach numerycznych, nie zostały przedstawione siatki obliczeniowe. Prezentując obliczenia i wyniki badań w większości nie podawał ich interpretacji. Zabrakło objaśnień rysunków i wzorów, które powinny umożliwić ich szybką ocenę.

Czy Doktorant widzi możliwość poprawy dokładności symulacji numerycznych w oparciu o badania eksperymentalne. Które z przeprowadzonych pomiarów mogą być szczególnie przydatne.

W bibliografii nie został przyjęty jednorodny opis bibliograficzny publikacji. Zamiast nazwisk współautorów pojawiają się ich inicjały lub niepoprawnie zapisany skrót „i inni”. np. „W. d. h. i. p. n. P. Próchnicki „...”. Strony internetowe nie zostały oddzielone od publikacji naukowych.

W pracy często występują pozycje cytowanej literatury umieszczone po kropce kończącej zdanie (np. str. 41, 69, 135) lub przed zdaniem. Na str. 45 zacytowano pozycje literatury po tytule podrozdziału.

Uwagi Szczegółowe

Nie zdefiniowano oznaczeń w tabeli cytowanej jako rysunek 3.13.

Na str. 29 brakuje przywołania tabeli 4.1. W nagłówku Tabeli 4.1 zamiast „speed” powinno być „rotational speed” lub zgodnie z przyjętym w pracy oznaczeniem „propeller revolutions”.

Brakuje opisu osi rzędnych na rysunku 4.1.

Na rysunku 4.3 współczynnik momentu na osi rzędnych należało opisać „10 K_Q” zamiast „K_Q”. W podpisie pod rysunkiem należało podać źródło: Rowiński L., Kaczmarczyk M. Evaluation of effectiveness of waterjet propulsor for a small underwater vehicle. Polish Maritime Research 4 (112) 2021 Vol. 28; pp. 30-41, z którego ten rysunek pochodzi. Wymienionego cytowania brakuje także przy podpisie pod rysunkiem 4.4. Brakuje adnotacji „opracowano na podstawie” w podpisie pod rysunkami 4.5, 5.1, 6.1 i 6.2. Brak cytowania wymienionej publikacji dotyczy także wyprowadzenia wzoru 5.14.

Artykuł, z którego pochodzą wyżej wymienione rysunki, stanowi znaczący dorobek publikacyjny Doktoranta i powinien być zamieszczony w bibliografii.

We wzorze 5.5 jednostki umieszczono przed indeksem siły naporu, powinno być: F_{umax} [N].

Na rysunku 5.1 brakuje opisu osi po prawej stronie wykresu, oznaczenie z lewej strony jest niespójne z podpisem pod rysunkiem i nie występuje w spisie oznaczeń.

Na rysunku 5.2 brakuje opisu osi rzędnych. Cytowanie rysunków 5.1, 6.3, 6.4, 6.5, 8.1 umieszczono poza opisem rysunku.

W rozdziale 6 podając wzór empiryczny na współczynnik liniowej straty hydraulicznej dla przepływu turbulentnego, wynikający z analizy wymiarowej, należało zaznaczyć, że jest on słuszny dla $Re < 8 \cdot 10^4$.

Brak jest cytowania tabeli 6.3.

Na str. 45, linia 6 od dołu: zamiast „l” powinno być „λ”. Na str. 47, linia 17: zamiast „indicates” powinno być „indicate”, na str. 48, linia 2 od dołu: powinno być „depend” zamiast „depends”. We wzorze 6.29 zamiast „δ” powinno być „δ₁”. Na str. 56, linia 3: zamiast „ration” powinno być „ratio”. Brak cytowania wzoru 6.46. We wzorze 6.49 zamiast „F” powinno być „F_u”. Wzór 6.11 jest powtórzeniem wzoru 6.5. Rysunek 6.19 jest nieczytelny w wersji drukowanej pracy.

Brak jest cytowania wzoru 6.26 na wysokość strat miejscowych. Widać jednak, że wzór ten jest niepoprawnie zapisany w części opisującej straty na przeszkodzie, ponieważ występujący we wzorze parametr „r” powinien oznaczać promień łuku, podczas gdy na rysunku 6.7 ilustrującym wzór i zgodnie z oznaczeniami przyjętymi w spisie promień łuku to „R” a „r”, zgodnie z oznaczeniami jest promieniem rury, „d” średnicą rury, δ - zgodnie z oznaczeniami jest grubością warstwy przyściennej, podczas gdy we wzorze 6.26 powinien występować kąt nachylenia rury do poziomu „δ₃”.

