

Література

1. Van Biert, L., Godjevac, M., Visser, K., & Aravind, P. V. (2016). A review of fuel cell systems for maritime applications. *Journal of Power Sources*, 327, 345–364. doi:10.1016/j.jpowsour.2016.07.007.
2. Baroutaji, A., Arjunan, A., Ramadan, M., Robinson, J., Alaswad, A., Abdelkareem, M. A., & Olabi, A.-G. (2021). Advancements and prospects of thermal management and waste heat recovery of PEMFC. *International Journal of Thermofluids*, 9, 100064. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100064>.
3. Nöst, M., Doppler, C., Klell, M., & Trattner, A. (2017). Thermal Management of PEM Fuel Cells in Electric Vehicles. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, 93–112. doi:10.1007/978-3-319-57445-5_7.
4. Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Fuel Cell Power Systems for Maritime Applications: Progress and Perspectives. *Sustainability*, 13(3), 1213. doi:10.3390/su13031213.
5. He, T., Shi, R., Peng, J., Zhuge, W., & Zhang, Y. (2016). Waste Heat Recovery of a PEMFC System by Using Organic Rankine Cycle. *Energies*, 9(4), 267. doi:10.3390/en9040267.
6. Експериментальні дослідження термоакустичних двигунів з двофазним робочим тілом. В. В. Коробко, А. П. Шевцов. Published: by National Aerospace University - Kharkiv Aviation Institute. *Journal: Aerospace technic and technology* pp.87-93; <https://doi.org/10.32620/akt.2022.4sup1.12>.

FEATURES OF HYBRID POWER PLANTS WITH PEM FC ELECTROCHEMICAL GENERATORS

Korobko V.V. Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Operation of Ship Power Plants and Thermal Power Engineering, of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Abstract. This paper discusses the utilization of electrochemical generators (ECGs) based on PEMFC in marine and shipboard power systems. The application of PEMFC provides ships and their hybrid power systems with fundamentally new capabilities. For marine power, PEMFC represents a relatively novel solution, thus, it's essential to consider the specific operational processes of ECGs when integrating this equipment into existing marine energy-saving systems. This approach ensures the achievement of maximum efficiency in hybrid power systems.

Key words: Ship power plants, PEMFC, waste heat emissions.

УДК 681.51

РОБАСТНО-ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ МОРСЬКИМИ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Тимченко В.Л.

доктор технічних наук,

професор кафедри морського приладобудування

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова,

м. Миколаїв, Україна

vl.timchenko58@gmail.com

Анотація. Управління перехідними процесами широкого класу рухомих об'єктів, що описуються звичайними нелінійними диференціальними рівняннями, вимагає розробки робастно-оптимальних систем зі змінною структурою. Запропоновано рішення цієї задачі за допомогою загальної алгоритмічної процедури побудови оптимальних траєкторій, визначення моментів перемикання та синтезу керуючих функцій для багатовимірних систем. Контроль невідповідності траєкторії руху фізичного об'єкта оптимальній моделі розрахункової траєкторії

дозволяє врахувати значення оптимального керування та сформувати робастну підсистему, яка забезпечує інваріантність до неповної інформації про рухомий об'єкт.

Ключові слова. Робастно-оптимальне керування, система змінної структури, морський рухомий об'єкт, квадаторотний дрон

У період інтенсивного розвитку основ сучасної теорії управління проблеми, пов'язані з розробкою бажаних (оптимальних) траєкторій руху/стабілізації об'єкта, досліджувалися в класичних працях Р. Белмана, Р. Калмана, Н. Красовського, А. Фельдбаума, Л. Понтрягіна та інших відомих вчених. В цих роботах математично формалізовано основні вимоги до розв'язання задач синтезу оптимального керування за квадратичними критеріями оптимальності мінімуму витрат енергії та максимальної швидкодії. Це був прорив у системах управління, особливо в космічній сфері, де для чітко визначених об'єктів і заданих властивостей навколишнього середовища були потрібні найвищі точність і ефективність [1,2]. Дослідження інших проблем керування, наприклад, руху в умовах аеродинамічного та/або гідродинамічного опору стохастичного середовища з неповністю відомими параметрами математичної моделі рухомого об'єкта, мало настільки значний вплив на похибки керування, що стимулювало швидкий розвиток методів інваріантного, адаптивного, а також пізніше, робастного керування. В 2004 році акад. В. М. Кунцевич [3], підсумовуючи розвиток цих методів, відніс їх до адаптивно-оптимальних методів, що потребують ідентифікації параметрів і налаштування керування (що досить складно забезпечити в реальному часі), та робастно-оптимальних методів, які створюють алгоритми керування з відомими стійкими рішеннями щодо обмежених невизначеностей [4]. Інші широко використовувані методи, засновані на ковзних режимах, мають робастні властивості (враховуючи додаткову потужність керування для їх реалізації), але часте перемикання пристроїв керування негативно впливає на їх ефективність. Робастні властивості також притаманні ПІД-регуляторам, оскільки вони використовують наближене налаштування параметрів моделі рухомого об'єкта, миттєво реагують на помилку та компенсують невизначені збурення.

