

ДИПЛОМНА РОБОТА

Другий (магістерський)

Освітній рівень

Галузь знань 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Шифр і назва спеціальності

Спеціальність 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Шифр і назва спеціальності

Освітня програма 172 Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі

Шифр і назва освітньої програми

на тему **МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РОБОТИ
FPV-ДРОНІВ**

ДРЕКР.023165.01.03 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група ЕКР_м-23-1



підпис

Р. А. Сілідуєв
Ініціали, прізвище

Керівник: к.т.н., доцент



підпис

В. І. Стецюк
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри: д-р техн. наук, доцент



підпис

С. К. Підченко
Ініціали, прізвище

12.12

2024 р.

Факультет *інформаційних технологій*

Кафедра *телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій (ТМІТ)*

Освітній рівень *другий (магістерський)*

Галузь знань *17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації*

Спеціальність *172 – Електронні комунікації та радіотехніка*

Освітня-професійна програма *Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою ТМІТ

 С. К. Підченко

«2» Вересня 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ**

Сілідусву Роману Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Метод підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів

керівник роботи Стецюк Віктор Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

К. т. н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом по університету від «26» серпня 2024 р. № 60.

2. Строк подання студентом роботи на кафедру: 02.12.2024 р.

3. Вихідні дані (характеристика об'єкта, умов дослідження та ін.)

Мета роботи підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів

Об'єкт дослідження теплові та вібраційні процеси безпілотних літальних апаратів

Предмет дослідження FPV-дрони

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити):

1. Провести аналітичний огляд існуючих рішень, здійснити класифікацію безпілотних літальних апаратів та FPV-дронів.

2. Сформувати математичний апарат аналізу механічних впливів на елементи конструкції безпілотного літального апарату.

3. Здійснити імітаційне моделювання та стрес-аналіз елементів конструкції дрона.

4. Запропонувати апаратну реалізацію теплового та акселерометричного моніторингу.

Завдання отримав

Науковий керівник

 Сілідус Р. А.
 Стецюк В.

АНОТАЦІЯ

Тема магістерської роботи: «Метод підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів»

Автор роботи: Сілідуєв Роман Анатолійович

Керівник роботи: канд. техн. наук, доцент Стецюк Віктор Іванович.

Пояснювальна записка: 91 сторінок, 57 рисунків, 3 таблиці, 20 джерел

Графічна частина: слайди презентації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: безпілотний літальний апарат, дрон, двигун, політний контролер, тепловий моніторинг, акселерометричний моніторинг, авіоніка.

Метою магістерської роботи є підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів.

Об'єктом дослідження є теплові та вібраційні процеси безпілотних літальних апаратів.

Предметом дослідження є FPV-дрони.

У першому розділі проведено аналітичний огляд існуючих рішень, здійснено класифікацію безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та FPV-дронів. Показано, що механічні складові та авіоніка знаходяться під дією двох дестабілізуючих факторів – температури та вібрації, які виникають на деяких режимах роботи БПЛА.

В другому розділі розроблено загальний математичний апарат аналізу механічних впливів на елементи конструкції безпілотного літального апарату. Здійснено аналіз статичних та динамічних напружень рами дрона, особливо в критичних ділянках. Визначено діапазони частот власних резонансів дрона та його основних складових, рекомендується ряд антирезонансних заходів на основі акселерометричного моніторингу поточного стану.

В третьому розділі на основі розробленої математичної моделі в середовищах SolidWorks та MATLAB/Simulink проведено імітаційне моделювання та стрес-аналіз елементів конструкції дрона.

В четвертому розділі запропонована апаратна реалізація теплового та акселерометричного моніторингу, оснований на введенні додаткових електронних складових – сенсорів температури та вібрації. Отримана сенсорна телеметрія дозволяє штатному політному контролеру уникати деструктивних явищ елементів конструкції БПЛА.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	6
ВСТУП	7
1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ	13
1.1. Історичні передумови	13
1.2. Економічні та політичні тенденції	24
1.3. Класифікація БПЛА та FPV-дронів	26
Висновки до розділу 1	33
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	34
2.1. Конструкція дрона	34
2.2. Аналіз вібраційної стійкості конструкції дрона	41
Висновки до розділу 2	54
3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	55
Висновки до розділу 3	61
4. АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ	62
4.1. Сенсори дрона	62
4.1.1. Контроль температури	62
4.1.2. Акселерометричний контроль	71
4.1.3. Додаткове обладнання	78
4.2. Підбір двигунів	79
4.3. Вибір пропелерів	80
Висновки до розділу 4	86
ВИСНОВКИ	88
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	90
Додатки	92
Додаток А. Слайди презентації	93
Додаток Б Копії публікацій.....	108

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП –	Аналогово-цифровий перетворювач
БпЛА –	Безпілотний літальний апарат
ЕРС –	Електрорушійна сила
MEMS –	мікроелектромеханічні системи
ШИМ –	Широтно-імпульсна модуляція (англ. pulse-width modulation, PWM)
CAN –	Controller Area Network – мережа обміну даними між контролерами та периферійними пристроями (являється стандарт промислових мереж)
I ² C –	Inter-Integrated Circuit (ІІС, I ² C) – послідовний синхронний двопровідний інтерфейс
GPS –	Global Positioning System – американська система глобального просторового позиціонування
HUB –	концентратор транспортних потоків
HVAC –	Heating, Ventilation, & Air Conditioning – технологія клімат-контролю
MEMS –	Micro-electromechanical systems – мікроелектромеханічні системи
SMBus –	System Management Bus – послідовний протокол обміну даними, оснований на шині I ² C
SPI –	Serial Peripheral Interface – послідовний інтерфейс
FIFO –	First in, first out – спосіб організації та маніпулювання даними щодо часу та пріоритетів – “першим прийшов – першим пішов”
FPV –	First Person View – вид від першої особи

ВСТУП

Логічним розвитком цивілізації в будь-якій області науки і техніки є винайдення нових методів, матеріалів, технологій, вдосконалення певних технологічних процесів та засобів, тощо. Так склалось еволюційно: від примітиву до високих технологій з різницею лише у градієнтах часової послідовності. Тобто в одних областях еволюція відбувалася повільними темпами, певні засоби і методи не змінювалися століттями, а в інших відлік йшов на десятиліття, роки або навіть місяці. Останнє твердження якраз відноситься до розвитку електроніки, її апаратної та особливо програмної реалізації.

Все вище сказане в повній мірі відноситься і до авіації. Тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і дронів активно формуються під впливом технологічного прогресу, військових, комерційних і наукових потреб. Ось ключові напрями розвитку:

1. Мініатюризація:

- розвиток мікро- та наноелектроніки, МЕМС технологій;
- зменшення масогабаритних показників літальних апаратів дозволяє використовувати їх у важкодоступних місцях та для специфічних завдань;
- популярність отримують нанодрони, що використовуються для спостереження, моніторингу або навіть доставки невеликих вантажів.

2. Збільшення автономності за часом польоту:

- вдосконалення методів акумулювання енергії;
- розробка нових типів акумуляторів;
- впровадження гібридних технологій;
- використання альтернативних джерел енергії (сонячна, воднева, термоядерна);
- зниження енергоспоживання електронних компонент.

3. Аграрний сектор:

- моніторинг посівів;

- обробка сільськогосподарських культур, дозування внесення добрив і пестицидів;

- прогнозування врожайності.

4. Екологічний моніторинг навколишнього середовища:

- стан атмосфери;

- стан водних басейнів;

- зміни клімату;

- лісові пожежі;

- танення льодовиків;

- дослідження хвороб рослин;

- незаконне вирубування лісів;

- вулканічна діяльність та інш.

5. Військові застосування:

- FPV-дрони;

- дрони-камікадзе;

- високоточне наведення;

- стратегічна розвідка;

- скритність та маневреність;

- стелс-технології, тощо.

6. Логістика та доставка:

- розвиток комерційних сервісів доставки (Amazon, DHL), особливо у віддалених або міських районах;

- автоматичне оновлення запасів на складах після сканування дронами;

- використання в гуманітарних цілях, наприклад, доставка ліків, крові чи їжі у важкодоступні зони.

7. Розробка нових матеріалів:

- використання композитних матеріалів (легкість, міцність, непомітність виявлення);

- розвиток гнучких конструкцій для компактного транспортування.

8. Мультифункціональність:

- комбінування функцій (зйомка, сканування, перевезення вантажів);
- розробка підводних дронів та дронів-амфібій.

9. Інтеграція з іншими системами:

- з геоінформаційними системами (ГІС) – використання даних дронів для створення детальних карт місцевості, тривимірних моделей, аналізу ґрунтів, ландшафтів;

- оновлення інформації у реальному часі для аналізу та планування;

- штучний інтелект (ШІ): виконання складних завдань без втручання людини, зокрема розпізнавання об'єктів, автономна навігація, ухилення від перешкод, аналітика та машинне навчання, виявлення аномалій, прогнозування, обробка зображень для розпізнавання пошкоджень інфраструктури тощо;

- об'єднання дронів у рої (swarming) для виконання спільних завдань, наприклад, розвідки, атаки чи створення віртуальних бар'єрів.

- підключення до систем інтернету речей (IoT) для обміну даними в реальному часі (температурні датчики, детектори вологи, газоаналізатори, робота у важкодоступних місцях, наприклад трубопроводи, електромережі, ліси, пересічна місцевість);

- системи управління трафіком дронів (UTM) – синхронізація і координація польотів дронів, запобігання зіткненням та управління польотами;

- з робототехнікою (співпраця з наземними роботами для спільного виконання завдань, наприклад, дрони обстежують місцевість, а наземні роботи виконують фізичні роботи.

- із системами моніторингу надзвичайних ситуацій;

- з GPS та іншими навігаційними системами для швидкого пошуку людей у небезпечних умовах;

- поєднання із системами комунікацій для передачі сигналів у важкодоступних місцях.

- з логістичними платформами (управління складом, взаємодія із базами даних замовлень для автоматичної доставки товарів, координація між повітряними та наземними засобами).

- з оборонними системами (поєднання з радарми, супутниками та наземними контрольними пунктами, інтеграція з бойовими системами та комплексами).

Ці тенденції продовжують еволюціонувати, розширюючи можливості використання дронів у всіх сферах людської діяльності.

Актуальність роботи полягає у підвищенні ефективності режимів роботи FPV-дронів шляхом підбору, вдосконалення та моніторингу стану окремих вузлів. Відомо ряд робіт [7-10], присвячених розгляду теорії гармонійного аналізу конструкцій та вібраційних процесів в авіоніці [12]. В ряді робіт [13, 14] приводиться загальний математичний апарат аналізу механічних впливів на раму конструкції безпілотного літального апарату. В даній роботі розроблено математичний апарат акселерометричного моніторингу окремих вузлів дрона. Здійснено аналіз статичних та динамічних напружень рами дрона, особливо в критичних ділянках (на кінцях, в точках кріплення двигунів). Визначено діапазони частот власних резонансів дрона та його основних складових, рекомендується ряд антирезонансних заходів на основі акселерометричного моніторингу поточного стану. Розвиток та вдосконалення безпілотних літальних апаратів є актуальною складною науково-технічною задачею, що відповідає сьогоднішнім потребам суспільства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Магістерська робота виконана відповідно до поточних та перспективних планів наукової роботи Хмельницького національного університету, кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій за тематикою дослідження безпілотних літальних апаратів.

Мета роботи і задачі дослідження.

Метою дипломної роботи є підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані наступні задачі:

1) провести аналітичний огляд існуючих рішень, здійснити класифікацію безпілотних літальних апаратів та FPV-дронів;

2) сформувавши математичний апарат аналізу механічних впливів на елементи конструкції безпілотного літального апарату;

3) здійснити імітаційне моделювання та стрес-аналіз елементів конструкції дрона;

4) запропонувати апаратну реалізацію теплового та акселерометричного моніторингу.

Об'єкт дослідження – теплові та вібраційні процеси безпілотних літальних апаратів.

Предмет дослідження – FPV-дрони.

Методи дослідження. Дослідження базуються на загальних положеннях математичного, тензорного аналізу та імітаційному моделюванні. Теоретичні дослідження проводилися з використанням комп'ютерних методів аналізу вібраційних процесів та теорії резонансу. Моделювання здійснювалося засобами SolidWorks. Експериментальні дослідження проведені з використанням теорії планування експерименту, теорії вимірів та обробки результатів експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів.

Створено математичну модель аналізу механічних впливів на елементи конструкції безпілотного літального апарату.

В рамках поставлених задач, удосконалено методи стрес-аналізу, показано, що тепловий та акселерометричний моніторинг являються важливими аспектами проектування БпЛА.

Проведено детальну класифікацію безпілотних літальних апаратів та FPV-дронів.

Запропоновано унікальні варіативні схеми апаратної реалізації теплового та акселерометричного моніторингу дронів, які можуть бути застосовані на практиці при конструюванні та проектуванні авіонки.

Практичне значення отриманих результатів.

Робота пройшла апробацію:

- міжнародна наукова конференція у Португалії: Стецюк В. І. Тепловий моніторинг двигунів дронів / В. І. Стецюк, Р. А. Сілідюєв // XIV Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference «The latest technologies in scientific activity and the educational process», December 03-06 2024, Porto, Portugal. – p. 118-124. ISBN–979-8-89619-788-1. DOI–10.46299/ISG.2024.2.14. URL:<https://isg-konf.com/the-latest-technologies-in-scientific-activity-and-the-educational-process/>.

- міжнародна наукова конференція Німеччині: Стецюк В. І. Акселерометричний моніторинг стану безпілотного літального апарату / В. І. Стецюк, Р. А. Сілідюєв // XIV International Scientific and Practical Conference "Current problems of mankind and ways to solve them", December 02-04, 2024, Munich, Germany. – p. 397-401. ISBN–9-789-40377-086-4. URL:<https://eu-conf.com/en/events/current-problems-of-mankind-and-ways-to-solve-them/>.

Публікації. На базі даної магістерської роботи була опублікована стаття у фаховому науковому журналі: Стецюк В. І. Підвищення ефективності роботи FPV-дронів / В. І. Стецюк, Р. А. Сілідюєв // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2024. – № 6. Том 2. – серія: технічні науки. – С.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Історичні передумови.

