

УДК 004.422

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-22

Сацик В. О., Маркіна Л. М., Копчунь А. О., Сацик О. В.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

АНАЛІЗ РОБОТИ ТА НАЛАШТУВАННЯ PID-РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМАХ СТАБІЛІЗАЦІЇ БПЛА НА БАЗІ ПРОШИВКИ BETAFLIGHT

У статті здійснено аналіз теоретичних основ та практичних аспектів роботи PID-регулятора в системах стабілізації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) роторного типу, що функціонують на базі прошивки Betaflight. Розглянуто фундаментальні принципи побудови PID-регуляції, вплив пропорційної, інтегральної та диференціальної складових на керованість літального апарату, а також особливості взаємодії регулятора з динамічними характеристиками FPV-платформи. Особливу увагу приділено можливості налаштування параметрів PID-регулятора під час польоту, визначення тонкощів адаптації значень під різні типи БПЛА та аналізу чутливості системи до зміни цих параметрів. На основі проведеного експрес-аналізу ключових прошивок польотних контролерів для практичної частини вибрано відповідно Betaflight. Наведено огляд специфіки реалізації PID-контролю в Betaflight, включаючи систему компенсації зовнішніх перешкод та механізми оптимізації керованості апарату. Показано практичні підходи до налаштування PID-параметрів для досягнення їх підвищеної стабільності.

Отримані результати можуть бути використані для удосконалення алгоритмів управління FPV-дронами, оптимізації польотних характеристик та підвищення ефективності застосування Betaflight у наукових та практичних завданнях.

Ключові слова: PID-регулятор, Betaflight, стабілізація польоту, БПЛА, FPV-дрон, контролер польоту.

Постановка проблеми. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА), особливо FPV-дрони, висувають підвищені вимоги до точності керування та стабільності польоту через високу швидкість та динамічність систем. Проблема полягає у тому, що некоректно налаштований контролер коптера призводить до ряду помилок в роботі комплексу: нестабільність польоту; проблеми з управлінням; затримки або неправильна реакція на команди пульта (неконтрольоване прискорення або гальмування; підвищений ризик аварій; перевантаження двигунів і акумулятора; значне зниження точності польоту (похибки при виконанні місій, наприклад, картографування або аерофотозйомки); помилки в роботі датчиків; виклик безпідставних аварійних режимів і т.д.

Варто відмітити, що коптери як і інші типи роботизованих комплексів мають широкий спектр налаштувань, від власне контролера до пультів управління які мають свої нюанси та особливості

Метою дослідження є визначення практичних підходів до налаштування PID-регулятора Betaflight та аналіз їх ефективності для FPV-платформ різної конфігурації.

Аналіз існуючих програмних рішень та наукових підходів.

Налаштування польотного контролера здійснюється на основі різних типів прошивок. Прошивка польотного контролера – це програмне забезпечення, яке працює на польотному контролері та керує роботою FPV-дрона. Це впливає на характеристики та особливості польоту, а різні варіанти прошивки мають різні переваги та недоліки для різних стилів польоту та вподобань.

Так наприклад, Betaflight використовується для налаштувань FC гоночних дронів та FPV-коптерів. Особливості: швидка реакція на команди, тонке налаштування PID, підтримка різних режимів польоту (Angle, Horizon, Acro).

iNav використовується в основному для автономних, картографічних дронів, та польотів за GPS. Особливості: автопілот, маршрутизація, утримання висоти, телеметрія.

ArduPilot, застосовують для: різних типів БПЛА (коптери, літаки, гелікоптери, авто, судна). ArduPilot відомий своїми широкими функціями та можливостями налаштування, що робить його

хорошим вибором для досвідчених пілотів і розробників. Особливості: планування складних місій, робота з великою кількістю сенсорів, підтримка GPS, телеметрії, різних сенсорів.

Multiwii була однією з перших популярних прошивок польотних контролерів в спільноті саморобних дронів і була випущена в 2010 році. Особливості: дуже проста для старту на Arduino-платах; легка для експериментів та навчання, популярна серед новачків; в той же час менш оптимізована для високошвидкісних FPV-дронів та обмежена підтримка сучасних сенсорів та 32-бітних FC.

Cleanflight – це прошивка польотного контролера з відкритим вихідним кодом, розроблена Домініком Кліфтоном і спочатку заснована на Baseflight. Він був випущений у 2014 році та швидко став популярним у спільноті FPV-дронів.

