

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Raka
pt. *Kompleksowy układ sterowania ruchem statku handlowego*
we wszystkich fazach podróży morskiej

Niniejsza recenzja została sporządzona na prośbę Pana Dziekana Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni, prof. dr hab. inż. Krzysztofa Góreckiego.

1. Zakres i cel

Uważa się, że wyznacznikiem rozwoju techniki w ostatnim 10-leciu jest dążenie do opracowania autonomicznych obiektów mobilnych poruszających się w różnych środowiskach. Do obiektów takich należą również statki morskie, których zdolność do autonomicznego ruchu określają cztery stopnie MASS (*Marine Autonomous Surface Ship Degrees*). Stopień MASS 3 dotyczy bezzałogowego statku sterowanego zdalnie, a MASS 4 statku w pełni autonomicznego. Zakres recenzowanej rozprawy dotyczy jednego z elementów zapewniających stopnie MASS 3 i 4, jakim jest system autonomicznego sterowania statkiem we wszystkich fazach podróży morskiej „od kei do kei”. Fazami tymi są: manewrowanie w porcie, żegluga na pozaportowych wodach ograniczonych oraz żegluga swobodna na wodach otwartych.

Jest zrozumiałe, że w każdej z tych faz sterowanie powinien prowadzić inny regulator. Dlatego cel pracy, który określono jako opracowanie i wdrożenie na rzeczywistym obiekcie pływającym kompleksowego układu sterowania wykorzystującego kilka współdziałających regulatorów o odrębnych zasadach działania uważam za jak najbardziej właściwy, zarówno pod względem metodologicznym jak i technicznym. Obiektem pływającym jest statek treningowy będący modelem izomorficznym 1:24 gazowca *Dorchester Lady*, należący do Ośrodka Manewrowania Statkami FBŻiOŚ mieszczącego się w Iławie-Kamionce nad jeziorem Silm. Współdziałanie regulatorów należy rozumieć jako bezuderzeniowe przełączenie sterowania przy zmianach faz ruchu. Aby we właściwej perspektywie ocenić zakres prac, których wymaga osiągnięcie celu warto pamiętać o trudnościach jakie napotykają firmy stoczniowe zaangażowane w projekty nad autonomicznymi statkami morskimi.

2. Przegląd treści

Po Wprowadzeniu, w którym na tle stopni MASS sformułowano cel pracy i tezę, następują cztery zasadnicze rozdziały.

W pierwszym z nich dokonano przeglądu metod sterowania ruchem statku oraz podano ideę metody przełączania bezuderzeniowego (PBU). Metody obejmują sterowanie kursem, sterowanie wzdłuż zadanej trajektorii, pozycjonowanie dynamiczne oraz kompensację kołysań. Podczas podróży „od kei do kei” nadrzędny układ nawigacyjno-decyzyjny wybiera odpowiedni regulator zależnie od fazy podróży. Przełączanie PBU między regulatorem aktualnie sterującym, czyli aktywnym, a regulatorem rezerwowym oczekującym na następną fazę polega na nadażaniu sygnału sterującego regulatora rezerwowego, za filtrowanym sterowaniem regulatora aktywnego. Odbywa się to w układzie ze sprzężeniem zwrotnym, dla

którego zakłóceniem jest odchyłka między wielkością zadaną, a wyjściem aktywnego układu regulacji.

Drugi rozdział zawiera szczegółowy opis statku treningowego *Dorchester Lady*, a w tym przegląd jego urządzeń nawigacyjnych, urządzeń sterujących oraz wyposażenia komputerowego. Do nawigacji służy GPS, Kompas żyroskopowy, anemometr, log łopatkowy oraz symulator identyfikatora AIS. Urządzeniami sterującymi zasilanymi napięciem 120 VDC są dwa główne pędniki gondolowe na rufie (azipody) oraz dwa stery strumieniowe, tunelowy i obrotowy na dziobie. Komputer PC SLRT Host (*Simulink Real Time Toolbox*) służy najpierw do programowania, a potem do obsługi operatorskiej. Jest on połączony z umieszczonym pod pokładem komputerem przemysłowym SLRT Target wykonującym skompilowany program sterowania. Ponadto system zawiera konwerter komunikacji szeregowej, dwa lokalne sterowniki obsługujące urządzenia sterujące i ew. trzeci komputer PC symulujący statek.

