Witold Gierusz Józef Lisowski Konrad Sajnaj Akademia Morska w Gdyni

# IDENTYFIKACJA PODSYSTEMU UKŁADU STEROWANIA SILNIKA GŁÓWNEGO STATKU

W artykule przedstawiono metodykę identyfikacji podukładu sterowania, w którym sygnał wyjściowy badanego układu jest niedostępny. Praca dotyczy jednego z regulatorów prędkości obrotowej silnika głównego współczesnego statku handlowego. Cały system składał się z regulatora właściwego i układu kształtującego sygnał zadany, a proces identyfikacji odnosił się do ostatniego podukładu.

W pracy zaproponowano metodę modelu odwrotnego do rekonstrukcji niedostępnego sygnału. Po odtworzeniu go określono model dynamiki układu kształtującego sygnał zadany metodą minimalizacji błędu predykcji.

### 1. WSTĘP

Jednym z szeroko stosowanych rozwiązań napędu głównego statku handlowego jest układ ze śrubą nastawną. Jego najważniejszą zaletą jest możliwość pełnego wykorzystania mocy silnika głównego w każdych warunkach eksploatacji (szczególnie przy niższych prędkościach ruchu). Sterowanie takim układem napędowym odbywa się poprzez regulację prędkości obrotowej wału oraz zmiany kąta skoku śruby. Regulacja ta może być niezależna lub sprzężona.

Pewną odmianą sterowania niezależnego jest utrzymywanie prędkości obrotowej wału na wartości znamionowej i regulacja mocy układu napędowego tylko poprzez zmianę kąta ustawienia płatów śruby. Schemat blokowy takiego sterowania przedstawiono na rysunku 1.

Jednym z istotnych elementów pokazanego na rysunku 1 układu jest blok kształtujący sygnał zadany skoku śruby, oznaczony jako  $R_z$ . Ma on za zadanie ochronę silnika głównego przed niebezpieczeństwem uszkodzeń na skutek zbyt dużych czy zbyt gwałtownych zmian obciążenia spowodowanych szybką zmianą ustawienia płatów śruby.

Celem tej pracy jest przedstawienie metody identyfikacji właściwości dynamicznych wspomnianego układu w sytuacji, gdy nie jest dostępny sygnał  $H_{mod}$  (patrz rys. 1) na jego wyjściu. Zaproponowano tu metodę modelu odwrotnego w celu odtworzenia tego sygnału, co w dalszej kolejności umożliwiło określenie właściwości członu  $R_z$ .



**Rys. 1.** Schemat układu napędowego ze śrubą nastawną i stałą prędkością obrotową silnika głównego (pominięto dla uproszczenia sygnały zakłóceń, np. zmiany obciążenia śruby);  $n_z$  – wartość zadana prędkości obrotowej silnika głównego,  $R_{rpm}$  – regulator prędkości obrotowej, SG – silnik główny,  $n_{TC}$  – prędkość obrotowa turbiny doładowania silnika głównego,  $H_z$  – wartość zadana skoku śruby nastawnej,  $R_z$  – układ regulacji kształtujący sygnał zadany,  $H_{mod}$  – wartość skoku śruby nastawnej, zmodyfikowana przez  $R_z$ ,  $R_{ss}$  – regulator skoku śruby nastawnej, SN – śruba nastawna, H – skok śruby nastawnej, u – prędkość wzdłużna statku

Wszystkie eksperymenty identyfikacyjne przeprowadzono na statku typu ro-ro m/v "Rider" [2], wyposażonego w dwa średnioobrotowe silniki główne, pracujące każdy na własną śrubę. Badania odbyły się w trakcie rejsów pomiędzy RFN i Finlandią w sezonie zimowym 2005 roku.

Artykuł podzielono w następujący sposób: w punkcie 2 omówiono eksperymenty identyfikacyjne. W kolejnym punkcie przedstawiono proces identyfikacji poszczególnych elementów układu sterowania. Punkt 4 zawiera krótkie podsumowanie pracy, a dodatek podstawowe dane statku, silników głównych i śrub.

Do obliczeń wykorzystano algorytmy z biblioteki "System Identification Toolbox" z pakietu Matlab/Simulink [1].

#### 2. EKSPERYMENTY IDENTYFIKACYJNE

Celem identyfikacji był blok kształtujący sygnał zadany kąta ustawienia płatów śruby. W dokumentacji statku układ ten określony był jako *load control change regulator* [2]. Dla uproszczenia w dalszej części pracy nazywany będzie w skrócie regulatorem. Jego sygnałem wejściowym jest zadany skok śruby, oznaczony jako  $H_z$ , a sygnałem wyjściowym (niedostępnym pomiarowo) zmodyfikowany zadany skok śruby, oznaczony jako  $H_{mod}$ . Do pomiarów można użyć rzeczywistego skoku śruby, przedstawianego na wskaźniku w jednostkach niemianowanych jako H.

