

<http://dx.doi.org/10.15589/evn20140309>

УДК 656.61:629.584

Н 17

SYNTHESIS OF THE CONTROLLER OF THE UNDERWATER VEHICLE TRIM IN THE OPERATION OF THE EXTERNAL ATTACHED EQUIPMENT

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДИФЕРЕНТУ ПІДВОДНОГО АПАРАТА ПРИ РОБОТІ ЗОВНІШНЬОГО НАЧІПНОГО ОБЛАДНАННЯ

Viktor A. Nadtochii

nva_74@mail.ru

ORCID: 0000-0003-3869-3546

В. А. Надточій,

ВИКЛ.

Kherson Branch of The National University of Shipbuilding, Kherson

Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон

Abstract. The problem of the system synthesis of the automatic stabilization of an underwater vehicle different is considered in the article. For the stabilization of the of the underwater vehicle different, the mathematical model of the gyrating driving of the underwater vehicle which is represented by a differential first-order equation, is constructed. On its basis, the inverse mathematical model of the gyrating driving of the underwater vehicle is determined and a different controller is synthesized. For the purpose of parametric identification of an inverse mathematical model, a series of computer experiments is conducted. Synthesizing the controller allows stabilizing qualitatively the underwater vehicle in the cross-section axis. The obtained results can be used at the construction of the automated control systems of underwater vehicles. For example, they can be used to expel mechanical wedging of the clamp of the paring knife of ropes as a result of the act of the disturbing force which originates at the emersion of the underwater vehicle. Thus, the alternative controller of the underwater vehicle different on the basis of the inverse model of the control installation with qualitative parameters of control is suggested.

Keywords: underwater vehicle; stabilization system; controller; cable cutter.

Анотація. Синтезовано систему автоматичної стабілізації диференту телекерованого підводного апарата на основі інверсної моделі його динаміки та регулятора швидкості обертання гребного гвинта вертикального рушія. Система забезпечує безаварійне від'єднання різак підводного апарата від троса після завершення підводної операції дистанційного перерізування підводного троса.

Ключові слова: підводний апарат; система стабілізації; регулятор; різак троса.

Аннотация. Синтезирована система автоматической стабилизации дифферента телеуправляемого подводного аппарата на основе инверсной модели его динамики и регулятора скорости вращения гребного винта вертикального движителя. Система обеспечивает безаварийное отсоединение резака подводного аппарата от троса после завершения подводной операции дистанционного перерезывания подводного троса.

Ключевые слова: подводный аппарат; система стабилизации; регулятор; резак троса.

REFERENCES

- [1] Blintsov O.V., Nadtochii V.A. *Avtomatyzatsiia keruvannia odnolankovymy samokhidnymy pryviaznymy pidvodnymy systemamy* [Automation of control of the one-stage propelled tethered underwater systems]. Mykolaiv, NUK Publ., 2014. 124 p.
- [2] Blintsov S.V., Nadtochii V.A. *Vozmozhnosti onlayn-identifikatsii parametrov podvodnogo apparata dlya postroeniya sistem upravleniya na baze inwersnoy modeli* [Possibilities for online identification of the underwater vehicle parameters for building control systems based on the inverse model]. *Materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy»* [Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference «Modern methods and means of ocean engineering studies»]. Moscow, 2013, pp. 305–309.
- [3] Blintsov O.V. *Udoskonalennia keruvannia kvazistatsionarnym prostоровym rukhom samokhidnoi pryviaznoi pidvodnoi systemy v umovakh nevyznachenosti*. Avtoreferat Diss. [Improving the control of the quasi-steady spatial motion of a propelled tethered underwater system under uncertainty. Author's abstract.]. Lviv, 2009.
- [4] Merenov I.V., Smolin V.V. *Spravochnik vodolaza. Voprosy i otvety* [Diver's reference book. Questions and answers]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1990. 400 p.

