

УДК 62.64

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/13>**Заболотний О.В.**Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»**Сіроклин В.П.**Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»**Нікулін С.С.**Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»**РОЗРОБКА АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ
ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ БОЙОВИХ КВАДРОКОПТЕРІВ:
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ЕФЕКТИВНОСТІ
У СУЧАСНІЙ ВІЙСЬКОВІЙ ТЕХНОЛОГІЇ**

Надійність функціонування квадрокоптерів в умовах сучасного бою є критично важливою. Для забезпечення високого рівня надійності необхідно ретельно тестувати алгоритми управління та системи квадрокоптера на землі. Ця робота присвячена створенню наземного випробувального комплексу для систем квадрокоптерів. Запропонований комплекс базується на карданному підвісі, який дозволяє імітувати тривимірні рухи квадрокоптера під час тестування. До складу комплексу входять: платформа системи позиціонування квадрокоптера, незалежна система вимірювання параметрів орієнтації, виконавчі механізми для завдання просторового положення, а також керуючий комп'ютер, який забезпечує роботу комплексу та здійснює точну оцінку рухів квадрокоптера на основі даних, отриманих від системи орієнтації та вимірювальних систем. У статті представлено результати початкового етапу розробки всіх структурних елементів комплексу, включаючи проектування та тестування основних модулів, а також інтеграцію різних систем для забезпечення синхронізованої роботи. Керуючий комп'ютер використовує спеціалізоване програмне забезпечення для аналізу даних з датчиків і забезпечує зворотний зв'язок для корекції рухів квадрокоптера. Комплекс дозволяє імітувати різні сценарії польоту та оцінювати реакцію систем квадрокоптера. Завдяки цьому підходу можна значно підвищити надійність та ефективність використання квадрокоптерів у реальних бойових умовах. Описано аспекти створення та налаштування випробувального комплексу, розглянуто вибір компонентів, проектування та виготовлення платформи позиціонування, синтез програмного забезпечення для керуючого комп'ютера, інтеграцію систем вимірювання та орієнтації, а також випробування комплексу в різних умовах. Комплекс розроблено з урахуванням можливості масштабування та адаптації для різних типів квадрокоптерів і сценаріїв випробувань. Окрему увагу надано забезпеченню потрібної точності вимірювань та відтворюваності результатів випробувань. Це дозволяє проводити комплексні тести систем управління та навігації квадрокоптера, оцінювати його реакцію на різні типи навантажень та впливів, що імітують реальні умови експлуатації. Важливим моментом є можливість автоматизованого збирання і аналізу даних, що значно підвищує ефективність процесу тестування та дозволяє швидко виявляти і усувати недоліки у функціонуванні квадрокоптера.

Ключові слова: апаратно-програмний комплекс, тестування, система позиціонування, квадрокоптер, проектування, надійність функціонування, наземне випробування, карданний підвіс, оцінка рухів, імітація сценаріїв польоту.

Постановка проблеми. Застосування квадрокоптерів у сучасній війні має високу актуальність і може істотно вплинути на тактику і стратегію бойових дій. Практика збройного конфлікту в Україні дала можливість виділити такі основні сфери, де квадрокоптери показали високу ефективність:

а) розвідка та спостереження, коли квадрокоптери використовують для отримання розвідувальної інформації, включаючи спостереження за ворожими позиціями, виявлення прихованих об'єктів, моніторинг руху військ та транспорту, а також для оцінки місцевості та об'єктів на ній (оснащення

сенсорами різних типів, камерами, тепловізорами та радіоелектронним обладнанням);

б) ударні дії, під час яких квадрокоптери можуть бути носіями легкого озброєння, такого як протипіхотні або протитанкові гранати (постріли), для точного удару по ворожих цілях (ефективно для нейтралізації загроз у важкодоступній для звичайних засобів ураження місцевості та зонах);

в) контрзаходи, коли квадрокоптери також використовують для боротьби з ворожими безпілотними літальними апаратами (БПЛА), наприклад, для перехоплення або знищення ворожих дронів, постановки радіоелектронних перешкод;

г) психологічний тиск, у випадку, коли присутність квадрокоптерів у повітрі може створювати моральний тиск на ворога, викликаючи тривогу та невизначеність у його лавах.

