

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри


(підпис)

І. С. Білюк

« 15 » 06 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня бакалавра

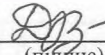
зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

освітня програма Електротехніка та електротехнології
(назва освітньої програми)

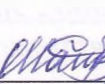
на тему: Дослідження системи керування рухом квадрокоптера

Виконав: студент IV курсу, групи 4311

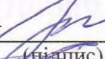
Васильченко Дмитро Віталійович
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

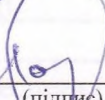
Керівник доц. каф. автоматики, к.е.н., доц.
Майборода О. В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

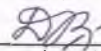
Нормоконтроль ст. викладач Савченко О. В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Рецензент доц. каф. СЕЕС, к.т.н.,
доц. Новогрецький С. М.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)


(підпис)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент 
(підпис)

м. Миколаїв— 2026 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра автоматики

Освітній ступінь бакалавр

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

(код і назва)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

Освітня програма «Електротехніка та електротехнології»

(назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми,

к.т.н., доцент

(підпис)

О. Г. Васильєв

86

02

2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра студенту

Васильченко Дмитру Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження системи керування рухом квадрокоптера

керівник роботи Майборода О. В., к.е.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти 286-47 від 22.04.26

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи технічні характеристики квадрокоптера DJI Mavic 3, технічні характеристики безколекторного двигуна DJI Mavic Pro Drone 2008; внутрішній контур регулювання швидкості, зовнішній контур за положенням; контроль тангажу.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 4.1. Огляд літератури за темою дослідження

4.2. Аналіз і узагальнення результатів дослідження 4.3. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

5.1. Загальний вигляд квадрокоптера 5.2. Блок-діаграма квадрокоптера

5.3. Модель системи керування швидкістю

5.4. Модель системи керування положенням

5.4. Дослідження динаміки

6. Консультанти розділів роботи

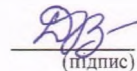
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Майборода О. В., доцент кафедри автоматики		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Обґрунтування актуальності проблеми, що розглядатиметься; визначення основної мети та завдань кваліфікаційної роботи. Вимоги до оформлення пояснювальної записки та графічної частини.		
2	Короткий огляд літератури за темою дослідження. Опис об'єкта керування.		
3	Побудова функціональної схеми системи керування. Розрахунок та вибір її елементів.		
4	Математичний опис системи керування. Налаштування контурів регулювання.		
5	Дослідження динаміки системи керування в MATLAB.		
6	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини. Підготування доповіді.		

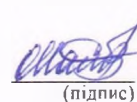
Студент


(підпис)

Васильченко Д. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник
роботи


(підпис)

Майборода О. В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 65 с., 20 рис., 9 табл., 1 дод., 14 джерел.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, квадрокоптер, моделювання, перехідна характеристика, система керування рухом.

Об'єкт дослідження – перехідні процеси в системі керування рухом квадрокоптера.

Мета роботи – синтез та аналіз системи керування рухом квадрокоптера.

Методи дослідження – графічний метод, методи аналізу та синтезу, порівняння, імітаційне моделювання, обробка та аналіз отриманих результатів.

У першому розділі проведено критичний аналіз підходів до класифікації безпілотних літальних апаратів з позицій концептуальних підходів: повноти поділу, наявності єдиної підстави, виключності, та послідовності. Розкрито рівні та складові системи керування безпілотного літального апарату. У другому розділі побудовано функціональну схему системи керування руху квадрокоптера та обґрунтовано вибір її елементів. Побудовано модель системи керування електропривода квадрокоптера та виконано розрахунок параметрів її елементів. Проведено моделювання системи керування рухом в Scilab та досліджено вплив параметрів регуляторів на якість керування. В розділі 3 розглянуті питання з охорони праці. Додаток містить слайди мультимедійної презентації.

ABSTRACT

Qualification thesis: 65 pages, 3 chapters, 20 figures, 9 tables., 1 appendix, 14 references.

Keywords: modeling, motion control system, quadcopter, transient response, unmanned aerial vehicle.

Object of research – transient processes in the quadcopter motion control system.

Purpose of work – synthesis and analysis of the quadcopter motion control system.

Research methods – graphical method, methods of analysis and synthesis, comparison, simulation modeling, processing and analysis of the obtained results.

Chapter 1 provides a critical analysis of approaches to the classification of unmanned aerial vehicles from the perspective of conceptual approaches: completeness of division, presence of a single basis, exclusivity, and consistency. The levels and components of the unmanned aerial vehicle control system are revealed.

In the Chapter 2, a functional diagram of the quadcopter motion control system is constructed and the choice of its elements is justified. A model of the quadcopter electric drive control system is developed, and the parameters of its elements are calculated. The simulation of the motion control system is performed in Scilab, and the influence of regulator parameters on the control quality is investigated.

Chapter 3 addresses occupational health and safety issues.

The Appendix contains slides of the multimedia presentation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ	7
1.1 Класифікація безпілотних літальних апаратів	7
1.2 Двигуни безпілотних літальних апаратів	12
1.3 Система керування безпілотними літальними апаратами	20
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	25
2.1 Загальна характеристика об'єкта керування	25
2.2 Побудова функціональної та математичної моделі керування рухом квадрокоптера	29
2.3 Дослідження динаміки системи керування рухом квадрокоптера	43
РОЗДІЛ 3 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	48
3.1 Нормативно-правове регулювання та відповідальність за порушення правил використання повітряного простору БПЛА	48
3.2 Вимоги щодо забезпечення безпеки роботи безпілотних літальних апаратів у повітряному просторі	57
3.3 Вимоги з охорони праці та техніки безпеки при роботі з безпілотними літальними апаратами	61
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66
ДОДАТОК А. Мультимедійна презентація.....	68

ВСТУП

Актуальність теми. Безпілотні авіаційні системи набувають всебічного використання як у цивільних, так і у воєнних цілях. Особливої актуальності розробка сучасних безпілотних літальних апаратів в Україні набуває в умовах російської агресії. Ефективність використання відповідно до заданих цілей та економічність виготовлення безпілотних літальних апаратів є важливими завданнями сьогодення. Застосування і удосконалення електроприводів в безпілотних авіаційних системах покликані забезпечити виконання поставлених цілей щодо ефективності та економічності. Адже від технічних характеристик електроприводів залежать техніко-технологічні можливості безпілотних літальних апаратів. Крім цього, слід зазначити, що сучасні електроприводи з якісно новими показниками керування суттєво впливають на їх ціноутворення.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є синтез та аналіз системи керування рухом квадрокоптера. Щоб досягти поставленої мети, слід виконати наступні завдання:

- 1) розглянути класифікацію безпілотних авіаційних систем відповідно до екзистенціальних завдань. Висвітлити види двигунів, які застосовуються в безпілотних літальних апаратах. Описати рівні системи керування квадрокоптера;
- 2) побудувати функціональну схему та імітаційну модель системи керування рухом квадрокоптера, виконати розрахунок параметрів її елементів;
- 3) виконати моделювання системи керування рухом квадрокоптера в Scilab та дослідити вплив параметрів регуляторів на якість керування.

Об'єктом дослідження є перехідні процеси в системі керування рухом квадрокоптера. Предмет роботи – структура та параметри регуляторів системи керування рухом квадрокоптера.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Класифікація безпілотних літальних апаратів

Класифікація – це термін логіки, який означає поділ певної сукупності об'єктів на окремі складові частини за чітко визначеними ознаками, які повинні бути суттєвими для всіх об'єктів, які виділяються за цією ознакою. Зважаючи на те, що класифікація є видом поділу понять, то при її здійсненні необхідно дотримуватися певних правил: повноти поділу, наявності єдиної підстави, виключності, та послідовності.

Сутність повноти поділу полягає в тому, що сукупність членів поділу повинна дорівнювати обсягу поняття, що дозволяє уникнути занадто вузького, або широкого поділу. Виділені одиниці сукупності мають дорівнювати загальному обсягу сукупності.

Виключність передбачає, що окремі члени поділу повинні виключати одне одного. Не можуть окремі одиниці сукупності відноситись до різних ознак поділу.

Послідовність поділу впливає з попереднього правила, та полягає у неможливості включення до класифікації за певною підставою окремих членів різного порядку.

Відповідно до Повітряного кодексу України безпілотне повітряне судно – будь-яке повітряне судно, що експлуатується або розроблене для експлуатації автономно чи яке пілотується дистанційно без пілота на борту.

Правила використання повітряного простору України надають наступне визначення: безпілотне повітряне судно призначене для виконання польоту без пілота на борту, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються за допомогою спеціальної станції керування, що розташована поза повітряним судном.

Розрізняють такі типи БПЛА, що відрізняються конструкцією та принципом роботи, зльоту/посадки та призначення: безпілотні літальні апарати літакового типу; мультироторні безпілотні літальні апарати; безпілотні літальні апарати аеростатичного типу; безпілотні конвертоплани та гібридні моделі.

Апарати літакового типу відомі як БПЛА з жорстким крилом (англ. fixed-wing UAV). Підйомна сила у них створюється аеродинамічний спосіб за рахунок напору повітря, що набігає на нерухоме крило. Повітряні судна такого типу, як правило, відрізняються великою тривалістю польоту, великою максимальною висотою польоту та високою швидкістю.

До мультироторних безпілотних літальних апаратів належать мультикоптери. Їх особливістю є те, що вони мають більше двох несучих гвинтів. Реактивні моменти врівноважуються за рахунок обертання гвинтів, що несуть, попарно в різні сторони або нахилу вектора тяги кожного гвинта в потрібному напрямку.

В залежності від кількості роторів мультикоптера розрізняють: трикоптери (оснащені трьома моторами); квадрокоптери (оснащені чотирма моторами); гексокоптери (оснащені шістьма моторами); октокоптери (оснащені вісьмома моторами).

Найбільш розповсюдженим видом мультироторних БПЛА є квадрокоптер. За зовнішніми параметрами його корпус зазвичай має хрестоподібний вигляд, а ротори, якими він оснащений, як правило, розташовані на його кінцях. Для спрямування руху та польоту квадрокоптера передбачений механізм, який змушує першу пару пропелерів обертатися в одному напрямку, а іншу в протилежному. Таким чином, змінюючи відносну швидкість діаметрально розташованих один від одного гвинтів, досягається керування польотом та рухом планера.

За призначенням виділяють: безпілотні автоматичні літальні апарати, дистанційно пілотовані літальні апарати, дистанційно керовані літальні апарати.

За масштабами застосування: стратегічні, тактичні, оперативні. Слід зазначити, що чіткого розмежування віднесення БПЛА до тієї чи іншої групи автори не наводять.

За приналежністю: сухопутні війська, ВПС, ВМС, МВС, прикордонні війська. Така класифікація не відповідає вимогам до повноти поділу загальної сукупності об'єктів, адже БПЛА можуть використовувати і в інших видах військ – інженерні, ракетні і т.д. До того ж МВС відноситься до правоохоронних органів як і державне бюро розслідувань, служба безпеки України та ін.

За можливістю повторного застосування: одноразові та багаторазові.

За способом керування: керування оператором по каналах керування; керування автоматично; комбінована система керування. Вважаємо що більш правильним буде поділ безпілотних літальних апаратів на: БПЛА з автоматизованим керуванням та БПЛА з автоматичним керуванням. Автоматизоване керування передбачає що частину функцій з керування БПЛА виконує людина, а іншу частину – автоматичні пристрої апарату. При автоматичному керуванні всі функції керування після запуску виконуються БПЛА в автоматичні режимі, без участі людини. Комбінована система керування БПЛА відноситься до автоматизованого режиму керування польотом.

За способом старту: катапультного типу; що запускаються з руки; запускаються із злітної смуги.

За способом посадки: літаковим способом що спускаються на парашуті; уловлювані різними пристосуваннями.

За часом отримання зібраної інформації: в масштабі реального часу; періодично в ході сеансів зв'язку; після посадки.

По вигляду базування пускової установки: наземні; повітряні; морські.

По висоті застосування: надмалі висоти; малі висоти; середні висоти; висотні.

По дальності дії: надмалої дальності; малої дальності; середньої дальності; великої дальності.

За тривалістю польоту: малої; середньої; великої.

В іноземних джерелах пропонують класифікувати безпілотні літальні апарати за такими ознаками: вага; дальності та тривалості польоту; максимальна висота польоту; вантажопідйомності; тип двигуна та потужність.

За вагою розрізняють БПЛА поділяють на 4 групи (див. таблицю 1.1).

Таблиця 1.1 – Класифікація безпілотних літальних апаратів за вагою

Клас	Вага	Представники
Надважкі	Понад 2000 кг	X-45, Darkstar, Predator B і Global Hawk
Важкі	Від 200 до 2000 кг	Outrider, Seeker, Shadow 600, Sperwer, LEWK, GNAT, Snow Goose, Hunter X-50, A 160, Predator, Herron Fire Scout
Середні	Від 50 до 200 кг	Raven, Dragon, Warrior, Crecerelle, Pioneer, Cypher, Shadow, Brevel, Phoenix
Легкі	Від 5 до 50 кг	Finder Neptune Luna Dragon Drone RPO Midge
Мікро	До 5 кг	Dragon Eye, FPASS, Pointer і SilentEyes

Іншою ознакою класифікації БПЛА є тривалість та дальність польоту (див. таблицю 1.2). Ці два параметри зазвичай взаємопов'язані оскільки, чим довше літальний апарат знаходиться у повітрі, тим більший радіус його корисної дії. Важливо враховувати дальність і тривалість польоту, оскільки це дозволяє користувачу БПЛА визначити необхідний тип залежно від особливостей завдання, відстані від місця запуску до місця виконання завдання, необхідності заміни джерела живлення, дозаправки тощо.

Максимальна робоча висота є ще однією характеристикою за якою класифікують повітряні судна. Така ознака є надзвичайно корисною для військових цілей. Для БПЛА у військових ситуаціях є важливою низька видимість для уникнення виявлення та знищення ворогом. Також висота є важливою вимогою для аерозйомки та розвідки, для збільшення охоплення максимальної площі місцевості.

Іншим корисним способом класифікації БПЛА є навантаження на крило. Для розрахунку навантаження на крило БПЛА, загальну вагу БПЛА необхідно поділити на площу крила.

Таблиця 1.2 – Класифікація безпілотних літальних апаратів залежно від дальності та тривалості польоту

Клас	Радіус дії	Час знаходження у повітрі	Представники
Великої	Більше 1500 км	Більше 24 год.	Global Hawk, GNAT, Herron
Середньої	100-400 км	5-24 год.	Fire Scout, Crecerelle, LEWK, Silver Fox, Finder, Darkstar, Seeker, Shadow 600, Hunter, Predator, Predator B, A160
Малої	До 100 км	До 5 год.	Pointer, Javelin, Dragon Eye, FPASS (Desert Hawk), Dragon Warrior, Pointer, Dragon Drone, Outrider, X-45, Cypher, Neptune, Phoenix, RPO, Midget, X-50, Raven Luna, Breve

Таблиця 1.3 – Класифікація безпілотних літальних апаратів залежно від висоти польоту

Клас	Максимальна висота, м	Представники
Низька висота	< 1000	FPASS, Pointer, Dragon Eye
Середня висота	1000 – 10000	Neptune, Phoenix, Dragon, Doner, X 50, Cercerelle, Silver Fox, Bever, Luna, Raven, Shadow, Outrider, Finder, Pioneer, LEWK, Seeker, Shadow 600, Sperwer, Dragon Warrior, Snow Goose, Fire Scout, Hunter, SilentEyes, Predator, GNAT, A160 Heron
Велика висота	> 10000	X-45, Predator, Darkstar, Global Hawk

Таблиця 1.4 – Класифікація за ознакою навантаження на крило

Клас	Навантаження на крило, кг/м ²	Представники
Низьке	< 50	Dragon Eye, Pointer, Crecerelle, A160, FPASS (Desert Hawk), Dragon Drone, Finder Seeker RPO Midget Phoenix Silver Fox Pioneer Lun
Середнє	50-100	Raven, Dragon Warrior, Fire Scout, Herron, Outrider, Darkstar, Neptune, GNAT, Shadow, X-45, Predator B, Shadow 600, Predator, Silent Eyes
Високе	> 100	LEWK, Sperwer, Hunter, Global Hawk, X-50

1.2 Двигуни безпілотних літальних апаратів

Різноманітність завдань, які ставляться щодо використання БПЛА, обумовлює застосування різних видів двигунів. В практичній діяльності при проектуванні БПЛА застосовують двотактні, турбовентиляторні, турбогвинтові, поршневі, електричні та пропелерні типи двигунів. Двигуни внутрішнього згоряння та електричні двигуни є найбільш використовуваними видами двигунів в БПЛА.

Розмір і тип двигуна, який використовується, залежить від розміру і ваги безпілотного літального апарату. Електричні двигуни зазвичай використовуються в легких і малих моделях, поршневі двигуни використовуються у важких і великих моделях (див. таблицю 1.5).

Таблиця 1.5 – Види двигунів, які використовуються в окремих безпілотних літальних апаратах

Роторно-поршневий	Турбо-вентиляторний	Турбо-гвинтовий	Поршневий	Електричний
RQ-7A	Darkstar	Predator B	Neptune	Dragon Eye
Sikorsky	Global Hawk		Heron	Dragon
Cypher	Phoenix		Drone	Warrior
Shadow 200	X – 45		Finder	Pointer
	X – 50		A 160	Raven
	Fire Scout		GNAT	Luna
			Crecedelle	Javelin
			Seeker	
			Brevel	
			Snow Goose	
			Silver Fox	

БПЛА схожий за конструкцією на звичайний літак, тому система приводу може бути аналогічною. Багато безпілотних літальних апаратів зможуть літати на дозвукових і надзвукових швидкостях на висотах нижче 18000 метрів, маневрувати на швидкості з перевантаженням 9 g або менше. Дійсно, кожен новий літак розроблено з використанням існуючих двигунів, щоб уникнути часу та витрат на розробку нових двигунів. Кілька класів безпілотних літальних апаратів вимагають нових інноваційних двигунів. Для прикладу, для тактичного безпілотного літального апарату (TUAV) може знадобитися газотурбінний двигун, який може працювати з потужністю набагато більше, ніж 9g, що обмежує спостереження за такими літальними транспортними засобами.

