

Prof. Leszek Trybus
Katedra Informatyki i Automatyki
Politechnika Rzeszowska

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI
TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI
Politechniki Gdańskiej
Rzeszów, 17.04.2025 r.
RPH/17913/2025
Wpłynęło dnia 28.04.2025

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Rymarczyk
pt. *Prognozowanie zdolności statku do dynamicznego pozycjonowania*

Niniejsza recenzja została sporządzona na prośbę Pana prof. dr. hab. inż. Piotra Jasińskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Gdańskiej.

1. Motywacja, teza i cele

Niezależnie od dziedziny techniki, projektowanie urządzeń, systemów czy infrastruktury wymaga obecnie wsparcia przez zaawansowane środowiska obliczeniowe pozwalające prognozować skutki decyzji projektowych. Dotyczy to również inżynierii morskiej, a w niej projektowania statków zdolnych do dynamicznego pozycjonowania DP (*Dynamic Positioning*), gdzie danymi projektowymi są kształt kadłuba, rodzaj i rozmieszczenie naporów (pędników), ich moc itd. Dysponując odpowiednim systemem wspomagania decyzji DSS (*Decision Support System*) projektant mógłby sprawdzić, czy i w jakim stopniu projektowany statek będzie zdolny utrzymywać zadaną pozycję i kierunek pomimo prądu morskiego, fal i wiatru.

Wytyczne dotyczące procedur projektowych w DP i oceny ich rezultatów podane są w standardach klasyfikacyjnych, z których jednym jest skandynawski DNV-ST. Należy również przyjąć, że systemami DSS wspomagającymi projektowanie dysponują firmy przodujące w inżynierii morskiej, jak choćby norweski Kongsberg. Dlatego cel ogólny rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Rymarczyk jakim jest opracowanie systemu DSS prognozującego zdolność statku do dynamicznego pozycjonowania, z przeznaczeniem dla gdańskiego Centrum Techniki Okrętowej S.A., uważam za jak najbardziej właściwy.

Standard DNV wyróżnia trzy poziomy prognozowanej zdolności statku do DP zależnie od zakresu danych wejściowych przyjętych do projektowania. Poziomy 1, 2 określone są na podstawie analiz statycznych, tzn. gdy oddziaływanie środowiska (prąd, fale, wiatr) w założonej wielkości jest zrównoważone przez napory statku. Wynikiem projektowania jest niewielki obszar, w którym pozostawałby statek poddany takiemu oddziaływaniu. Poziom 3 prognozuje ten obszar na podstawie analiz dynamicznych przeprowadzonych albo symulacyjnie, albo jako wynik badań eksperymentalnych na modelu statku. Symulowany statek lub jego model musi być wtedy wyposażony w automatyczny system pozycjonowania DPS (*DP System*), który także podlega projektowaniu. Tak więc opracowanie środowiska zapewniającego wsparcie projektowania odpowiadającego trzem poziomom standardu DNV wymaga wiedzy zarówno z obszaru hydrodynamiki jak i automatyki.

Dwóm problemom, w których wybór metody rozwiązania standard DNV pozostawia projektantowi jest alokacja naporów TA (*Thrust Allocation*) oraz model matematyczny statku dla projektowania systemu DPS. Pierwszy problem bierze się stąd, że oddziaływanie środowiska można sprowadzić do sił działających w osiach x , y statku oraz momentu obrotowego wokół osi z . Do ich zrównoważenia statek przeznaczony do DP ma nadmiar aktuatorów naporowych, tzn. pędniki azymutalne, pędniki strumieniowe i ew. ster. Problem TA sprowadza się więc do tego, jak rozdzielić obciążenia na pędniki, aby efektywnie zrównoważyć te dwie siły i moment.

Drugim problemem jest identyfikacja modelu matematycznego dynamiki statku, który w ogólnej postaci składa się z dwóch układów równań różniczkowych, pierwszego dla pozycji i kierunku, a drugiego dla prędkości. W modelu takim od oddziaływania środowiska zależą współczynniki określające masę dodaną i tłumienie wiskotyczne, które jako nieznane apriori muszą być zidentyfikowane na podstawie kształtu kadłuba oraz danych o tym oddziaływaniu. Dopiero wtedy model statku nadaje się do projektowania systemu automatyki DPS.

