

DOI:10.5604/20830157.1109375

# ADAPTACYJNY REGULATOR LQR W UKŁADZIE STEROWANIA KĄTEM KURSOWYM I PRĘDKOŚCIĄ STATKU OPISANEGO NIELINIOWYM MODELEM DYNAMICZNYM MIMO

Michał Brasel

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano adaptacyjny układ sterowania kątem kursowym i prędkością statku opisanego nieliniowym modelem dynamicznym MIMO (ang. Multi-input, Multi-Output) o czterech stopniach swobody ruchu (ang. Four-Degrees-of-Freedom, 4-DoF). Przedstawiony model statku jest silnie nieliniowy i uwzględnia nie tylko ograniczenia saturacyjne sygnałów sterujących ale także dynamikę maszyny sterowej i napędu głównego. Głównym zadaniem zaprojektowanego adaptacyjnego regulatora LQR jest sterowanie kątem kursowym statku i jego prędkością względem wody. Poszczególne zestawy parametrów regulatora użyte w procesie adaptacji zostały wyznaczone na podstawie linearyzacji modelu statku w wybranych nominalnych punktach pracy. W końcowej części artykułu przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zaprojektowanego regulatora w układzie z pełnym nieliniowym modelem statku.

**Słowa kluczowe:** sterowanie optymalne, sterowanie adaptacyjne, obiekty nieliniowe, nieliniowy model statku

## ADAPTIVE LQR COURSE-KEEPING CONTROLLER FOR THE NONLINEAR MIMO MODEL OF A CONTAINER VESSEL

**Abstract.** In the paper an adaptive control system for the nonlinear 4-DoF model of a container vessel is presented. The considered model of the ship includes input signals saturations and dynamics of actuators. Main goal of the presented control system is control of the course angle and speed of the ship relative to water. The system synthesis is carried out by means of LQ-optimal control method. Sets of controller parameters are designed using linearization of the considered model in the nominal steady-state operating points of the ship. The final part of the paper includes simulation results of control system operation with full nonlinear MIMO model of the container vessel.

**Keywords:** optimal control, adaptive control, nonlinear systems, nonlinear model of a ship

### Wstęp

Zagadnienia związane ze sterowaniem nieliniowymi obiektami dynamicznym MIMO są nadal przedmiotem ciągłych badań i źródłem wielu nierozwiązanych problemów [1-4, 6, 7, 9]. Przykładem takich obiektów mogą być wszelkie obiekty fizyczne o wielu stopniach swobody ruchu, takie jak pływające jednostki morskie, manipulatory przemysłowe czy obiekty latające.

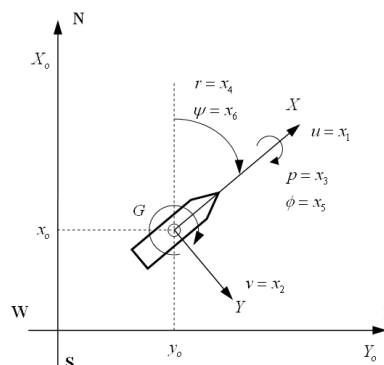
W prezentowanym artykule obiektem sterowania jest nieliniowy model matematyczny kontenerowca opisujący jego przemieszczenie w czterech stopniach swobody ruchu. Wraz ze zmianą parametrów ruchu statku (poszczególnych prędkości składowych statku względem wody) zmieniają się oddziaływania hydrodynamiczne związane z naporem wody na kadłub. Charakter tych zmian jest silnie nieliniowy, co powoduje duże trudności w sterowaniu ruchem statku. Jako rozwiązanie tego problemu w artykule proponuje się zastosowanie adaptacyjnego regulatora LQR o parametrach zmieniających się skokowo [2-4, 6, 7, 9], zależnie od aktualnych właściwości dynamicznych jednostki pływającej. Głównym zadaniem zaprojektowanego regulatora LQR jest sterowanie kątem kursowym statku i jego prędkością postępową względem wody. W artykule przedstawiono model statku uwzględniający dynamikę urządzeń wykonawczych i ograniczenia saturacyjne sygnałów sterujących, następnie opisano proces syntezy regulatora bazujący na linearyzacji modelu obiektu w nominalnych punktach pracy i procedurę adaptacji parametrów tego regulatora. Na koniec przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zaprojektowanego układu sterowania wraz z pełnym nieliniowym modelem statku.

