

Jednolite projektowanie regulatorów kursu i ścieżki dla autopilota statku

Andrzej Stec, Zbigniew Świder, Leszek Trybus

Politechnika Rzeszowska, Katedra Informatyki i Automatyki, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

Streszczenie: Przedstawiono jednolity sposób doboru nastaw PID dla regulatora kursu i regulatora śledzenia ścieżki, które występują w kaskadowym układzie autopilota statku. Jednolitość projektowania jest możliwa dzięki temu, że w odniesieniu do każdego regulatora sterowany przez niego obiekt wygląda jak integrator ze stałą czasową. W przypadku regulatora kursu jest to znany model Nomoto. Dzięki eliminacji przez regulator stałej czasowej obiektu, układ zamknięty staje się układem 2-go rzędu. Założono, że układ ten ma mieć podwójną stałą czasową różniącą się w zadanym stosunku od stałej czasowej obiektu. Pokazano, że tak zaprojektowany regulator kursu lepiej tłumi zakłócenia środowiskowe niż regulator z wzorcowymi nastawami.

Słowa kluczowe: regulator PID, autopilot statku, nastawy, układ kaskadowy

1. Wprowadzenie

W podróży statku morskiego można wyróżnić trzy główne fazy różniące się sposobem sterowania [1–3]:

- manewry w porcie i na wodach ograniczonych, ze sterowaniem ręcznym,
- żegluga przybrzeżna, z kursem statku utrzymywanym przez autopilota,
- żegluga na wodach otwartych (oceaniczna), gdzie autopilot przeprowadza statek po trasie wyznaczonej przez szereg punktów nawigacyjnych.

Powszechnie stosowanym algorytmem sterowania kursem jest PID z nastawami wyznaczonymi dla prostego opisu dynamiki statku, znanego jako model Nomoto. Ma on postać integratora ze stałą czasową i jest tworzony na podstawie prób morskich. Śledzenie prostoliniowego fragmentu trasy, inaczej ścieżki, można realizować w układzie kaskadowym [4, 5] z regulatorem nadrzędnym (także PID) wyznaczającym zadany kurs dla regulatora podrzędnego.

Parametry modelu Nomoto, a więc i nastawy PID, można uzależnić od prędkości statku otrzymując adaptacyjny regulator kursu. Trudnością jest jednak uzależnienie ich od stopnia załadunku, zmiennego dla wielu typów statków. Rozwiązaniem może być tutaj rozmyty regulator PID, w którym na podstawie odchyłki kursu i prędkości jej zmiany koryguje się co pewien czas nastawy według wcześniej przygotowanych reguł [6, 7].

Autor korespondujący:

Zbigniew Świder, swiderzb@prz.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 09.10.2022 r., przyjęty do druku 14.11.2022 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

Wzorcowe nastawy regulatora PID sterującego kursem podane są w książkach Fossena [1, 2], fundamentalnych dla automatyki okrętowej. Zakłada się tam, że układ zamknięty, na razie tylko z regulatorem PD, ma mieć transmitancję 2-go rzędu o częstotliwości naturalnej ω_n i współczynniku tłumienia ξ w przedziale [0.8, 1]. Składową I dołączaną następnie do PD określa wzór heurystyczny (pochodzący od Balchena). Z nastaw wzorcowych korzysta wielu autorów, np. [7–9].

Alternatywą dla tych nastaw mogą być nastawy podane w [10], sformułowane przy założeniu podwójnej stałej czasowej układu zamkniętego (tłumienie krytyczne), która w zadanym stosunku ma różnić się od stałej czasowej statku. Dzięki eliminacji przez regulator tej stałej czasowej, układ zamknięty staje się 2-go rzędu, ale bez sięgania po zależność heurystyczną. Metodę tę zastosowano również do syntezy serwomechanizmu napięciowego [11] ze względu na identyczny opis dynamiki obiektu.

