

DOI 10.15589/jnn20180306
УДК 502:51:504.5
Л33

VARIABLE STRUCTURE CONTROL SYSTEM WITH MAXIMUM ACTION SPEED FOR STABILIZATION OF VESSEL'S COURSE

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЗІ ЗМІННОЮ СТРУКТУРОЮ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ШВИДКОДІЇ ПРИ СТАБІЛІЗАЦІЇ КУРСУ СУДНА

Denis O. Lebedev
dns19944@gmail.com
ORCID: 000-0002-6637-2187

Д. О. Лебедєв
аспірант

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Using methods of the theory of optimal processes, a system with variable structure is synthesized for the fastest stabilization of the ship's course, which is described by a nonlinear model of the 3rd order. A nonlinear ship model is considered, while for the most similar control systems only a linear model of the object is the case. Taking into account the maximum speed of the propulsion units of the vessel, a control is being synthesized based on the forces' and moments' balance equation to ensure that the vessel moves along the optimal trajectory of ship's course stabilization. The forces' and moments' balance equation determines the mathematical and structural form of a control system with a variable structure, the block diagram of which is demonstrated in this work. Simulation modeling of the movement of the vessel for a given course of the vessel with the physical limitations of the vessel's engines is conducted in the MATLAB/Simulink environment. The simulation shows the effectiveness of the proposed approach for fuel consumption and sufficient accuracy of stabilization of the course compared to the PID controller, which are now used almost in 90 % of all control systems. On the basis of the results obtained, further research is expected both on the modification of the ship's autopilot and dynamic positioning systems, and on the application of the results of the research for control of other types of mobile objects and purposes, for example, unmanned aerial objects, i.e. quadcopters. Also relevant is the task of using additional (for example, robust) systems that allow to modernize systems with variable structure. The synthesis of such dual robust-optimal control systems allows the object to be brought to a stable given state by the optimal time or by spending the least amount of fuel, while «online» compensation of uncontrolled external influences (for example, waves or wind disturbances) takes place.

Keywords: ship control; variable feedback loops; maximum action speed; optimal trajectory; course stabilization.

Анотація. Використовуючи методи теорії оптимальних процесів, синтезовано систему зі змінною структурою для найшвидшої стабілізації курсу судна, що описується нелінійною моделлю 3-го порядку. Розглянуто нелінійну модель судна, в той час як для більшості аналогічних систем керування розглядалася лише лінійна модель об'єкта. Беручи до уваги максимальну швидкодію рушіїв та підрулюючих пристроїв судна, синтезовано керування на основі рівняння балансу сил і моментів, що забезпечує рух судна оптимальною траєкторією стабілізації курсу. Рівняння балансу сил та моментів визначає математичний і структурний вигляд системи керування зі змінною структурою, структурна схема якої подана в даній роботі. Проведене імітаційне моделювання руху судна у середовищі MATLAB/Simulink для заданого курсу судна при фізичній обмеженості рушіїв судна. Моделювання демонструє ефективність запропонованого підходу за витратами палива та достатню точність стабілізації курсу в порівнянні з ПІД-регуляторами, які наразі використовуються майже у 90 % усіх систем керування. На основі отриманих результатів передбачаються подальші дослідження як щодо модифікації судових авторульових та систем динамічного позиціонування, так і щодо застосування результатів дослідження для керування рухомими об'єктами інших типів та призначення, наприклад, безпілотних літальних об'єктів, а саме квадрокоптерів. Крім того, актуальною постає задача використання додаткових (наприклад, робастних) систем, які дозволяють модернізувати системи зі змінною структурою. Синтез таких дуальних робастно-оптимальних систем керування дозволяє привести об'єкт до стабільного заданого стану за оптимальний час або витрачаючи найменшу кількість палива, при цьому компенсуючи в режимі «онлайн» неконтрольовані зовнішні впливи (наприклад, збурення або вітрове хвилювання).

Ключові слова: керування судном; змінні зворотні зв'язки; максимальна швидкодія; оптимальна траєкторія; стабілізація курсу.