Однак варто зазначити, що використання квадрокоптерів також пов'язане з деякими обмеженнями та ризиками, такими як схильність до перехоплення, можливість ураження протиповітряним вогнем і ускладнення в управлінні за наявності засобів ворожої електронної боротьби.

Наведені вище аргументи дозволяють сформулювати пункти актуальності теми розробки стендів для тестування бойових квадрокоптерів, а саме:

а) тестування функціональності та надійності, адже стенди надають контрольоване середовище для перевірки функцій та надійності квадрокоптерів і можуть використовуватися для симуляції різних умов, включаючи погодні умови, вплив ворожого вогню та електромагнітні перешкоди;

б) тестування безпеки та стійкості, коли стенди дозволяють проводити випробування на безпеку та стійкість квадрокоптерів, включаючи їх здатність виживати в умовах механічних пошкоджень або впливу засобів ППО;

в) розробка та тестування нових технологій, таких як автономне керування, системи навігації, засоби виявлення тощо;

г) навчання та тренування, адже стенди дозволяють проводити навчання та тренування операторів квадрокоптерів в умовах, максимально наближених до реальних бойових ситуацій, що допомагає підвищити професіоналізм та ефективність.

д) економічна ефективність, адже тестування на стендах може бути більш ефективним з економічної точки зору, ніж проведення польових випробувань, особливо при тестуванні великих обсягів обладнання або при необхідності повторюваності результатів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Останніми роками квадрокоптерам приділяється все більше уваги, оскільки вони зручніші, ніж пілотовані літальні апарати, і можуть більш гнучко виконувати різні завдання, але рівень аварійності для квадрокоптерів набагато вищий, ніж для пілотованих літальних апаратів, через недосконалу технологію обладнання та відсутність ефективного управління працездатністю та діагностики бортових систем [1, 2]. Оскільки квадрокоптерам потрібно літати на різних висотах і протягом відносно тривалого періоду часу, бортове обладнання має бути якомога легшим, щоб перевозити більше корисного навантаження, що обмежує складність діагностичних систем квадрокоптерів. Довший час польоту також збільшує ймовірність відмови. Саме через зазначені обставини потрібен ефективний діагностичний підхід.

Система керування польотом, що відповідає за виконання завдань польоту, є ядром квадрокоптера. Порівнюючи фактичний стан квадрокоптера, вказаний даними датчиків, з бажаним станом, вона посилає команди виконавчим механізмам, щоб фактичний стан відповідав бажаному стану, завершуючи замкнутий процес управління [3, 4]. Датчики надають дані до системи управління польотом для проведення аналізу та генерації команд управління, а невірні дані датчиків призведуть до помилкових команд та небажаних наслідків. Крім того, датчики польоту часто піддаються впливу тиску і температури повітря, що швидко змінюється, що збільшує ймовірність їх поломки. Тому виявлення несправностей датчиків квадрокоптерів дуже важливе для забезпечення виконання завдань польоту.

В останні роки було розроблено ряд підходів до виявлення несправностей датчиків, які можна розділити на дві основні категорії: підходи на основі моделі та підходи, основані на отриманих даних [5, 6].

Підходи на основі моделі можуть досягти високої продуктивності виявлення та надати детальну інформацію про несправності, яку можна інтерпретувати, якщо буде отримана точна фізична модель досліджуваної системи [7, 8, 9]. Однак, створити таку модель для квадрокоптера досить складно, що обмежує можливості цього підходу [10, 11].

У порівнянні з підходами, заснованими на моделі, методи, основані на отриманих даних не потребують усвідомлення складних фізичних механізмів і можуть найкращим чином використовувати інформацію, отриману від датчи-

ків. Несправності можуть бути точно виявлені різними підходами, заснованими на даних та на основі зміни характеристик даних [14, 15].

Спираючись на зазначені підходи розробляють і сучасні комплекси для тестування квадрокоптерів на базі аеродинамічних [16, 17] та дротяних підвісів [18, 19], проте, як показує практика їх застосування, вони мають обмеження на обертальний рух за осями крену та тангажу.

