

УДК 621.317.73

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-66-2-11

РАДЕЛЬЧУК Г. І., МАКАРИШКІН Д. А.,  
ГРЕБІНЧУК А. Д., БОНДАР А. Ю.  
Хмельницький національний університет

## АДАПТИВНА МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ

*У статті наведено структуру адаптивної мікропроцесорної системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом із використанням нелінійної моделі безпілотного літального апарату, що дозволяє підвищити ефективність керування та вимірювання координат безпілотних літальних апаратів. Представлені результати аналізу існуючих адаптивних мікропроцесорних систем автоматичного керування безпілотним літальним апаратом. Встановлено їх переваги та недоліки. Для реалізації на практиці реальної програми керування польотом безпілотного літального апарату є необхідним застосування систематичного процесу проектування та моделювання адаптивної мікропроцесорної системи керування використовуючи алгоритми адаптивного керування зі зворотнім зв'язком L1.*

*Ключові слова: адаптивна мікропроцесорна система автоматичного керування, безпілотний літальний апарат, адаптивне керування, лінійна модель, нелінійна модель.*

RADELCHUK G., MAKARYSHKIN D.,  
HREBINCHUK A., BONDAR A.  
Khmelnitsky national university

## ADAPTIVE MICROPROCESSOR SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF UNMANNED AIRCRAFT

*The modern development of unmanned aerial vehicles is extremely important for the defense capability, sovereignty and economy of Ukraine. The range of practical applications of unmanned aerial vehicles is very wide. The most important tasks of unmanned aerial vehicles are related to their use in the military, civilian (public, private, commercial) and anti-terrorist industries. Unmanned aerial vehicles have a number of advantages: high maneuverability, widely used in all areas of human activity, reliability and economy. Unmanned aerial vehicles are used in a wide range of applications, such as research, civil engineering, military use, aerial photography, search and rescue operations, and risk zone surveys. One of the most important classes of unmanned aerial vehicles are quadcopters, which have significant advantages in many parameters, such as simplicity of design, rapid manufacture and low cost. In recent years, the subject of many scientific studies in the field of quadcopters has been the control of their position, in part the height of the quadcopter. During these scientific studies, many algorithms have been proposed to solve the problem of quadcopter control.*

*The paper presents the structure of an adaptive microprocessor system for automatic control of unmanned aerial vehicles using a nonlinear model of unmanned aerial vehicles, which allows to increase the efficiency of control and measurement of coordinates of unmanned aerial vehicles. The results of the analysis of the existing adaptive microprocessor systems of automatic control of the unmanned aerial vehicle are presented. Their advantages and disadvantages are established. To implement a real flight control program for an unmanned aerial vehicle, it is necessary to use a systematic process of designing and modeling an adaptive microprocessor control system using adaptive control algorithms with L1 feedback.*

*Key words: adaptive microprocessor automatic control system, unmanned aerial vehicle, adaptive control, linear model, nonlinear model.*

**Вступ.** Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів є надзвичайно важливим для обороноздатності, суверенітету та економіки України. Спектр практичного застосування безпілотних літальних апаратів є дуже широким. Найбільш важливі задачі безпілотних літальних апаратів пов'язані із їх застосуванням у військовій, цивільній (державній, приватній, комерційній) та антитерористичній галузі [1]. Безпілотні літальні апарати мають ряд переваг: висока маневреність, широко використовуються в усіх сферах людської діяльності, надійність та економічність. Безпілотні літальні апарати застосовуються у широкому спектрі додатків, таких як наукові дослідження, громадянське будівництво, воєнне використання, аерофотозйомка, пошуково-рятувальні операції, та огляди зони ризиків [2–5]. Одним з важливіших класів безпілотних літальних апаратів є квадрокоптери, які мають значні переваги по багатьох параметрах, таких як, простота конструкції, швидке їх виготовлення та мала ціна [6, 7]. В останні роки предметом багатьох наукових досліджень в області квадрокоптерів було керування їх положенням, у частковому випадку висоти квадрокоптера [6]. Під час проведення цих наукових досліджень було запропоновано багато алгоритмів для вирішення проблеми керування квадрокоптером.