### 1. Nieliniowy model matematyczny statku

W pracy wykorzystano nieliniowy model matematyczny opisujący statek - kontenerowiec wyposażony w jednośrubowy napęd główny ze sterem. Nominalne reżimy pracy takiego statku cechują się dużymi prędkościami statku względem wody (szczególnie prędkości wzdłużnej), a podstawowym celem sterowania jest regulacja kąta kursowego statku i prędkości wzdłużnej względem wody. Parametry szczegółowe statku:

Długość statku:  $L=175\text{m}$ , szerokość:  $B=25,4\text{m}$ , średnie zanurzenie:  $d=8,5\text{m}$ .

Przyjęto następujące oznaczenia prędkości liniowych i kątowych statku w poszczególnych stopniach swobody ruchu:  $u$  - składowa wzdłużna prędkości liniowej statku względem wody,  $v$  - składowa poprzeczna prędkości liniowej statku względem wody,  $p$  - prędkość kątowa statku wokół osi wzdłużnej,  $r$  - prędkość kątowa statku wokół osi pionowej, oraz oznaczenia odpowiadających im współrzędnych położeniowych określanych w nieruchomym układzie odniesienia związanym z ziemią:  $x_o$  - współrzędna położenia środka ciężkości statku w kierunku N-S,  $y_o$  - współrzędna położenia środka ciężkości statku w kierunku W-E,  $\phi$  - kąt kołysania bocznego statku,  $\psi$  - kąt kursowy statku. Wszystkie zmienne występujące w opisie matematycznym ruchu statku zaznaczono na rys. 1.



Rys. 1. Układy odniesienia statku

Ogólne nieliniowe równania ruchu statku w 4-DoF są następujące [5, 8]:

$$\begin{aligned} (m + m_x) \dot{u} - (m + m_y) vr &= X \\ (m + m_y) \dot{v} + (m + m_x) ur + m_y \alpha \dot{r} - m_y l_y \dot{p} &= Y \\ (I_x + J_x) \dot{p} - m_y l_y \dot{v} - m_x l_x ur + WGM\phi &= K \\ (I_z + J_z) \dot{r} + m_y \alpha \dot{v} &= N - Yx_G \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:  $m$  oznacza masę statku;  $m_x$  i  $m_y$  masy dodane w kierunkach  $X$  i  $Y$ ;  $J_x$  i  $J_z$  dodane momenty bezwładności w osiach  $X$  i  $Z$ ;  $l_x$  i  $l_z$

momenty bezwładności statku w osiach w osiach  $X$  i  $Z$ . Ponadto,  $\alpha_y$  oznacza współrzędną w kierunku osi  $X$  środka masy  $m_y$ ;  $l_x$  i  $l_y$  współrzędne w kierunku osi  $Z$  środków mas  $m_x$  i  $m_y$ ;  $x_G$  współrzędną wzdłużną środka ciężkości statku;  $GM$  wysokość metacentryczną statku.