Butterflight – це бренд Betaflight, який має на меті привернути увагу до ефективності польоту FPV-дронів і передових функцій. Станом на 2018 рік основні відмінності між Butterflight і Betaflight полягають у програмній фільтрації сигналу гіроскопа та підтримці АКК VTX Smart Audio. Однак у 2019 році розробка зупинилася.

OpenPilot : був однією з перших розробок прошивки FC з відкритим вихідним кодом для мультироторів і вплинув на значний прогрес у варіантах прошивки керування польотом.

LibrePilot: є брендом OpenPilot і зосереджений на дослідженнях і розробках для використання в багатьох різних програмах, включаючи робототехніку. Хоча він не такий популярний у спільноті міні-квадрокоптерів, як інші варіанти прошивки, він має надійну команду розробників і залишається відкритим кодом.

TauLabs: ще один бренд OpenPilot. Проект орієнтований на професіоналів, дослідників і студентів, пропонуючи платформу початкового рівня зі швидким і простим налаштуванням/конфігурацією для будь-якої групи, якій потрібні БПЛА для своїх досліджень.

Останній, але не менш важливий у цьому списку dRonin, який походить від OpenPilot, зосереджується в основному на FPV-гонках безпілотників. Майстер налаштування/конфігурації швидкий і простий у використанні [1]. Посилання для літератури: (<https://surl.li/bedkfv>).

Провівши експрес-аналіз ключових прошивок польотних контролерів, можна стверджувати, що вони дозволяють налаштувати широкий спектр параметрів – від базової стабілізації до складних автономних режимів. Незалежно від рівня складності чи спеціалізації, всі вони дозволяють:

- працювати з даними IMU (акселерометр + гіроскоп),
- компенсувати зовнішні збурення (вітер, прискорення, зміна тяги),
- стабілізувати апарат у просторі,
- керувати оборотами моторів,
- виконувати режими стабілізації та ручного керування,
- працювати з додатковими сенсорами (барометр, GPS, магнітометр).

Усі розглянуті вище системи – від найпростішої MultiWii до сучасного ArduPilot – у своїй основі використовують PID-регулятори, це говорить про архіважливість даного параметру, так як саме він виступає «серцем» стабілізації БПЛА.

З нашої точки зору, оптимальним вибором є Betaflight, оскільки вона забезпечує найточніше та найефективніше регулювання, в переважній більшості налаштувань і зокрема, дозволяє найтонше й найточніше налаштувати PID-регулятори для максимальної реактивності.

Таким чином, у подальшому зосередимося на практичних аспектах налаштування PID-регуляторів у прошивці Betaflight, оскільки саме вони визначають точність керування та стабільність польоту БПЛА.

Виклад основного матеріалу. ПІД-регулятор – це автоматичний регулятор з зворотнім зв'язком. Керуючий сигнал формується за законом пропорційно-інтегрально-дефініційного регулювання, тобто вплив представляє собою суму трьох складових різниць між вхідним сигналом і сигналом зворотнього зв'язку. Під регулятор використовується для коригування вихідного сигналу системи, щоб забезпечити бажану відповідь на вхідний сигнал.

Управління відбувається за допомогою закону пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання і підрегулювання, який включає три складові пропорційну, інтегральну і диференціальну (рисунок 1).