- [5] Korobkov V.A., Levin V.S., Lukoshkov A.V., Serebrenitskiy P.P. *Podvodnaya tekhnologiya* [Underwater technology]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981. 240 p.
- [6] Khekmen D., Kodi D. *Podvodnyy instrument* [Underwater instrument]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 128 p.
- [7] Shostak V.P. *Podvodnye apparaty-roboty i ikh manipulyatory* [Underwater robocrafts and their manipulators]. Chikago, Magatron Publ., 2011. 134 p.
- [8] Yastrebov V.S. *Podvodnye apparaty-roboty i ikh manipulyatory* [Underwater robocrafts and their manipulators]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 144 p.
- [9] Antonelli G., Fossen T., Yoerger D. *Springer Handbook of Robotics, chapter Underwater Robotics*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2008, pp. 987–1008.
- [10] Fossen T.I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. John Wiley & Sons Ltd. Hardcover, 2011. 600 p.
- [11] Gianluca Antonelli. *Underwater Robots*. Springer, 2013. 279 p.
- [12] Moore S., Harry Bohm, Vickie Jensen. *Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication*. Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010. 770 p.
- [13] Robert D. Christ, Robert L. Wernli, Sr. *The ROV Manual – A User Guide for Remotely Operated Vehicles*. Second Edition, Published by Elsevier Ltd., 2014. 679 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Одним з головних завдань підводної робототехніки є реалізація безлюдних технологій виконання механічних робіт під водою [8, 12]. До таких робіт належать підводне зварювання і різання металевих конструкцій, захоплення і переміщення вантажів, перерізування тросових конструкцій тощо [6, 7, 11]. Значені роботи виконуються, зазвичай, за допомогою начіпного обладнання (НО) – маніпуляторів, різаків тросів та ін., які встановлюються на телекерованому підводному апараті (ПА) і керуються дистанційно оператором з судна забезпечення у ручному режимі.

З позицій автоматизації керування такими роботами значну складність викликає задача стабілізації просторового положення ПА під час функціонування НО. Особливу складність має задача стабілізації диференту ПА в умовах дії зовнішніх збурень, які виникають внаслідок механічної взаємодії НО та підводного об'єкта (ПО).

Зокрема, актуальною є прикладна задача стабілізації диференту ПА у випадку застосування різаків тросів (РТ) заякорених ПО з позитивною плавучістю (технологічних поплавців підводних монтажних конструкцій, понтонів підводних трубопроводів тощо). Оскільки після перерізування троса затискач РТ, який під час операції зафіксований до троса над місцем перерізування, не може миттєво від'єднатися від троса, виникає загроза його заклинювання у результаті спливання ПО з тросом і, у найгіршому випадку, – його механічного ушкодження.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання просторової стабілізації ПА під дією зовнішніх збурень розглядалися українськими і зарубіжними дослідниками здебільшого з позицій нейтра-

лізації впливу кабель-троса прив'язного ПА, який має місце внаслідок дії підводної течії та хитами судна забезпечення, та з позицій стабілізації крену ПА [3, 9, 10]. Наукове завдання з першого напрямку практично розв'язане шляхом удосконалення законів керування маршовими та вертикальними рушіями ПА, а друге – шляхом розробки законів керування його підрулюючих пристроїв [1, 13]. Проте постановка задачі стабілізації диференту ПА під дією збурюючих сил, які виникають при спливанні підводного об'єкта, у науково-технічній літературі наразі не висвітлена, що і зумовлює актуальність цієї роботи.

МЕТА РОБОТИ – синтез системи автоматичної стабілізації диференту підводного апарата, яка б унеможливила механічне заклинювання затискача різаків тросів після перерізування троса та дії збурюючої сили, що виникає під час спливання підводного об'єкта.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Ознайомлення з виробничою літературою [4–6] дає змогу встановити, що керований процес перерізування тросу за допомогою ПА, оснащеного спеціальним НО – різаків тросів (РТ), складається з наступних фаз:

приведення ПА до троса ПО позитивної плавучості та позиціонування (зазвичай проти течії) з візуальним контролем за допомогою штатної відеокамери ПА;

захоплення троса ПО затискачем РТ з візуальним контролем за допомогою штатної відеокамери ПА;

перерізування троса виконавчим пристроєм РТ – електричним різаків тросів з візуальним контролем за допомогою штатної відеокамери ПА;

розжимання затискача у процесі спливання верхньої частини троса під дією ПО з візуальним контролем за допомогою штатної відеокамери ПА.

