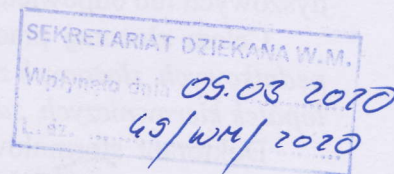


Gdańsk, 2020-03-06

Dr hab. inż. Paweł Flaszyński, prof. IMP PAN  
Zakład Aerodynamiki  
Instytut Maszyn Przepływowych  
im. Roberta Szewalskiego  
Polskiej Akademii Nauk  
Tel: 58 6995 268  
E-mail: pflaszyn@imp.gda.pl



**Recenzja pracy doktorskiej  
mgra inż. Przemysława Króla**

*pt.: Nowa metoda projektowania układów pędnikowych o optymalnym  
rozkładzie cyrkulacji związanej*

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie uchwały Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej oraz pisma, nr 0026/WM/2020 z dnia 14.01.2020, przesłanego przez Pana prof. dr hab. inż. Krzysztofa Kalińskiego, Prodziekana ds. Nauki.

**1. Ocena ogólna**

Praca Pana mgra inż. Przemysława Króla dotyczy metody projektowania układów pędnikowych składających się z wirnika reakcyjnego współpracującego z układem kierowniczym. Praca powstała na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej, a została zainspirowana pracami numerycznymi i eksperymentalnymi prowadzonymi przez Doktoranta w Ośrodku Hydromechaniki Okrętu Centrum Techniki Okrętowej S.A. Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. Krzysztof Tesch, profesor Politechniki Gdańskiej.

Projekt pędnika okrętowego, tak jak każde urządzenie mechaniczne, wymaga spełnienia multidyscyplinarnych kryteriów w całym procesie projektowania i przygotowania produkcji. Odpowiedni dobór geometrii układu pędnika zapewniający optymalną konwersję energii i napęd statku jest bardzo ważnym problemem technicznym, niosącym bezpośrednie konsekwencje ekonomiczne i środowiskowe. Obecnie szacuje się, że ponad 80% handlu międzynarodowego jest uzależnione od transportu morskiego. Postępująca globalizacja przyczyniła się do powstania międzykontynentalnych szlaków transportu kontenerowego, który koncentruje większość transportu morskiego. Ten aspekt jest istotny dla warunków pracy układu napędowego statku. Długie dystanse transportu morskiego determinują charakterystykę pędnika i jego zależność od prędkości ruchu danego statku. Sprawność układu napędowego ma także bezpośredni wpływ na emisję zanieczyszczeń, a ich redukcja jest jednym z trendów wyznaczonych przez International Maritime Organisation.

Rozwój pędników okrętowych, tzw. śrub napędowych rozpoczął się w XVIII wieku, ale wspomniane powyżej zainteresowanie transportem morskim, rosnące wymagania dotyczące jego bezpieczeństwa, a z drugiej strony intensywny rozwój technologii wytwarzania oraz metod analityczno-obliczeniowych powoduje ciągłą ewolucję tego rodzaju pędnika okrętowego.

Śruba okrętowa jest umieszczona za kadłubem statku w jego śladzie, co oznacza jej pracę w niekorzystnych warunkach napływu wynikających z nierównomiernego rozkładu prędkości. Wobec czego, poprawa efektywności napędu może być zrealizowana nie tylko poprzez dobór optymalnej śruby, ale także zastosowanie metod prowadzących do redukcji nierównomierności prędkości w napływającym strumieniu. Obecnie stosuje się różne metody umożliwiające



zmniejszenie efektu śladu poprzez zastosowanie spojlerów, generatorów wirów, kanałów dyszowych lub odpowiednio kształtowanych układów sterowych.

Celem złożonej pracy doktorskiej jest „*opracowanie metodyki projektowania układów pędnikowych, złożonych z wirnika reakcyjnego o optymalnym rozkładzie cyrkulacji związanej z łopatkami kierowniczymi, zdolnej do wdrożenia do praktyki przemysłowej*”.

Doktorant sformułował tezę pracy: „*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 model układu pędnikowego*”.

**Wobec powyższego, można stwierdzić, że praca jest oryginalna i ze względu na znaczenie poznawcze i aplikacyjne wybranego obszaru badawczego podjęta tematyka pracy doktorskiej została określona prawidłowo.**

## **2. Ocena szczegółowa**

Praca została zredagowana na 122 stronach. Materiał diskutowany w pracy ujęto w 6 rozdziałach, które zakończono wykazem ważniejszych oznaczeń oraz spisem literatury zawierającym 103 pozycje. Ponadto na końcu pracy zamieszczono załączniki zawierające: dorobek publikacyjny autora oraz wybrane wyniki pomiarów.

