



Szczecin, dnia 27.04.2020r.

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Szelangiewicz

Wydział Nawigacyjny

Akademia Morska w Szczecinie

Ul. Wały Chrobrego 1-2

70-500 Szczecin

R e c e n z j a

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława Króla

pt. „Nowa metoda projektowania układów pędnikowych

o optymalnym rozkładzie cyrkulacji związanej”

wykonanej pod kierunkiem promotora dr. hab. inż. Krzysztofa Tescha

Podstawa prawna: zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej (pismo l.dz. 027/WM/2020 wpłynęło do AMS 20.01.2020).

1. Przedmiot, cel i zakres rozprawy

Ochrona środowiska jest aktualnie jednym z najważniejszych kryteriów stosowanych podczas projektowania i budowy środków transportowych. Również w transporcie morskim stosowane są różne kryteria dotyczące np. emisji CO₂, tlenków azotu (NO_x) lub tlenków siarki (SO_x), które dotyczą różnych typów statków transportowych.

W projektowaniu i budowie statków transportowych stosowany jest, opracowany przez Międzynarodową Organizację Morską (IMO) Projektowy Wskaźnik Efektywności Energetycznej (EEDI), obowiązujący od 1 stycznia 2013 r. Wskaźnik ten określa dla danego typu statku i jego nośności, dopuszczalną emisję CO₂. Każdy nowoprojektowany statek musi spełniać określoną normę emisji CO₂, aby mógł być dopuszczalny do eksploatacji po jego zbudowaniu (odpowiedni certyfikat wydaje Administracja Morska państwa, pod którego banderą pływa statek). Co kilka lat norma emisji CO₂ jest obniżana. Projektanci statków muszą poszukiwać takich rozwiązań, aby projektowany i budowany statek spełniał odpowiednie kryterium emisji CO₂.

Jedną z możliwości spełnienia normy emisji CO₂, wynikającej ze wskaźnika EEDI jest takie projektowanie statku, aby przy zadanej nośności i prędkości eksploatacyjnej, moc napędu statku była możliwie niska. Moc napędu, w tym przypadku silnika (ów) napędu głównego, zależy głównie od oporu kadłuba statku (dla prędkości eksploatacyjnej) oraz od sprawności napędowej, czyli od sprawności śruby napędowej lub układu napędowego, od współczynników: ssania, wpływu kadłuba i rotacyjnego. Prowadzenie badań mających na celu obniżenie mocy napędu poprzez zwiększenie ogólnej sprawności napędowej statku, w tym zwiększenie sprawności śruby okrętowej lub układu pędnikowego jest jak najbardziej wskazana, tym bardziej, że co kilka lat zmniejszana jest wartość wskaźnika EEDI dla nowych statków.

Mgr inż. Przemysław Król, przynajmniej tak wynika z rozdz. 1.1 ma świadomość, że prowadzenie badań w celu zwiększenia sprawności napędu statku ma także „aspekt ekologiczny”, str. 13. Aby uzyskać wzrost sprawności napędu statku, Doktorant proponuje zastosować odpowiednio zaprojektowany układ pędnikowy. Sam układ pędnikowy w postaci okrętowa śruba napędowa i łopatki kierownicze nie jest nowym pomysłem, ale opracowanie metodyki projektowania takich układów, która byłaby łatwa do wykorzystania w ich projektowaniu jest bardzo interesujące i przydatne. Doktorant definiuje następujący cel rozprawy doktorskiej: **„opracowanie metodyki projektowania układów pędnikowych, złożonych z wirnika reakcyjnego o optymalnym rozkładzie cyrkulacji związanej i łopatek kierowniczych, zdolnej do wdrożenia do praktyki przemysłowej”**, str. 21.

Wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Króla jest więc jak najbardziej uzasadniony, a prowadzone badania naukowe dotyczące poszukiwania układów pędnikowych (śruba napędowa + kierownica przepływu) o wyższej sprawności niż dotychczasowe rozwiązania wpisują się w aktualne potrzeby przemysłu okrętowego.

Podjęta przez Doktoranta problematyka badawcza jest interesująca pod względem poznawczym, a to oznacza, że jest dysertabilna i mieści się w zakresie dyscypliny Inżynieria mechaniczna.

