

Kompleksowy układ sterowania ruchem statku handlowego we wszystkich fazach podróży morskiej

Streszczenie rozprawy

Ewolucja koncepcji morskiego statku towarowego zmierza w ostatnich latach do opracowania i budowy takich jednostek, które będą w stanie realizować podróże w pełni autonomicznie. Zadanie takie ujawnia swą złożoność w wielu wymiarach: ekonomicznym, prawnym, społecznym, technicznym, a nawet etycznym.

Jednym z kluczowych zagadnień aspektu technicznego jest budowa układu sterowania ruchem statku, które zapewni jego efektywność i bezpieczeństwo we wszystkich fazach podróży. Analiza funkcjonalna zadań, które należy zrealizować prowadzi do ich podziału na trzy warstwy:

- Poziom zarządzania (strategii), w którym przyjmując za podstawę założone parametry ekonomiczne, przewidywane warunki pogodowe, oraz decyzje właściciela planuje się trasę podróży;
- Nadrzędny układ nawigacyjny, który na podstawie informacji z warstwy zarządzania i urządzeń nawigacyjnych, w szczególności mapy elektronicznej i systemu antykolizyjnego, określa bezpieczną trajektorię ruchu statku i na jej podstawie wypracowuje sygnały sterujące dla układu regulacji;
- Układ regulacji, który steruje dostępnymi na statku urządzeniami sterowo-napędowymi tak, aby utrzymać ruch statku na trajektorii wypracowanej w układzie nawigacyjnym.

Parametry brane pod uwagę oraz dane przetwarzane w poszczególnych warstwach mogą się różnić w zależności od akwenu, na którym porusza się statek. W tym kontekście określono trzy fazy pełnej podróży morskiej istotne z punktu widzenia układu regulacji:

- Manewry w porcie z niewielkimi prędkościami;
- Pływanie po wodach ograniczonych ze zmiennymi prędkościami;
- Pływanie po wodach otwartych z prędkością eksploatacyjną.

Odmienne charakterystyki manewrów w każdej z tych faz oraz ujawniające się, szczególnie podczas ruchu z niewielkimi prędkościami, znaczne nieliniowości dynamiki statku powodują, że synteza układu sterowania dla statku autonomicznego, realizującego pełną podróż jest trudnym zadaniem.

Celem rozprawy było zbadanie użyteczności stosowania układu przełączalnych regulatorów do sterowania ruchem statku towarowego podczas kolejnych etapów podróży morskiej: „od kei do kei”. Dodatkowo rozważano zasadność stosowania w takim układzie technik przełączania bezzderzeniowego (PBU) w celu ograniczenia gwałtownych zmian sygnałów sterujących podczas przełączania regulatorów.

Badania prowadzono, wykorzystując izomorficzny model gazowca LNG 113,5 tys. DWT zbudowany w skali 1:24, którego napęd stanowiły dwa ciągnące pędniki gondolowe. Model ten był na co dzień eksploatowany podczas kursów manewrowych dla pilotów i oficerów pokładowych w Ośrodku Manewrowania Statkami Fundacji Bezpieczeństwa Żeglugi i Ochrony Środowiska w Iławie-Kamionce, stąd w pracy nazywany jest także statkiem treningowym.

W syntezie układu regulacji wykorzystano:

- Dla reżymu pływania w porcie – wielowymiarowy regulator prędkości podłużnej, poprzecznej i kątowej statku zaprojektowany z wykorzystaniem techniki liniowych nierówności macierzowych – LMI. Regulator ten adaptowany był z istniejącego rozwiązania, które stosowano wcześniej do sterowania modelem zbiornikowca VLCC;
- Dla pływania po wodach ograniczonych – adaptacyjny regulator PID wykorzystujący technikę „*gain scheduling*”;
- Dla pływania po wodach otwartych – regulator predykcyjny MPC, który stosowano wcześniej do sterowania modelem gazowca w zadaniu utrzymania ruchu równoległego dwóch jednostek – „*underway replenishment*” (UNREP). Układ ten przystosowano do roli regulatora ruchu statku płynącego z pełną prędkością.

W wyniku analizy właściwości uzyskanego zestawu regulatorów uznano, że naturalną techniką przełączania bezuderzeniowego w tym układzie będzie metoda śledzenia wyjścia regulatora aktywnego, przy czym mechanizm ten zastosowano do przełączania pomiędzy regulatorami PID-GS oraz MPC. Sposób wykorzystania wielowymiarowego regulatora LMI do sterowania statkiem podczas manewrów z niewielkimi prędkościami nie wymagał stosowania technik PBU.