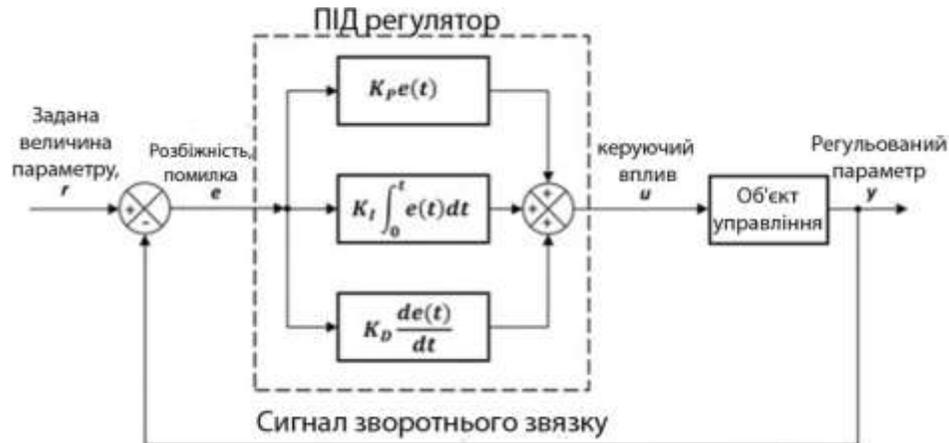


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування БПЛА

Пропорційна P складова, відповідає за величину та напрямок зміни вихідного сигналу відносно різниці між бажаним значенням вхідний сигнал і поточним значенням (сигналом зворотного зв'язку). Це визначає ступінь корекції, яка потрібна для зведення різниці між входом і виходом до нуля.

Дана складова, визначає ступінь відповіді дрона на помилку між бажаною та фактичною позицією. Збільшення цього параметра може збільшити реакцію дрона на зміни, але занадто велике значення може призвести до коливань. Тобто P -складова відповідає за те, як швидко і різко буде реагувати на наші стіки дрон (так звана реактивність дрона) [2].

Інтегральна I складова, реагує на накопичену величину помилки в часі. Це означає, що вона виправляє систему, коли помилка тривалий час зводиться до нуля. Інтегральна складова допомагає усунути будь-які залишкові помилки і встановлює точність системи. Крім того, Інтегральна I -складова відповідає за корекцію системних помилок, таких як невеликі похибки у триманні позиції дрона. Збільшення цього параметра може допомогти усунути залишкові похибки. Наприклад, коли наш коптер постійно десь клонить, I -складова допомагає прибирати цей нюанс.

Диференційна D складова, відповідає за швидкі зміни вихідному сигналу. Вона допомагає уникнути перерегулювання системи на швидкі зміни вхідного сигналу, зменшуючи величину корекції, в залежності від того, настільки швидко відбувається зміна. Коли ці всі складові об'єднуються в системі підрегулювання, вони дозволяють системі швидко та точно реагувати на зміни вхідного сигналу і підтримувати систему у стабільному стані.

В той же час, Диференційна D -складова зменшує реакцію дрона на швидкі зміни відомих похибок. Це може допомогти уникнути коливань під час різких змін напрямку чи швидкості. То параметр D виступає тут як певний демпфер, звідси власне й назва даної складової [2].

PID-тюнінг включає в себе експерименти із значеннями цих параметрів, спостереження за реакцією дрона на різні команди та зміну параметрів для досягнення оптимальної стабільності і реактивності (здатність бортової системи польотного контролера забезпечувати оперативну та точну реакцію апарата на введені команди, що проявляється у швидкій та передбачуваній зміні кутів крену, тангажу та курсу) під час польоту. Це може бути важливим для отримання якісного відео та контролю. Тобто, перш ніж займатися налаштуванням PID -ів, ми повинні мати чітку ціль наших налаштувань [4].

В разі виникнення ситуації, коли вмикається функція ARM (увімкнення двигунів), а наш коптер не летить, або починає рухатися сам, вібрувати, ця проблема пов'язана, скоріше за все, не з PID -ами. Це пов'язано безпосередньо з їх збіркою, або з налаштуванням фільтрації на дронах.

(питання фільтрації необхідно розглядати окремо). Тобто, перед налаштуванням PID-ів, коптер повинен вже літати, хоч якось.

Всі параметри підбираються експериментально. Завантажувати пресети (готові конфігурації PID, фільтрів, RPM-фільтрації, рейтингів, ESC-настроек та інших параметрів) варто. Підбір відповідних коефіцієнтів необхідно проводити вручну, дивитися на графіки та реальні вібрації коптра, так як пресети дають нам якесь готове рішення, яке може не підійти, що призведе до перегріву квадрокоптера і виведення його з ладу.

Метою налаштування PID є оптимізація роботи системи стабілізації, яка проявляється у високій реактивності, відсутності осциляцій, відсутності перерегулюванні, утримання орієнтації без дрейфу; компенсації зовнішніх збурень (пориви вітру), максимально точній повторюваності траєкторії заданої пілотом [3].

З метою дослідження впливу налаштувань PID-регулятора на поведінку безпілотного літального апарату в умовах реального польоту було проведено серію експериментів із варіюванням параметрів пропорційної (P), інтегральної (I) та диференціальної (D) складових.