Аннотация. Используя методы теории оптимальных процессов, синтезировано систему с переменной структурой для наиболее быстрой стабилизации курса судна, которая описывается нелинейной моделью 3-го порядка. Рассмотрено нелинейную модель судна, в то время как для большинства аналогичных систем управления рассматривалась только линейная модель объекта. Принимая во внимание максимальное быстродействие двигателей и подруливающих устройств судна, синтезировано управление на основании уравнения баланса сил и моментов, которое обеспечивает движение судна по оптимальной траектории стабилизации курса судна. Уравнение баланса сил и моментов определяет математический и структурный вид системы управления с переменной структурой, структурная схема которой подана в данной работе. Проведено имитационное моделирование движения судна в среде MATLAB/Simulink для заданного курса судна при физической ограниченности двигателей судна. Моделирование показывает эффективность предложенного подхода по расходам топлива и достаточную точность стабилизации курса по сравнению с ПИД-регуляторами, которые сейчас используются почти в 90 % всех систем управления. На основе полученных результатов предполагаются дальнейшие исследования как по модификации судовых авторулевых и систем динамического позиционирования, так и по применению результатов исследования для управления подвижными объектами других типов и назначения, например, беспилотных летательных объектов, а именно квадрокоптеров. Кроме того, актуальной остается задача использования дополнительных (например, робастных) систем, которые позволяют модернизировать системы с переменной структурой. Синтез таких дульных робастно-оптимальных систем управления позволяет привести объект к стабильному заданному состоянию за оптимальное время или затрачивая наименьшее количество топлива, при этом компенсируя в режиме «онлайн» неконтролируемые внешние воздействия (например, возмущение или ветровое волнение).

Ключевые слова: управление судном; переменные обратные связи; максимальное быстродействие; оптимальная траектория; стабилизация курса.

REFERENCES

- [1] Kuntsevich, V. M. (2004). Sintez robustno-optimalnykh sistem upravleniya nestatsionarnymi obektami pri ogranichennykh vozmushcheniyakh. *Problemy upravleniya i informatiki*, 2, 19-31 (in Russ.).
- [2] Atherton, D. P., & Majhi, S. (1999). Limitations of PID controllers. In *Proceedings of the 1999 American Control Conference* (Cat. No. 99CH36251), 6, 3843-3847. IEEE. DOI: 10.1109/ACC.1999.786236.
- [3] Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE transactions on control systems technology*, 13(4), 559-576.
- [4] Zelikin, M. I. (1998). Odnorodnye prostranstva i uravnenie Rikkati v variatsionnom ischislenii. Moscow: Faktorial. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331 (in Russ.).
- [5] Larin, V. B. (2004). Ob obrashchenii problemy analiticheskogo konstruirovaniya regulyatorov. *Problemy upravleniya i informatiki*, 1, 17-25 (in Russ.).
- [6] Yemelyanov, S. V., & Korovin, S. K. (1997). *Novye tipy obratnoy svyazi* (in Russ.).
- [7] Banos, A. (2004). Nonlinear quantitative stability. *Int. Journal of Robust and Non-Linear Control*, 14, 289-306. <https://doi.org/10.1002/rnc.879>.
- [8] Comasolivas, Ramón, Escobet, Teresa & Quevedo, Joseba. (2012). Automatic design of robust PID controllers based on QFT specifications. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 2, 715-720. 10.3182/20120328-3-IT-3014.00121.
- [9] Khlebnikov, M. V., & Polyak B. T. (2011). Optimizatsiya lineynykh sistem pri ogranichennykh vneshnikh vozmushcheniyakh (tekhnika invariantnykh ellipsoidov). *Avtomatika i telemekhanika*, 11, 9-59 (in Russ.).
- [10] Balashevich N. V., Gabasov R., & Kirillova F. M. (2000). Numerical methods for open-loop and closed-loop optimization of linear control systems. *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki*, 40/6, 838-859.
- [11] Fossen, Thor & Grøvlén, Åslaug. (1998). Nonlinear Output Feedback Control of Dynamically Positioned Ships Using Vectorial Observer Back-Stepping. *Control Systems Technology, IEEE Transactions*, 6, 121-128. 10.1109/87.654882.
- [12] Johansen, T. A., & Fossen, T. I. (2013). Control allocation – a survey. *Automatica*, 49(5), 1087-1103. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.035>.
- [13] Krutko, P. D. (2004). *Obratnye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravleniya*. (in Russ.).

