

Projektowanie adaptacyjnego regulatora modalnego dla nieliniowego modelu statku wiertniczego

Michał Brasel

Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki i Robotyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Streszczenie: W artykule rozważa się problem syntezy układu dynamicznego pozycjonowania statku wiertniczego opisanego nieliniowym modelem dynamicznym o wielu wejściach i wielu wyjściach (MIMO). Proponowana metoda syntezy sterowania bazuje na strukturze z liniowym regulatorem modalnym o strojonych parametrach wyliczanych na podstawie linearyzacji modelu obiektu w wybranych nominalnych punktach jego pracy. Główny problem praktycznego wykorzystania tej metody związany jest z odpowiednim wyborem punktów pracy biorących udział w syntezie regulatora oraz sposobami ograniczania ich ilości. Liczba przyjętych punktów pracy oraz odpowiednie określenie sygnałów pomocniczych, na podstawie których definiowane są te punkty, mogą w znaczący sposób wpływać na uzyskiwaną jakość sterowania. W artykule zaproponowano prosty sposób wyboru nominalnych punktów pracy na podstawie trzech niezależnych sygnałów pomocniczych. Działanie zaproponowanego układu sterowania zilustrowano przykładowymi wynikami symulacyjnymi pozycjonowania statku dla różnych warunków początkowych.

Słowa kluczowe: układy dynamicznego pozycjonowania, wielowymiarowe układy sterowania, układy nieliniowe, sterowanie adaptacyjne, sterowanie modalne

1. Wprowadzenie

Zagadnienie projektowania systemów dynamicznego pozycjonowania jednostek pływających na powierzchni morza należy do skomplikowanych zadań syntezy sterowania. Obiekty pływające przeznaczone do takich zadań opisywane są najczęściej nieliniowymi modelami dynamicznymi o wielu wejściach i wielu wyjściach (MIMO). Realizacja procesów dynamicznego pozycjonowania takich jednostek wymaga wykonywania przez nie ruchów jednocześnie w wielu stopniach swobody, powodując nieustanną zmianę właściwości dynamicznych samego obiektu. Zmieniające się parametry ruchu obiektu względem wody są głównym źródłem nieliniowości występujących w opisie matematycznym tych obiektów.

Ze względu na silnie nieliniowy charakter dynamiki tych obiektów przy projektowaniu systemów pozycjonowania nie jest możliwe zastosowanie wprost uniwersalnych metod syntezy sterowania liniowego. Prosty regulator liniowy zaprojektowany dla takiego obiektu nie byłby w stanie spełnić narzuconych mu wymagań w całym zakresie stanów dynamicznych przyjmowanych przez obiekt i mógłby zagwarantować jedynie lokalną sta-

bilność układu zamkniętego. Jednym z rozwiązań tego problemu może być podejście polegające na syntezie nieliniowego regulatora, który spełniałby postawione wymagania w całym zakresie stanów dynamicznych, w których może znaleźć się obiekt sterowania [1–6].

Jednak ze względu na znaczny poziom skomplikowania algorytmów sterowania nieliniowego bazujące na nich rozwiązania mogą być trudne do praktycznego zastosowania szczególnie w przypadku tak złożonych obiektów sterowania. Z praktycznego punktu widzenia, często wygodniejsze (w szczególności pod względem minimalizacji nakładów obliczeniowych) mogą okazać się metody wykorzystujące techniki sterowania liniowego oparte na odpowiednio przeprowadzonej linearyzacji opisu matematycznego obiektu. W wyniku takiego podejścia możliwe jest zaprojektowanie adaptacyjnego regulatora liniowego o zmiennych parametrach, który będzie systematycznie dostrajany w zależności od zmieniających się warunków pracy obiektu sterowania. Pewną alternatywą do podejścia adaptacyjnego jest zastosowanie metod sterowania odpornego, jednak zwykle w wyniku ich stosowania otrzymuje się regulatory bardzo wysokiego rzędu [7, 8].

W ostatnich latach zauważalny jest intensywny rozwój technik sztucznej inteligencji wykorzystujących tzw. cyfrowe bliźniaki (ang. *digital twins*) w zastosowaniach przemysłowych, w tym również dla sektora morskiego. Idea ta zakłada tworzenie dynamicznych modeli cyfrowych, odwzorowujących na bieżąco aktualny stan i zachowanie rzeczywistych procesów sterowania. Podejście to znajduje się na etapie wczesnego rozwoju i pomimo dużego potencjału koncepcyjnego jego praktyczne wdrożenie w systemach sterowania obiektami morskimi napotyka wciąż na liczne trudności techniczne i organizacyjne [9].

W wielu przypadkach dobrym, praktycznym rozwiązaniem problemu sterowania nieliniowymi obiektami MIMO jest zapro-

Autor korespondujący:

Michał Brasel, michal.brasel@zut.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 27.09.2025 r., przyjęty do druku 07.11.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

jektowanie grupy liniowych regulatorów wyznaczanych na podstawie lokalnych modeli obiektu zlinearyzowanych w wybranych nominalnych punktach jego pracy. Takie podejście prowadzi najczęściej do układu sterowania składającego się z wielu regulatorów pracujących w strukturze przełączalnej [10] bądź z jednego regulatora adaptacyjnego o parametrach dostrajanych odpowiednio do zmieniających się właściwości dynamicznych obiektu [11–16]. Przełączenie między regulatorami (bądź zmiana wartości parametrów regulatora) odbywa się na podstawie odpowiednio przyjętych sygnałów pomocniczych informujących o znaczących zmianach właściwości dynamicznych obiektu sterowania.

Problemem otwartym w tym podejściu pozostaje określenie sposobu doboru nominalnych punktów pracy biorących udział w syntezy regulatora i ustalenie ich optymalnej ilości. Ustalenie tych cech jest dodatkowym stopniem swobody w projektowaniu układu zamkniętego, mogącym mieć istotne znaczenie z punktu widzenia uzyskiwanej jakości sterowania oraz możliwości praktycznej realizacji takiego rozwiązania.

