

Szczecin 28.03.2022

Prof. dr hab. Zenon Zwierzewicz
Katedra Automatyki Okrętowej
Wydział Mechatroniki i Elektrotechniki
Akademia Morska w Szczecinie
ul. Wały Chrobrego 1-2
70-500 Szczecin

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
dla
Rady Naukowej Wydziału Elektrycznego
Uniwersytetu Morskiego w Gdyni

Tytuł rozprawy: Kompleksowy układ sterowania ruchem statku handlowego
we wszystkich fazach podróży morskiej

Autor rozprawy: mgr inż. Andrzej Rak

Promotor: dr hab. inż. Witold Gierusz

1. Dane ogólne

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Elektrycznego UMG prof. dr hab. inż. Krzysztofa Góreckiego z dnia 03.02.2022 r.

Recenzowana praca liczy 143 strony, na które składają się cztery rozdziały, zakończenie, dodatki oraz spis literatury składający się z 188 pozycji. Najstarsza pozycja jest z 1914, a najnowsza z 2021 roku. Autor jest ponadto współautorem czternastu pozycji z czego pięć opublikowano w wysoko punktowanych czasopismach w tym jedną w *Ocean Engineering*.

2. Charakterystyka merytoryczna: aktualność tematu, cel pracy

Wzrastające znaczenie i rozwój transportu morskiego wynikające z rosnących obrotów handlu światowego i związane z tym wzrost konkurencji uruchomił trend minimalizacji kosztów przewozu. Doprowadziło to do istotnych przeobrażeń we flocie w postaci tendencji ograniczania liczebności załóg. To z kolei wymusiło potrzebę coraz dalej idącej automatyzacji procesów prowadzącą do częściowej lub nawet pełnej autonomiczności statku, polegającej na tym, że statek pozbawiony załogi odbywałby podróż w pełni autonomicznie „od kei do kei”. W tym kontekście celem, jaki postawił sobie Autor pracy jest:

Opracowanie i wdrożenie na rzeczywistym obiekcie pływającym kompleksowego systemu sterowania ruchem statku z wykorzystaniem kilku współdziałających regulatorów o odmiennych zasadach działania.

Praca ta stanowić ma zatem przyczynek czy też krok w kierunku realizacji idei autonomicznego statku morskiego, co w efekcie poprawiłoby wyniki ekonomiczne w żegludze morskiej dzięki redukcji załóg. Przyczyniłoby się także do zwiększenia bezpieczeństwa transportu morskiego.

Temat pracy jak i sformułowany cel są aktualne i godne podjęcia zwłaszcza w obliczu postępującej rewolucji cyfrowej mającej także swój wydzźwięk właśnie w masowej automatyzacji, w tym autonomizacji transportu morskiego. Badania te mają bardzo duże znaczenie, zwłaszcza praktyczne.

Oceniając sam kierunek badań przeprowadzonych w pracy należy stwierdzić, że Autor dobrze wpasował się w obecny trend czy nurt badawczy odnoszący się m.in. do nowoczesnych technik projektowania i testowania systemów sterowania, jaką jest np. metodologia symulacji *Hardware-in-the-Loop* (HIL).

3. Przegląd tematyki zawartej w rozdziałach

Rozprawę podzielono na cztery rozdziały.

W pierwszym dokonano przeglądu metod sterowania ruchem statku na tle historycznym przechodząc od klasycznych algorytmów PID do współczesnych LQG z filtrem Kalmana, które mogły zaistnieć w praktyce dzięki pojawieniu się minikomputerów oraz nowoczesnych systemów nawigacji automatyzujących proces określania pozycji statku.

Dokonano tu także klasyfikacji zadań automatycznego sterowania statkiem czyli: sterowanie kursem, wzdłuż zadanej trajektorii, dynamicznego pozycjonowania czy kompensacji kołysań bocznych. Omówiono ponadto sprawę integracji układów sterowania wraz z systematyką metod sterowania oraz dekompozycję zadania realizacji pełnomorskiej podróży statku autonomicznego uzasadniając potrzebę stosowania układów przełączających. Ponadto zaprezentowano tu ideę sterowania bezuderzeniowego .

Drugi rozdział zawiera opis obiektu sterowania, jakim jest izomorficzny model gazowca LNG Dorchester Lady używanego jako statku treningowego do szkolenia nawigatorów. Opisano tu oprzyrządowanie układu pomiarowo-kontrolnego, w tym urządzenia nawigacyjne jak: odbiornik GPS, kompas żyroskopowy, anemometr, log. Przedstawiono układ energetyczny modelu i urządzenia wykonawcze: pędniki gondolowe, stery strumieniowe (tunelowy i obrotowy). Opisano ponadto urządzenia sterujące jak np. sterowniki mikroprocesorowe oraz komputery PC. Zobrazowano akweny testowe.