Układ regulacji został zaprojektowany i zrealizowany w środowisku MATLAB-Simulink. Platformą sterowania w czasie rzeczywistym był przemysłowy komputer PC. Jego oprogramowanie generowano wykorzystując narzędzia *Simulink Coder* i *Simulink Real Time*. Weryfikację właściwości zbudowanego układu regulacji przeprowadzono w dwóch etapach:

- W trybie symulacji „*Hardware-In-the Loop*” (HIL) z użyciem rzeczywistego sterownika. Układ sterowania współpracował wówczas z uruchomionym na osobnej maszynie w reżymie czasu rzeczywistego symulatorem dynamiki modelu gazowca;
- Podczas eksperymentów na właściwym statku treningowym pływającym po jeziorze w Ośrodku Manewrowania Statkami.

Przeprowadzono badania poszczególnych regulatorów z osobna, dobierając parametry zadanych trajektorii ruchu tak, aby odpowiadały one charakterystyce pływania statku w fazie podróży odpowiedniej dla danego regulatora. Badano także wpływ zastosowania układu PBU na amplitudę i szybkość zmian kąta obrotu pędników gondolowych podczas przełączania regulatorów dla manewrującego statku. Przeprowadzono także próby sterowania statkiem, bez ingerencji operatora, dla trajektorii zadanej, która zawierała wszystkie etapy podróży „od kei do kei”

Przeprowadzona badania wykazały, że:

- Regulatory składowe: LMI, PID-GS oraz MPC poprawnie sterują ruchem modelu izomorficznego gazowca w dedykowanych dla nich fazach pływania;
- Układ przełączania bezuderzeniowego zmniejsza zarówno amplitudę jak i szybkość zmian kąta obrotu pędników gondolowych podczas przełączania regulatorów;
- Kompleksowy układ sterowania wykorzystujący trzy przełączane regulatory może bezpiecznie sterować modelem izomorficznym we wszystkich etapach podróży „od kei do kei”.

Jednocześnie wskazały one kierunki rozwoju zbudowanego układu i możliwych nowych badań, gdyż:

- Regulator LMI, mimo iż działa poprawnie, wymaga udoskonalenia, szczególnie w torze regulacji prędkości kątowej. Algorytm wyznaczania jego sygnałów zadanych, wykorzystując jedynie wartości statycznych uchybów położenia względem punktu zwrotu, jest źródłem wydłużenia czasu manewrów;
- Izomorficzny model gazowca nie umożliwia badań wpływu zmiennego stanu załadowania statku oraz falowania na akwenu na jakość działania układu sterowania.

- Mimo iż układ przełączania bezuderzeniowego zmniejsza amplitudy i szybkość zmian sygnałów sterujących nie można przesądzić o zasadności jego stosowania w układach sterowania ruchem statku.

Struktura rozprawy

Praca została podzielona na cztery rozdziały. Pierwszy z nich umiejscawia technologię stosowaną w badanym układzie na tle krótkiej historii rozwoju dziedziny sterowania ruchem statku. Przeprowadzono w nim także analizę etapów pełnej podróży morskiej, w której określono, iż na poziomie warstwy sterowania może ona być podzielona na wymienione wyżej trzy fazy. Dokonano także analizy cech układów przełączania bezuderzeniowego oraz opisano układ wybrany do implementacji.

Drugi rozdział stanowi szczegółowy opis obiektu sterowania – izomorficznego modelu gazowca „*Dorchester Lady*”. Przedstawiono w nim wszystkie urządzenia nawigacyjne i sterowo-napędowe zainstalowane na modelu. Opisano także konfigurację układu pomiarowo-kontrolnego, który używany był podczas eksperymentów w warunkach rzeczywistych. Rozdział kończy charakterystyka akwenów i urządzeń dostępnych na jeziorze podczas prób.

W trzecim rozdziale przedstawiono szczegóły syntezy i implementacji regulatorów składających się na układ sterowania. Opisano w nim także realizację układu PBU. Poszczególne elementy układu sterowania zaprezentowane są w postaci diagramów Simulinka uzupełnionych opisem ich głównych bloków.

Czwarty rozdział zawiera rezultaty badań eksperymentalnych. Przedstawiono kolejno wyniki prób dla poszczególnych regulatorów składowych, następnie dla układu PBU oraz dla pełnej podróży „od kei do kei”. Przebiegi odpowiednich trajektorii i zarejestrowanych sygnałów zestawiono parami: dla symulacji HIL oraz dla eksperymentów rzeczywistych przeprowadzonych w zbliżonych warunkach pogodowych. W rozdziale tym przeprowadzono także analizę działania poszczególnych składowych układu regulacji, wykorzystując wyznaczone dla kolejnych prób wskaźniki jakości sterowania.

W zakończeniu przedstawiono wnioski i propozycje dalszych prac wynikające z analizy wyników badań.

Rozprawę uzupełnia dodatek zawierający opis złożonego, nieliniowego modelu matematycznego dynamiki statku treningowego „*Dorchester Lady*”. Model ten wykorzystywano do symulacji obiektu sterowania, zarówno na wstępnym etapie projektowania poszczególnych elementów układu regulacji jak podczas weryfikacji kompleksowego układu sterowania w trybie HIL.

10. 01. 2022

Andrzej Ralski