

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ВБУДОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМ АПАРАТОМ.

Старший викладач Галкін П.В., студент Кострикін І.А

Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра
проектування та експлуатації електронних апаратів

e-mail: galkinletter@ukr.net, illia.kostrikin@nure.ua

Abstract. The rapid development of unmanned aerial vehicles has led to their widespread application in the fields of aerial photography, environmental monitoring, industrial inspection, telecommunications, and defense technologies. One of the key limiting factors in the effective use of unmanned aerial platforms remains the limited energy capacity of onboard batteries. Therefore, an is the design and investigation of an energy-efficient embedded control system for an unmanned aerial vehicle that ensures stable real-time operation, reduced power consumption, and improved overall efficiency of the flight platform. This article presents an approach to the development of such a system, analyzes its hardware–software architecture, and provides the results of an experimental evaluation of its energy performance indicators.

Ключові слова: Автономність польоту, безпілотний літальний апарат, вбудована система, керування рухом, оптимізація ресурсів.

Вступ. В епоху стрімкого розвитку вбудованих обчислювальних платформ та цифровізації інженерних рішень, одноплатні комп'ютери та мікроконтролерні системи стають ключовою основою для побудови IoT та ПоТ-орієнтованих систем керування [1]. Актуальним напрямом є також інтеграція апаратно-програмних стендів на базі FPGA та мікроконтролерів у навчальні лабораторії, що відповідають концепції Industry 4.0 та забезпечують підготовку фахівців до роботи з сучасними кіберфізичними системами [2]. Значну увагу в сучасних дослідженнях приділено автономним вбудованим пристроям моніторингу та сповіщення з використанням бездротових технологій зв'язку, що дозволяє реалізовувати системи безпеки та контролю доступу в умовах обмежених енергетичних ресурсів [3]. Основою таких рішень є вузли бездротових сенсорних мереж, архітектура яких визначає надійність, масштабованість та енергоефективність розподілених систем збору даних [4].

Окремий клас досліджень присвячений розробці вбудованих систем керування безпілотними літальними апаратами, де особливу роль відіграють бортові обчислювальні модулі та алгоритми стабілізації і навігації автономних квадрокоптерів [5]. Для підвищення надійності таких систем широко застосовуються методи апаратно-інформаційного моделювання та hardware-in-the-loop тестування, що дозволяє перевіряти поведінку вбудованих контролерів у режимі, наближеному до реального польоту [6]. Сучасні алгоритми керування, зокрема методи ковзного режиму та їхні модифікації, демонструють можливість реалізації високоточних систем керування в реальному часі навіть на обмежених за

ресурсами вбудованих платформах [7].

Паралельно з промисловими та авіаційними застосуваннями активно розвиваються навчальні лабораторні комплекси з вбудованих систем та автоматизації, які поєднують реальне апаратне забезпечення з елементами віддаленого доступу та цифрових освітніх середовищ [8]. Практична реалізація складних алгоритмів керування на мікроконтролерах підтверджує доцільність використання таких платформ як у дослідницьких, так і в освітніх цілях. Перспективним напрямом також є створення хмарних та змішаних навчальних лабораторій для вивчення промислових контролерів і вбудованих систем, що забезпечує масштабованість, доступність та інтеграцію з сучасними інформаційними технологіями.

Основна частина. Сучасні вбудовані системи керування безпілотними апаратами являють собою складні апаратно-програмні комплекси, що поєднують мікроконтролерні платформи, сенсорні модулі, виконавчі механізми та алгоритми керування реального часу. Зростання обчислювальної складності алгоритмів стабілізації, навігації та адаптивного керування призводить до підвищення енергоспоживання бортової електроніки, що робить задачу енергоефективності однією з пріоритетних при проектуванні таких систем. Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є розробка та дослідження енергоефективної вбудованої системи керування безпілотним апаратом.

Архітектура енергоефективної вбудованої системи керування БПЛА

Базовим елементом архітектури є бортовий обчислювальний модуль, побудований на основі енергоефективного мікроконтролера або однокристальної системи, що підтримує апаратні засоби прискорення обчислень, багаторівневу систему переривань та режими зниженого енергоспоживання. Важливу роль у структурі системи відіграє сенсорний рівень, який включає інерціальні вимірювальні модулі, датчики висоти, навігаційні приймачі та інші допоміжні сенсори. Архітектура передбачає оптимізовану схему збору та попередньої обробки сенсорних даних з мінімізацією кількості обчислювальних операцій та передач даних між модулями. Для зниження енергоспоживання застосовуються адаптивні режими опитування сенсорів, за яких частота вимірювань змінюється залежно від режиму польоту та динаміки руху безпілотного апарата.