Trzeci rozdział poświęcono szczegółowej realizacji kompleksowego układu sterowania statkiem w podróży „od kei do kei”. Przedstawiono propozycje regulatorów stosowanych w kolejnych fazach podróży. I tak:

- dla fazy ruchu statku z małymi prędkościami czyli manewrów w obrębie akwenów portowych przeznaczono wielowymiarowy regulator LMI,
- jako regulator ruchu na wodach ograniczonych, wzdłuż zadanej trajektorii, wybrano klasyczny PID wraz z harmonogramowaniem wzmocnień (*gain-scheduling*) wprowadzając w ten sposób element adaptacji,
- jako algorytm działania regulatora przeznaczonego do pracy na wodach otwartych wybrano sterowanie predykcyjne MPC (*model predictive control*).

Ponadto w rozdziale tym przedstawiono algorytm Line-of-Sight (LOS) wyznaczający kurs powrotu na bieżący odcinek trajektorii, regulator predykcyjny dla prędkości eksploatacyjnych, wraz z zarysem idei MPC, oraz układ przełączania bezuderzeniowego (PBU).

W kolejnym podrozdziale zajęto się techniczną realizacją środowiska badawczego w tym: układem do przeprowadzania wstępnych badań, architekturą docelowego układu badawczego działającego w czasie rzeczywistym oraz implementacją układu wykorzystującego grupę regulatorów.

Czwarty rozdział przedstawia wyniki symulacji komputerowych typu HIL oraz badań przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym zarówno dla poszczególnych składowych, jak i całości zbudowanego w ramach pracy układu sterowania. Na wstępie opisana została metodologia badań opracowanego układu, a następnie przedstawiono ich wyniki dla poszczególnych typów regulatorów czyli:

- wielowymiarowego regulatora wykorzystującego liniowe nierówności macierzowe LMI,
- regulatora adaptacyjnego PID-GS,
- regulatora predykcyjnego.

Dokonano analizy porównawczej przypadków symulacji HIL z odpowiadającymi im rzeczywistymi eksperymentami przeprowadzonymi na jeziorze.

Do rozprawy dołączono dodatek, w którym zamieszczono opis matematycznego modelu obiektu sterowania (statku), stosowanego podczas badań symulacyjnych.

4. Wartość merytoryczna rozprawy.

Przedstawiona praca ma przede wszystkim walor inżyniersko-eksperymentalny, co w naukach technicznych stanowi niewątpliwie dorobek badawczy Autora. Rozwiązany problem techniczny sformułowany w celu pracy stanowi niewątpliwie wkład na drodze rozwoju autonomicznych jednostek pływających. Zebrane doświadczenia mogą służyć także do dalszej weryfikacji stosowanych algorytmów jak i użytych technik (w sensie sprzętowym).

Ponieważ inżynieria oraz teoria sterowania przeżywają obecnie swego rodzaju rozkwit w sensie różnych złożonych i często ‘inteligentnych’ algorytmów, ważną cechą pracy jest to, że w jej ramach opracowano pewną gotową strukturę sprzętową (*framework*) mogącą służyć do weryfikacji całej gamy innych nowoczesnych algorytmów sterowania, która może być wykorzystana do dalszych badań.

5. Uwagi krytyczne i komentarze

Jak rozumiem praca ta powstała przy okazji wieloletnich badań teoretycznych i eksperymentalnych całego zespołu pracowników zarówno FBZiOS, jak i Uniwersytetu Morskiego w Gdyni (str.59). Fakt ten miał niewątpliwie pewien wpływ na charakter pracy, stanowiącej rodzaj ‘wyciągu’ z raportu ww. obszernych prac projektowo-badawczych, jak również na sposób potraktowania określonych treści. W sensie inżyniersko-eksperymentalnym nie budzi ona moich zastrzeżeń natomiast jej część teoretyczna, gdzie operuje się głównie sformułowaniami hasłowymi (np. LMI, MPC), jest lakoniczna i powierzchowna, a przez to nie zawsze zrozumiała. Nie ułatwia też sprawy odwołanie się do literatury autorstwa (w domyśle) innych z członków zespołu. W tym kontekście trudno jest ocenić w jakim stopniu używane w pracy oprogramowanie oraz jego implementacja na sprzęcie jest pracą własną Doktoranta.