Таким чином, після перерізування троса ПА повинен відстикуватись від нього. Але на ПА у процесі спливання діє сила, прикладена до РТ, яка залежить від динаміки спливання ПО. При цьому створюється диферентуючий момент ПА, який може призвести до заклинювання затискача РТ, а при кутах диференту, що виходять за межі $\psi = \pm 10^\circ$, на РТ можуть утворитись моменти, які здатні завдати йому механічні ушкодження. Тому одразу після відрізання троса має вмикатись рушій – стабілізатор диференту, щоб не допустити механічного ушкодження РТ.

З використанням вертикального рушія ПА набиратиме швидкість V_y . Проте забезпечити синхронне спливання ПА та об'єкта недостатньо. Необхідно вирівняти диферент ПА та утримувати його в діапазоні $\psi = \pm 5^\circ$, в цьому випадку вплив збурюючої сили зменшується майже до нуля і з'являється можливість розтиснути затискач.

Рух ПО моделюватимемо за експоненціальним законом:

$$\frac{dv_m}{dt} = \frac{1}{T_m}(V_m - v_m), \quad (1)$$

де v_m – поточне значення швидкості спливання ПО; $V_m = 0,5$ м/с – кінцеве значення швидкості спливання ПО; $T_m = 1$ с – стала часу моделі спливання ПО [4].

Вплив троса на ПА моделюватимемо, використовуючи ММ КТ з двох елементів – корінного та ходового кінців: координата ходового кінця збігатиметься з точкою розташування затискача маніпулятора, координата корінного кінця змінюватиметься за законом

$$y_m = \iint \frac{dv_m}{dt} dt dt. \quad (2)$$

Довжину КТ приймемо незрівнянно малою у порівнянні з габаритами ПА. Це забезпечить формування силового впливу на ПА в точці утримання троса маніпулятором.

На рис. 1 зображено динаміку зміни диференту ПА внаслідок дії спливаючого ПО.

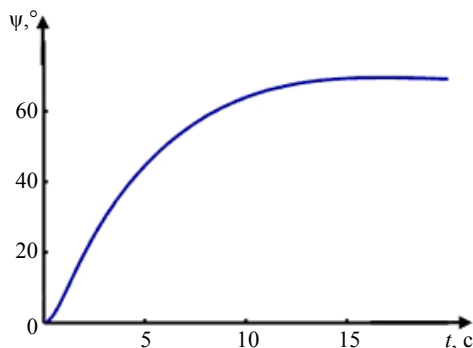


Рис. 1. Зміна диференту ПА внаслідок дії збурень від троса

Обертовий рух ПА під дією збурюючих сили та моменту характеризується суттєвими нелінійностями, оскільки виникає внаслідок взаємодії нелінійних

складових: рушійного пристрою; корпусу ПА; власне невизначених зовнішніх збурень у вигляді вектора сили \vec{F}_m та моменту M_m троса.

Для стабілізації диференту ПА виділимо елементи математичної моделі обертового руху ПА, кожен з яких описується диференціальним рівнянням першого порядку:

- модель електродинамічних процесів в електродвигуні (ЕД) рушійного пристрою;
- модель динаміки механічних процесів в ЕД рушійного пристрою;
- модель динаміки обертового руху корпусу ПА.

Електродинамічні перехідні процеси, які протікають в ЕД рушійного пристрою ПА, значно швидші, ніж механічні перехідні процеси в ньому, тому математичну модель динаміки електромеханічних процесів рушійного пристрою можна представити у вигляді лінійного диференціального рівняння першого порядку, керуючим впливом є напруга живлення ЕД u , керованою величиною – швидкість обертання гребного гвинта $\omega_{\Gamma\Gamma}$.

Застосуємо принцип підпорядкованого керування та отримаємо структуру системи автоматичної стабілізації диференту ПА, яка містить регулятор швидкості обертання гребного гвинта $R_{\omega_{\Gamma\Gamma}}$ та стабілізатор диференту ПА S_ψ (рис. 2).