Tutaj wracamy do uzasadnienia nastaw z [10] dokonując jednocześnie porównania z nastawami wzorcowymi dla odpowiedzi na zakłócenia środowiskowe (wiatr, prąd). Okazuje się, że pod tym względem zaproponowane nastawy wyglądają korzystniej. Drugim rezultatem są nastawy regulatora śledzenia ścieżki (nadrzędnego), których nie napotkano w dostępnej literaturze. Pokazano, że nastawy regulatora śledzenia można dobrać według analogicznych zależności jak nastawy regulatora kursu, ponieważ modele sterowanych obiektów są tego samego typu (integrator ze stałą czasową). W sumie otrzymano jednolity sposób doboru nastaw PID dla autopilota przewidzianego dla żeglugi przybrzeżnej i żeglugi na wodach otwartych.

Należy jednak dodać, że powszechnie stosowanym, prostszym niż regulacja kaskadowa, jest algorytm śledzenia „na namiar” LoS (ang. *Line of Sight*) [12–14]. Polega on na cyklicznym korygowaniu kursu na końcowy punkt ścieżki, jeśli zakłócenia środowiskowe powodują od niej odchylenia. Dokładność śledzenia metodą LoS, będącej faktycznie sterowaniem w układzie otwartym pomiędzy korektami kursu, ustępuje jednak regulacji kaskadowej.

Wśród komercyjnych autopilotów statków pierwszą grupę stanowią proste regulatory kursu, których nastawy dobierane są ręcznie [15]. Do drugiej grupy należą autopiloty wyposażone w GPS [16], które mogą kierować statek do wybranego punktu (ang. *Goto Waypoint*) lub przechwytywać ścieżkę (ang. *Goto Track*). Trzecią grupę stanowią zaawansowane rozwiązania z wbudowanym trybem śledzenia ścieżki oraz możliwością planowania trasy podróży na urządzeniu ECDIS (ang. *Electronic Chart Display Information System*). Producenci autopilotów nie podają jednak, według jakich zależności dobierane są nastawy.

2. Regulator kursu

Prostym opisem dynamiki statku dla sterowania kursem φ za pomocą wychylenia steru δ jest model Nomoto [1–3]

$$\frac{\varphi(s)}{\delta(s)} = \frac{k}{s(Ts + 1)}, \quad k = k_0 \frac{V}{V_0}, \quad T = T_0 \frac{V_0}{V}, \quad (1)$$

czyli integrator ze stałą czasową T . Współczynnik wzmocnienia k jest wprost proporcjonalny do prędkości statku V , a stała czasowa T – odwrotnie. Początkowe wartości k_0 , T_0 są znane na podstawie prób morskich wykonywanych przy prędkości V_0 .

Rozważany jest układ regulacji kursu pokazany na rys. 1, w którym d reprezentuje zakłócenie środowiskowe, tzn. wiatr, fale lub prąd morski. Standardowy regulator PID ma postać

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = k_p \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{(T_1 + T_2) s}, \quad (2)$$

$$T_i = T_1 + T_2, \quad T_d = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} \leq \frac{T_i}{4}.$$



Rys. 1. Schemat układu regulacji kursu
Fig. 1. Diagram of the heading control system

Filtr F eliminuje przeregulowanie. Zaadaptowany z [10] tryb projektowania polega na takim doborze nastaw regulatora PID oraz filtru F , aby transmitancja układu zamkniętego miała postać

$$G_{cl}(s) = \frac{1}{(T_{cl} s + 1)^2}, \quad T_{cl} = \frac{T}{r}. \quad (3)$$

Dzielnik redukcyjny r jest parametrem projektowym. Jeżeli $r > 1$, to stała czasowa T_{cl} układu zamkniętego ma być r -krotnie mniejsza od stałej czasowej statku T . Podobny problem, choć na gruncie całkiem innych zastosowań, był rozważany w [11], ale z czasem regulacji t_s jako parametrem projektowym.