- [14] Timchenko, V. & Kondratenko, Yu. (2011). Robust Stabilization of Marine Mobile Objects on the Basis of Systems with Variable Structure of Feedbacks. *Journal of Automation and Information Sciences*, 43, 16-29. 10.1615/JAutomatInfScien.v43.i6.20.
- [15] Timchenko, V. (2012). Synthesis of Variable Structure Systems for Stabilization of Ship at Incomplete Controllability. *Journal of Automation and Information Sciences*, 44, 8-19. 10.1615/JAutomatInfScien.v44.i6.20.
- [16] Timchenko, V. L. & Ukhin, O. A. (2014). Optimization of Stabilization Processes of Marine Mobile Object in Dynamic Positioning Mode. *Journal of Automation and Information Sciences*, 46, 40-52. 10.1615/JAutomatInfScien.v46.i7.40.
- [17] Lukomskiy, Yu. A. & Chugunov V. S. (1988). *Sistemy upravleniya morskimi podvizhnymi obektami*. L., Sudostroenie (in Russ.).
- [18] Timchenko, V. L. (2015). *Sistemy robustno-optimalnoy stabilizatsii morskikh podviznykh obektov*. Palmarium Academic Publishing (in Russ.).

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зниження транспортних витрат морського флоту шляхом оптимізації систем керування суднами при русі заданими траєкторіями, збільшення робочого часу функціонування морського технологічного обладнання і підвищення надійності керування спеціалізованими суднами із системами динамічного позиціонування в критичних перехідних режимах вимагає вдосконалення та практичної реалізації принципів оптимального керування [1], яке забезпечує вирішення відповідних функціональних завдань у режимі реального часу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз принципів побудови систем керування суднами, наприклад, автопілотів для транспортних суден, демонструє широке застосування ПІД-регуляторів (майже 90 % усіх систем керування [2]), незважаючи на їх відомі слабкі сторони щодо налаштування параметрів, споживання енергії, чутливості до впливу параметричного шуму, а також неможливість забезпечити повну оптимальність [3]. Аналіз класичних оптимальних методів керування демонструє використання матричних рівнянь Ріккаті. Проте значна обчислювальна складність, з урахуванням багатовимірної нелінійної моделі об'єкта керування, при розв'язанні крайових задач для синтезу програмного керування [4] обмежує їх застосування. Квадратичні критерії оптимальності вимагають формалізації матриць вагових коефіцієнтів на основі додаткових процедур обчислень [5] або емпіричних розрахунків. Розвиток фундаментального принципу керування на основі зворотних зв'язків [6] базується на широкому використанні для синтезу оптимального керування статичних зворотних зв'язків [7; 8], лінійних матричних нерівностей з урахуванням дії довільних, обмежених збурень [9], однак застосовуються в основному для лінійних або еквівалентних лінійних моделей [7; 10] керованих систем, у т. ч. морських рухомих об'єктів

[11; 12]. Альтернативні підходи, наприклад, засновані на принципах розв'язання обернених задач динаміки та структурного синтезу [13], не завжди дозволяють оптимізувати параметри програмних траєкторій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій демонструє необхідність у створенні й розвитку нових теоретичних та прикладних методів оптимального керування суднами. Один з таких методів детально розроблено та описано у роботах [14–16]. Пропонований метод базується на використанні системи зі змінною структурою і включає у себе наступні основні етапи: планування оптимальної траєкторії, визначення моментів перемикання керуючих функцій у ланцюгах зворотних зв'язків об'єкта, синтез керуючих функцій у відповідних ланцюгах зворотного зв'язку об'єкта. Ці системи забезпечують мінімізацію енерговитрат або максимальну швидкість для конкретного функціонального режиму керування рухомих об'єктом з достатньою точністю.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Актуальною постає задача синтезу оптимальних систем керування зі змінною структурою для різноманітних функціональних режимів рухомих об'єктів, наприклад, судна у режимі стабілізації курсу. Максимальна швидкість рухів та підрулюючих пристроїв у цьому режимі відіграє важливу, а іноді й життєво необхідну роль. При цьому проблема розробки, базуючись на системі зі змінною структурою, системи найшвидшої стабілізації курсу судна, яке описується нелінійною моделлю 3-го порядку, залишається невирішеною.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ — на базі системи зі змінною структурою синтез системи найшвидшої стабілізації курсу судна, яке описується нелінійною моделлю 3-го порядку; подальше імітаційне моделювання руху судна у середовищі MATLAB/Simulink для демонстрації ефективності системи зі змінною структурою в порівнянні з ПІД-регулятором.