Всі дослідження проводилися на базі коптера:

1. Розмір рами: 7 дюймів;
2. Тип двигунів: безколекторні 2306;
3. Пропелери: 3-лопатеві (тип 3-blade);
4. Загальна вага: 1398 г (492 г – вага дрона без батареї, 906 г – батарея);
5. Прошивка польотного контролера: Betaflight;
6. Стиль польоту: Асго.

Експерименти супроводжувалися збором даних за допомогою системи Blackbox у середовищі Betaflight, що дозволило отримати об'єктивні графічні характеристики реакції дрона на задані команди. Кожна конфігурація PID-параметрів аналізувалася окремо для визначення її впливу на стабільність, чутливість та наявність осциляцій у польоті (рис. 2-9).

Експеримент 1. (Базовий варіант)

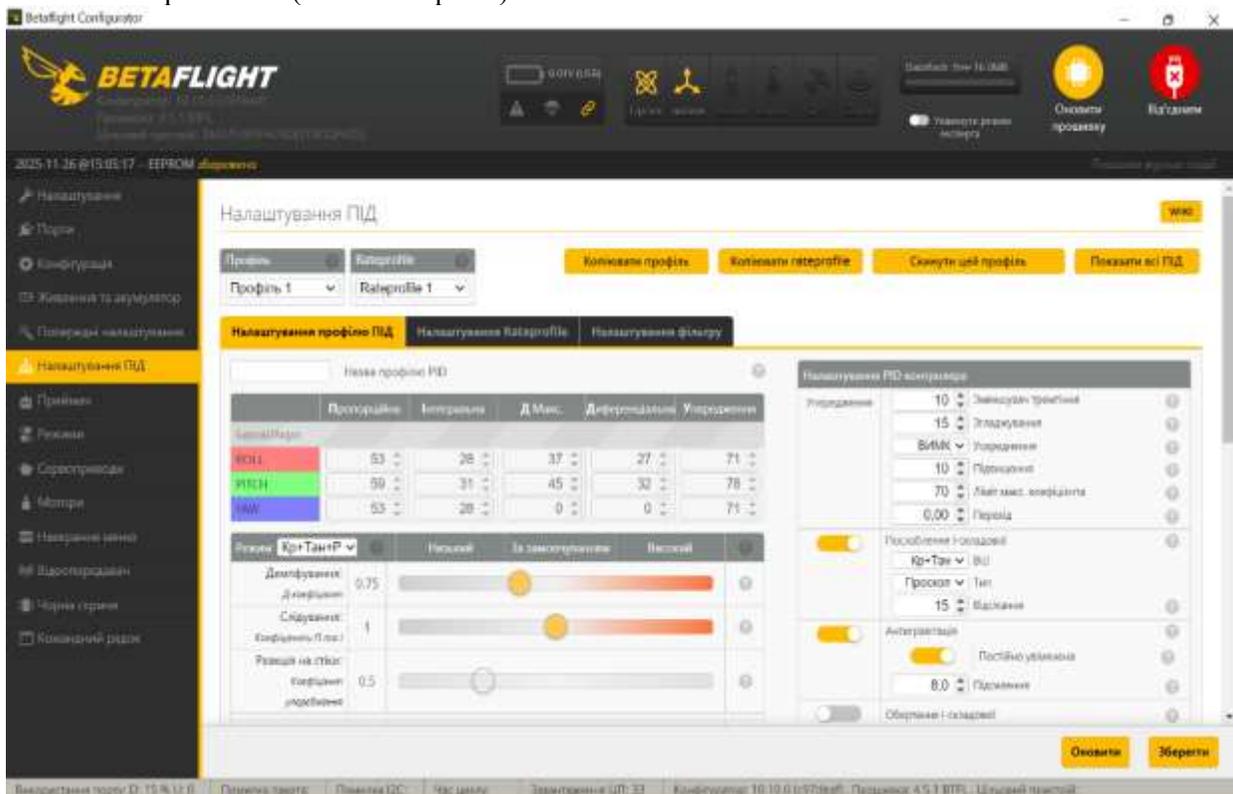


Рисунок 2 – Налаштування коефіцієнтів PID-регулятора експерименту 1

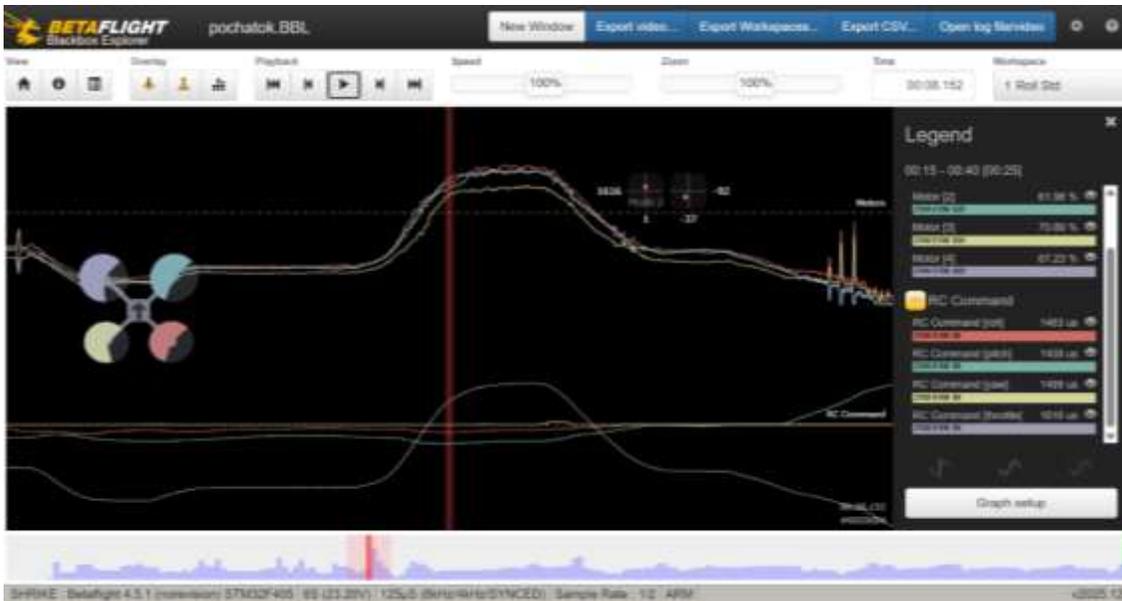


Рисунок 3 – Реакція двигунів дрона на керуючі команди ПІД конфігурації експерименту 1

Система демонструє найкращу якість роботи: реакція передбачувана, без осциляцій чи перегулювання. Рух стабільний і контрольований, відгук на команди точний і згладжений.

Експеримент 2. Зниження P складової по осях ROLL, PITCH та YAW – на 66, 64 та 66 відсотків. Зниження I складової - по всіх осях на 32 відсотки. Зниження D складової на 11, 3 та 0 відсотків відповідно.



Рисунок 4 – Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора експерименту 2