Hydrodynamiczne siły  $X$ ,  $Y$  i momenty  $K$ ,  $N$  w powyższych równaniach określone są następująco:

$$X = X_{uu} |u| u + (1-t)T + X_{vr} vr + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 + X_{\phi\phi} \phi^2 + c_{RX} F_N \sin(\delta), \quad (2)$$

$$Y = Y_v v + Y_r r + Y_p p + Y_\phi \phi + Y_{vv} v^3 + Y_{rr} r^3 + Y_{vr} v^2 r + Y_{vr} vr^2 + Y_{v\phi} v^2 \phi + Y_{v\phi} v \phi^2 + Y_{r\phi} r^2 \phi + Y_{r\phi} r \phi^2 + (1+a_H) F_N \cos(\delta), \quad (3)$$

$$N = N_v v + N_r r + N_p p + N_\phi \phi + N_{vv} v^3 + N_{rr} r^3 + N_{vr} v^2 r + N_{vr} vr^2 + N_{v\phi} v^2 \phi + N_{v\phi} v \phi^2 + N_{r\phi} r^2 \phi + N_{r\phi} r \phi^2 + (x_R + a_H x_H) F_N \cos(\delta), \quad (4)$$

$$K = K_v v + K_r r + K_p p + K_\phi \phi + K_{vv} v^3 + K_{rr} r^3 + K_{vr} v^2 r + K_{vr} vr^2 + K_{v\phi} v^2 \phi + K_{v\phi} v \phi^2 + K_{r\phi} r^2 \phi + K_{r\phi} r \phi^2 - (1+a_H) z_R F_N \cos(\delta). \quad (5)$$

gdzie: siła  $F_N$  określona jest jako:

$$F_N = \frac{-6.13\Delta}{\Delta + 2.25} \frac{A_R}{L^2} (u_R^2 + v_R^2) \sin(\alpha_R), \quad (6)$$

gdzie:

$$\alpha_R = \delta + \tan^{-1}(v_R / u_R), \quad (7)$$

$$u_R = u_p \varepsilon \sqrt{1 + 8kK_T / (\pi J^2)}, \quad (8)$$

$$v_R = \gamma v + c_{Rr} r + c_{Rrr} r^3 + c_{Rrv} r^2 v, \quad (9)$$

gdzie:

$$J = u_p V / (nD), \quad (10)$$

$$K_T = 0.527 - 0.455J, \quad (11)$$

$$u_p = \cos(v) \left[ (1-w_p) + \tau \left\{ (v + x_p r)^2 + c_{pv} v + c_{pr} r \right\} \right]. \quad (12)$$

Pozostałe wartości parametrów modelu statku użyte w powyższych równaniach podane są w pracy [5]. Aktualna prędkość postępową statku względem wody wyraża się wzorem:

$V = \sqrt{u^2 + v^2}$ . Sygnałami sterującymi dla tego modelu statku są:  $\delta$  (wychylenie steru) i  $n$  (prędkość śruby głównej).

## 2. Synteza adaptacyjnego regulatora LQR

Powyższy model ruchów statku może być zapisany w postaci nieliniowych równań w przestrzeni stanów:

$$\dot{x}_2(t) = f(x_2(t), u(t)) \quad (13)$$

$$y(t) = g(x_2(t), u(t)),$$

gdzie: semi-wektor stanu statku zdefiniowany jest następująco:

$$x_2(t) = [u \ v \ p \ r \ \phi \ \psi]^T \quad (14)$$

a wektory sygnałów wyjściowych i wejściowych:

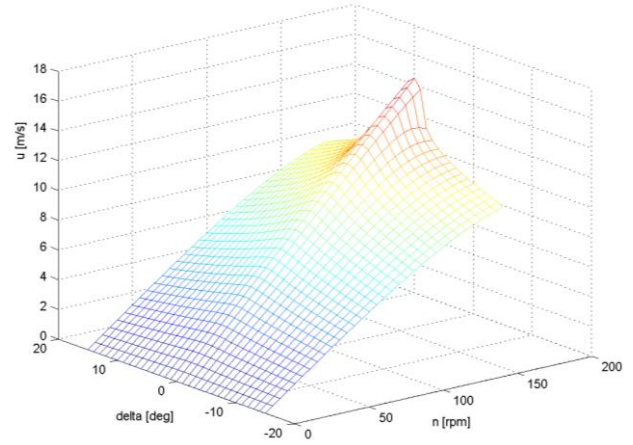
$$y(t) = [u(t) \ \psi(t)]^T \quad (15)$$

