

Аналіз можливостей налаштування системи керування двигунами безпілотного апарату на основі ПД регулятора

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.115>

Андрій Хрестюк

Національний університет водного господарства та природокористуванням.

м. Рівне, Україна

a.o.khrystyuk@nuwm.edu.ua

Олексій Литвиненко

Національний університет водного господарства та природокористуванням.

м. Рівне, Україна

lytvynenko_ak20@nuwm.edu.ua

Анотація – У роботі проведено аналіз принципів та відмінностей звичайного ПД регулятора та його розширеної ПД-F модифікації. Проаналізовано налаштування фільтрів, ПД-F регулятора та процес налаштування системи керування, включаючи визначення параметрів фільтрів, налаштування D складової, балансу P/D та інших компонентів. Проведене дослідження показало, що правильне налаштування цих параметрів забезпечує високу стабільність та точність керування безпілотними апаратами

Ключові слова – модель ПД-регулятора, фільтри, бетафлайт, частота, БПЛА.

I. ВСТУП

В умовах стрімкого розвитку технологій та зростання потреби в автоматизації різних процесів, безпілотні літальні апарати (БПЛА) відіграють все більш важливу роль у сучасному суспільстві. Вони знаходять застосування у широкому спектрі галузей, як наприклад: спостереження, картографування, доставка вантажів, сільське господарство, логістика, інфраструктурні проекти, наукові дослідження, рятувальні операції та військова справа. Використання БПЛА дозволяє значно підвищити ефективність виконання завдань, знизити ризики для людей та зменшити витрати.

Розробка ефективних систем керування такими БПЛА є дуже важливою для забезпечення їх надійної та безпечної експлуатації. Сучасні економічні умови вимагають від підприємств та організацій впровадження новітніх технологій, що сприяють оптимізації процесів та підвищенню конкурентоспроможності. У цьому контексті створення високоякісних систем керування БПЛА набуває особливої актуальності.

Окрім цивільного використання, БПЛА відіграють важливу роль й у військовій справі. Вони застосовуються для розвідки, спостереження, цілевказівки та навіть для безпосереднього ураження цілей. Розробка ефективних систем керування БПЛА є критично важливою для забезпечення їх надійної та безпечної експлуатації в умовах бойових дій. Сучасні конфлікти демонструють, що БПЛА стають невід'ємною

частиною військових операцій, підвищуючи точність та ефективність дій збройних сил.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Betaflight - це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, орієнтоване на продуктивність польоту, використання передових функцій і широку цільову підтримку мультикоптерів та БПЛА з фіксованим крилом. Воно забезпечує високу стабільність та точність управління від оператора, що важливо для швидких маневрів і польотів на високих швидкостях. Betaflight це програмний продукт, що головним чином орієнтований на гоночні квадрокоптери, вільні польоти та FPV (first-person view) [2]. Проте доступність та гнучкість роботи та можливості налаштувати систему БПЛА самостійно під різні задачі робить його ефективним засобом. Важливою задачею налаштування системи керування є отримання оптимальних параметрів, які забезпечать стабільність руху БПЛА, швидкий та коректний відгук апарату на вказівки оператора

III. ВИРІШЕННЯ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Фільтри - це алгоритми, призначені для зменшення впливу шумів та вібрацій на роботу контролера.

Для фільтрації шуму з даних гіроскопа в Бетафлайт використовується два типи фільтрів: low pass - фільтри низьких частот (ФНЧ) та notch - режекторні фільтри (РФ).

Low pass фільтр - послаблює високі частоти після заданої частоти зрізу, а інші, більш низькі, пропускає без змін. При наближенні до частоти зрізу амплітуда сигналу плавно згасає, поки не стане на 3 дБ менше, або ж на 50%, потім послаблення продовжується та збільшується, що дозволяє майже не пропускати шуми на більш високих частотах.

В Бетафлайт реалізовано декілька видів фільтрів низьких частот:

PT1 - звичайний фільтр першого порядку. Він є найпростішим типом фільтра низьких частот у програмі і використовується для базового згладжування сигналів.

Характеристики:
 + невелика фазова затримка. Фільтру потрібно небагато часу на обробку сигналу, а отже система буде реагувати швидше;

- полого смуга затримки. Пропускає більше шуму в порівнянні з іншими фільтрами

РТ2 та РТ3 - фільтри другого та третього порядку. Забезпечують кращу фільтрацію високочастотних шумів порівняно з РТ1.

Характеристики:
 + більша крутизна смуги затримки в порівнянні з РТ1;

- більша фазова затримка.

Vi-quad - двополосний фільтр Баттерворта.

Характеристики:
 + набагато більша крутизна смуги затримки, пропускає менше шуму;

- ще більша фазова затримка в порівнянні з РТ-фільтрами.