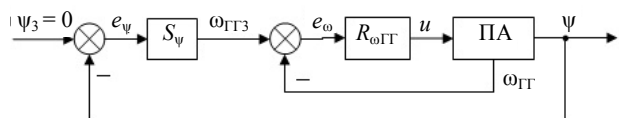


Рис. 2. Структура системи автоматичної стабілізації диференту ПА

У роботі [1] синтезовано ПІ-регулятор швидкості обертання гребного гвинта $R_{\omega_{\Gamma\Gamma}}$, який працює в умовах невизначених збурень зі сталою часу $T_{\omega_{\Gamma\Gamma}} = 0,02$ с. Застосуємо його для керування рушійним пристроєм ПА, тоді для реалізації системи автоматичної стабілізації диференту ПА залишається синтезувати стабілізатор S_ψ .

Задачею S_ψ є утримання нульового диференту ПА, виробляючи керуючий вплив $\omega_{\Gamma\Gamma 3}$ для регулятора $R_{\omega_{\Gamma\Gamma}}$. При успішній роботі S_ψ диферент ПА буде знаходитись у діапазоні $\psi = \pm 1^\circ$, що забезпечить мінімізацію збурюючих впливів від троса. Крім того, в цьому діапазоні нелінійності обертового руху корпусу ПА також будуть проявлятися слабо, тому представимо математичну модель обертового руху ПА диференціальним рівнянням першого порядку з лінійними коефіцієнтами $k_{\psi 1}$ та $k_{\psi 2}$:

$$k_{\psi 1} \frac{d\psi}{dt} = \omega_{\Gamma\Gamma} - k_{\psi 2} \psi + \omega_{33}. \quad (3)$$

Величина ω_{33} являє собою зовнішнє збурення, приведенє до розмірності керуючого впливу, що виникає внаслідок взаємодії ПА з тросом ПО, який спливає. Очевидно, що ω_{33} , а також коефіцієнти k_{ψ_1} та k_{ψ_2} залежать від V_m .

Для стабілізації диференту застосуємо інверсну модель обертового руху ПА [2]:

$$\omega_{\Gamma_3} = k_{\psi_1} \omega_3 + k_{\psi_2} \psi - \omega_{\text{const}}; \quad (4)$$

$$\omega_3 = -\frac{\psi}{T_\psi}, \quad (5)$$

де ω_3 – заданє значення кутової швидкості ПА; ω_{const} – константа, що компенсує вплив ω_{33} ; T_ψ – стала часу стабілізатора диферента.

Серію комп'ютерних експериментів з метою параметричної ідентифікації інверсної математичної моделі (4) було проведено при $V_m = 0,5$ м/с.

Установлено, що при керуючих впливах $\omega_{\Gamma_3} \approx 72 \dots 78$ с⁻¹ забезпечуються достатні для оперативного керування кутові швидкості $\omega_3 \approx -1 \dots 1^\circ/\text{с}$. Керуючі впливи задавались для диферентів у діапазоні $\psi \in [-5; 5^\circ]$.

Апроксимація табличних даних методом найменших квадратів дала змогу отримати наступні параметри моделі: $\omega_{\text{const}} = -74,6333$ с⁻¹, $k_{\psi_1} = -2,8337$ град⁻¹ та $k_{\psi_2} = -0,083$ (град·с)⁻¹.

На рис. 3 представлено результати моделювання системи автоматичної стабілізації диференту ПА.

Як бачимо, стабілізатор утримує диферент ПА в межах $\psi \in (-2,6; 5,6^\circ)$, що запобігає механічному ушкодженню маніпулятора, а через 5 с диферент потрапляє у діапазон $\psi \in (-1; 1^\circ)$ і утримується у ньому, що дає можливість розтиснути затискач маніпулятора.