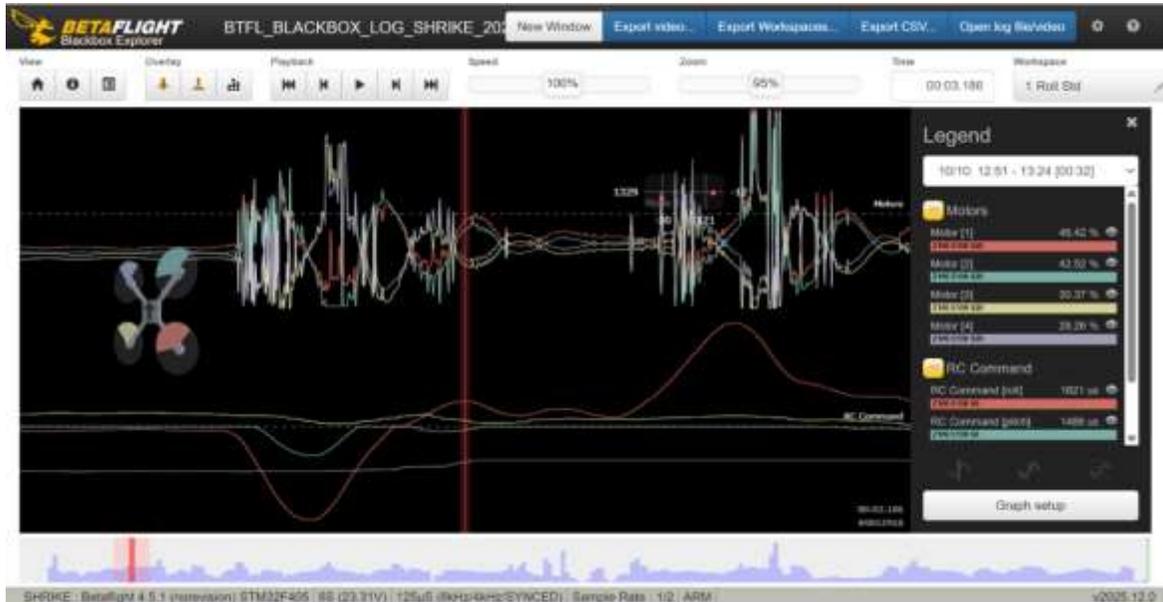


Рисунок 5 – Реакція двигунів дрона на керуючі команди ПІД конфігурації експерименту 2

Помірно стабільна реакція з легкими осциляціями. Налаштування працюють задовільно, проте в окремих режимах спостерігаються легкі осциляції. Стан придатний до польотів, але не ідеальний.

Експеримент 3. Зниження P складової по осях ROLL, PITCH та YAW – на 75, 71 та 75 відсотків. Підвищення I складової - по осях ROLL, PITCH та YAW – на 357, 339 та 357 відсотків. Зниження D складової на 18, 38 та 0 відсотків відповідно.



Рисунок 6 – Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора експерименту 3



Рисунок 7 – Реакція двигунів дрона на керуючі команди ПІД конфігурації експерименту 3

Перерегулювання, як можна бачити з рисунка 7, досить чітко виражене. Реакція дрона стає різкішою, графік містить коливання середньої інтенсивності, що свідчить про нестачу демпфування. Необхідна корекція PID-параметрів для покращення стабільності системи.

Експеримент 4. Зниження P складової по осях ROLL, PITCH та YAW – на 75, 56 та 75 відсотків. Зниження I складової - по осях ROLL, PITCH та YAW – на 75, 58 та 75 відсотків. Зниження D складової на 0, 47 та 0 відсотків відповідно.

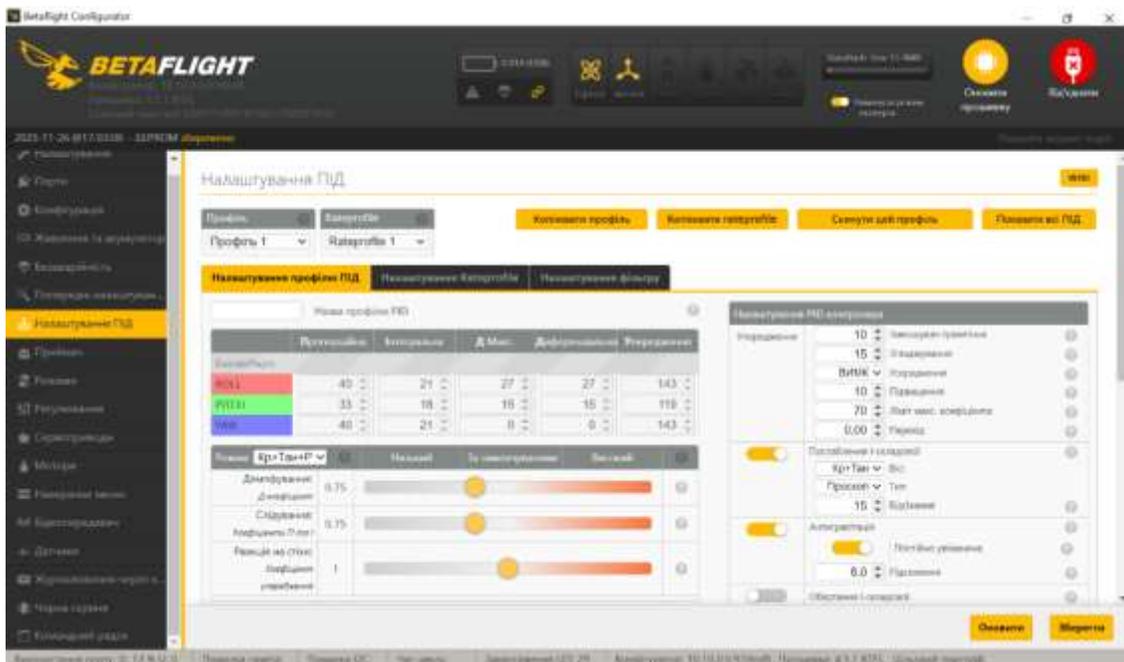


Рисунок 8 – Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора експерименту 4