Здійснивши екскурс в історію людства, ми побачимо, що людина завжди прагнула літати. Кожен із нас, мабуть, переживав яскраві відчуття польоту уві сні. Спочатку це були просто фантазії, прагнення повторити навколишній світ, імітувати навколишню фауну. Згодом – перші спроби запустити в небо якісь об'єкти, наприклад повітряного змія. Подібним спробам вже більше двох тисяч років. У Китаї повітряні змії та ліхтарики існували ще за кілька століть до нашої ери [1]. Це вже можна назвати прикладами перших технічних засобів повітроплавання. Звісно були спроби стрибків з веж за допомогою різноманітних засобів, зробити крила або щось подібне до парашуту. Напевно першим винаходом, який знаходиться найближче до сучасних дронів були китайські іграшки – бамбукові вертольоти з обертовими роторами, які існували ще з 4 століття до н. е., рис. 1. У Європі подібні вироби почали з'являтися тільки у 14 столітті вже нашої ери.

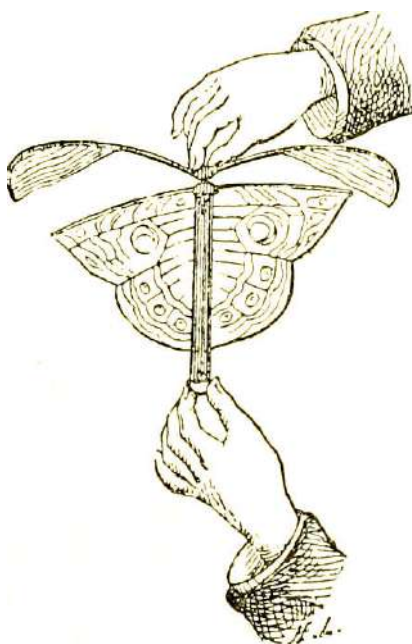


Рисунок 1.1 – Китайська іграшка у вигляді бамбукового вертольоту

Перший великий внесок у відкриття автономних механізмів відбувся за часів Піфагора і приписується Архіту з Таранти (південна Італія) – 428-347 р. до н. е., який був одним із засновників математичної механіки. Він створив перший прототип БпЛА у вигляді механічного птаха (рис. 1.2), який міг рухатися за допомогою пару [3].

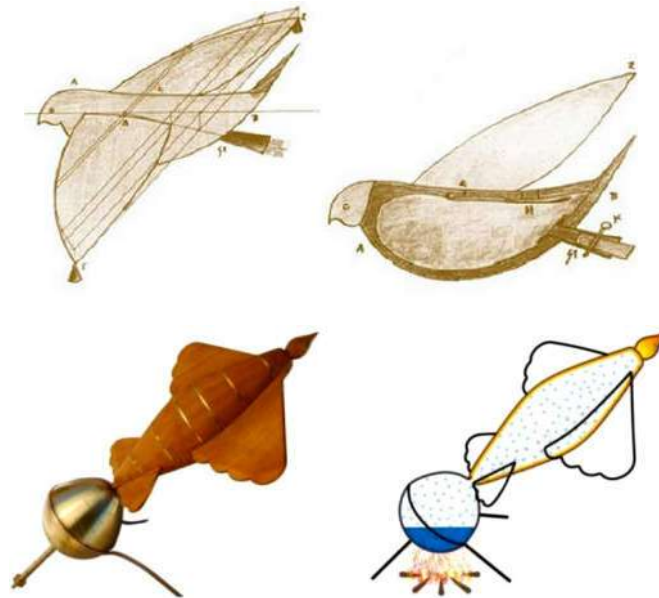
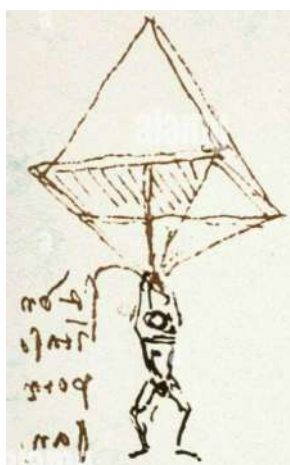


Рисунок 1.2 – Голуб-дрон Архіта на паровій тязі
(літальна машина античності)

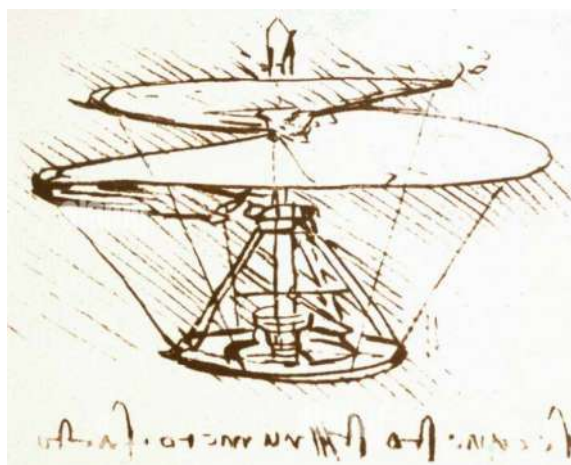
Літучий голуб Архіта – перша автономна літальна машина античності. Він складався з легкої але міцної ємності – герметичного котла та дерев'яного кеорпуса у вигляді голуба, в якому розміщувався бичачий сечовий міхур. Він включав крила, виступаючі з обох боків і менші крила позаду, схожі на хвостові стабілізатори. Разом ця система утворювала потужний поршневий повітряний насос. Коли тиск пари або повітря перевищував механічний опір з'єднання, голуб запускався і продовжував свій політ на кілька сотень метрів, за допомогою сили стисненого повітря, яке виходило із сечового міхура, відповідно до принципів аеродинаміки.

Великий вклад у розвиток повітроплавання зробив Леонардо да Вінчі (1452-1519 р.): парашут, орнітоптер (дельтаплан), прототипи вертольотів, тощо (рис. 1.3). Так, наприклад, парашут який мав розміри $7 \times 7 \times 7$ м, був

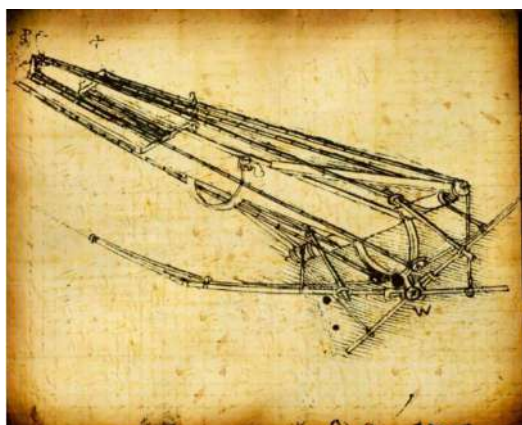
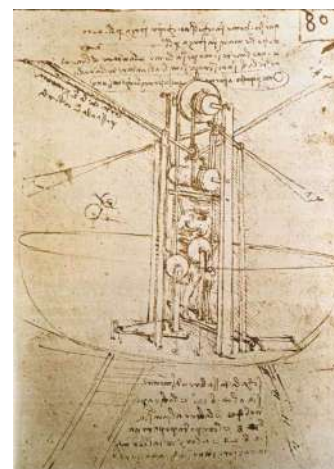
сконструйований уже в наш час і перевірений швейцарцем Олів'є Теппом. Він стрибнув з парашутом да Вінчі з висоти 650 метрів і стрибок був повністю безпечним. Інший літальний апарат – прототип вертольоту, використовував принцип повітряного гвинта, подібного до гвинта Архімеда, забезпечуючи пристрою вертикальний зліт. Сам гвинт був виготовлений з дерева і льону. Наступна літаюча машина – орнітоптер (прототип дельтаплану) створена під враженням від польоту кажанів. За задумом да Вінчі, пілот мав лежати в центрі апарта і крутити педалі, які передають мускульну силу руху крил.



а)



б)



в)

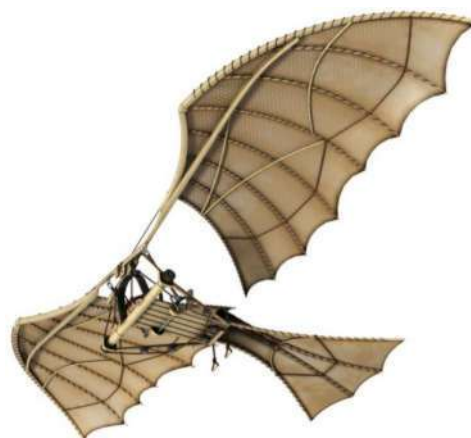


Рисунок 1.3 – Винаходи Леонардо да Вінчі в області повітроплавання:

а) парашут; б) прототипи вертольотів; в) орнітоптери

Перший в історії коаксіальний ротор з пружинним приводом запропонував Михайло Ломоносов, який продемонстрував його у липні 1754 року, рис. 1.4.

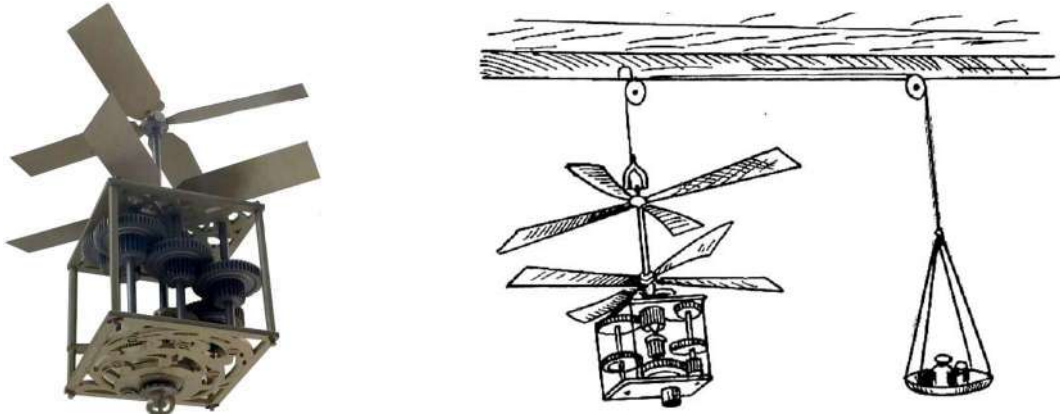


Рисунок 1.4 – Осьовий ротор Ломоносова, 1754 р.

Безпілотні літальні апарати – це не тільки авіація і авіонка, цей термін також охоплює питання автоматизації, робототехніки, адже пілот відсутній і всі рішення по керуванню здійснюються дистанційно або автономно. З огляду на такий підхід, слід пригадати Французького винахідника Жака де Вокансона (1738 р.), який свого часу створив низку автономних роботів, серед яких є механічний птах – качка. Модель-автомат мала понад 400 різних частин і могла махати крилами, їсти, перетравлювати і навіть здійснювати дефекацію травленої їжі (рис. 1.5). На той час – досить вражаючий робот!

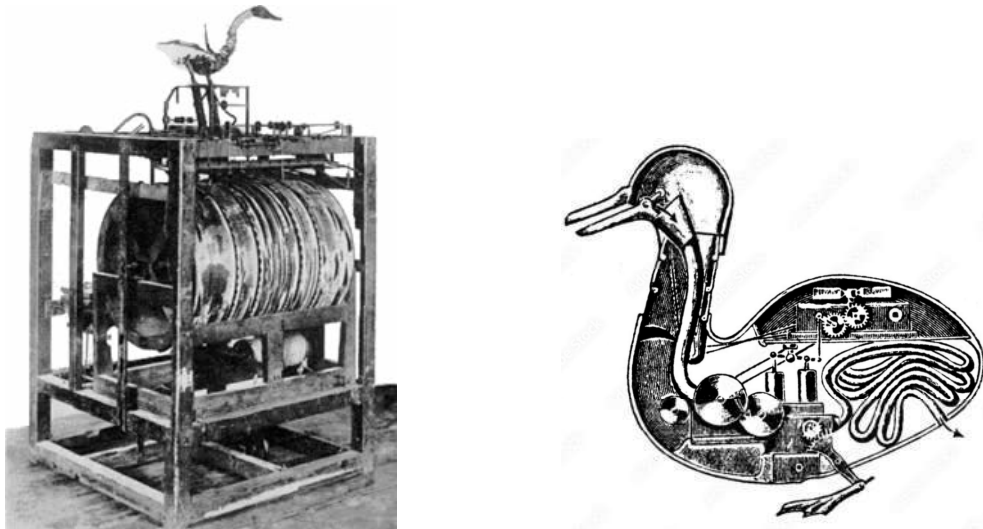


Рисунок 1.5 – Механічна качка Жака де Вокансона

У 1783 р. французькі винахідники Лаунуа та Б'єнвеню (Launoy та Bienvenue) представили подібну модель гвинта, основу на ідеї китайської іграшки у вигляді бамбукового вертольоту і моделі Ломоносова (рис. 1.6) [3].

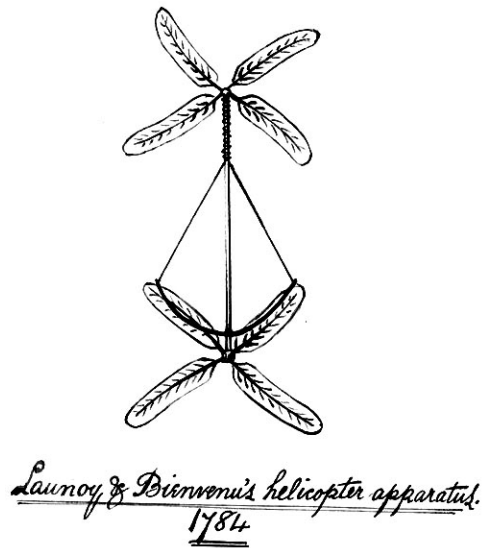


Рисунок 1.6 – Пропелер протилежного обертання, 1783

Ця рання конструкція, влучно названа «гелікоптером», мала захоплюючу рухову систему: два коаксіальних ротори з опереннями, що приводилися в рух накопиченою енергією пружно закрученої тятиви. Ці ротори, кожен діаметром приблизно фут, імітували помаху крилами птахів. Ця новаторська концепція послужить трампліном для майбутнього розвитку вертольотів.