У зв'язку з цим, в Національному аерокосмічному університеті розпочато роботи зі створення апаратно-програмного комплексу тестування квадрокоптерів на основі карданного підвісу, з метою забезпечення повноцінного обертального руху та розробки нових методик тестування.

Постановка завдання. Метою статті є розгляд ключових аспектів проектування апаратно-програмного комплексу для тестування квадрокоптерів. Апаратно-програмний комплекс повинен забезпечувати обертальний рух квадрокоптера за трьома ступенями свободи з мінімальними обмеженнями на кути обертання.

Виклад основного матеріалу.

1. Структура апаратно-програмного комплексу

Апаратно-програмний комплекс складається з платформи системи позиціонування, призначеної для розміщення квадрокоптера, незалежної виміральної системи, призначеної для визначення параметрів орієнтації квадрокоптера під час випробувань, вітрогенератора, здатного імітувати вплив атмосферних факторів, і комплексу, що складається з керуючого комп'ютера, що використовується для моніторингу системи (рисунок 1).

На початку випробувань квадрокоптер встановлюється на платформу системи позиціонування. Через нерівномірний розподіл ваги тестованого квадрокоптера платформа системи позиціонування може бути розбалансована під дією гравітаційних моментів, що виникають через невідповідність між центром ваги платформи та центром обертання підвісу. Тому платформа системи позиціонування повинна бути оснащена системою балансування. Для активації бортових систем квадрокоптера необхідно подати живлення, для чого на платформі має бути встановлено відповідний роз'єм.

При тестуванні квадрокоптера дані про його кутове положення повинні бути передані на керуючий комп'ютер. Для цього на платформі системи позиціонування використовують радіоканал передачі даних. Отримані дані кутового положення порівнюють з незалежними вимірюваннями параметрів орієнтації квадрокоптера для отримання

точних прогнозів. У зв'язку з цим апаратно-програмний комплекс повинен бути доповнений незалежною системою вимірювань.



Рис. 1. Склад апаратно-програмного комплексу

2. Проектування апаратно-програмного комплексу

2.1. Карданний підвіс

На початковому етапі проектування апаратно-програмного комплексу будуть розглянуті основні етапи проектування карданного підвісу, як показано на рисунку 2.

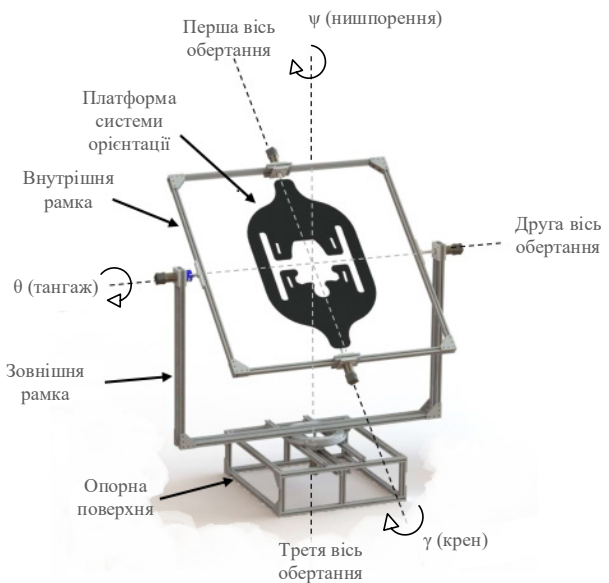


Рис. 2. Конструкція карданного підвісу

Конструкція підвісу складається з трьох рам. Перша рама дозволяє пристрою обертатися навколо осі нахилу γ (крену), друга рама дозволяє йому обертатися навколо осі нахилу θ (тангажу), а третя рама, по суті, є платформою для системи позиціонування та дозволяє їй обертатися навколо осі нахилу ψ (нишпорення). Усі три рами можуть обертатися на 360° .

Кожна рама складається з алюмінієвого профілю, з'єднаного гвинтами через розпірки. Кожна

рама шарнірно з'єднана з наступною, щоб забезпечити обертання навколо осі. Для зменшення тертя у з'єднаннях використовують сферичні роликові підшипники. Вибір алюмінієвого сплаву для конструкції підвісу обумовлений забезпеченням легкості та довговічності.

Випробувальний стенд оснащений приводами крокових двигунів для автоматичної орієнтації рамок карданного підвісу.