W Rozdziale 1, Doktorant przedstawił motywację podjętej tematyki wskazując na prace ukierunkowane na podnoszenie sprawności układu napędowego poprzez zastosowanie łopatek kierowniczych. Prace te były realizowane w ramach międzynarodowego projektu INRETRO, gdzie partnerem było Centrum Techniki Okrętowej S.A.

Doktorant podkreśla, że zadanie omówione w pracy ma charakter ogólny i jest stosowalne dla dowolnego układu pędnikowego, który można sprowadzić do wirnika reakcyjnego współpracującego z kierownicą. Przykładem praktycznym jest śruba napędowa statku wodnego, co w kontekście prezentowanego problemu jest naturalnym wyborem. Natomiast argumentacja tego wyboru jest zaskakująca, ponieważ jako alternatywną konfigurację Doktorant przywołuje śmigło samolotu kontrowersyjnie twierdząc, że śmigła samolotów pracują na ogół po obciążeniu umiarkowanym lub lekkim. Redukcja masy układu jest jednym z kryteriów projektowania napędów lotniczych, co wymusza pracę układu przepływowego przy dużych obciążeniach. Poza tym w lotnictwie nie stosuje się kierownic przed śmigłami, a co najważniejsze oba przypadki różnią się środowiskiem i warunkami w jakich pracują.

Obecnie projektuje się pędniki jako samodzielnie pracujące wirniki bez kierownic i jak twierdzi Doktorant, jedną z przyczyn jest „brak powszechnie uznanej metody projektowania układów” z kierownicami. Doktorant słusznie zauważa, że oddziaływanie kierownicy i wirnika trudno (choć Doktorant stwierdza, że „*nie daje się*”) ująć w postaci zamkniętych wyrażen analitycznych, a problemem jest kryterium rozdziału i rozkładu cyrkulacji związanej na powierzchniach łopat. Problem ten jest efektem pracy całego układu w nierównomiernym polu prędkości oraz niestacjonarnego oddziaływania kierownicy i wirnika. Analizując obecny stan wiedzy w zakresie projektowania pędników, Doktorant wymienia szereg prac badających możliwość poprawy sprawności układu poprzez zastosowanie kierownic i wykorzystanie różnych metod obliczeniowych. Tą część pracy podsumowuje stwierdzeniem o braku dostępności w literaturze próby określenia teoretycznego kryterium optymalnego rozkładu cyrkulacji związanej na śrubie napędowej współpracującej z kierownicą i na tym tle formułuje, podane powyżej, cel i tezę pracy.

W drugim rozdziale Doktorant przedstawia układ równań mechaniki płynów i jego szczególny przypadek dla analizowanego zagadnienia, i na tym tle omawia podstawy metod wirowych. W dalszej części prezentuje model powierzchni nośnej dla śruby pojedynczej oraz



dla śruby z kierownicą. W obu przypadkach omówione są szczegóły metody, schemat algorytmu i przykładowe wyniki. Zdecydowanie można odnieść wrażenie, że w tym obszarze Doktorant swobodnie się porusza i ma doświadczenie w wykorzystaniu metod wirowych. W kilku miejscach brakuje wyjaśnień dotyczących założeń, które Autor przyjmuje, np. wartość współczynnika korekcyjnego we wzorze 2.27, czy tzw. „dodatkowego dystansu”  $\Delta h$  we wzorze 2.29, lub wartość maksymalnego przemieszczenia w kroku czasowym (str.33). Czy przyjęte wartości są ogólnie stosowane, czy charakterystyczne dla wybranego przypadku? W przypadku współczynnika CKOR wartości są różne dla konfiguracji bez i z kierownicą, ale nie podano dlaczego te, a nie inne wartości. Wyniki obliczeń swobodnej śruby uzyskane Metodą Powierzchni Nośnej porównano z wynikami obliczeń metodą objętości skończonych oraz z danymi eksperymentalnymi. Lepszą zgodność z pomiarami uzyskano przy wykorzystaniu metody objętości skończonych. Jednak należy podkreślić, że w zakresie niższych wartości współczynnika posuwu śruby obciążenie wyznaczone metodą powierzchni nośnej jest także akceptowalne. W tej części Doktorant zdawkowo opisuje model obliczeń przepływu trójwymiarowego i odsyła czytelnika do publikacji w Polish Maritime Research. Podobna uwaga dotyczy rys. 4 i prezentacji wpływu siatki obliczeniowej na rozwiązanie, reprezentowane przez sprawność, dla której brakuje definicji. Na rys. 5 Doktorant prezentuje wartość siły naporu i momentu obrotowego dla śruby napędowej z kierownicą ST0002 w funkcji wartości zmierzonych. Widać wyraźnie poprawę wyników po modyfikacji algorytmu obliczeniowego, ale nie wiadomo dlaczego wyniki są przedstawione w funkcji siły lub momentu zmierzonego, a nie np. w funkcji prędkości obrotowej. Wykresy prezentujące wpływ siatki obliczeniowej trudno interpretować wobec braku szczegółów modelu, chociaż zaskakuje brak zmian rozwiązania przy 3-krotnym zwiększeniu ilości elementów. Czy to oznacza, że można wykonać obliczenia na rzadkiej siatce i uzyskać satysfakcjonujące wyniki? Więcej informacji o modelu można znaleźć w publikacji [70], ale to pytanie pozostaje bez odpowiedzi. W dalszej części rozdziału jest omówiony wpływ obecności kadłuba i płetwy sterowej, co jest niezwykle istotnym czynnikiem wpływającym na warunki pracy śruby napędowej.