2. Teza naukowa i oryginalność rozprawy doktorskiej

Doktorant stawia też ambitną tezę, że **„możliwe jest stworzenie kryterium analitycznego, pozwalającego na dobór optymalnego (z punktu widzenia sprawności**

napędowej) rozkładu cyrkulacji związanej dla pędnika w postaci wirnika reakcyjnego, współpracującego z łopatkami kierowniczymi oraz wykorzystanie tego kryterium do wykonania zadania projektowego, w oparciu o wirowy model układu pędnikowego” (rozdz. 1.3, str. 21).

Ostatnia część tezy dobrze koresponduje z ostatnią częścią celu, tzn. opracowana metodyka ma umożliwiać wykonanie zadania projektowego.

W badaniach nad sprawnością układu pędnikowego, Doktorant chce uwzględnić ster płetwowy umieszczony za okrętową śrubą napędową. Od dawna jest znany fakt, że ster płetwowy o odpowiednim profilu i umieszczony w odpowiedniej odległości od śruby napędowej korzystnie wpływa na jej sprawność (ster płetwowy zmienia pole ciśnień i przebieg linii prądu za śrubą, co może mieć korzystny wpływ na sprawność samej śruby napędowej).

W literaturze dotyczącej projektowania śrub napędowych znane są algorytmy wykorzystujące modele wirowe do projektowania śrub słabo lub średnio obciążonych. W tych algorytmach, w warunku minimalizującym straty energetyczne, główną rolę odgrywa kąt posuwu indukowanego.

Teza postawiona przez Doktoranta zawiera postulat opracowania kryterium analitycznego umożliwiającego projektowanie optymalnego układu pędnikowego (śruba napędowa + kierownica przepływu). Mogę więc stwierdzić, że opracowanie takiego kryterium, które będzie przydatne do projektowania optymalnych, dla danych statków, układów pędnikowych jest oryginalnym rozwiązaniem.

Do rozwiązania powyższego problemu (opracowanie metodyki i analitycznego kryterium), Doktorant proponuje wirowy model, a dokładnie model powierzchni nośnej. Zakres badań (zadania cząstkowe) do realizacji celu badań zamieszczony jest na str. 22, rozdz. 1.3.

Ponadto teza pracy sugeruje, że opracowane kryteria będą na tyle ogólne, że będzie można projektować optymalne układy pędnikowe dla różnych statków. Realizacja pracy stanowić więc będzie oryginalny układ w rozwój metod projektowania śrub okrętowych lub układów pędnikowych.

3. Metodyka badań

Przedstawiony problem, czyli opracowanie analitycznego kryterium doboru optymalnego pędnika i łopatek kierowniczych, Doktorant planuje rozwiązać wykorzystując model wirowy, w którym cyrkulacja wokół płata jest zmienna w 2-ch kierunkach. W metodzie tej płat o skończonym wydłużeniu, w tym przypadku skrzydło śruby napędowej lub łopatka kierownicza, jest zastąpiony powierzchnią nośną, tj. powierzchnią wirów związanych.

Współdziałanie śruby napędowej i kierownicy, która ma modyfikować strumień nadążający spływający z kadłuba statku i poprzez kierownicę przepływu dopływający do śruby, jest złożonym problemem hydrodynamicznym. Należy mieć także na uwadze, że śruba napędowa też zmienia ten strumień, powodując jednocześnie wzrost oporu kadłuba statku. Badanie tych zjawisk może być prowadzone na drodze eksperymentalnej (badania modelowe w basenie np. holowniczym), obliczeń za pomocą numerycznej mechaniki płynów (CFD) lub stosując inne metody numeryczne np. wykorzystujące teorię wirową. Należy zauważyć, że w teorii wirowej, dla elementarnego wycinka skrzydła śruby napędowej, można w sposób przybliżony opracować analityczne kryterium dla projektowania śruby optymalnej, ale obliczenie siły naporu lub momentu dla całej śruby, szczególnie gdy pracuje w niejednorodnym polu prędkości, przeprowadza się numerycznie. Ponieważ celem Doktoranta jest opracowanie analitycznego kryterium do projektowania śruby napędowej lub układu napędowego o optymalnym rozkładzie cyrkulacji związanej, a następnie wykonanie projektu śruby napędowej i kierownicy przepływu, wybór metody bazującej na modelu wirowym, a dokładniej najbardziej przydatnym do tego celu modelu powierzchni nośnej, jest wyborem prawidłowym.