$$u(t) = [\delta(t) \ n(t)]^T.$$

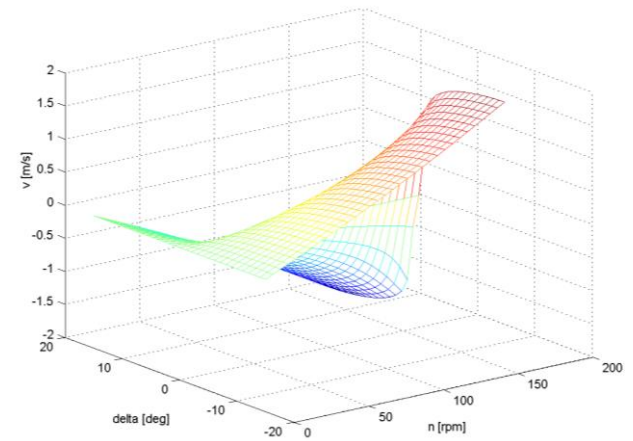
W celu syntezy układu sterowania model ten jest linearyzowany w nominalnych punktach pracy statku. Nominalny reżim pracy statku zdefiniowany jest następująco:

$$x_{2n} = [u_n \ v_n \ 0 \ r_n \ \phi_n \ \psi_n]^T. \quad (16)$$

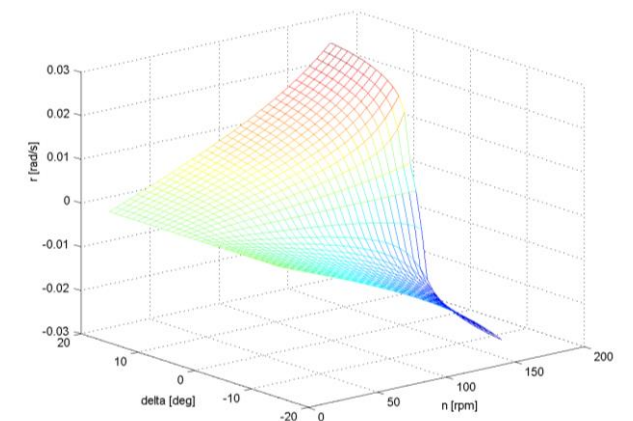
Wartości zmiennych stanu:  $u_n$ ,  $v_n$ ,  $r_n$ ,  $\phi_n$  zostały wyznaczone w symulacyjnych próbach cyrkulacji statku dla sygnałów sterujących:  $\delta_o$  and  $n_o$ . Zakresy zmian tych sygnałów są następujące:  $\delta_o = \langle -15 \div 15 \rangle \text{deg}$  co 1 deg i  $n_o = \langle 5 \div 160 \rangle \text{rpm}$  co 5 rpm. Daje to razem 992 nominalne punkty pracy statku. Każda kombinacja sygnałów sterujących i odpowiadających im parametrów ruchu statku definiuje nam nominalny reżim pracy statku. Zależności prędkości wzdłużnej  $u_n(\delta_o, n_o)$ , bocznej  $v_n(\delta_o, n_o)$  oraz kątowej  $r_n(\delta_o, n_o)$  statku od sygnałów sterujących w nominalnych punktach pracy statku pokazano na poniższych rysunkach.