Niestety nie istnieją żadne uniwersalne metody ich ustalania, co stanowi pewne wyzwanie dla projektanta układu sterowania. Z jednej strony zależy nam na możliwie dokładnym odwzorowaniu zmian właściwości dynamicznych obiektu, co może wiązać się z koniecznością użycia relatywnie dużej liczby nominalnych punktów pracy, a z drugiej strony, ze względów praktycznych, zależy nam na maksymalnym ograniczeniu ich liczby. Zbyt duża liczba nominalnych punktów pracy przyjmowanych do syntezy układu jest jednym z głównych problemów związanych z praktycznym wykorzystaniem tego podejścia [4, 11]. Konieczne jest zatem na etapie projektowania układu wypracowanie odpowiedniego kompromisu między uzyskiwaną jakością sterowania a ilością przyjętych punktów pracy. Dlatego w literaturze pojawiają się publikacje [11], w których podejmowane są próby opracowania procedur umożliwiających redukcję liczby regulatorów użytych w przełączalnej strukturze sterowania (lub odpowiednio liczby zestawów paramentów koniecznych do strojenia regulatora adaptacyjnego).

Badania omawiane w niniejszym artykule dotyczą układu sterowania z adaptacyjnym regulatorem modalnym dedykowanym do zadań dynamicznego pozycjonowania jednostek pływających. Prezentowane wyniki działania układu uzyskano na podstawie badań symulacyjnych przeprowadzonych na nieliniowym modelu statku wiertniczego opisującym jego ruch w trzech stopniach swobody.

Rozważany układ sterowania dostrajany jest zależnie od zmieniających się nominalnych punktów pracy obiektu identyfikowanych na podstawie pochodzących od niego sygnałów pomocniczych. Wyniki uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań pokazują, że odpowiednie przyjęcie sygnałów pomocniczych definiujących nominalne punkty pracy może odgrywać korzystną rolę w procesie ich wyboru oraz redukcji ich liczby. W artykule wykazano, że dla rozpatrywanego obiektu sterowania możliwe jest uzyskanie zadowalającej jakości regulacji przy zastosowaniu prostej siatki przełączeń w dziedzinie trzech niezależnych sygnałów pomocniczych dobranych bezpośrednio jako zmienne stanu obiektu. Zaproponowane podejście pozwala na zastosowanie relatywnie niewielkiej liczby regulatorów (mniejszej w stosunku do rozwiązania zaproponowanego w [11]) bez konieczności stosowania złożonych procedur redukujących ich liczbę. Dzięki temu możliwe jest zredukowanie nakładów obliczeniowych potrzebnych w fazie projektowania układu sterowania oraz zmniejszenie rozmiarów jego struktury. Pozostała część artykułu jest zorganizowana w następujący sposób. W sekcji 2 opisano nieliniowy model matematyczny rozpatrywanego obiektu sterowania. W sekcjach 3 i 4 przedstawiono strukturę proponowanego systemu sterowania oraz omówiono sposób jego syntezy. Wyniki badań symulacyjnych zaproponowanego układu sterowania przedstawiono w sekcji 5, natomiast w sekcji 6 dokonano podsumowania otrzymanych wyników.

2. Opis obiektu sterowania

Nieliniowy model matematyczny statku wiertniczego użyty w niniejszym artykule opracowany został na podstawie badań [17] przeprowadzonych na fizycznym modelu statku o długości $L_{pp} = 94,49$ m, szerokości $B = 15,24$ m, średnim zanurzeniu $H = 5,49$ m i masie DWT $m = 5670$ ton. Statek ten wyposażony był w prosty system dynamicznego pozycjonowania, który umożliwiał utrzymanie kąta kursowego statku i jego pozycji nad punktem wiercenia za pomocą głównego napędu Diesla o mocy 2013 kW i czterech obrotowych pędników azymutalnych, z których każdy miał moc 746 kW.

Nieliniowe równania stanu rozpatrywanego modelu można zapisać następująco [17]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_4 \cos x_3 - x_5 \sin x_3 + V_c \cos \Psi_c \\ \dot{x}_2 &= x_4 \sin x_3 + x_5 \cos x_3 + V_c \sin \Psi_c \\ \dot{x}_3 &= x_6 \\ \dot{x}_4 &= 0,088x_5^2 - 0,132x_4V_s + 0,958x_5x_6 + 0,958u_1 \\ \dot{x}_5 &= -1,4x_5V_s - 0,978x_5^3 / V_s - 0,543x_4x_6 + 0,037x_6|x_6| + 0,544u_2 \\ \dot{x}_6 &= (-0,764x_4x_5 - 1,4x_5V_s + 0,258x_5V_s - 0,162x_6|x_6| + u_3) / J_c\end{aligned}\quad (1)$$

gdzie $V_s = \sqrt{x_4^2 + x_5^2}$ jest prędkością liniową statku względem wody, parametr $J_c = k_{zz}^2 + 0,0431$ opisuje moment bezwładności statku wraz z wodą towarzyszącą (związany z ruchem kątowym statku wokół jego osi pionowej), przy czym parametr $k_{zz} = 0,25$ jest względnym promieniem bezwładności odniesionym do długości statku L_{pp} , natomiast V_c i Ψ_c są odpowiednio prędkością i kierunkiem prądu morskiego.