Do weryfikacji otrzymanych wyników obliczeń naporu i momentu śruby okrętowej lub układu pędnikowego, Doktorant wykorzystał wyniki eksperymentalnych badań modelowych. Przedstawił także wyniki obliczeń naporu i momentu śruby okrętowej wykonane metodą CFD, oraz na podstawie analizy czasu obliczeniowego, uzasadnił celowość wyboru metody powierzchni nośnej (str. 38).

4. Ocena treści rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z czterech głównych rozdziałów, rozdział piąty (10 stron) zawiera podsumowanie i wnioski, a rozdział szósty (1 strona) plan dalszych badań oraz

spis najważniejszych oznaczeń, literaturę (103 pozycje), dwa załączniki – łącznie cała praca liczy 128 stron.

Rozprawa rozpoczyna się spisem: treści, tabel i ilustracji oraz streszczeniem.

Rozdział 1. (11 stron) zawiera wprowadzenie, a w nim uzasadnienie tematyki prowadzonych badań, obecny stan wiedzy, cel, teza i zakres pracy. Uzasadnienie jest oczywiste i dobrze przedstawione, a aktualny stan wiedzy jest bardzo wyczerpujący i zawiera dogłębną analizę literatury dotyczącej tematu badań. Z rozdziału tego wynika jaki problem i w jaki sposób ma być rozwiązany przez Doktoranta.

Natomiast rozdział 1.3 (cel, teza i zakres pracy) jest moim zdaniem zbyt skromny. Brakuje mi w tym miejscu konkretnych definicji dotyczących układów pędnikowych – na str.17 jest stwierdzenie, że „do układu pędnikowego rozważnego w niniejszej pracy najbardziej zbliżone są układy tandem śrub przeciwbieżnych” – w układach przeciwbieżnych obie śruby się obracają, natomiast z dalszej części pracy wynika, że kierownica przepływu jest nieruchoma. Wskazane byłoby też pokazanie graficzne już na początku pracy, jak za kadłubem statku wygląda układ pędnikowy łącznie ze sterem płetwowym. Brakuje też założeń lub ewentualnie przyjętych uproszczeń oraz kolejności realizowanych badań (pewne wyjaśnienia są w streszczeniu). Dobrze byłoby też opisać lub przedstawić graficznie wpływ kierownicy przepływu na pracę śruby okrętowej np. za pomocą linii prądu, jakie będą zastosowane pędniki i układy pędnikowe, i jakie zostaną wykonane badania modelowe.

Rozdział 2. Zawiera dość dokładnie przedstawione podstawy teoretyczne dotyczące badanego problemu. W tym rozdziale też dobrze byłoby pewne założenia teoretyczne przedstawić graficznie. W rozdz. 2.3 przedstawiono model powierzchni nośnej dla śruby odosobnionej wraz ze szkicowym algorytmem do obliczeń naporu i momentu na śrubie. Wyniki obliczeń naporu i momentu śruby CP745 i błędu względnego zamieszczono w tabelach 3 i 4 oraz na rys. 2 i 3. Tabele mają pokazać dokładność obliczeń naporu i momentu na śrubie wykonanych metodą CFD oraz metodą powierzchni nośnej. W tabelach 3 i 4 są wyniki oznaczone tymi samymi indeksami LS i raz są to obliczenia z uwzględnieniem piasty a raz bez piasty. Brak wyjaśnienia jakiego przypadku dotyczy indeks LSO. Ponieważ śruba napędowa (odosobniona lub za kadłubem statku) ma piastę, istotne są obliczenia naporu i momentu śruby z piastą, bo tak będzie na statku. W tabelach 3 i 4 brak jest sprawności śruby. Jeżeli opracowana metoda ma dotyczyć optymalnego rozkładu cyrkulacji to otrzymana sprawność śruby odosobnionej η_0 będzie kryterium czy nowa zaprojektowana śruba lub układ pędnikowy będzie

lepszy (pod względem sprawności) od innych rozwiązań. Przedstawione błędy względne dotyczące naporu i momentu nie decydują czy dane rozwiązanie jest lepsze. Na str. 38 znajduje się zdanie: „Metoda powierzchni nośnej wykazuje najlepszą zgodność z doświadczeniem w pobliżu punktu projektowego pędnika ($J = 0,352$)” – nie jest to zgodne z prawdą, ponieważ punkt projektowy dla tego typu pędnika jest dla innej wartości J .