У 1840 році Гораціо Фредерік Філіпс (піонер англійської авіації) сконструював машину, здатну здійснювати вертикальні польоти. Він містив мініатюрний котел для генерування пари. Однак Гораціо Філіпс ввійшов в історію як один із перших конструкторів мультипланів (рис. 1.7), які можна вважати родоначальниками сучасних мультікоптерів.

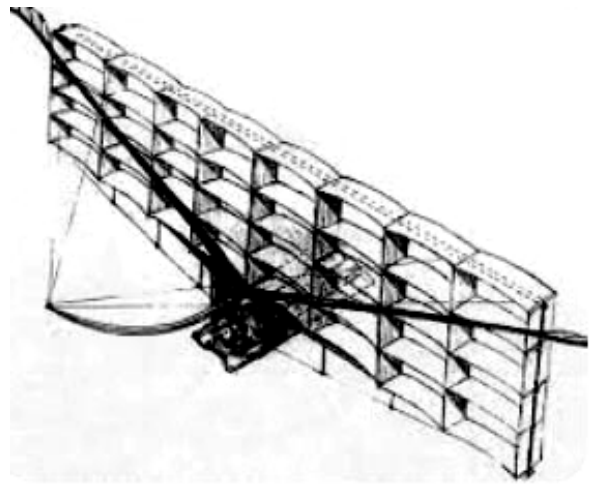


Рисунок 1.7 – Мультиплани Гораціо Фредеріка Філіпса

Французькі винахідники Гюстав де Понтон д'Амекур і Гійом Жозеф Габріель де Ла Ландель побудували в 1861 році невеликий експериментальний прототип аеростату, важчого за повітря, з ротором, що обертається протилежно, і двома коаксіальними гвинтами. У двоциліндрового парового двигуна котел був зроблений з алюмінію, абсолютно нового на той час матеріалу. В 1860 році Понтонд'Амекур літав на моделях гелікоптерів, що приводилися в рух парою (рис 1.8) [3]. Габріель де ла Ландель був морським офіцером, тому не дивно, що в його уяві народжувалися подібні ідеї.

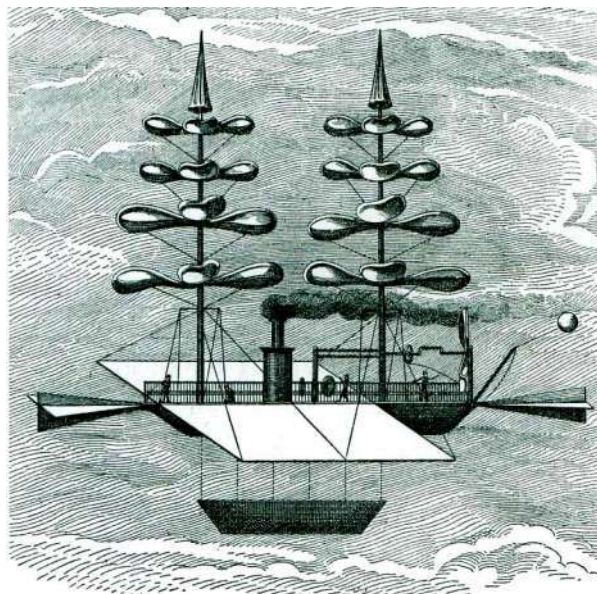


Рисунок 1.8 – Уявний вертоліт, що переміщується паром
(Габріель де ла Ландель)

Гюстав де Понтон д'Амекур запропонував слово “гелікоптер” від давньогрецького $\acute{\epsilon}\lambda\lambda\acute{\iota}\xi$, $\acute{\epsilon}\lambda\lambda\acute{\iota}\kappa\omicron\varsigma$ («спіраль, пропелер») і $\pi\tau\epsilon\rho\acute{\omicron}\nu$ або $\pi\tau\epsilon\rho\omicron\nu$ («крило»). Цей термін вперше з'являється 3 серпня 1861 року в його заявці на патент у Сполученому Королівстві, потім 16 квітня 1862 року в сертифікаті доповнення до патенту № 49077, поданому 3 квітня 1861 року у Франції. Слід сказати, що термін “авіація” також придумав Гійом Жозеф Габріель де Лаландель в 1863, що походить від дієслова *avier* (літати в повітрі), що походить від латинського *avis* (птаха) і суфікса «-ation».

На протязі 17-19 століть відбувалися прикладні дослідження Землі, в тому числі атмосфери – її складу та прошарків. Це призвело до появи повітряних куль (з нагрітим повітрям, воднем та іншими інертними газами). Брати Жозеф-Мішель і Жак-Етьєн Монгольф'є провели першу публічну

демонстрацію безпілотного літального апарату – повітряної кулі в Анноне, Франція. У 1858 р. Гаспер Фелікс Турнашон робить перший аерофотознімок з повітряної кулі в Парижі, Франція. Першу камеру на БПЛА встановив відомий винахідник динаміту Альфред Нобель у 1896 р., який встановив камеру на ракету. Експеримент Нобеля став першим випадком, коли камери були розміщені на безпілотному літаючому апараті.

Як вже було сказано були спроби створити гібрид аеростата і гвинтокрила. Одне з перших використання БПЛА в якості бойового повітряного транспортного засобу відбулося в 1849 році, коли Австрійці атакували Італію (Венецію), використовуючи 200 повітряних куль, заряджених вибуховими пристроями, які підірвали за допомогою таймерів. Інтригуючою була можливість використання радіо для керування літальними апаратами. У 1916 році Літаки-мішені дистанційно керувалися автоматичною системою Hewitt-Sperry, інтегрованою з гіроскопом.

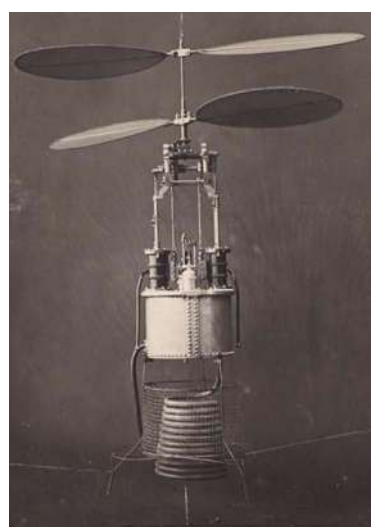
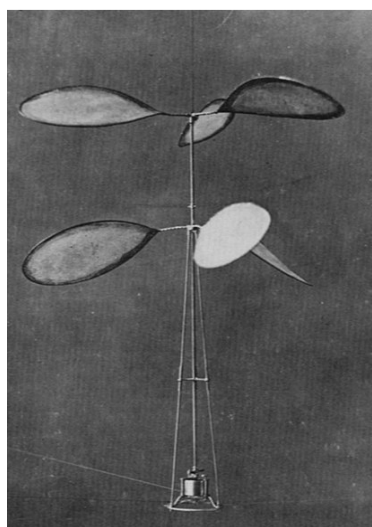


Рисунок 1.9 – Гюстав де Понтон д'Амекур і його гелікоптери

У 1898 році Нікола Тесла продемонстрував радіокерований човен, що став першою спробою створити дистанційно керований пристрій – водний дрон (рис. 1.10). Окрім самого човна, до складу радіокерованої моделі входив також пристрій дистанційного керування. І хоча ця подія не відноситься до авіації, саме вона заклала основи радіокерованих безпілотних літальних апаратів.



Рисунок 1.10 – Перший прототип безпілотного човна Ніколи Тесла

Досліди з польотами на безпілотних повітряних кулях здійснювали брати Монгольф'є, піднімаючи вгору різноманітних тварин.

Історія того, що ми сьогодні можемо назвати безпілотниками, почалася під час Першої світової війни, коли літаки, керовані радіозв'язком, використовувалися для нападу на аеростати Цепеліни. Під час Першої світової війни у 1916 році з'явилися перші спроби створення безпілотників. Наприклад, "Aerial Target" у Великій Британії – безпілотна модель літака, що використовувалася як мішень для тренувань.

У 1917 р. Чарлз Франклін Кеттерінг (Дейтон, Огайо) побудував першу безпілотну повітряну торпеду, яка увійшла в історію під назвою "Torpedo Kettering Bug" або Kettering Bug (жучок Каттерінга). Пристрій використовував систему попередньо встановлених внутрішніх пневматичних та електричних елементів керування для стабілізації літака. Коли торпеда досягала заданої

відстані, двигун зупинявся, крила від'єднувалися і Жук падав з неба. Загальна вартість конструкції становила лише 400 доларів. Він міг пролетіти порядком 120 км зі швидкістю 80 км/год і переносити 82 кг вибухівки.



Рисунок 1.11 – «Жук» Кеттерінга

Велика Британія також долучилася до авіаційних розробок. В 1935 р. Королівськими ВПС розроблено дрон-мішень з дистанційним керуванням – DH.82 Queen Bee. Його назва призвела до нинішнього терміну «дрон».

1936 р. знаменує початок програми безпілотників у США. На основі ідей британської моделі Queen Bee ВМС США у 1937 розробляють радіокеровану торпеду БПЛА Curtiss N2C-2. N2C-2 отримував команди від оператора, який знаходився в літаку з екіпажем, що летів поруч. Хоча це обмежувало ефективність БПЛА, це був значний крок у розвитку технології радіокерованих БПЛА.

Початок польотів від першої особи (FPV) датується 1943 р. Boeing і ВПС США розробили BQ-7, який працював на базовій системі FPV. Пілот-людина керував літаком до визначеної цілі, потім вмикався автопілот, а сам пілот вистрибував з літака. Система була малоефективною, пілоти мали високий шанси загибелі або захоплення в полон.

Протягом наступних років проводилися різноманітні експерименти з безпілотними літальними апаратами, результатом яких стала розробка малих, швидких і легкокерованих безпілотників у 1970-х роках. Перші сучасні безпілотні літальні апарати, які використовувалися в основному військовими

наприкінці 20-го століття, були розміром з малий літак і використовувалися для розвідувальних місій, глушіння радарів противника, а також слугували приманкою.

У 1973 р. Ізраїль розробляє БПЛА серії Mastiff і IAA Scout для спостереження та розвідки. Битва при Джебзіні (1982 р.) стала першою битвою безпілотників. Ізраїль вдало використовував свої БПЛА проти сирійської авіації з мінімальними втратами. В даний період остаточно закріплюється концепція використання БПЛА у бойових діях.



Рисунок 1.12 – БПЛА Mastiff

Конфлікти у В'єтнамі (1959-1975 рр.), Афганістані (1979-1989 рр.), та згодом у Персидській затоці (1990-1991 рр.) призводять до нарощування виробництва безпілотників у США. Так у 1986 р. США та Ізраїль спільно розробляють дрон RQ2 Pioneer, який вважається одним із найуспішніших БПЛА.

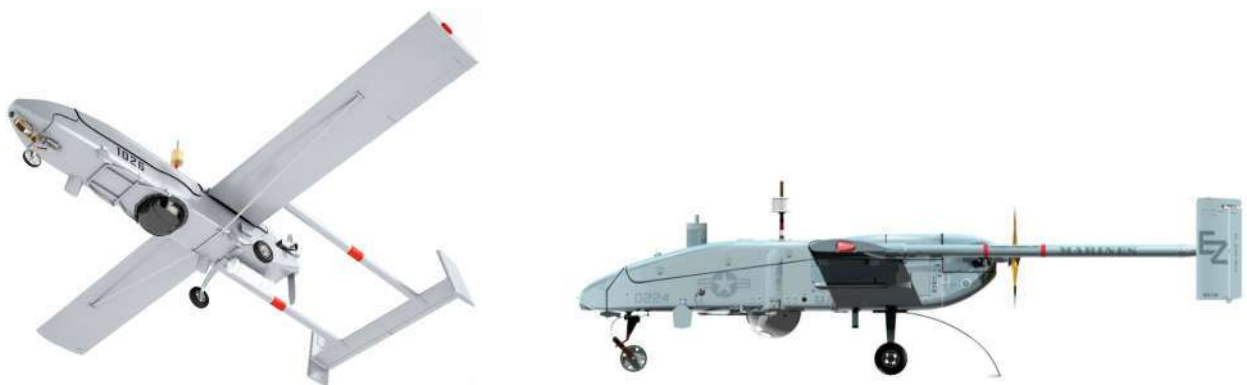


Рисунок 1.13 – Дрон RQ2 Pioneer

Успіхи в області комп'ютеризації, мініатюризації та винаходу GPS разом зробили сучасний дрон невеликим, легким, точним літальним апаратом, керованим людиною. Кульмінацією цієї хвилі інновацій стало створення БПЛА можливих літати 24/7. У 1996 р. розроблено дрон Predator, який створив суспільний образ безпілотників для враження будь-якої цілі по всьому світу.

