

Моделювання процесу злету та приземлення безпілотного квадрокоптера з похилої поверхні в автоматичному режимі польоту

Богдан Благітко¹, Юрій Мочульський¹, Ігор Заячук²

¹ к. т. н., Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. генерала Тарнавського, 107, Львів, 79017, e-mail: blagitko@electronics.lnu.edu.ua, mochulsky@ukr.net

² к. т. н., Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дж. Дудаєва, 15, Львів, 79005, e-mail: igorzaj@litech.lviv.ua

Обґрунтовано необхідність аналізу та моделювання процесів злету безпілотного квадрокоптера з похилої площини та його приземлення на неї. За допомогою розроблених математичних моделей для опису процесу злету і приземлення проведено числовий експеримент. За результатами аналізу отриманих даних вказано на особливості впливу ухилу місця старту–приземлення безпілотного квадрокоптера на процес його виходу до заданої точки маршруту.

Ключові слова: безпілотний квадрокоптер, висотомір, трьохосьовий гіроскоп, трьохосьовий акселерометр, трьохосьовий магнітометр, керування, пропорційно-диференціальний (ПД) регулятор.

Вступ. Традиційна математична модель безпілотного квадрокоптера описує динамічні процеси в системі за нульових початкових умов [1-5]. Це означає, що безпілотний квадрокоптер нерухомо стоїть на горизонтальній площині перед початком злету. Приземлення відбувається на ту ж горизонтальну площину. Для реальних умов профіль місця злету–приземлення безпілотного квадрокоптера складається з окремих ділянок із підйомами або спусками. Крутизна підйому або спуску ділянки характеризується поздовжнім або поперечним ухилом. Рух безпілотного квадрокоптера відбувається за трьома осями: поздовжньою, поперечною та вертикальною. Поздовжня вісь закладається в конструкцію безпілотного квадрокоптера на етапі його проектування. Обертання безпілотного квадрокоптера навколо цієї осі супроводжується опусканням однієї та підняттям іншої бокової консолі. Такий рух називається «крен». Поперечна вісь лежить у площині, яка проходить через центри консолей, і перпендикулярна до поздовжньої осі. Вона спрямована в бік правої консолі та доповнює, таким чином, пов'язану систему координат до правої трійки векторів. Обертання навколо цієї осі супроводжує опускання або підняття носа безпілотного квадрокоптера. Такий рух називається «тангаж», а утворений з горизонтальною площиною кут називається кутом тангажу. Розрізняють тангаж зі збільшенням кута — кабрування, та зі зменшенням кута — пікірування. Рух безпілотного квадрокоптера, спричинений його обертанням

навколо вертикальної осі називається «рискання». Кут повороту безпілотного квадрокоптера в горизонтальній площині, відлічуваний від напрямку на північ, називають кутом рискання. Кути крену, тангажу та рискання визначають нахил літального апарата відносно його центру. Важливо дослідити вплив на динаміку руху безпілотного квадрокоптера для ненульових значень кутів крену, тангажу та рискання, які зумовлені ухилом поверхні злету–приземлення.

1. Побудова структури моделі безпілотного квадрокоптера

Безпілотний квадрокоптер конструктивно складається з електромеханічної системи й електронної (система керування польотом). Електромеханічна система реалізована у вигляді хрестоподібної балкової конструкції. На кожному з кінців балок однакової довжини прикріплені електричні двигуни постійного струму з повітряними пропелерами з незмінюваним кутом атаки. Сили тяги всіх чотирьох пар електричних двигун–пропелер напрямлені перпендикулярно до площини балкової конструкції, причому двигуни на сусідніх кінцях балок мають різні пропелери: один з них — правий, інший — лівий. Швидкості обертання роторів електродвигунів і, відповідно, сили тяги пропелерів змінюються шляхом зміни напруг, які подаються на обмотки електродвигунів [4, 5]. Електронна система реалізована у вигляді плати управління силою тяги електродвигунів шляхом визначення напруг, які необхідно подати на обмотки відповідних електродвигунів для переміщення квадрокоптера за заданою траєкторією. Процес формування величини сигналів управління здійснюється мікроконтролером за даними, які вимірюються відповідними сенсорами.

