

## СИСТЕМА КУТОВОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТРИРОТОРНОГО БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ З ВІДМОВОСТІЙКИМ БЛОКОМ ВИМІРЮВАЧІВ ПАРАМЕТРІВ РУХУ

Джулгаков В. Г., Руденко К. І., Плавинська Н.В.

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "ХАІ"

Запропоновано структуру відмовостійкої системи куткової стабілізації безпілотного літального апарату, отримано математичний опис процедури діагностування блоку датчиків параметрів руху.

**Постановка проблеми.** Одним із важливих напрямів розвитку сільського господарства України і світу є застосування нових приладів і технологій. У цьому сенсі актуальним стає використання малогабаритних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для моніторингу полів, лісових масивів, точеного внесення добрив тощо. До них апаратів висувають вимоги високої маневреності та надійності системи управління (СУ). В останні роки це призвело до широкого застосування мультироторних БПЛА із чотирма, шістьма та вісьма гвинтами. Окремо слід виділити БПЛА з трьома гвинтами – трикоптери. Каркас такого БПЛА може складатися на зразок штативу для фотокамери, що суттєво полегшує їх транспортування.

Оскільки в малогабаритних БПЛА неможливе повне дублювання приладів, забезпечення надійності досягається шляхом поєднання методів діагностування технічного стану апаратури, ресурсної надмірності і алгоритмічних підходів до компенсації відмов елементів СУ. Отже, розробка структури СУ для трироторного апарату є першим етапом в створенні високоефективного надійного БПЛА. Окремою задачею при створенні відмовостійкої СУ є розробка математичних моделей для діагностування технічного стану блоку датчиків параметрів руху БПЛА.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Різноманітні структури СУ мультироторних БПЛА розглядаються у цілій низці публікацій [1,2]. Модуль вимірювання параметрів руху БПЛА будують на основі датчиків типу MEMS (як правило, це датчики куткової швидкості та акселерометри), обробка навігаційної інформації та стабілізація параметрів руху здійснюються потужним бортовим мікроконтролером. В багатьох моделях БПЛА тректорне управління здійснюється за допомогою дистанційного керування оператором. У незначній кількості моделей реалізовано автономний політ, а задачі відмовостійкого управління, визначені, наприклад, в роботі [3], практично не вирішені в цьому класі ЛА.

**Мета статті.** Сформувані основні вимоги до СУ кутовим положенням трироторного ЛА з відмовостійким блоком вимірювачів параметрів руху, визначити структурні елементи СУ та інтерфейси між ними, побудувати так звані діагностичні математичні моделі для блоку датчиків параметрів руху трироторного БПЛА.

**Основні матеріали дослідження.** На основі аналізу публікацій і відомих принципів побудови відмовостійких СУ ЛА сформульовано наступні вимоги до СУ трикоптера:

- ЛА має функціонувати в двох режимах: автономний політ за заданою програмою і політ в режимі ручного керування оператором;
- необхідність використання малогабаритних мікроелектронних вимірювачів параметрів руху;

– можливість діагностування технічного стану вимірювачів параметрів руху трикоптера безпосередньо в процесі польоту.

Типова кінематична схема трикоптера показана на рис. 1.

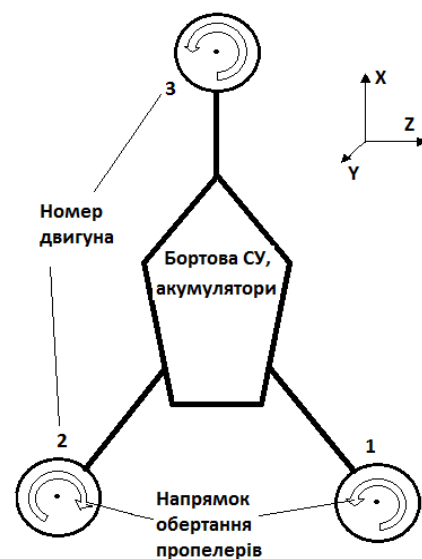


Рисунок 1 – Кінематична схема трикоптера

Розташування осей зв'язаної системи координат відповідає класичній схемі для літаків, нумерація двигунів здійснена від напрямку осі X. Напрямок обертання пропелерів має наступний характер: пропелери двигунів 1 і 2 (Дв1, Дв2) обертаються в протилежних напрямках для компенсації обертового моменту, пропелер двигуна 3 (Дв3) обертається в тому ж напрямку, що й пропелер Дв1. Всі двигуни підключені до контролера через електронні регулятори швидкості обертання (ЕРШ1, ЕРШ2, ЕРШ3 відповідно). Задля компенсації обертового моменту, створеного Дв3, в систему введено сервопривід, що змінює вектор сили тяги шляхом повороту Дв3.

Розроблена структура системи управління трикоптера показана на рис. 2.