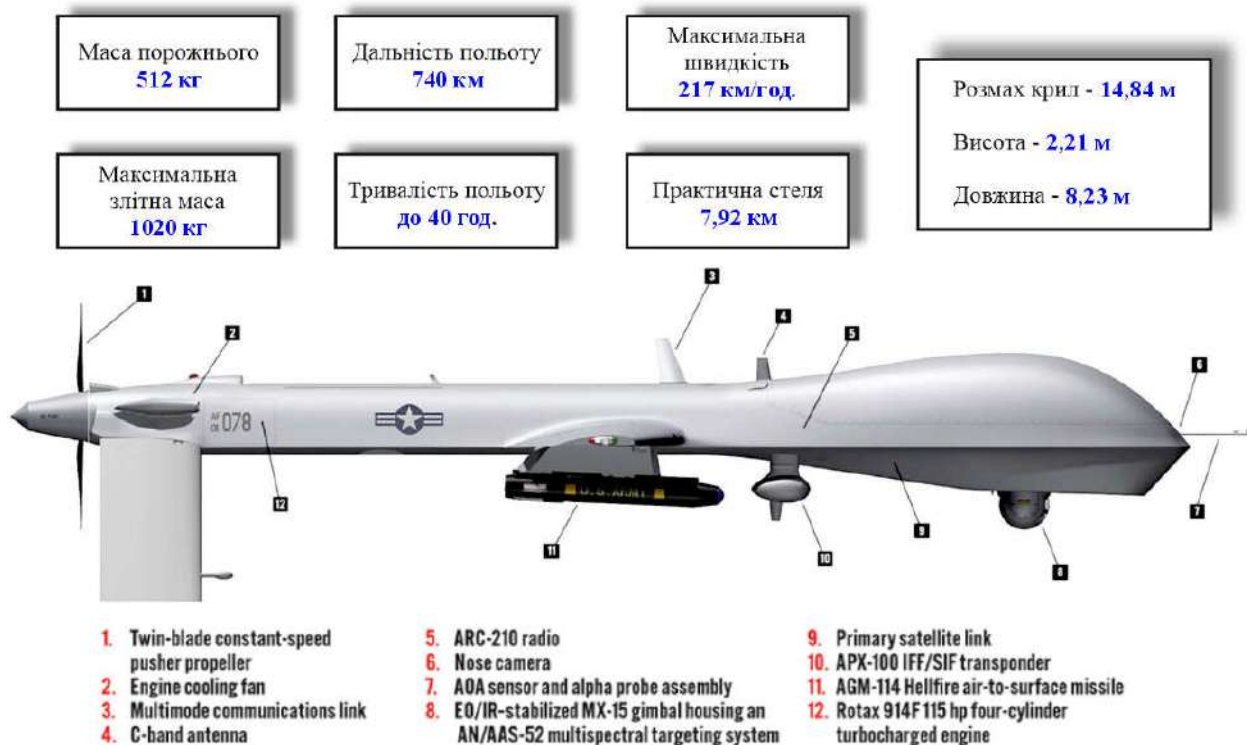


Рисунок 1.14 – Дрон Predator

Історія першого дрона FPV почалася з появою аматорських дронів у світі авіамоделізму. Перші безпілотники FPV були створені ентузіастами, які використовували камери та передавачі з низькою роздільною здатністю для передачі відео на екрани або окуляри пілотів. У ті часи дрони в основному використовували для змагань і хобі. Перші моделі дронів FPV не були такими складними, як сучасні пристрої. Вони були створені з використанням доступних на той час технологій, які включали прості камери та передавачі для відеосигналу. Згодом ці системи стали доступнішими та кращими, що дало змогу точніше керувати дронами на відстані. Технічний прорив у FPV відбувся в 2010-х роках з розвитком технологій бездротового зв'язку та вдосконаленням

якісних компактних камер. Це дозволило істотно поліпшити керованість і маневреність дронів, що зробило їх популярними не тільки серед любителів, а й у професійних сферах, таких як кінематограф, картографія, а згодом і військова розвідка та бойові дії.

З 2006 р. БпЛА вперше дозволені в цивільному повітряному просторі США. Першим безпілотником, який використовували цивільні правоохоронні органи, був спеціально розроблений медиком ВПС США Джином Робінсоном розвідувальний дрон під назвою Spectra. Приблизно в цей час почала формуватися індустрія споживчих дронів (Parrot, DJI, 3DR та багато інших).

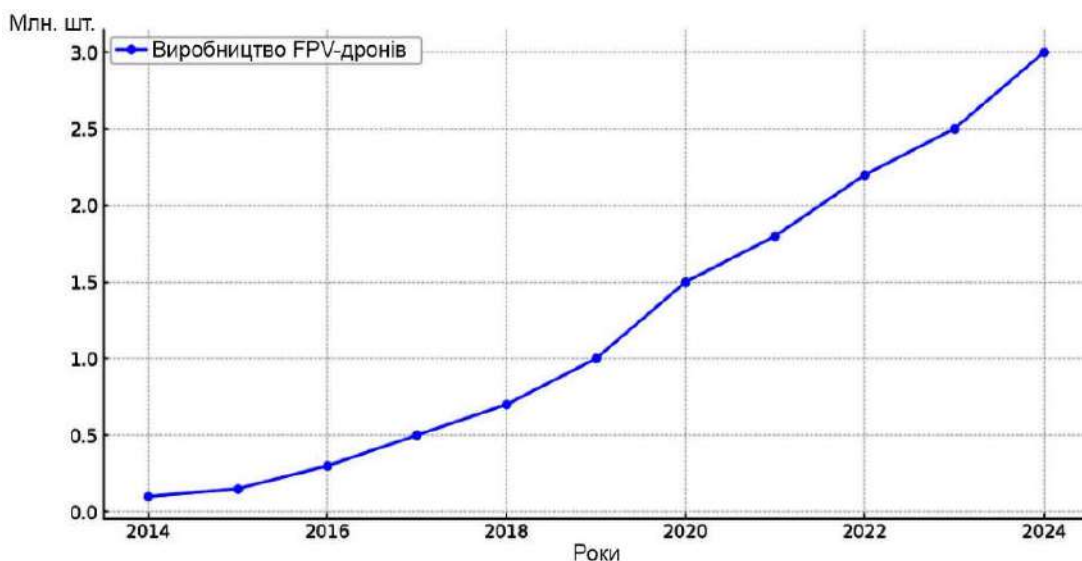
Наприклад, досить популярним і успішним дроном став DJI Phantom, який використовував GPS і екшн-камеру GoPro. У 2013 р. DJI виробляє перший Phantom Drone. Цей безпілотник поклав початок сучасних FPV-дронів. Всього за кілька років DJI займе лідируючу позицію на ринку споживчих дронів, виробляючи майже 80% споживчих дронів. Також у 2013 р. великі логістичні компанії FedEx, UPS, Amazon, Google, Uber та інш. розпочали кур'єрську доставку дронами.

Найбільший поштовх у розвитку безпілотників FPV відбувся під час військових конфліктів, зокрема, в Сирії та Україні. Їхня ефективність у нанесенні точкових ударів і розвідці за допомогою безпілотних систем привернула великий інтерес у військових у всьому світі. Використання безпілотників FPV під час війни в Україні довело їх здатність змінити хід бойових дій і знизити ризик для пілотів.

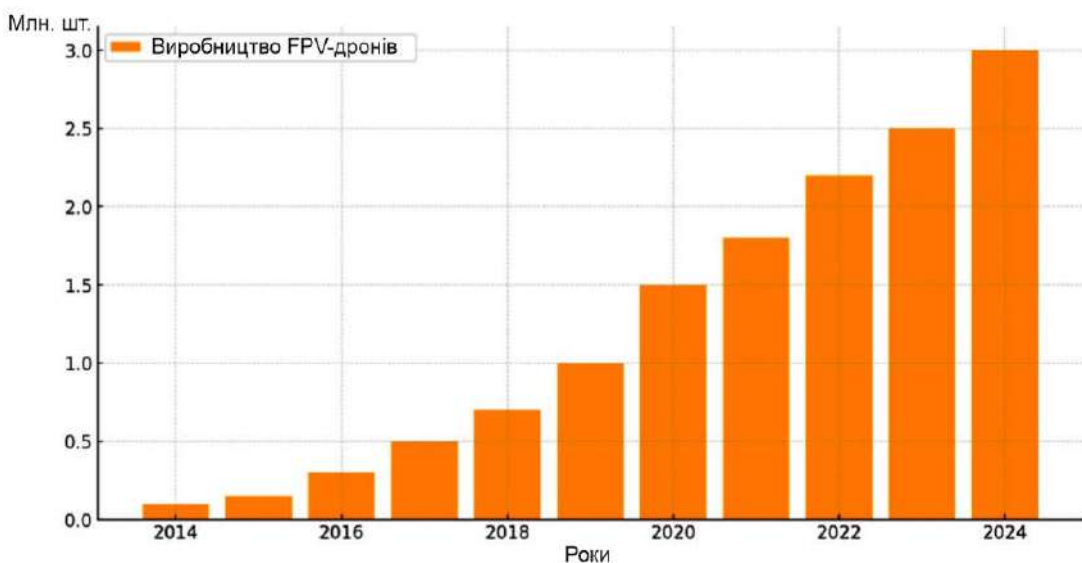
1.2. Економічні та політичні тенденції.

На сьогоднішній час область авіоніки та безпілотних систем знаходяться на піку свого технологічного розвитку, переживаючи неймовірний підйом (рис. 1.15). Проаналізувавши світовий ринок в області безпілотних літальних апаратів (БпЛА), слід відзначити, що з 2014 року їх виробництво країнами світу зросло в сотні разів. Крім того, прогноз на кінець 2024 року складає приріст порядку 16% в порівнянні із попередніми роками, а до 2030 року – 19-24%.

Згідно з різними ринковими звітами, у 2023 році розмір світового ринку БпЛА оцінювався приблизно в 25 мільярдів доларів США, з постійною тенденцією до нарощування [4, 5].



а)



б)

Рисунок 1.15 – Ріст виробництва FPV-дронів в глобальному масштабі:

а) графік; б) діаграма

Одним із найбільш популярних напрямків безпілотних систем є FPV-дрони (First Person View). На сьогоднішній час FPV-дрони стали значним сегментом загального світового ринку виробництва БпЛА, займаючи 70% від загального. Наприклад, Україна в 2024 році планує випустити понад мільйон

FPV-дронів. Це величезний обсяг для однієї країни, що свідчить про зростання популярності таких дронів. Технологія FPV дозволяє операторам керувати безпілотником за допомогою живого відео, забезпечуючи захоплюючий досвід польоту в режимі реального часу. Ринок безпілотних літальних апаратів неухильно зростає завдяки розвитку відповідних технологій, зростанню інтересу до даного виду техніки і розширенню областей застосування. Так, стосовно новітніх технологій слід констатувати наявність розробок, насамперед, в області мікромініатюрної електроніки та засобів акумулювання енергії. Обидва цих чинника зіграли вирішальну роль в появі та розвитку безпілотних літальних апаратів. Мікромініатюризація електронних компонентів дозволила зменшити форм-фактор та максимально знизити вагу. А розробки в області акумулювання енергії дозволили перейти від теплових двигунів до електричних машин, забезпечивши ряд суттєвих переваг.

За короткий часовий інтервал дана область науки, техніки і технологій набула найбільшої популярності, утворивши симбіотичні зв'язки зі спорідненими галузями. Ми спостерігаємо як постійно з досить високою періодичністю з'являються нові матеріали, нові розробки та методи, що безпосередньо пов'язані з областю безпілотних літальних апаратів (БпЛА). Так з'являються FPV-дрони з машинним зором та штучним інтелектом, спостерігається їх інтеграція з іншими системами та комплексами, тощо.

Станом на 2024 рік у світовому виробництві безпілотних літальних апаратів домінують кілька ключових країн із значними відмінностями у військовому та цивільному застосуванні: Китай, США, Ізраїль, Туреччина, Південна Корея, Індія, Великобританія, Франція, Німеччина і т. д.

1.3. Класифікація БпЛА та FPV-дронів.

Класифікація безпілотних літальних апаратів може бути здійснена за різними критеріями залежно від їх призначення, конструкції, ваги, дальності польоту, типу управління тощо.

Ось основні критерії класифікації.

1. За типом конструкції:

1) гелікоптерного типу / мультикоптери:

- квадрокоптери (4 ротори);
- гексакоптери (6 роторів);
- октакоптери (8 роторів);

2) літакового типу (фіксоване крило);

3) змішаного типу (наприклад, з вертикальним зльотом і горизонтальним польотом).

2. За вагою:

- мікро (до 5 кг);
- малі (5–200 кг);
- середні (200–2000 кг);
- великі (2000–5000 кг);
- тяжкі (більше 5000 кг).

3. За розміром:

- нанодрони (довжина або розмах крил – до 15 см);
- мікродрони (розмір від 15 до 50 см);
- малі дрони (розмір 50 см – 2 м);
- середні дрони (розмір: 2–5 м);
- великі дрони (розмір: понад 5 м), наприклад MQ-9 Reaper

4. За призначенням:

1) військові;

- розвідувальні;
- ударні;
- логістичні;
- радіоелектронної боротьби (РЕБ);

2) цивільні;

- фото-, відеозйомка (аерофотозйомка, кіноіндустрія);
- кур'єрські служби (доставка товарів);
- моніторинг (сільське господарство, екологія, будівництво);

- розважальні;

3) спеціального призначення (рятувальні, пошукові, пожежогасіння, поліція, медицина, тощо).

5. За типом управління:

- автономні (програмовані маршрути);
- дистанційно керовані (через радіозв'язок);
- напівавтономні (комбінують автономність і дистанційне керування).

6. За дальністю польоту:

- малої дальності (до 5 км);
- середньої дальності (5–100 км);
- великої дальності (понад 100 км).

7. За тривалістю польоту:

- короткотривалі (до 30 хвилин);
- середньої тривалості (до кількох годин);
- довготривалі (понад 24 години).

8. За типом двигуна:

- електричні;
- двигуни внутрішнього згоряння (ДВС);
- гібридні.

9. За висотою польоту:

- низько-висотні (до 500 м);
- середньо-висотні (500 м – 10 км);
- висотні (понад 10 км).

10. За швидкістю:

- повільні (до 50 км/год);
- середньої швидкості (50–150 км/год);
- швидкісні (понад 150 км/год).

Класифікація може залежати також від специфічних потреб, наприклад, у військовій чи комерційній сферах.