Rozdział 3, to opis metody projektowania, w tym zaproponowanego przez Doktoranta kryterium rozkładu indukowanego kąta posuwu na skrzydle śruby optymalnej, modelu wirowego doskonałej kierownicy przepływu i poziomu odniesienia do oceny dobroci kierownicy rzeczywistej, a także algorytm wykorzystywany w projektowaniu śruby optymalnej dla danej kierownicy. Na początku rozdziału Autor pisze, że kierownica generuje pole prędkości osiowych, w dominującej części dziedziny ujemnych. Proszę o wyjaśnienie, co jest przyczyną ujemnych prędkości. To sformułowanie nie jest jasne, czy należy je interpretować jako przepływ powrotny, oderwaniowy?

W dalszej części Doktorant wyznacza kryterium rozkładu indukowanego kąta posuwu na skrzydle śruby. To interesująca propozycja, bo stwarza możliwość wyznaczenia kształtu śruby przy założeniu maksimum sprawności, a wymagająca tylko warunku brzegowego w postaci indukowanego kąta posuwu na wybranym promieniu. W kontekście tego wniosku nasuwa się pytanie, czy można wykorzystać kryterium 3.14 lub 3.26 sformułowane dla śruby bez kierownicy zamiast 3.31 do wyznaczenia kształtu śruby za kierownicą wobec znanego (lub założonego) rozkładu prędkości za tą kierownicą. Kryterium 3.31 zawiera współczynnik ssania, który na tym etapie analizy bez znajomości rozkładu prędkości w obszarze kierownicy jest obciążony dużym błędem, a przynajmniej jest efektem założeń projektowych.

Rozdział zakończony jest spisem kolejnych wersji algorytmu projektowego ze wskazaniem różnic pomiędzy nimi.

W rozdziale 4 Doktorant prezentuje analizowane układy pędnikowe (CP745+ST001, CP753+ST002, CPC+ST002), które zostały zaprojektowane przez Doktoranta, a następnie badane w skali modelowej na stanowisku badawczym Centrum Techniki Okrętowej. Należy podkreślić, że te układy były projektowane dla statku szkoleniowego Akademii Morskiej w Szczecinie – Nawigatora XXI. Rozdział zawiera zbiór założeń projektowych, szczegóły poszczególnych geometrii, a także opis badań w basenie modelowym. Zamieszczono krótki



opis pomiaru oporu kadłuba oraz rozkład prędkości za kadłubem. Zabrakło informacji jaką metodą pomierzono prędkość. Doktorant zamieścił charakterystyki śrub, wyniki pomiarów napędowych w skali modelowej oraz wyniki obliczeń metodą powierzchni nośnej. Wyniki zebrane są w tabeli 23 i wskazują na dobrą, w zakresie kilku procent, zgodność z wynikami pomiarów. Niestety brakuje informacji o dokładności pomiarów. Niejednoznaczny jest wpływ kierownicy w badanych konfiguracjach, ponieważ nie zawsze trend zmian przewidziany numerycznie jest potwierdzony eksperymentalnie. Jednak należy wyraźnie podkreślić, że wpływ kierownicy jest znikomy i raczej zlokalizowany w wybranych położeniach obwodowych, co nie powinno zaskakiwać biorąc pod uwagę jej geometrię i ilość łopatek. Podobne wyniki obliczeń uzyskano w skali rzeczywistej (tab.26).

Podsumowanie wyników i wnioski zostały przedstawione w Rozdziale 5. Zestawienie prognozowanych wartości hydrodynamicznej mocy doprowadzonej dla poszczególnych układów (tab. 27) wskazuje na uzyskaną redukcję o ok. 2% w przypadku zaprojektowanej śruby z kierownicą ST002 i zastosowaniu kryterium (3.31) zaproponowanego przez Doktoranta. Ten wynik należy uznać za sukces i potwierdzenie tezy pracy. Nasuwa się jednak szereg pytań o charakterze dyskusyjnym. Jaki jest wpływ kierownicy na rozkład prędkości przed śrubą? Wprawdzie Doktorant stwierdza, że zastosowanie kierownicy pozwala na znaczną redukcję prędkości obrotowej (tab.28), ale skąd ten wniosek? Czy z prognozy mocy, czy z analizy rozkładu prędkości? Jeśli z rozkładu prędkości to na podstawie jakiej metody lub modelu obliczeniowego?