Двигун, здатний маневрувати при навантаженнях 30g, наприклад, вимагав би розробки новітніх невикористаних концепцій двигунів, які могли б вимагати суттєвих змін у конструкції літальних апаратів, але не відповідали б сучасним запитам цивільної та військової авіації.

Газотурбінні двигуни впевнено переважають над іншими типами двигунів в усіх аспектах. Такий високий рівень виконання відображає переваги конструкторської концепції закладеної при їх розробці, та значні вкладення у дослідження та вдосконалення газових турбін. Співвідношення потужності до маси газових турбін у три-шість разів перевищує поршневі двигуни літаків. Контраст у незмінній якості справді помітний.

Вібрація та шум, численні рухомі частини, вимоги до ущільнення та мастила, необхідність охолодження є деякими недоліками поршневих двигунів (таблиця 1.7).

Можливо легка вага, можливо невеликі розміри, підтримка примусової індукції для використання на великій висоті є деякими перевагами таких двигунів.

Таблиця 1.6 – Концептуальна характеристика двигуна внутрішнього згоряння

Система привода	Одиниця	Опис
Двигун внутрішнього згоряння	Джерело енергії	Нафтові дистиляти
	Трансформатор енергії	Виробництво тепла та розширення об'ємів у результаті згоряння нафтових дистилятів
	Силовa установка	Рух поршня в результаті розширення обсягів, які, у свою чергу, обертають колінчастий вал
	Руховa установка	Пропелерний або вентиляторний блок, що приводиться в дію прямо або опосередковано (приводиться в дію) колінчастим валом
	Управляюча установка	Дросельна заслінка, регулювання подачі палива

Таблиця 1.7 – Технічні проблеми двигуна внутрішнього згорання

Технічні проблеми	По відношенню до безпілотних авіаційних систем
Слабкість колінчастого валу	Для двигунів, досить великих для пілотованих систем, це значною мірою описано в комп'ютеризованій системі виявлення несправностей. Проблема тут у двигунах меншого розміру.
Шум двигуна	Заважає зв'язку в польоті, впливає на можливість виявлення безпілотних літальних апаратів. У невеликих БПЛА ці проблеми можуть бути несуттєвими.
Вібрація	Може вплинути на довгострокову надійність.
Ущільнювачі	З часом ущільнювачі можуть вийти з ладу, що призведе до втрати потужності та/або потенційно критичного стану
Висока температура	Двигун може вийти з ладу або заклинити, якщо тепло не відводиться від двигуна досить швидко.

Газотурбінні двигуни – це двигуни внутрішнього згорання. Принцип дії яких полягає в тому, що в камеру згорання потрапляє пальне та подається під тиском повітря (за допомогою компресора). Після згорання газу, розширюючись, тиснуть на лопатки тягової турбіни, пов'язаної з первинним валом коробки передач. Попутно газу розкручують і турбіну компресора, тож окремий привід їй також не потрібен. Та взагалі багато чого не потрібно: ані кривошипно-шатунного механізму, ані ГРМ, ані систем змащення та навіть охолодження. Загальне число деталей газотурбінних двигунів приблизно в 5 разів менше, ніж у поршневого двигуна, через це вони в кілька разів компактніші та легші за стандартні ДВЗ. А ще газотурбінні мотори нерозбірливі до якості й типу пального, при цьому вони мають набагато більшу за поршневі (та навіть роторні) аналоги питому потужність. Із довговічністю за ремонтпридатністю проблем у газотурбінних двигунів також немає.

Газотурбінний двигун буває різних форм, зокрема, це реактивний турбінний двигун, турбовентиляторний двигун і турбогвинтовий двигун.

Турбореактивний двигун - це повітряно-дихаючий газотурбінний двигун, що виконує цикл внутрішнього згоряння під час роботи. Він також належить до типу реакційних двигунів літальних апаратів. Сер Франк Уїтл з Великобританії та Ганс фон Охейн з Німеччини самостійно розробили практичну концепцію двигунів наприкінці 1930-х років, але лише після Другої світової війни реактивний двигун став широко використовуваним рушійним методом.

Турбогвинтові двигуни – це ще один варіант, побудований на турбореактивному двигуні, і він використовує турбіну для роботи на валу для приводу гвинта. Вони є гібридом ранніх поршневих двигунів та новіших двигунів на газовій турбіні.

Турбовентиляторний двигун - це вдосконалена версія турбореактивного двигуна, де робота на валу використовується для приводу вентилятора, який приймає велику кількість повітря, стискає і спрямовує через вихлоп для створення тяги. Турбовентиляторні двигуни менш шумні і забезпечують більшу тягу.

В авіабудуванні знайшла втілення концепція мікротурбінних двигунів, проте вона ще недостатньо використовується при розробці безпілотних літальних апаратів, хоча перші ластівки вже є. Американська компанія Fusion Flight представила безпілотний літальний апарат АВ6, відмінною особливістю якого стали чотири мікротурбінні реактивні двигуни, що використовуються замість звичних роторів. Повітряне судно здатне злітати вертикально, розвивати максимальну швидкість до 400 км/год. Максимальна злітна маса становить 60 кг. Дальність польоту до 150 км.

Основними недоліками використання газотурбінних двигунів у безпілотній авіації є: вартість виготовлення, низькі значення коефіцієнта корисної дії, шум від вихлопних газів при роботі турбін, ускладнення зубчастих редукторів,

Електричні двигуни працюють як джерело енергії для генерації обертового руху від електричної енергії. Для систем приводу з електричним приводом електричні двигуни використовуються як джерело енергії, оскільки їх можна легко комбінувати з пропелерами як рушійною силою; все що необхідно - це постійне джерело електроенергії.

Сьогодні залишається актуальною проблема створення безпілотного літального апарату без двигуна внутрішнього згоряння, який мав би аналогічні технічні

характеристики, при цьому перевершуючи свій аналог за деякими параметрами. Такий апарат має відповідати високим вимогам маневреності, швидкості польоту та надійності. Існуючі зразки такого роду БПЛА недосконалі. Їх основними недоліками є: низька швидкість польоту; складна система керування польотом; висота польоту близько 8-12 тисяч метрів; невелика вага корисного навантаження.

В даний час наведені вище проблеми можна вирішити, якщо для БПЛА правильно підібрати електродвигуни та систему керування електродвигунами.

Застосування електродвигунів на БПЛА обумовлено низкою причин. По-перше, у сучасних електродвигунів високий коефіцієнт корисної дії (у разі застосування безколекторного двигуна фактично може сягати 95%). По-друге, електродвигуни важать значно менше, ніж аналогічні по характеристик двигуни внутрішнього згоряння. Більше того, до електродвигуна не потрібно підводити паливо для забезпечення його функціонування. Це розширює можливості конструювання БПЛА, адже не потрібно передбачати розміщення у корпусі БПЛА паливопроводів. Варто зазначити, що електродвигун та система його живлення (акумуляторна батарея) менш вибухонебезпечне, ніж аналогічна система з двигуном внутрішнього згоряння.

БПЛА, в яких як силова установка використовуються електродвигуни, що живляться від акумуляторів, є перспективною розробкою з погляду екології. Пояснюється це тим, що за функціонування таких БПЛА немає шкідливих викидів в атмосферу, обумовлених згорянням палива.

Перевага використання електродвигунів на БПЛА полягає також у тому, що існує можливість забезпечити живлення електродвигунів за рахунок енергії, що накопичується сонячними батареями. На даний момент приклад такого БПЛА можна навести БПЛА «Owl», розроблений компанією «Tiber». Побудовані за подібною схемою БПЛА надалі зможуть здійснювати польоти, тривалість яких буде обмежена лише технічним станом БПЛА.

Варто звернути увагу на те, що якщо у БПЛА електродвигуни розташовуються на крилах можливо застосування технології «гнучке крило». Особливістю

такої технології є те, що на крилі немає звичні механізми, відповідальні зміну напрямку польоту БПЛА і контроль швидкості польоту БПЛА.

Маневрування та зміна швидкості БПЛА (наприклад, при посадці) здійснюється за рахунок зміни геометрії крила. Перевага даної технології полягає в тому, що при маневруванні чи зміні швидкості крило зберігає обтічну форму. Застосування технології «гнучке крило» важко здійснити при використанні двигунів внутрішнього згоряння, адже при встановленні двигунів внутрішнього згоряння на крилі необхідно забезпечити до них підведення палива. При використанні гнучкого крила підвести паливо до двигуна, розташованому на крилі, практично неможливе завдання. Якщо в такому випадку використовувати електродвигун, працюючий за рахунок того, що на нього по проводах подається електричний струм від акумулятора.

У застосуванні на БПЛА найбільшого поширення отримали безколекторні електродвигуни. Конструктивно безколекторний двигун складається з ротора з постійними магнітами та статора з обмотками. У колекторному двигуні обмотки знаходяться на роторі. Тому, далі в тексті ротор – елемент електродвигуна з постійними магнітами, статор-елемент двигуна, на якому розташовуються обмотки.

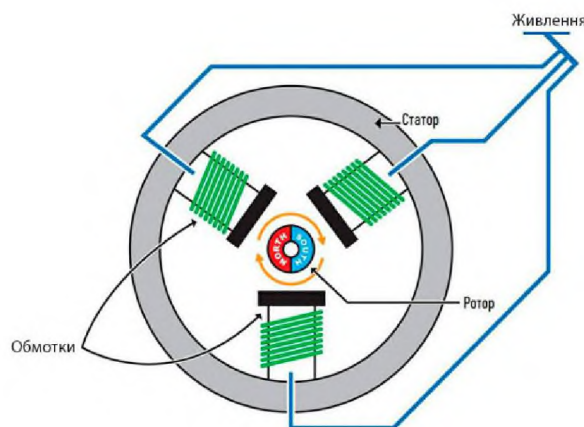


Рисунок 1.1 – Схема безколекторного двигуна

Керування безколекторним електродвигуном на БПЛА здійснюється за рахунок електронного регулятора.

Використання безколекторного електродвигуна на БПЛА обумовлено низкою причин. У конструкції безколекторного електродвигуна відсутня колектор, за рахунок чого конструкція електродвигуна суттєво спрощується. У зв'язку з цим безколекторний електродвигун також має меншу вагу і розмір, ніж аналогічний електродвигун із колектором.

У безколекторного електродвигуна вищий коефіцієнт корисної дії та показник потужності на кілограм власної ваги, ніж у електродвигуна з колектором. Більш того у безколекторного електродвигуна ширший діапазон швидкості обертання гвинтів, що забезпечує ширші можливості для пілотування БПЛА та відповідно обумовлює дозволяє встановлювати БПЛА більше додаткового устаткування.

Як було сказано раніше, безколекторні електродвигуни не мають колектора, точніше щітково-колекторного вузла, в якому щітки та пластини колектора безперервно розмикаються, що викликає іскріння, що призводить до втрат і створює радіоперешкоди. Коефіцієнт корисної дії безколекторних електродвигунів вищий, ніж у електродвигунів з колектором тому, що в електродвигуні з колектором щітки постійно труться колектор, зношуються та підгорають, погіршуючи струмопровідність здатність щітково-колекторного вузла, що тягне у себе зменшення потужності двигуна. Варто зазначити, що частина потужності електродвигуна з колектором витрачається на подолання тертя між щітками та колектором. Відсутність щітково-колекторного вузла у безколекторного двигуна дозволяє практично досягти значення коефіцієнта корисної дії 95%.

Відсутність щіток та колектора спрощують обслуговування двигуна, у зв'язку з тим, що відсутня необхідність періодично міняти щітки і чистити колектор електродвигуна, що використовується. Ресурс безколекторного двигуна в основному залежить від підшипників ротора. Завдяки цьому досягається висока надійність двигуна.

На сьогоднішній день існує велика кількість безколекторних електродвигунів, тому існує можливість підібрати електродвигун для даного БПЛА, що відповідає бажаним характеристикам БПЛА. Тобто безколекторний електродвигун для

БПЛА підбирається виходячи з передбачуваних маси БПЛА, швидкості польоту, тривалості польоту, енергоспоживання безколекторного електродвигуна та розмірів безколекторного електродвигуна (обумовлюються конструкцією БПЛА).

Отже, в даний час ведеться розробка БПЛА, які зможуть виконувати певні завдання, представляючи при цьому небезпеку для життя людини. На цих БПЛА розумна установка безколекторних електродвигунів, тому що вони багато в чому перевершують існуючі двигуни внутрішнього згорання з аналогічними характеристиками. Більш того, безколекторні електродвигуни розширюють можливості для подальшого проектування БПЛА та дозволяють створювати БПЛА, здатні функціонувати на бажаних висотах бажану кількість часу.

1.4 Система керування безпілотними літальними апаратами

Основним наземним засобом керування безпілотними літальними апаратами є система керування (СУ).

Класифікацію системи керування БПЛА можна здійснювати за такими критеріями:

- клас СУ: стаціонарний (приміщення, бункер і т.п.), пересувний (контейнер і т.п.), мобільний (на базі транспортних засобів), портативний (кейси і т.п.);
- функціональне призначення: зліт, посадка, пілотування, керування корисним навантаженням, комбінована;
- ступінь автоматизації: автоматична, автоматизована, ручна;
- тип СУ: керування технологічними процесами, інформаційне керування, комбінована;
- централізація: глобально-розподільна, локально-розподільна, централізована;
- географічна зона відповідальності;
- наявність функції автопілота: зліт, посадка, пілотування, комбінований;

- технологічні параметри: відкритість, масштабованість, адаптивність, стійкість, надійність, катастрофостійкість, інтегрованість із іншими підсистемами, раціональність, відмовостійкість;
- технології програмної реалізації: функціонально-орієнтовані, об'єктно-орієнтовані, сервіс-орієнтовані, процесно-орієнтовані;
- експлуатаційні параметри: тривалість розгортання/згортання, тривалість процедури передачі, тривалість процедури повернення керування.

Розглянемо більш детально систему керування БПЛА вертолітного типу, або Х-коптерами, де Х – означає кількість гвинтів апарату.

Трирівнева структура керування БПЛА вертолітного типу. В системі керування БПЛА можна виділити три рівні автоматизації.

Верхній (Management Level) – рівень диспетчеризації та адміністрування, що здійснює взаємодію між оператором (диспетчером, користувачем) через інтерфейс із контролерами середнього рівня.

Середній (Automation Level) – рівень автоматизованого керування процесами за допомогою контролерів, модулів введення-виведення сигналів та комутаційного обладнання.

Нижній (Field Level) - рівень кінцевих пристроїв, що включає в себе датчики та механізми.

Склад нижнього рівня. На нижньому рівні застосовують двигуни двох типів: колекторні та безколекторні. У колекторного двигуна обмотки знаходяться на роторі (вертається), а у безколекторного – на статорі. Безколекторні двигуни (BLDC-двигуни) не використовують щітки та колектори і за наявності хороших підшипників вимагають мінімального технічного обслуговування. Ротор BLDC-двигунів виготовляється із постійного магніту та не має обмоток. Статор містить обмотки, змінне поле яких призводить до обертання ротора. керування двигунами здійснюється за допомогою задання напрямку та швидкості обертання гвинтів через електронні регулятори швидкості, що підключаються до них (Electric Speed Controller – ESC). На вхід ESC подається напруга з акумулятора і сигнали, що управляють, з мікроконтролера, на вихід регулятор віддає напругу для приводу. Збільшенням

числа обертів гвинтів в одиницю часу призводить до підйому, зменшення - опускання. Збільшення обертів двох бічних гвинтів задає крен (roll), а передніх або задніх – тангаж (pitch) з наступним рухом убік або підйомом/зниженням. Для стабілізації руху одна пара гвинтів завжди обертається за годинниковою стрілкою, інша – проти, компенсуючи цим крутний момент (див. рисунок 1.5).

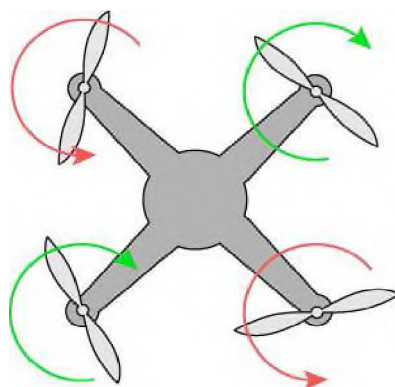


Рисунок 1.2 – Схема напрямку руху гвинтів квадрокоптера

Крім двигунів на нижньому рівні, вбудовуються різноманітні датчики. Інерційний вимірювальний блок (IMU) служить для відстеження поточного прискорення пристрою, використовуючи при цьому поєднання кількох акселерометрів (показує відхилення апарата від горизонтальної осі) і гіроскоп (відображає напрямки руху апарату по одному з 6 напрямків). Також включають магнітометр для додаткової стабілізації апарату, що є важливим і складним завданням, т.к. розподіл ваги дрону не завжди є симетричним. У такому разі БПЛА при польоті матиме крен і з часу відхилятиметься від маршруту. Цю проблему можна вирішити шляхом регулювання тяги двигунів, але це вимагатиме розподілу крену, тангажу та відхилення від курсу. Для вимірювання цих кутових координат використовують інерційні сенсори або модулі iNEMO, що є комбінацією з триосьового акселерометра та триосьового гіроскопа.

