

УДК 623.746-519:629.7.058

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ СТАБІЛІЗАЦІЇ І КЕРУВАННЯ ПОЛЬОТУ МУЛЬТИКОПТЕРІВ

Головай В.Ю.

e-mail: volodymyr.holovai@nure.ua

Науковий керівник – к.т.н., доц. Орел Р.П.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. Фізики
м. Харків, Україна

Multicopter stabilization as a complex dynamic process is analysed. The role of the Inertial Measurement Unit, including MEMS gyroscopes, accelerometers, and magnetometers, is examined. Physical principles such as the Coriolis force and the Hall effect are discussed. The flight controller's operation and PID control algorithm are investigated. The functions of proportional, integral, and derivative components in compensating for disturbances are demonstrated. The synergy of physical laws and computational algorithms is shown to be fundamental for UAV stability.

Сучасні мультикоптери (БПЛА, дрони) є складними динамічними системами, які за своєю природою часто є нестабільними (особливо мультироторні системи). Стабілізація БПЛА полягає у підтримці заданої орієнтації (кутів крену, тангажу та рискання) і висоти за допомогою постійного корегування швидкості обертання гвинтів (пропелерів) двигунів.

Ключовим елементом стабілізації мультикоптера є інерціальний вимірювальний модуль (IMU) та комбінований регулятор (PID-регулятор) [1]. Система IMU складається з трьох ключових компонентів: гіроскоп, акселерометр, магнітометр, які пов'язані з виконавчими пристроями через польотний контролер.

Гіроскоп відповідає за вимірювання кутової швидкості. Важливо зазначити, що гіроскопи у мультикоптерах відрізняються від класичних: в них немає масивних дисків, що обертаються всередині корпусу. Замість цього використовуються мікроскопічні датчики (MEMS-гіроскопи), але фізичні принципи, на яких базується їх робота, такі самі як у класичних. Гіроскоп містить рамку, що постійно вібрує, і при повороті мультикоптера сила Коріоліса змушує рамку зміщуватися вбік. Це зміщення перетворюється в електричний сигнал, який передається до польотного контролеру.

Робота акселерометра базується на використанні властивості інертності: в цьому елементі є мікроскопічна “кремнієва маса”, яка підвішена на кремнієвих пружинах та завдяки своїй інертності тисне на датчики довкола. Зміна відстані між рухомою частиною та нерухомими електродами змінює електричну ємність, яку контролер перетворює на цифровий сигнал. Головна функція цієї частини - визначення вектору гравітації, адже це дозволяє мультикоптеру розуміти свій нахил у стані

спокою, та надати цю інформацію польотному контролеру для подальших дій.

Магнітометр працює як електронний компас, вимірюючи магнітне поле Землі для корекції курсу. Для цього використовується Ефект Холла. Головна функція магнітометра є визначення курсу польоту мультикоптера [2].

Польотний контролер (обчислювальний блок) виконує роль «мозку» мультикоптера. На рис.1. показано схему стабілізації польоту. Процес стабілізації відбувається за алгоритмом:

- збір даних;
- порівняння;
- розрахунок помилки;
- видача команд.



Рисунок 1 – Схема стабілізації польоту мультикоптера

У відповідь на дані які контролер отримує із системи IMU, реагує система PID-регулятор. PID-регулятор дозволяє мультикоптеру підтримувати рівновагу, попри зовнішні чинники. Він постійно обчислює різницю («помилку») між бажаним кутом нахилу та реальним станом, який реєструє і передає IMU (рис.2). Ключові елементи PID-регулятора:

1. P – підсилювач, який лінійно реагує на поточну помилку, намагаючись виправляючи її негайно, але через інертність, дрон не може просто зупинитися в потрібному положенні, тому він завжди "проскакує" центр і починає коливатися. Для виправлення такого становища функціонують наступні елементи.

2. I – інтегратор, який компенсує зовнішні фактори, що діють тривалий час (наприклад, вітер). Він потрібний, щоб мультикоптер не «дрейфував». Цей елемент інтегрує помилку за часом, поступово зміщуючи "точку

спокою" мультикоптера, поки статична сила не буде повністю компенсована. Це дозволяє системі досягти нульової статичної похибки.

3. D – диференціатор, який передбачає майбутні коливання та «гасить» їх, запобігаючи перерегулюванню, виконуючи функцію дисипації зайвої кінетичної енергії [3].

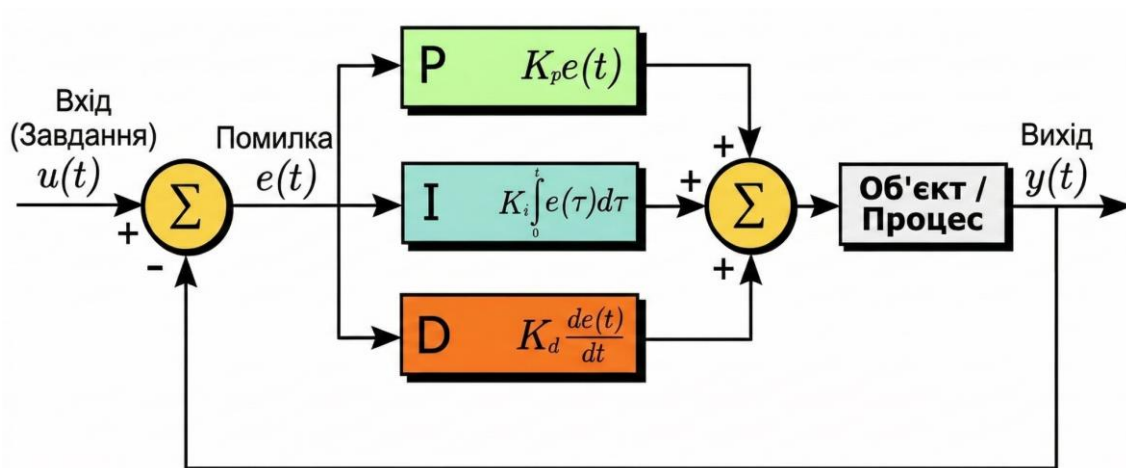


Рисунок 2 – Схема роботи PID-регулятора

Таким чином, стабілізація сучасних мультикоптерів є критично важливим процесом, що базується на високотехнологічному поєднанні сенсорів IMU та алгоритмів PID-регулювання. Використання MEMS-технологій та математичної корекції помилок дозволяє перетворити динамічно нестабільну систему на керований апарат. Враховуючи стрімке розширення сфер застосування БПЛА, подальше вдосконалення цих систем, інтеграція адаптивних алгоритмів та штучного інтелекту є надзвичайно актуальним напрямом для забезпечення надійності польотів у складних умовах.

Список використаних джерел:

1. Inertial Navigation Primer: Feedback Controls // VectorNav Tec. URL: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/math-fundamentals/math-controls> (дата звернення: 11.02.2026).
2. Inertial Navigation Primer: Attitude & Heading Reference System // VectorNav Tec. URL: <https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-primer/theory-of-operation/theory-ahrs> (дата звернення: 11.02.2026).
3. FPV Drone PID Explained – Mastering Flight Performance through PID Tuning. URL: <https://oscarliang.com/pid/> (дата звернення: 11.02.2026).