Wobec powyższych problemów wykazanie prawdziwości tezy rozprawy określonej jako możliwość opracowania systemu wspomagania decyzji dla prognozowania zdolności statku do DP w kontekście standardu DNV wymaga osiągnięcia następujących celów:

- opracowanie algorytmu alokacji naporów TA,
- identyfikacja parametrów modeli kadłuba i pędników,
- symulacja dynamiczna statku wyposażonego w automatyczny system DPS,
- walidacja symulatora poprzez porównanie zachowania z fizycznym modelem.

Jednym z rezultatów symulacji powinno być określenie tzw. współczynnika dynamicznego dla skorygowania danych środowiskowych przyjętych do analiz statycznych. Metodą prowadzącym do osiągnięcia powyższych celów są poświęcone kolejne rozdziały rozprawy.

2. Przegląd treści

Anglojęzyczna rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Rymarczyk składa się z 9. rozdziałów i 3. dodatków.

Na początku wprowadzenia (rozdz. 1) Autorka podkreśla, że zasadniczym celem rozprawy jest system wspomagania decyzji DSS dla inżyniera projektującego statek zdolny do DP. Podaje ogólną koncepcję takiego systemu, w którym metody obliczeniowe dotyczące hydrodynamiki, alokacji naporów oraz projektowania systemu DPS pochodzą od eksperta, natomiast inżynier projektant określa geometrię kadłuba i pędników, parametry symulatora oraz inne dane dotyczące statku i środowiska. Wynikiem projektowania wspomaganego przez DSS jest prognoza obszaru na płaszczyźnie x, y , w którym utrzymywałby się statek poddany zadanim oddziaływaniom środowiska. Jeżeli obszar ten okazuje się nadmierny, inżynier powinien skorygować dane wejściowe i ponowić obliczenia. Finalne wyniki są zapisywane w bazie danych systemu DSS jako przykłady dla następnych projektów. W rozdziale 1 podano także obszerną charakterystykę problemu DP wspartą przeglądem literatury, tezę wraz z powyższymi celami oraz listę założeń przyjętych na podstawie standardu DNV.

W rozdziale 2 przedstawiono trzy poziomy zdolności statku do DP według tego standardu. Poziomy 1, 2 dotyczą analiz statycznych z tym, że dla poziomu 1 wystarczają standardowe dane o środowisku, natomiast dla 2 powinny one odpowiadać danej lokalizacji (*site*). Klasyfikacja na poziomie 3 wymaga symulacji dynamicznej w określonym przedziale czasu lub badań modelowych. Następnie podano sposób określenia sił i momentu pochodzących od środowiska. Standard nie określa jednak jak rozdzielić je na napory, czyli jak ma wyglądać alokacja TA.

Rozdział 3 określa model matematyczny dynamiki statku przeznaczonego do DP wraz z modelami oddziaływań środowiska. Model dynamiki statku, ściślej model kadłuba, składa się z dwóch trójwymiarowych układów nieliniowych równań różniczkowych, pierwszego dla pozycji i kierunku w globalnym układzie współrzędnych, drugiego dla prędkości, ale w układzie związanym ze statkiem. W drugim układzie występują dwie nieznane macierze, tzn. macierz masy dodanej zależna od fal oraz macierz tłumienia wiskotycznego zależna od ruchów statku. Za pomocą profesjonalnych narzędzi *Ansys Aqwa* i *STAR CCM+* typu CFD (*Computational Fluid Dynamics*) bazujących na metodzie siatek utworzono najpierw wykresy wartości składowych modelu zawierających masę dodaną i tłumienie. W następnym kroku zidentyfikowano współczynniki dwóch wspomnianych macierzy poprzez dopasowanie ich do

wykresów. Metodą CFD, ale również eksperymentalnie, utworzono model pędnika azymutalnego będący parabolą wiążącą generowaną siłę z obrotami śruby. Na model falowania składa się model I rzędu będący sumą sinusoid oraz model II rzędu będący stałą. Stałymi są również modele prądu oraz uśredniony model wiatru.