Визначилася складність синтезу керування багатовимірними об'єктами, яка змусила розробити підхід до формування шуканих траєкторій у роботах, присвячених розв'язанню обернених задач динаміки. Ці методи спрощують синтез оптимального керування, оскільки не вимагають розв'язування рівнянь Ріккати чи варіаційних задач. Проблеми синтезу оптимальних систем стабілізації вихідних координат різних типів рухомих об'єктів, у т.ч. забезпечення додаткових якостей перехідного процесу вирішуються на основі матричних алгебраїчних рівнянь Ляпунова за квадратичним критерієм шляхом синтезу оптимальних регуляторів у статичних і динамічних зворотних зв'язках навіть при стабілізації групи об'єктів [5]

Моделі динаміки морського рухомого об'єкта як твердого тіла, що функціонує на межі між повітрям і водним середовищем, достатньо вивчені і описуються багатовимірними нелінійними стохастичними диференціальними системами рівнянь [6]. Повний точний опис динаміки морського рухомого об'єкта під дією випадкових збурень (течії, вітру, морських хвиль) надзвичайно складний через неповну визначеність параметрів динамічної моделі, оскільки фізично неможливо сформувати та математично описати всі фактори, що впливають на значення параметрів, а також виміряти деякі компоненти зовнішніх збурень (пульсації вітру, нерегулярні хвилі). Використання класичних методів оптимального керування обмежує високий рівень обчислювальної складності, з урахуванням багатовимірної нелінійної моделі керованого об'єкта, необхідністю розв'язування крайових задач для синтезу програмного керування та матричних рівнянь Ріккати при побудові оптимального регулятора. Також критерії квадратичної оптимальності вимагають формалізації матриць вагових коефіцієнтів на основі додаткових розрахункових процедур або емпіричних розрахунків.

Реалізація високотехнологічних функціональних вимог до маневрування та позиціонування морських рухомих об'єктів може бути здійснена за допомогою інженерних систем керування зі змінною структурою на основі спеціальних комутаційних зворотних

зв'язків [7]. Ці системи забезпечують мінімізацію енерговитрат або максимізацію швидкодії для конкретного функціонального завдання керування морським рухомим об'єктом (відповідно, робочим технологічним чи перехідним критичним режимом) з необхідною точністю керування та достатньою інваріантністю до невизначеності параметрів об'єкта та середовища.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволяє значно розширити використання засобів візуального оперативного контролю технічних об'єктів різного призначення. Наприклад, страхування безпечного судноплавства користується все більшим попитом в обмежених акваторіях, особливо під час різноманітних технологічних операцій, таких як маневрування, буксирування, бункерування, навантаження тощо. Аналіз морських аварій, що сталися під час роботи суден в акваторіях з обмеженим доступом, доводить, що близько 70% нещасних випадків відбувається через вплив суб'єктивних причин. Частково це пов'язано з відсутністю достатніх даних про безпеку руху, щоб оператори могли у реальному часі приймати рішення в екстремальних умовах експлуатації. Використання БПЛА для моніторингу морського середовища дозволяє розширити інформаційну оцінку безпеки судноплавства та підвищити контроль над морськими рухомими об'єктами, покращуючи таким чином запобігання надзвичайним ситуаціям на морі.

Застосування запропонованого підходу до синтезу систем зі змінною структурою для різних типів рухомих об'єктів на основі попередньої побудови оптимальних траєкторій стабілізації динамічних процесів дає можливість оптимізувати нелінійні системи до шостого порядку. Сформовані мінімаксні умови оптимальності за різними критеріями дозволяють врахувати обмеження на керуючі дії та розв'язати задачу синтезу для відповідних функціональних задач керування: максимальної швидкості (для критичних режимів) та мінімальних енерговитрат (для технологічних режимів). Невизначеність зовнішнього середовища та динамічного об'єкта вимагає робастної корекції оптимальної системи. Сформовані оптимальні траєкторії та керування забезпечують формування додаткового робастного контуру керування для компенсації неповної апріорної визначеності математичної моделі та неконтрольованих (невимірних) збурень і шумів.