Для відстеження розташування апарату використовують баросенсор (електронний барометр), що визначає висоту польоту, та мікросхеми сімейства Teseo II і Teseo III, що узгоджуються з однією з існуючих систем позиціонування – частіше за GPS, Galileo (Європа), BeiDou2 (Китай), QZSS (Японія). Для спрощення навігації

використовують функцію Failsafe – запам'ятовування за допомогою компаса шляху руху, який потім використовується для повернення. Іноді застосовують сонар (ультразвуковий сенсор) для обльоту перешкод, м'якої посадки або сканування поверхні при незначній висоті польоту з неї (до трьох метрів). Встановлення відеокамери на борту БПЛА дозволяє транслювати вид від першої особи (FPV – First Person View), який може бути особливо корисним при віддаленні апарата на велику відстань або виходу з поля зорового контакту.

В залежності від переліку поставлених завдань на борту БПЛА можуть додатково встановлюватися такі системи та пристрої, як:

- система розвідки (оптико-електронної, тепловізорної, радіолокаційної, радіо- та радіотехнічної, радіаційної, хімічної, бактеріологічної та інших видів розвідки);
- засоби для радіоелектронної боротьби або пристрої радіоелектронних перешкод;
- пристрої наведення та корекції керованої зброї;
- засоби поразки цілей різних типів;
- засоби керування та зв'язку з наземним пунктом керування;
- апаратура автоматичного пілотування та посадки;
- транспортувальні касети, відсіки, кріплення тощо.

Необхідно пам'ятати, що більша кількість датчиків збільшує вагу та габарити апарату, а їх відсутність – призводить до зниження маневреності.

Сигнали GPS-навігаторів можна глушити, перехоплювати та замінювати. Існує система перехоплення керування БПЛА шляхом так званого GPSспуфінгу, але тільки для тих апаратів, які використовують незашифрований сигнал GPS. Для виявлення використовують радіолокаційні станції, оптичні та акустичні засоби виявлення.

Склад середнього рівня. Як апаратура керування в дронах застосовують цифрові сигнальні процесори чи мікроконтролери (MicroPC), програмовані мовами високого рівня, як-от C, C++, Модула-2, Оберон SA чи Ада95, і керовані операційними системами (інтерфейсами) реального часу (QNX, VME, VxWorks, XOberon).

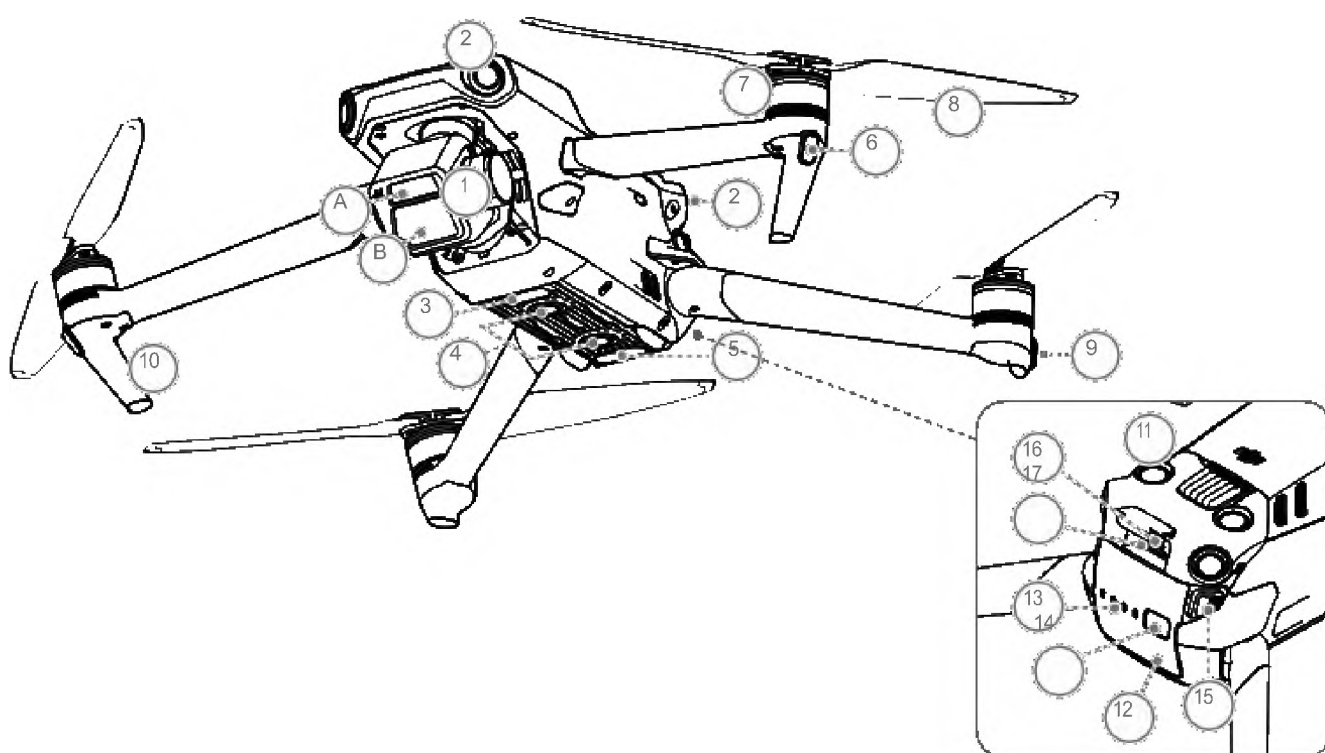
Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) – диспетчерське керування та збирання даних – програмний пакет, призначений для розробки або забезпечення роботи у реальному часі систем моніторингу чи керування.

Верхній рівень, або засоби зв'язку, що використовуються в керуванні та телеметрії БПЛА вертолітного типу. Чим складніша технічна система, якою ми керуємо, тим більша кількість незалежних каналів зв'язку для цього потрібно. Для зв'язку з БПЛА та високошвидкісної передачі даних на наземний пункт керування використовується командна радіолінія зв'язку. Як правило вона організовується на ультракороткій хвилі від 200 до 400 МГц, L (1-2 ГГц), S (2-4 ГГц), C (3,4-8 ГГц) та X (7-10,7 МГц) у межах діапазону прямої видимості. Для зв'язку на далекій відстані можуть використовуватися БПЛА-ретранслятори, а також засоби супутникового зв'язку. У простих надлегких, легких та малих БПЛА також можуть використовуватися мережі мобільних операторів (2G покоління, що працюють на частотах 780-960, 925-960 МГц, або 1,7-2,2, 2,5-2,7 ГГц), мережі WiFi (2,4-2,5, 5,15-5,35, 5,65-6,425 ГГц), WiMAXMobile (2,3-13,5 ГГц) та LTE (0,79- 0,87, 1,7-1,8, 2,5-2,7 ГГц). У випадках, якщо команди з пульта керування не надходять, то БПЛА переходить у режим автопілотування. У цьому режимі БПЛА можуть використовувати як прості програми, на кшталт «повернення», «прямолінійний політ», «баражування», так й складні програми автоматичного польоту, які використовують заздалегідь закладені електронні карти місцевості та дані навігаційної системи.

2 АНАЛІЗ І УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальна характеристика об'єкта керування

DJI Mavic 3 містить контролер польоту, систему відеозйомки, системи зору, систему інфрачервоного зондування, систему силової установки та інтелектуальну батарею для польоту. Елементи системи квадрокоптера DJI Mavic 3 наведено на рисунку 2.1.



1 – підвіс і камера (A – телекамера; B – камера Hasselblad L2D-20c); 2 – система горизонтального всенаправленого бачення; 3 – допоміжне нижнє освітлення; 4 – система огляду вниз; 5 – інфрачервона сенсорна система; 6 – передні світлодіоди; 7 – двигуни; 8 – пропелери; 9 – індикатори стану літака; 10 – шасі (вбудовані антени); 11 – система огляду вгору; 12 – інтелектуальна літальна батарея; 13 – світлодіоди рівня заряду батареї; 14 – кнопка живлення; 15 – пряжки акумулятора; 16 – порт USB-C; 17 – слот для карти microSD

Рисунок 2.1 – Загальний вигляд дрона DJI Mavic 3

DJI Mavic 3 має як систему інфрачервоного датчика, так і системи бачення вперед, назад, вгору, вбік і вниз, що дозволяє зависати і літати як у приміщенні, так і на вулиці, а також автоматично повертатися додому, уникаючи перешкод у всіх напрямках. Літак має максимальну швидкість польоту 47 миль/год (75,6 км/год) і максимальний час польоту 46 хвилин.

Пульт дистанційного керування DJI RC Pro має вбудований 5,5-дюймовий екран високої яскравості 1000 кд/м² з роздільною здатністю 1920x1080 пікселів. Користувачі можуть підключатися до Інтернету через Wi-Fi, а операційна система Android включає Bluetooth і GNSS. DJI RC Pro постачається з широким набором елементів управління літаком і карданним механізмом, а також настроюваними кнопками та має максимальний час роботи 3 години. Пульт дистанційного керування RC-N1 відображає передачу відео з літака на DJI Fly на мобільному пристрої. Літаком і камерою легко керувати за допомогою бортових кнопок, а пульт дистанційного керування має час роботи 6 годин.

DJI Mavic 3 використовує 4/3-дюймову CMOS-камеру Hasselblad L2D-20c, здатну знімати 20-мегапіксельні фотографії та відео 5,1K 50fps/DCI 4K 120fps Apple ProRes 422 HQ* і H.264/H.265. Камера має регульовану діафрагму від f/2,8 до f/11, динамічний діапазон 12,8 ступенів і підтримує 10-бітне відео D-Log. Телекамера допомагає користувачам знімати з 28-кратним збільшенням у режимі дослідження.

Завдяки чотирьом вбудованим антенам і технології передачі на далекі відстані O3+ DJI Mavic 3 пропонує максимальний діапазон передачі 15 км і якість відео до 1080p 60 кадрів в секунду з літака в додаток DJI Fly. Пульт дистанційного керування працює як на 2,4, так і на 5,8 ГГц і може автоматично вибирати найкращий канал передачі.

Інтелектуальні режими польоту: користувач може зосередитися на керуванні літальним апаратом, а розширена система допомоги пілоту 5.0 (APAS 5.0) допомагає літальному апарату уникати перешкод у всіх напрямках.

DJI Mavic 3 має три режими польоту, а також четвертий режим польоту, на який літальний апарат перемикається в певних сценаріях. Режими польоту можна

перемикати за допомогою перемикача Flight Mode на пульті дистанційного керування.

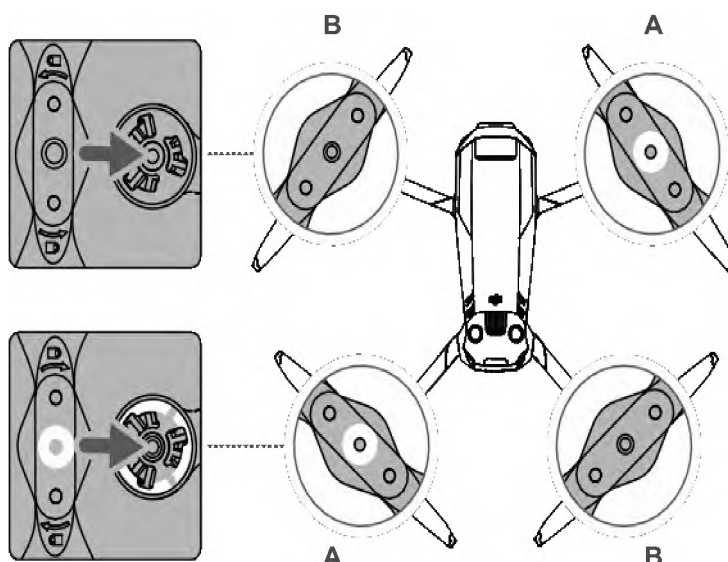
Звичайний режим: літальний апарат використовує GNSS і системи переднього, заднього, бічного, верхнього та нижнього бачення та систему інфрачервоного зондування для визначення місцезнаходження та стабілізації. Коли сигнал GNSS сильний, літальний апарат використовує GNSS для визначення місцезнаходження та стабілізації. Коли GNSS слабка, але освітлення та інші умови навколишнього середовища достатні, літальний апарат використовує системи бачення, щоб визначити місцезнаходження та стабілізувати себе. Коли системи переднього, зворотного, бічного, верхнього та нижнього бачення ввімкнено, освітлення та інші умови середовища достатні, максимальний кут нахилу становить 30° , а максимальна швидкість польоту – 15 м/с.

Спортивний режим: у спортивному режимі літальний апарат використовує GNSS для позиціонування, а відгуки літального апарату оптимізовані для маневрності та швидкості, що робить його більш чутливим до рухів ручки управління. Зверніть увагу, що розпізнавання перешкод вимкнено, а максимальна швидкість польоту становить 21 м/с.

Режим «Кіно»: режим «Кіно» базується на нормальному режимі, а швидкість польоту обмежена, що робить літак більш стабільним під час зйомки.

Літак автоматично перемикається в режим Attitude (ATTI), коли системи зору недоступні або вимкнені, а також коли сигнал GNSS слабкий або компас відчуває перешкоди. У режимі ATTI літак може легше піддаватися впливу навколишнього середовища. Такі фактори навколишнього середовища, як вітер, можуть призвести до горизонтального зсуву, що може становити небезпеку, особливо під час польоту в обмеженому просторі.

Існує два типи малошумних швидкознімних пропелерів DJI Mavic 3, які обертуються в різних напрямках (див. рисунок 2.2).



А – рухаються за часовою годинниковою стрілкою;

В – рухаються проти часової годинникової стрілки

Рисунок 2.2 – Схема керування рухом квадрокоптера DJI Mavic 3

Максимальний час польоту було перевірено в середовищі без вітру під час польоту на постійній швидкості польоту 20,1 миль/год (32,4 км/год). Максимальна швидкість польоту була перевірена на висоті над рівнем моря без вітру.

Пульт дистанційного керування досягає максимальної відстані передачі (FCC) у широко відкритій зоні без електромагнітних перешкод на висоті приблизно 400 футів (120 м). Максимальна відстань передачі означає максимальну відстань, на яку літальний апарат ще може надсилати та отримувати передачі. Це не стосується максимальної відстані, яку літак може пролетіти за один політ. Максимальний час роботи перевірено в лабораторних умовах і без заряджання мобільного пристрою.

Пульт дистанційного керування DJI RC-N1, DJI RC Pro та всі типи ND-фільтрів повністю сумісні з Mavic 3.

2.2 Побудова функціональної схеми та математичної моделі системи керування рухом квадрокоптера

2.2.1 Функціональна схема та підсистеми моделі керування рухом квадрокоптера. Стабільний політ дрона значною мірою залежить від конструкції, а складність у проектуванні системи керування виникає через нижчу стабільність системи. Рух дрона залежить від результуючих сил та моментів щодо центру важкості. Хороше кількісне співвідношення сил та крутного моменту щодо центру мас тіла може бути отримано за допомогою моделі Ньютона Ейлера. Наприклад, якщо безпілотному літальному апарату необхідно зависнути на певній висоті, моменти щодо центру тяжіння повинні дорівнювати нулю. Сили та моменти, прикладені до центру ваги, залежать від конструкції. Конструкція квадрокоптера включає як аспекти машинобудування, так і аспекти комп'ютерної інженерії. Короткий опис аспекту комп'ютерної інженерії наведено на рисунку 2.3. Він здійснюється у два етапи як програмний, так і апаратний відповідно.

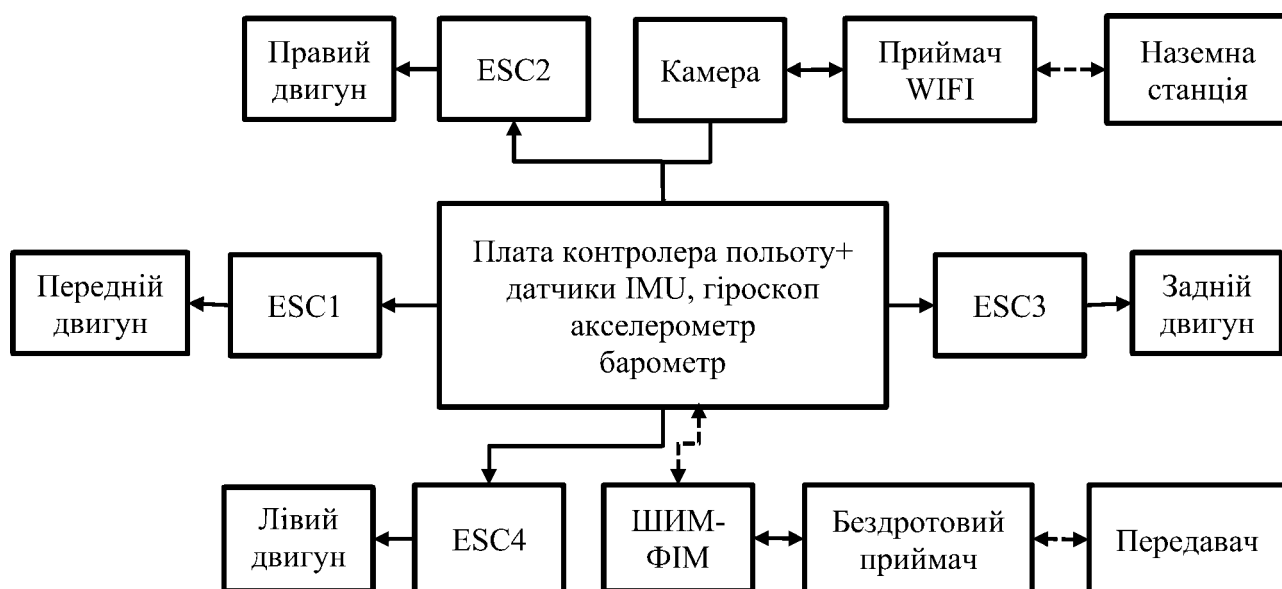


Рисунок 2.3 – Блок-діаграма квадрокоптера

Конструкція квадрокоптера заснована на платформі embedded system, тобто. внутрішньої системи, являє собою комбінацію комп'ютерного процесора, пам'яті

та периферійних пристроїв введення/виведення, що виконує спеціальну функцію в рамках більшої механічної або електронної системи. Конструкція складається з мікроконтролерів, які керують загальною продуктивністю квадрокоптера, такий як механізм польоту та пряма трансляція відео. ESC використовується для керування швидкістю обертання гвинта в залежності від сигналу від комп'ютера. Живлення квадрокоптера здійснюється від акумулятора. Ці вимоги гарантують, що квадрокоптер підтримує стабільний політ під час руху чи зависання.