Wyjaśnienia pod tabelami 7.1-7.3 „Niektóre indeksy użyte w powyższych tabelach mogą nie odnosić się bezpośrednio do indeksów wymienionych na początku niniejszej pracy. Różnią się również jednostki. Wynika to z dużej liczby parametrów użytych w obliczeniach. Wszystkie zostały jednak krótko opisane, aby ułatwić ich identyfikację.” nie jest uzasadnione, ponieważ w pracy kwalifikacyjnej oznaczenia powinny być ujednolicone.

Nagłówki tabel 8.7 i 8.8 „obliczenia CFD dla prędkości równej ...” powinny zawierać słowo „napór [N]”, którego te tabele dotyczą.

Na rys. 8.12 nie widać różnicy pomiędzy wersją H i F16.

Na str. 37, 66, 128, 129 w liście punktowanej brakuje znaków przestankowych.

W rozdziale 8.5 rozważany jest wpływ średnicy dyszy wylotowej na napór pędnika i sprawność napędu, przy jednoczesnym skróceniu. Analiza parametryczna, która w tym wypadku uwzględniała tylko wpływ średnicy dyszy nie była właściwa, co potwierdziły dalsze badania.

Zauważone w pracy pojedyncze błędy językowe i edytorskie: str. 5, linia 32: zamiast „deformacją” powinno być „deformacjom”; str. 11, linia 8: zamiast „the” powinno być „they”; linia 10: zamiast „finds” powinno być find”; str. 20, 7 linia od dołu: zamiast „wit” powinno być „with”; na str. 54 i 55 zastosowano niewłaściwą interpunkcję przy opisie wzorów (2.77) i (2.78); str. 98, 3 linia: zamiast „vales” powinno być „values”; str. 119, linia 13: zamiast „indicates” powinno być „indicate”; str. 131, 4 linia od dołu: zamiast „behaviour” powinno być „behaviour of”.

Ocena czy w pracy przedstawiono oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Z naukowo-badawczego punktu widzenia, postawiony w rozprawie problem badawczy został rozwiązany w oparciu o istniejące narzędzia obliczeniowe. Innowacyjny charakter rozprawy polega na właściwym doborze narzędzi do oceny właściwości oporowo-napędowych małego obiektu podwodnego i dedykowanych dla nich pędników. Przedstawione obszernie wyniki obliczeń, eksperymentów i ich analiza pozwalają pozytywnie ocenić efekt przeprowadzonych prac badawczych.

Indywidualny wkład Doktoranta obejmował optymalizację geometrii kanału pędnika strugowodnego dla zadanych parametrów eksploatacyjnych małego pojazdu podwodnego. Wymagało to szerokiej analizy fizyki zjawisk, metod empirycznych, metod modelowania numerycznego i metod eksperymentalnych, właściwych dla podjętego problemu badawczego.

Autor wykazał rzetelne podejście, dociekliwość i sztukę wyszukiwania interesujących, z punktu widzenia poznania naukowego, problemów. Po przedstawieniu opisanych w literaturze rozwiązań, ze względu na znacznie mniejsze rozmiary projektowanego urządzenia, nie odniósł się do nich jako obiektów podobnych. Zaplanował systematyczne badania, Zastosował właściwe podejście przyjmowane przy projektowaniu, zaczynając od obliczeń z wykorzystaniem wzorów empirycznych, poprzez obliczenia numeryczne i badania eksperymentalne na obiekcie rzeczywistym.

Postawione zadanie było trudne ze względu na występowanie zjawisk oderwania i blokowania przepływu oraz małe wartości mierzonych parametrów, wymagające dużej dokładności pomiarów. Doktorant właściwie zidentyfikował ograniczenia zarówno modelowania CFD jak i badań eksperymentalnych. Sprawdził możliwość stosowania uproszczeń skomplikowanego zagadnienia modelowania numerycznego właściwości oporowo-napędowych małego pojazdu podwodnego i pędnika strugowodnego, dedykowanego dla tego pojazdu. We wstępnych badaniach numerycznych uwzględnił możliwe konfiguracje geometrii pędnika, w celu zilustrowania i udowodnienia rezultatu, przewidywanego na podstawie intuicji, popartej doświadczeniem badawczym.

