

2. Inovgrid – Évora Inovcity smart energy grid. Available at: https://pocacito.eu/sites/default/files/Inovcity_%C3%89vora.pdf

3. Torriti, J. (2012). Demand Side Management for the European Supergrid. Energy Policy, vol. 44, pp. 199–206. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421512000651>

4. Von Meier A. Electrical Engineer 137A: Electric Power Systems. Lecture 2: Introduction to Electric Power Systems, Slide 33. 2013.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-542-6-14>

IMPROVING THE QUALITY OF UNMANNED AERIAL VEHICLE ATTITUDE CONTROL UNDER CONDITIONS OF PARAMETRIC AND STRUCTURAL UNCERTAINTY

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ КЕРУВАННЯ ПОЛОЖЕННЯМ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ В УМОВАХ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Satskyi I. S.

*Postgraduate Student at the Department
of Theoretical Electrical Engineering
National Technical University of
Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine*

Сацький І. С.

*аспірант кафедри теоретичної
електротехніки
Національний технічний університет
України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна*

Ostroverkhov M. Ya.

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Theoretical
Electrical Engineering
National Technical University of
Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute”
Kyiv, Ukraine*

Острове́рхов М. Я.

*доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри теоретичної
електротехніки
Національний технічний університет
України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна*

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) швидко розвиваються і набувають широкого використання в різних цивільних програмах, зокрема спостереження, пошуково-рятувальні роботи, перевірка споруд, тощо.

Квадротор є спеціальним класом цього літального апарату, який має чотири гвинти.

Для ефективного керування квадатором необхідно розробляти системи, що здатні протистояти зовнішнім силам, неврахованій динаміці та атмосферним збуренням, адаптуватися до змін умов експлуатації, забезпечуючи стабільність та точність польоту.

Однією з головних проблем, з якими стикаються розробники систем керування, є параметричні та структурні невизначеності. Параметричні невизначеності пов'язані зі змінами маси, аеродинамічних характеристик та зовнішніх збурень, тоді як структурні невизначеності включають такі фактори, як нелінійності динамічної моделі, помилки та шум сенсорів, порушення в системі зв'язку.

Керування multi-input–multi-output (МІМО) невизначеними нелінійними системами привертає значну увагу та становить складну задачу в галузі теорії керування. Квадатор є МІМО-системою, яка демонструє нелінійну динамічну поведінку, зокрема високий ступінь зв'язаності та невизначені нелінійності. Через ці особливості розробка системи керування квадатором є серйозним викликом. Квадатор має фіксоване положення лопатей пропелерів. Його рух можливий виключно за рахунок регулювання кутових швидкостей окремих роторів. Квадратори схильні до різних аеродинамічних ефектів, таких як пориви вітру, шуми датчиків, пертурбації, зміни корисного навантаження.

Керування квадатором можна реалізувати двома способами: за допомогою контролерів, які вимагають точної математичної моделі системи (модельно-орієнтовані контролери), або без її використання (контролери, що не залежать від моделі). Системи керування квадаторами можна умовно поділити на три основні категорії: класичні, робастні та адаптивні методи.

До класичних методів керування належить ПІД-регулятор і його модифікації, що використовуються у більшості систем завдяки своїй простоті та ефективності. Однак цей метод має низьку адаптивність до змін параметрів об'єкта керування. Його параметри налаштовуються емпірично, а стійкість замкнутої системи за наявності збурень і невизначеностей не гарантується. В інших дослідженнях були реалізовані лінійні контролери на основі моделі (LQG, MPC, H_∞), які забезпечують стійкість замкнутої системи. Та їхня ефективність погіршується, коли літальний апарат виходить за межі номінальних умов.

Значна робота була проведена над розробленням гібридних методів керування, що використовують комбінацію різних підходів, що дозволяє в свою чергу компенсувати недоліки окремих методів. Це методи, зокрема на основі адаптивних нейронних мереж [1] і нечіткої

логіки [2], [3]. У роботі [4] автори поєднали адаптивні нейронні мережі з радіальними базисними функціями (RBFNNs) та метод подвійного інтегрального ковзного режиму (SMC). Поєднання в авторами в [5] ПІД-регулятора і нейронних мереж Wavelet дозволило компенсувати недоліки класичних ПІД-регуляторів. Автори роботи [6] використали нечітку логіку типу 2 з еліптичними функціями належності, які налаштовуються за допомогою оптимального алгоритму, заснованого на теорії ковзного режиму (SMC). Робота [7] присвячена інтелектуальному адаптивному backstepping-керуванню (IABC) з використанням нейронної мережі з радіальними базисними функціями (RBFNN) для квадрокоптера.