Дрон повинен бути стійким навколо своїх осей, а поступальний політ повинен викликати його легкий нахил, щоб рухатися вперед. Польотні характеристики дрона вимагають оптимізації продуктивності його руху, пов'язаної зі швидкістю двигунів і кутом нахилу дрона. При цьому робота сервоприводів повинна покращуватися за допомогою контролерів.

Метою цього дослідження є аналіз і покращення ефективності керування швидкістю дрона вздовж осі тангажу шляхом дії на прямий силовий ланцюг або на контур зворотного зв'язку.

Вимоги до контролю висоти наступні. Отримання кращої поведінки контуру зворотного зв'язку за швидкістю. Критерії досягнення результату:

- запас стійкості за фазою $> 45^\circ$;
- перерегулювання $< 5 \%$;
- 5% час перехідного процесу $< 0,5$ с.

Наведемо апаратну та програмну архітектуру дрона за допомогою діаграми визначення блоку (рисунок 2.4).

Досягнення мети дослідження здійснюється за допомогою моделювання окремих процесів та вимагає виконання таких завдань:

- проаналізувати блок-схему керування;
- налаштувати пропорційний коректор P;
- додати інтегральну дію до цього коректора вивчити ефект похідної дії.

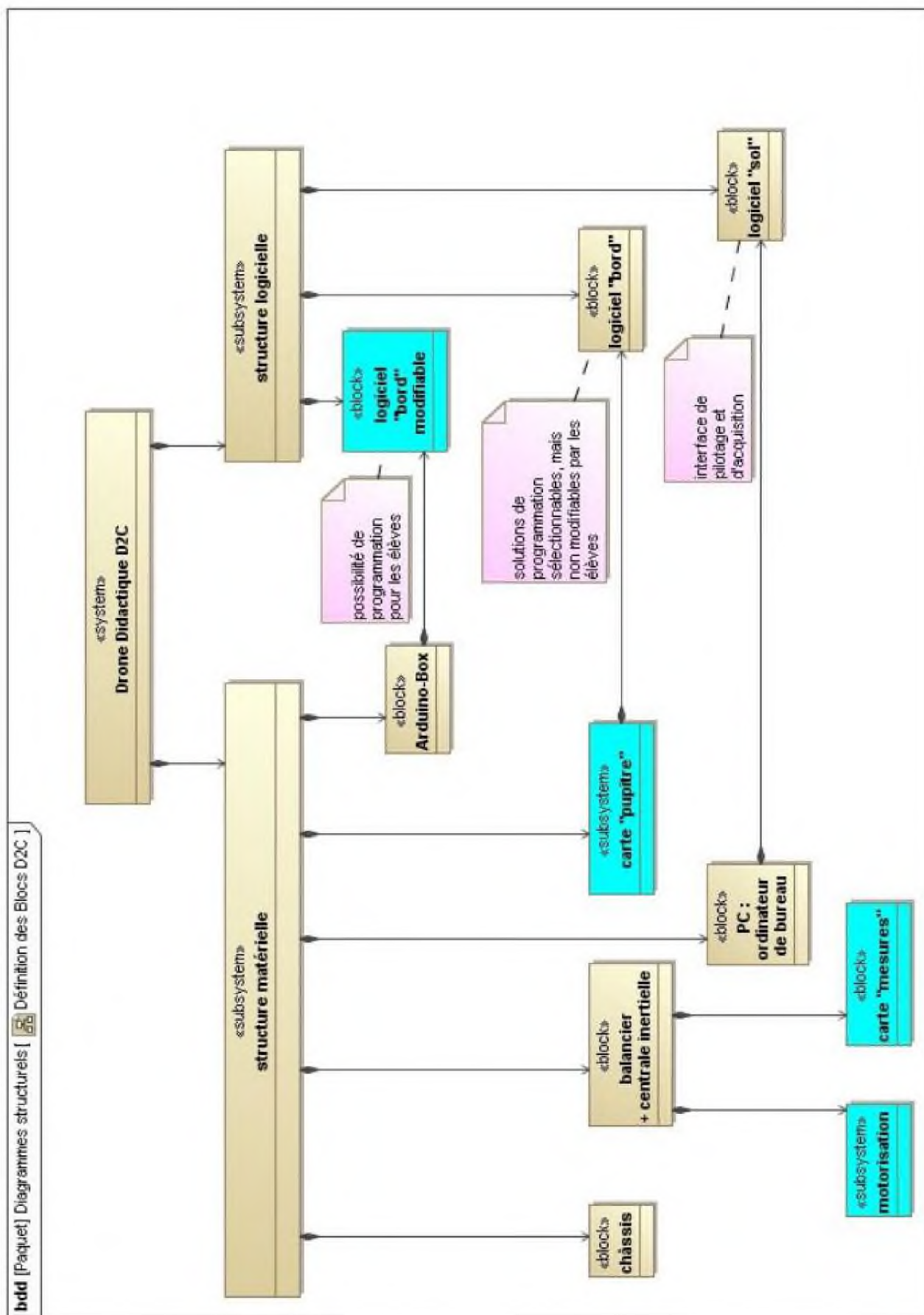


Рисунок 2.4 – Програмна та апаратна архітектура дрона

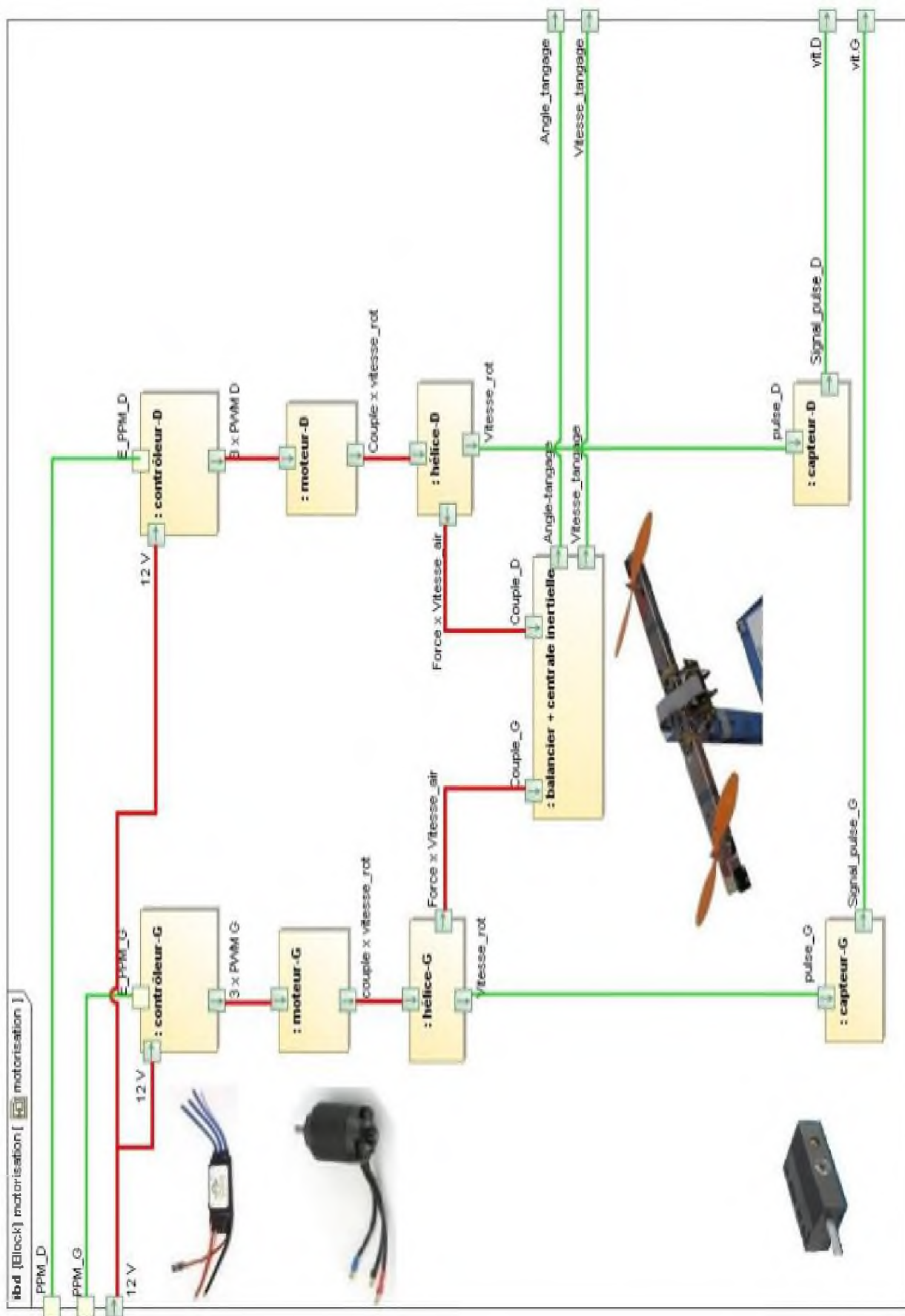


Рисунок 2.5 – Опис підсистеми «двигуни»

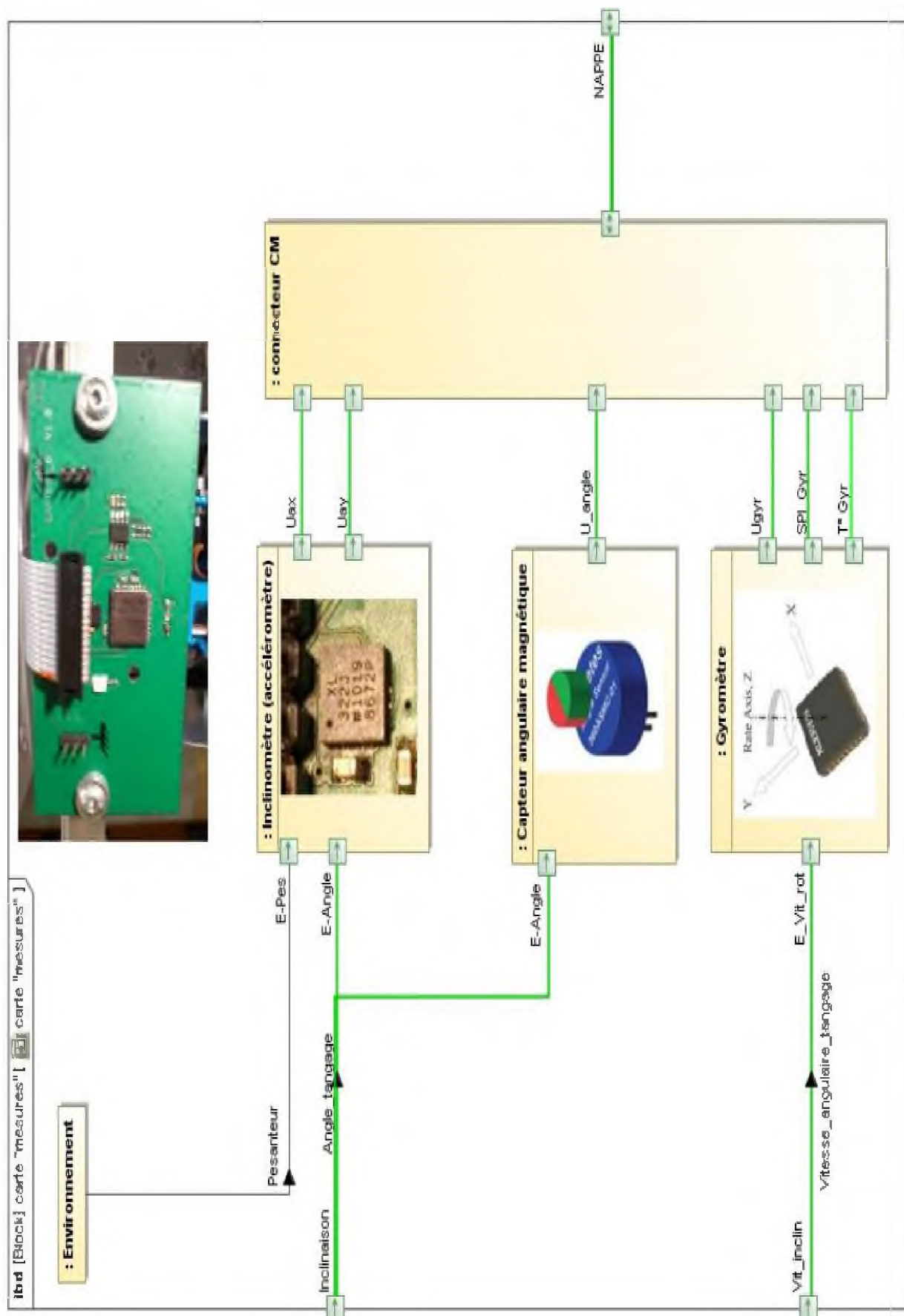


Рисунок 2.6 – Опис підсистеми «карта вимірювань»

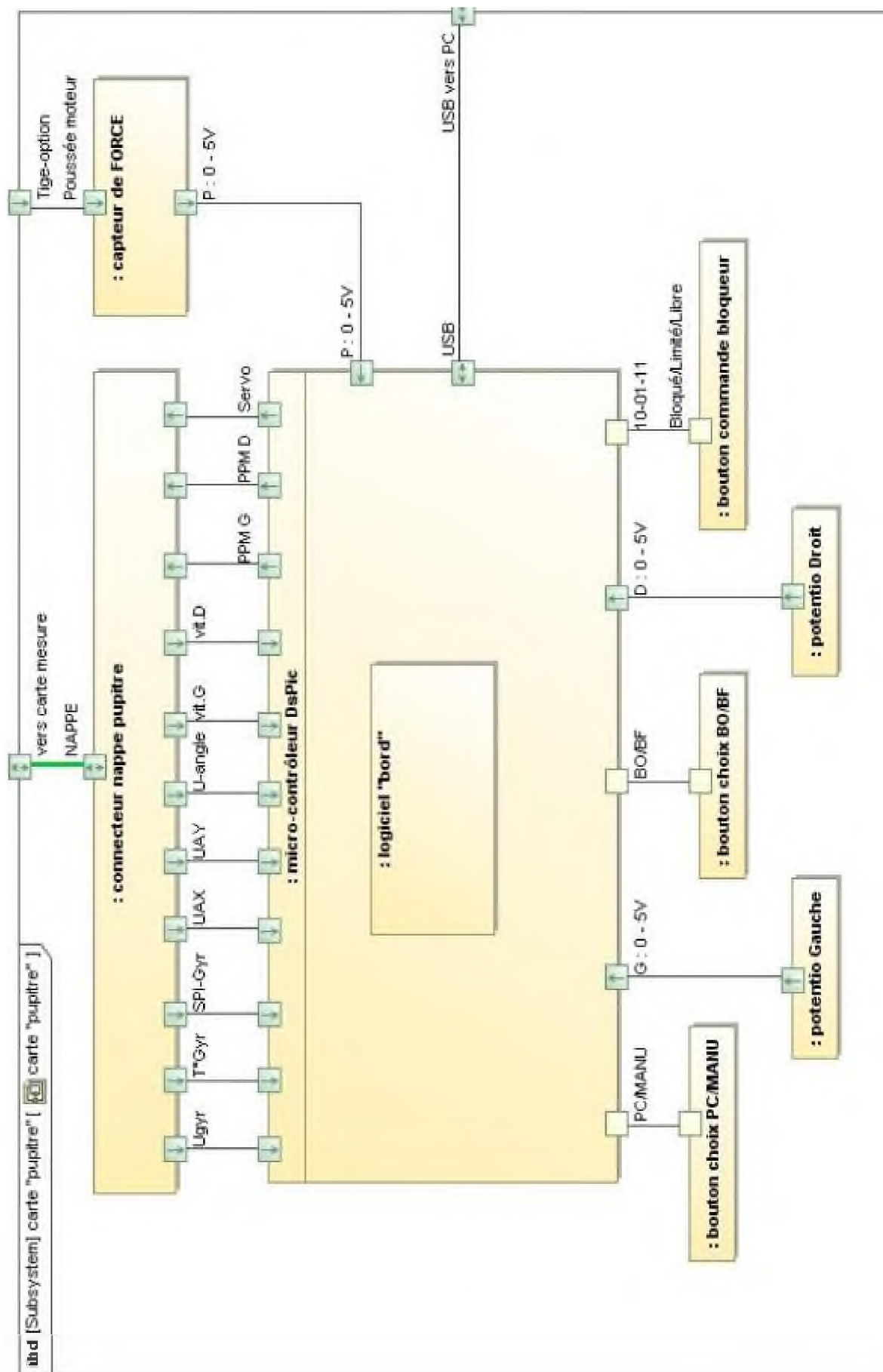


Рисунок 2.7 – Опис підсистеми «карта-десктоп»

2.2.2 Елементи системи керування рухом дрона. Блок-схема нижче представляє контур керування швидкістю дрона (рисунок 2.8).