Równania (1) można zapisać w ogólnej postaci, jako:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), V_c, \Psi_c), \quad (2)$$

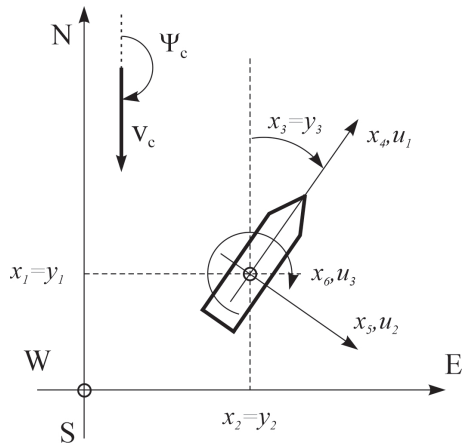
gdzie $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t) \ x_5(t) \ x_6(t)]^T$ oraz $\mathbf{u}(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ u_3(t)]^T$.

Opracowany model opisuje ruch statku w trzech stopniach swobody (wzdłużnym, poprzecznym i obrotowym) i jest modelem bezwymiarowym, w którym wszystkie sygnały występujące w równaniach (wejściowe, wyjściowe i zmienne stanu) są bezwymiarowe [17], co znaczy, że są one odniesione do charakterystycznych parametrów statku związanych odpowiednio z jego wymiarami, masą oraz przyspieszeniem ziemskim. W konsekwencji również czas występujący w rozpatrywanym modelu jest czasem bezwymiarowym przeliczonym przez współczynnik

$\sqrt{L_{pp}/g}$. Wszystkie sygnały wejściowe, wyjściowe i zmienne

stanu obiektu oznaczono symbolicznie na rys. 1.

Trzy pierwsze zmienne stanu opisujące położenie statku i jego orientację są określane w stałym ziemskim układzie odniesienia z osiami skierowanymi na północ (N) i wschód (E) oraz środkiem umieszczonym nad punktem wiercenia. Są to odpowiednio: współrzędne położenia środka ciężkości statku mierzone w osi wzdłużnej $x_1(t)$ i poprzecznej $x_2(t)$ oraz kąt kursowy statku $x_3(t)$ o kierunku dodatnim mierzonym zgodnie z ruchem wskazówek zegara, tak jak to zaznaczono na rys. 1. Kolejne trzy zmienne stanu to prędkości statku względem wody, odpowied-



Rys. 1. Układy współrzędnych odniesienia
Fig. 1. Reference coordinate systems

nio: prędkość w kierunku wzdłużnym $x_1(t)$, prędkość w kierunku poprzecznym $x_2(t)$ oraz prędkość kątową statku $x_3(t)$ mierzona wokół osi pionowej przechodzącej przez środek ciężkości statku. Za sygnały wyjściowe w proponowanym układzie sterowania przyjmuje się bezpośrednio trzy pierwsze zmienne stanu opisujące położenie i orientację statku nad punktem wiercenia:

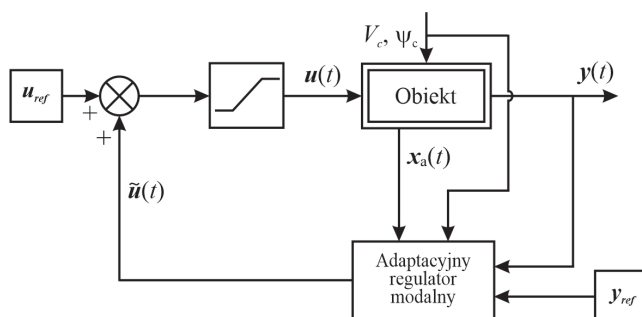
$$y_i(t) = x_i(t) \quad \text{dla} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

Rozpatrywany obiekt ma trzy sygnały wejściowe (sterujące), którymi są: siła działająca na kadłub w osi wzdłużnej $u_1(t)$, siła działająca na kadłub w osi poprzecznej $u_2(t)$ oraz moment obrotowy $u_3(t)$ działający wokół osi pionowej przechodzącej przez środek ciężkości statku. Zarówno składowe prędkości statku względem wody, jak i składowe wektora sygnałów wejściowych określone są w układzie ruchomym związanym z bryłą statku i osiami skierowanymi odpowiednio w kierunku wzdłużnym statku (od rufy do dziobu) i w kierunku poprzecznym statku (z lewej na prawą burzę) oraz ze środkiem umieszczonym w jego środku ciężkości.

3. Struktura układu sterowania

Schemat blokowy proponowanego układu sterowania nieliniowym obiektem MIMO (1)–(3) przedstawiono na rys. 2.

Podstawą działania tego układu jest adaptacyjny regulator modalny o parametrach strojonych zależnie od aktualnych warunków pracy obiektu sterowania. Wszystkie zestawy parametrów wykorzystywane do strojenia regulatora zaprojektowane są dla liniowych modeli obiektu otrzymanych w wyniku linearyzacji równań (1) w wybranych nominalnych punktach jego pracy. Wybór aktualnego zestawu parametrów regulatora dokonywany jest na podstawie wektora sygnałów pomocniczych $x_a(t)$ związanych z aktualnym stanem dynamicznym obiektu. Regulator



Rys. 2. Schemat blokowy proponowanej struktury układu sterowania
Fig. 2. Block diagram of the proposed control system structure

na podstawie sygnałów sprzężenia zwrotnego od wyjść obiektu $y(t)$ oraz przyjętych wartości zadanych y_{ref} wypracowuje składową $\tilde{u}(t)$ sygnału sterującego. Sygnał wyjściowy regulatora dzięki odpowiednim zmianom wartości jego parametrów dostosowywany jest na bieżąco do zmian właściwości dynamicznych obiektu sterowania. Do sygnału wypracowywanego przez regulator dodawana jest składowa u_{ref} sygnałów sterujących, odpowiadająca przyjętym wartościom zadany y_{ref} . W strukturze układu sterowania uwzględniono także ograniczenia dopuszczalnych wartości poszczególnych sygnałów sterujących, przyjętych jako: $u_1(t) \in [-0,035; 0,037]$, $u_2(t) \in [-0,02; 0,02]$, $u_3(t) \in [-0,0026; 0,0026]$, którym odpowiadają rzeczywiste wartości sił i momentu obrotowego, odpowiednio: $[-1,95; 2,06]$ MN, $[-1,11; 1,11]$ MN, $[-13,7; 13,7]$ MNm.