Eliminacja stałej czasowej T przez podstawienie $T_2 = T$ w regulatorze (2) daje transmitancję układu otwartego w postaci

$$G_{op}(s) = k_p k_0 \frac{T_1 s + 1}{(T_1 s + T) s^2}. \quad (4)$$

Odpowiadającą jej transmitancję układu zamkniętego przekształcamy tak, aby ostatnim elementem mianownika było 1. Mianownik ten powinien być taki sam jak mianownik w (3), czemu odpowiada równanie

$$\frac{T_1 + T}{k_p k} s^2 + T_1 s + 1 = (T_{cl} s + 1)^2. \quad (5)$$

Wynikają z niego wprost T_1 i k_p w zależności od T_{cl} , czyli

$$T_1 = 2T_{cl}, \quad k_p = \frac{1}{k} \frac{T_1 + T}{T_{cl}^2}. \quad (6)$$

Ponieważ $T_{cl} = T/r$ według (3), więc łącząc wzory (2), (6) z warunkiem $T_2 = T$ otrzymuje się finalne nastawy k_p , T_i , T_d podane w tab. 1. Układ z rys. 1 będzie miał postać (3) dla filtru F o transmitancji $1/(T_1 s + 1)$ z $T_1 = 2T/r$.

Tab. 1. Nastawy regulatora PID kursu statku
Tab. 1. Setting of the ship heading PID controller

k_p	T_i	T_d
$\frac{1}{kT} r(r+2)$	$T \frac{r+2}{r}$	$T \frac{2}{r+2}$

W pracy [11] można znaleźć odpowiedniki wzorów z tab. 1, gdy parametrem projektowym jest, jak wspomniano, czas regulacji t_s . Ponieważ w przypadku transmitancji 2-go rzędu (3) mamy $t_s = 6T_{cl}$, więc $r = 6T/t_s$ oraz $T_1 = 2T/r = t_s/3$. Stąd np. pierwszy wzór z tab. 1 można przekształcić do postaci $k = 36(T_1 + T)/(kt_s^2)$.

W praktycznej realizacji algorytmu PID składowa różniczkująca jest uzupełniana filtrem o stałej czasowej T_d/D , czyli ma postać

$$\frac{T_d s}{(T_d/D)s + 1} = \frac{T_d s}{(1/N)s + 1}, \quad N = \frac{D}{T_d} \quad (7)$$

z symbolem N stosowanym w środowisku MATLAB. Można sprawdzić, że dla $N \geq 4$ i nastaw z tab. 1 odpowiedź skokowa układu z filtrem różniczkowania praktycznie nie różni się od odpowiedzi bez tego filtru.

3. Porównanie z nastawami wzorcowymi

W fundamentalnych książkach Fossena [1, 2] jako transmitancję układu zamkniętego przyjęto

$$G_{cl}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad \xi \in [0,8, 1] \quad (8)$$

z parametrami projektowymi ω_n , ξ . Projektowany jest tam najpierw regulator PD, do którego składową i dobiera się heurystycznie. Podane w [1, 2] nastawy, nazywane tutaj wzorcowymi, mają postać

$$k_p = \frac{T\omega_n^2}{k}, \quad T_d = \frac{2\xi T\omega_n - 1}{T\omega_n^2}, \quad T_i = \frac{10}{\omega_n} \quad (9)$$

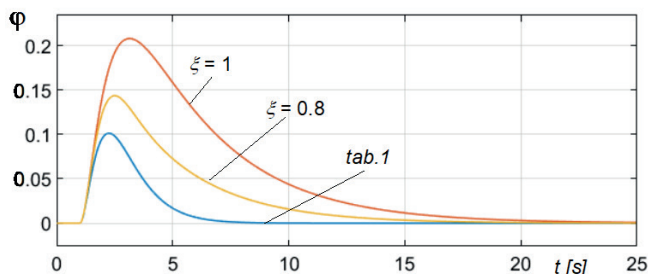
Porównanie przebiegów regulacyjnych dla takich nastaw z nastawami według tab.1 wymaga ujednoczenia parametrów projektowych. Stała czasowa T_{cl} występująca w (3) odpowiada odwrotności modułu części rzeczywistej pierwiastka mianownika w (8), czyli

$$T_{cl} = \frac{1}{\xi\omega_n}. \quad (10)$$

Ponieważ $T_d = T/r$, więc $\omega_n = r/(\xi T)$, co po podstawieniu do (9) daje nastawy wzorcowe w postaci

$$k_p = \frac{1}{kT} \frac{r^2}{\xi^2}, \quad T_i = 10 \frac{\xi T}{r}, \quad T_d = T \xi^2 \frac{2r-1}{r}. \quad (11)$$