На рис. 1 зображено блок-схему моделі безпілотного квадрокоптера разом із платою керування та сенсорами, де Z — висота польоту; V_z — вертикальна складова швидкості; γ, θ, ψ — відповідно кути крену, тангажу та рискання; $\omega_\gamma, \omega_\theta, \omega_\psi$ — кутові швидкості обертання; U_1, U_2, U_3, U_4 — напруги, які подаються на двигуни. Блок сенсорів складається з висотоміра, 3-осьового гіроскопа, 3-осьового акселерометра та 3-осьового магнітометра.

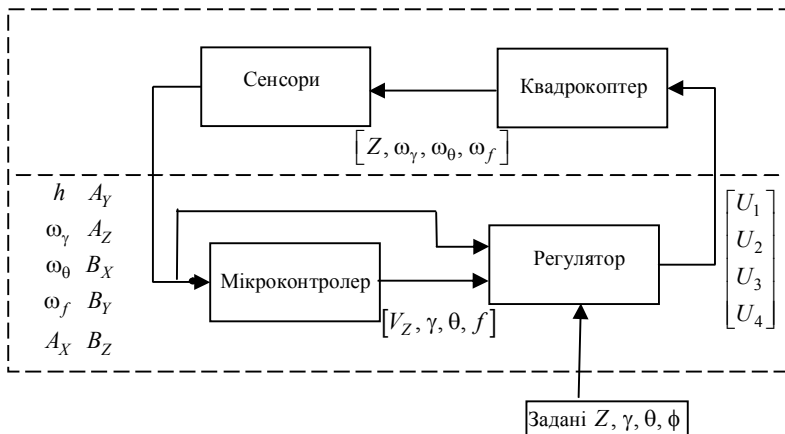


Рис. 1. Блок-схема безпілотного квадрокоптера з регулятором

2. Математична модель безпілотного квадрокоптера

Математична модель безпілотного квадрокоптера описується системою диференціальних рівнянь 16-го порядку у формі Коші [5]. Для керування польотом безпілотного квадрокоптера використовується регулятор, який задає необхідні напруги на двигуни пропелерів. Для регулювання висоти польоту та кутів нахилу безпілотного квадрокоптера вибрано пропорційно-диференційний регулятор. Регулювання здійснюється шляхом зміни вертикальної складової сили тяги пропелерів і моментів сил, які обертають безпілотний квадрокоптер.

Окрім того в математичній моделі повинні бути враховані умови сумісності параметрів моделі безпілотного квадрокоптера та моделі ПД регулятора. Адже в першому випадку вхідними параметрами моделі є напруги живлення електричних двигунів безпілотного квадрокоптера, а вихідними — кутові швидкості обертання їх валів. З іншого боку ці напруги формуються ПД регулятором за значеннями параметрів, які вимірюються сенсорами. Особливості сенсорів також потрібно брати до уваги.

Висота польоту безпілотного квадрокоптера Z визначається висотоміром. За допомогою числового диференціювання висоти знаходимо його вертикальну швидкість. Кутові швидкості ω_γ , ω_θ та ω_ψ , які задає 3-осьовий гіроскоп, — це відповідні змінні стану моделі безпілотного квадрокоптера. Далі шляхом числового інтегрування знаходимо кути тангажу, крену та ристання, з врахуванням того, що гіроскоп має зміщення нуля Δ . Тоді формула для розрахунку кута крену в момент часу t_{i+1} на основі значень кута в момент часу t_i така

$$\gamma_{i+1} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \omega_\gamma(t) dt + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \Delta_\gamma dt + \gamma_i \approx \gamma_i + \omega_{\gamma,i} (t_{i+1} - t_i) + \Delta_\gamma (t_{i+1} - t_i). \quad (1)$$

Аналогічні формули можна записати для розрахунку кута тангажу та ристання. Зауважимо, що за рахунок похибки нуля гіроскопа (третього доданку) похибка розрахунку кутів тангажу, крену та ристання буде нагромаджуватися, що вплине на відхилення траєкторії польоту безпілотного квадрокоптера від заданої.