4. Synteza układu sterowania

4.1. Synteza regulatora

Nieliniowy model dynamiki statku (1) można zlinearyzować w otoczeniu nominalnych punktów pracy w wyniku czego otrzymuje się zlinearyzowany opis odpowiadający dynamice obiektu w otoczeniu tego punktu. Nominalny punkt pracy obiektu, rozumiany jest jako punkt równowagi układu (2):

$$0 = f(x_o, u_o, V_c, \Psi_c), \quad (4)$$

w którym statek stoi nieruchomo w układzie odniesienia związanym z ziemią i jednocześnie płynie względem wody przeciwnie do prądu morskiego, zgodnie z warunkiem $\dot{V}_s(t) = -\dot{V}_c$. Nominalne wartości zmiennych stanu x_o oraz sygnałów sterujących u_o można wyznaczyć wprost z algebraicznych równań (4). Dokonanie linearyzacji w pełnym zakresie zmienności nominalnych punktów pracy $\{x_o, u_o\}$ pozwala wyznaczyć lokalne liniowe modele obiektu odwzorowujące jego dynamikę w otoczeniu tych punktów:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A[x(t) - x_o] + B[u(t) - u_o] \\ y(t) - y_o &= C[x(t) - x_o], \end{aligned} \quad (5)$$

z macierzami $\{A, B, C\}$ określonymi jako:

$$\begin{aligned} A &= \left[\frac{\partial f^T(x, u, \cdot)}{\partial x} \right]_{\substack{x=x_o \\ u=u_o}}^T, \\ B &= \left[\frac{\partial f^T(x, u, \cdot)}{\partial u} \right]_{\substack{x=x_o \\ u=u_o}}^T, \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Uzyskane w wyniku linearyzacji parametry lokalnych modeli liniowych (5) wykorzystuje się do syntezy parametrów regulatora przy użyciu standardowych metod syntezy sterowania liniowego. Jedną z możliwości jest zaprojektowanie wielowymiarowego regulatora modalnego [11–13] zbudowanego na bazie obserwatora Luenbergera. W ten sposób można uzyskać ściśle przyczynowe regulatory modalne, które mogą być opisane w przestrzeni stanów w postaci:

$$\dot{\mathbf{x}}_r(t) = \mathbf{A}_r \mathbf{x}_r(t) + \mathbf{B}_r \mathbf{y}(t) + \mathbf{V}_r \quad (6)$$

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{C}_r [\mathbf{x}_r(t) + \mathbf{x}_{ref}],$$

gdzie $\mathbf{A}_r = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{F} - \mathbf{L}\mathbf{C}$, $\mathbf{B}_r = \mathbf{L}$, $\mathbf{C}_r = -\mathbf{F}$,

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{B}(\mathbf{F}\mathbf{x}_{ref} + \mathbf{u}_{ref}) + \mathbf{V}_c,$$

$$\text{oraz } \mathbf{V}_c = [V_c \cos(\Psi_c) \quad V_c \sin(\Psi_c) \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T.$$

Wektory zmiennych stanu $\mathbf{x}_{ref}$ i sygnałów sterujących $\mathbf{u}_{ref}$ w powyższych wyrażeniach odpowiadają zadanemu (końcowemu) punktowi pracy i są wyliczane z algebraicznych równań (4) przy założeniu $\vec{V}_s(t) = -\vec{V}_c$. Synteza regulatora (6) sprowadza się do wyznaczenia macierzy sprzężenia zwrotnego $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ od zmiennych stanu oraz macierzy wzmocnień obserwatora $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$. Obie te macierze, będące głównymi parametrami regulatora modalnego, mają za zadanie rozwiązanie problemu lokowania biegunów w pożądanym miejscach płaszczyzny zespolonej. Macierz sprzężeń zwrotnych $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ ma za zadanie lokować bieguny układu zamkniętego, natomiast macierz wzmocnień $\mathbf{L} \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$ bieguny obserwatora Luenbergera. W celu wyznaczenia tych macierzy można (dla podanych zbiorów poświadanych lokalizacji biegunów) zastosować standardową procedurę *place.m* dostępną w środowisku MATLAB/Simulink. W celach porównawczych, wartości poświadanych biegunów (zarówno dla układu zamkniętego, jak i obserwatora) przyjęto następująco [11–13]:

$$s_1 = -0,4; \quad s_2 = -0,45; \quad s_3 = -0,14; \quad s_4 = -0,16; \quad s_5 = -0,15; \\ s_6 = -0,18;$$

oraz

$$s_{o1} = -0,8; \quad s_{o2} = -0,9; \quad s_{o3} = -0,28; \quad s_{o4} = -0,32; \quad s_{o5} = -0,3; \\ s_{o6} = -0,35.$$

4.2. Zbiór nominalnych punktów pracy obiektu

Identyfikacja aktualnych punktów pracy obiektu (1) potrzebnych do strojenia regulatora (6) pracującego w strukturze przedstawionej na rys. 2 dokonywana jest na podstawie sygnałów pomocniczych $\mathbf{x}_a(t)$. W rozwiązaniach proponowanych [11–13], do wyznaczenia zbioru nominalnych punktów pracy obiektu (1) zastosowano siatkę na bazie dwóch sygnałów pomocniczych:

$$\mathbf{x}_a(t) = [\mathbf{V}_s(t) \quad \Psi_c - \mathbf{x}_3(t)]^T \quad (7)$$

z następującym podziałem:

$$V_s \in [-4,9; 4,9; 0,2] \text{ Mm / h} \\ (\Psi_c - \mathbf{x}_3(t)) \in [0^\circ; 360^\circ; 5^\circ] \quad (8)$$

w wyniku czego otrzymuje się łącznie 3650 zestawów parametrów regulatora modalnego.