Ponieważ w [1, 2] nie podano wskazówek odnośnie doboru filtra F (rys. 1), więc do porównania powinny służyć odpowiedzi zakłóceniami. Na rys. 2 pokazano takie odpowiedzi dla wzorcowych nastaw (11) oraz nastaw z tab.1 dla znormalizowanych danych $k = 1$, $T = 1$ oraz $r = 2$ i $\xi = 0,8$ lub 1 . Jak widać, odpowiedzi zakłóceniami przemawiają na korzyść nastaw z tab.1. Można jednak sprawdzić, że jeśli w każdym z tych przypadków zastosować identyczny filtr $1/(T_1s + 1)$, to odpowiedzi na skok wielkości zadanej φ_{ref} są bardzo zbliżone (2,5 % przeregulowania dla $\xi = 0,8$).



Rys. 2. Odpowiedzi zakłóceniami dla nastaw wzorcowych [1, 2] i nastaw z tab.1

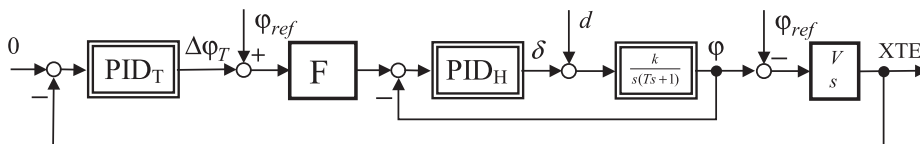
Fig. 2. Disturbance responses for reference settings [1, 2] and settings from Table 1

4. Kaskadowy układ śledzenia ścieżki

Sterowanie statkiem wzdłuż ścieżek łączących kolejne punkty planu podróży jest przeważnie realizowane za pomocą algorytmu LoS (ang. *Line of Sight*) [12–14]. W tym celu w autopilocie statku znajdującego się na początku ścieżki ustawia się zadany kurs φ_{ref} na jej punkt końcowy. Jeżeli nie ma wiatru lub prądu, to regulator kursu doprowadzi statek po pewnym czasie do punktu końcowego. Jednak pojawienie się zakłóceń znosi statek ze ścieżki zmieniając zamiar na punkt końcowy. Wymaga to wówczas odpowiedniej korekty φ_{ref} . Po parokrotnych korektach dochodzi się finalnie do punktu końcowego odcinka, ale po trajektorii będącej płytszym lub głębszym łukiem, którego cięciwą jest pierwotna ścieżka. Należy oczekiwać, że regulator śledzenia ścieżki na podstawie sygnału GPS określającego aktualną pozycję będzie w stanie poprowadzić statek po cięciwie-ścieżce mimo wiatru lub prądu.

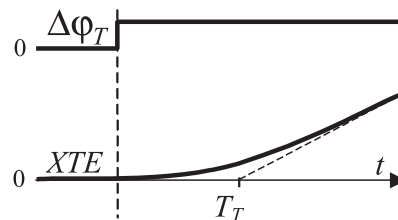
Schemat proponowanego kaskadowego układu śledzenia ścieżki pokazano na rys. 3 (por. poz. [10])

PID_T jest regulatorem śledzenia (ang. *track*), PID_H regulatorem kursu (ang. *heading*), zaś blok V/s przekształca odchyłkę kursu $\varphi - \varphi_{ref}$ na odchylenie od ścieżki XTE (ang. *Cross Track Error*), zależne od prędkości V [1, 2]. Faktyczne odchylenie XTE jest wyznaczane przez układ nawigacyjny statku. Problem projektowy polega na dobraniu nastaw regulatora PID_T .