Rozdział 2.4 zawiera model powierzchni nośnej dla śruby z kierownicą przepływu. Tutaj też brakuje graficznego przedstawienia układu pędnikowego oraz przykładu linii prądu dla wody spływającej z kadłuba statku, przechodzącej przez kierownicę i dopływającej do pędnika. Dobrze byłoby pokazać wektory prędkości (składowe wektora wypadkowego) i ich zmiany w poszczególnych etapach przepływu. Pokazany został szkicowy algorytm obliczeń siły naporu i momentu dla układu pędnikowego oraz wyniki pomiarów i obliczeń dla układu CP753 + ST002 – tabela 5 i 6 (pomiarów przeprowadzono z wykorzystaniem modelu statku podczas prób napędowych). Za tabelami 5 i 6 jest rysunek 5 zawierający przebieg zależności $T=f(T_{\text{dos}})$ i $Q=f(Q_{\text{dos}})$ – należało podać dla jakich parametrów wynikających z eksperymentu są te zależności. Dla rysunków 5 i 6 należałoby określić eksploatacyjny zakres pracy układu pędnikowego dla danego modelu (statku) – ten zakres jest najistotniejszy z punktu widzenia projektowania układu pędnikowego i wpływu tego układu na ogólną sprawność napędową statku.

Kolejny podrozdział 2.5 dotyczący wpływu/współpracy kadłuba modelu/statku i płetwy sterowej na sprawność pędnika lub układu pędnikowego. W tym celu określa się, na podstawie pomiaru w basenie modelowym, rozkład strumienia nadążającego w kręgu śrubowym (strumień nominalny – tj. bez śruby napędowej). Doktorant pomiary nominalnego strumienia nadążającego, w skali modelowej, wykorzystuje do obliczenia uśrednionych wartości tego współczynnika, a następnie do określenia tzw. efektywnego współczynnika strumienia nadążającego. Współczynnik ten, w dalszej części pracy posłuży do projektowania pędnika okrętowego lub układu pędnikowego (brak jest informacji czy do uśrednionej wartości współczynnika strumienia nadążającego brana jest tylko składowa osiowa).

Jak wynika ze stwierdzeń zawartych na str. 50, Doktorant rezygnuje z analizowania wpływu płetwy sterowej na sprawność pędnika lub układu pędnikowego. Rozdział 2.6 przedstawia skrótowy algorytm zastosowania modelu powierzchni nośnej do projektowania płata nośnego.

Rozdział 3. przedstawia proponowaną metodę projektowania, w której zawiera się: „kryterium rozkładu indukowanego kąta posuwu na skrzydle śruby optymalnej, model wirowy doskonałej kierownicy przepływu i poziom odniesienia do oceny dobroci kierownicy rzeczywistej oraz algorytm służący do zaprojektowania śruby optymalnej dla danej kierownicy”, str. 54.

Indukowany kąt posuwu dla śruby odosobnionej bez kierownicy pokazano na rys. 10, a dla śruby z kierownicą na rys. 11. Na podstawie zależności wynikających z tych rysunków oraz zależności na siłę naporu oraz momentu na śrubie, Doktorant wyprowadził zależności na kryterium optymalnej wartości indukowanego kąta posuwu dla śruby bez kierownicy, wzór (3.26) oraz dla układu pędnikowego (śruba + kierownica przepływu), wzór (3.31). Aby sprawdzić, czy dana kierownica przepływu ma korzystny wpływ na śrubę, tzn. czy spowoduje wzrost jej sprawności, należy opracować model doskonałej kierownicy przepływu. Taki wirowy model przedstawiony został w rozdz. 3.2. Natomiast w rozdz. 3.3 Doktorant przedstawił zależności, bazujące na odwrotnym współczynniku doskonałości oporu indukowanego dla kierownicy przepływu doskonałej i rzeczywistej. Rozdział 3.4 przedstawia proponowany algorytm do projektowania śruby okrętowej o optymalnym rozkładzie cyrkulacji związanej współpracującej z daną kierownicą przepływu. Jednak jest to algorytm szkicowy (opisowy) nie zawierający założeń, danych wejściowych, poszczególnych kroków obliczeniowych z podaniem odpowiednich zależności, kryteriów i warunków obliczeniowych.