У процесі проектування кардана бажано проаналізувати напружено-деформований стан під дією навантажень від квадрокоптера. Цей аналіз напружки-деформації було виконано за допомогою програмного забезпечення SolidWorks. Стенд, що розробляється, буде використовуватися для квадрокоптерів вагою до 5 кг. У процесі розрахунку напружено-деформованого стану критичну масу навантаження вибирають із запасом у 1,5 рази більшим від початкової маси.

2.2. Платформа системи позиціонування

Платформа системи позиціонування розташована на першій рамі кардана і використовується для кріплення квадрокоптера. Платформа системи позиціонування включає систему стабілізації, силовий модуль і радіолінію передачі даних.

2.2.1. Система балансування

Система балансування стабілізує платформу системи позиціонування, зменшуючи дисбаланс або відстань між центром маси платформи та центром обертання підвісу до такого значення, коли результуючий обертальний момент сили тяжіння не впливає на положення платформи.

Система стабілізації реалізована як набір вантажів різної маси, які можна механічно переміщувати, розміщених у різних місцях на платформі системи позиціонування. Балансування є повторюваним процесом зі зворотним зв'язком і гарантує, що центр ваги вирівнюється з центром обертання, поки амплітуда коливань навколо центру обертання не зменшиться.

Дисбаланс системи можна визначити як величину асиметрично розподіленої маси, виражену в грамах на міліметр або кілограмах на метр, або як відхилення центру маси платформи від центру обертання системи, виражене в міліметрах. Для вимірювання дисбалансу використовують набір акселерометрів і гіродатчиків, зазвичай встановлених на корпусі платформи системи позиціонування.

З усіх наявних на ринку акселерометрів, MEMS акселерометри найкраще підходять для використання у складі системи стабілізації завдяки високій чутливості та точності вимірювання параметрів низькочастотної вібрації та руху об'єктів [20].

2.2.2. Модуль живлення

Усі пристрої на платформі системи позиціонування, включаючи квадрокоптер, живляться від розподільника електроенергії потужністю не нижче сумарного споживання електроенергії всіх компонентів платформи системи позиціонування (крокових двигунів системи позиціонування (12 В), логічних пристроїв бортової системи керування (5 В) і пристроїв бездротової передачі даних (5 В)), та необхідних рівнів вхідної напруги квадрокоптерів (зазвичай 11,5 В, 14,8 В або 22,2 В).

2.2.3. Бездротовий канал передачі даних

Бездротові канали будуть реалізовані за допомогою радіочастотних приймачів, що працюють на частоті 2,4 ГГц і забезпечують швидкість передачі даних до 3 Mbps. Такі пристрої в протоколі Bluetooth представлені приймачами серії Bluetooth 5.0 BLE.

2.3. Незалежна вимірювальна система

Незалежна вимірювальна система – це група високоточних пристроїв, поєднаних із програмним забезпеченням, яке обробляє вихідні сигнали для автономного визначення поточних параметрів орієнтації квадрокоптера під час тестування.

Більшість розробників випробувальних стендів не мають незалежної системи вимірювань і покладаються на результати вимірювань, отримані з самого квадрокоптера. Одним з можливих варіантів створення незалежної вимірювальної системи є використання оптичних датчиків або цифрових камер. В даний час існують способи відновлення орієнтації об'єкта за зображеннями однієї або кількох камер [21, 22]. Для цього на досліджуваному приладі наносять спеціальні світлові позначки у вигляді опорних точок або ліній (рисунок 3). При використанні $n \geq 3$ опорних точок, які не знаходяться на одній лінії, алгоритм P_nP може успішно використовуватися для визначення орієнтації об'єктів на зображенні [23, 24]. Алгоритм, наведений у [25, 26], використовується для визначення орієнтації об'єктів на основі лінійних міток.