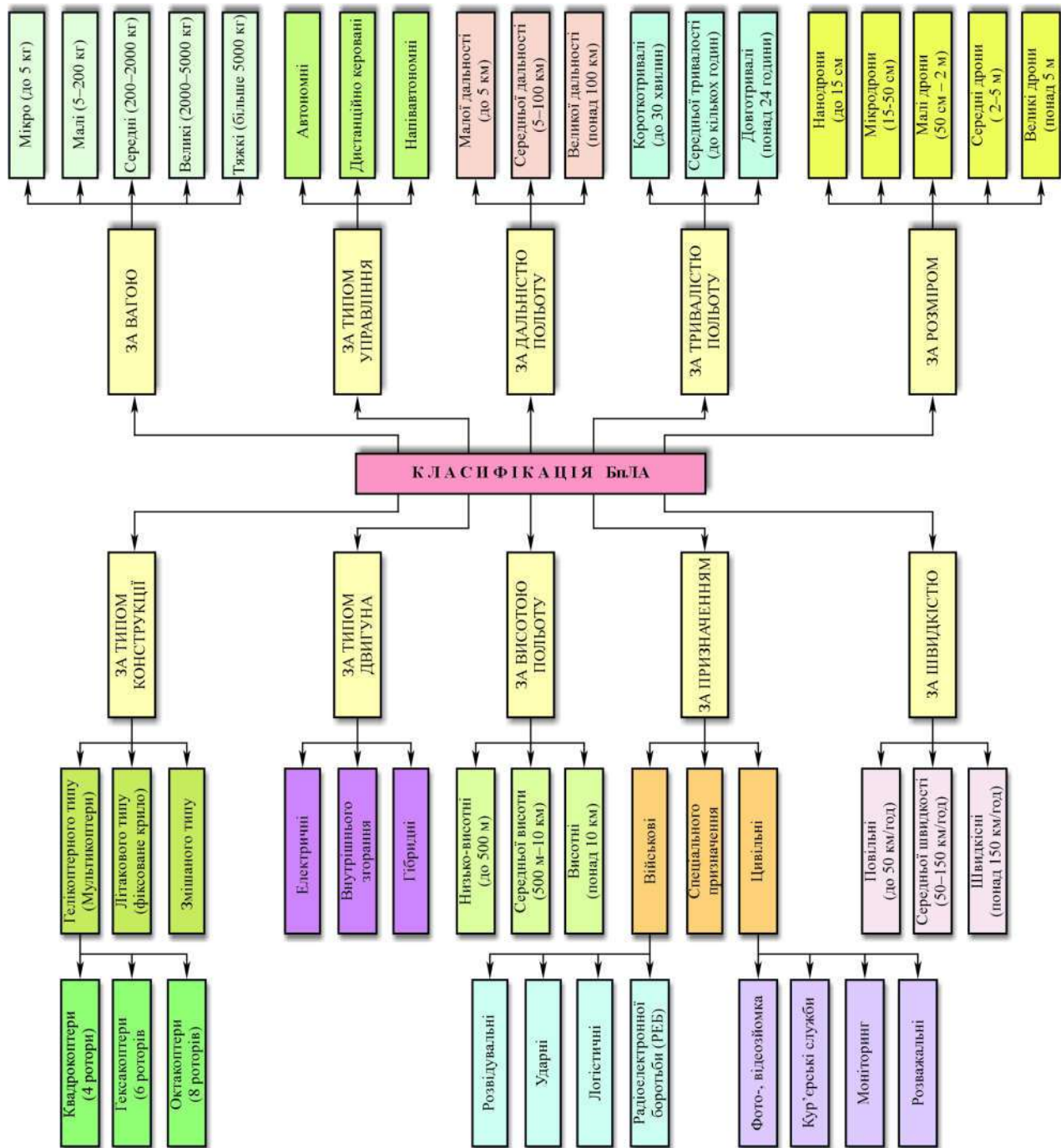


Рисунок 1.16 – Класифікація безпілотних літальних апаратів

FPV-дрони (First Person View – дрони з видом від першої особи) мають свою специфічну класифікацію через їхнє призначення та конструктивні особливості. Основні критерії класифікації FPV-дронів:

1. За призначенням:

1) гоночні дрони (Racing drones):

- велика швидкість;

- компактність і легкість;
- маневреність.

2) фрістайл дрони (Freestyle drones):

- призначені для виконання акробатичних трюків;
- баланс між швидкістю та контролем для точності.

3) кінематографічні (Cinewhoop drones):

- висока стабільність;
- високоякісна батарея великої ємності;
- високоякісна камера для плавної зйомки.

4) тренувальні дрони:

- початкового рівня (легкі та бюджетні);
- навчання пілотуванню високого рівня.

2. За розміром:

- мікро-дрони (2–3 дюйми, 50–75 мм), підходять для польотів у приміщеннях або вузьких просторах;
- міні-дрони (3–5 дюймів, 75–125 мм), універсальні, підходять як для перегонів, так і для фрістайлу;
- великі дрони (понад 5 дюймів, >125 мм), переважно для зйомок або польотів на відкритій місцевості.

3. За вагою:

- нанодрони (до 250 г), наприклад DJI Mini, Black Hornet;
- мікродрони (250 г – 2 кг);
- малі дрони (2–25 кг);
- середні дрони (25–150 кг);
- великі дрони (150 кг і більше).

4. За типом двигунів:

- безколекторні (Brushless) – більше потужності, довговічності та продуктивності;
- колекторні (Brushed) - зазвичай на мікро-дронах, менш потужні, але дешевші;

5. За типом живлення:

- літій-іонні (Li-Ion);

- літій-полімерні (LiPo);

6. За дальністю польоту:

- коротка дальність (до 2 км); особливості: FPV-перегони, фрістайл, легка вага для маневреності, використання частоти 5,8 ГГц для передачі відеосигналу (кращий сигнал на коротких дистанціях), час польоту – 5-10 хвилин через невеликі акумулятори; міні-дрони (пропелери 2-5 дюймів);

- середня дальність (2-10 км); особливості: відеозйомка, дослідження місцевості, тренування; передача відео за допомогою частоти 2,4 ГГц, батареї великої ємності, час польоту – 10-20 хвилин, середні дрони (пропелери 5-7 дюймів), наприклад, DJI;

- велика дальність (понад 10 км)); особливості: професійні зйомки, розвідка, дослідження; системи передачі сигналу на частотах 900 МГц або 1,2 ГГц для кращої стійкості сигналу на великих відстанях, використання GPS та систем автопілоту, великі дрони з потужними батареями, час польоту – 20-40 хвилин і більше.

7. За типом камер:

- аналогові (менше затримка передачі відео, низька якість зображення, але підходять для перегонів).

- цифрові (HD) (висока якість зображення, зручні для фрістайлу та зйомок, більша затримка сигналу).

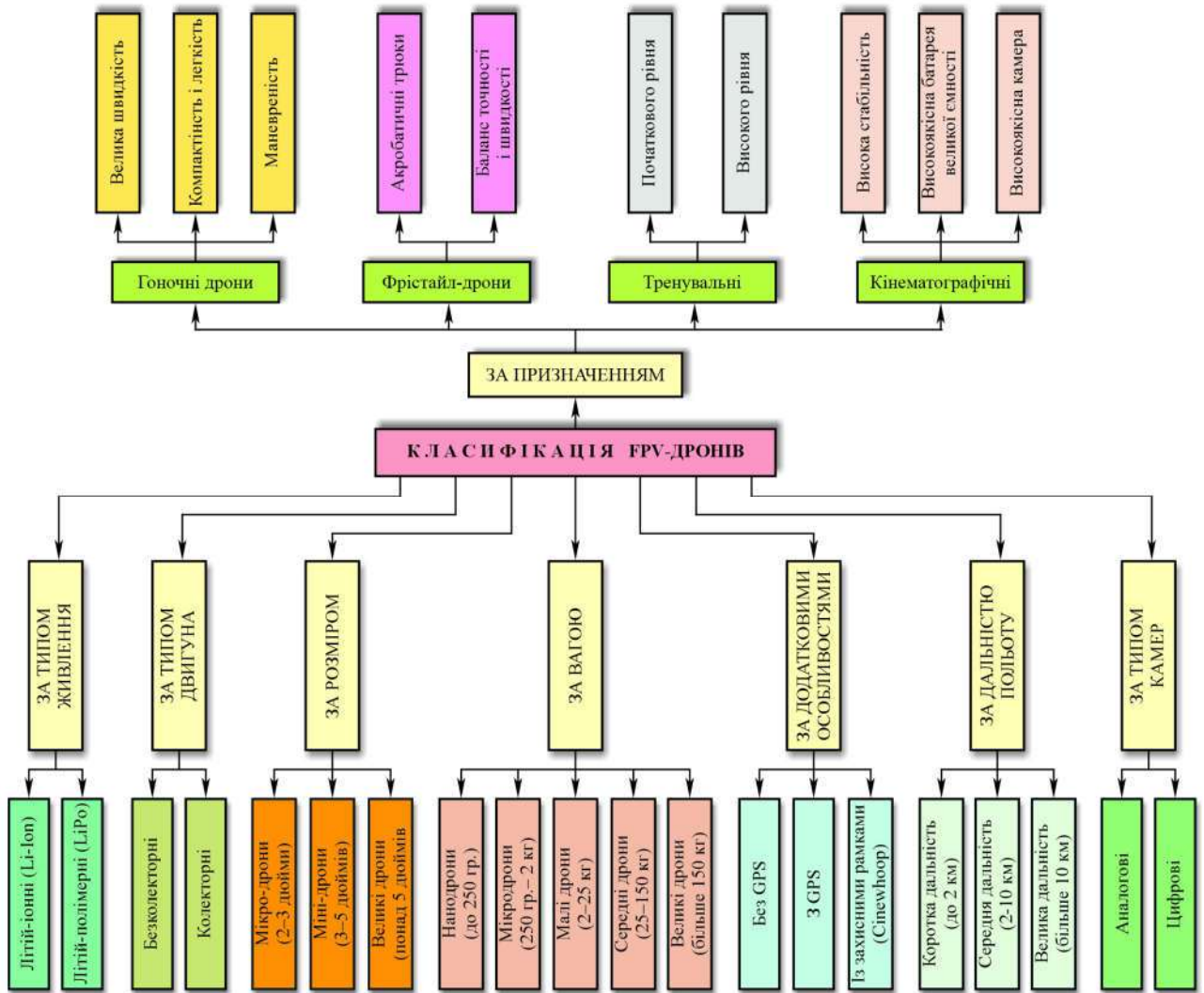
8. За додатковими особливостями:

- з GPS (для польотів на великі відстані та автоматичного повернення).

- без GPS (для перегонів та трюків).

- із захисними рамками (Cinewhoop) для безпечного польоту у вузьких місцях.

Універсальної класифікації FPV-дронів не існує. Класифікаційні ознаки розрізнені, часто протирічні та можуть взаємно перетинатися, характеризуючи подібні ознаки. Класифікацію FPV-дронів можна проводити ще більш детально, систематизуючи ті чи інші характеристики, параметри або особливості даного виду літальних апаратів. Однак в рамках даної роботи приведена оригінальна класифікація, розроблена на основі аналізу всіх доступних джерел та їх систематизації.



Рисунк 1.17 – Класифікація FPV-дронів

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. В даному розділі проведено всесторонній детальний огляд за темою наукового дослідження магістерської кваліфікаційної роботи, а саме безпілотних літальних апаратів та, зокрема, FPV-дронів. Проводиться історичний екскурс розвитку апаратів повітроплавання за період порядку 2500 років.

2. Розглянуто економічні та політичні тенденції популярності безпілотних літальних апаратів. Побудовано графік і діаграму стрімкого збільшення приросту виробництва FPV-дронів в глобальному масштабі.

3. Здійснено глибокий детальний аналіз класифікаційних характеристик безпілотних літальних апаратів. Приведено оригінальні варіанти класифікації БпЛа та FPV-дронів, сформованих на основі усіх доступних офіційних джерел та їх систематизації. Приведені дані є в загальному доступі, не містять комерційну або військову таємницю, а сформовані висновки є логічно узагальнюючими.

2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Конструкція дрона

Дрони, як клас безпілотних літальних апаратів, можуть відрізнятися за типом конструкції (розділ 1), тому в рамках даної роботи беремо за основу класичний дрон або мультикоптер, який в якості корисного навантаження може бути оснащений FPV-камерою та (за потреби) додатковим обладнанням (виконавчі механізми, системи скидання, модулі керування, радары, РЕБ, тощо).

Класична будова FPV-дрона представлена на рис. 2.1.

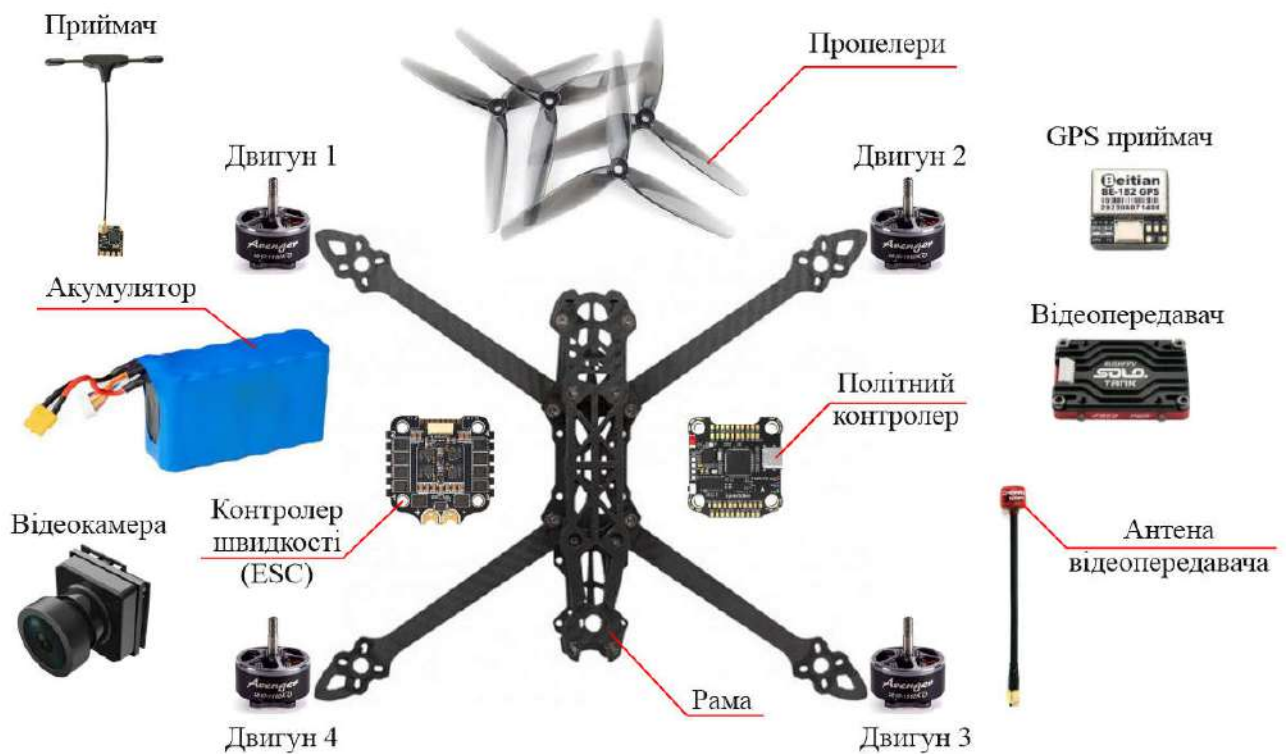


Рисунок 2.1 – Комплектація FPV-дрона

До складу FPV-дрона входять:

- рама;
- двигуни;
- пропелери;
- політний контролер;

- контролер швидкості (регулятор обертів), ESC;
- GPS приймач;
- акумулятор;
- відеокамера;
- відеопередавач;
- антена відеопередавача;
- приймач команд керування з антеною.