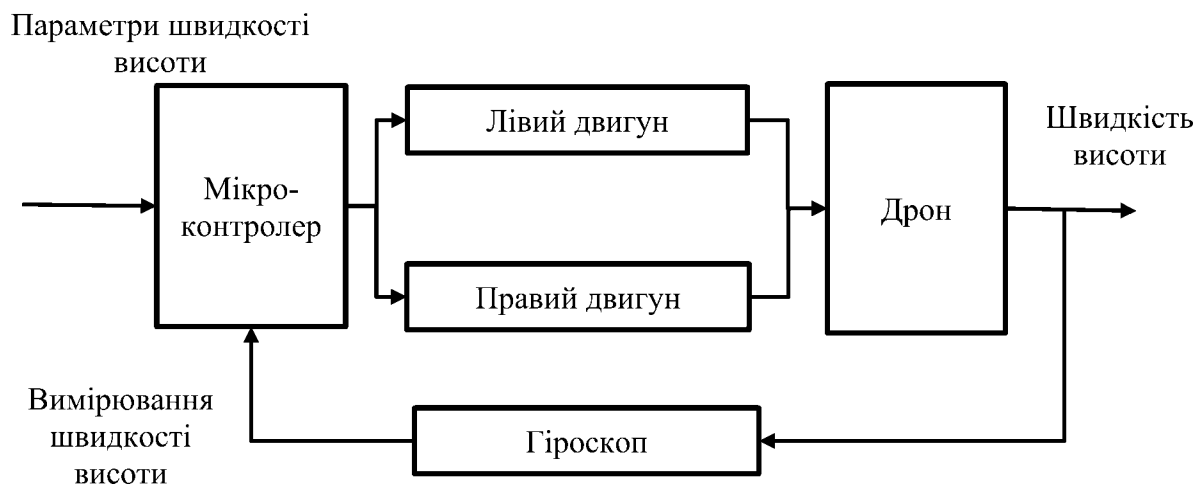


Рисунок 2.8 – Блок-схема контуру керування швидкістю дрона

2.2.3 Двигун. У DJI Mavic 3 використовуються чотири безколекторні двигуни DJI Mavic Pro Drone 2008.



Рисунок 2.9 – Двигун квадрокоптера DJI Mavic 3 Pro Drone 2008

DJI Mavic Pro Drone 2008 – це безколекторний двигун постійного струму з вбудованим драйвером. Конструкція двигуна з порожнистим валом забезпечує високу щільність крутного моменту, точність керування, гнучкі методи взаємодії та

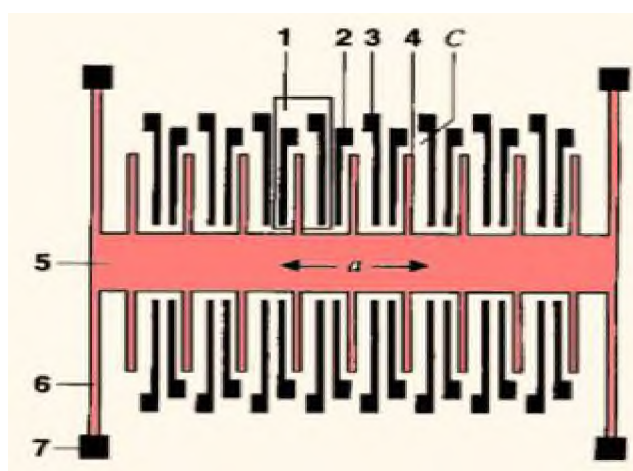
інтелектуальний захист. Він підходить для сценаріїв застосування прямого привода з низькою швидкістю та високим крутним моментом.

Основні характеристики двигуна наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Характеристики двигуна DJI Mavic Pro Drone 2008

Показники	Значення
Номінальна напруга, В	24
Обороти, об/В	1400
Діапазон робочих температур, °С	-10 до 45
Вага двигуна, грм	27,6
Діаметр двигуна, мм	24
Діаметр вала, мм	2,95

2.2.4 Акселерометр. Акселерометр – це пристрій, який вимірює вібрацію або прискорення руху конструкції. Сила, викликана вібрацією або зміною руху (прискорення), змушує масу «стискувати» п'єзоелектричний матеріал, що створює електричний заряд, пропорційний силі, що діє на нього. Оскільки заряд пропорційний силі, а маса постійна, то заряд також пропорційний прискоренню.



1, 2, 3, 4 – гребінчасті електроди; 5 – рухома маса; 6 – бруски

Рисунок 2.10 – Схема акселерометра

Фіксовані електроди (2, 3), розміщені на чіпі розташовані з кожного боку рухомих електродів (4). Коли датчик прискорюється, відстань між змінюваними мобільними електродів і стаціонарних, що призводить до зміни електричного сигналу в чіп інтерпретації.

2.2.5 Гіроскоп. Мікроконтролер отримує інструкцію щодо швидкості тангажу, а також вимірювання швидкості за допомогою гіроскопа (датчик, що вимірює кутові прискорення в 3 напрямках). Будова гіроскопа розглянемо на основі гіроскопа Melexis MLX 90609.

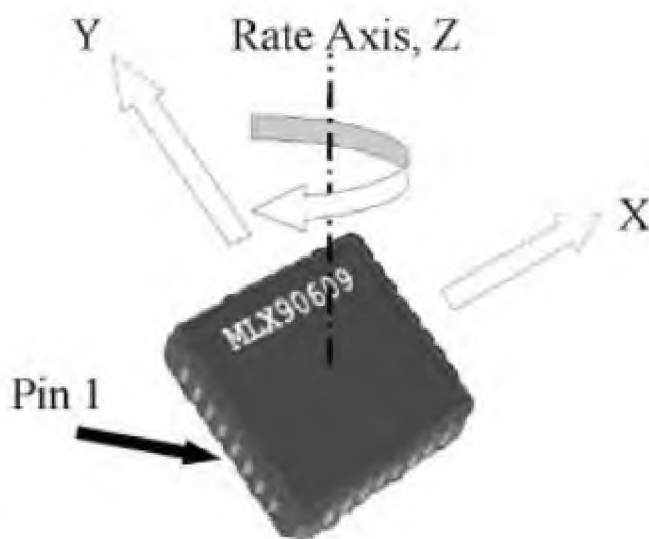


Рисунок 2.11 – Гіроскоп

Цей гіроскоп складається з кремнієвих мікросхем: в основному для вимірювального елемента та схеми інтерпретації. Серцевина вимірювального елемента в його структурі розпізнається лише під мікроскопом. Це набір смісних гребінців, виготовлених за технологією мікрообробленого кремнію.

Принцип вимірювання по осі гіроскопа. Осі вимірювання, встановлені виробником. На гіроскопа MLX 90609 вимірювання швидкості відбувається навколо осі, яка називається Z перпендикулярно до площини кріплення мікросхеми. Поворот, вказаний навколо осі Z, є trigo direction < 0 (отже, за годинниковою стрілкою > 0).

Вимірювання кутової швидкості ґрунтується на спостереженнях коріолісових прискорень. Дуже схематично, ефект Коріоліса (або прискорення Коріоліса) проявляється тангенціальним прискоренням рухомого тіла, яке рухається в неінерційній обертовій системі відліку.

Розглянемо об'єкт M , який має можливість радіального руху (у напрямку X) відносно а тверде тіло S , яке саме обертається вздовж осі Z зі швидкістю кут Ω відносно нерухомої опори O (рисунок 2.10).

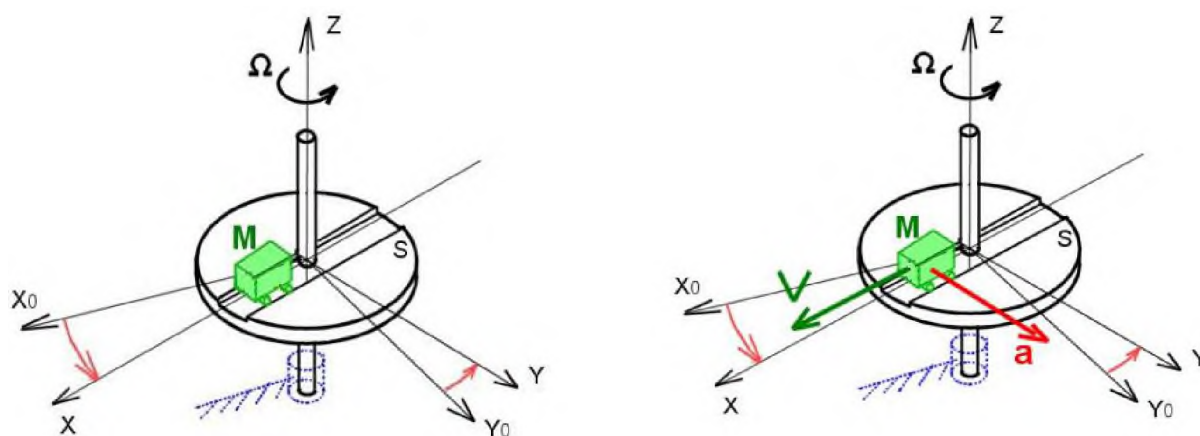


Рисунок 2.12 – Коріолісове прискорення

Закони механіки, які застосовуються до цього об'єкта M , дозволяють виділити той факт, що коли він рухається радіально зі швидкістю V відносно S (в напрямку X), він зазнає прискорення, яке називається прискоренням Коріоліса, яке діє в напрямку Y . Значення цього прискорення: $a = 2 \Omega V$.

Принцип вимірювання кутової швидкості такий. Вимірюючи « a » (наприклад, за допомогою акселерометра), якщо ми знаємо « V », то можемо визначити кутову швидкість системи відліку Ω .

Існує також так зване «відцентрове» прискорення, яке діє в напрямку X , і що немає необхідності брати до уваги в цьому поясненні.

Інтуїтивне пояснення цього коріолісового прискорення може бут и надане, враховуючи, що об'єкт M повинен мати дедалі більшу тангенціальну швидкість важлива при віддаленні від осі обертання. Так під час руху зі швидкістю V в напрямку X , він повинен прискорюватися в напрямку Y .

На наведеному вище ескізі використовуються та розміщені два мікромеханічні датчики прискорення.

Щоб привести сейсмічну масу M в рух у напрямку X , ці акселерометри мають встановлено на «вібраційній опорі», яка рухається зі швидкістю V . Ця швидкість V змінна, але відома в кожен момент часу. Співвідношення « $a = 2 \Omega V$ » завжди застосовується, але величини a і V є величинами, які розвиваються синусоїдально, що вимагає складної електронної обробки щоб отримати значення кутової швидкості Ω .

2.2.6 Послідовність дій при контролі висоти за допомогою консолі.

2.2.6.1 Перевірка перед запуском:

- якщо система була в роботі, вимкніть її, щоб повернутися до налаштувань за замовчуванням.
- знятий шток вимірювання сили (під правим двигуном);
- пружний фіксуючий стрижень (у центрі), розміщений у висунутому положенні (і зафіксований у цьому положенні);
- дверцята доступу до двигуна закриті (права сторона шасі);
- підключена система; «Загальне вимкнення» розблоковано; встановіть «0/1» на 1.

2.2.6.2 Ініціалізація системи:

- гудки двигуна: мелодія, потім 3 коротких гудка, потім один довгий;
- блимання світлодіода «Програма готова»;
- система блокування швидко рухається до блокування, а потім завершує блокування повільним рухом;
- послідовне згасання трьох діодів на електронній платі біля мікроконтролера;
- повернення блокатора в положення, позначене кнопкою «Керування блокатором»;
- USB-з'єднання з ПК: не потрібно;
- 3 чорні перемички контролюють двигуни та блокувальник на місці.

2.2.7 Контроль висоти (див. рисунок 2.11). Поступово натискайте на потенціометр «Команда двигуни», щоб розташувати його приблизно на 25% (старт відбувається з 18%)

Це передбачає вибір досить низької швидкості для обмеження акустичних неприємностей, а також вібрації через моторизацію. Потім натисніть на потенціометр «Команда тангаж», щоб розташувати баланс дрона за бажаним нахилом.

2.2.8 Ручне керування «розімкненим контуром» – це керування, яке здійснюється без допомоги бортового комп'ютера (мікроконтролера); тому це питання ручного регулювання положення потенціометрів «лівий двигун» і «правий двигун» для отримання бажаного руху балансу навчального дрона.

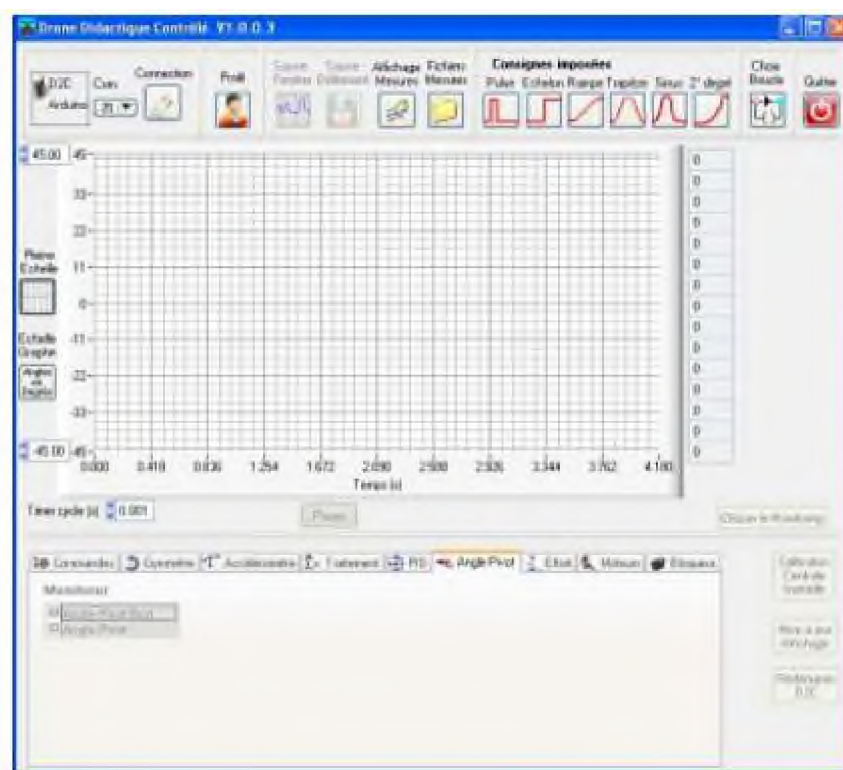


Рисунок 2.13 – Візуалізація контролю позиції кроку за допомогою ПК

Необхідно провести ті самі перевірки, що й у підпункті 2.2.6.1, крім: кнопка BO/BF на «Open Loop»; правий двигун в лівому початковому положенні 0%.

З міркувань безпеки перехід від команди «Замкнутий цикл» до команди «Розімкнутий контур» ефективний лише після того, як потенціометр «правий двигун» буде встановлено в положення ліворуч 0%.

Необхідно діяти поступово та одночасно на потенціометри «лівий двигун» і «правий двигун», щоб отримати бажаний рух балансу; (починається з 18%). Для цього необхідно вибрати досить низькі швидкості, щоб обмежити шумове забруднення, а також вібрацію через моторизацію.

У режимі «відкритого циклу» рух балансу може бути досить сильним; необхідно буде діяти з обережністю.

2.2.9 Контроль за допомогою ПК.

2.2.9.1 Перелік перевірок, які необхідно виконати перед запуском. Необхідно провести ті самі перевірки, що й у підпункті 2.2.6.1 крім: USB-з'єднання, підключеного до ПК і крім: кнопки «PC/MANU» на ПК.

2.2.9.2 Контроль позиції кроку за допомогою ПК:

- запустити програмне забезпечення, або подвійним клацанням піктограми Windows на робочому столі;
- або через меню Windows «Пуск – програми – D_IHM – D2C».

Якщо це перше використання, може з'явитися повідомлення про те, що час затримки порту USB не встановлено на 1 мілісекунду; У цьому випадку необхідно спочатку запустити через меню Windows наступний виконуваний файл: «Пуск – програми – дрон – змінити затримку» в режимі адміністратора (клацніть правою кнопкою миші, а потім «запустити від імені адміністратора»).

Порт зв'язку USB визначається автоматично. Натисніть на кнопку «підключення». Якщо необхідно, ви можете знайти номер порту в диспетчері пристроїв Windows.

Вкладки команд і моніторингу стають активними. Поступово натискайте курсор «Газ» або змінюйте значення, щоб запустити двигуни. Розмістіть його на рівні близько 25%; (початок відбувається при 18%) Необхідно буде вибрати досить низьку швидкість, щоб обмежити акустичне забруднення, а також вібрації через моторизацію.

Потім натисніть кнопку «контроль тангажу» або змініть значення, щоб розташувати маятник навчального дрона під потрібним нахилом.

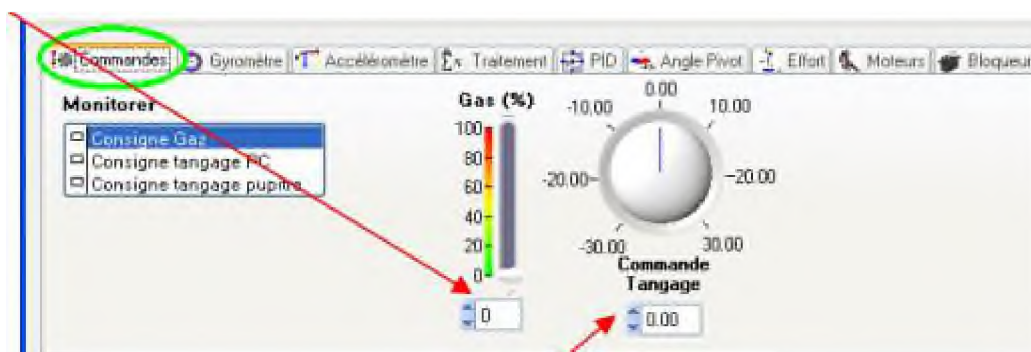


Рисунок 2.14 – Візуалізація процесу запуску двигунів

Величини кута нахилу, отримана в результаті використання цифрових фільтрів (за запитом) у повернення контролю висоти дрона:

1: кут, отриманий в результаті вимірювання гіроскопа, регулярно коригованого вимірюванням акселерометра;

2: кут, заданий акселерометром низьких частот, відфільтрований за першим порядком, на частоті прориву «AcPB Frequ» (Гц).