Rys. 3. Kaskadowy układ śledzenia ścieżki o kursie φ_{ref}
Fig. 3. Cascade tracking system with path course φ_{ref}

W celu oceny dynamiki obiektu sterowanego przez PID_T założmy, że regulator ten znajduje się w trybie pracy ręcznej, a jego wyjście przestawiono skokowo na wartość $\Delta\varphi_T$. Regulator PID_H zacznie wtedy zmieniać kurs, skutkiem czego odchyłka XTE zacznie narastać, mniej więcej tak, jak to pokazano na rys. 4. Prawą prostoliniową część odpowiedzi skokowej można zapisać jako $V\Delta\varphi_T(t - T_T)$ z wartością T_T odczytaną wprost z wykresu.



Rys. 4. Odpowiedź układu regulacji kursu z wyjściem XTE
Fig. 4. Heading control system response with XTE output

Nietrudno spostrzec, że odpowiedź z rys. 4 odpowiada transmitancji integratora o stałej czasowej T_T , tzn.

$$\frac{XTE(s)}{\Delta\varphi_T(s)} = \frac{V}{s(T_Ts + 1)}. \quad (12)$$

Jest to transmitancja tego samego typu co w (1), dzięki czemu można zastosować dotychczasowe wyniki projektowania po zmianie oznaczeń.

Niech więc

$$T_{cl,T} = \frac{T_T}{r_T} \quad (13)$$

będzie stałą czasową kaskadowego układu zamkniętego z odpowiednio dobranym dzielnikiem r_T . Nastawy regulatora PID_T podane w tab. 2 aktualizują tab. 1 odpowiednio do (12) i (13).

Zwróćmy uwagę, że powyższa analiza ogranicza się do wymagania, aby regulator kursu PID_H działał poprawnie, nie określając bliżej jego nastaw. W szczególności mogłyby to być wzorcowe nastawy (9) lub inne gwarantujące stabilną pracę. Jednak, gdy regulator PID_H jest nastawiony według tab.1, to transmitancją układu regulacji kursu jest (3) i wtedy między T_T w $1/(T_Ts + 1)$ a T_{cl} w (3) zachodzi związek

$$T_T = 2T_{cl} = 2 \frac{T}{r}. \quad (14)$$

Tab. 2. Nastawy regulatora śledzenia PID_T wyznaczone z odpowiedzi skokowej

Tab. 2. PID_T tracking controller settings derived from the reference response

k_p	T_i	T_d
$\frac{1}{VT_T} r_T(r_T + 2)$	$T_T \frac{r_T + 2}{r_T}$	$T_T \frac{2}{r_T + 2}$

Uwzględniono to w tab. 2 otrzymując nastawy regulatora PID_T podane w tab. 3.

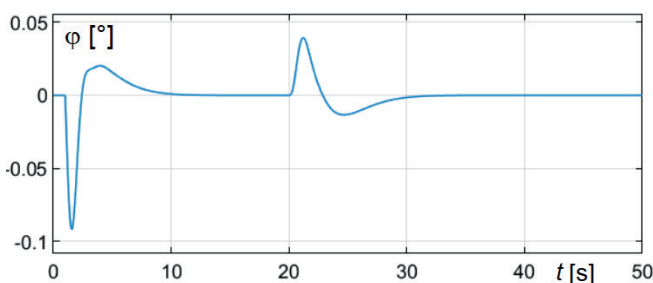
Tab. 3. Nastawy regulatora PID_T wyznaczone z modelu Nomoto

Tab. 3. PID_T tracking controller settings derived from the Nomoto model

k_p	T_i	T_d
$\frac{1}{2VT} r r_T (r_T + 2)$	$2T \frac{r_T + 2}{r r_T}$	$T \frac{4}{r(r_T + 2)}$

Jak widać, nie jest tu potrzebna dodatkowa odpowiedź skokowa (rys. 4), ale wystarczy stała czasowa statku T wyznaczona pierwotnie na podstawie prób morskich.