Останнім часом, однією з переваг безпілотних літальних апаратів є їх застосування в різних аерокосмічних програмах. Однак, є необхідність використовувати такі транспортні засоби в потенційно несприятливих умовах, тому дуже важливо розробляти їх з високою ефективністю та надійністю, що в свою чергу викликає науковий інтерес до використання адаптивного керування у таких випадках. Еталонні

моделі сучасних адаптивних регуляторів на основі мікропроцесорних систем на сьогодні набули широкого застосування, однак вони характеризуються одним суттєвим недоліком, які полягає у тому, що сучасні адаптивні регулятори можуть бути дуже чутливими до затримок часу. Для подолання цього недоліку та проектування реалістичної адаптивної системи автоматичного керування, були створені відфільтровані версії сучасних адаптивних регуляторів на основі мікропроцесорних систем, які називається отримали назву адаптивне керування L1.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Основна перевага адаптивного керування L1 перед іншими алгоритмами адаптивного керування полягає у чіткому розділенні продуктивності та надійності, де включення фільтра низьких частот гарантує необмежену пропускну здатність сигналу керування та високу швидкість адаптації, яка у свою чергу обмежується тільки доступними обчислювальними ресурсами. Звідси випливає, що проблему адаптивного керування можна поділити на два обмеження: пропускну здатність каналу та доступні ресурсні обчислення.

Найпростіша та ефективніша версія реалізації адаптивного керування L1 – це реалізація такого керування із зворотнім зв'язком, основною перевагою якого є один вхід на один вихід, тому стани такої внутрішньої системи не потребують їх моделювання та вимірювання. Модель один вхід на один вихід охоплює усю систему замкнутого циклу та формується за допомогою простих методів ідентифікації системи. Таким чином, сучасні адаптивні регулятори на основі мікропроцесорних систем зі зворотнім зв'язком, які реалізують адаптивне керування L1 представляє собою стабільну систему із замкнутим циклом, з ефективною продуктивністю та надійністю. У таких системах легко передбачити та спрогнозувати час затримки використовуючи стандартний лінійний системний аналіз. Також необхідно врахувати, що зворотний зв'язок L1 є простим в практичній реалізації.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На основі сучасного аналізу відомих адаптивних мікропроцесорних систем керування безпілотними літальними апаратами, можна зробити висновок, що найбільш застосовуються наступні адаптивні мікропроцесорні системи регулювання безпілотних літальних апаратів: адаптивні мікропроцесорні системи керування безпілотних літальних апаратів на основі пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора; адаптивні мікропроцесорні системи керування безпілотних літальних апаратів на основі лінійно-квадратичного регулятора; адаптивні мікропроцесорні системи керування безпілотних літальних апаратів на основі методу Н на нескінченості; адаптивні мікропроцесорні системи керування безпілотних літальних апаратів на основі нелінійного регулювання.

Адаптивна мікропроцесорна система керування безпілотними літальними апаратами на основі пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора створюється на базі лінійної моделі безпілотного літального апарату в точці стабілізації, яка здатна стабілізувати систему на протязі 3-х секунд. Однак, суттєвими недоліками такої адаптивної системи автоматичного регулювання є обмежене використання, тільки у точці рівноваги та нездатність здійснювати складних маневрів, якщо така система автоматичного керування застосовується для регулювання положення та висоти безпілотного літального апарату.

Адаптивна мікропроцесорна система керування безпілотними літальними апаратами на основі лінійно-квадратичного регулятора також створюється на базі лінійної моделі безпілотного літального апарату застосовуючи декілька точок для стабілізації. Суттєвими недоліками такої адаптивної системи автоматичного регулювання є нездатність привести систему до стабілізації на фізичні моделі та неврахування динаміки двигуна у цій моделі, тобто менша продуктивність у порівнянні з адаптивною мікропроцесорною системою керування безпілотними літальними апаратами на основі пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора.

Адаптивна мікропроцесорна система керування безпілотними літальними апаратами на основі методу Н на нескінченості здатна забезпечувати ефективне та надійне відстеження заданих сигналів і відмови від порушень застосовуючи нелінійну математичну модель. При цьому нелінійна математична модель базується на змішаній чутливості методу Н на нескінченості та  $\mu$ -синтезу з ітераційними алгоритмами DK, завдяки цьому розробляється адаптивна мікропроцесорна система керування безпілотними літальними апаратами з високоефективною надійністю його роботи.

Адаптивну мікропроцесорну систему керування безпілотними літальними апаратами на основі нелінійного керування, краще всього застосовувати у випадках, коли відхилення є досить великими.

Як показано у науковій роботі [8], загальна структурна схема керування безпілотним літальним апаратом може бути представлена та описана через керування чотирма вхідними силами: крену, тангажу, ристання і загальної тяги (див. рис. 1).