Рисунок 9 – Реакції двигунів дрона на керуючі команди ПІД конфігурації експерименту 4

Як видно з рисунка 9, система демонструє нестабільну поведінку через надмірно низькі або незбалансовані PID-параметри. Реакція двигунів хаотична, графік містить значну строкатість і осциляції. Така конфігурація непридатна для стабільного польоту та потребує суттєвого перегляду PID-налаштувань.

Висновок. Проведена серія експериментів із PID-регулятором дала змогу емпірично дослідити вплив окремих параметрів на політну стабільність та реактивність безпілотного літального апарату. Незважаючи на часткову нестабільність окремих конфігурацій, було виявлено оптимальне поєднання налаштувань, яке може слугувати базою для подальших точних корекцій.

Зібрані дані дозволяють надалі скоротити кількість ітерацій у процесі налаштування, зменшити ймовірність осциляцій та підвищити ефективність системи стабілізації. Найбільш збалансовані показники стабільності та керованості були зафіксовані у варіанті 0, для якого застосовано такі PID-параметри: Roll – $P = 53$, $I = 28$, $D = 27$; Pitch – $P = 59$, $I = 31$, $D = 32$; Yaw – $P = 53$, $I = 28$, $D = 0$. Ця конфігурація забезпечила чітке слідування RC-командам, відсутність осциляцій та плавне гасіння інерції після маневрів. Саме вона може розглядатись як еталонна для подальших експериментів і практичного застосування у FPV-польотах.

Загалом, представлені налаштування PID-регулятора забезпечують оптимальний баланс між стабільністю та реактивністю FPV-дрона, що дозволяє досягти високої точності керування під час Асго-польоту та знижує ризик перегріву моторів. Дані результати є практичною демонстрацією можливостей налаштування PID в середовищі Betaflight та підтверджують ефективність ручного тюнінгу під конкретну конфігурацію платформи.

Інформаційні джерела

1. Victory Drones. URL: <https://fpv-manuals.victory-drones.com/> (дата звернення 03.11.2025)
2. Приймак Б. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи : навч. посіб. / Б. І. Приймак. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 310 с.
3. OscarLiang URL: <https://oscarliang.com/pid/#Remember-Not-Every-Problem-is-PID-Related> (дата звернення 15.10.2025)
4. Посібник з налаштування PID для багатокотерів URL: https://docs.px4.io/main/uk/config_mc/pid_tuning_guide_multicopter (дата звернення 20.11.2025)

Satsyk V., Markina L., Kopchun A., Satsyk O.
Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

ANALYSIS OF THE OPERATION AND CONFIGURATION OF THE PID CONTROLLER IN UAV STABILIZATION SYSTEMS BASED ON BETAFLIGHT FIRMWARE

The article analyzes the theoretical foundations and practical aspects of the operation of a PID controller in stabilization systems for rotary-wing and fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs) operating on the basis of Betaflight firmware. The fundamental principles of PID control design, the influence of proportional, integral, and derivative components on aircraft controllability, as well as the peculiarities of the controller's interaction with the dynamic characteristics of the FPV platform are considered. Particular attention is paid to the possibility of adjusting the parameters of the PID controller during flight, determining the subtleties of adapting values for different types of UAVs, and analyzing the sensitivity of the system to changes in these parameters. An overview of the specifics of PID control implementation in Betaflight is provided, including the capabilities of high-frequency filters, the external interference compensation system, and mechanisms for optimizing aircraft controllability. Practical approaches to adjusting PID parameters to achieve increased stability and control accuracy in both rotary UAVs and fixed-wing models are shown. The results obtained can be used to improve FPV drone control algorithms, optimize flight characteristics, and increase the effectiveness of Betaflight in scientific and practical applications.

Keywords: *PID controller, Betaflight, flight stabilization, UAV, FPV drone, flight controller.*

Дата першого надходження
статті до видання
12.11.2025 р.

Дата прийняття статті
до друку
15.12.2025 р.

Дата
оприлюднення
25.12.2025 р.