3, 4, 5: додатковий фільтр = доповнення між вимірюваннями акселерометра з фільтром низьких частот та вбудованим гіроскопом з фільтром високих частот; два фільтри на частоті прориву «Comp Filter» (Гц).

6: кут, заданий гіроскопом із фільтром високих частот на частоті прориву «Gyro PH Frequ» (Гц).

Щоб підвищити точність вимірювання кута нахилу, розробники дронів додали гіроскопічний датчик: гіроскоп, опис якого був наведений вище.

Тоді діаграма вимірювання кута є протилежною діаграмою. Фільтр високих частот пов'язаний з вимірюванням гіроскопа, щоб усунути повільний дрейф останнього, передатна функція якого 1-го порядку така:

$$FT_{\text{високих частот}}(p) = \frac{\tau p}{1 + \tau p}$$

Коли частоти зрізу цих двох фільтрів рівні, ми тоді говоримо про додатковий фільтр. Щоб змодельовати асоціацію двох фільтрів за допомогою глобального «комплементарного» фільтра 1-го порядку, ми вважаємо, що:

- гіроскоп, швидкий датчик, визначає постійну часу цього додаткового фільтра;
- акселерометр, точний датчик, визначає статичне посилення додаткового фільтра.

Відповідно до технічної документації ми виділяємо наступні характеристики датчиків (див. таблицю 2.2).

Таблиця 2.2 – Параметри датчиків дрона

Датчик	Чутливість, В/(°/с)	Смуга пропускання, Гц
Гіроскоп	0,00667	75
Акселерометр	0,013	50

2.3 Дослідження динаміки системи керування рухом квадрокоптера

Дослідження динаміки системи керування рухом квадрокоптера здійснюється в програмі Scilab.

Щоб зробити систему більш ефективною, в роботі застосовано внутрішній контур регулювання швидкості (рисунок 2.15). Зовнішній контур за положенням коригується регулятором пропорційної дії, що характеризується $K_p = 0,03$. (див. рисунок 2.16).

У результаті моделювання отримано перехідні характеристики системи керування рухом квадрокоптера, які наведені на рисунках 2.17, 2.18.

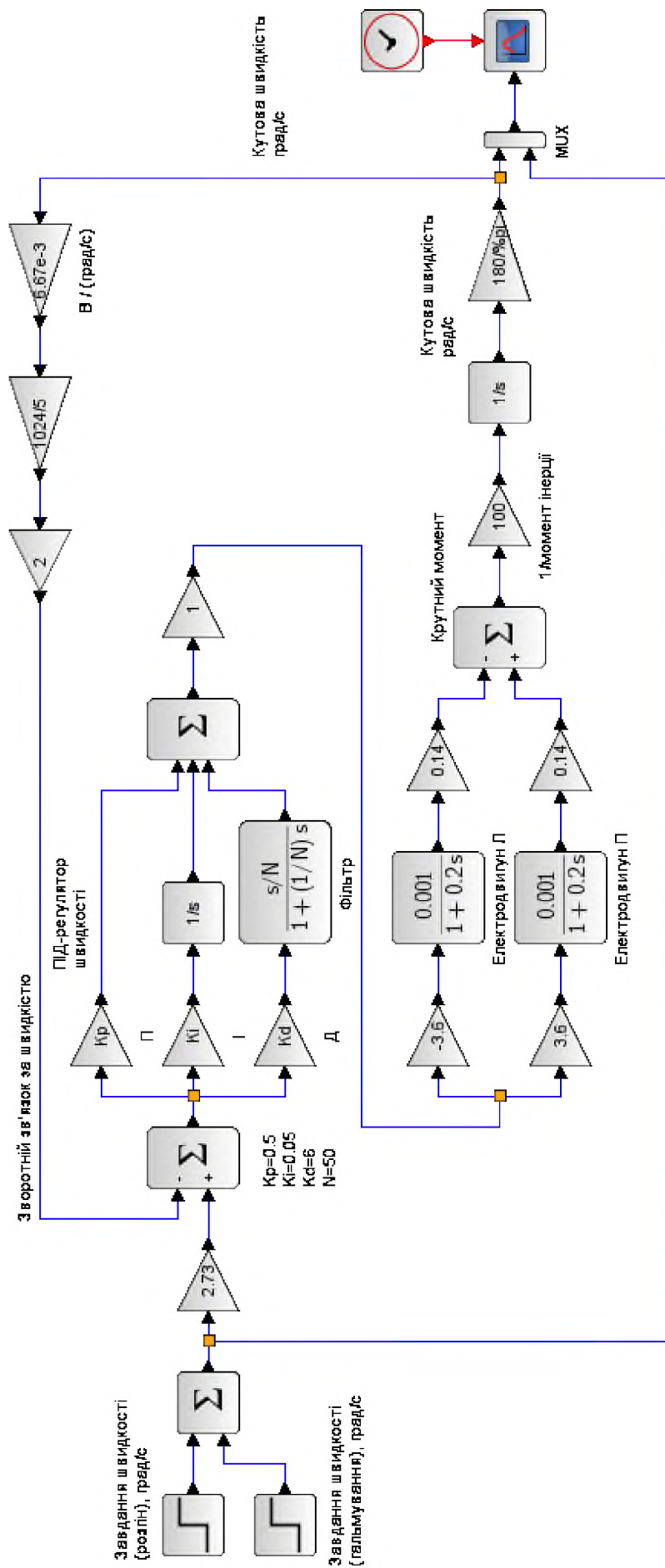


Рисунок 2.15 – Модель системи керування швидкістю

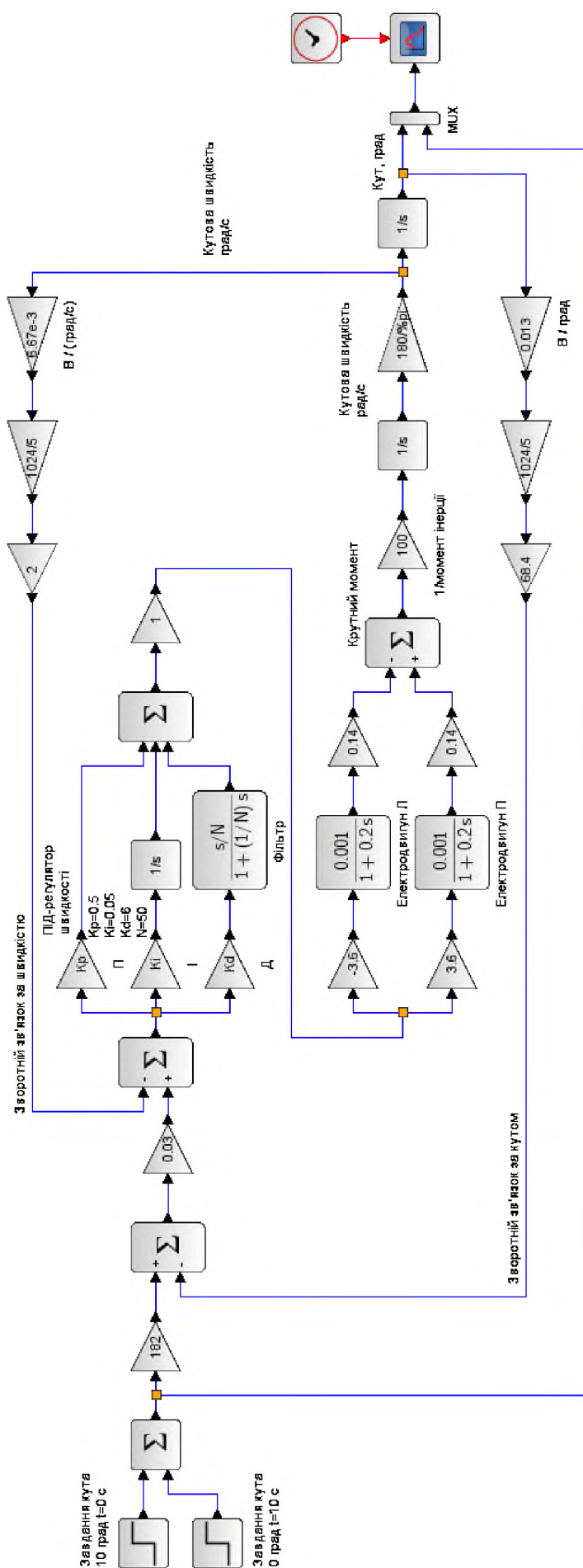


Рисунок 2.16 – Модель системи керування положенням (позиційне керування)

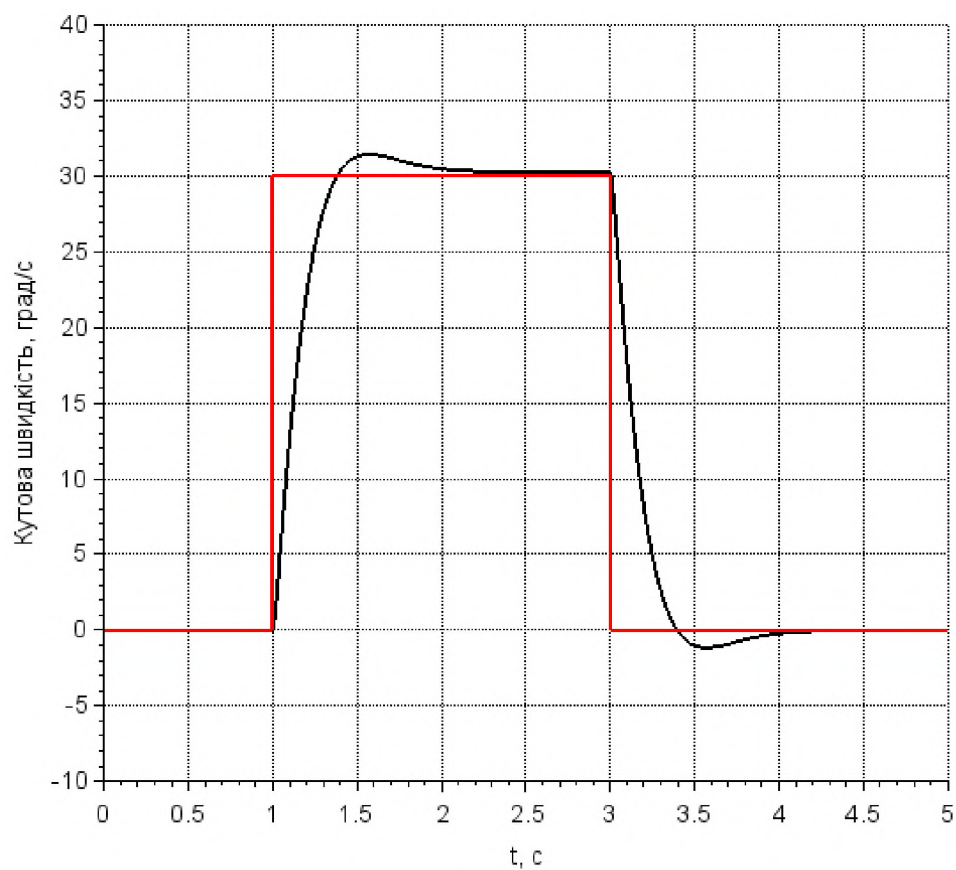


Рисунок 2.17 – Перехідна характеристика кутової швидкості

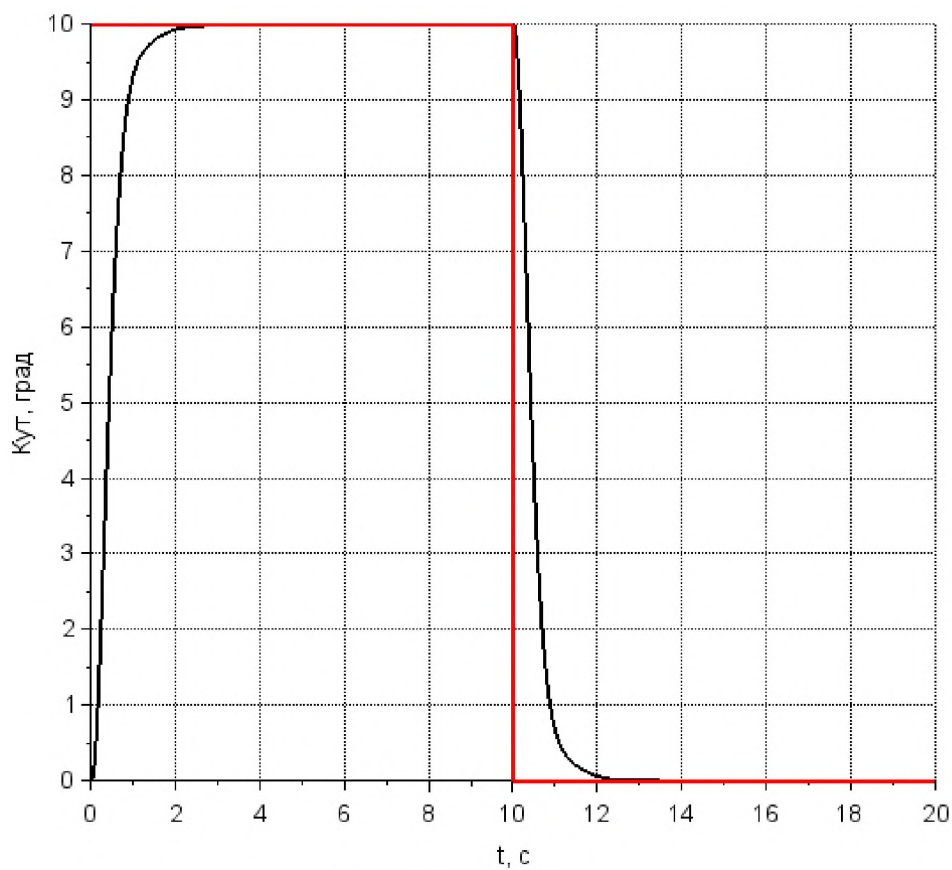


Рисунок 2.18 – Перехідна характеристика кута

Ідентифікація системи – це процес, який дозволяє отримати динамічну модель. У цьому процесі вхідні та вихідні часові дані системи вимірюються під час польоту та використовуються для розробки динамічних моделей. Процес ідентифікації системи економить час і створює точнішу модель порівняно з методом моделювання.

Крім того, основною зручністю використання системної ідентифікації є те, що структурно-інерційні характеристики системи можуть бути не обов'язково точно оцінені.

Відповідно до отриманих результатів можна зробити висновок, що в результаті керуючого впливу на систему керування квадрокоптера вдалось досягти значень в межах встановлених параметрів.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Нормативно-правове регулювання та відповідальність за порушення правил використання повітряного простору БПЛА

Порядок та організація повітряного простору України безпілотними літальними апаратами (далі БПЛА) регулюються Повітряним кодексом України, Авіаційними правилами України «Правила використання повітряного простору України» Постановою Кабінету Міністрів «Про затвердження Положення про використання повітряного простору України» від 6 грудня 2017 року № 954. Відповідальність за порушення порядку використання повітряного простору визначається Кодексом України про адміністративні порушення, Кримінальним кодексом України.

З 24 лютого 2022 року встановлено обмеження щодо використання безпілотних літальних апаратів, які визначає Закон України «Про правовий режим воєнного стану» затверджений 12 травня 2015 року № 389-VIII.

Державне регулювання діяльності в галузі авіації та використання повітряного простору України полягає у формуванні державної політики та стратегії розвитку, визначенні завдань, функцій, умов діяльності в галузі авіації та використання повітряного простору України, застосуванні заходів безпеки авіації, прийнятті загальнообов'язкових авіаційних правил України, у здійсненні державного контролю за їх виконанням та встановленні відповідальності за їх порушення.

Авіація поділяється на державну та цивільну. Державна авіація використовується з метою захисту національних інтересів України, забезпечення національної безпеки та захисту населення. Цивільна авіація призначена для задоволення потреб фізичних та юридичних осіб у здійсненні повітряних перевезень та виконанні авіаційних робіт.

У складі як державної, так і цивільної авіації можна виокремити безпілотні літальні апарати. Безпілотний літальний апарат відноситься до повітряних

суден, які використовуються у повітряному просторі без знаходження персоналу та пасажирів на його борту, управління яким здійснюється дистанційно за допомогою безпілотного авіаційного комплексу.

Відповідно до статті 8 Чиказької конвенції під БПЛА слід розуміти певне повітряне судно, пілот на борту якого не присутній. Повітряне судно за відсутності на борту пілота здійснює політ у заданому напрямі. Управляти повітряним судном можливо дистанційно, або політ його може виконуватися автономно відповідно до встановленої програми.

Відповідно до Повітряного кодексу України безпілотне повітряне судно – будь-яке повітряне судно, що експлуатується або розроблене для експлуатації автономно чи яке пілотується дистанційно без пілота на борту.

Правила використання повітряного простору України надають наступне визначення: безпілотне повітряне судно призначене для виконання польоту без пілота на борту, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються за допомогою спеціальної станції керування, що розташована поза повітряним судном.

Безпілотна авіаційна система – безпілотне повітряне судно та обладнання для дистанційного керування ним.

Порядок організації та проведення польотів безпілотних авіаційних комплексів державної авіації України регулюється Правилами виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України. Слід зазначити що цивільної авіації таких правил не затверджено.