Dwie metody alokacji naporów TA, tzn. programowanie kwadratowe QP (*Quadratic Programming*) oraz algorytm genetyczny QA (*Genetic Algorithm*) są rozważane w rozdziale 4. W QP chodzi o taki rozdział sił w osiach x , y i momentu obrotowego pomiędzy napory (pędniki), aby kwadratowy wskaźnik jakości określony przez ten rozdział był minimalizowany. Można to też uważać na minimalizację całkowitej mocy wymaganej przez napory. Ograniczenia równościowe w przedziale QP wyrażają równowagę między naporami a oddziaływaniem środowiska, natomiast ograniczenia nierównościowe wynikają z zakresów nastawczych naporów. Podano schemat blokowy algorytmu QP z podziałem globalnej minimalizacji na liniowe podproblemy optymalizacyjne odpowiadające niewielkim sektorom kątów pędników azymutalnych. Rezultaty alokacji przedstawiono dla statku ratowniczego RV (*Rescue Vessel*), mającego o jeden pędnik więcej niż rozważany w następnych rozdziałach wielozadaniowy statek MSV (*Multi-Service Vessel*). Natomiast w genetycznym algorytmie GA ograniczenia równościowe zastąpiono kwadratową odchyłką pozycji i kierunku, którą również należy minimalizować. Powstał w ten sposób problem minimalizacji dwukryterialnej, do rozwiązania którego zastosowano algorytm sortujący NSGA II, także przedstawiony jako schemat blokowy. Alokacja naporów w statku RV uzyskana obydwoma algorytmami okazała się bardzo podobna z tym, że QP jest zdecydowanie efektywniejszy obliczeniowo.

Metody przeznaczone do symulacyjnej oceny zdolności statku do DP są przedstawione w rozdziale 5. Warunkiem symulacji jest funkcjonowanie systemu automatycznego pozycjonowania DPS, na który składają się obserwator pozycji i kierunku z filtracją falowania morza, regulator wyznaczający wartości trzech sterowań odpowiednio do oddziaływań środowiskowych oraz algorytm TA rozdzielaający te sterowania na napory. Jako pierwszy element zastosowano nieliniowy pasywny obserwator Fossena, jako drugi regulator PID lub MPC (*Model Predictive Controller*), a jako trzeci alokator TA z programowaniem kwadratowym QP. Wskaźnik minimalizowany w MPC jest ważoną sumą kwadratów odchyłki stanu i zmian sterowania. Obiektem sterowania jest model dynamiki statku z rozdziału 3.

W rozdziale 6 zawarto wyniki eksperymentów symulacyjnych przeprowadzonych za pomocą narzędzia DP solver implementującego metody przedstawione wcześniej, który jako kluczowy element systemu wspomagania decyzji DSS stanowi wymierny rezultat rozprawy. DP solver jest w stanie ocenić zdolność statku do DP odpowiednio do poziomów 1, 2, 3 standardu DNV. Przeprowadzone eksperymenty dotyczyły utrzymywania pozycji i kierunku pomimo prądu oraz fali krótkiej lub długiej różniących się dwukrotnie okresem. Okazało się, że o ile system DPS radzi sobie z prądem i falą długą, to nie jest w stanie utrzymać pozycji dla fali krótkiej, zarówno w przypadku regulatora PID jak i MPC. Warto też dodać, że obliczenia dla MPC trwają trzykrotnie dłużej niż dla PID.

Praktyczne eksperymenty omawiane w rozdziale 7 przeprowadzono w basenie CTO (*site*) na fizycznym modelu statku MSV w skali 1:36. Ma on dwa rurowe pędniki azymutalne i dwa dziobowe strumieniowe. System automatyki DPS był taki sam jak w poprzednich symulacjach za wyjątkiem alokacji TA, w której zamiast minimalizacji QP zastosowano pseudoinwersję macierzy 4×3 umożliwiającą obliczenia w czasie rzeczywistym. Podobnie jak poprzednio, system DPS radził sobie dobrze z prądem i falą długą, ale nie był w stanie utrzymać pozycji dla fali krótkiej, niezależnie od regulatora.