W punkcie „Idea stosowania LMI do syntezy regulatora wielowymiarowego” nie ma de facto przedstawionej żadnej idei poza kilkoma ogólnikami i wzorem (3.4), określającym ogólną postać nierówności macierzowej, z którego zresztą Autor dalej wcale nie korzysta. Niewiele lepiej sprawa wygląda z przedstawieniem ‘idei sterowania predykcyjnego’ (str. 52-53), a zwłaszcza z opisem sposobu zaimplementowania algorytmu MPC w kontekście zadania sterowania statkiem. Nawet czytelnikowi znającemu ogólny koncept każdego z tych algorytmów trudno jest skojarzyć w jaki sposób ich ogólne metodyki (idee) zostały przełożone na rozważane w pracy zadanie sterowania statkiem. Przydałoby się, chociaż po kilka stron na przybliżenie czytelnikowi każdego z tych algorytmów na tyle, aby w trakcie ich specjalizacji dla konkretnego zadania sterowania, można by było odwoływać się do nich (choćby w symbolicznym zakresie).

Co do uwag bardziej szczegółowych wymienię następujące:

Jest wiele różnych algorytmów sterowania, odpowiednich także do sterowania statkami morskimi. Brakuje mi w pracy choćby krótkiego uzasadnienia dla takiego, a nie innego wyboru algorytmów dla poszczególnych faz podróży morskiej.

Algorytm sterowania predykcyjnego (MPC) kojarzy się z możliwością uwzględnienia wielu ograniczeń np. na zmienne sterujące jak i na współrzędne wektora stanu. Dla fazy pływania po wodach otwartych wydaje się, że tych ograniczeń w stosunku do innych faz jest najmniej. Skąd zatem taki wybór algorytmu dla fazy wód otwartych, gdy implementacja i nakład obliczeniowy MPC są dość znaczące.

Na stronie 119 np. napisano, ‘...przed próbą przeniesienia omawianego układu sterowania w obszar zastosowań przemysłowych konieczne byłoby uzupełnienie go o mechanizm adaptacji do zmiennych stanów załadowania statku’. Dlaczego więc nie uwzględniono od razu postaci algorytmu w wersji adaptacyjnej.

Jedynym uzasadnieniem doboru algorytmów podanym w pracy jest fakt, że algorytm taki spisywał się w praktyce lepiej niż dwa pozostałe w odniesieniu do danego zadania sterowania (fazy podróży morskiej). Fakt ten może wynikać jednak z wielu czynników występujących w fazie implementacji.

Dla modelu liniowego (3.1),(3.2) nie podano metody za pomocą, której dokonano linearyzacji. Brakuje tu fizycznej interpretacji poszczególnych współrzędnych wektora stanu. Podobnie nic nie wspomniano o metodzie identyfikacji modelu.

Wypadałoby chociaż zwięźle opisać sposób wyznaczania macierzy K (3.5). Odwoływania się w całości do literatury, np. [106], może sugerować, że autor skorzystał z gotowego oprogramowania opracowanego w zespole i użył go nie rozumiejąc do końca podstaw jego opracowania.

W modelu (3.16), (3.17) nie wiadomo skąd taką strukturę uzyskano, brakuje ponadto opisu fizycznych współrzędnych: wektora stanu, wyjścia, sterowania i błędu e_k , co znacznie ogranicza czytelność tekstu. Podobnie jak wyżej nie jest jasna metoda identyfikacji modelu.

Wnioski końcowe

Przedstawione uwagi, w niektórych przypadkach dyskusyjne, nie wpływają w sposób istotny na wartość pracy. Podsumowując uważam, że Doktorant zrealizował cel rozprawy, dowiódł postawionej tezy oraz wykazał się umiejętnościami i odpowiednim przygotowaniem do samodzielnej pracy naukowej w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*. Przedstawione w pracy wyniki badań zarówno symulacyjnych, a zwłaszcza tych przeprowadzonych na obiekcie rzeczywistym, stanowią cenne uzupełnienie osiągnięć innych ośrodków badawczych w omawianym zakresie.

Biorąc także pod uwagę ogólne podejście do problemu oraz aktualność i ważność tematu, zwłaszcza pod względem praktycznym, należy stwierdzić, że rozprawa doktorska zatytułowana „Kompleksowy układ sterowania ruchem statku handlowego we wszystkich fazach podróży morskiej” przedłożona przez mgra inż. Andrzeja Raka, spełnia wymagania określone w aktualnych przepisach i wnioskuje do Rady Naukowej Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni o dopuszczenie mgra inż. Andrzeja Raka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