Ocena wyników badań oparta była w większości na analizie inżynierskiej, np. wizualnej ocenie płynności przepływu w kanale pędnika, połączonej z porównaniem wielkości fizycznych, związanych z przepływem. Symulacje numeryczne opływu poszczególnych elementów pędnika wykazały, że nie może być wprost stosowana zasada superpozycji naporu, ani ocena wizualna opływu, co powinno być uznane za oczywiste, jednak zbadany został zakres błędu związanego z częściowym modelowaniem.

Do modelowania numerycznego właściwości oporowo-napędowych Doktorant prawidłowo wybrał rzeczywisty pojazd wraz z napędem i narzędzie obliczeniowe w postaci programu Ansys CFX, umożliwiające zastosowanie dwurównaniowego modelu turbulencji.

Pan mgr inż. Maciej Kaczmarczyk zebrał bardzo obszerny materiał do dalszych analiz porównawczych, umożliwiając udoskonalenie istniejących metod modelowania numerycznego. Sprawdzone zostały możliwości projektowania pędnika w oparciu o analizę wizualizacji opływu i obliczenia naporu dla poszczególnych części urządzenia, dzięki czemu możliwe było potwierdzenie niestosowności metody superpozycji w przypadku małych urządzeń, na których pracę duży wpływ miały występujące zjawiska oderwania i blokowania przepływu, zidentyfikowane przez Doktoranta.

Wykorzystanie dwurównaniowego modelu turbulencji w obliczeniach numerycznych CFD, w połączeniu z pomiarami na rzeczywistym obiekcie i sprawdzeniem stosowności istniejących metod empirycznych, przy braku danych dotyczących porównywalnych rozwiązań, dostępnych w literaturze, można uznać za oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Obszerna analiza wyników i wnioski z badań zawarte zostały w dwóch końcowych rozdziałach rozprawy.

Rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Doktorant przedstawił obszerny stan badań w zakresie postawionego problemu badawczego. Złożoność problemu i brak istniejących rozwiązań spowodował konieczność poszukiwania metod obliczeniowych i odniesienia się, przy weryfikacji wyników obliczeń, do zbliżonych rozwiązań. Zakres stosowanych modeli i metod obliczeniowych, właściwie przyjęte założenia upraszczające i prawidłowe wykorzystanie narzędzi obliczeniowych, z uwzględnieniem ich ograniczeń, świadczą o ogólnej wiedzy teoretycznej Doktoranta z zakresu inżynierii mechanicznej i umiejętności samodzielnego prowadzenia badań. Autor przedstawił wnioski dotyczące przydatności wybranych metod półempirycznych oraz algorytmów numerycznych do szczegółowej analizy napędu.

Poszukiwanie możliwości ochrony przed zniszczeniem kabla sterującego „Głuptaka” przez pędniki śrubowe, bez pogorszenia jego właściwości oporowo-napędowych, postawione jako cel użytkowy pracy, zakończyło się sukcesem, można więc uznać, że cel pracy został osiągnięty. Teza pracy została udowodniona.

Ocena końcowa rozprawy doktorskiej. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Pan mgr inż. Maciej Kaczmarczyk przedstawił prawidłowe rozwiązanie poprawnie sformułowanego problemu badawczego, mieszczącego się w dziedzinie nauk inżynierijno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Uważam, że uzyskane wyniki badań, przedstawione w rozprawie, wnoszą wkład w rozwój dyscypliny, poszerzają zrozumienie zjawisk związanych z napędami strugowodnymi małych pojazdów podwodnych, metod ich projektowania i przewidywania właściwości oporowo-napędowych, mają też wartość użytkową. Tym samym można uznać, że opiniowana praca odpowiada oczekiwaniom stawianym rozprawom doktorskim oraz spełnia warunki określone w przepisach obowiązującej Ustawy. Wniosuję o dopuszczenie rozprawy mgr. inż. Macieja Kaczmarczyka do jej publicznej obrony.

Tomasz Abramowicz
30.10.2025