Для корекції деяких кутів положення безпілотного квадрокоптера, доцільно скористуватися показами акселерометра. Адже 3-осьовий акселерометр визначає проекції (A_{x_o} , A_{y_o} , A_{z_o}) суми вектора прискорення вільного падіння та вектора абсолютного прискорення об'єкту на осі X_o , Y_o , Z_o системи координат, пов'язаної з об'єктом. Якщо об'єкт нерухомий або рухається рівномірно, то ці проекції будуть проекціями вектора прискорення вільного падіння \vec{G} на осі X_o , Y_o , Z_o . (рис. 2). Тоді кут крену γ безпілотного квадрокоптера запишемо як

$$\gamma = \arctg \left(\frac{A_{x_o}}{\sqrt{A_{y_o}^2 + A_{z_o}^2}} \right), \quad (2)$$

де $\sqrt{A_{y_o}^2 + A_{z_o}^2}$ — довжина вектора A_{yzo} , який є сумою векторів A_{y_o} та A_{z_o} .

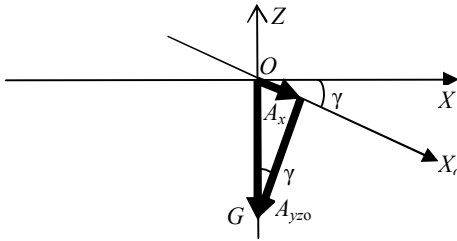


Рис. 2. Визначення кута тангажу

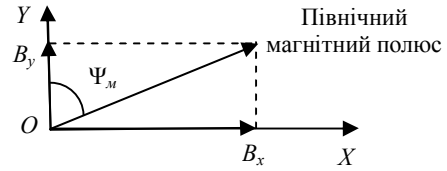


Рис. 3. Визначення кута рискання

Аналогічно можна записати вираз для знаходження кута тангажу

$$\theta = \arctg \left(\frac{A_{yo}}{\sqrt{A_{xo}^2 + A_{zo}^2}} \right). \quad (3)$$

Кут рискання обчислити за показами акселерометра неможливо. Тому для корекції кута рискання доцільно використати 3-осьовий магнітометр. Він визначає проекції вектора магнітної індукції магнітного поля Землі на осі X_o , Y_o , Z_o (відповідно B_{xo} , B_{yo} та B_{zo}). Використавши матрицю повороту системи координат на кути γ і θ , перерахуємо вказані вище проекції в інерційну систему XYZ (рис. 3)

$$\begin{aligned} B_x &= B_{xo} \cos(\gamma) - B_{zo} \sin(\gamma), \\ B_y &= B_{xo} \cos(\theta) \sin(\gamma) + B_{yo} \cos(\theta) + B_{zo} \cos(\gamma) \sin(\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

і знайдемо відхилення носа безпілотного квадрокоптера від напрямку на північний магнітний полюс

$$\phi_m = -\arctg(B_x/B_y). \quad (5)$$

Враховавши значення кута магнітного відхилення для місця знаходження безпілотного квадрокоптера, обчислимо кут рискання.

Для знаходження розв'язку диференціальних рівнянь, що описують модель безпілотного квадрокоптера, використовувався неявний метод Рунге-Кутта [6].