Jednym z głównych problemów praktycznej realizacji tego podejścia jest odpowiedni dobór oraz minimalizacja liczby nominalnych punktów pracy, w których dokonuje się linearyzacji modelu obiektu na potrzeby syntezy regulatora. Układ zawierający bardzo dużą liczbę zaprojektowanych regulatorów może być trudny do praktycznej implementacji, dlatego poszukiwane są skuteczne metody redukcji ich liczby. W [11] zaproponowano dwuetapową procedurę redukcji liczby regulatorów, która polega w pierwszym etapie na zaprojektowaniu stosunkowo gęstej siatki nominalnych punktów pracy, aby następnie w drugim etapie odpowiednio ją zredukować. Proponowana procedura redukcji polega na porównywaniu wybranych cech regulatorów zaprojek-

towanych w kolejnych nominalnych punktach pracy (posługując się odpowiednio określoną miarą zmienności ich parametrów). W przypadku spełnienia odpowiednich warunków (stwierdzenia wystarczająco małych różnic między bliskimi sobie regulatorami) grupa sąsiadujących punktów pracy jest zastępowana jednym punktem, któremu odpowiada jeden wspólny zestaw parametrów regulatora. Wykazano [11], że dla rozważanego obiektu sterowania (1) zastosowanie takiej procedury jest możliwe, choć niestety, zależnie od kierunku sprawdzania warunków „scalania” regulatorów uzyskuje się niejednoznaczne wyniki redukcji. W wyniku zastosowania proponowanej [11] procedury dla początkowej siatki (8) udało się zmniejszyć ich łączną liczbę z 3650 do 93 regulatorów.

W rozwiązaniu zaproponowanym w artykule przyjęto prostą siatkę nominalnych punktów pracy, bazującą nie na dwóch sygnałach pomocniczych lecz na trzech, przyjętych bezpośrednio w postaci kolejnych zmiennych stanu:

$$\mathbf{x}_a(t) = [x_3(t) \quad x_4(t) \quad x_5(t)]^T \quad (9)$$

z następującym podziałem:

$$x_3 \in [-180^\circ; 180^\circ; 90^\circ] \\ x_4 \in [-5; 5; 3\frac{1}{3}] \text{ Mm / h} \\ x_5 \in [-5; 5; 3\frac{1}{3}] \text{ Mm / h} \quad (10)$$

zachowując tożsame zakresy zmienności kąta kursowego oraz prędkości statku względem wody [11–13]. W wyniku takiego podziału udało się uzyskać łączną liczbę 64 regulatorów, co daje wynik o około 30 % niższy od łącznej liczby regulatorów [11] uzyskanej po zastosowaniu procedury redukcji ich liczby.

5. Wyniki badań symulacyjnych

Wszystkie badania symulacyjne proponowanego układu sterowania zostały przeprowadzone w strukturze przedstawionej na rys. 2 z adaptacyjnym regulatorem modalnym (6) strojonym według podziału nominalnych punktów pracy zgodnie z (10). Symulacje przeprowadzono z wykorzystaniem nieliniowego modelu statku wiertniczego (1–3) opisującego wolnozmienne ruchy w trzech stopniach swobody dla przyjętych wartości prędkości (mierzona w węzłach – milach morskich Mm/h) i kierunku prądu morskiego równych odpowiednio: $V_c = 2 \text{ Mm/h}$ oraz $\Psi_c = 180^\circ$. Wektor wartości zadanych w badanym układzie sterowania przyjęto jako $\mathbf{y}_{ref} = [0 \quad 0 \quad 0]^T$, co odpowiada ustalonej pozycji statku nad zadanym punktem wiercenia o współrzędnych $x_{1ref} = 0$ i $x_{2ref} = 0$, z dziobem skierowanym w kierunku północnym $x_{3ref} = 0$.

Jakość działania proponowanego układu sterowania zilustrowano na kilku różnych przypadkach dynamicznego pozycjonowania statku, dobranych tak, aby uwzględnić możliwie pełen zakres warunków pracy obiektu związanych ze zmianą jego właściwości dynamicznych. W szczególności warunki początkowe obiektu sterowania w przeprowadzonych eksperymentach zostały dobrane tak, aby statek w stanach przejściowych był zmuszony dopływać nad punkt wiercenia z różnych kierunków.

W badaniach symulacyjnych przyjęto cztery główne przypadki (A, B, C, D) warunków początkowych obiektu, przy czym dla każdego z nich rozważono dwie różne wartości początkowe kąta kursowego, odpowiednio: $x_3(0) = 1 \text{ rad}$ oraz $x_3(0) = -1 \text{ rad}$, co razem daje osiem eksperymentów dopływania nad zadany punkt wiercenia, oznaczonych jako: A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2:

Przypadek A:

$$\mathbf{x}_{A1}(0) = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\mathbf{x}_{A2}(0) = [1 \ 1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Przypadek B:

$$\mathbf{x}_{B1}(0) = [-1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\mathbf{x}_{B2}(0) = [-1 \ 1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Przypadek C:

$$\mathbf{x}_{C1}(0) = [-1 \ -1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\mathbf{x}_{C2}(0) = [-1 \ -1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Przypadek D:

$$\mathbf{x}_{D1}(0) = [1 \ -1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\mathbf{x}_{D2}(0) = [1 \ -1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