До порушень порядку використання повітряного простору України належать:

- використання повітряного простору без подання заявок, отримання дозволу та/або умов його використання, крім випадків, що передбачені цим Положенням;
- недотримання умов використання повітряного простору України або плану польоту (відхилення від маршруту, заданого рівня польоту, зліт чи посадка повітряного судна з незапланованого (на незапланований) або закритий ае-

родром, постійний злітно-посадковий майданчик/вертодром тощо) без дозволу або погодження органу обслуговування повітряного руху (органу управління повітряним рухом), крім аварійних випадків;

- політ групи повітряних суден, кількість яких перевищує зазначену в заявці;

- порушення вимог щодо порядку перетинання державного кордону та виконання польоту в зоні з особливим режимом використання повітряного простору України;

- виконання без дозволу повітряного судна польоту в забороненій зоні або в зонах обмеження польотів та тимчасово зарезервованого повітряного простору України під час їх використання;

- політ повітряного судна, яке не відповідає на запит засобів радіолокаційної системи державного розпізнавання, крім повітряного судна, на яких апаратура радіолокаційної системи державного розпізнавання не передбачена або які повертаються з несправною апаратурою радіолокаційної системи державного розпізнавання з аеродромів, злітно-посадкових майданчиків/вертодромів, де ремонт такої апаратури неможливий;

- невиконання вимог до інформування органів контролю за дотриманням порядку використання повітряного простору України про виконання польотів та провадження іншої діяльності з використання повітряного простору України.

За правопорушення в галузі цивільної авіації до суб'єктів авіаційної діяльності Повітряним кодексом України передбачені фінансові санкції у вигляді штрафу:

- 1) від п'яти до восьми тисяч неоподатковуваних мінімумів доходів громадян у разі:

- експлуатації повітряного судна без документів, що дають право виконувати польоти, або з порушенням строку дії таких документів чи встановлених ними вимог;

- порушення правил та порядку використання повітряного простору України;
- знищення бортових чи наземних засобів об'єктивного контролю, матеріалів або документів, які можуть бути використані для з'ясування причини авіаційної події чи інциденту;
- виконання польотів на повітряному судні з порушенням строків проведення технічного обслуговування повітряного судна;
- використання аеродрому, який не відповідає типу повітряного судна або виконуваний операції для польотів повітряних суден;
- ненадання до уповноваженого органу з питань цивільної авіації інформації, обов'язкове подання якої встановлюється законодавством або авіаційними правилами України, надання недостовірної інформації або надання інформації з порушенням встановлених строків;
- порушення вимог щодо використання обов'язкових у повітряному русі знаків і сигналів для цілей, не пов'язаних з повітряним рухом;
- користування без відповідного дозволу засобами радіозв'язку на частотах, зарезервованих для здійснення радіозв'язку у повітрі;
- завдання шкоди покриттю злітно-посадкової смуги та руліжних доріжок, виведення з ладу обладнання, що використовується для потреб зльоту і посадки повітряного судна та повітряного руху, яке розміщене на аеродромі або за його межами;
- надання послуг з перевезення пасажирів або вантажу повітряним судном без відповідної ліцензії;
- здійснення повітряних перевезень без відповідного права на експлуатацію певної повітряної лінії або порушення обмежень, встановлених таким правом;
- допуску авіаційного персоналу до професійної діяльності без відповідного свідоцтва або з порушенням визначених у ньому обмежень;
- порушення порядку або строків сплати державних зборів із суб'єктів авіаційної діяльності, визначених законодавством;

— перешкоджання виконанню обов'язків та здійсненню прав державним інспектором або особою, уповноваженою на проведення перевірки, що визначені статтею 16 цього Кодексу;

2) від двох до п'яти тисяч неоподатковуваних мінімумів доходів громадян у разі:

— виконання польотів на повітряному судні, що не пройшло необхідні підготовку та обслуговування перед польотом;

— експлуатації повітряного судна без його обладнання комплектом необхідного аварійно-рятувального устаткування;

— виконання технічного обслуговування повітряного судна організаціями, які не мають сертифіката на право здійснення технічного обслуговування;

— виконання технічного обслуговування повітряного судна поза межами схвалення, визначеного сертифікатом;

— створення радіо- та оптичних завад електронним засобам, що забезпечують польоти у повітряному просторі України;

— порушення експлуатаційних обмежень завантаження та центрування повітряного судна;

— недотримання заходів безпеки, визначених уповноваженим органом з питань цивільної авіації під час льотних випробувань;

— проведення льотних випробувань без схвалених уповноваженим органом з питань цивільної авіації програм льотних випробувань;

— проведення льотних випробувань з порушенням обмежень, визначених уповноваженим органом з питань цивільної авіації;

— виконання польотів, що не входять до програми приймальних випробувань;

— виготовлення виробів авіаційної техніки, їх компонентів або обладнання з відхиленнями від схваленої типової конструкції без узгодження з розробником та схвалення уповноваженим органом з питань цивільної авіації;

- внесення в конструкцію виробу авіаційної техніки, засобів аеронавігаційного обслуговування, його компонентів та обладнання змін без узгодження з уповноваженим органом з питань цивільної авіації;
 - експлуатації виробів авіаційної техніки, компонентів та обладнання, ресурс яких закінчився або щодо яких відсутнє документальне підтвердження наявності ресурсу;
 - порушення вимог із забезпечення аварійно-рятувальних заходів та забезпечення протипожежної безпеки на аеродромах;
 - порушення вимог щодо обладнання об'єктів і перешкод, які розташовані на приаеродромній території і перетинають поверхні обмеження перешкод, денними та нічними маркувальними знаками та пристроями;
 - необґрунтованої відмови експлуатанта аеропорту (аеродрому) в наданні дозволу на посадку повітряного судна, в наземному обслуговуванні повітряного судна, у видачі авіаперевізнику слотів на виконання польотів;
 - допуску персоналу з наземного обслуговування до роботи без відповідного сертифіката;
- 3) від тисячі до трьох тисяч неоподатковуваних мінімумів доходів громадян у разі:
- несвоєчасного внесення змін до організаційно-керівних та виробничих, експлуатаційних документів експлуатанта, розробника, виробника або організації з технічного обслуговування та непогодження або несвоєчасного погодження зазначених документів уповноваженим органом з питань цивільної авіації;
 - порушення вимог уповноваженого органу з питань цивільної авіації щодо погодження кандидатур керівного складу експлуатанта;
 - невиконання або неналежного виконання персоналом суб'єктів авіаційної діяльності вимог авіаційної безпеки;
 - створення перешкод щодо проведення уповноваженим органом з питань цивільної авіації перевірок суб'єктів та об'єктів авіаційної діяльності;

- порушення встановлених вимог щодо оформлення перевізної документації для повітряних перевезень небезпечного вантажу;

4) від п'ятисот до тисячі неоподатковуваних мінімумів доходів громадян у разі:

- порушення правил безпеки під час заправлення, завантаження, буксирування та обслуговування повітряного судна;

- недотримання норм робочого та льотного часу, а також часу відпочинку персоналу експлуатанта під час здійснення льотної діяльності;

- виконання польотів без урахування відповідної інформації, визначеної авіаційними правилами України;

- порушення обліку часу напрацювання авіаційної техніки, що призвело до неможливості подальшого технічного обслуговування;

- порушення правил контролю за доступом в зону обмеженого доступу авіапідприємств;

- порушення правил контролю за безпекою польотів та авіаційною безпекою на авіапідприємствах;

- порушення правил повітряних перевезень та обслуговування пасажирів, багажу, вантажу і пошти, а також визначених нормативів якості такого обслуговування;

- надання дозволу експлуатантом аеродрому (вертодрому, злітно-посадкового майданчика) на здійснення посадок і вильотів повітряних суден на аеродромі (вертодромі, злітно-посадковому майданчику), який не має сертифіката (посвідчення про допуск до експлуатації) або має сертифікат (посвідчення про допуск до експлуатації), строк дії якого закінчився;

- порушення норм і правил, які застосовуються під час експлуатації аеродрому;

- невиконання вимог правил суб'єкта авіаційної діяльності, погоджених уповноваженим органом з питань цивільної авіації;

- ненадання перевізником пільг пасажиру, встановлених законом;

5) від трьохсот до п'ятисот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян у разі:

- незаповнення екіпажем звітної документації або порушення процедури ведення документації під час польоту;
- порушення встановлених строків зберігання виробничої документації;
- порушення строків проведення метрологічних перевірок обладнання, що використовується для технічного обслуговування;
- порушення строків усунення недоліків за результатами проведених уповноваженим органом з питань цивільної авіації інспекторських перевірок, а також ненадання у визначений строк звіту про їх усунення;
- порушення вимог щодо зберігання та ведення обліку запасних частин до повітряного судна;
- ненадання встановлених послуг пасажиром з обмеженими можливостями (особам з інвалідністю).

Статтею 111 Кодексу України про адміністративні правопорушення визначено такі види відповідальності. Розміщення в районі аеродрому будь-яких знаків і пристроїв, схожих на маркірувальні знаки і пристрої, прийняті для розпізнання аеродромів, або спалювання піротехнічних виробів без дозволу адміністрації аеропорту, аеродрому, або влаштування об'єктів, які сприяють масовому скупченню птахів, небезпечних для польотів повітряних суден, – тягне за собою накладення штрафу на громадян від п'ятдесяти до чотирьохсот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян і на посадових осіб – від шістдесяти до п'ятисот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян.

Невиконання правил про розміщення нічних і денних маркірувальних знаків або пристроїв на будівлях і спорудах - тягне за собою накладення штрафу на громадян від п'ятдесяти до чотирьохсот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян і на посадових осіб – від шістдесяти до п'ятисот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян.

Пошкодження аеродромного устаткування, аеродромних знаків, повітряних суден та їх устаткування – тягне за собою накладення штрафу від п'ятдесяти до чотирьохсот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян.

Прохід або проїзд без належного дозволу по території аеропортів (крім аеровокзалів), аеродромів, об'єктів радіо- і світлозабезпечення польотів – тягне за собою накладення штрафу від шістдесяти до п'ятисот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян.

Виконання польотів з порушенням нормативно-правових актів, які регулюють діяльність авіації, – тягне за собою накладення штрафу від шістдесяти до п'ятисот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян.

Статтями 281, 282 Кримінального кодексу України визначення кримінальну відповідальність за порушення правил польотів та правил використання повітряного простору. Порушення правил безпеки польотів повітряних суден особами, які не є працівниками повітряного транспорту, якщо це створило небезпеку для життя людей або настання інших тяжких наслідків, – карається штрафом від однієї тисячі до трьох тисяч неоподатковуваних мінімумів доходів громадян або арештом на строк до шести місяців, або обмеженням волі на строк до трьох років.

Ті самі діяння, якщо вони спричинили потерпілому середньої тяжкості тілесні ушкодження або завдали великої матеріальної шкоди, – караються позбавленням волі на строк від двох до п'яти років.

Діяння, передбачені частинами першою або другою цієї статті, якщо вони спричинили загибель людей, або інші тяжкі наслідки, – караються позбавленням волі на строк від п'яти до дванадцяти років.

Порушення правил пуску ракет, проведення всіх видів стрільби, вибухових робіт або вчинення інших дій у повітряному просторі, якщо це створило загрозу безпеці повітряних польотів, – караються штрафом від однієї тисячі до трьох тисяч неоподатковуваних мінімумів доходів громадян або виправними роботами на строк до двох років, або обмеженням волі на строк до п'яти років.

Ті самі діяння, якщо вони спричинили потерпілому середньої тяжкості чи тяжкі тілесні ушкодження або завдали великої матеріальної шкоди, – караються позбавленням волі на строк від двох до п'яти років.

Діяння, передбачені частиною першою або другою цієї статті, якщо вони спричинили загибель людей, – караються позбавленням волі на строк від п'яти до дванадцяти років.

3.2 Вимоги щодо забезпечення безпеки роботи безпілотних літальних апаратів у повітряному просторі

Вимоги щодо забезпечення безпеки використання безпілотних літальних апаратів у повітряному просторі визначено розділом II Авіаційних правил України «Правила використання повітряного простору України», Правилами виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України.

Польоти БПЛА організовують користувачі повітряного простору, які планують або проваджують зазначену діяльність.

Польоти БПЛА масою до 20 кг включно виконуються без подання заявок на використання повітряного простору, без отримання дозволів на використання повітряного простору, без інформування відповідних органів та служб, за умови дотримання таких вимог:

- 1) польоти виконуються без перетинання державного кордону України;
- 2) польоти виконуються поза межами встановлених заборон та обмежень використання повітряного простору;
- 3) польоти виконуються не ближче 5 км від зовнішніх меж злітно-посадкових смуг аеродромів або не ближче 3 км від зовнішніх меж злітно-посадкової смуги злітно-посадкового майданчику /вертодромів;
- 4) польоти виконуються не ближче 500 м від пілотованих повітряних суден;
- 5) польоти не виконуються над:

- скупчення людей на відкритому просторі та над місцями щільної за-
будови;

- об'єктами (зонами), які визначені Міністерством оборони України, Міністерством інфраструктури України, Міністерством внутрішніх справ України, Державною прикордонною службою України, Службою безпеки України, Національною поліцією України, Національною гвардією України, Державною фіскальною службою України, Службою зовнішньої розвідки України, Управлінням державної охорони України, іншими військовими формуваннями та правоохоронними структурами, утвореними відповідно до законів України, та відносно яких здійснюється охорона / державна охорона (за умови позначення території навколо цих об'єктів інформаційними знаками про заборону польотів БПЛА та/або шляхом оприлюднення меж такої заборони), крім випадків виконання польотів за дозволом зазначених вище повноважних органів;

- 6) польоти виконуються в межах прямої видимості (VLOS);

- 7) максимальна висота польоту не вище:

- 120 м над рівнем земної (водної) поверхні поза межами CTR, AFIZ, ATCA, ATCZ, спеціально встановлених зон, зарезервованого повітряного простору для забезпечення польотів за спеціально встановленими маршрутами польотів державної авіації;

- 50 м над рівнем земної (водної) поверхні в межах CTR, AFIZ, ATCA, ATCZ, спеціально встановлених зон, зарезервованого повітряного простору для забезпечення польотів за спеціально встановленими маршрутами польотів державної авіації або якщо інформація про фактичний статус елементів структури повітряного простору на час виконання польоту відсутня;

- 50 м над статичними перешкодами на горизонтальній відстані не більше 100 м від таких перешкод, як відхилення від зазначених вище обмежень по висоті, на запит власника такого об'єкту;

- 8) швидкість польоту БПЛА складає не більше 160 км/год.

В інших випадках польоти БПЛА масою до 20 кг включно та усі без винятку польоти БПЛА масою більше 20 кг виконуються у межах спеціально

встановлених зон та маршрутів з дотриманням вимог щодо подання заявок на використання повітряного простору, отримання дозволів та умов використання повітряного простору. БПЛА масою понад 20 кг підлягають державній реєстрації відповідно до вимог Правил реєстрації державних повітряних суден України.

Правилами виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України також визначається ряд положень, які стосуються безпеки використання повітряного простору України. При експлуатації БПЛА. По-перше, БПЛА повинен бути помітним з метою забезпечення його видимості та спостереження персоналом, який здійснює управління ним. При здійсненні польотів у нічний час, БПЛА мають бути оснащені бортовими вогнями. Ця вимога не поширюється на БПЛА, які виконують бойові завдання. По-друге, БПЛА мають мати розпізнавальні знаки або розпізнавальні таблички, які дозволяють їх ідентифікувати.

Виходячи з особливостей експлуатації БПЛА можна виділити передпольотний та польотний етапи забезпечення безпеки використання таких повітряних суден. На передпольотному етапі відбуваються організаційні заходи, підготовка авіаційного персоналу, перевірка стану повітряного судна та можливих умов його використання.

Організаційні заходи включають прийняття рішень щодо проведення польотів та постановку завдань на польоти авіаційному персоналу; планування польотів; підготовку до польотів авіаційного персоналу засобів управління і наземного забезпечення польотів; радіолокаційну розвідку погоди.

Підготовка авіаційного персоналу передбачає проведення організаційних заходів щодо допуску зовнішніх пілотів (операторів) до польотів та перевірка їх знань і навичок за різними видами льотної підготовки.

Передпольотна підготовка до польотів зовнішніх екіпажів включає: передпольотний медичний контроль; тренування на робочих місцях; передпольотні вказівки; виконання необхідних розрахунків для конкретних умов польоту;

огляд і прийом повітряних суден; перевірку робочих місць і підготовку їх до польоту.

На передпольотних вказівках доводяться: фактичні та очікувані на льотну зміну умови погоди в районі польотів; найбільш ймовірні відхилення умов погоди від передбачених прогнозом при нестійкому характері умов погоди; дані радіолокаційної розвідки погоди (у разі проведення); дані про фактичну й очікувану орнітологічну обстановку; заходи безпеки щодо метеорологічного та орнітологічного забезпечення польотів; час початку і закінчення польотів; злітно-посадковий курс; способи заходу на посадку; повітряна, наземна (морська) і навігаційна обстановка в районі польотів та особливості управління польотами; стан аеродрому; умови зльоту, заходу на посадку і посадки; конкретні заходи безпеки, обмеження, обумовлені фактичними метеорологічними умовами і характером польотних завдань; інші необхідні дані для успішного та безпечного виконання польотів.

На польотному етапі визначаються вимоги до наявності аеродромів, до робочого місця пілота; запуску, руління, зльоту, перебування у повітряному просторі та приземлення БПЛА.

Запуск двигуна БПЛА, руління і буксирування по аеродрому у період проведення польотів без дозволу керівника польотами на аеродромі забороняється. Запуск двигуна безпілотних повітряних суден проводиться за командою керівника польоту або без його команди з дотриманням заходів безпеки.

Забороняється запускати двигун у разі: відсутності засобів пожежогасіння; без гальмівних колодок під колесами шасі; несправності гальмівної системи та без використання стоянкового гальма; якщо струмінь газу від двигуна може пошкодити інші повітряні судна; якщо в напрямку запуску з катапульти (з руки) знаходяться перешкоди.

Зліт безпілотних літальних апаратів у випадках, якщо: на злітно-посадковій смузі знаходяться повітряні судна або перешкоди; повітряні судна що заходять на посадку, відходять на друге коло; виявлено несправності у роботі безпілотних літальних апаратів; не забезпечується безпека зльоту.