Potencjometr służący do zmiany wartości sygnału wejściowego ( $H_z$ ) wyskalowany był w przeliczonych wartościach procentowych obciążenia (mocy) silnika głównego dla poszczególnych kątów wychylenia płatów śruby nastawnej. Możliwość zmian ustawienia istniała w zakresie 70–95% mocy znamionowej przy skoku zmian co 2,5%.

Odczytane z dokumentacji wartości skoku śruby przy poszczególnych wartościach wskaźnika obciążenia przedstawiono w tabeli 1 [2].

#### Tabela 1

Obciążenie silnika głównego	[%]	70,0	72,5	75,0	77,5	80,0	82,5	85,0	87,5	90,0	92,5	95,0
Skok śruby rzeczywisty	[kąt wychylenia płatów]	20,5	21,5	22,5	23,5	25,0	26,5	28,0	29,5	31,0	32,5	34,0
Wartość na wskaźniku	[-]	5,0	5,2	5,4	5,5	5,6	5,7	5,9	6,1	6,2	6,3	6,4

Wartości skoku śruby przy poszczególnych stopniach obciążenia silnika głównego

Do generowania pseudolosowych sygnałów wejściowych, używanych podczas identyfikacji, zbudowano układ w środowisku Simulink. Układ ten umożliwiał zmianę (ustawienie) wzmocnienia, okresu próbkowania i wartości średniej przebiegu, przy zachowaniu minimalnego skoku wartości sygnału na poziomie 2,5% obciążenia silnika. Przykładowy przebieg sygnału wejściowego  $H_z$  dla jednego z eksperymentów oraz odpowiadające mu przebiegi sygnałów wyjściowych H (w wartościach ze wskaźnika skoku śruby) z włączonym i wyłączonym regulatorem  $R_z$  przedstawiono kolejno na rysunkach 2 i 3 [3].



**Rys. 2.** Przebieg zmian obciążenia SG podczas jednego z eksperymentów. Na osi poziomej zaznaczono czas w sekundach, a na osi pionowej procentowe, zadane obciążenie silnika



Rys. 3. Przebiegi zmian wskaźników skoku śruby przy zmianach obciążenia SG (oś pionowa) według diagramu z rysunku 2; na osi poziomej zaznaczono czas w sekundach; linia ciągła – układ z regulatorem R<sub>z</sub>, linia przerywana – układ bez regulatora

Można zauważyć łagodzący wpływ regulatora  $R_z$  na szybkość zmiany kąta ustawienia płatów śruby.

#### 3. IDENTYFIKACJA DYNAMIKI UKŁADU Rz

# 3.1. Określenie modelu dynamiki układów sterowania z załączonym i wyłączonym regulatorem *R*<sub>z</sub>

Schemat blokowy identyfikowanych układów z możliwością załączenia i wyłączenia (za pomocą zwarcia klucza nad blokiem  $R_z$ ) regulatora  $R_z$  przedstawia rysunek 4.



**Rys. 4.** Schemat układu sterowania z włączonym regulatorem *R*<sub>z</sub>. Wyłączenie regulatora polega na zwarciu klucza znajdującego się nad nim

Przyjęto, że dynamika układu opisana jest modelem dyskretnym typu ARX. Zastosowano metodę minimalizacji błędu predykcji PEM z biblioteki Matlaba [1]. Przykładowy zestaw danych do identyfikacji przedstawia rysunek 5 [3].



Rys. 5. Przebiegi sygnału wyjściowego – skoku śruby y<sub>1</sub> (mierzonego za pomocą wskaźnika skoku) oraz sygnału wejściowego – zmiany zadanego obciążenia silnika głównego (u<sub>1</sub>) funkcji czasu w sekundach do wyznaczenia modelu dynamiki układu

Po obliczeniach z wykorzystaniem danych z wielu eksperymentów uzyskano model układu z regulatorem  $R_z$  w postaci transmitancji dyskretnej  $G_1(z)$ :

$$G_1 = \frac{H(z)}{H_z(z)} = \frac{0,01413}{1 - 0,6866 \ z^{-1} - 0,1118 \ z^{-2}}.$$
 (1)

W podobny sposób przeprowadzono identyfikację układu sterowania bez regulatora  $R_z$ , wykorzystując dane z eksperymentów, w których regulator  $R_z$  był wyłączony (zwarty). Otrzymano następującą transmitancję:

$$G_2 = \frac{H(z)}{H_z(z)} = \frac{0,05133 - 0,03345 z^{-1}}{1 - 0,6888 z^{-1} - 0,5519 z^{-2}}.$$
 (2)

Podczas procesu identyfikacji sprawdzano jakość uzyskanych wyników, analizując odchylenia standardowe poszczególnych współczynników modeli oraz przebiegi funkcji autokorelacji residuów sygnałów wyjściowych i przebiegi korelacji residuów sygnałów wejściowych i wyjściowych pod kątem ich "białości".