Analizę porównawczą wyników symulacyjnych i modelowych, czyli walidację, przeprowadzono w rozdziale 8 korzystając z pięciu kryteriów począwszy od rozmiaru obszaru, w którym pozostawał statek w trakcie DP, a kończąc na wskaźniku dynamicznym (pkt. 1) będącym stosunkiem całkowitych sił naporowych w stanach dynamicznym

i statycznym. Wskaźnik ten może służyć do korekty statycznych danych projektowych na podstawie wyników dynamicznych, a jego nominalna wartość według standardu DNV wynosi 1.25. Okazało się, że moc przyjętą do statycznego projektowania statku MSV można zmniejszyć o 9 %, natomiast dane dla prądu i fali długiej zredukować w stosunku odpowiednio 0,94 i 0,72. Odwrotnie jest natomiast w przypadku fali krótkiej, której oddziaływanie w projektowaniu statycznym powinno być nawet dwukrotnie zwiększone. W sumie jednak walidacja potwierdziła poprawność zastosowanych rozwiązań.

Rozprawę kończy rozdział 9, w którym podano wynikające z niej wnioski oraz kierunki dalszych prac. Na podstawowe rezultaty badawcze składają się algorytm optymalnej alokacji naporów oraz identyfikacja numeryczna matematycznego modelu dynamiki statku. Zasadniczym wynikiem praktycznym jest system DSS wspomagający decyzje projektowe, którego istotę stanowi opracowany DP solver. Potwierdza to zrealizowanie celów wskazanych w pkt. 1, a tym samym dowodzi prawdziwości tezy. Jako kierunki dalszych badań Autorka przewiduje pewne korekty dotyczące systemu automatycznego pozycjonowania, ale przede wszystkim uzupełnianie bazy danych systemu DSS o projekty następnych statków, aby stał się on źródłem praktycznej wiedzy dla projektantów.

W trzech dodatkach rozprawy znajdują się dane statku MSV i podobnego RV, identyfikacja numeryczna pędników, rozwiązania techniczne systemu DPC oraz pozostałe dane.

3. Ocena ogólna

Zasadniczym rezultatem rozprawy jest system DSS dla wspomagania decyzji projektowych dotyczących statku zdolnego do dynamicznego pozycjonowania. System ten jest wdrożony w gdańskim CTO, a jego podstawowym elementem jest DP solver implementujący metody przedstawione w rozprawie. Łącznie pozwalają one ocenić zdolność projektowanego statku do DP według standardu DNV, zarówno w wersji statycznej jak i dynamicznej. Interfejs zewnętrzny służy do wprowadzania danych statku i danych środowiska. Na bazie wygenerowanych prognoz zdolności do DP projektant może dobrać kształt kadłuba, rodzaj i rozmieszczenie naporów, ich moc itp.

Metody przedstawione w rozprawie obejmują alokację naporów TA, identyfikację modelu matematycznego statku oraz projekt automatycznego systemu DPS. Szczególną uwagę poświęcono optymalnej alokacji TA sprowadzając ją do problemu programowania kwadratowego QP z ograniczeniami równościowymi (pozycjonowanie) i nierównościowymi (napory). Dzięki podziałowi zakresów kątów pędników na niewielkie sektory udało się zastąpić wyrażenia nieliniowe liniowymi. Programowanie QP wyróżnia się korzystnie względem algorytmu genetycznego GA. Iteracje w QP można wykonywać dla 11. stanów morza oraz co 10° zakresów kątów pędników.

Na ogólny model dynamiki statku składają się dwa układy równań z macierzami parametrów określonymi przez konstrukcję statku (masa, Coriolis) oraz dwoma macierzami zależnymi od środowiska. Od okresu i wysokości fal zależy masa dodana, a od intensywności ruchów statku tłumienie wiskotyczne. Identyfikację współczynników tych macierzy przeprowadzono generując najpierw odpowiednie wykresy za pomocą narzędzi *Ansys Aqwa* (fale) i *STAR CCM+* (tłumienie), a następnie dopasowując współczynniki macierzy do tych wykresów. W podobny sposób utworzono paraboliczny model siły pędnika azymutalnego.