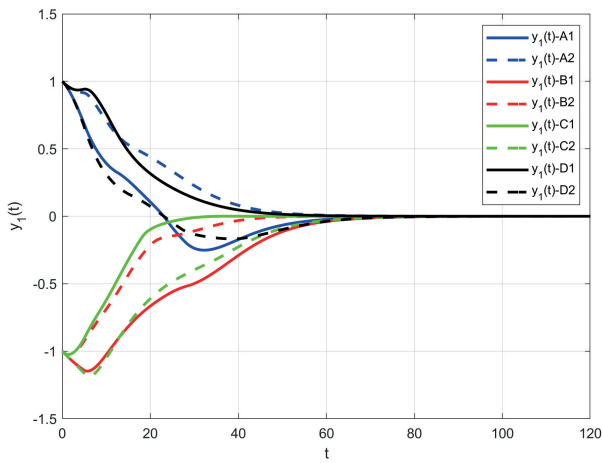
Wartości początkowe położenia statku, podane jako wielkości bezwymiarowe $x(0) = \pm 1$ oraz $x_2(0) = \pm 1$, odpowiadają rzeczywistemu przesunięciu środka ciężkości statku od zadanego punktu wiercenia w każdym rozpatrywanym przypadku o odległość równą $1,4 \cdot L_{pp} \approx 134$ m. Wartości początkowe skła-

dowych prędkości statku względem wody przyjęto jako zerowe, co oznacza, że w początkowej fazie pozycjonowania obiekt musi wypracować odpowiednio dużą prędkość względem wody w celu przezwyciężenia prądu morskiego. Może się to wiązać z nasycaniem sygnałów sterujących w początkowej fazie procesu, jednak nie pogarsza to znacząco uzyskiwanej jakości sterowania.

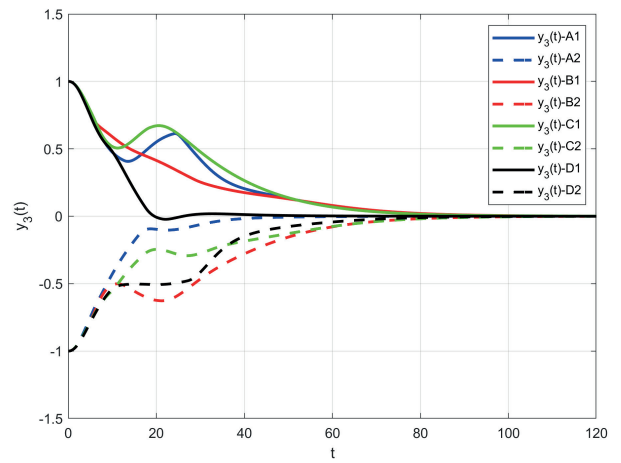
Na rysunkach 3–5 przedstawiono uzyskane przebiegi czasowe sygnałów wyjściowych badanego układu sterowania dla przyjętych zestawów warunków początkowych. Natomiast na rys. 6 przedstawiono otrzymane sygnały sterujące, odpowiadające wybranemu przypadkowi pozycjonowania (C1).

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że zaproponowany układ sterowania spełnia postawione wymagania zapewniając zadowalającą jakość pozycjonowania przyjętego obiektu sterowania. Pomimo nieliniowych właściwości obiektu i niekorzystnego wpływu dynamicznych sprzężeń skrośnych między jego wejściami i wyjściami, we wszystkich rozpatrywanych przypadkach statek dopływa nad zadany punkt wiercenia bez znaczących przeregulowań, a sygnały sterujące mieszczą się w zakresach dopuszczalnych wartości. Szybkości ustalania się przebiegów czasowych na rysunkach 3–5 nie odbiegają od siebie znacząco, mimo bardzo zróżnicowanych warunków początkowych.

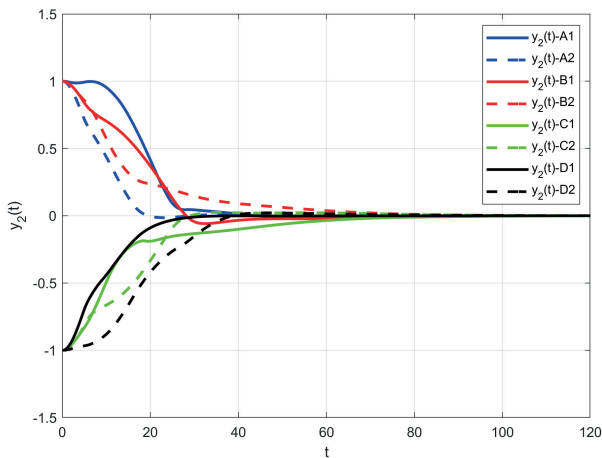
W przypadku potrzeby porównywania szybkości ustalania położenia statku w poszczególnych stopniach swobody ruchu



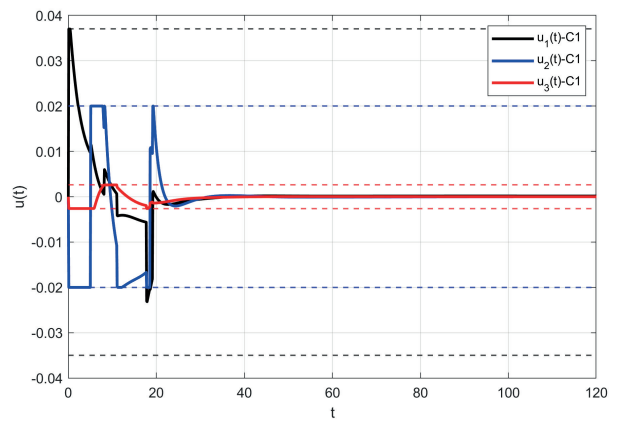
Rys. 3. Wykresy współrzędnej położenia statku $y_1(t)$ dla różnych przypadków pozycjonowania dynamicznego
Fig. 3. Plots of the ship's position coordinate $y_1(t)$ for various dynamic positioning scenarios



Rys. 5. Wykresy współrzędnej położenia statku $y_3(t)$ dla różnych przypadków pozycjonowania dynamicznego
Fig. 5. Plots of the ship's position coordinate $y_3(t)$ for various dynamic positioning scenarios