Бетафлайт є програмним продуктом з відкритим вихідним кодом, що дало можливість дослідити програмну реалізацію фільтрації даних та реалізувати їх математичні моделі у MATLAB (рис. 1 а) для наглядного дослідження фазо-частотних характеристик (рис. 1 б).

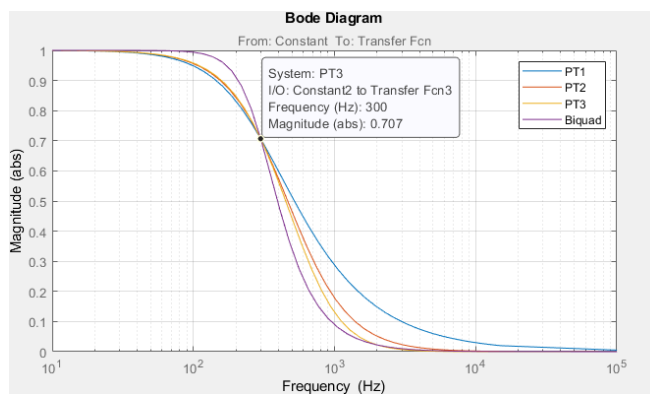
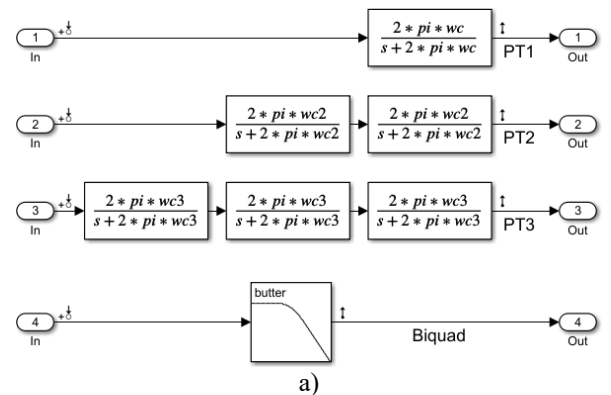


Рис. 1 Аналіз ФНЧ засобами MATLAB при частоті зрізу 300Гц

Notch фільтр - зменшує шуми навколо цільової частоти і пропускає без змін ті, що до та після неї. Як і в ФНЧ, на частоті зрізу послаблення сягає 50%, але враховуючи те що послаблення відбувається у деякому діапазоні, цей фільтр має дві частоти зрізу.

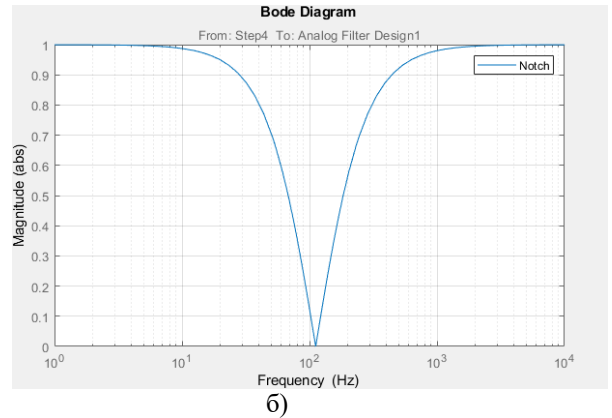
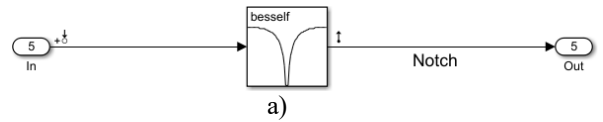


Рис. 2 Аналіз режекторного фільтра у MATLAB

Також у програмі реалізовано динамічні варіанти low pass та notch фільтрів. Вони мають той же принцип роботи, що і наведені вище фільтри, але їх частоти зрізу змінюються у процесі польоту.

Динамічний low pass - змінює свою частоту зрізу залежно від режиму роботи літального апарату.

Динамічний notch - підлаштовує свою частоту зрізу під пікові значення шуму у визначеному діапазоні.

RPM (revolutions per minute) - набір з декількох notch фільтрів, які змінюють свою цільову частоту в залежності від обертів двигунів. Мотори є основним джерелом шуму для більшості дронів.

PID регулятор - один з найрозповсюдженіших регуляторів, що використовується в системах автоматизації тих чи інших процесів. Працює за Пропорційно-Інтегрально-Диференціальним законом, що можна представити формулою:

$$P + I + D = K_p \cdot \epsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \epsilon(t) dt + K_d \cdot \frac{d(\epsilon(t))}{dt};$$

де K_p , K_i , K_d - коефіцієнти підсилення відповідних складових;

$\epsilon(t)$ - похибка.

Це можна представити у вигляді схеми (рис. 3).