FPV-дрон (First Person View) – це безпілотний літальний апарат, призначений для польотів з використанням відеотрансляції в режимі реального часу з власної бортової камери. Його конструкція складається з багатьох елементів та вузлів, кожен з яких виконує своє індивідуальне завдання. Ось основні складові FPV-дрона та їх призначення:

1) рама (Frame):

- призначення: основа дрона, несуча конструкція, платформа для розміщення всіх компонентів, їх взаємодії та захисту;
- форма та розмір (X-подібна, H-подібна, 5", 6", 7", тощо).
- матеріали: карбон, пластик, алюміній, вуглецеве волокно;
- особливості: легкість, міцність;

2) політний контролер (Flight Controller, FC):

- призначення: основна електронна бортова система дрона (його “мозок”), що забезпечує керування та координацію всіх складових:

- функції:

- а) управління моторами;
- б) забезпечення всіх параметрів польоту (швидкість, маневреність, крен, тангаж);
- в) обробка сигналів із радіопередавача;
- г) моніторинг бортових сенсорів (акселерометр, гіроскоп, альтиметр, тощо);
- д) обробка сигнали від пілота;
- е) налаштування режимів польоту (акробатичний, стабілізований);

3) мотори:

- призначення: рушійна сила – забезпечення руху дрона у повітрі;
- тип: безщіткові мотори (brushless motors), які мають високу ефективність і тривалий термін служби;

- розташування: на діаметрально протилежних краях несучої конструкції дрона (як правило 4, 6, 8 моторів, інколи інша кількість);

4) регулятори швидкості (Electronic Speed Controllers, ESC):

- призначення: контроль швидкості обертання моторів відповідно до сигналів від польотного контролера;

- особливості: відповідають за плавність руху та енергоефективність.

5) FPV-камера:

- призначення: передача зображення в реальному часі на окуляри або монітор пілота;

- особливості: широкий кут огляду, висока швидкість оновлення (мінімальна затримка відео);

б) відеопередавач (VTX):

- призначення: передача відеосигналу від камери на окуляри або екран;

- характеристики: потужність (мВт), частоти передачі (наприклад, 5,8 ГГц).

- особливості: дальність передачі залежить від потужності та типу антени.

7) антени:

- призначення: забезпечують стабільний сигнал між дроном та окулярами/пультом;

- види: кругова поляризація (для VTX) і лінійна (для радіозв'язку).

8) радіосистема (радіопередавач і приймач сигналів керування):

- призначення: забезпечує зв'язок між пілотом та дроном для керування;

- частоти: наприклад, 2,4 ГГц або 900 МГц (для більшої дальності);

- особливості: підтримка різних протоколів зв'язку (FrSky, Crossfire);

9) батарея акумуляторів (як правило літій-полімерна, LiFePO4):

- призначення: джерело енергії для дрона;

- характеристики: напруга (S – кількість комірок), ємність (мА·год);

- особливості: висока енергетична щільність, потребує ретельного догляду;

10) пропелери:

- призначення: створюють підйомну силу та забезпечують маневреність;

- типи: дволопатеві, трилопатеві або багатолопатеві;

- матеріали: пластик або карбон;

11. GPS-модуль (за потреби):

- призначення: визначення місцезнаходження дрона, забезпечення функції “повернення додому” (RTH);

- особливості: використовується переважно на довготривалих або кінематографічних дронах;

12) датчики:

- призначення: забезпечують позиціонування, покращують стабільність і можливості дрона;

- типи: барометр, альтиметр, гіроскоп, магнітометр, дальномір, тощо.

13) додаткові та супутні складові FPV-дрона:

а) FPV-окуляри або монітор;

- призначення: відображення зображення з камери дрона для пілота;

- особливості: вбудовані приймачі сигналу, налаштування яскравості, контрасту.

б) OSD (On-Screen Display)

- призначення: відображення телеметричної інформації на екрані (наприклад, рівень батареї, висота, швидкість);

- інтеграція: вбудована у польотний контролер або окремий модуль;

в) Battery Eliminator Circuit (BEC):

- призначення: забезпечує перетворення напруги акумулятора у ряд напруг живлення електронних компонентів дрона;

- особливості: вбудований у ESC або як окремий модуль.

FPV-дрон – це комплексна система, де кожна деталь відіграє важливу роль у забезпеченні стабільності, керованості та задоволення від польотів.

Вибір рами для FPV-дрона залежить від багатьох факторів, таких як тип польотів, цілі, розмір двигунів, акумуляторів та інших компонентів. Розглянемо кілька важливих критеріїв, на які слід звернути увагу при виборі рами FPV-дрона. Діагональ рами визначає розмір дрона та розмір пропелерів, які можна використовувати. Найбільш поширені розміри – 3-4 дюйми (для компактних дронів), 5 дюймів (для спортивного FPV), 6-7 дюймів (для дальніх польотів).

Великі рами (наприклад, 7+ дюймів) підходять для дальніх польотів і стабільних відеозйомок, тоді як малі рами краще підходять для спортивного польоту або польотів у закритих приміщеннях.

За формою рами бувають наступних типів:

- True X: всі плечі рівної довжини, що забезпечує відмінну стабільність і підходить для спортивних польотів;

- Stretched X: подовжена форма, що зменшує горизонтальне обтікання повітрям, що може покращити маневреність і стабільність;

- H-рама: забезпечує більше місця для компонентів, особливо корисна для зйомки відео, де потрібен простір для камери.

Стосовно матеріалу для виконання рами:

- карбонове волокно – найпопулярніший матеріал, що забезпечує високу міцність і легкість та меншу руйнівну інерцію під час аварії, але дорожчий;

- нейлон або пластик – легкі, але менш міцні, зазвичай використовуються в мікродронах або навчальних моделях. Часто використовують елементи 3D друку, однак вони менш міцніші, ніж цілюоліті.

Недоліками карбонового волокна є електропровідним: якщо дроти під напругою торкаються рами, це може спричинити коротке замикання та спалювання компонентів. Він також може блокувати/послаблювати радіосигнали.

Вага рами: легші рами покращують швидкість і маневреність, але важчі рами можуть забезпечити більшу стабільність і краще захистити внутрішні компоненти під час аварій.

Монтаж і компонування: тип монтажу камер (для відеопередачі та запису), а також простір для електроніки (ESC, акумулятори, контролери) варто

врахувати залежно від специфічних потреб. Деякі рами мають змінний кут нахилу для камер, що є корисним для FPV-польотів з високими швидкостями.

6. Захист і ремонт: наявність захисних компонентів для двигунів або пропелерів може бути важливою та корисною. Легкість заміни частин рами (наприклад, окремих плечей) також зручна у разі частих пошкоджень.

Найбільш поширеними розмірами рами FPV-дронів є 5"-10" (12,7-25,4 мм). Візьмемо для моделювання стрес-аналізу раму 7" (~180 мм), рис. 2.2.

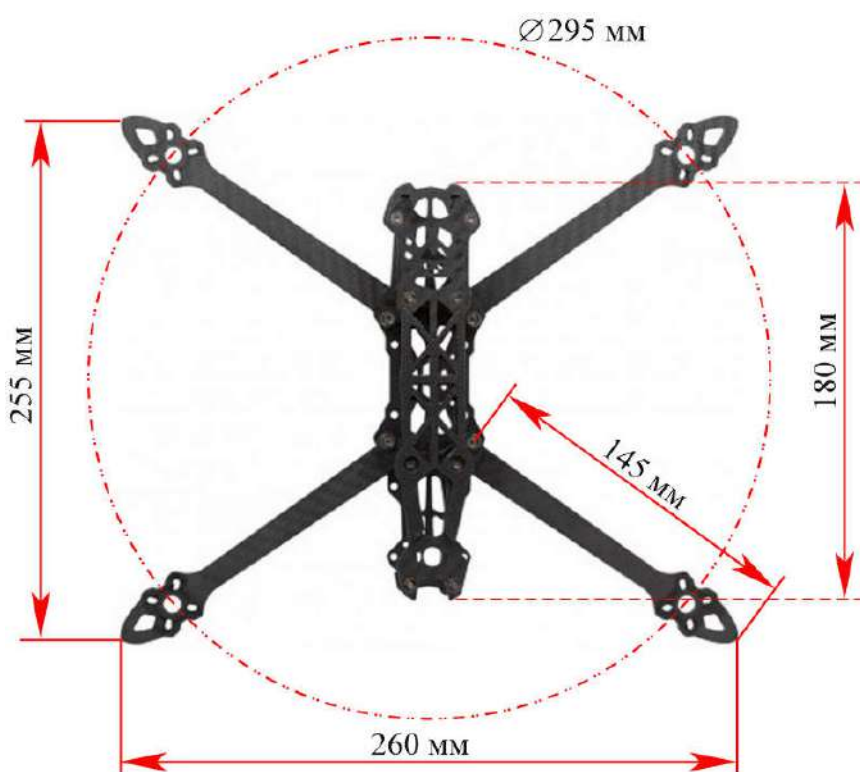


Рисунок 2.2 – Розміри рами FPV-дрона 7"

Як біло сказано вище, існують найрізноманітніші конструкції дронів, але методика аналізу та синтезу дослідження вібрацій корпусу, його складових та інших елементів дрона універсальна.

Взагалі рами дронів збірні, тобто вони складені з великої кількості комплектуючих, які після монтажу утворюють єдиний міцний каркас, рис. 2.3. Це важливо знати і, відповідно, враховувати при аналізі вібраційної стійкості каркасу дрона та його основних елементів, як правило пари двигун-пропелер. Саме ці складові представляють цікавість з точки зору вібромоніторингу.

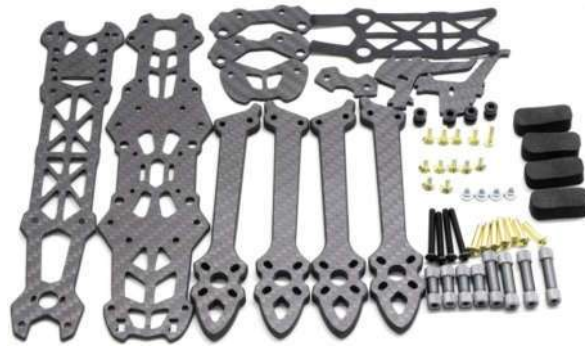


Рисунок 2.3 – Деталі рами дрона



Рисунок 2.4 – Рама дрона в зібраному вигляді



Рисунок 2.5 – Елементи дрона розташовані на рамі

2.2. Аналіз вібраційної стійкості конструкції дрона.

Дослідження вібраційного впливу на конструкцію безпілотного літального апарату логічно розпочати локальних ділянок (окремих складових), переходячи до загальної картини впливу на конструкцію цілком.

Найбільш вірогідним джерелом вібрації являються двигуни дрона, оснащені пропелерами. І тут можна виділити як окремо сам двигун, так і окремо пропелер. Зокрема вібрації двигуна можуть виникнути з наступних причин:

- погано збалансований ротор (заводський брак, задири від тертя, попадання сторонніх предметів);
- зношення підшипників;
- погано закріплені обмотки статора (неякісна або нерівномірна обмотка, недостатньо лаку, відсутність компаунду, тощо);
- явища внутрішнього резонансу.

Вібрації пропелера можуть виникнути через:

- турбулентність повітряних потоків (тимчасові явища);
- гідрометеори (дощ, сніг, тупан);
- дисбаланс окремих лопатів;
- зношення;
- деформація, втрата геометрії;
- часткове пошкодження поверхні (через тертя, удари);
- явища внутрішнього резонансу.

Вплив вібрацій на стан БпЛА може мати наступні наслідки:

- втрата стабільності польоту;
- випадкові або самовільні часткові крени і тангажі;
- вплив на вмонтовані бортові датчики (альтиметр, гіроскоп, тиск, температура, тощо);
- вплив на авіоніку;
- вплив на якість позиціонування (GPS, оптична стабілізація, тощо).

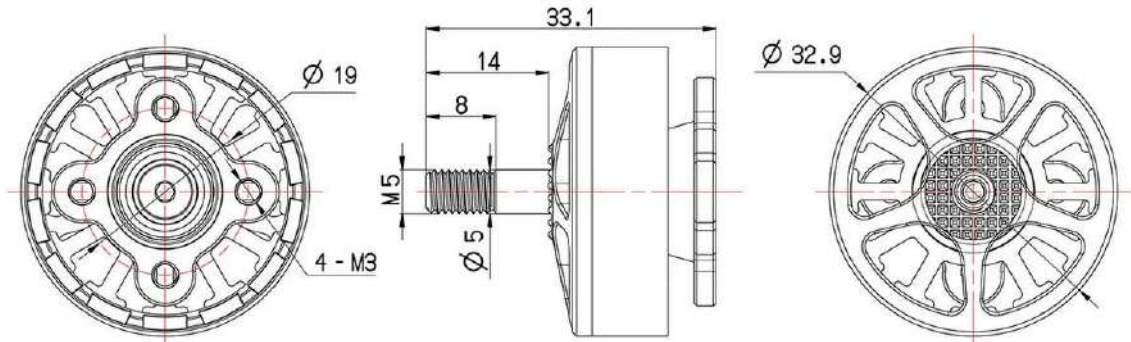
Розглянемо будову кількох типових електричних двигунів дронів. Це, як правило, без щіткові (безколекторні) електродвигуни постійного струму – BLDC (Brushless Direct Current). Ці двигуни добре зарекомендували себе на протязі останніх десятиліть в промисловості, транспорті, системах автоматики, тощо. Вони мають гарні масо-габаритні показники та відношення маса/тяга. Саме розвиток подібних двигунів разом з системами акумулювання енергії високої щільності дозволили перейти від двигунів внутрішнього згорання або турбореактивних конструкцій до електричних. Ці двигуни забезпечують більш плавну роботу та вищу вихідну потужність, що робить їх ідеальними для застосування в безпілотних літальних апаратах завдяки точному контролю та продуктивності. Однак BLDC двигуни потребують спеціальних схем керування – контролерів.