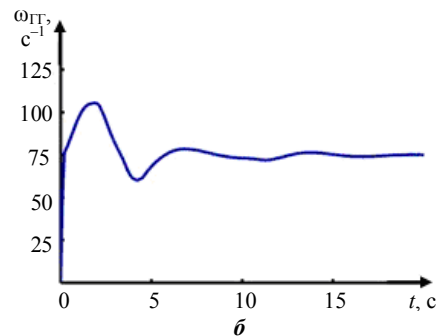
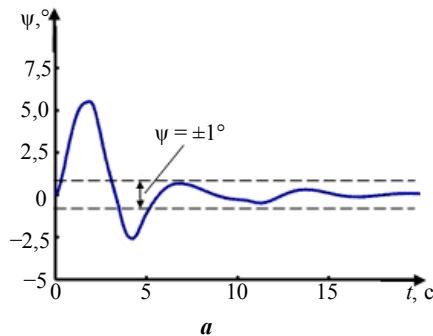


Рис. 3. Динаміка зміни диференту ПА (а) та керуючого впливу ω_{Γ_3} (б)

ВИСНОВОК

Для підводної операції дистанційного перерізування троса за допомогою підводного апарата з різакм троса синтезовано систему автоматичної стабілізації диференту підводного апарата на основі інверсної математичної моделі його обертового руху та регулятора швидкості обертання гребного гвинта,

з'єднаних за підпорядкованою структурою. Після перерізування троса та виникнення збурюючих впливів запропонована система утримує диферент апарата в межах від $-2,6$ до $5,6^\circ$, що запобігає механічному ушкодженню маніпулятора, а через 5 секунд диферент потрапляє й утримується в діапазоні від -1 до 1° , що дає можливість безаварійно розтиснути затискач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Блінцов, О. В.** Автоматизация керування одноланковими самохідними прив'язними підводними системами [Текст] : навч. посіб. / О. В. Блінцов, В. А. Надточій. – Миколаїв : НУК, 2014. – 124 с.
- [2] **Блінцов, С. В.** Возможности онлайн-идентификации параметров подводного аппарата для построения систем управления на базе инверсной модели [Текст] / С. В. Блинцов, В. А. Надточий // Современные методы и средства океанологических исследований : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. – М. : АПР, 2013. – Т. 1. – С. 305–309.
- [3] **Блінцов, О. В.** Удосконалення керування квазістаціонарним просторовим рухом самохідної прив'язної підводної системи в умовах невизначеності [Текст] : автореферат дис. ... канд. техн. наук. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2009.
- [4] **Меренов, И. В.** Справочник водолаза. Вопросы и ответы [Текст] / И. В. Меренов, В. В. Смолин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Судостроение, 1990. – 400 с.
- [5] Подводная технология [Текст] / В. А. Коробков, В. С. Левин, А. В. Лукошков, П. П. Серебrenицкий. – Л. : Судостроение, 1981. – 240 с.
- [6] **Хэксмен, Д.** Подводный инструмент [Текст] / Д. Хэксмен, Д. Коды : [пер. с англ.]. – Л. : Судостроение, 1985. – 128 с.

- [7] **Шостак, В. П.** Подводные аппараты-роботы и их манипуляторы [Текст] / В. П. Шостак. – Чикаго : Мегатрон, 2011. – 134 с.
- [8] **Ястребов, В. С.** Подводные аппараты-роботы и их манипуляторы [Текст] / В. С. Ястребов. – М. : Наука, 1980. – 144 с.
- [9] Antonelli G., Fossen T. and Yoerger D. Springer Handbook of Robotics, chapter Underwater Robotics [Text], pages 987–1008. B. Siciliano, O. Khatib, (Eds.), Springer-Verlag, Heidelberg, D, 2008.
- [10] **Fossen, T. I.** Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control [Text] / T. I. Fossen. – John Wiley & Sons Ltd. Hardcover, 2011. – 600 p.
- [11] Gianluca Antonelli. Underwater Robots – Springer, 2013. – 279 p.
- [12] **Moore, S.** Underwater Robotics: Science, Design & Fabrication [Text] / Steven W. Moore, Harry Bohm, Vickie Jensen. – Publisher : Marine Advanced Technology Education (MATE) Center, 2010. – 770 p.
- [13] Robert D. Christ, Robert L. Wernli, Sr. The ROV Manual – A User Guide for Remotely Operated Vehicles [Text]. Second Edition – Published by Elsevier Ltd., 2014. – 679 p.

© В. А. Надточій

Надійшла до редколегії 13.11.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2014