Rys. 4. Wykresy współrzędnej położenia statku $y_2(t)$ dla różnych przypadków pozycjonowania dynamicznego
Fig. 4. Plots of the ship's position coordinate $y_2(t)$ for various dynamic positioning scenarios



Rys. 6. Wykresy sygnałów sterujących $u(t)$ dla wybranego przypadku dynamicznego pozycjonowania
Fig. 6. Plots of control signals $u(t)$ for a selected dynamic positioning scenario

Tab. 1. Wartości całkowego wskaźnika jakości regulacji IAE dla różnych przypadków pozycjonowania dynamicznego
Tab. 1. Values of the IAE performance index for various dynamic positioning scenarios

Lp.	IAE	A	B	C	D
1	IAE ₁	14,6	31,9	12,5	17,6
	IAE ₂	19,6	17,0	15,3	10,1
	IAE ₃	24,4	21,9	27,0	10,0
	ΣIAE	58,6	70,8	54,8	37,7
2	IAE ₁	19,7	15,7	29,6	12,9
	IAE ₂	9,3	16,7	15,8	20,1
	IAE ₃	11,0	26,9	20,2	22,6
	ΣIAE	40,0	59,4	65,6	55,6
		IAE _A = 98,6	IAE _B = 130,2	IAE _C = 120,4	IAE _D = 93,3

można posłużyć się całkowym wskaźnikiem jakości regulacji wyrażonym w postaci:

$$IAE_i = \int |y_{ref_i} - y_i(t)|dt, \tag{11}$$

gdzie *i* oznacza *i*-ty stopień swobody ruchu.

Uzyskane wartości wskaźnika (11) oraz jego wartości wypadkowe (sumy ze wszystkich stopni swobody) dla każdego rozpatrywanego przypadku pozycjonowania przedstawiono w tab. 1. Porównując wypadkowe wartości wskaźnika (11) dla poszczególnych przypadków pozycjonowania można zauważyć, że jakości sterowania uzyskiwane w przypadkach A i D (IAE_A = 98,6; IAE_D = 93,3) oraz B i C (IAE_B = 130,2; IAE_C = 120,4) mają zbliżone do siebie wartości. Uzyskanie mniejszych wartości wskaźników w przypadkach A i D w porównaniu do przypadków B i C wytłumaczyć można relacją początkowej pozycji statku w stosunku do kierunku prądu morskiego. W przypadkach A i D kierunek przemieszczania się statku jest zgodny z kierunkiem prądu morskiego (prąd morski wspomaga przybliżanie się statku nad punkt wiercenia), natomiast w przypadkach B i C jest odwrotnie – prąd morski utrudnia przemieszczanie się statku do punktu zadanego, co może skutkować większymi wartościami wskaźników IAE.

6. Podsumowanie

Wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań potwierdzają, że podejście bazujące na projektowaniu układów regulacji strojonych odpowiednio do zmieniających się punktów pracy obiektu jest wykonalne i może przynosić zadowalające rezultaty nawet w przypadku nieliniowych obiektów MIMO. Regulatory zaprojektowane jedynie dla wybranych ustalonych punktów pracy obiektu działają poprawnie mimo tego, że w rzeczywistości muszą pracować także we wszystkich stanach przejściowych, w których znajduje się obiekt w trakcie trwania procesu. Wadą prezentowanego podejścia może być (spowodowana przełączalnym charakterem działania układu) możliwość występowania gwałtownych zmian sygnałów sterujących, które mogą się nasilać wraz ze zmniejszaniem liczby regulatorów. Jeśli realizacja takich sygnałów sterujących byłaby problematyczna, nieciągłości te można redukować lub nawet eliminować wykorzystując odpowiednie algorytmy logiki rozmytej [18–20] albo

właściwości aproksymacyjne sieci neuronowych [13, 14]. W przypadku występowania zbyt silnych efektów dynamicznych sprzężeń skrośnych między poszczególnymi torami regulacji, strukturę układu sterowania można rozszerzyć o dodatkowe bloki odprężające, podobnie jak w [10].
Odpowiednie przyjęcie sygnałów pomocniczych, na bazie których definiowane są punkty pracy użyte do strojenia regulatora może ułatwiać proces syntezy układu sterowania. W niniejszym artykule wykazano, że w rozważanym przypadku jest możliwe ustalenie prostej siatki przełączeń (na podstawie trzech niezależnych sygnałów pomocniczych) z relatywnie małą liczbą węzłów, bez konieczności stosowania algorytmów redukujących ich liczbę. Dzięki podejściu przedstawionemu w artykule, uzyskano o około 30 % mniejszą (w stosunku do rozwiązania [11]) liczbę zestawów parametrów regulatora pracującego w strukturze adaptacyjnej. Uzyskane wyniki odnoszą się do konkretnego przypadku obiektu i mają raczej charakter szczególny. Poszukiwanie efektywnych procedur ograniczających liczbę regulatorów użytych w układzie sterowania ogólnie jest jednak bardzo potrzebne i może znacznie ułatwiać ich realizację praktyczną. W ogólności problem opracowania uniwersalnych sposobów optymalnego doboru punktów pracy do syntezy regulatorów w omawianych metodach sterowania pozostaje otwarty.