Підсистема керування виконавчими механізмами інтегрована в загальну архітектуру таким чином, щоб забезпечити мінімальні затримки формування керуючих сигналів. Архітектурні рішення передбачають апаратну підтримку генерації сигналів керування та розподіл обчислювальних задач між ядрами або периферійними модулями, що дозволяє зменшити навантаження на центральний процесор. Це, у свою чергу, створює умови для переходу обчислювального модуля в

енергозберігаючі режими між циклами керування.

У цілому запропонована архітектура (рис. 1.1) базується на принципах ієрархічної організації, модульності та адаптивного керування ресурсами. Поєднання оптимізованих апаратних рішень і енергоорієнтованих програмних механізмів створює передумови для підвищення автономності безпілотного апарата без зниження якості керування та надійності функціонування системи.



Рисунок 1.1 – Блок-схема архітектури енергоефективної вбудованої системи керування БПЛА

Алгоритми керування та методи зниження енергоспоживання

Алгоритмічне забезпечення енергоефективної вбудованої системи керування безпілотним літальним апаратом орієнтоване на забезпечення стабільності польоту та точності керування за умов обмежених обчислювальних і енергетичних ресурсів. Зниження енергоспоживання досягається шляхом комплексного застосування програмних і апаратних методів енергоменеджменту. У програмному забезпеченні реалізуються механізми пріоритетного планування задач та подієво-орієнтованої обробки даних, що дозволяє переводити обчислювальні та периферійні модулі в режими зниженого споживання між циклами активної роботи. Додатково застосовується адаптивне керування живленням сенсорів і комунікаційних інтерфейсів, за якого їх активація здійснюється лише за необхідності. Поєднання оптимізованих алгоритмів керування з динамічним керуванням енергетичними режимами забезпечує зменшення сумарного енергоспоживання системи та підвищення автономності безпілотного апарата при збереженні стабільності й надійності його функціонування.

Висновки. У статті розглянуто підхід до побудови енергоефективної вбудованої системи керування безпілотним літальним апаратом, орієнтований на роботу в реальному часі за умов обмежених енергетичних ресурсів. Запропонована апаратно-програмна архітектура та алгоритмічні

рішення забезпечують зниження енергоспоживання без погіршення стабільності й якості керування. Отримані результати підтверджують доцільність використання адаптивних режимів роботи та механізмів енергоменеджменту для підвищення автономності та ефективності експлуатації БПЛА.

Список використаних джерел.

1. Galkin P., Golovkina L., Klyuchnyk I. Analysis of single-board computers for IoT and IIoT solutions in embedded control systems //2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). – IEEE, 2018. – С. 297-302.
2. Galkin P., Umiarov R., Grigorieva O. Design embedded system testbench based on FPGA and microcontrollers for TATU smart lab as education component of industry 4.0 //2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – IEEE, 2019. – С. 628-633.
3. Феденко В. В. Автономний GSM-пристрій сповіщень для моніторингу з функцією виявлення несанкціонованого доступу : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 171 – електроніка / наук. кер. І. А. Кулик. Суми : Сумський державний університет, 2025. 40 с.
4. Ivan Buhrym, Oleksandr Vynokurov, Pavlo Galkin. Approaches to Designing a Wireless Sensor Network Node // First International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» MC&FPGA-2019, Kharkiv, Ukraine, July 26-27, 2019. – Kharkiv: NURE, MC&FPGA, 2019. – P. 21-24. DOI: 10.35598/mcfpga.2019.007
5. S. Madruga, A. Tavares, A. Brito and T. Nascimento, "A Project of an Embedded Control System for Autonomous Quadrotor UAVs," 2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE), João Pessoa, Brazil, 2018, pp. 483-489, doi: 10.1109/LARS/SBR/WRE.2018.00091.
6. L. Kis, G. Regula and B. Lantos, "Design and hardware-in-the-loop test of the embedded control system of an indoor quadrotor helicopter," 2008 International Workshop on Intelligent Solutions in Embedded Systems, Regensburg, Germany, 2008, pp. 1-10, doi: 10.1109/WISES.2008.4623300.
7. A. R. Firdaus and M. O. Tokhi, "Real-time embedded system of super twisting-based integral sliding mode control for quadcopter UAV," 2019 2nd International Conference on Applied Engineering (ICAE), Batam, Indonesia, 2019, pp. 1-7.
8. Галкін П. В. Розробка лабораторного комплексу по вивченню вбудованих систем управління і промислової автоматизації // Матеріали 21-го Міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті", 25-27 квітня 2017 р. [Текст] : [збірник] / П.В. Галкін //: Т. 2.- Харків: ХНУРЕ.- С.94-95.