Як *методи дослідження* використовуються методи теорії оптимальних процесів.

Об'єкт дослідження — оптимальні системи керування.

Предмет дослідження — оптимальні системи зі змінною структурою для найшвидшої стабілізації курсу судна, модель якого має нелінійність.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для оцінки ефективності запропонованої системи керування розглянемо імітаційне моделювання процесу стабілізації кута курсу судна ψ , яке керується пером керма α [17]:

$$\begin{cases} \ddot{\omega}(t) + a_1 \dot{\omega}(t) + a_2 \omega(t) |\omega(t)| = \\ = b_1 \dot{\alpha}(t) + b_2 \alpha(t), \\ \dot{\psi}(t) = \omega(t). \end{cases} \quad (1)$$

де α — кут перекладки керма; ω — кутова швидкість; ψ — кут курсу; $a_1 = 0,084$, $a_2 = 0,001$, $b_1 = 0,0063$, $b_2 = 0,0002$ — наведені коефіцієнти, задані для конкретної моделі судна.

Розглядається задача найшвидшої стабілізації, тобто задача максимальної швидкодії, за якої оптимальний критерій виражається мінімальним часом перехідного процесу:

$$J = \int_{t_1}^{t_2} dt = \min, \quad (2)$$

де t_1 , t_2 — відповідно час початку та кінця процесу стабілізації.

Сформуємо оптимальні траєкторії стабілізації судна, яке описується рівнянням (1), при фізичній обмеженості рухів судна (нульовій третій похідній кутової швидкості) $\ddot{\omega} = 0$ ($\ddot{\omega} = \text{const}$), для граничних умов $\psi(0) = 0$, $\omega(0) = 0$, $\dot{\omega}(0) = 0$, $\dot{\psi}(0) = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-3}$; $\psi(T) = \psi_{\text{зад}} = 25$ град, $\omega(T) = 0$, $\dot{\omega}(T) = 0$, $\dot{\psi}(T) = \pm 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-3}$:

— перший відрізок

$$\begin{cases} \psi(t_1^s) = 2 \cdot 10^{-6} \frac{(t_1^s)^3}{6}, \\ \omega(t_1^s) = 2 \cdot 10^{-6} \frac{(t_1^s)^2}{2}, \\ \dot{\omega}(t_1^s) = 2 \cdot 10^{-6} t_1^s; \end{cases} \quad (3)$$

— другий відрізок

$$\begin{cases} \psi(t_2^s) = \psi(t_1^s) + \omega(t_1^s)(t_2^s - t_1^s) + \\ + \dot{\omega}(t_1^s) \frac{(t_2^s - t_1^s)^2}{2} - 2 \cdot 10^{-6} \frac{(t_2^s - t_1^s)^3}{6}, \\ \omega(t_2^s) = \omega(t_1^s) + \dot{\omega}(t_1^s)(t_2^s - t_1^s) - \\ - 2 \cdot 10^{-6} \frac{(t_2^s - t_1^s)^2}{2}, \\ \dot{\omega}(t_2^s) = \dot{\omega}(t_1^s) - 2 \cdot 10^{-6} (t_2^s - t_1^s); \end{cases} \quad (4)$$

— третій відрізок

$$\begin{cases} \psi(t_2^s) + \omega(t_2^s)(T - t_2^s) + \\ + \dot{\omega}(t_2^s) \frac{(T - t_2^s)^2}{2} + \\ + 2 \cdot 10^{-6} \frac{(T - t_2^s)^3}{6} = \psi_{\text{зад}}, \\ \omega(t_2^s) + \dot{\omega}(t_2^s)(T - t_2^s) + \\ + 2 \cdot 10^{-6} \frac{(T - t_2^s)^2}{2} = 0, \\ \dot{\omega}(t_2^s) + 2 \cdot 10^{-6} (T - t_2^s) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

де t_1^s , t_2^s — моменти перемикання; T — момент закінчення перехідного процесу стабілізації.

Слід відзначити, що траєкторії виду (3)–(5) у координатній формі при позитивних значеннях похідних вектора координат стану будуть оптимальні щодо критерію (2) при русі морського об'єкта з максимальним можливим числом максимальних можливих значень похідних вектора координат з урахуванням обмежень на керуючі впливи і виконання всіх заданих граничних умов [18]:

$$\max_k \max_{\dot{\mathbf{X}}_k} \left\{ \dot{\mathbf{X}}_k \left[\mathbf{X}_k, t_0, t \right] \right\}.$$

Розв'язання рівнянь (3)–(5) визначає моменти часу перемикання керуючих функцій $t_1^s = 47,77 \text{ с}$, $t_2^s = 143,34 \text{ с}$ і закінчення перехідного процесу $T = 191,12 \text{ с}$.