Попри значний прогрес у розробці систем керування квадроторами, залишаються нерозв'язані проблеми, що ускладнюють створення ефективних алгоритмів керування. Класичні регулятори мають обмежену адаптивність до змін параметрів і структурних невизначеностей. Алгоритми, що базуються на штучному інтелекті, вимагають високих обчислювальних витрат та великих обсягів навчальних даних. Однак для повністю автономної навігації подібні алгоритми, що мають високу обчислювальну складність, не підходять для реалізації на бортових системах. Усі алгоритми керування, навігації та сенсорної обробки повинні виконуватися в режимі реального часу на борту безпілотного апарата, а обчислювальні ресурси вбудованих процесорів є обмеженими. Водночас, спрощення реалізації можливе завдяки усуненню операцій диференціювання, що зменшує навантаження на процесор польотного контролера, залишаючи ресурси для інших важливих завдань.

Ефективний алгоритм керування має забезпечувати слабку чутливість до змін параметрів системи та динамічну декомпозицію каналів керування. Таким чином, необхідний алгоритм, здатний покращити якість керування положенням літального апарату в умовах параметричної та структурної невизначеності.

Метою роботи є підвищення якості керування положенням безпілотного літального апарату шляхом синтезу законів керування на основі концепції зворотних задач динаміки із застосуванням методу мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергії.

Запропоновані закони керування характеризуються слабкою чутливістю до параметричних та координатних збурень, забезпечують динамічну декомпозицію взаємопов'язаної системи та не містять операцій диференціювання, що значно спрощує їх практичну реалізацію. Метод ефективно працює в умовах параметричних і координатних збурень без необхідності використання додаткових алгоритмів адаптації або ідентифікації параметрів.

Для побудови структури регуляторів не потрібна детальна математична модель об'єкта керування. Закон керування формується безпосередньо на основі рівняння об'єкта та диференціального рівняння, яке визначає бажану якість керування координатою, що дозволяє уникнути традиційного розв'язання оптимізаційної задачі.

Додатковою перевагою запропонованого підходу є його проста практична реалізація, яка забезпечується відсутністю операцій диференціювання у регуляторах, а також збереженням стійкості системи навіть за необмеженого збільшення коефіцієнтів підсилення регуляторів.

Література:

1. X. Zhao, X. Wang, S. Zhang and G. Zong. Adaptive neural backstepping control design for a class of nonsmooth nonlinear systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2019. Вип. 49(9). С. 1820–1831.
2. X. Huo, L. Ma, X. Zhao and G. Zong. Observer-based fuzzy adaptive stabilization of uncertain switched stochastic nonlinear systems with input quantization. *J. Franklin Inst.* 2019. Вип. 356(4). С. 1789–1809.
3. H. Wang, P. X. Liu, X. Xie, X. Liu, T. Hayat and F. E. Alsaadi. Adaptive fuzzy asymptotical tracking control of nonlinear systems with unmodeled dynamics and quantized actuator. *Information Sciences*. 2021. Вип. 575. С. 779–792.
4. S. Li, Y. Wang, J. Tan and Y. Zheng. Adaptive RBFNNs/integral sliding mode control for a quadrotor aircraft. *Neurocomputing*. 2016. Вип. 216. С. 126–134.
5. R. A. Barrón-Gómez, L. E. Ramos-Velasco, E. S. E. Quesada and L. R. G. Carrillo. Wavelet neural network PID controller for a UAS transporting a cable-suspended load. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Вип. 50. С. 2335–2340.
6. E. Kayacan and R. Maslim. Type-2 fuzzy logic trajectory tracking control of quadrotor VTOL aircraft with elliptic membership functions. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*. 2017. Вип. 22(1). С. 339–347.
7. M. A. M. Basri, A. R. Husain and K. A. Danapalasingam. Intelligent adaptive backstepping control for MIMO uncertain non-linear quadrotor helicopter systems. *Trans. Inst. Meas. Control*. 2015. Вип. 37(3). С. 345–361.