Otrzymany model matematyczny statku posłużył do opracowania systemu automatycznego pozycjonowania DPS, na który składa się nieliniowy pasywny obserwator filtrujący falowanie, regulator PID lub MPC utrzymujący pozycję i kierunek, oraz alokator naporów TA. Został on nieco uproszczony w stosunku do alokatora optymalnego, aby umożliwić obliczenia w czasie rzeczywistym.

Do prognozowania utrzymywania pozycji i kierunku posłużył wymieniony wyżej program DP solver napisany w Pythonie. Walidację DP solvera przeprowadzono porównując jego prognozy w wynikami badań przeprowadzonych na fizycznym modelu statku z takim samym systemem sterowania DPS. Wykazały one ogólną zgodność symulacji i badań modelowych świadcząc o celowości wykorzystania DP solvera w systemie wspomaganie projektowania DSS.

Z powyższego widać, że rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Rymarczyk zasługuje na autentycznie dobrą ocenę. Postępując rzetelną przemyślaną drogą opracowała ona metody potrzebne do utworzenia DP solvera, na którym opiera się system wspomaganie decyzji projektowych. Metodami tymi są optymalny alokator naporów TA, zidentyfikowany model dynamiki statku oraz system sterowania DPS. Walidacja eksperymentalna pokazała, że zaproponowany system jest w stanie trafnie prognozować zdolność statku do DP zgodnie ze standardem DNV. Świadczy to o poprawności tezy postawionej w rozprawie (pkt. 1 powyżej).

Spis literatury liczy 110 pozycji ściśle związanych z tematyką rozprawy, z których zdecydowana większość pochodzi z ostatnich kilku lat. Na podkreślenie zasługuje bardzo dobra angielszczyzna.

4. Uwagi

Podane niżej uwagi krytyczne mają znaczenie drugorzędne i nie umniejszają wartości rozprawy.

- Nie podano dlaczego część D algorytmu PID w pkt 5.3.1 nie zawiera rotacji R.
- Jak dobierano wartości współczynników macierzy K_p , K_I , K_D w PID?
- Z jakim cyklem komputer sterujący (dodatek C) oblicza sterowanie DP?
- DP solver przedstawiony w pkt. 6.1 jest zasadniczym praktycznym wynikiem rozprawy. Oprócz okna *dashboard* (Fig. 6.1) przydałyby się więc jeszcze dwa lub trzy okna wprowadzające nieco głębiej w DP solvera.
- Trzeci wzór w (4.12) powinien być nierównością.

Rozprawa jest relatywnie obszerna (192 strony) i pod względem formalnym nie budzi żadnych zastrzeżeń. Opisy tekstowe, rysunki, tabele i zrzuty z ekranu są bez zarzutu. Usterki redakcyjno-edytorskie praktycznie nie ma (za wyjątkiem kilku na stronach 114, 115, 120 i dalej).

5. Wniosek końcowy

Uważam, że cele postawione w rozprawie zostały osiągnięte. Prawdziwość tezy stwierdzającej, że możliwe jest opracowanie systemu wspomaganie decyzji projektowych statku zdolnego do dynamicznego pozycjonowania w kontekście standardu DNV-ST, Autorka wykazała opracowując metodę optymalnej alokacji naporów, identyfikując model matematyczny statku, projektując system automatycznego pozycjonowania oraz tworząc narzędzie programowe DP solver. System wspomaganie decyzji został pomyślnie zweryfikowany przez porównanie wyników DP solvera z badaniami na fizycznym modelu statku przeprowadzonymi w CTO S.A., gdzie także nastąpiło wdrożenie.

Wobec tego uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Rymarczyk pt. *Prognozowanie zdolności statku do dynamicznego pozycjonowania*, której tematyka mieści się w dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*, z nadmiarem spełnia wymagania stawiane w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dn. 20.07.2018 r. i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

L. Tytus