Виконавчими пристроями в СУ трироторного БПЛА є безколекторні двигуни постійного струму, що змонтовані на металевих пілонах на відстані 48 см від центру мас БПЛА. Всі модулі бортової апаратури та акумуляторні батареї розташовані в центрі конструкції. Формування широко-модульованих імпульсів для керування двигунами забезпечується мікроконтролером.



Рисунок 2 – Структура системи управління трироторного БПЛА

При реалізації дистанційного керування БПЛА мікроконтролер керування двигунами отримує пакет широтно-модульованих імпульсів від модуля прийому сигналів дистанційного керування (МПСДК). Ці імпульси відповідають потрібним значенням кутів курсу, тангажу та крену ЛА. Мікроконтролер керування двигунами розраховує потрібну зміну тяги кожного з двигунів для виконання заданого режиму польоту. В цьому варіанті управління задані значення параметрів формуються оператором.

Вимірювально-інформаційна частина системи управління реалізована у вигляді окремого модуля вимірювачів параметрів руху БПЛА, в якому закладено принципи відмовостійкості, один із яких – надлишковість елементів, в даному випадку – датчиків кутових швидкостей.

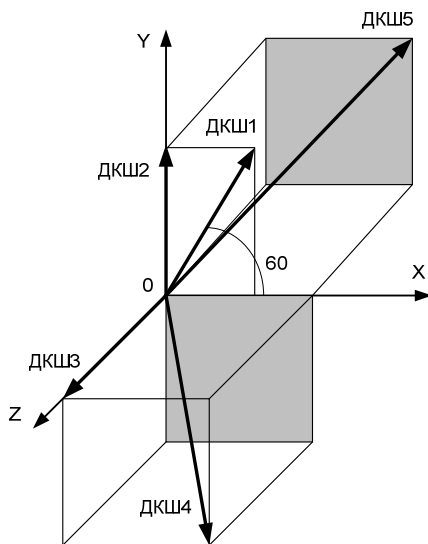


Рисунок 3 – Розташування датчиків кутової швидкості

В запропонованій системі використано п'ять датчиків кутової швидкості (ДКШ), що розташовані відповідно до схеми (рис. 3). Таке розташування датчиків дозволяє при відмові одного з них за допомогою діагностичних предикатів визначити, який саме з датчиків припинив функціонувати, і змінити принцип обробки інформації з них.

Щоб сформувати діагностичні предикати, введемо

наступні позначення:  $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5$  – чисельні значення кутових швидкостей на виходах першого, другого, третього, четвертого і п'ятого датчиків відповідно в  $k$ -й момент часу. З огляду на розташування датчиків (рис. 3) маємо наступні рівняння для вихідних сигналів датчиків кутової швидкості, які запишемо у вигляді матричного добутку:

$$\begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \\ U_3(t) \\ U_4(t) \\ U_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{3} & 0 \\ 2 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x(t) \\ \omega_y(t) \\ \omega_z(t) \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \omega_x(t) \\ \omega_y(t) \\ \omega_z(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – проекції кутової швидкості обертання БПЛА на осі зв'язаної системи координат. ДКШ має коефіцієнт перетворення  $K_{\text{ДКШ}}$ , який враховується у відповідному значенні параметра  $U$ .

Дослідимо матрицю  $K$  по критерію повного діагностування [3]. Всі рядки матриці  $K$  лінійно незалежні, тобто потрібно перевірити другу умову для всіх симетричних матриць  $A_{(3 \times 3)}$  з матриці  $K$ .

Маємо  $C_5^3 = \frac{5!}{3!2!} = 10$  матриць  $A_i, i=1..10$ .

Розглянемо ці матриці:

$$\begin{aligned} A_1 &= (U_1, U_2, U_3); & A_6 &= (U_3, U_4, U_5); \\ A_2 &= (U_1, U_2, U_4); & A_7 &= (U_1, U_3, U_4); \\ A_3 &= (U_1, U_2, U_5); & A_8 &= (U_1, U_3, U_5); \\ A_4 &= (U_2, U_3, U_4); & A_9 &= (U_1, U_4, U_5); \\ A_5 &= (U_2, U_3, U_5); & A_{10} &= (U_2, U_4, U_5). \end{aligned} \quad (2)$$

Можна обчислити детермінант кожної з матриць із системи (2) і пересвідчитись, що жоден з них не дорівнює нулю, тобто блок, який складається з п'яти

датчиків, може бути повністю діагностований [3].

Отримаємо логічну таблицю для формування предикатів діагностування. Можна скласти п'ять множин рівнянь, причому з кожної множини можна формулювати показники з одного датчика через всі інші з другої множини. Позначимо такі множини як  $S_p$ ,  $p = 1..5$ , що складаються з елементів  $U_j$ ,  $j = 1..5$ , причому  $j \neq p$ .