#### 3.2. Identyfikacja regulatora R<sub>z</sub>

Do określenia właściwości dynamicznych regulatora  $R_z$  niezbędna jest znajomość jego sygnału wyjściowego  $H_{mod}$  (patrz rys. 1 i 4). Ze względu na niedostępność tego sygnału odtworzono go na podstawie znajomości wyznaczonych w poprzednim punkcie modeli układów sterowania. Ideę tego odtworzenia przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Idea metody wyznaczenia wielkości wyjściowej za regulatorem Rz

Przykładowy przebieg sygnału  $H_{mod}$  po podaniu na wejście układu z rysunku 6 jednego z opisanych w punkcie 2 sygnałów identyfikacyjnych przedstawia rysunek 7 [3].

Postępując podobnie jak w przypadku wyznaczania transmitancji  $G_1$  oraz  $G_2$ , określono model dynamiki regulatora  $R_z$  w postaci transmitancji dyskretnej:

$$G_{R_z} = \frac{H_{mod}(z)}{H_z(z)} = \frac{0,2424}{1 - 0,5603 \ z^{-1} - 0,1979 \ z^{-2}}.$$
 (3)



**Rys. 7.** Przykładowy przebieg odtworzonego sygnału  $H_{mod}$  na wyjściu z regulatora  $R_z$ 

Porównanie przebiegów sygnału  $H_{mod}$  z wyjścia modelu  $G_{Rz}$  oraz ze schematu z rysunku 6 przedstawia rysunek 8 [3].



**Rys. 8.** Odtworzony sygnał  $H_{mod}$  ze schematu blokowego (wyższy przebieg) i z wyjścia modelu regulatora  $R_z$  (niższy przebieg)

Do określenia związku pomiędzy przedstawionymi sygnałami obliczono współczynnik korelacji wielowymiarowej  $R_{yy}$ . Jego wartość wyniosła 0,84.

### 4. UWAGI KOŃCOWE

- W pracy przedstawiono metodę określenia prostych modeli dynamiki elementów rzeczywistego układu sterowania skokiem śruby nastawnej w sytuacji, gdy niektóre sygnały są niedostępne do pomiarów.
- 2) Przy stosunkowo długich stałych czasowych w systemie możliwe jest ręczne przeprowadzanie eksperymentów identyfikacyjnych siłami samej załogi bez konieczności użycia kosztownego, specjalistycznego oprzyrządowania. Warunkiem powodzenia jest jednak wcześniejsze opracowanie diagramów dla sygnałów wejściowych, zapewniających odpowiednie pobudzenie badanego układu.
- 3) Statek m/v "Rider", na którym przeprowadzano badania, wyposażony był w dwa takie same silniki główne (i układy automatyki). Przeprowadzenie badań na obu tych silnikach pozwala określić różnice w dynamice (i pracy) obu układów sterowania skokiem śruby, a w dalszej kolejności umożliwia lepsze ich dostrojenie do aktualnych warunków pracy. Zatem badania w warunkach rzeczywistej eksploatacji, takie jak opisane w niniejszej pracy, mogą stanowić

element monitoringu i diagnostyki układów okrętowych i poprawiać niezawodność ich pracy.

#### **LITERATURA**

- 1. Ljung L., System Identification Toolbox, The MathWorks, Inc. Natick, USA 2001.
- 2. *M/v Rider. Ship documentation.*
- 3. Sajnaj K., *Identification of the load control system model for the main engine and the control quality appreciation with the Matlab/simulink package application*, (in polish), Msc. Thesis, Gdynia Maritime University, Gdynia 2006.

#### DODATEK. Wybrane parametry techniczne statku ro-ro m/v "Rider"

1. Statek

Zanurzenie (trym): 4,8 m – dziób, 5,4 m – rufa Wymiary (długość/szerokość): 186,5 m / 21,6 m Prędkość: 18,5 kn

2. Silnik główny:

Producent: MAK 8601, 8 cylindrów Moc: 8000 kW Prędkość obrotowa znamionowa: 420 rpm Średnie zużycie paliwa: 45 m<sup>3</sup>/ 24h HFO (IFO 380) przy obciążeniu 90% Kierunek pracy: PS – prawoskrętny, SB – lewoskrętny

3. Śruba napędowa:

Producent: LIPS b.v. Liczba skrzydeł: 4 Średnica: 3700 mm Predkość obrotowa: 229 rpm

## THE IDENTIFICATION OF MAIN ENGINE CONTROL SUBSYSTEM

#### Summary

This paper addresses the problem of the identification of a controller in the subsystem related to the main engine of a merchant ship. Two degree controller is implemented and presented work concentrates on dynamics of a prefilter. Unfortunately output signal from this prefilter is inaccessible. The main idea is the using an inverted model of the remaining control system dynamics to reconstruction mentioned output signal. Next the identification of the prefilter dynamics is performed.