Адаптивний алгоритм керування L1, який використовується для керування польотом безпілотного літального апарату і представляє собою систему з замкненим циклом, зображено на рис. 2. До такої адаптивної системи керування входять: низькочастотний фільтр  $C(s)$  та еталоні моделі. Застосування фільтра нижніх частот  $C(s)$  надає дві переваги: обмеження пропускну здатності керуючого сигналу  $u$ ; в еталоні моделі надходить сигнал високої частоти.

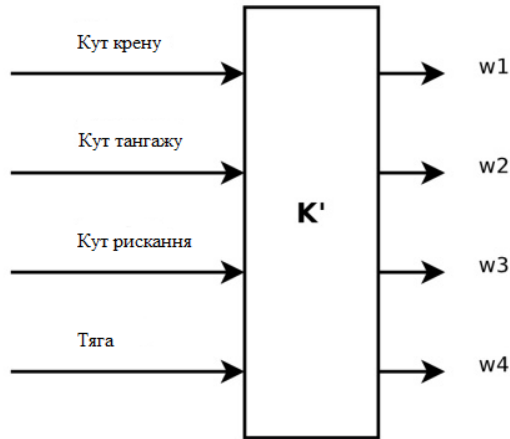


Рис. 1. Загальна структурна схема керування крену, тангажу, ристання і загальної тяги

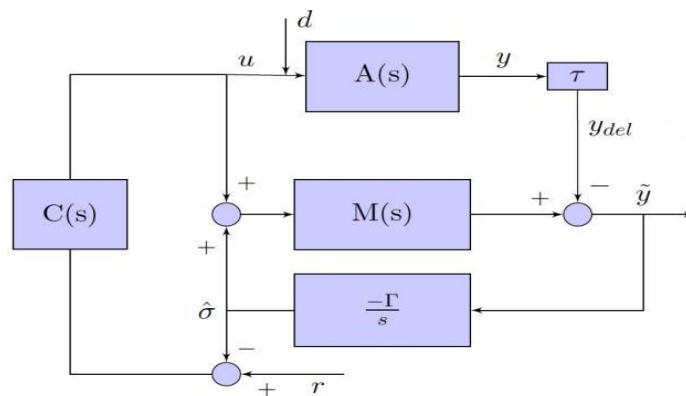


Рис. 2. Структурна схема адаптивного керування зі зворотнім зв'язком L1

Загальна структурна схема адаптивної мікропроцесорної системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом, яка реалізує алгоритм адаптивного керування зі зворотнім зв'язком L1 може бути представлена як показано на рис. 3.