Syntezy regulatorów składających się na układ dokonano w rozdziale trzecim przedstawiając również ich implementacje w Simulinku. Regulatorami tymi są:

- wielowymiarowy regulator prędkości podłużnej, poprzecznej i kątowej statku projektowany metodą liniowych nierówności macierzowych LMI (*Linear Matrix Inequalities*), wzorowany na pracy [150],
- regulator PID-GS (*Gain Scheduling*) do sterowania kursem wzdłuż zadanej trajektorii na wodach ograniczonych, z adaptacją nastaw odpowiednio do prędkości obrotowej pędników głównych,
- regulator predykcyjny MPC (*Model Predictive Control*) do sterowania na wodach otwartych, który minimalizuje kwadratowy wskaźnik jakości zawierający ważoną sumę odchyłek prędkości kątowej i wydatku na sterowanie, zaadaptowany z pracy [104].

Bezuderzeniowe przełączanie PBU następuje pomiędzy regulatorami PID-GS i MPC, ponieważ regulator LMI kończąc pracę doprowadza sterowania do zera. W nadążnych układach PBU zastosowano regulatory PD. Następnie opisano technikę realizacji środowiska badawczego Matlab-Simulink przeznaczonego do wstępnych badań. Podany w Załączniku model matematyczny statku treningowego zaczerpnięto z prac promotora [57, 58]. W drugim etapie badań symulacyjnych cały układ sterowania przeniesiono na sprzęt komputerowy opisany w rozdziale drugim tworząc układ klasy HIL (*Hardware In the Loop*). Układ decyzyjny SUPERVISOR przełączający regulatory mieści się w komputerze Host.

Czwarty rozdział przedstawia wyniki eksperymentów przeprowadzonych najpierw dla każdego regulatora z osobna, a potem dla autonomicznej podróży „od kei do kei” ze wszystkimi fazami ruchu. Podróż obejmowała również opłynięcie hipotetycznej wyspy po zadanym torze. Eksperymenty są przedstawiane parami, jeden w układzie HIL, a drugi przeprowadzony na jeziorze Silm. Badania uwzględniały słaby, umiarkowany lub silny wiatr, kilka prędkości statku oraz układy bez lub z bezuderzeniowością PBU. W sumie par trajektorii HIL-Silm jest dwanaście, w większości uzupełnionych przebiegami czasowymi odpowiednich sygnałów. Trajektorie i przebiegi w obydwu przypadkach są zbliżone świadcząc o adekwatności modelu statku. Układy PBU zapewniały w miarę płynne przejście między sterowaniami PID-GS a MPC. Po eksperymentach przedstawiono statystyczne oceny jakości działania regulatorów w formie średnich odchyłek bocznych, kątów obrotu pędników, szybkości obrotu itp. Rozdział kończą ogólne uwagi dotyczące wyników badań układu sterowania. Wskazano między innymi, że fazę manewrowania w porcie można byłoby skrócić.

3. Ocena ogólna

Zasadniczy rezultat rozprawy pokazuje, że opracowany układ sterowania jest w stanie autonomicznie i bezpiecznie sterować statkiem podczas podróży „od kei do kei”. Kilkanaście

eksperymentów z regulatorami LMI, PID-GS i MPC pokazało, że poprawnie sterują one statkiem pomimo zmiennych warunków pogodowych i różnych prędkości. Projektowanie tych regulatorów jest metodologicznie odmienne. Układ bezzderzeniowego przełączania PBU zmniejsza amplitudę i szybkość obracania pędników głównych.

Środowiskiem dla realizacji systemu był Matlab-Simulink z bibliotekami *Coder* i *Real Time*. Schematy Simulinka są wyjaśniane szczegółowo nie budząc wątpliwości. System opracowywano w trzech etapach, począwszy od symulacji *off-line* z matematycznym modelem statku, poprzez symulację *on-line* w układzie HIL, aż po praktyczną realizację na statku treningowym. Porównanie trajektorii i przebiegów otrzymanych w HIL i podczas prób na jeziorze pokazało dobry poziom zgodności.