Синтез системи зі змінною структурою базується на формуванні рівняння балансу сил та моментів. За умови функціональних обмежень рухів та підрулюючих пристроїв $\ddot{\omega} = 0$ ($\ddot{\omega} = \text{const}$), диференціюючи перше рівняння із системи (1)

$$\ddot{\omega}(t) + a_1 \dot{\omega}(t) + a_2 \omega(t) |\omega(t)| = b_1 \dot{\alpha}(t) + b_2 \alpha(t), \quad (6)$$

отримаємо

$$\ddot{\omega}(t) + a_1 \ddot{\omega}(t) + 2a_2 \dot{\omega}(t) |\omega(t)| = b_1 \ddot{\alpha}(t) + b_2 \dot{\alpha}(t). \quad (7)$$

Після підстановки (6) з урахуванням $\ddot{\omega} = 0$ ($\ddot{\omega} = \text{const}$) у рівняння (7) маємо

$$\begin{aligned} b_1 \ddot{\alpha}(t) + (b_2 - a_2 b_1) \dot{\alpha}(t) - a_1 b_2 \alpha(t) = \\ = (2a_2 |\omega(t)| - a_1^2) \dot{\omega}(t) - a_1 a_2 |\omega(t)| \omega(t). \end{aligned} \quad (8)$$

Рівняння (8) є тотожним рівнянню балансу сил та моментів, а також їх похідних. Структурна схема системи керування зі змінною структурою, яка базується на (8), показана на рис. 1.

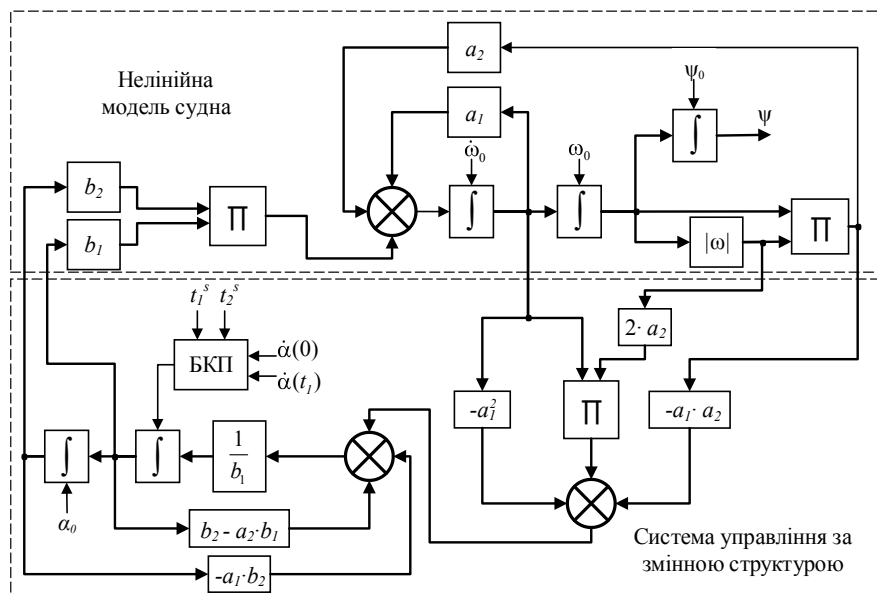


Рис. 1. Структурна схема системи керування зі змінною структурою

У результаті імітаційного моделювання системи, беручи до уваги (3)–(5), можна визначити значення кутової швидкості перекладки керма в момент перемикавання: на першому відрізку траєкторії $\dot{\alpha}(0) = 3,17 \cdot 10^{-4}$ рад/с на другому $\dot{\alpha}(t_1^s) = 9,1 \cdot 10^{-5}$ рад/с і на третьому $\dot{\alpha}(t_2^s) = 1,62 \cdot 10^{-4}$ рад/с.