3. Дослідження процесу злету безпілотного квадрокоптера з похилої поверхні

Злет безпілотного квадрокоптера з горизонтальної поверхні відбувається у вертикальному напрямі [1-5]. Вертикальний злет безпілотного квадрокоптера з похилої поверхні має свої особливості. На ковзкій поверхні безпілотний квадрокоптер, не

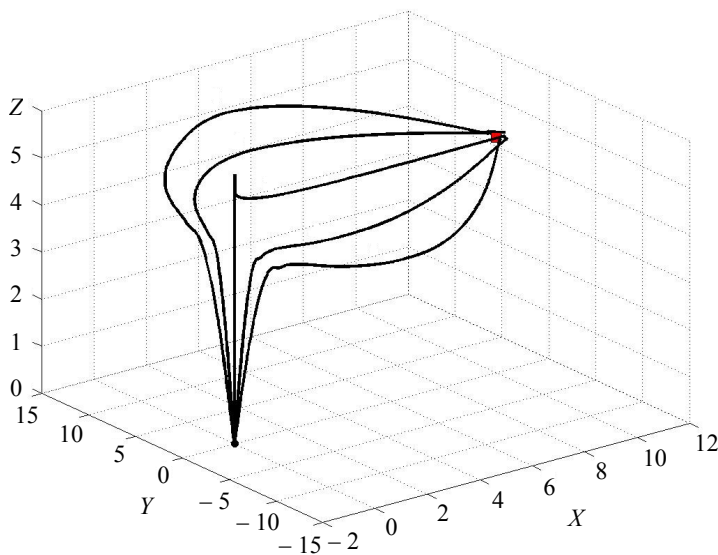


Рис. 4. Траєкторії злету безпілотного квадрокоптера за різних кутів повздовжнього ухилу похилої площини

злітаючи, переміщається по поверхні в некерованому напрямі, а на шорсткій або злітає в некерованому напрямі, або перевертається.

Дослідимо процес злету безпілотного квадрокоптера у перпендикулярному напрямі до похилої поверхні. Початок польоту відбувається з вимкненим регулятором. Після підняття безпілотного квадрокоптера на задану висоту польоту вмикається регулятор і політ продовжується за програмою.

На рис. 4 наведені траєкторії руху безпілотного квадрокоптера зі злітної поверхні, нахиленої під різними кутами. Траєкторія 1 відображає зліт безпілотного квадрокоптера з площини ухилом — $0,5$ рад, 2 — $-0,3$ рад, 4 — $+0,3$ рад, 5 — $+0,5$ рад. Для порівняння подано траєкторію руху 3, яка відображає процес традиційного вертикального злету безпілотного квадрокоптера з горизонтальної поверхні. Всі траєкторії сходяться в одній і тій же ж точці подальшого маршруту.

4. Дослідження процесу приземлення безпілотного квадрокоптера на похилу поверхню

Процес приземлення безпілотного квадрокоптера на похилу поверхню складніший, аніж його злет. Адже після приземлення безпілотний квадрокоптер повинен бути готовим до нового старту з тими ж ненульовими початковими умовами, що і за першого злету з похилої поверхні.

Доцільно процес приземлення безпілотного квадрокоптера на похилу поверхню розділити на два етапи. Підлітаючи до точки приземлення або точки вильоту на висоті, наприклад, $0,5$ м вмикається регулятор і безпілотний квадрокоптер, як в ручному режимі управління [7], приземляється на похилу площину.

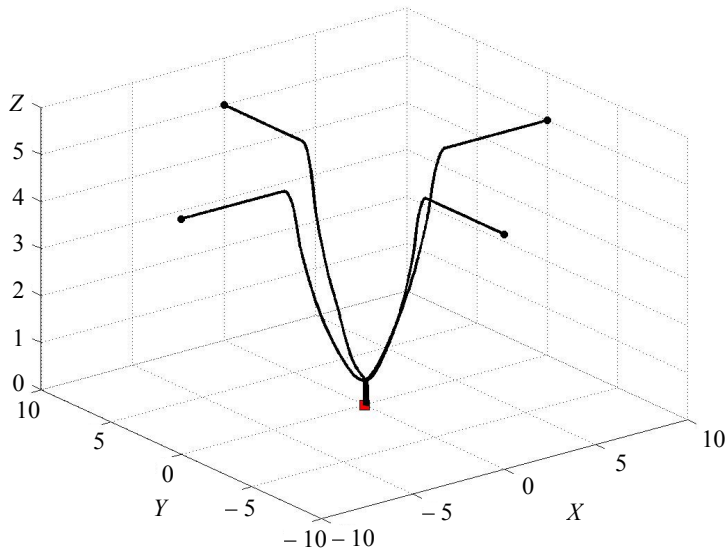


Рис. 5. Траєкторії приземлення безпілотної квадрокоптера у разі підльоту його з чотирьох різних сторін світу

На рис. 5 наведені траєкторії приземлення безпілотної квадрокоптера у разі підльоту його з чотирьох різних сторін світу. Всі траєкторії сходяться в одній і тій же ж точці на висоті 0,5 м над місцем приземлення.