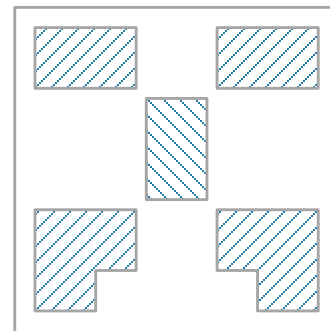


Рис. 3. Мітка системи незалежних вимірювань

Загалом, алгоритм визначення орієнтації складається з наступних кроків:

- а) бінаризація та фільтрація зображення;
- б) вибір орієнтира на зображенні та визначення координат його центру в системі координат детектора камери (для точкових орієнтирів) або параметрів лінії (для лінійних орієнтирів);
- в) визначення орієнтації об'єкта за співвідношенням координат знака в системі координат камери і системі координат досліджуваного приладу.

Слід зазначити, що камеру необхідно відкалібрувати перед аналізом зображень.

Що стосується побудови незалежної вимірювальної системи, то в цій роботі було віддано перевагу використанню оптичних датчиків на основі прецизійних екодерів, розташованих взаємно перпендикулярно до трьох осей карданного підвісу спільно з інерційним вимірювальним блоком (IMU), який поєднує 3-осьовий гіроскоп і 3-осьовий акселерометр, а також 3-осьовий магнітометр.

2.4. Бортова система керування

Бортова система керування – це логічний пристрій, що керує роботою системи автоматичного керування орієнтацією рами карданного підвісу, виконавчими механізмами якого є крокові двигуни, керування трактом передачі радіоінформації та модулем живлення.

Обчислювальних ресурсів логічних пристроїв бортової системи управління повинно бути достатньо для прийому, обробки та передачі даних, а також для роботи програмного забезпечення автоматичного орієнтування. Цим вимогам відповідає мікроконтролер Atmega2560 (8-розрядний високопродуктивний мікроконтролер AVR з низьким енергоспоживанням), частотою 16 МГц і 256 КБ енергонезалежної пам'яті.

Взаємозв'язок між апаратними та програмними компонентами для тестування квадрокоптерів показано на рисунку 4.

2.5. Керуючий комп'ютер

Керуючий комп'ютер забезпечує зв'язок із квадрокоптером і дозволяє, серед іншого, задавати команди для активації системи орієнтації в різних режимах роботи, задавати різні режими роботи гвинтокрилого комплексу, а також приймати й обробляти дані від датчиків квадрокоптера. Комп'ютер керування використовується для збору та обробки даних незалежної вимірювальної системи та визначення фактичного положення квадрокоптера, що тестується. Потім керуючий комп'ютер оцінює його кутове положення, порівнюючи розрахований напрямок, надісланий квадрокоптером, із фактичним напрямком. Апаратно-програмний комплекс та