Na rys. 5 pokazano przebieg odchyłki XTE przy skokowej zmianie kąta φ_{ref} (nowa ścieżka, lewa część) oraz pojawieniu się zakłócenia d (prawa część) dla danych $k = 1$, $T = 1$, $r = 2$, $r_T = 1$, $\varphi_{ref} = 0,25$, $d = 1$. W obydwu przypadkach odchylenie XTE od zadanej ścieżki jest sprowadzane do zera.



Rys. 5. Odpowiedź układu kaskadowego przy przejściu na nową ścieżkę i pojawieniu się zakłócenia

Fig. 5. Cascade system response when changing to a new path and when disturbance occurs

5. Trajektorie statku

Na rys. 6a, b, c pokazano trajektorie wprowadzania statku przez autopilota na trzy różne ścieżki będące pierwszymi skład-

nikami pewnych planów podróży. Zakłada się, że statek może wyjść z portu tylko w kierunku północnym, zaś autopilot powinien możliwie szybko wprowadzić go na ścieżkę. Każdą ścieżkę określa orientacja geograficzna, np. NE (ang. *North-East*), oraz położenie względem portu. Pierwszy znak orientacji wskazuje, w którym z dwu możliwych kierunków (przeciwnych) statek ma płynąć. Mamy więc odpowiednio do rysunków:

- a) NE, ścieżka wychodząca z portu,
- b) NW, ścieżka przebiega powyżej portu,
- c) SW, jw.

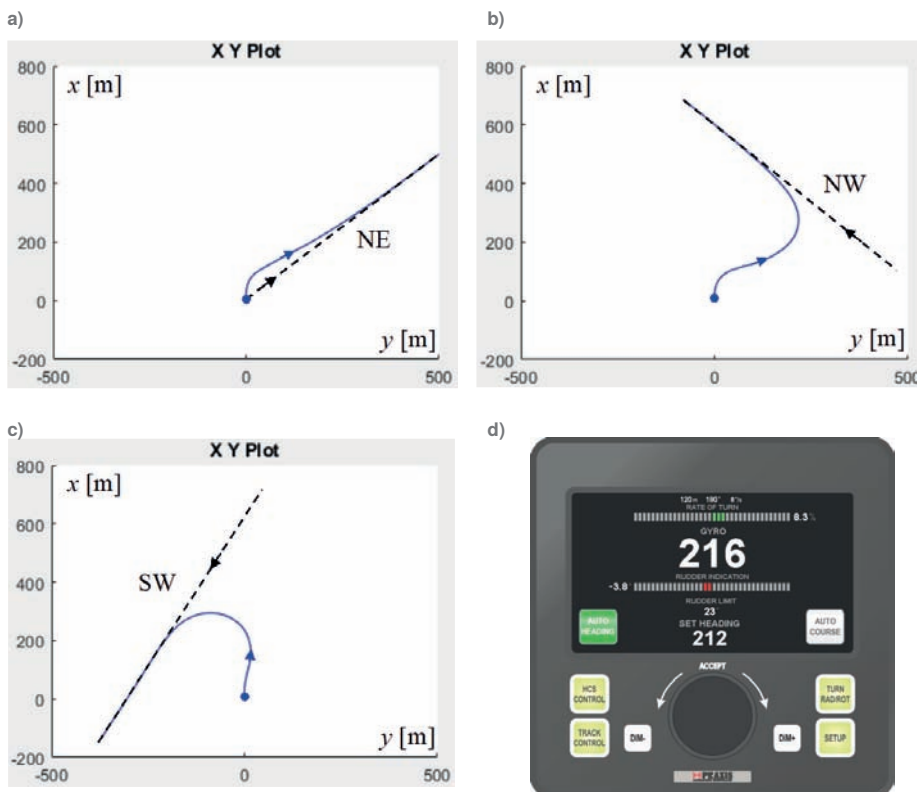
Trajektorie reprezentują symulację statku o danych $k = 0,7$ [deg/s/deg], $T = 60$ s oraz parametrów projektowych $r = 2$, $r_T = 1$. Nastawy regulatorów dobrano według tab. 1 i tab. 3. Odległości na rysunkach są podane w metrach.