3.3 Вимоги з охорони праці та техніки безпеки при роботі з БПЛА

До самостійної роботи з БПЛА мають допускатися особи, які досягли 18 років, які пройшли теоретичне та практичне навчання, після перевірки правил його експлуатації, вимог безпеки та практичних навичок роботи в обсязі посадових обов'язків та отримання відповідного допуску, відповідають вимогам за медичними показниками, не мають протипоказань за станом здоров'я, пройшли ознайомлення з вимогами щодо техніки безпеки, охорони праці, правилами електробезпеки та пожежної безпеки на робочому місці.

Перевірка знань щодо експлуатації безпілотного авіаційного комплексу (далі БпАК) та вимог безпеки під час його роботи на, умінь і навичок щодо їх експлуатації особовим складом зовнішнього екіпажу у всіх випадках здійснюється командиром підрозділу.

Під час виконання робіт на БпАК персонал повинен знати та суворо дотримуватись вимог безпеки. Керівники, у підпорядкуванні яких постійно або тимчасово перебуває персонал, що виконує роботи з експлуатації, ремонту БпАК, забезпечують дотримання вимог безпеки та норм виробничої санітарії. За дотримання заходів безпеки під час виконання робіт на БпАК відповідає особисто кожен виконавець.

Робочі місця залежно від характеру робіт, що виконуються, і небезпечні зони мають бути обладнані загальними або індивідуальними, постійними або тимчасовими інструкціями, знаками та загородженнями безпеки.

За своєчасне попередження всіх осіб, які перебувають у небезпечних зонах, виставлення та зняття тимчасових загороджень і знаків безпеки відповідає керівник робіт. Команди попередження про небезпечні дії мають подаватися у спосіб, що гарантує їх отримання всіма спеціалістами, які перебувають в небезпечних зонах.

Інструктажі щодо заходів безпеки залежно від характеру, мети, місця і часу проведення поділяються на первинний, повторний та позаплановий. Про

проведення зазначених інструктажів здійснюються записи в контрольному аркуші проведення інструктажу з техніки безпеки.

Повторний інструктаж проводиться не рідше одного разу на півроку (на роботах з підвищеною небезпекою – не рідше одного разу на квартал). З особами, які через певні причини (відпустка, хвороба, відрядження тощо) були відсутні на роботі під час настання строку проведення періодичного (повторного) інструктажу, інструктаж проводиться перед початком роботи в перший день їх виходу на роботу.

Перед початком робіт персонал повинен бути ознайомлений з характером та умовами виконання робіт і заходами безпеки. Інструктаж проводить начальник (старший групи), який безпосередньо керує виконанням робіт.

Передпольотний медичний контроль зобов'язані пройти всі члени зовнішніх екіпажів, які беруть участь у польотах. Кожен член зовнішнього екіпажу у разі погіршення самопочуття зобов'язаний доповісти про це безпосередньому начальнику, а також лікарю (фельдшеру), який здійснює передпольотний медичний огляд.

Організація роботи особового складу з експлуатації БпАК та правила технічної експлуатації БпАК встановлюються Правил технічної експлуатації безпілотних авіаційних комплексів І класу державної авіації України.

З метою збереження БпАК необхідно:

- зберігати БпАК відповідно до вимог в штатних, призначених для зберігання ящиках (кейсах);
- своєчасно видаляти з БпЛА, наземного обладнання сніг, лід, бруд;
- не допускати під час роботи пошкодження обшивки та лакофарбового покриття БпЛА.

Контроль за технічним станом полягає в перевірці відповідності значень параметрів БпАК вимогам експлуатаційної (ремонтної) документації та визначенні на цій основі технічного стану в даний момент.

Контроль за технічним станом є основним джерелом інформації для особового складу, який експлуатує БпАК, під час визначення конкретного характеру та обсягу робіт, що підлягають виконанню на БпАК.

Види контролю технічного стану БпАК, порядок їх виконання встановлюються експлуатаційною та нормативною документацією.

Повний контроль здійснюється після завершення льотної зміни з метою:

- аналізу та оцінки безпосередніми керівниками (начальниками) підрозділів БпАК виконання польотних завдань, виявлення інцидентів і розроблення заходів щодо їх усунення;
- оцінки керівним складом стану БпАК, дотримання правил їх експлуатації, а також прогнозування їх працездатності;
- виявлення та аналізу недоліків у керівництві польотами та вжиття заходів щодо їх усунення.

Спеціальний контроль здійснюється: за потреби поглибленого аналізу роботи БпАК або виконання польотного завдання; під час підготовки та проведення спеціальних польотів; у разі виявлення відхилень у роботі БпАК; для оцінки повноти та якості підготовки БпАК до польотів; під час розслідування авіаційних подій та інцидентів.

З метою збереження БпАК необхідно:

- зберігати БпАК відповідно до вимог ЕД в штатних, призначених для зберігання ящиках (кейсах);
- своєчасно видаляти з БпЛА, наземного обладнання сніг, лід, бруд;
- не допускати під час роботи пошкодження обшивки та лакофарбового покриття БпЛА.

Зняття, встановлення компонентів та обладнання, виконання регламентних і ремонтних робіт проводяться з дотриманням заходів, що унеможливають потрапляння інструменту, деталей (гвинтів, болтів, контрвального матеріалу), робочих рідин, пилу, дощу, снігу в двигуни, на електричні роз'єми та агрегати.

Перестановка компонентів та обладнання з одного БпАК на інший допускається з дозволу старшого інженера (інженера) – начальника ІАС військової частини (установи, організації) з обов’язковим записом про це у відповідних розділах формулярів (паспортів) БпАК, компонентів та обладнання, а також у журналах підготовки та застосування БпАК.

Компоненти та обладнання, що надійшли зі складів і баз та зняті з інших БпАК, для визначення їх справності перед встановленням на БпАК оглядаються та перевіряються на відповідність технічним вимогам основних параметрів. Обсяг перевірки встановлює старший інженер (інженер) – начальник ІАС (командир підрозділу БпАК).

Після заміни окремого компонента або комплекту апаратури в цілому на БпАК проводиться повна перевірка працездатності всієї системи, до складу якої входить компонент або апаратура.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі надані результати, які узагальнюють теоретичні дослідження системи керування рухом квадрокоптера.

1. Розглянуто різні підходи до класифікації безпілотних літальних апаратів, здійснено критичну оцінку окремих підходів. Згруповано існуючі безпілотні літальні апарати за такими ознаками: вага; дальності та тривалості польоту; максимальна висота польоту; навантаження на крило; тип двигуна та потужність.

Розглянуто переваги та недоліки застосуванні двигунів внутрішнього згоряння, електричних двигунів в безпілотних літальних апаратах. Окреслено переваги застосування безколекторних електричних двигунів.

Розкрито рівні та складові системи керування квадрокоптера. В системі керування БПЛА можна виділити три рівні автоматизації: верхній – рівень диспетчеризації та адміністрування, що здійснює взаємодію між оператором (диспетчером, користувачем) через інтерфейс із контролерами середнього рівня; середній – рівень автоматизованого керування процесами за допомогою контролерів, модулів введення-виведення сигналів та комутаційного обладнання; нижній (Field Level) – рівень кінцевих пристроїв, що включає в себе датчики та механізми.

2. Побудовано функціональну схему квадрокоптера DJI Mavic 3, визначено підсистеми та елементи системи керування рухом квадрокоптера. Розроблено динамічну модель керування рухом квадрокоптера та виконано розрахунок параметрів її елементів.

3. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Scilab в роботі виконано моделювання та проведено аналіз якості керування системи руху квадрокоптера. Аналіз результатів дослідження якості показав, що система керування рухом квадрокоптера має динамічні показники, які цілком задовольняють сформульованим вимогам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конверський А. Є. Логіка : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2017. 392 с.
2. Повітряний кодекс України : Закон України від 19.05.2011 № 3393-VI. Відомості Верховної Ради України. 2011. № 48–49. Ст. 536
3. Про затвердження Правил використання повітряного простору України : Наказ Міністерства оборони України, Міністерства інфраструктури України від 11.05.2018 № 211/257. Офіційний вісник України. 2018. № 75. Ст. 2516.
4. Тимочко О. І., Голубничий Д. Ю., Третяк В. Ф. Класифікація безпілотних літальних апаратів. Системи озброєння і військова техніка. 2007. № 1. С. 61–66.
5. Austin R. Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment. Chichester : John Wiley & Sons, 2010. 332 p.
6. Гуменчук О. В., Кулик М. С. Двигуни безпілотних літальних апаратів : підручник. Київ : НАУ, 2015. 280 с.
7. Возняк Г. В. Безколекторні двигуни постійного струму та системи їх керування для автономних літальних апаратів. Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. 2019. № 2 (84). С. 112–119.
8. Автоматизовані системи керування та збору даних (SCADA) : навч. посіб. / І. В. Корнієнко, О. М. Петров. Харків : ХНУРЕ, 2018. 210 с.
9. Спадко Т. М. Використання мікромеханічних інерціальних модулів (IMU) у системах стабілізації та орієнтації БПЛА. Авіаційна техніка і технологія. 2020. № 4. С. 45–52.

10. DJI Mavic 3 User Manual v1.2. DJI Support, 2021. URL: https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3/DJI_Mavic_3_User_Manual_v1.2_en.pdf (дата звернення: 02.06.2026).

11. DJI Mavic Pro User Manual v2.0. DJI Support, 2017. URL: https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic/Mavic_Pro_User_Manual_v2.0_en.pdf (дата звернення: 02.06.2026).

12. Сидоренко А. О., Коваленко Д. М. Математичне моделювання динаміки та систем керування квадрокоптера в середовищі Scilab/Xcos. Технічні науки та технології. 2021. № 2 (24). С. 115–123.

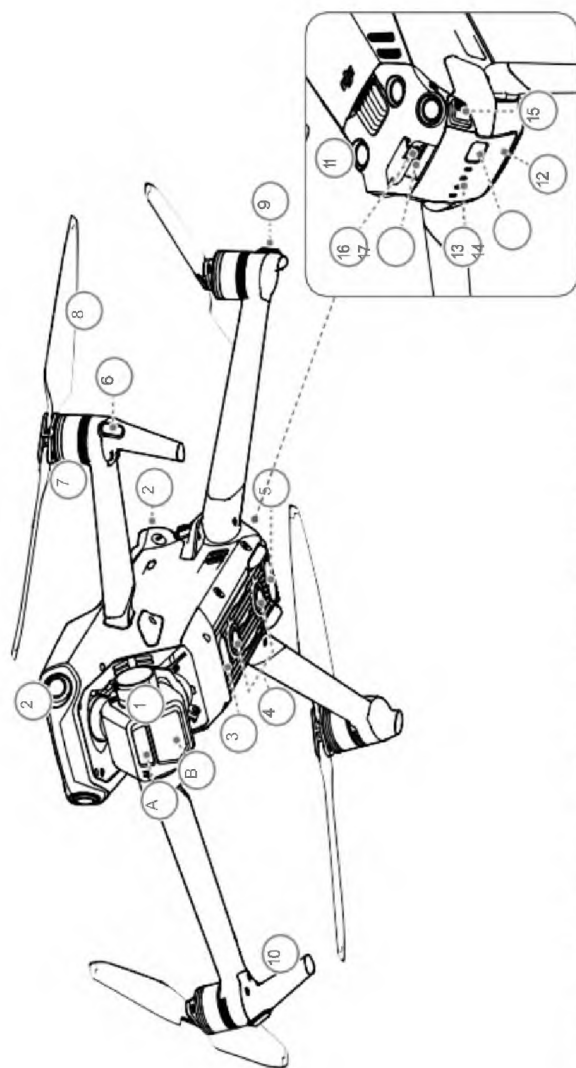
13. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : Либідь, 2007. 656 с.

14. Ljung L. System Identification: Theory for the User. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1999. 609 p.

Мультимедійна презентація

6

Загальний вигляд DJI Mavic 3



1 - підвіс і камера (A телекамера; B камера Hasselblad L2D-20c); 2 - система горизонтального все направленного бачення; 3 - допоміжне нижнє освітлення; 4 - система огляду вниз; 5 - інфрачервона сенсорна система; 6 - передні світлодіоди; 7- двигуни; 8 — пропелери; 9 - індикатори стану літака; 10 - шасі (вбудовані антени); 11 - система огляду вгору; 12 - телектуальна літальна батарея; 13 - світлодіоди рівня заряду батареї; 14 - кнопка живлення; 15 -пряжки акумулятора; 16 - порт USB-C; 17 - гніздо для карти microSD

Рисунок А.1 – Слайд 1 мультимедійної презентації

Блок-діаграма квадрокоптера

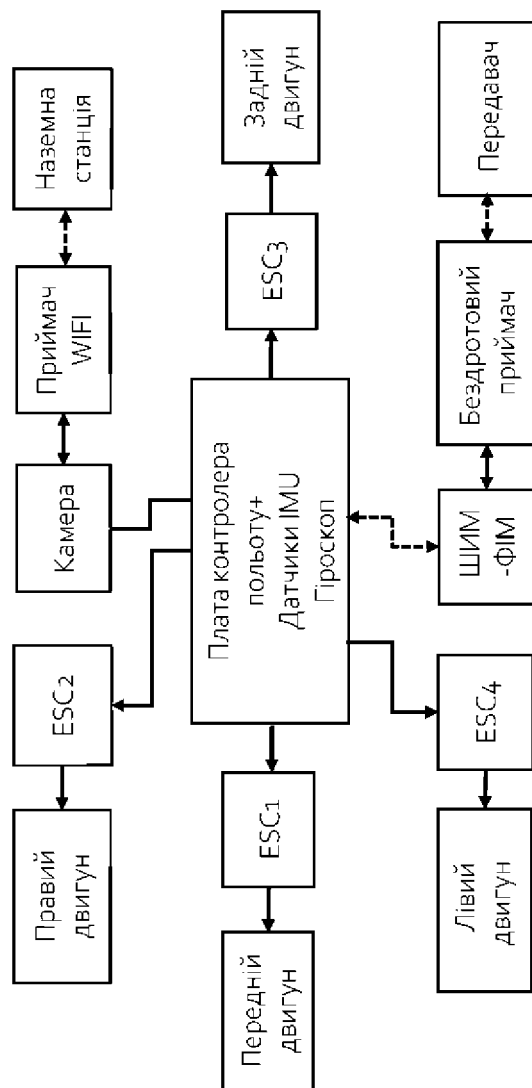


Рисунок А.2 – Слайд 2 мультимедійної презентації

Дослідження динаміки

10

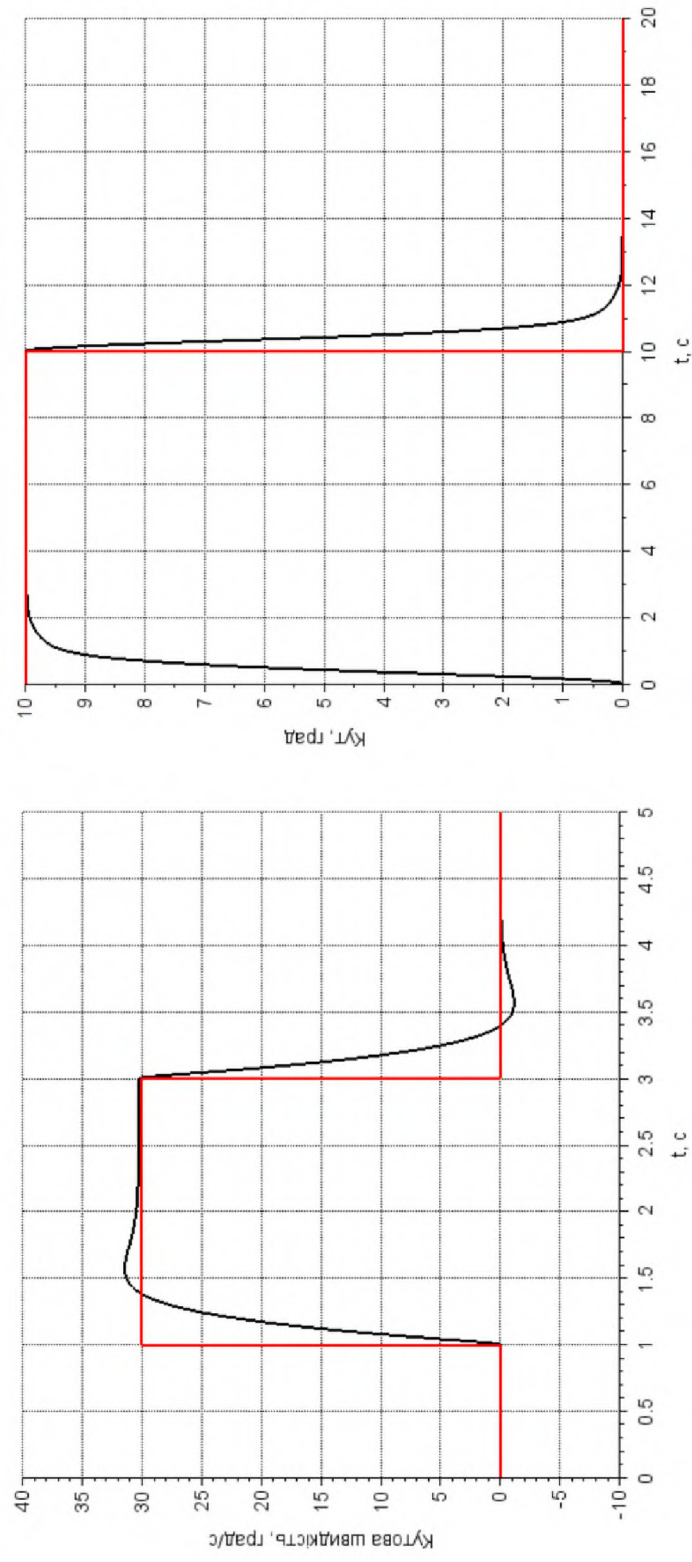


Рисунок А.5 – Слайд 5 мультимедійної презентації