

УПРАВЛІННЯ ВІБРАЦІЄЮ БПЛА РОТОРНОГО ТИПУ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕЖЕКТОРНИХ ФІЛЬТРІВ

У роботі на базі прошивки Arducopter ver.4.0.7, встановленої на польотні контролери на базі мікроконтролерів сімейства STM32F4, розглянуті питання зменшення впливу вібрацій на IMU (інерційно вимірювальний пристрій) польотного контролера. Дослідження проводилися в ході льотних випробувань трьох мультикоптерів з рамами 250мм, 550мм і 850мм, зібраних в лабораторії. Відзначено, що firmware arducopter містить ефективний інструментарій, що дозволяє виявляти рівень вібрації і керувати нею. На підставі аналізу графіків вібро-прискорення показано, що для коптерів з рамою, розміром менше 250мм, високо швидкісними ($kv > 2300$) моторами і малими пропелерами (діаметром < 5 ") в якості типу вібро - ізоляційного матеріалу можливе використання дешевої віброзахисту на основі двостороннього скотча з спіненого матеріалу. Для коптерів з рамою 450, 550мм і більше, з низько швидкісними моторами ($kv < 1000$) і пропелерами діаметром більше 10 ", доцільно використання більш складних вібро прокладок на гумових амортизаторах. У роботі розглянуто використання програмних фільтрів для зменшення впливу вібрацій працюючих моторів на показання акселерометра і гіроскопа. В якості таких фільтрів використовувалися динамічні режекторні фільтри, які в роботі налаштовувалися на частотний діапазон, пов'язаний з обертанням двигунів. Зниження вібраційного шуму розглянуто на основі положення дросельної заслінки. Частота в середині дросельної заслінки визначається аналізом журналів, а потім зміна положення дросельної заслінки вище середньої використовується для відстеження збільшення частоти шуму. На прикладі гексакоптера з рамою 850мм показано, що такі фільтри значно скорочують амплітуду не тільки виявленої основної частоти, а й гармоніки. Встановлено, що при правильному виборі механічної віброзахисту, використанні режекторних фільтрів, мотори коптера менше нагріваються, і як наслідок - зменшується енергія споживання. Це особливо помітно для мультикоптерів великого розміру. Помічено, що при FPV польотах з курсовою відео камерою на великому коптере (850мм) вібрація відео зображення помітно зменшилася. Показана можливість використання вібраційних графіків для виявлення причин деяких аварій мультикоптерів, наприклад, при руйнуванні пропелера.

Ключові слова: Arducopter, Ardupilot, GPS приймач, БПЛА, AltHold, Loiter, RTL, Land, PosHold, Auto, Notch Filters, Польотний контролер

Вступ. В даний час відомо, що для виконання топографо-геодезичної зйомки з метою складання плану місцевості, обприскування сільськогосподарських полів, проведення рятувальних робіт, військових розвідувальних операцій широко використовуються безпілотні літальні апарати (БПЛА) роторного типу (квадрокоптера, гексакоптери, ортокоптери) [1-3]. Для вирішення таких завдань БПЛА повинен вміти працювати в повністю автоматичному режимі при обльоті території по заданому маршруту. Дуже важливо, щоб під час польоту апарат був досить стійкий до зовнішніх впливів (наприклад, до поривів вітру). Велике значення для вирішення перерахованих завдань, забезпечення стійкості польоту має програмне забезпечення, апаратні засоби.

Виклад проблеми. З джерел відомо, що для підтримки стійкості Мультикоптер широко застосовуються математичні моделі, побудовані на базі PID регуляторів [4]. Для функціонування їх дані надходять з IMU (акселерометр, гіроскоп, компас), бародатчиків, GPS приймачів, датчиків оптичного потоку, сонарів і т.д. Для їх обробки широко використовуються такі математичні моделі як комплементарний фільтр, фільтр Маджвіка, фільтр Калмана [5-7]. Від якості використовуваних математичних моделей, які втілені в програмне забезпечення польотних контролерів, в значній мірі залежить стійкість польоту БПЛА. Крім цього особливе значення на поведінку БПЛА під час польоту надають вібрації, викликані обертанням моторів.

Автопілот оснащено акселерометром, чутливими до вібрацій. Ці значення акселерометра об'єднуються з даними барометра і GPS для оцінки положення БПЛА. Через надмірні вібрацій оцінка положення може бути порушена. Це призводить до дуже поганої роботи в режимах, які залежать від точного позиціонування (наприклад, на коптері: режими AltHold, Loiter, RTL, Land, PosHold і Auto [8] - firmware arducopter).

Аналіз останніх досліджень. Для стабільного польоту коптера в першу чергу необхідно зменшити частоту і амплітуду вібрації, які є характеристикою роботи двигунів (пропелерів), що обертаються під час польоту. Ці вібрації характеризуються високою частотою з низькою амплітудою. Метою гасіння вібрації є зменшення високочастотних і середньочастотних вібрацій польотного контролера, на якому встановлені барометр, гіроскоп і акселерометр. Для гасіння вібрацій в БПЛА широко використовуються механічні виброгасителі у вигляді спіненого матеріалу, антивібраційні демпфируючі пластини з гумовими амортизаторами для кріплення до рами мультикоптера польотного контролера і т.д. [9]. Для подальшого усунення вібрацій знайшли широке застосування режекторні фільтри, які використовуються в різних прошивках БПЛА [10,11]. Режекторний фільтр - це програмний фільтр нижніх частот, що дозволяє видалити більшу частину залишившихся після механічного фільтра вібраційного шуму. Розглянуті в роботі динамічні режекторні фільтри налаштовуються на діапазон, пов'язаний з частотою обертання двигуна для двигунів мультикоптер. Для їх аналізу широко використовується математичний апарат дискретного перетворення Фур'є, застосування якого висвітлено в роботі [12].

Основний матеріал і результати роботи. В роботі розглядаються тестові мультикоптер (рис.1), побудовані на базі прошивок Ardupilot ver 4.0.7 (2021р.), Які встановлені на польотні контролери з мікроконтролерами STM32F4:

1. Гексакоптер з рамою 850мм. Мотор BE4108-380kv, пропелер дволопатекий 16x55;
2. Квадрокоптер з рамою 250мм. Мотор MT2204-2300kv, пропелер трилопатекий 5x45;
3. Гексакоптер з рамою 550мм. Мотор A2212-1000kv, пропелер дволопатекий 10x45.

Установка і налаштування програмного забезпечення виконувалася так, як представлено в роботі [13,14].



Рисунок 1 – Мультикоптери, що тестуються

Попередньо, як показала практика складання мультикоптер [9], польотний контролер для квадрокоптера з розміром рами не більше 250 мм і високоспритними моторами ($kv > 2300$) закріплюють з використанням двостороннього скотча з спіненого матеріалу. Для коптерів з розмірами рами приблизно більше 450мм, на які встановлювалися мотори з $kv < 1000$, польотний контролер кріплять до рами за допомогою антивібраційних гумових амортизаторів. Кріплення польотних контролерів розглянутих в роботі мультикоптер показано на рис. 2.