Bibliografia

1. Witkowska A., Śmierzchalski R., *Adaptive Backstepping Tracking Control for an over-Actuated DP Marine Vessel with Inertia Uncertainties*, “International Journal of Applied Mathematics and Computer Science”, Vol. 28, No. 4, 2018, 679–693, DOI: 10.2478/amcs-2018-0052.
2. Witkowska A., Rynkiewicz T.N., *Dynamically Positioned Ship Steering Making Use of Backstepping Method and Artificial Neural Networks*, “Polish Maritime Research”, Vol. 25, No. 4, 2018, 5–12, DOI: 10.2478/pomr-2018-0126.
3. Zwierzewicz Z., *Nonlinear Adaptive Tracking-Control Synthesis for General Linearly Parametrized Systems*, “Automation and Robotics”, I-Tech Education and Publishing, 2008, DOI: 10.5772/61116.
4. Huba M., Skogestad S., Fikar M., Hovd M., Johansen T.A., Rohal-Ilkiv B., *Selected Topics on Constrained and Nonlinear Control*, Workbook Dolný Kubín, Slovakia, ROSA, 2011.
5. Khalil H.K., *Nonlinear systems*, Prentice Hall, 2001.
6. Fabri S.G., Kadirkamanathan V., *Functional Adaptive Control, An Intelligent Systems Approach*, 2001, DOI: 10.1007/978-1-4471-0319-6.
7. Gierusz W., Rybczak M., *Effectiveness of Multidimensional Controllers Designated to Steering of the Motions of Ship at Low Speed*, “Sensors”, Vol. 20, No. 12, 2020, DOI: 10.3390/s20123533.
8. Gierusz W., *The H2 and Robust Hinf Regulators Applied to Multivariable Ship Steering*, “TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation”, Vol. 3, No. 4, 2009, 431–440.
9. Madusanka N.S., Fan Y., Yang S., Xiang X., *Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends*, “Journal of Marine Science and Engineering”, Vol. 11, No. 5, 2023, DOI: 10.3390/jmse11051021.
10. Bańka S., Brasel M., Dworak P., Latawiec K.J., *Switched-structure of linear MIMO controllers for positioning of a drillship on a sea surface*, 15th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Miedzydroje, Poland, 2010, 249–254, DOI: 10.1109/MMAR.2010.5587228.
11. Dworak P., *A reduction of a controller set of switched controller for positioning of a drillship on a sea surface*,

- 17th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR), Miedzydroje, Poland, 2012, 325–330, DOI: 10.1109/MMAR.2012.6347897.
12. Bańka S., Dworak P., Jaroszewski K., *Linear adaptive structure for control of a nonlinear MIMO dynamic plant*, “International Journal of Applied Mathematics and Computer Science”, Vol. 23, No. 1, 2013, 47–63, DOI: 10.2478/amcs-2013-0005.
13. Bańka S., Dworak P., Jaroszewski K., *Design of a multi-variable neural controller for control of a nonlinear MIMO plant*, “International Journal of Applied Mathematics and Computer Science”, Vol. 24, No. 2, 2014, 357–369, DOI: 10.2478/amcs-2014-0027.
14. Dworak P., Jaroszewski K., *Neural networks for a dynamic decoupling of a nonlinear MIMO dynamic plant*, 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzydroje, Poland, 2015, 788–793, DOI: 10.1109/MMAR.2015.7283976.
15. Brasel M., *Adaptive LQR control system for the nonlinear 4-DoF model of a container vessel*, 18th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics (MMAR), Miedzydroje, Poland, 2013, 711–716, DOI: 10.1109/MMAR.2013.6669999.
16. Brasel M., *A gain-scheduled multivariable LQR controller for hybrid excitation synchronous machine*, 20th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzydroje, Poland, 2015, 655–658, DOI: 10.1109/MMAR.2015.7283952.
17. Wise D.A., English J.W., *Tank and wind tunnel tests for a drill-ship with dynamic position control*, Offshore Technology Conference. No. OTC 2345, Dallas, Texas, 1975, DOI: 10.4043/2345-MS.
18. Pen C.-L., Chang W.-J., Lin Y.-H., *Fuzzy Controller Design Approach for a Ship’s Dynamic Path Based on AIS Data with the Takagi-Sugeno Fuzzy Observer Model*, “Journal of Marine Science and Engineering”, Vol. 11, No. 6, 2023, DOI: 10.3390/jmse11061181.
19. Zheng M., Zhou Y., Yang S., *Robust Fuzzy Sampled-Data Control for Dynamic Positioning Ships*, “Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)”, Vol. 23, 2018, 209–217, DOI: 10.1007/s12204-018-1931-z.
20. Chang W.-J., Chen G.-J., Yeh Y.-L., *Fuzzy Control of Dynamic Positioning Systems for Ships*, “Journal of Marine Science and Technology”, Vol. 10, No. 7, 2002, 47–53, DOI: 10.51400/2709-6998.2300.

Design of an Adaptive Pole Placement Controller for a Nonlinear Drilling Vessel Model

Abstract: The article presents a dynamic positioning system for a drilling vessel described by a nonlinear MIMO model. The proposed control method is based on a structure with a linear pole placement controller with stepwise switchable parameter values. The controller synthesis is carried out by linearization of the nonlinear plant model at its operating points. From a practical point of view, the main challenge in using this method is the appropriate selection of operating points for controller synthesis and minimizing their number. The number of selected operating points, as well as the proper definition of auxiliary signals on which these points are based, can significantly affect the resulting control quality. The article proposes a simple method for selecting nominal operating points based on three independent auxiliary signals. The operation of the proposed control system is illustrated with example simulation results of vessel positioning under different initial conditions.

Keywords: dynamic positioning systems, multivariable control systems, nonlinear systems, adaptive control, pole placement control

mgr inż. Michał Brasel

michal.brasel@zut.edu.pl

ORCID: 0000-0002-2925-2370



Asystent w Katedrze Automatyki i Robotyki na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Jego główne zainteresowania badawcze obejmują zagadnienia związane z cybernetyką, a w szczególności: z analizą i syntezą wielowymiarowych układów sterowania, syntezą sterowania nieliniowego i optymalnego, syntezą precyzyjnego sterowania obiektami o wielu stopniach swobody ruchu, modelowaniem i optymalizacją procesów biotechnologicznych.