Rys. 2. Wartości prędkości wzdłużnej statku w nominalnych punktach pracy



Rys. 3. Wartości prędkości bocznej statku w nominalnych punktach pracy



Rys. 4. Wartości prędkości kątowej statku w nominalnych punktach pracy

W wyniku linearyzacji tego modelu w całym zakresie nominalnych sygnałów sterujących otrzymuje się zestaw liniowych modeli statku:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_2(t) &= \mathbf{A}_2[\mathbf{x}_2(t) - \mathbf{x}_{2n}] + \mathbf{B}_2[\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_n] \\ \mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_n &= \mathbf{C}_2[\mathbf{x}_2(t) - \mathbf{x}_{2n}], \end{aligned} \quad (17)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_2 &= \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}^T(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \right]_{\substack{\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_{2n} \\ \mathbf{u} = \mathbf{u}_n}}^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} & a_{15} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B}_2 &= \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{u}} \mathbf{f}^T(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \right]_{\substack{\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_{2n} \\ \mathbf{u} = \mathbf{u}_n}}^T = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{21} & b_{31} & b_{41} & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} & b_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C}_2 &= \left[ \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{g}^T(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \right]_{\substack{\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_{2n} \\ \mathbf{u} = \mathbf{u}_n}}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (18)$$

gdzie: poszczególne elementy  $a_{ij}$  i  $b_{ij}$  zależą od prędkości:  $u$ ,  $v$ ,  $r$  statku względem wody, kąta przechylenia bocznego  $\phi$  statku i sygnałów sterujących  $\mathbf{u}_n = [\delta_o \ n_o]^T$  w nominalnym punkcie pracy statku.

Dodatkowo dla celów syntezy układu sterowania przyjęto prosty model dynamiki maszyny sterowej w postaci liniowego układu pierwszego rzędu ze stałą czasową  $T_s = 1.8$ s. i model napędu głównego o stałej czasowej  $T_m = 10.48$ s. Współczynniki te uzyskano przez uśrednienie wartości podanych w pracy [5]. Dzięki temu układ wykonawczy statku może być zapisany jako:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_1(t) &= \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1(t) + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_c(t) \\ \mathbf{y}_1(t) &= \mathbf{x}_1(t), \end{aligned} \quad (19)$$

gdzie:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -0.556 & 0 \\ 0 & -0.095 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0.556 & 0 \\ 0 & 0.095 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Przy czym  $\mathbf{u}_c(t)$  jest deklarowanym wektorem sygnałów sterujących, a  $\mathbf{u}(t)$  jest wektorem sygnałów sterujących. Pełny wektor stanu statku uwzględniający dynamikę urządzeń wykonawczych można teraz zapisać jako:

$$\mathbf{x}(t) = [\delta \ n \ u \ v \ p \ r \ \phi \ \psi]^T. \quad (21)$$

W końcu, pełny zlinearyzowany model statku opisany jest macierzami:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_2 & \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [\mathbf{0} \ \mathbf{C}_2], \quad \mathbf{D} = \mathbf{0}, \quad (22)$$

gdzie: wektory sygnałów sterujących i wyjściowych zdefiniowane są jako:  $\mathbf{u}_c(t) = [\delta_c(t) \ n_c(t)]^T$  i  $\mathbf{y}(t) = [u(t) \ \psi(t)]^T$ .

Rozwiązanie zagadnienia sterowania LQ- optymalnego dla liniowego modelu dynamicznego (22) sprowadza się do wyznaczenia optymalnej macierzy sprzężeń zwrotnych  $\mathbf{F}$  od stanu gwarantującej pożądane właściwości układu sterowania poprzez minimalizację kwadratowego wskaźnika jakości sterowania w nieskończonym horyzoncie czasu ciągłego:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t=0}^{\infty} ([\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_n]^T \mathbf{\Psi} [\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_n] + [\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_n]^T \mathbf{\Phi} [\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}_n]) dt \quad (23)$$

gdzie: symetryczna macierz wagowa  $\mathbf{\Psi} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  jest nieujemnie określona  $\mathbf{\Psi} \geq 0$  natomiast, macierz  $\mathbf{\Phi} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  dodatnio określona  $\mathbf{\Phi} > 0$ . Mając dany opis liniowego obiektu sterowania w przestrzeni stanów  $\{\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}\}$  oraz określone macierze wagowe  $\mathbf{\Psi}$  i  $\mathbf{\Phi}$  poprzez minimalizację wskaźnika  $J$  można wyznaczyć

optymalną macierz sprzężeń zwrotnych  $\mathbf{F}$  od wektora stanu:

$$\mathbf{F} = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{N}^T), \quad (24)$$

gdzie: symetryczna i nieujemnie określona macierz  $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$  jest rozwiązaniem algebraicznego równania Riccatiego, natomiast macierze:  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ ,  $\mathbf{N} \in \mathbb{R}^{8 \times 2}$  są zdefiniowane następująco:

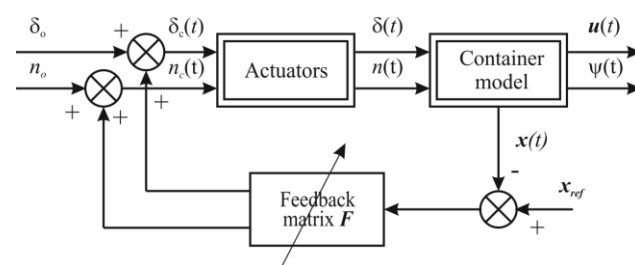
$\mathbf{N} = \mathbf{C}^T \mathbf{\Psi} \mathbf{D}$ ,  $\mathbf{R} = \mathbf{D}^T \mathbf{\Psi} \mathbf{D} + \mathbf{\Phi}$ . W celu dokonania syntezy adaptacyjnego układu sterowania nieliniowym modelem statku, zlinearyzowano go w typowych nominalnych punktach pracy i zaprojektowano macierz  $\mathbf{F}$  dla każdego z nich.

### 3. Struktura układu sterowania i wyniki symulacji

Zaprojektowany zestaw 992 regulatorów został wykorzystany do stworzenia adaptacyjnego regulatora LQR o parametrach strojonych skokowo na podstawie trzech zmierzonych sygnałów pomocniczych:  $u$ ,  $v$  i  $r$ . Do wyznaczenia najbliższego nominalnego punktu pracy statku względem aktualnego stanu statku minimalizuje się wskaźnik  $J_n$ :

$$J_n = \left( \frac{\Delta u}{u_{\max}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta v}{v_{\max}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta r}{r_{\max}} \right)^2 \quad (25)$$

gdzie:  $\Delta u$ ,  $\Delta v$  i  $\Delta r$  są odchyleniami odpowiednich prędkości aktualnych statku od prędkości w nominalnym punkcie pracy, natomiast:  $u_{\max}$ ,  $v_{\max}$  i  $r_{\max}$  są maksymalnymi wartościami odpowiednich prędkości statku spośród wszystkich wartości w nominalnych punktach pracy. Adaptacyjny regulator LQR strojony jest na bieżąco zależnie od znalezionej "najbliższej" względem kryterium (25) punktu pracy statku. Struktura proponowanego układu sterowania kątem kursowym i prędkością postępową statku przedstawiona jest na Rys. 5.



Rys. 5. Struktura adaptacyjnego układu sterowania z regulatorem LQR

Wektor sygnałów  $\mathbf{u}_c(t)$  w proponowanym układzie sterowania wyraża się zależnością:

$$\mathbf{u}_c(t) = \mathbf{F} (\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}(t)) + \mathbf{u}_n, \quad (26)$$

gdzie: wektor  $\mathbf{x}_{ref}$  jest referencyjnym wektorem stanu statku (wektor wartości zadanych) określonym jako:

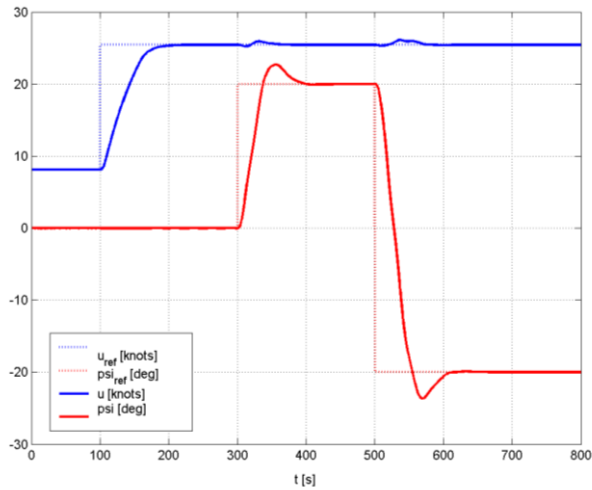
$$\mathbf{x}_{ref} = [0 \ n_{ref} \ u_{ref} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \psi_{ref}]^T. \quad (27)$$

przy czym  $n_{ref}$  jest referencyjną prędkością obrotową śruby głównej, odpowiadającą prędkości  $u_{ref}$  statku, wyznaczoną z wykresu na Rys. 2 dla wychylenia steru równego zero.

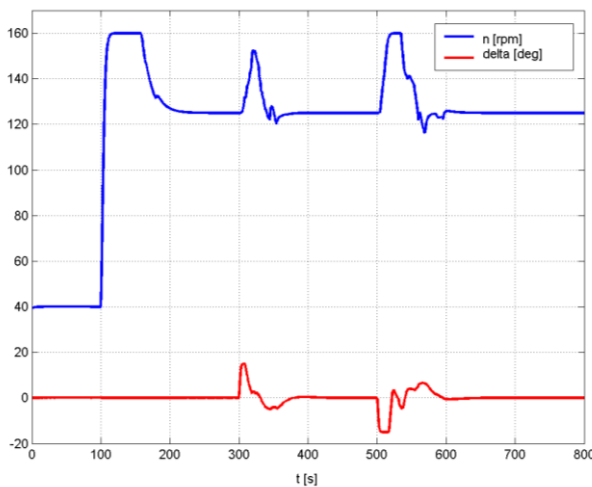
Głównym zadaniem tego układu sterowania jest jednoczesna regulacja dwóch sygnałów wyjściowych statku: kąta kursowego i jego prędkości wzdłużnej. W celu uzyskania możliwie szybkich przebiegów sygnałów wyjściowych układu regulacji przy możliwie najmniejszych nasyceniach sygnałów sterujących, macierze wagowe kryterium (23) zostały wyznaczone metodą kolejnych przybliżeń, jako:

$$\mathbf{\Psi} = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 30 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 13 & 0 \\ 0 & 0.002 \end{bmatrix}, \quad (28)$$

Prezentowane poniżej wyniki symulacji uzyskano na drodze badań przeprowadzonych w środowisku MATLAB/Simulink. Na rys. 6 pokazano przebiegi sygnałów wyjściowych, natomiast na rys. 7 odpowiadające im przebiegi sygnałów sterujących.

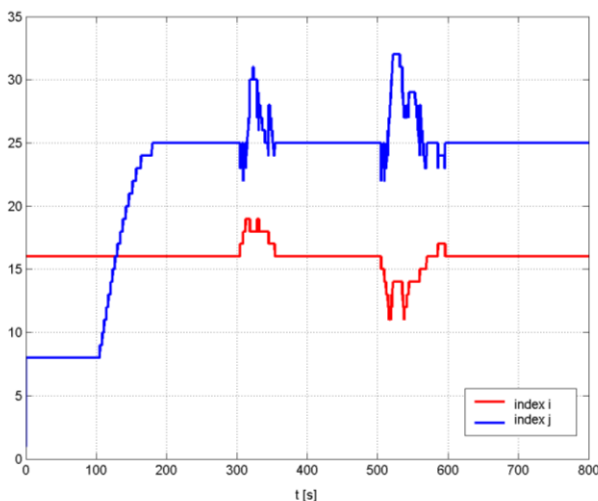


Rys. 6. Przebiegi sygnałów wyjściowych układu sterowania



Rys. 7. Przebiegi sygnałów sterujących

Na rys. 8 pokazano zmianę indeksów nominalnych punktów pracy statku w czasie wykonywania manewru zmiany kąta kursowego i prędkości wzdłużnej statku. Momentom zmian tych indeksów odpowiadają momenty zmian parametrów adaptacyjnego regulatora LQR.