Doktorant udowodnił możliwość redukcji zapotrzebowania mocy pobieranej przez napęd, ale niepokój budzą rozkłady sił i momentów wzdłuż promienia śruby CPC, gdyż rośnie prawdopodobieństwo wystąpienia kawitacji u wierzchołka. Doktorant stwierdza, że jest to powszechna wada energetycznych kryteriów optymalnego rozkładu obciążenia pędników i w większości przypadków prowadzi do rezygnacji z rozkładu optymalnego poprzez odciażanie wierzchołka. Czy wobec tego stwierdzenia zaproponowane kryterium po takim zabiegu będzie równie efektywne? W jakim zakresie promienia należałoby zmienić to kryterium?

Jak wyjaśnić wpływ tak dużej różnicy cyrkulacji na łopatach kierownicy w zestawieniu ze śrubą CP753 i CPC? Jak daleko w górę przepływu (pod prąd) na pole prędkości oddziałuje śruba?

Na rys. 33 przedstawiono rozkład średniej obwodowej prędkości indukowanej przez kierownicę. Jak została uśredniona wartość i czy ona reprezentuje cały obwód? W jaki sposób odnieść te wartości do pomierzonych prędkości nominalnego strumienia nadążającego (Załącznik B), gdzie wartości na zewnętrznym promieniu wynoszą od 0.2 do 0.4 m/s, czyli ponad dwukrotnie więcej niż w przypadku z kierownicą.

Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób dobrano geometrię kierownic, a w szczególności ST002. Jakie kryterium wyboru przyczyniło się do zlokalizowania 3 łopatek tylko po jednej stronie strumienia nadążającego i dlaczego z prawej? Jak taka asymetria może wpływać na nierównomierność pola prędkości i ewentualne efekty niestacjonarne?

Praca została napisana poprawnie, chociaż Doktorant nie ustrzegł się pomyłek edytorskich, czy niezbyt trafnych sformułowań.

Str 25. „rozważanej powierzchni nie przebijają żadne wiry” – wir jest wektorem, ale czy ma zdolność przebijania?

Str. 61 „cyrkulacja odpowiada intensywności wszystkich wirów przebijających okrąg...” – uwaga jak wyżej

Str. 62 „...zastosowanie dla kierownicy przepływu o nieskończenie dużej ilości nieskończenie słabo obciążonych płatów” – czyli płatów bez obciążenia, czy tak?

Str. 62 „dochodzi do spowolnienia przepływu, co musi skutkować rozszerzeniem linii prądu” – to raczej dotyczy powierzchni prądu

Rys. 3 – błędny podpis

Rys. 32 – chyba powinno być  $r/R$  w opisie osi,  $rR$  nie ma w spisie oznaczeń



### 3. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Pan mgr inż. Przemysław Król przedstawił w rozprawie rozwiązanie interesującego i ważnego zagadnienia. Zaproponował kryterium umożliwiające dobór optymalnej cyrkulacji związanej dla pędnika w postaci wirnika współpracującego z łopatkami kierowniczymi oraz rozwiązał zadanie projektowe wykorzystując to kryterium. Wykonane badania w basenie modelowym oraz obliczenia za pomocą Metody Powierzchni Nośnej umożliwiły przeprowadzenie analizy wpływu zaproponowanego kryterium na parametry projektowanego pędnika. Uzyskane wyniki wykazały jego skuteczność. Rozwiązanie zadania projektowego wymaga z reguły spełnienia szeregu kryteriów, a współpraca śruby napędowej z kierownicą w nierównomiernym polu prędkości napływającego strumienia jest przykładem takiego złożonego zadania. Zatem przedstawioną metodę projektowania należy traktować jako element całego procesu, w ramach którego wykorzystuje się także bardziej zaawansowane, ale i czasochłonne metody analizy przepływu trójwymiarowego i niestacjonarnego. Doktorant w ograniczonym zakresie zastosował te metody, ale w planach dalszych badań wyraźnie określa potrzebę ich szerszego zastosowania, co wskazuje na potencjalne możliwości poprawy charakterystyk układów pędników napędowych.

**Uważam, że praca doktorska Pana mgr inż. Przemysława Król pt.: *Nowa metoda projektowania układów pędnikowych o optymalnym rozkładzie cyrkulacji związanej* w pełni odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