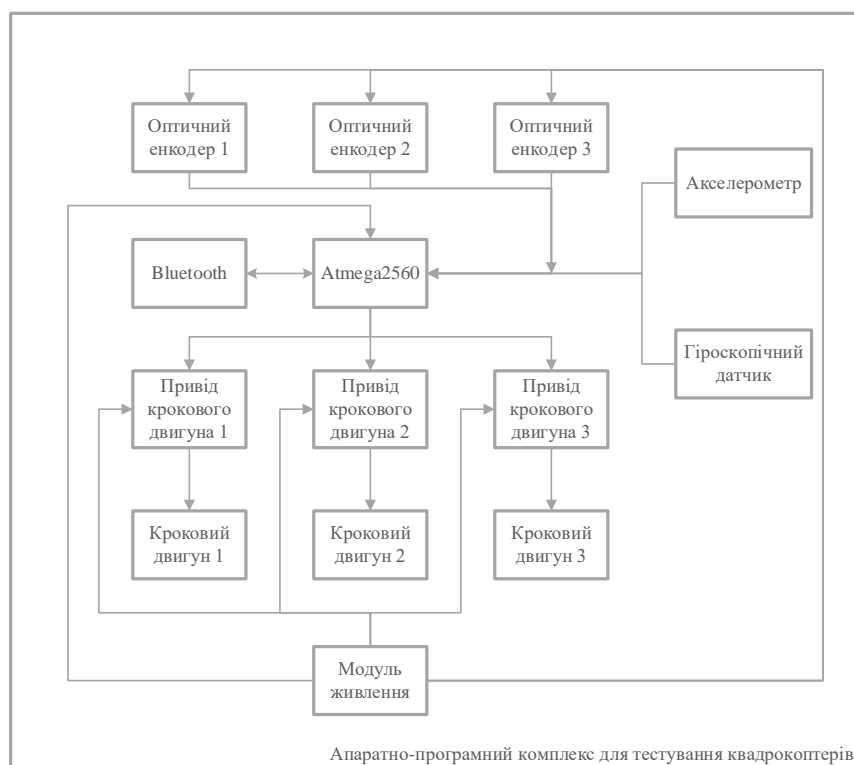


Рис. 4. Компоненти апаратно-програмного комплексу для тестування квадрокоптерів

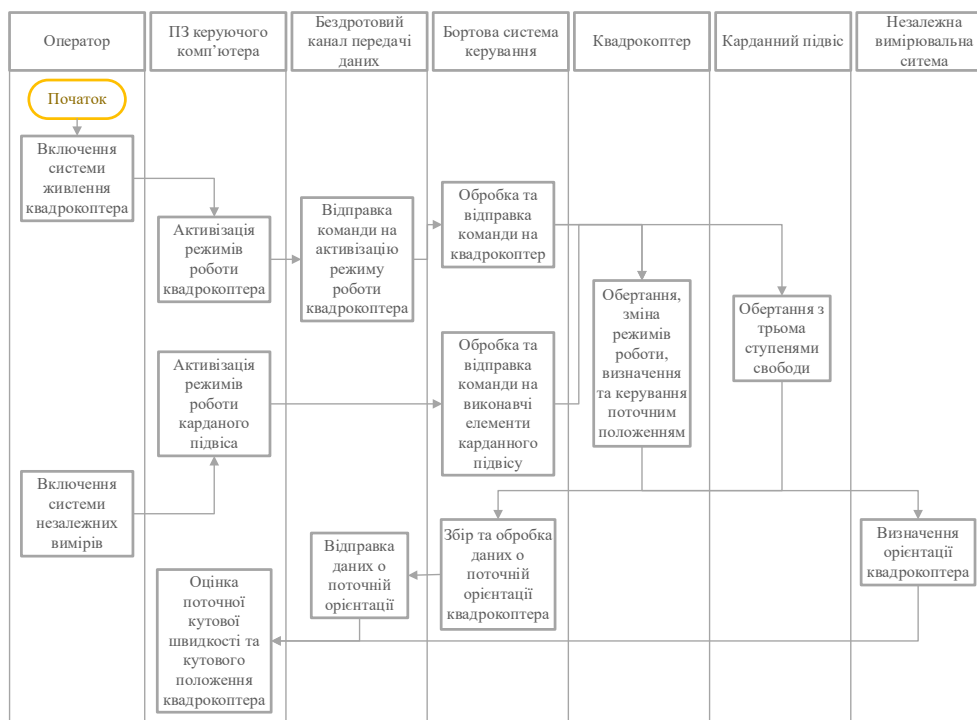


Рис. 5. Алгоритм роботи апаратно-програмного комплексу та керуючого комп'ютера для випробувань квадрокоптерів

алгоритм роботи керуючого комп'ютера наведено на рисунку 5.

Висновки. У статті розглянуто питання початкової стадії проектування апаратно-програмного комплексу для тестування квадрокоптерів у Національному аерокосмічному університеті імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

У подальшому, основні дослідження у проекті будуть пов'язані з розробленням нових методик та алгоритмів тестування квадрокоптерів, методик самодіагностики та інших технічних засобів.

В результаті впровадження апаратно-програмного комплексу переваги перед наявними аналогами виглядатимуть наступним чином:

а) в сфері розроблення нових алгоритмів калібрування (на відміну від аналога [27]) будуть використані методи штучного інтелекту для автоматизації та оптимізації калібрування, що дозволить покращити точність та ефективність цього процесу;

б) у частині розроблення систем автоматизованого тестування, запропонована система буде використовувати технології машинного навчання та аналізу даних для автоматичного виконання різних тестів та генерації детальних звітів про результати, що дозволить суттєво покращити швидкість та точність тестування;

в) у частині розроблення методики самодіагностики (на відміну від аналога [28], де існуюча система має обмежені можливості самодіагностики та непрозорі методи виявлення проблем) нові методики будуть базуватись на методах аналізу даних, що дозволить виявляти та виправляти проблеми у реальному часі і забезпечить підвищену надійність та безпеку роботи квадрокоптерів.