Rys. 8. Momenty zmian parametrów regulatora LQR

Wszystkie badania opracowanej struktury układu sterowania przeprowadzono uwzględniając ograniczenia sygnałów sterujących, zarówno maksymalną prędkość śruby głównej:  $n_{max}=160\text{rpm}$ , jak i maksymalny kąt wychylenia steru:  $\delta_{max}=\pm 15\text{deg}$  oraz maksymalną prędkość wychylenia steru:  $\dot{\delta}_{max}=5\text{deg/s}$ .

#### 4. Podsumowanie

W artykule zaproponowano i przetestowano adaptacyjny układ sterowania LQR dla nieliniowego obiektu dynamicznego MIMO opisującego statek poruszający się w 4-DoF. Synteza układu sterowania opiera się na linearyzacji nieliniowego modelu statku w 992 typowych punktach jego pracy i zaprojektowaniu regulatorów LQR dla każdego z tych punktów. Adaptacyjny regulator LQR strojony jest skokowo zależnie od aktualnego punktu pracy statku na podstawie trzech mierzonych sygnałów pomocniczych, prędkości wzdłużnej, bocznej i kątowej statku względem wody:  $u$ ,  $v$  i  $r$ . Uzyskane wyniki symulacyjne w proponowanym układzie sterowania z pełnym nieliniowym modelem statku wraz z ograniczeniami sygnałów sterujących, potwierdzają możliwość otrzymania wysokiej jakości regulacji zarówno kąta kursowego jak i prędkości statku.

#### Literatura

- [1] Åström K., Wittenmark B.: Adaptive control, Addison Wesley, 1995.
- [2] Brasel M., Bańka S.: Adaptive LQR Control System for Nonlinear MIMO Model of a Drill-Ship with Wind Disturbances, XIV International PhD Workshop OWD 2012, 20-23 October, Wisła, Poland, 2012, s. 81-84.
- [3] Dworak P., Jaroszewski K., Brasel M.: Rozmyty regulator TSK do sterowania obiektem cieplnym MIMO. Przegląd Elektrotechniczny 10a, 2012, s. 83-87.
- [4] Dworak P., Jaroszewski K., Brasel M.: Neuronowy regulator do sterowania nieliniowym obiektem cieplnym MIMO. Przegląd Elektrotechniczny 10a, 2012, s. 79-83.
- [5] Fossen T. I.: Guidance and Control of Ocean Vehicles. John Wiley and Sons, 1994.
- [6] Morse A.S.: Control Using Logic-Based Switching, Trends in Control: A European Perspective, Springer-Verlag, 1998, s. 69-113.
- [7] Shengxiang J., Voulgaris P.G.: Performance Optimization of Switched Systems: A Model Matching Approach, IEEE Transactions on Automatic Control, 54, 2009, nr 9, s. 2058-2071.
- [8] Son, K. H., Nomoto K.: On the Coupled Motion of Steering and Rolling of a High Speed Container, J.S.N.A., Japan, 1981, Vol. 150, s. 232-244.
- [9] Yamé J., Kinnaert M., Delwiche T.: Parametrization of MIMO multi-controller schemes for bumpless switching, European Control Conference, ECC'07, Kos, Greece, 2007.

**Mgr inż. Michał Brasel**  
e-mail: [michal.brasel@zut.edu.pl](mailto:michal.brasel@zut.edu.pl)

Student stacjonarnych studiów doktoranckich na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Swoje aktualne zainteresowania naukowe koncentruje na zagadnieniach sterowania nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO, sterowaniu adaptacyjnym i praktycznym wykorzystaniu algebry liniowej w syntezie układów sterowania.



otrzymano/received: 27.06.2013

przyjęto do druku/accepted: 16.02.2014