W rozdziale tym, w nazwie którego jest „proponowana metoda projektowania” nie ma metody projektowania, a jest tylko szkic postępowania. Nie ma żadnych zależności lub wskazówek w jaki sposób zaprojektować, dla danego statku kierownicę przepływu. Ile powinno być skrzydeł kierownicy lub ich rozstawienie (pozycje kątowe), aby uzyskać najlepszy efekt, czyli wzrost sprawności śruby lub sprawności napędowej statku.

Rozdział 4. zawiera opis wykonanych badań dla 3-ch układów pędnikowych: CP745 + ST001 i CP753 + ST002 układy przebadane w skali modelowej i numerycznej oraz układ CPC + ST002 przebadany numerycznie. Doktorant przedstawił założenia projektowe i geometrię śrub napędowych w skali modelowej oraz kierownic przepływu dla tych śrub. Następnie opisał przebieg modelowych badań napędowych statku Nawigator XXI z układami pędnikowymi: CP745 + ST001 i CP753 + ST002. Zmierzone zostały, podczas badań modelowych, następujące wielkości: opór kadłuba modelu, nominalny strumień nadążający,

charakterystyki hydrodynamiczne śrub odosobnionych. Następnie wykonano próby napędowe modelu statku z układami pędnikowymi.

Podczas badań eksperymentalnych mierzono napór T_M i moment Q_M zarówno dla śruby bez kierownicy i z kierownicą przepływu – wyniki tych pomiarów są zamieszczone w tabelach 17, 18, 19 i 20, ale nie przedstawiono sprawności napędowej statku z tymi śrubami lub układami pędnikowymi. W tabeli 23 pokazano wyniki obliczeń naporu i momentu na śrubie, wykonanych przez Doktoranta, ale z tej tabeli też nie można wyciągnąć wniosku, które rozwiązanie jest najlepsze pod względem sprawności.

Otrzymane wyniki z pomiarów eksperymentalnych zostały przeliczone na rzeczywisty statek. W tabeli 25 zawierającej wyniki dla statku rzeczywistego, po raz pierwszy pojawia się sprawność η_{OS} – śruby odosobnionej dla statku oraz współczynnik ssania t , współczynnik strumienia nadążającego w_T , współczynnik rotacyjny η_R . W tej tabeli jest też moc P_{DS} dostarczona do śruby lub układu pędnikowego w przeliczeniu na statek rzeczywisty (wyniki obliczeń P_{DS} otrzymanych z badań eksperymentalnych i obliczeń metodą powierzchni nośnej świadczą, że cel pracy został osiągnięty).

Rozdział 5. Zawiera podsumowanie wyników obliczeń wykonanych przez Doktoranta oraz wnioski. Z punktu widzenia celu i tezy rozprawy doktorskiej, najistotniejsze są wyniki obliczeń mocy P_D doprowadzonej do 3-ch badanych układów pędnikowych (tabela 27). Z tej tabeli wynika, że cel pracy został osiągnięty, ponieważ najmniejsza moc dostarczona jest dla układu pędnikowego CPC + ST002 zaprojektowanego przez Doktoranta. Interesujące są także uwagi Doktoranta, dotyczące kierownicy przepływu, ale głównie jej oporu i sposobu jego określenia i udziału w układzie napędowym – układ pędnikowy + kadłub statku.

Plan dalszych badań (rozdz. 6) uwzględnia zagadnienia, które w recenzowanej pracy zostały pominięte, uproszczone lub też wynika z analizy otrzymanych wyników (duże rozbieżności) co sugeruje konieczność dokładniejszego rozpoznania problemu.