В комплексі, запропонований апаратно-програмний комплекс забезпечить ефективне тестування бойових квадрокоптерів з метою підвищення надійності та ефективності експлуатації останніх.

Список літератури:

1. Wang, B.; Liu, D.; Wang, W.; Peng, X. A hybrid approach for UAV flight data estimation and prediction based on flight mode recognition. *Microelectron. Reliab.* 2018, 84, 253–262.
2. Avram, R.C.; Zhang, X.; Campbell, J.; Muse, J. IMU sensor fault diagnosis and estimation for quadrotor UAVs. *IFAC-PapersOnLine* 2015, 48, 380–385.
3. Khalastchi, E.; Kalech, M.; Kaminka, G.A.; Lin, R. Online data-driven anomaly detection in autonomous robots. *Knowl. Inf. Syst.* 2015, 43, 657–688.

4. Suarez, A.; Heredia, G.; Ollero, A. Cooperative Virtual Sensor for Fault Detection and Identification in Multi-UAV Applications. *J. Sens.* 2018, 2018, 4515828.
5. Wang, L.; Li, M.; Liu, L.; Liu, D. Exhaust gas temperature sensing data anomaly detection for aircraft auxiliary power unit condition monitoring. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*, Xi'an, China, 15–17 August 2018.
6. Gao, Z.; Cecati, C.; Ding, S.X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques Part I: Fault diagnosis. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 3768–3774.
7. Ortiz-Torres, G.; López-Estrada, F.R.; Reyes-Reyes, J.; García-Beltrán, C.D.; Theilliol, D. An Actuator Fault Detection and Isolation method design for Planar Vertical Take-off and Landing Unmanned Aerial Vehicle modelled as a qLPV system. *IFAC-PapersOnLine* 2016, 49, 272–277.
8. Abbaspour, A.; Aboutalebi, P.; Yen, K.K.; Sargolzaei, A. Neural adaptive observer-based sensor and actuator fault detection in nonlinear systems: Application in UAV. *ISA Trans.* 2017, 67, 317–329.
9. López-Estrada, F.R.; Ponsart, J.C.; Theilliol, D.; Zhang, Y.; Astorga-Zaragoza, C.M. LPV Model-Based Tracking Control and Robust Sensor Fault Diagnosis for a Quadrotor UAV. *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.* 2016, 84, 163–177.
10. Liu, D.; Yin, X.; Song, Y.; Liu, W.; Peng, Y. An on-line state of health estimation of lithium-ion battery using unscented particle filter. *IEEE Access* 2018, 6, 40990–41001.
11. Zhang, Y.; Liu, L.; Peng, Y.; Liu, D. An Electro-Mechanical Actuator motor voltage estimation method with a feature-aided Kalman Filter. *Sensors* 2018, 18, 4190.
12. Liu, D.; Song, Y.; Li, L.; Liao, H.; Peng, Y. On-line life cycle health assessment for lithium-ion battery in electric vehicles. *J. Clean. Prod.* 2018, 199, 1050–1065.
13. Liu, L.; Wang, S.; Liu, D.; Peng, Y. Quantitative selection of sensor data based on improved permutation entropy for system remaining useful life prediction. *Microelectron. Reliab.* 2017, 75, 264–270.
14. Zhao, G.; Liu, X.; Zhang, B.; Liu, Y.; Niu, G.; Hu, C. A novel approach for analog circuit fault diagnosis based on deep belief network. *Measurement* 2018, 121, 170–178.
15. Zhao, R.; Wang, D.; Yan, R.; Mao, K.; Shen, F.; Wang, J. Machine Health Monitoring Using Local Feature-Based Gated Recurrent Unit Networks. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2018, 65, 1539–1548.
16. Veyna, U.; Garcia-Nieto, S.; Simarro, R.; Salcedo, J.V. Quadcopters Testing Platform for Educational Environments. *Sensors* 2021, 21, 4134. <https://doi.org/10.3390/s21124134> (дата звернення: 12 червня 2024 року)
17. Schwartz J.L. The distributed spacecraft attitude control system simulator : PhD Thesis – Virginia Polytechnic Institute and State University , 2004. 134 p.
18. Mukras, S.M.S.; Omar, H.M. Development of a 6-DOF Testing Platform for Multirotor Flying Vehicles with Suspended Loads. *Aerospace* 2021, 8, 355. <https://doi.org/10.3390/aerospace8110355> (дата звернення: 7 лютого 2024 року)
19. Bhargava A. Development of a quadrotor testbed for control and sensor development : Master Thesis – Clemson University , 12-2008. 522 p.
20. Чернев О. Л. Сенсорі вібрації та улогового положення: практичний підручник/ Чернев О. Л., Грищенко В. А. – К.: Техніка, 2010. 213с.
21. Hartley R. Multiple View geometry in computer vision . – Cambridge : Cambridge University Press, 2003. 656 p.
22. Paragios N, Chen Y. Handbook of Mathematical Models in Computer Vision – NY: Springer Science + Business Media, 2006. 606 p.
23. Quan L, Lan Z. Linear N-point Camera Pose Determination // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1999, Vol. 21(8), pp. 774-780.
24. Chou S., Gao X. Complete solution classification for the perspective-three-point problem // *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2003. Vol. 25(8). P. 930-43.
25. Lijuan Qin, Dongzhi Cao, Yulan Hu, Yingzi Wei, Yue Zhou and H. Wang, Algorithm for attitude determination from three door-like lines, 2008 International Conference on Information and Automation, Changsha, China, 2008, pp. 1359-1363, doi: 10.1109/ICINFA.2008.4608213
26. J. S. .-C. Yuan, "A general photogrammetric method for determining object position and orientation," in *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 5, no. 2, pp. 129-142, April 1989, doi: 10.1109/70.88034
27. M. Jovanović and D. Lazić, Sensor Calibration via Wireless Sensor Networks One Possible Approach, 2024 23rd International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/INFOTEH60418.2024.10495985
28. V. Sadhu, K. Anjum and D. Pompili, On-Board Deep-Learning-Based Unmanned Aerial Vehicle Fault Cause Detection and Classification via FPGAs, in *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 39, no. 4, pp. 3319-3331, Aug. 2023, doi: 10.1109/TRO.2023.3269380.