W przypadku rys. 6a statek po wyjściu z portu skręca ku wschodowi kierując się na pobliską ścieżkę. Trajektorie z rys. 6b rozpoczyna się od dościa w pobliże ścieżki, po którym następuje właściwe śledzenie. Podobnie jest na rys. 6c, ale wobec przeciwnego kierunku podróży w stosunku do wyjścia z portu statek rozpoczyna od zawracania.

Oprogramowanie realizujące sterowanie kursem i śledzenie ścieżki jest obecnie testowane w prototypowym autopilocie, którego panel czołowy pokazano na rys. 6d [18]. Przycisk HCS aktywuje sterowanie kursem z wartością zadaną SET HEADING i mierzoną GYRO. Przycisk TRACK CONTROL aktywuje śledzenie. Wśród parametrów ustawianych w SETUP znajdują się r oraz r_T .

6. Podsumowanie

Przedstawiono jednolity sposób projektowania regulatora kursu i regulatora śledzenia ścieżki przewidzianych dla autopilota sterującego statkiem w fazach żeglugi przybrzeżnej i żeglugi na wodach otwartych. Regulator kursu jest projektowany dla statku opisanego modelem Nomoto, czyli integratora ze stałą czasową. Pokazano, że w odniesieniu do regulatora śledzenia w układzie kaskadowym, model odchylenia XTE od ścieżki



Rys. 6. a, b, c – trajektorie wyprowadzania statku na ścieżkę, d – panel operatorski prototypowego autopilota [18]

Fig. 6. a, b, c – trajectories for moving the ship onto the path, d – the operator panel of the prototype autopilot [18]

wygląda analogicznie. Przyjęto, że stałą czasowa odpowiedniego układu zamkniętego ma r - lub r_T -krotnie różni się od stałej czasowej sterowanego obiektu. W podanych tabelach nastaw występują parametry modelu Nomoto, parametry projektowe r oraz r_T , a także prędkość statku. Pokazano, że regulator kursu z zaproponowanymi nastawami lepiej tłumi zakłócenia środowiskowe, niż regulator z nastawami wzorcowymi [1, 2].

Podziękowania

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019–2023, nr projektu 027/RID/2018/19, kwota finansowania 11 999 900 zł.