Пропорційна складова домножує різницю між заданим та вимірним значенням (похибку) на деякий коефіцієнт. Тобто, чим більша відмінність між вимірним значенням і тим що потрібно, ти більшим буде вплив цієї складової.

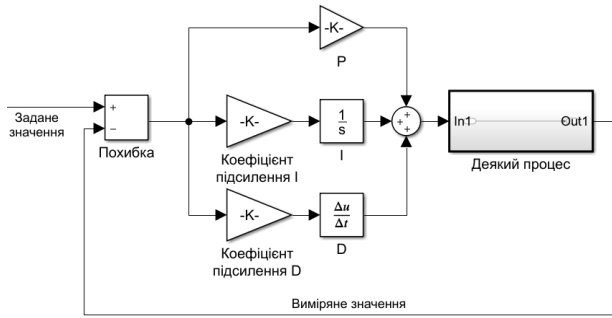


Рис.3 Структурна схема PID регулятора в MATLAB

Інтегральна складова є інтегралом похибки по часу і дозволяє враховувати її статичність. Це означає, що чим довше зберігається похибка, тим більшим буде вплив.

Диференціальна складова є похідною похибки по часу. Вплив цієї складової змінюється так, щоб повернути поточну похибку до значення попередньої.

PID-F регулятор влаштований подібно до звичайного, але D складова фактично розщеплена на дві частини – D складову та Feedforward, або ж «Випередження» (рис. 4).

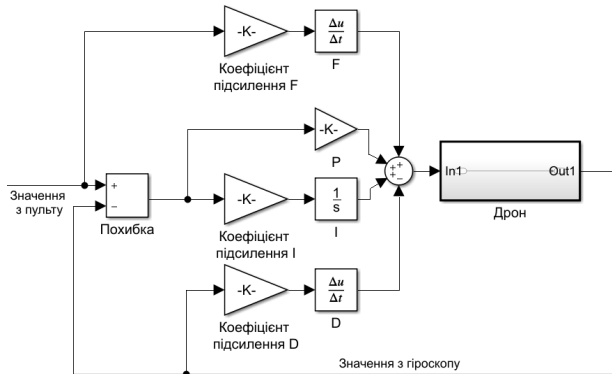


Рис.4 Структурна схема PID-F регулятора в MATLAB

Диференційна складова класичного ПІД регулятора є похідною похибки $-\frac{de}{dt}$. Оскільки похідна різниці дорівнює різниці похідних, дану формулу можна переписати як $\frac{d(\text{задане})}{dt} - \frac{d(\text{виміряне})}{dt}$. Таким чином, у PID-F версії регулятора, F є похідною заданого значення, а D - похідною виміряного значення зі знаком мінус.

Таке розділення дозволяє краще налаштувати регулятор і задати окреме підсилення для похідних від гіроскопу та заданого значення. А отже: через D складову можна налаштувати уповільнення змін в положенні БПЛА, тобто амортизувати його рухи, що дуже важливо, оскільки це допомагає уникнути перерегулювання і коливань, а через F складову - налаштувати затримку між заданим значенням та

гіроскопом, що покращує відстеження та реакцію на команди з пульта, особливо при швидких рухах.

Feedforward - одна з речей, яка відрізняє Бетафлайт від інших систем керування польотом і яка дуже впливає на те, наскільки точною може бути робота контролера при відстежуванні команди з пульта. Всього у системі є три ПІД регулятора, по одному на кожну вісь. Регулятори на Крен і Тангаж працюють однаково, але через принцип керування по осі Рискання у самому дроні, D складова в її регуляторі відсутня.

Процес налаштування системи керування складається з декількох етапів:

1. Попередня підготовка: включає перевірку апаратної частини, програмного забезпечення, перевірку та налаштування керування, ввімкнення процесу реєстрації історії польоту (чорної скриньки) та інші підготовчі кроки.
2. Тестові польоти для забору історії відгуків апарата на дії оператора.
3. Аналіз даних з чорної скриньки.
4. Налаштування фільтрів.
5. Налаштування ПІД-регуляторів.

Якісне налаштування фільтрації полягає у використанні якомога меншої кількості фільтрів для забезпечення швидкого та адекватного відгуку системи, при усуненні всіх зайвих шумів. Якщо фільтри пропускають занадто багато шумів, у PID-F регуляторі вони помножуються та можуть призвести до некоректної роботи контролера, тряски БПЛА, втрати керованості та навіть до перегрівання і згорання двигунів.

Для аналізу даних чорної скриньки, ми використали програмне забезпечення Blackbox explorer.

Відкривши файл з даними, переходимо у «Graph setup» та обираємо потрібні графіки для побудови. Тут можна прослідкувати як змінювалися різні значення у процесі тестового польоту, наприклад, впливи складових PID-F регуляторів по різним осям, задане значення та отримане з гіроскопа, мотори та ін. (рис.5).