5. Uwagi krytyczne lub wymagające wyjaśnienia

Śruba optymalna (lub inaczej o najniższych stratach energetycznych) jest taka, dla której uzyskany napór T dla prędkości V_A i prędkości obrotowej n , moment doprowadzony do śruby Q ma wartość minimalną, czyli sprawność η_0 osiąga wartość maksymalną. W celu osiągnięcia maksymalnej sprawności poszukuje się takiego promieniowego rozkładu cyrkulacji

związanej, który w tym przypadku będzie rozkładem optymalnym. W przypadku układu pędnikowego (śruba napędowa + kierownica przepływu), oprócz maksymalizacji sprawności śruby, w niektórych przypadkach może być to maksymalizacja sprawności napędowej.

Mgr inż. Przemysław Król, w celu i tezie swojej pracy doktorskiej, postuluje poszukiwanie optymalnego rozkładu cyrkulacji związanej z punktu widzenia sprawności napędowej, str. 21. Można więc wywnioskować, że efektem zastosowania w projektowaniu śrub lub układów pędnikowych, kryteriów optymalnego rozkładu cyrkulacji związanej, będzie śruba lub układ pędnikowy o maksymalnej sprawności śruby lub sprawności napędowej modelu lub statku.

W dużej części rozprawy doktorskiej brakuje wyników obliczeń sprawności śruby odosobnionej lub też sprawności napędowej modelu/statku. Z np. tabeli 4 wynika, że dla dużych wartości współczynnika posuwu J są duże błędy względne, nawet rzędu kilkuset procent, obliczeń naporu i momentu na śrubie. Nie jest to takie istotne, gdyż wysoka dokładność obliczeń powinna być dla zakresu pracy śruby napędowej – dla tego przypadku jest on w granicach $J = 0,4 \div 0,5$ i wskazane jest, aby dla tego zakresu metoda numeryczna (obliczeniowa) powinna osiągać maksymalną dokładność. Ostateczna ocena dokładności metody obliczeniowej powinna być dokonana na podstawie obliczonej sprawności, a tej nie ma w tabeli 4 lub 5.

Aby uzyskać korzystany efekt (wzrost sprawności napędowej) układu pędnikowego w stosunku do śruby napędowej bez kierownicy zaprojektowanej dla konkretnego kadłuba statku, musi być zaprojektowana geometria płatów kierownicy przepływu tak, aby powstały układ pędnikowy miał wyższą sprawność napędową. Taka metoda projektowania, zaproponowana przez Doktoranta została przedstawiona w rozdz. 3. Budzi jednak moją wątpliwość stwierdzenie Doktoranta, że opracowany „algorytm służący do zaprojektowania śruby optymalnej dla danej kierownicy”, str. 54. Sądzę, że dla danego kadłuba statku i śruby napędowej powinna być zaprojektowana kierownica przepływu, która razem ze śrubą i kadłubem spowoduje wzrost sprawności napędowej statku. Wychodząc z rozkładu prędkości oraz elementarnych sił na wycinku profilu śruby napędowej, Doktorant opracował kryterium (3.26) optymalnej wartości indukowanego kąta posuwu dla śruby napędowej pracującej w strumieniu nadążającym oraz drugie kryterium (3.31) dla śruby napędowej współpracującej z kierownicą przepływu w strumieniu nadążającym. W tym drugim przypadku, strumień nadążający, spływający z kadłuba modelu/statku jest modyfikowany (zmieniany jest rozkład

prędkości) przez kierownicę przepływu, zanim dotrze do śruby napędowej. Cała istota tego rozwiązania polega na tym, aby modyfikacja strumienia nadążającego przez kierownicę przepływu doprowadziła do wzrostu sprawności śruby lub całego układu napędowego (śruba, kierownica, kadłub modelu/statku). W rozprawie doktorskiej trudno doszukać się jasnej i czytelnej metody projektowania optymalnego (pod względem sprawności) układu pędnikowego, a szczególnie parametrów geometrycznych kierownicy: liczba skrzydeł i ich rozstawienie oraz powiązania tych wielkości ze strumieniem nadążającym wpływającym z kadłuba modelu/statku.