Bibliografia

1. Fossen T.I., *Guidance and Control of Ocean Vehicles* (4th ed.), Wiley, Chichester, 1999.
2. Fossen T.I., *Marine Control Systems*, Marine Cybernetics, Trondheim, 2002.
3. Lisowski J., *Statek jako obiekt sterowania automatycznego*, Wyd. Morskie, Gdańsk, 1981.
4. Morawski L., Pomirski J., Rak A., *A cascade control system for trajectory tracking*, [In:] 4th International Congress on Maritime Technological Innovations and Research, 2004, 265–276.
5. Chen C.Y., Ruiz M.T., Delefortrie G., Vantorre M., Lataire E., *An Energy-Efficient Adaptive Course Control System for Ocean Surface Ships*, 11th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, Hamburg, 2019, DOI: 10.15480/882.3349.
6. van Amerongen J., van Nauta Lemke H.R., van der Veen J.C.T., *An autopilot for ships designed with fuzzy sets*, “IFAC Proceedings Volumes”, Vol. 10, No. 16, 1977, 479–487, DOI: 10.1016/S1474-6670(17)69559-4.
7. Tomera M., *Fuzzy Self-tuning PID Controller for a Ship Autopilot*, Proceedings of the 12th International Conference on Marine Navigation and Safety of sea transportation, TransNav, Gdynia, 2017.
8. Moreira L., Fossen T.T., Guedes Soares C., *Modeling, Guidance and Control of “Esso Osaca” Model*, Internal Report, No. 2005-2-W, Trondheim, 2005.
9. Temiz I., *An Investigation on the Ship Rudder with Different Control Systems*, “Elektronika ir Elektrotechnika”, Vol. 105, No. 9, 2010, 28–32.
10. Trybus L., Świder Z., Stec A., *Tuning Rules of Conventional and Advanced Ship Autopilot Controllers*, Automation 2015, 303–311.
11. Bożek A., Trybus L., *Krok dyskretyzacji i nastawy PID w dyskretnym serwomechanizmie napięciowym*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 26, Nr 1, 2022, 5–10, DOI: 10.14313/PAR_243/5.
12. Fossen T.I., Breivik M., Skjetne R., *Line-of-sight path following of underactuated marine craft*. “IFAC Proceedings Volumes”, Vol. 36, No. 21, 2003, 211–216, DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37809-6.
13. Caharija W., Pettersen K.Y., Bibuli M., Calado P., Zereik E., Braga J., Gravidahl J.T., Sørensen A.J., Milovanović M., Bruzzone G., *Integral Line-of-Sight guidance and control of underactuated marine vehicles: Theory, simulations, and experiments*. “IEEE Transactions on Control Systems Technology”, Vol. 24, No. 5, 2016, 1623–1642, DOI: 10.1109/TCST.2015.2504838.
14. Kula K., Tomera M., *Control system of training ship keeping the desired path consisting of straight-lines and circular arcs*, “TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation”, Vol. 11, No. 4, 2017, 711–719, DOI: 10.12716/1001.11.04.19.

Inne źródła

15. *ALPHASEAPILOT MFC Autopilot Operating Manual*, Alphatron, <https://www.alphatronmarine.com>
16. *FAP-2000 Autopilot Operator Manual*, Furuno, <https://www.furuno.com>
17. *Simrad AP70/80 Operator Manual*, Simrad, <https://rowlandsmarine.co.uk>
18. Praxis Automation Technology B.V., <http://www.praxis-automation.nl>

Uniform Design of Heading and Track Controllers for Ship Autopilot

Abstract: Uniform approach to selection of PID settings for heading and path tracking controllers that create a cascade control system for ship autopilot is presented. Uniformity of the design follows from observation that for each of the controllers the controlled plant looks like an integrator with time constant. In case of the heading controller, the plant is represented by the known Nomoto model. Due to elimination of the plant time constant by the controller, each of the closed loop systems becomes of 2nd order. One assumes that such system should have a double time constant, different in a prescribed ratio from time constant of the controlled plant. It is shown that the heading controller designed in this way suppresses disturbances better than the controller with standard settings.

Keywords: PID controller, ship autopilot, tunings, cascade system

dr inż. Andrzej Stec

astec@prz.edu.pl

ORCID: 0000-0002-5615-3626

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej (1993). Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w 2004 r. Obecnie adiunkt dydaktyczny w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi systemów wbudowanych i rozproszonych systemów sterowania.



dr hab. inż. Zbigniew Świder

swiderzb@prz.edu.pl

ORCID: 0000-0003-3504-5340

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej (1984). Na Wydziale Automatyki, Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach uzyskał stopień doktora nauk technicznych (1992) oraz doktora habilitowanego nauk technicznych (2004). Od początku pracy zawodowej zajmuje się sterownikami mikroprocesorowymi, a ostatnio metodami samostrojenia i adaptacji nastaw regulatorów, komputerowymi systemami automatyki oraz środowiskami inżynierskimi do programowania przemysłowych układów sterowania.



prof. dr hab. inż. Leszek Trybus

ltrybus@prz.edu.pl

ORCID: 0000-0002-1415-3679

Ukończył AGH Kraków (1970), gdzie również uzyskał doktorat, habilitację i tytuł. Od ukończenia studiów pracuje w Politechnice Rzeszowskiej. Autor ponad 200 publikacji. Wieloletni członek Komitetu Automatyki i Robotyki PAN. Zajmuje się regulatorami mikroprocesorowymi, rozproszonymi systemami.