Розглянемо множину  $S_1 = (U_1, U_2, U_3, U_4)$ . Із системи рівнянь (1) виключимо рівняння для параметра  $U_5$ . Отримаємо вираз для оціночного значення виходу датчика ДКШ1  $\tilde{U}_1(t)$  на основі вихідних сигналів інших датчиків:

$$\tilde{U}_1(t) = 0.5(\sqrt{3}U_4(t) + (\sqrt{3} + 1)U_2(t) - U_3(t)). \quad (3)$$

Тоді параметр  $\Delta_1(t) = \tilde{U}_1(t) - U_1(t)$  можна розглядати як похибку між оціночним та фактичним вихідним сигналом, яка буде виникати при відмові ДКШ1. Для діагностування відмов в ДКШ введемо величину припустимого відхилення  $\delta_0$ .

Аналогічно виразу (3) можна провести розрахунки для інших множин  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  та  $S_5$  і отримати рівняння похибки для інших датчиків  $-\Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ .

Проаналізувавши взаємні залежності вихідних сигналів датчиків, можна сформулювати систему предикатних рівнянь для діагностування працездатності сукупності датчиків ДКШ1-ДКШ5.

$$z_0 = S\{|\Delta_1| \leq \delta_0 \ \& \ |\Delta_2| \leq \delta_0\} = \begin{cases} 1 - \text{немає відмови} \\ 0 - \text{є відмова} \end{cases}, \quad (4)$$

$$z_1 = S\{|\Delta_1| \leq \delta_0\} = \begin{cases} 1 - \text{відмова в ДКШ5} \\ 0 - \text{відмова в ДКШ1, ДКШ2,} \\ \text{ДКШ3 або ДКШ4} \end{cases}, \quad (5)$$

$$z_2 = S\{|\Delta_2| \leq \delta_0\} = \begin{cases} 1 - \text{відмова в ДКШ4} \\ 0 - \text{відмова в ДКШ1} \\ \text{або ДКШ2 або в ДКШ3} \end{cases}; \quad (6)$$

$$z_3 = S\{|\Delta_3| \leq \delta_0\} = \begin{cases} 1 - \text{відмова в ДКШ1} \\ 0 - \text{відмова в ДКШ2} \\ \text{або в ДКШ3} \end{cases}; \quad (7)$$

$$z_4 = S\{|\Delta_4| \leq \delta_0\} = \begin{cases} 1 - \text{відмова в ДКШ2} \\ 0 - \text{відмова в ДКШ3} \end{cases}. \quad (8)$$

Таким чином, отримані предикатні рівняння при послідовному аналізі дозволяють діагностувати відмову в будь-якому ДКШ. Після виявлення відмови показання датчика, що відмовив, можна компенсувати обчисленням на основі виразу (3) або аналогічного для інших датчиків.

Вказаний підхід можна застосовувати, спираючись на припущення, що відмова виникає тільки в одному з ДКШ. У разі виникнення відмови в іншому ДКШ треба застосовувати складніші методи діагнос-

тування.

**Висновки.** Запропоновано структуру системи стабілізації кутового положення трироторного ЛА, що дозволить здійснювати управління в ручному та автоматичному режимах. Отримані предикатні рівняння дають змогу сформулювати алгоритм для розв'язання завдань діагностування – визначення факту та місця відмови в одному з датчиків кутової швидкості. Розглянуті принципи діагностування можна поширити на комплекси інших датчиків параметрів руху, наприклад, акселерометрів.

#### Список використаних джерел

1. Распопов, В.Я. Микросистемная авионика: учеб. пособие / В.Я. Распопов. – Тула: Гриф и К, 2010. – 248 с.
2. Мультикоптеры. Техническая информация [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.multicopter.ru/technical>
3. Кулик, А.С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления / А.С. Кулик. – Х.: Гос. аэрокосмич. ун-т "ХАИ"; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
4. Кулік, А.С. Система управління шестироторного безпілотного літального апарату з властивостями відмово стійкості / А.С. Кулік, В.Г. Джулгаков, К.І. Руденко. – Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 117 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ, 2011. – 110 - 113 с.

#### Аннотация

### СИСТЕМА УГЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ТРИРОТОРНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫМ БЛОКОМ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ

Джулгаков В.Г., Руденко К.И., Плавинская Н.В.

*Предложена структура отказоустойчивой системы угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата, получено математическое описание процедуры диагностирования блока датчиков параметров движения.*

#### Abstract

### TRIOTOR FLIGHT VEHICLE ANGULAR POSITION STABILISATION SYSTEM WITH FAULT TOLERANT MOTION PARAMETERS MEASUREMENT UNIT

V. Dzhulgakov, K. Rudenko, N. Plavynska

*The trirotor flight vehicle fault-tolerant angular position stabilisation system is proposed; the mathematical description of the measurement unit diagnostic procedure is obtained.*