Zabolotnyi O.V., Siroklyn V.P., Nikulin S.S. DEVELOPMENT OF A HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR COMBAT QUADCOPTERS TESTING: IMPROVING RELIABILITY AND EFFICIENCY IN MODERN MILITARY TECHNOLOGY

The reliability of quadcopters in modern combat conditions is critically important. To ensure a high level of reliability, it is necessary to thoroughly test the control algorithms and quadcopter systems on the ground. This work is dedicated to creating a ground-based test complex for quadcopter systems. The developed complex is based on a gimbal that allows simulating three-dimensional movements of the quadcopter during testing. The complex includes a quadcopter positioning system platform, an independent orientation parameter measurement system, actuators for setting spatial positions, and a control computer that ensures the operation of the complex and performs accurate assessment of the quadcopter's movements based on data obtained from the orientation and measurement systems. The article presents the results of the initial development stage of all components of this complex, including the design and testing of the main modules, as well as the integration of various systems to ensure synchronized operation. The control computer uses specialized software to analyze sensor data and provides feedback for correcting the quadcopter's movements. The complex allows simulating various flight scenarios and evaluating the quadcopter systems' response to these conditions. This approach can significantly improve the reliability and efficiency of quadcopters in real combat conditions. The paper describes aspects of creating and setting up the test complex. This includes the selection of components, the design and manufacturing of the positioning platform, the development of software for the control computer, the integration of measurement and orientation systems, and the testing of the complex under various conditions. The complex is being developed with scalability and adaptability for different types of quadcopters and test scenarios in mind. Special attention is paid to ensuring high measurement accuracy and reproducibility of test results. This allows comprehensive testing of the quadcopter's control and navigation systems, evaluating its response to various types of loads and impacts that simulate real operating conditions. An important aspect is the ability to automate data collection and analysis, which significantly increases the efficiency of the testing process and allows quick identification and correction of deficiencies in the quadcopter's performance.

Key words: hardware-software complex, testing, positioning system, quadcopter, design, operational reliability, ground testing, gimbal, movement assessment, flight scenario simulation.