Результати моделювання для системи зі змінною структурою в порівнянні з ПД-регулятором наведені на рис. 2: кут курсу від часу $\psi(t)$ — a ; кутова швидкість від часу $\omega(t)$ — b ; кутова швидкість від куту курсу $\omega(\psi)$ — c ; кут перекладки керма від часу $\alpha(t)$ — d , що демонструють значно нижчі витрати енергії для систем зі змінною структурою (0,03 відносних одиниць) у порівнянні з ПД-регулятором (5,48 відносних одиниць).

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Наведені результати моделювання демонструють ефективність запропонованого підходу за показниками витрати енергії і значень помилок керування при

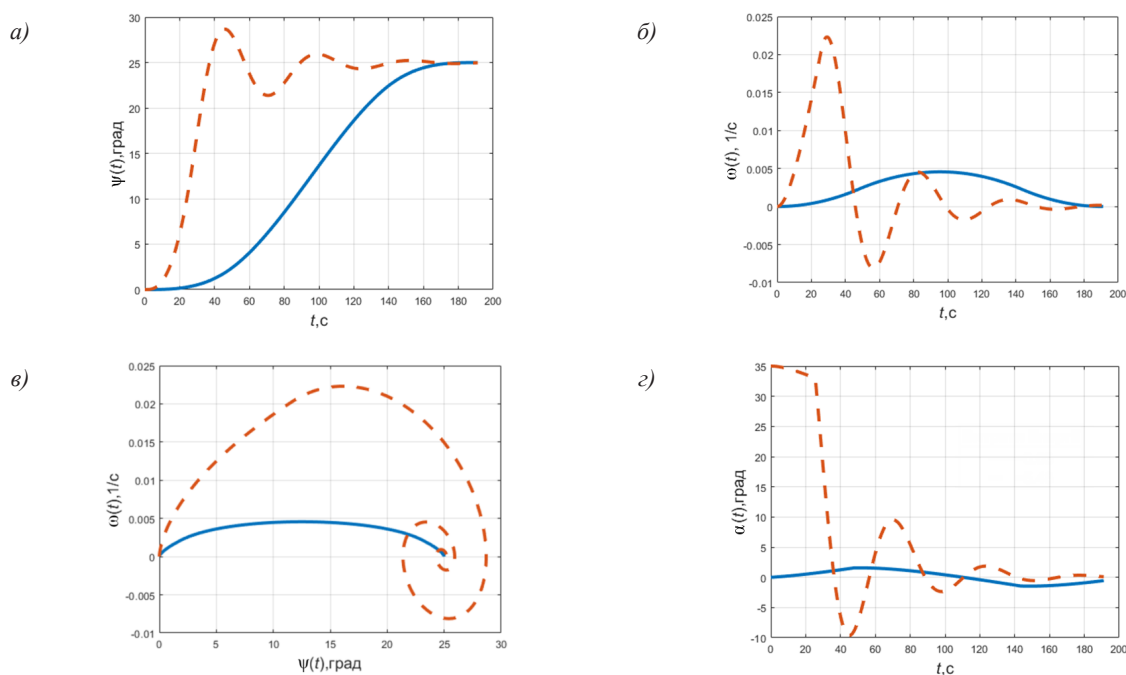


Рис. 2. Результати імітаційного моделювання стабілізації курсу судна: система зі змінною структурою — суцільна лінія; ПД-регулятор — штрихована лінія

порівняльному аналізі із широкоживаними системами керування, побудованими на основі оптимізованих ПІД-регуляторів. Проте слід відзначити, що ПІД-регулятори змінюють свої параметри у режимі «онлайн», у той час як система зі змінною структурою має програмний, наперед розрахований вигляд керуючих впливів. У реальному водному середовищі судно постійно знаходиться під впливом не повністю контрольованих стохастичних впливів (збурення або вітрове хвилювання). ПІД-регулятор здатний досить ефективно компенсувати ці впливи, в той час як для системи зі змінною структурою не має можливості їх врахувати і компенсувати. Це призводить до необхідності використання додаткових (наприклад, робастних) систем, які дозволяють модернізувати системи зі змінною структурою та привести систему до стабільного заданого стану в найбільш критичні моменти (наприклад, при суднових аварійних ситуаціях під час шторму) за оптимальний (найшвидший) час. Синтез таких дульних робастно-оптимальних систем

більш складний, проте неминучий у разі наявності неконтрольованих впливів.