Будова двигуна дрона представлена на прикладі двох різних конструкцій, рис. 2.6, 2.7. Як бачимо, вони суттєво відрізняються: BrotherHobby Avenger 2806.5 [6] має більш товстий корпус в порівнянні з діаметром та невелику кількість обмоток, тоді як T-Motor Antigravity MN6007 II [6] максимально тонкий при великому діаметрі корпуса з великою кількістю обмоток. Таке порівняння не випадкове. Розглянемо детальніше будову, щоб зрозуміти який із представлених конструктивів має суттєву перевагу стосовно антивібраційних характеристик.

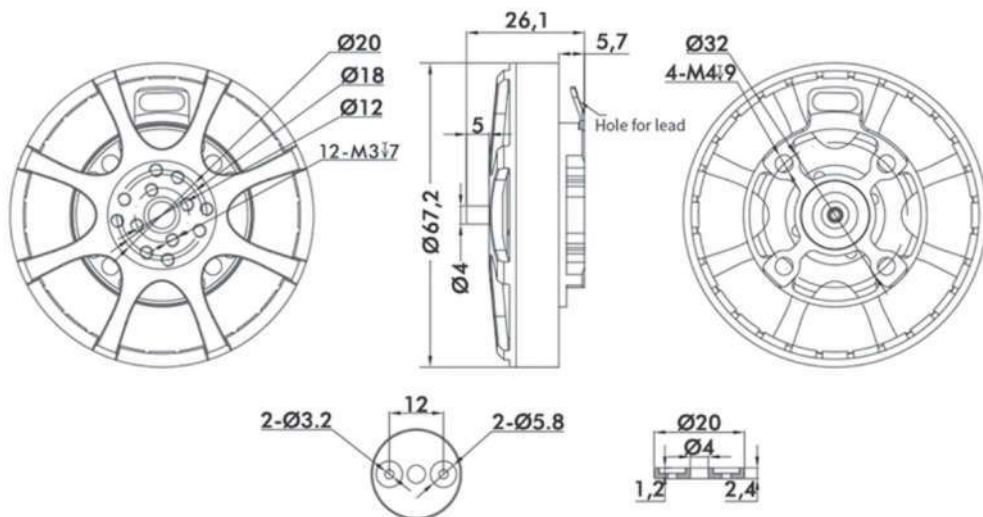
Обидва двигуни мають однаковий набір складових:

- статор (з електротехнічної сталі);
- ротор;
- обмотки (або котушки) із мідного дроту;
- постійні магніти;
- підшипник.

Статор – це нерухома частина двигуна. Він складається з прошарків тонких пластин електротехнічної сталі на які намотані котушки дроту (обмотки статора). Причому бувають одно-, дво- та трьохфазні схеми двигунів. В однофазних двигунах ротор складається лише з однієї пари полюсів (північного N і південного S).



a)



б)

Рисунок 2.6 – Варіанти конструкцій двигунів дронів:

a) BrotherHobby Avenger 2806.5 1700KV;

б) T-Motor Antigravity MN6007 II 320KV

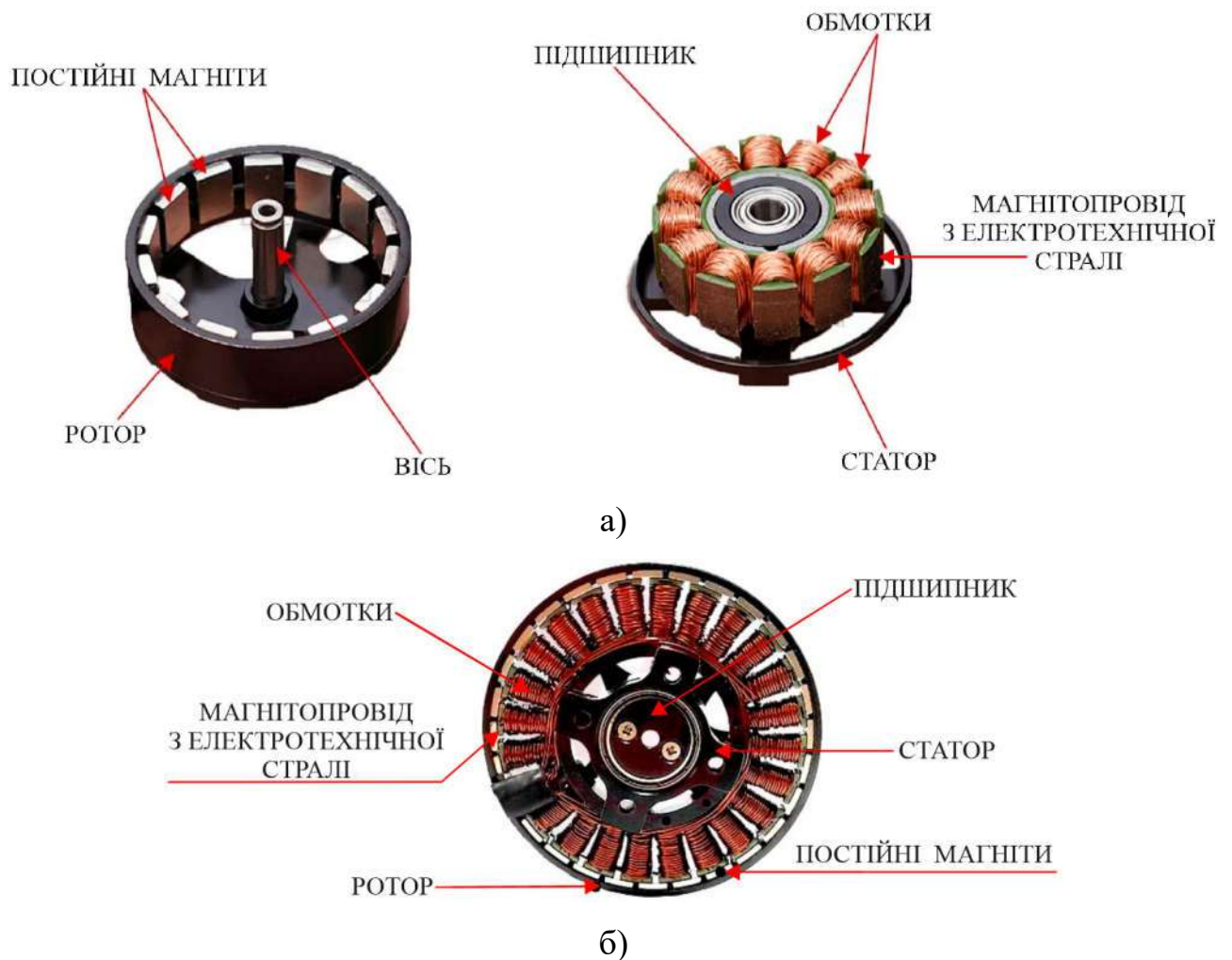


Рисунок 2.7 – Будова двигуна дрона

а) BrotherHobby Avenger 2806.5 1700KV;

б) T-Motor Antigravity MN6007 II 320KV

Такі двигуни працюють тільки на високих швидкостях, на низьких швидкостях його робота ускладнюється, втрачаючи плавність і стабільність. Двофазні двигуни працюють плавніше та ефективніші, ніж однофазні та мають відносно прості системи керування. Трифазні двигуни – багатополюсні, що забезпечує ще більш плавне обертання ніж два попередніх. Однак платою за це є зниження швидкості, адже частота обертання обернено пропорційна кількості полюсів p . Таким чином, трифазні двигуни мають саму низьку частоту обертання серед розглянутих. Але саме вони забезпечують максимальну стійкість до вібрацій, зберігаючи високий крутний момент. Тобто чим більше полюсів, плавніше працюватиме двигун і, відповідно менше будуть власні вібрації.

Ротор – це обертова частина двигуна, яка має власний корпус, по периметру якого розташовані постійні магніти, та вісь. Вісь ротора двигуна виконує подвійну функцію – співвісне розташування в корпусі двигуна з одного боку та вал кріплення пропелера х іншого. Постійні магніти взаємодіють з магнітним полем, створюваним статором, і змушують ротор обертатися. Технічні характеристики двигуна дрона залежать від конструктивних особливостей і будуть детально розглянуті в 4 розділі.

Котушки, як правило, намотуються мідним одножильним проводом на променах статора до заповнення, з'єднуються відповідно до фазності та виводяться назовні для під'єднання до схеми живлення. Під час протікання струму у колі котушки, виникають магнітні поля, які взаємодіють з постійними магнітами ротора, спричиняючи його обертання.

Підшипники – механічні конструктивні елементи, призначені для зменшення тертя між частинами двигуна дрону. Як правило, це кулькові підшипники закритого типу.

Правильне розташування всіх цих компонентів забезпечує перетворення електричної енергії в механічну з максимальним ККД. Однак, як було вказано вище, рано чи пізно неминуче відбудеться зношування окремих вузлів двигуна, особливо це елементи тертя. І тоді виникне биття, а отже і вібрація. Двигуни дрона працюють в надкритичних умовах. Це постійні перевантаження, динамічні зміни навантаження на валу, вертикальні двополюсні сили, бічні навантаження 3D.

BLDC двигуни для роботи потребують наявності зворотного зв'язку (feedback) у вигляді вбудованих датчиків (наприклад, на ефекті Холла). Сигнал з датчика зворотного зв'язку потрапляє на контролер швидкості ESC, дозволяючи контролювати положення та швидкість ротора двигуна. Для двигунів промислового призначення для цієї мети використовуються оптичні енкодери: для асинхронних – інкрементні, для синхронних – абсолютні.

Вібрації двигуна і/або пропелера передаються на несуче плече дрона та спричиняють вібрацію всього корпусу, так як система має жорстке кріплення і відсутні елементи демпфування або амортизації. Можливо ведення останніх

могло б частково усунути явища вібрації та резонансу, але подібні конструкції поки що відсутні (скоріш за все через складність та вартість реалізації). Хоча слід сказати, що дане питання потребує більш детального наукового та емпіричного аналізу.

Однак, враховуючи практичний досвід в області віброзахисту, можна констатувати той факт, що механічні демпферні або амортизаційні системи мають обмежений та частковий результат, адже зберігається вірогідність виникнення резонансних явищ разом із вказаними системами. Запропонований же метод вібромоніторингу усуває проблему повністю, адже має адаптивний алгоритм роботи. Незалежно від того, які саме складові та на якій частоті призводять до вібрації.

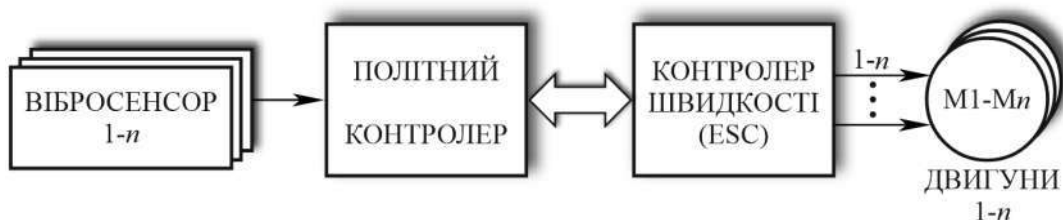


Рисунок 2.8 – Узагальнена модель акселерометричного моніторингу

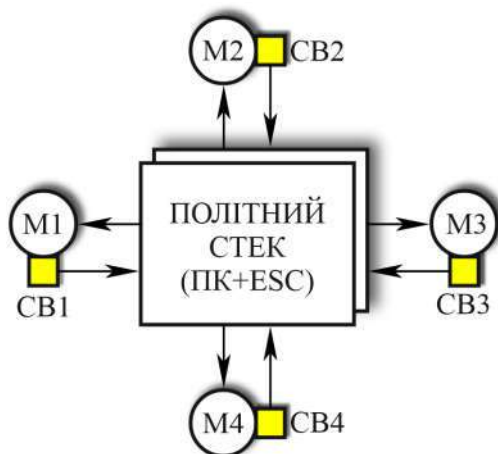


Рисунок 2.9 – Модель акселерометричного моніторингу

досліджуваної конструкції квадрокоптера:

M1-M4 – двигуни дрона; CB1-CB4 – сенсор вібрацій;

ПК – політний контролер; ESC – контролер швидкості.

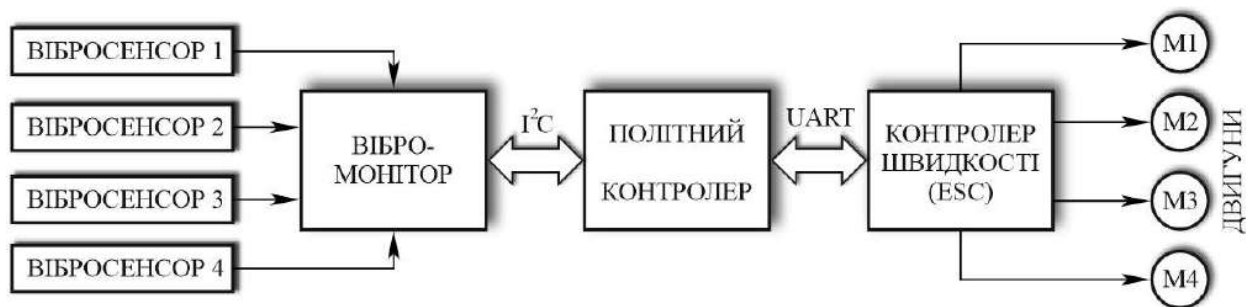


Рисунок 2.10 – Модель акселерометричного моніторингу на рівні цифрових протоколів

Для аналізу вібраційної стійкості двигуна, пропелера або пари двигун-пропелер пропонується наступна дослідна установка. Мультикоптерний варіант (рис. 2.11) базується на принципі важеля. Задіюються діаметрально протилежні пари двигунів: один активний, інший – пасивний (наприклад 1/4 та відповідно 3/2).