Należy podkreślić, że duży wysiłek został włożony w uruchomienie systemu HIL, w którym współpracują trzy komputery i konwerter komunikacyjny. System ten musiał być solidnie dopracowany, bo w rozprawie nie ma wzmianki, czy przy przenoszeniu go na statek treningowy pojawiły się problemy. Zgodność symulacji HIL z eksperymentami pozwala oczekiwać, że system HIL będzie wartościowym stanowiskiem dla kształcenia studentów w Katedrze Automatyki Okrętowej UMG.

Obszerny spis publikacji liczy 188 pozycji reprezentatywnych dla tematyki pracy. Wśród nich znajduje się 13 prac Autora z ostatnich 20 lat, opublikowanych wraz ze współpracownikami. Można z tego wnosić, że wniósł on znaczący wkład w rozwój systemów sterowania opracowanych w Katedrze.

W sumie rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Raka zasługuje na wysoką ocenę. Postępując rzetelną, przemyślaną drogą osiągnął on postawiony cel wykazując słuszność postawionej tezy, która mówi, że opracowany system sterowania przyczyni się do realizacji idei autonomicznego statku morskiego.

4. Uwagi i pytania

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

- 1) Jak funkcjonują lokalne sterowniki mikroprocesorowe statku treningowego? Czy jako nastawniki w układzie otwartym, czy jako serwomechanizmy ze sprzężeniem zwrotnym ustawiające kąty azypodów i steru strumieniowego oraz jako regulatory prędkości obrotowej?
- 2) Wyniki projektowania regulatora wieloparametrowego ocenia się zwykle porównując wartości własne układu otwartego i zamkniętego. Ile wynoszą one dla macierzy A_{HM} i $A_{HM} - B_{HM}K$? Z czego wynikają ich wzajemne proporcje?
- 3) Przed podaniem nastaw regulatora PID-GS dla kilku wartości prędkości obrotowej należało podać parametry zidentyfikowanego modelu Nomoto II rzędu. Można byłoby wtedy oszacować czas ustalania się odpowiedzi dla nastaw wyznaczonych przez *PID Tuner*.
- 4) Funkcja celu (3.19) regulatora MPC zawiera dwa współczynniki wagowe, których wartości i ich uzasadnienia nie podano. Czy na podstawie średnich z p. 4.7 można byłoby określić proporcje pierwszego i drugiego składnika funkcji celu, tzn. rolę uchybu prędkości kątowej i wydatku na obracanie pędników?
- 5) Schemat realizacji układu przełączania bezzderzeniowego PBU z rys. 3.10 nie jest tak przejrzysty jak schemat ideowy z rys. 1.6. Dla oceny doboru nastaw regulatorów PD (tab. 3.4) przydałby się wykres odpowiedzi układu PBU na skok sterowania regulatora aktywnego i skok błędu.

Pod względem edytorskim rozprawa jest przygotowana bez zarzutu. Usterek redakcyjnych praktycznie nie ma, za wyjątkiem kilku literówek (s.1, 38, 45, 72) i jednego przejęzyczenia (s.4). Dlaczego „trzech”, a nie „dwóch” w odnośniku na s. 12?

5. Wniosek końcowy

Uważam, że cel postawiony w rozprawie został osiągnięty. Autor opracował i zweryfikował praktycznie układ sterowania ruchem statku podczas autonomicznej podróży „od kei do kei”. Weryfikację przeprowadzono na statku treningowym *Dorchester Lady* w formie eksperymentów na jeziorze Silm. W skład systemu wchodzi trzy regulatory o odmiennych zasadach działania włączane w odpowiednich fazach ruchu. Rezultaty pracy wskazują, że statki morskie o autonomii przynajmniej MASS 3 mogą pojawić się w niedalekiej przyszłości.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Raka pt. *Kompleksowy układ sterowania ruchem statku handlowego we wszystkich fazach podróży morskiej* z wyraźnym nadmiarem spełnia wymagania stawiane w Ustawie *Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce* z dn. 3.07.2018 r. i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Leszek Tryliew