Висновки. Запропоновано методику дослідження процесу злету безпілотної квадрокоптера з похилої площини та приземлення на неї. Проведено аналіз результатів числових розрахунків на основі розробленої математичної моделі. Встановлено, що злет безпілотної квадрокоптера з похилої площини (місця старту) доцільно здійснювати в перпендикулярному (до похилої площини) напрямку з вимкненим регулятором. Після досягнення безпілотним квадрокоптером заданої висоти (наприклад 1 м) вмикається регулятор і політ виконується за наперед заданою програмою. Для приземлення на похилу площину безпілотний квадрокоптер повинен зависнути над місцем приземлення на заданій висоті (наприклад 1 м), далі вимикається регулятор і він приземлюється.

Література

- [1] *Huang H., Hoffmann G. M., Waslander S. L., Tomlin C. J.* Aerodynamics and control of autonomous quadrotor helicopters in aggressive manoeuvring // IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2009. — P. 3277-3282.
- [2] *Wissiere D., Bristeau P.-J., Martin A. P., Petit N.* Experimental autonomous flight of a small-scaled helicopter using accurate dynamics model and low-cost sensors // Proceeding of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Seoul Korea, July 6-11, 2008. — P. 14642-14650.
- [3] *Nartin P., Salaun E.* The True Role of Accelerometer Feedback in Quadrotor Control // IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, May 2010. — P. 1623-1629.

- [4] In-Flight Collision Avoidance Controller Based Only on OS4 Embedded Sensors / *M. Becker, R. C. B. Sampaio, S. Bounabdallah* et all // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. Vol. 34, No 3 Rio de Janeiro July/Sept. 2012 — March 2012. — Vol. XXXIV, No 3. — С. 294-107.
- [5] *Благитко Б., Мочульський Ю., Заячук І.* Математичне моделювання впливу особливостей сенсорів на процес польоту безпілотного квадрокоптера // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. — 2015. — Вип. 21. — С. 22-29.
- [6] *Мочульський Ю.* Matlab у фізичних дослідженнях: навч.-метод. посібник. — Львів: ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка, 2004. — 121 с.
- [7] *Благитко Б., Заячук І., Кім Л., Мочульський Ю.* Моделювання процесу керування вертикальним злетом і приземленням безпілотного квадрокоптера // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. — 2012. — Вип. 2. — С. 111-117.

Simulation of take-off and landing of unmanned quadrocopter from the sloping surface in automatical mode of flight

Bogdan Blahitko, Yuriyi Mochulsky, Jgor Zajzchuk

The necessity of analyzing and modeling the processes of take-off of unmanned quadrocopter from the sloping surface and its landing on it is substantiated. Using the developed mathematical models describing the process of take-off and landing, the numerical experiment is performed. The analysis of the data indicated the characteristics of the influence of the slope of start-landing unmanned quadrocopter on process of its put to a given waypoint.

Моделирование процесса взлета и приземления беспилотного квадрокоптера с наклонной поверхности в автоматическом режиме полета

Богдан Благитко, Юрий Мочульский, Игор Заячук

Обоснована необходимость анализа и моделирования процесса взлета беспилотного квадрокоптера с наклонной плоскости и его приземления на нее. С помощью разработанных математических моделей для описания процесса взлета и приземления проведено численный эксперимент. По результатам анализа полученных данных указано на особенности влияния наклонности места старта–приземления беспилотного квадрокоптера на процесс его выхода к заданной точке маршрута.

Отримано 06.12.16