ВИСНОВКИ. На основі системи зі змінною структурою вирішена проблема синтезу керуючих функцій для судна, що описується нелінійною моделлю 3-го порядку. Це дозволило вирішити завдання оптимізації процесів стабілізації курсу для задач максимальної швидкодії рухів та підрюлюючих пристроїв.

Було проведено подальше імітаційне моделювання руху судна у середовищі MATLAB/Simulink, що продемонструвало ефективність системи зі змінною структурою в порівнянні з ПІД-регулятором.

На основі отриманих результатів передбачаються подальші дослідження як щодо модифікації суднових авторульових та систем динамічного позиціонування, так і щодо застосування результатів дослідження для керування рухомими об'єктами інших типів і призначення, наприклад, безпілотних літальних об'єктів, а саме квадрокоптерів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кунцевич, В. М. (2004). Синтез робастно-оптимальных систем управления нестационарными объектами при ограниченных возмущениях. *Проблемы управления и информатики*, 2, 19-31.
- [2] Atherton, D. P., & Majhi, S. (1999). Limitations of PID controllers. In *Proceedings of the 1999 American Control Conference* (Cat. No. 99CH36251), 6, 3843-3847. IEEE. DOI: 10.1109/ACC.1999.786236.
- [3] Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE transactions on control systems technology*, 13(4), 559-576.
- [4] Зеликин, М. И. (1998). *Однородные пространства и уравнение Риккати в вариационном исчислении*. Москва: Факториал. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331.
- [5] Ларин, В. Б. (2004). Об обращении проблемы аналитического конструирования регуляторов. *Проблемы управления и информатики*, 1, 17-25.
- [6] Емельянов, С. В., & Коровин, С. К. (1997). *Новые типы обратной связи*.
- [7] Banos, A. (2004). Nonlinear quantitative stability. *Int. Journal of Robust and Non-Linear Control*, 14, 289-306. <https://doi.org/10.1002/rnc.879>.
- [8] Comasolivas, Ramón, Escobet, Teresa & Quevedo, Joseba. (2012). Automatic design of robust PID controllers based on QFT specifications. *IFAC Proceedings Volumes* (IFAC-PapersOnline), 2, 715-720. 10.3182/20120328-3-IT-3014.00121.
- [9] Хлебников, М. В., Поляк, Б. Т., & Кунцевич, В. М. (2011). Оптимизация линейных систем при ограниченных внешних возмущениях (техника инвариантных эллипсоидов). *Автоматика и телемеханика*, 11, 9-59.
- [10] Balashevich N. V., Gabasov R., & Kirillova F. M. (2000). Numerical methods for open-loop and closed-loop optimization of linear control systems. *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki*, 40/6, 838-859.
- [11] Fossen, Thor & Grøvlén, Åslaug. (1998). Nonlinear Output Feedback Control of Dynamically Positioned Ships Using Vectorial Observer Back-Stepping. *Control Systems Technology, IEEE Transactions*, 6, 121-128. 10.1109/87.654882.
- [12] Johansen, T. A., & Fossen, T. I. (2013). Control allocation – a survey. *Automatica*, 49(5), 1087-1103. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.01.035>.
- [13] Крутько, П. Д. (2004). *Обратные задачи динамики в теории автоматического управления*.
- [14] Timchenko, V. & Kondratenko, Yu. (2011). Robust Stabilization of Marine Mobile Objects on the Basis of Systems with Variable Structure of Feedbacks. *Journal of Automation and Information Sciences*, 43, 16-29. 10.1615/JAutomatInfScien.v43.i6.20.
- [15] Timchenko, V. (2012). Synthesis of Variable Structure Systems for Stabilization of Ship at Incomplete Controllability. *Journal of Automation and Information Sciences*, 44, 8-19. 10.1615/JAutomatInfScien.v44.i6.20.
- [16] Timchenko, V. L. & Ukhin, O. A. (2014). Optimization of Stabilization Processes of Marine Mobile Object in Dynamic Positioning Mode. *Journal of Automation and Information Sciences*, 46, 40-52. 10.1615/JAutomatInfScien.v46.i7.40.
- [17] Лукомский, Ю. А., & Чугунов, В. С. (1988). *Системы управления морскими подвижными объектами*. Л.: Судостроение.
- [18] Тимченко, В. Л. (2015). *Системы робастно-оптимальной стабилизации морских подвижных объектов*. Palmarium Academic Publishing.