Рис.5 Дані чорної скриньки у Blackbox explorer

Для визначення параметрів фільтрів будемо спектрограми значень з гіроскопу. Це тривимірна спектрограма, яка відображає шуми, з врахуванням тяги (ри.6).

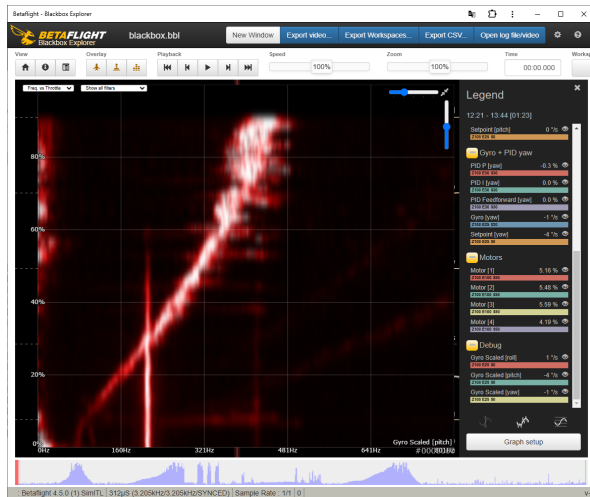


Рис.6 Спектрограма шумів по осі Крен у Blackbox explorer

Для знаходження найкращих значень коефіцієнтів ПІД регулятора існують різні методи, які включають зміну від одного до всіх параметрів, але оскільки у Бетафлайт значення за замовчуванням добре збалансовані та підходять для більшості БПЛА, змінювати абсолютно все немає потреби.

Чим менший коефіцієнт D, тим більше БПЛА буде схильним до самотурбулентності та гірше реагуватиме на зміну керування, але при цьому буде більш стійким до вібрацій від механічних елементів апарату.

Якщо D зависоке, це призведе до збільшення швидких коливань, втрати керування, підсилення шумів та перегріву або згорання двигунів.

Ідеальне значення D забезпечить хороше відпрацювання самотурбулентності, збільшення відгуку керування та більшу стабільність системи в цілому, хоча від цього зменшиться стійкість до вібрацій.

Тому, як правило намагаються знайти максимально можливе і зручне для пілота значення D, при цьому забезпечуючи помірне нагрівання двигунів. Так, для 5 дюймового БПЛА, в залежності від досвіду пілота, D встановлюють від 30 (для новачків або не дуже хорошої конструкції апарату) до 45+ (експерти з значним досвідом у пілотуванні, хорошою конструкцією та мінімальними вібраціями апарату).

Знайти відповідне значення складової D можна наступним чином:

1) Скинути всі значення вкладки «Налаштування профілю ПІД» за замовчуванням.

2) Зменшити значення «Динамічне демпфування» на 0.

3) Задати «Головний множник» на 0.5 та поступово збільшувати або зменшувати.

4) Виконати тестовий політ з достатньо різкими рухами.

5) Перевірити чи не перегріваються двигуни та чи відсутні зайві вібрації та шуми.

6) Повторювати дії з кроку 3, до отримання значення, при якому не виникає помітних проблем і максимально адекватне відпрацювання БПЛА команд оператора.

Далі потрібно знайти баланс між P та D складовими. Спочатку, на 0 виставляються повзунки «Коефіцієнт упередження» та «І коефіцієнт», «Слідування» встановлюється на 0.5 та з кожним тестовим польотом збільшується на 0.05-0.2 поки не будуть відчуватися вібрації. Однак при цьому кожен раз потрібно зберігати дані чорної скриньки, щоб проаналізувати їх згодом.

При налаштуванні I, важливо пам'ятати, що ця складова є інтегруючою. Це означає, що вона завжди досягатиме одного і того ж значення і з такою ж силою намагатиметься усунути статичну похибку PID. Якщо коефіцієнт підсилення I низький, знадобиться багато часу, щоб накопичити вплив на похибку, і так само якщо вона змінить знак, а зависокий спричинить коливання.

IV. ВИСНОВКИ

У представленій роботі проведено аналіз принципів та відмінностей звичайного ПІД регулятора та його розширеної ПІД-F модифікації. Проаналізовано налаштування фільтрів, ПІД-F регулятора та процес налаштування системи керування, включаючи визначення параметрів фільтрів, налаштування D складової, балансу P/D та інших компонентів. Проведене дослідження показало, що правильне налаштування цих параметрів забезпечує високу стабільність та точність керування безпілотними апаратами

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Kilby T., Kilby B. Getting Started with Drones. USA : Make Community, LLC, 2015. 204 с.
- [2] Betaflight Open Source Flight Controller Firmware [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://github.com/betaflight/betaflight>.
- [3] Understanding ESCs for FPV Drones [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://oscarliang.com/esc>.