Końcowe wyniki, czyli prognozowana moc dostarczona dla układu pędnikowego dla rzeczywistego statku (tabela 27) są optymistyczne. Z tej tabeli wynika, że ostatni układ pędnikowy, CPC + ST002 (zaprojektowany przez Doktoranta) wymaga najmniejszej mocy doprowadzonej co jest celem prowadzonych badań. Jednak i w tym przypadku brakuje wyników pośrednich: moc doprowadzona P_D zależy od ogólnej sprawności napędowej modelu/statku, natomiast sprawność napędowa zależy od sprawności śruby odosobnionej oraz od współczynników: ssania, strumienia nadążającego i rotacyjnego (ich wpływ na sprawność napędową wpływa w różny sposób). Doktorant na str. 99 stwierdza, że „zaproponowane kryterium promieniowego rozkładu kąta posuwu w postaci (3.31) dla śruby strumienia nadążającego, współpracującej z kierownicą przepływu, optymalnej z punktu widzenia sprawności napędowej”. Jednak analiza zamieszczonych w pracy doktorskiej, wyników badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych wykonanych przez Doktoranta budzi pewne wątpliwości – czy rzeczywiście zaprojektowany układ pędnikowy jest optymalny z punktu widzenia sprawności napędowej. Stąd moje pytania wymagające wyjaśnień:

1. Jaka jest sprawność śruby odosobnionej CP745 (tab. 3) z badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych.
2. Jaka jest sprawność napędowa układu pędnikowego CP745 + ST002, tab. 5.
3. W tabeli 23, w której zebrane są wyniki eksperymentów i obliczeń naporu i momentu dla badanych śrub i układów pędnikowych dla stałej prędkości modelu, ale dla różnych prędkości obrotowej śruby – jaka jest sprawność napędowa.
4. W jaki sposób obliczona została moc doprowadzona P_D do poszczególnych układów: śruba napędowa lub układ pędnikowy – tab. 25 i 27 – jaka jest sprawność napędowa.

5. Jaki jest związek lub czym kierował się Doktorant ustalając liczbę skrzydeł i ich rozstawienie (pozycje katowe) w badanych kierownicach przepływu – czy te parametry geometryczne kierownicy są optymalne.
6. Jaki jest algorytm projektowania parametrów geometrycznych śruby napędowej i kierownicy przepływu wg zaproponowanej metody.

6. Strona edycyjna

W pracy doktorskiej znajdują się drobne błędy edycyjne, ale nie mają wpływu na wartość naukową. Natomiast styl pracy nie zawsze ułatwia jej czytanie i ocenę. Brakuje pewnych definicji oraz interpretacji graficznych (rysunków). W pracy brakuje opisu oznaczeń pod wzorami, natomiast wykaz nie zawiera wszystkich oznaczeń, a także indeksów występujących przy oznaczeniach. W pracy Doktorant pisze o zastosowanych algorytmach rozwiązywania określonych zadań, ale nie są to algorytmy, ale tylko szkice rozwiązywanych problemów

7. Wniosek końcowy

Problematyka poruszana w rozprawie doktorskiej jest bardzo ważna i aktualna. Mgr inż. Przemysław Król w Swojej rozprawie doktorskiej:

- przedstawił prawidłowo zdefiniowany problem badawczy dotyczący projektowania układów pędnikowych dla statków,
- opracował kryteria i program komputerowy wykorzystywany do projektowania układów pędnikowych,
- wykorzystał badania eksperymentalne do walidacji wykonanych obliczeń numerycznych.

Ostateczne wyniki przeprowadzonych przez mgr. inż. Przemysława Króla badań wskazują, że cel został osiągnięty i teza udowodniona.

Doktorant wykazał się także wiedzą z zakresu teorii pędników okrętowych, metod numerycznych, hydromechaniki teoretycznej i okrętowych badań modelowych.

Mankamentem jest jednak brak obliczeń sprawności napędowej układu śruby napędowej lub sprawności napędowej układu pędnikowego – brak takich obliczeń nie daje

pewności, czy zaprojektowana kierownica przepływu lub cały układ pędnikowy są rozwiązaniami optymalnymi.

Mając powyższe na uwadze stwierdzam, że **opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymagania Ustawy dotyczącej rozpraw doktorskich i wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Przemysława Króla do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**