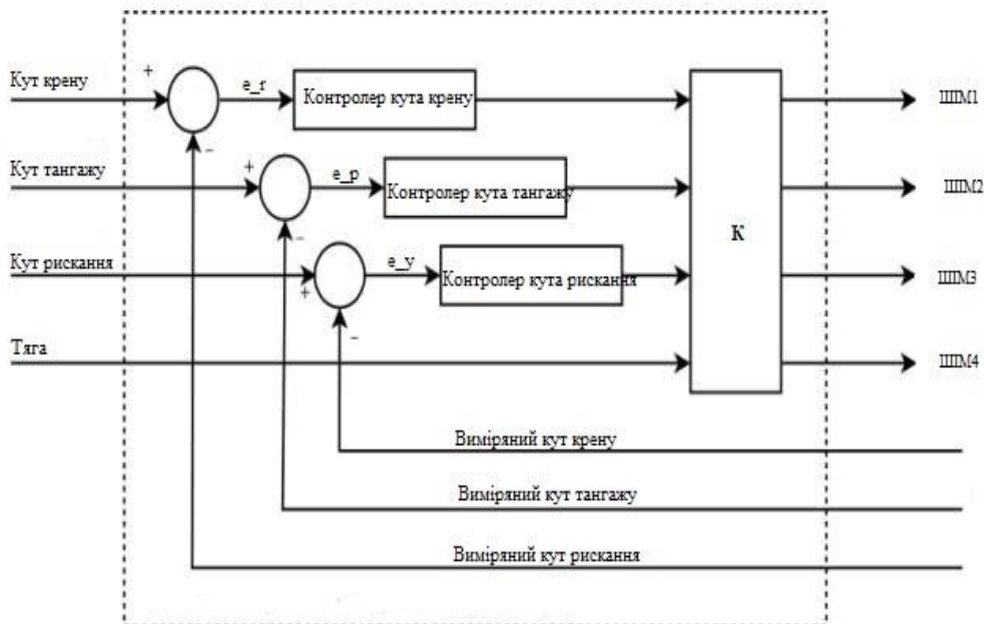
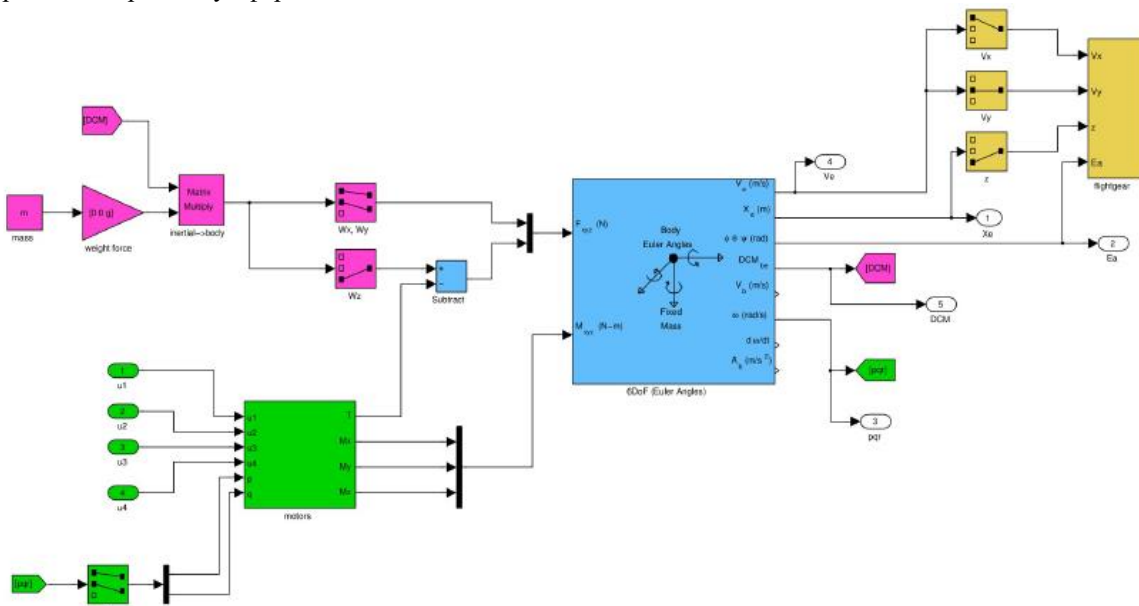


Рис. 3. Структурна схема адаптивної мікропроцесорної системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом

Для тестування адаптивних мікропроцесорних систем керування безпілотними літальними апаратами на основі пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора та уникненню пошкоджень реального безпілотного літального апарату є необхідним побудова наступної нелінійної моделі безпілотного літального апарату за допомогою Simulink, яка представлена на рис. 4. Така нелінійна модель безпілотного літального апарату дозволяє імітувати рівняння руху і додати насичення до швидкості електродвигунів, що у свою чергу призводить до обмеження їх обертів в секунду у діапазоні від 0 до 150. З проведеного аналізу рис. 1, можна зробити висновок, що нелінійна математична модель складається з таких частин, як динаміка твердих тіл 6DOF, підсистема гравітаційна і двигунів, а також підсистема візуалізації. Блок динаміки твердих тіл 6DOF враховує рівняння руху твердого тіла, такі параметри як початкові умови, тензор інерції тіла, маса. Вхідними даними тут виступають вхідні сили та моменти сил. Гравітаційний блок враховує перетворення вагової сили. Призначення підсистеми двигунів полягає у виробленні зовнішніх моментів сил та сили тяги. Підсистема візуалізації для надсилання даних про положення, при цьому відбувається перетворення декартових координат у сферичні.



**Рис. 4.** Нелінійна модель безпілотного літального апарату

**Висновки.** Встановлено, що найбільшого використання набули адаптивні мікропроцесорні системи регулювання безпілотних літальних апаратів на основі пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора, основі лінійно-квадратичного регулятора, методу Н на нескінченності та нелінійного керування. Проведено аналіз існуючих адаптивних мікропроцесорних систем регулювання безпілотних літальних апаратів. Встановлено їх переваги та недоліки, при використанні лінійної і нелінійної моделі безпілотного літального апарату. Встановлено, що для реалізації на практиці реальної програми керування польотом безпілотного літального апарату є необхідним застосування систематичного процесу проектування та моделювання адаптивної мікропроцесорної системи керування використовуючи алгоритми адаптивного керування зі зворотнім зв'язком L1. Наведено структурну схему адаптивної мікропроцесорної системи автоматичного керування безпілотним літальним апаратом, яка реалізує нелінійну модель та складається з динаміка твердих тіл 6DOF, підсистеми гравітаційна, двигунів та візуалізації.