Запропонована методика синтезу робастно-оптимальних систем була апробована на кількох моделях нелінійного рухомого об'єкта та продемонструвала універсальність та інженерну практичність, а також ефективність під впливом зовнішніх обмежених збурень з точки зору точності та контролю енергоспоживання. Сформовано алгоритмічні процедури побудови оптимальних траєкторій, визначення моментів перемикавання та синтезу керуючих функцій для багатовимірних систем. Контроль невідповідності між траєкторією фізичного об'єкта та розрахованою оптимальною траєкторією еталонної моделі дозволяє з урахуванням значень оптимального керування від еталонної системи сформувати робастну підсистему, що забезпечує інваріантність до неповної інформації про динамічну систему. Наведені результати моделювання стабілізації та маневрування судна квадранторного БПЛА в умовах зовнішніх збурень і параметричних шумів демонструють забезпечення необхідної точності керування в межах сформованої оптимальної траєкторії керованих координат.

Література

- [1] Krasovsky, N.N.: Some problems of the theory of stability of motion, Phizmathlit, M., (1959)
- [2] Feldbaum, A.A.: Theory Of Optimal Systems, Phizmathlit, M., (1963)
- [3] Kuntsevich, V.M.: Synthesis of Robust Optimal Adaptive Control Systems for Nonstationary Objects under Bounded Disturbances. In: Journal of Automation and Information Sciences, NY, Begell house inc., vol. 36, issue 3, pp.14–24 (2004)
- [4] Shtessel, Y.B., Moreno, J.A., Fridman, L.M.: Twisting sliding mode control with adaptation: Lyapunov design, methodology and application. In: Automatica, vol. 75, pp. 229–235 (2017)
- [5] Horowitz, I.M.: Survey of quantitative feedback theory (QFT). In: Int. Journal of Robust and Non-Linear Control, vol.11., №10., pp. 887–921 (2001)

[6] Johansen, T., Fossen, T.I.: Control allocation—A survey. In. Automatica, vol.49, pp. 1087–1103 (2013)

[7] V. L. Timchenko, D.O. Lebedev, Algorithmic Procedures Synthesis of Robust-Optimal Control for Moving Objects, In: Y.P. Kondratenko, V.M. Kuntsevich, A.A. Chikrii, V.F. Gubarev (Eds.), Recent Developments in Automatic Control Systems, Series in Automation, Control and Robotics, River Publishers, Gistrup (2022) pp. 289-323. (2022) ISBN: 978-87-7022-674-5/

Robust-Optimal Control for Marine Moving Objects

V.L. Timchenko, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, vl.timchenko58@gmail.com

Abstract. The control of transient processes of a wide class of moving objects described by ordinary nonlinear differential equations requires development of robust-optimal systems with variable structure. The solution of this problem is suggested using general algorithmic procedure for constructing optimal trajectories, determining switching moments and synthesizing control functions for multidimensional systems. The control of the mismatch between the trajectory of a physical object and the optimal model calculated trajectory allows to take into account the values of the optimal control and to form a robust subsystem, which provides invariance to incomplete information about the moving object.

Keywords. Robust-optimal control, variable-structure system, marine moving object, quadrotor UAV

УДК 626.02

АВАРІЯ ПА «ТИТАН» КОМПАНІЇ OCEAN GATE – УРОКИ ТРАГЕДІЇ: ВІД ПРОРИВНОГО СТАРТАПУ ДО ГЛИБОКОВОДНОЇ КАТАСТРОФИ

Трушляков Є.І.,

д-р техн. наук, професор,

*професор кафедри кондиціювання та рефрижерації Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова,
eugeniy.trushliakov@nuos.edu.ua*

Анотація: Проаналізовано відомі з відкритих джерел матеріали, щоб зрозуміти фактори, що призвели до катастрофічної загибелі ПА «Титан» у червні 2023 року при зануренні до «Титаніка», та допомогти гарантувати, що подібна трагедія не повториться у майбутньому.

Ключові слова: підводний апарат, глибоководна аварія, вуглепластиковий корпус, циклічні навантаження, система життєзабезпечення, безпека екіпажу.

19 червня 2023 року в Атлантичному океані зник підводний апарат компанії Ocean Gate «Титан», який вирушив дослідити уламки «Титаніка». ПА перестав виходити на зв'язок приблизно через 1 годину 45 хвилин після занурення. На борту були п'ятеро людей — два члени екіпажу на чолі з керівником самої компанії і три пасажери. Судно шукали близько чотирьох діб, доки у четвер, 22 червня, не було виявлено уламки апарату. Пізніше в Береговій охороні США заявили, що ПА вибухнуло від сильного тиску. Ocean Gate Expeditions, компанія-оператор зниклого апарату «Титан», визнала його екіпаж загиблим.

«Титан» — це дослідницький підводний апарат з максимальною глибиною занурення до 4000м, який може перевозити максимум п'ять осіб, зазвичай пілота та чотирьох «фахівців місії», серед яких можуть бути археологи, морські біологи або будь-хто, хто може дозволити собі такий досвід як турист. Ocean Gate розпочала розробку підводного апарату, попередньо