### Література

1. Луцький М.Г. Розвиток міжнародного регулювання та нормативної бази використання безпілотних літальних апаратів / М.Г. Луцький, В.П. Харченко, Д.О. Бугайко // Вісник НАУ. – 2015. – № 4. – С. 5-14. Дьяконов В.П. Генерация и генераторы сигналов / Дьяконов В.П.– Издательство: Л.: Энергия, 2009. – 384 с.
2. Xuan-Mung N. A Multicopter ground testbed for the evaluation of attitude and position controller / Xuan-Mung N., Hong S.K. // Int. J. Eng. Technol. - 2018., - №7. - p. 65–73.
3. Yu Y. A Quadrotor test bench for six degree of freedom flight / Yu, Y., Ding, X. // J. Intell. Robot. Syst. – 2012. - № 68. – p. 323–338.
4. Lee K.U. Inverse optimal design for position control of a quadrotor / Lee K.U., Choi Y.H., Park J.B.// Appl. Sci. – 2017. – p. 907.
5. Nguyen N.P. Sliding mode tau observer for actuator fault diagnosis of quadcopter UAVs / Nguyen N.P., Hong S.K. // Appl. Sci. - 2018 – p. 1893.
6. Xuan-Mung N. Improved Altitude Control Algorithm for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicles / Xuan-Mung N., Hong S.K. // Applied sciences - 2019., - №9., 2122. - p.1–15.
7. Santos M.C.P. An adaptive dynamic controller for quadrotor to perform trajectory tracking tasks / Santos M.C.P., Rosales C.D., Sarapura J.A., Sarcinelli-Filho M., Carelli R. // J. Intell. Robot. Syst. – 2019. – p.5–16.
8. Jayakrishnan H.J. Position and attitude control of a quadrotor UAV using super twisting sliding mode / Jayakrishnan H.J. // IFAC Pap. Online – 2016. - p. 284–289.

### References

1. Luckij M.G. Rozvitok mizhnarodnogo reguluvannya ta normativnoi bazi vikoristannya bezpilotnih litalnih aparativ / M.G. Luckij, V.P. Harchenko, D.O. Bugajko // Visnik NAU. – 2015. – № 4. – S. 5-14. Dyakonov V.P. Generaciya i generatory signalov / Dyakonov V.P.– Izdatelstvo: L.: Energiya, 2009. – 384
2. Xuan-Mung N. A Multicopter ground testbed for the evaluation of attitude and position controller / Xuan-Mung N., Hong S.K. // Int. J. Eng. Technol. - 2018., - №7. - p. 65–73.
3. Yu Y. A Quadrotor test bench for six degree of freedom flight / Yu, Y., Ding, X. // J. Intell. Robot. Syst. – 2012. - № 68. – p. 323–338.
4. Lee K.U. Inverse optimal design for position control of a quadrotor / Lee K.U., Choi Y.H., Park J.B.// Appl. Sci. – 2017. – p. 907.
5. Nguyen N.P. Sliding mode thau observer for actuator fault diagnosis of quadcopter UAVs / Nguyen N.P., Hong S.K. // Appl. Sci. - 2018 – p. 1893.
6. Xuan-Mung N. Improved Altitude Control Algorithm for Quadcopter Unmanned Aerial Vehicles / Xuan-Mung N., Hong S.K. // Applied sciences - 2019., - №9., 2122 - p.1–15.
7. Santos M.C.P. An adaptive dynamic controller for quadrotor to perform trajectory tracking tasks / Santos M.C.P., Rosales C.D., Sarapura J.A., Sarcinelli-Filho M., Carelli R. // J. Intell. Robot. Syst. – 2019. – p.5–16.
8. Jayakrishnan H.J. Position and attitude control of a quadrotor UAV using super twisting sliding mode / Jayakrishnan H.J. // IFAC Pap. Online – 2016. - p. 284–289.

Надійшла / Paper received: 14.06.2020

Надрукована / Paper Printed : 01.12.2020