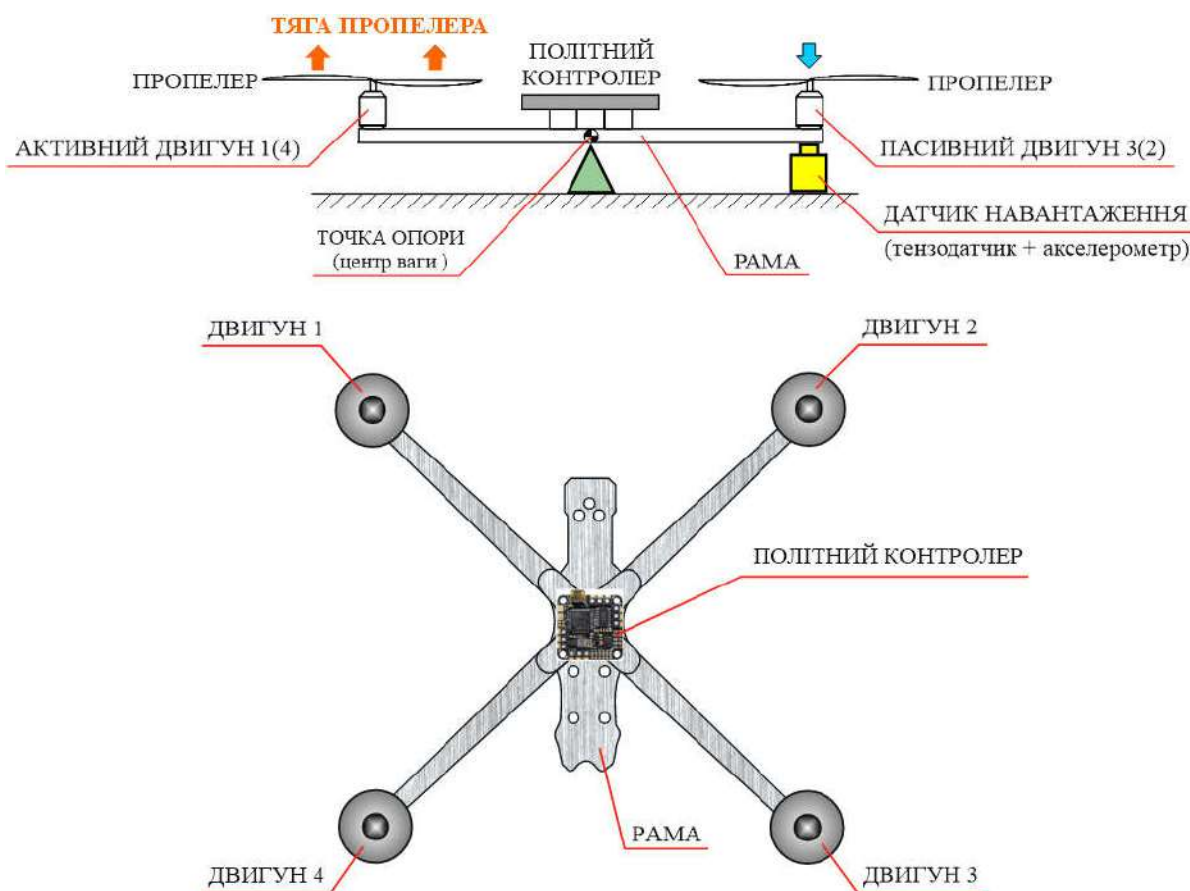


Рисунок 2.11 – Мультикоптерний варіант експериментальної установки

Активний двигун за допомогою пропелера створює тягу. Сила, яка створюється, через важіль (плече квадрокоптера) передається діаметрально протилежній точці конструкції, в якій встановлено сенсори. В даному випадку це – акселерометр для вимірювання прискорення та вібрацій і тензодатчик для вимірювання прикладеної сили. Аналізуючи ці параметри, можна визначити власну частоту ротора та частини плеча мультикоптера. Для цього перейдемо до моделі затиснутої консолі (балки), розглянувши її деформацію в плоскому згинанні, рис. 2.12.

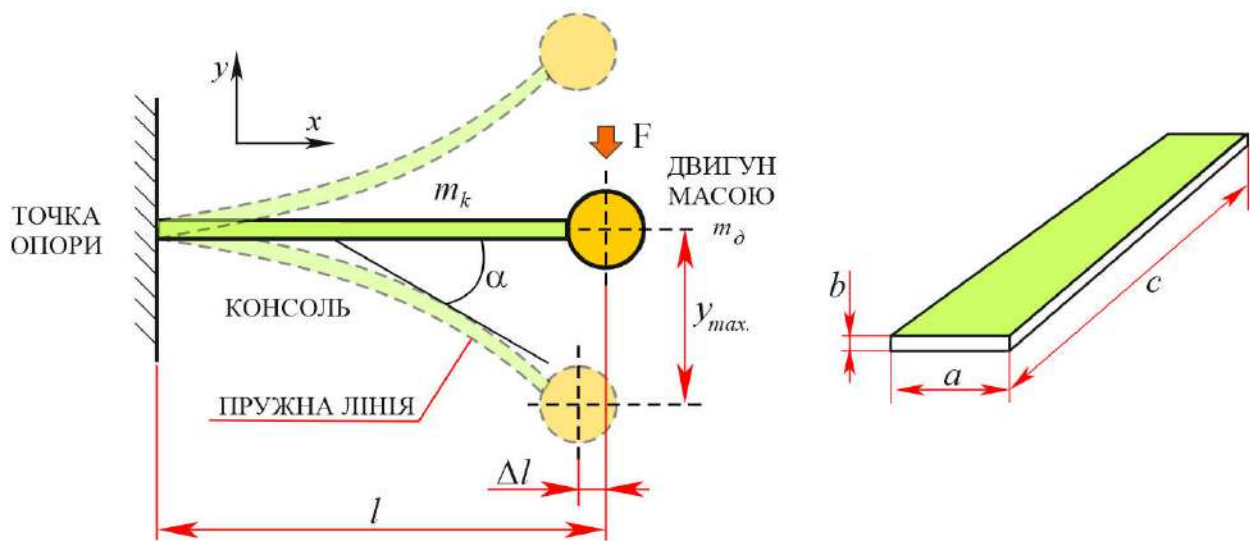


Рисунок 2.12 – Визначення власної резонансної частоти методом Релея:

l – довжина консолі (одного плеча рами дрона); Δl – модуль зміни довжина консолі; x – лінійне переміщення; m_k – маса консолі; m_d – маса двигуна; $a \times b \times c$ – відповідно розміри консолі (ширина, товщина і довжина); α – кут повороту

Під дією тяги пропелера та вібрацій консоль деформується, здійснюючи вертикальні коливальні рухи, переміщуючись на величину x . Для аналізу запропонованої моделі та визначення власної резонансної частоти використаємо метод Релея, оснований на припущенні, що якщо балка вібрує за гармонійним законом з експоненціальною функцією згасання коливань і при цьому максимальне значення потенціальної енергії $E_{П.макс.}$ повинно дорівнювати максимальному значенню кінетичної енергії $E_{К.макс.}$:

$$E_{П.маx.} = E_{К.маx.} \quad (2.1)$$

Основна резонансна частоти описаної коливальної системи:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (2.2)$$

де D – динамічна жорсткість; m – загальна маса консолі.

Загальна маса консолі, в свою чергу дорівнює:

$$m = m_k + m_d \quad (2.3)$$

де; m_k – маса консолі; m_d – маса двигуна.

Щоб застосувати метод Релея, нам потрібно знайти вирази для динамічної жорсткості та повної маси. Загальна маса визначається доволі просто: в паспортних даних конкретного двигуна вказано всі його технічні параметри, включаючи масу, табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вага поширених двигунів дронів

№ з/п	Марка	Маса, г
1	BrotherHobby Avenger 2806.5 1700KV	41
2	FPV Emax ECO II 2814	79,6
3	Antigravity MN5006	106
4	T-Motor Antigravity MN6007 II 320KV	180
5	iFlight XING 4214 X-Class	213
6	SunnySky X4125 V3	292

Вага тами також відома величина. Її можна також подивитися в паспортних даних або зважити безпосередньо. В загальному, рами можуть виготовлятися із дерева, алюмінію, склотекстоліту, пластика або карбона. Наприклад, рама, представлена на рис. 2.1-2.4 в різних виконаннях має наступну вагу:

- карбонова рама – 126 г;
- зі склотестоліту – 180 г.

Відповідно вага одного променя з карбону – 15 г.

Для дрона 7", наприклад, підходить двигун BrotherHobby Avenger 2806.5 1700KV, масою 41 г. Разом одне плече з двигуном мають масу 56 г.

В свою чергу, динамічна жорсткість:

$$D=E \cdot I \quad (2.4)$$

E – модуль Юнга; I – момент інерції.

Модуль Юнга (модуль пружності), E – фізична величина, що характеризує здатність матеріалу чинити опір пружній деформації:

$$E = \frac{Fl}{S\Delta l} \quad (2.5)$$

де F – сила, прикладена до консолі (рис. 2.12); S – площа поперечного перерізу консолі; l – довжина консолі; Δl – модуль зміни довжина консолі.

Всі величини нам відомі. Стосовно модуля Юнга, слід нагадати для матеріалів, які нас цікавлять, табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення модуля Юнга для деяких матеріалів

№ з/п	Назва матеріалу	Модуль Юнга E , ГПа	Густина ρ , кг/м ³
1	Дерево:		450-810
	- вздовж волокон	10	
	- поперек волокон	0,05-1	
2	Сталь	200-210	7800
3	Алюміній	70-71	2700
4	Дюралюміній	74	2500-2800
5	Склотестоліт:		1280-1400
	- вздовж аркуша	10-15	
	- поперек аркуша	7-10	
6	Карбон	140	1600

Диференціальне рівняння пружної лінії для нашого випадку:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2.6)$$

де M – згинаючий момент; EI – жорсткість балки.

Інтегруючи диференціальне рівняння (2.6), отримаємо

$$\begin{cases} \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI}; \\ \alpha(x) = \frac{dy}{dx} = \int \frac{M(x)dx}{EI} + \xi \\ y(x) = \int dx \int \frac{M(x)dx}{EI} + \xi x + \chi \end{cases} \quad (2.7)$$

де ξ і χ – сталі інтегрування.

$$\begin{aligned} M(x) &= Fx \\ EIy'' &= Fx \end{aligned} \quad (2.8)$$

Таблиця 2.3 – результати інтегрування

Результат першого інтегрування	Результат другого інтегрування
$EIy' = EI\alpha = \frac{Fx^2}{2} + \xi$	$EIy = \frac{Fx^3}{6} + \xi x + \chi$

Визначимо граничні умови:

$$\text{при } x=l, \quad \alpha=0; \quad (2.9)$$

$$\text{при } x=l, \quad y=0 \quad (2.10)$$

Для (2.9), маємо

$$EI\alpha = \frac{Fl^2}{2} + \xi = 0,$$

$$\xi = \frac{Fl^2}{2} \quad (2.11)$$

$$EIy = \frac{Fx^3}{6} + \frac{Fl^2}{2}x + \chi$$

Для (2.10)

$$EIy = \frac{Fl^3}{6} + \frac{Fl^3}{2} + \chi = 0 \quad (2.12)$$

Тоді маємо

$$\xi = \frac{Fl^3}{3} \quad (2.13)$$

Та, відповідно:

$$y_{max.} = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (2.14)$$

$$\alpha_{max.} = \frac{Fl^2}{2EI} \quad (2.15)$$

Згідно рис. 2.12 площа поперечного перерізу консолі:

$$S = a \cdot b \quad (2.16)$$

Момент інерції консолі прямокутного перерізу:

$$I = \frac{1}{12}ab^3 \quad (2.17)$$

Враховуючи (2.2)-(2.4) і (2.17), резонансна частота корпусу дрона:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E \frac{1}{12} ab^3}{m_k + m_d}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Eab^3}{12(m_k + m_d)}} \quad (2.18)$$

Окрім частоти основного резонансу, можуть виникати і гармонічні складові. Ми раніше вже згадували, про суто механічні методи гасіння коливань – демпфування або амортизацію. Тепер, стає зрозумілим, що знаючи основну резонансну частоту корпусу, можна застосувати демпфування або амортизацію для усунення небажаних явищ. Однак вони не будуть працювати на гармоніках. Методика визначення власної резонансної частоти корпусу дрона дозволяє уникати резонансу. Політний контролер, змінюючи частоту обертання ротора двигуна, дозволяє відходити вгору або вниз від проблемних частотних зон. Таким чином, запропонований метод постійного моніторингу разом з перелаштуванням частоти обертання двигунів дозволяє уникнути резонансних явищ повністю, не залежно від розмірів БПЛА та умов експлуатації.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. В даному розділі детально розглянута одна із найбільш популярних конструкцій FPV-дрона, розміром 7" та приведена методика аналізу його вібраційної стійкості.

2. Показано, що використання механічних демпферних або амортизаційних систем в корпусі БпЛА ускладнено і носить обмежений характер, адже зберігається вірогідність виникнення резонансних явищ на основній частоті або на гармоніках.

3. Розроблено модель акселерометричного моніторингу на основі додаткових сенсорів, встановлених у проблемних місцях конструкції дрона. Дана модель представлена у вигляді узагальненої схеми та схеми на рівні цифрових протоколів, адаптованих для авіоніки БпЛА.

4. Для аналізу вібраційної стійкості окремих елементів конструкції літального апарату, пропонується оригінальна дослідна установка у вигляді мультикоптерного варіанту. Запропоновані ідеї можуть бути інтерпольовані на будь-яку конструкцію БпЛА.

5. Створено математичну модель визначення власної резонансної частоти корпусу літального апарату методом Релея, оснований на припущенні, що досліджуваний елемент конструкції вібрує за гармонійним законом з експоненціальною функцією згасання коливань і при цьому максимальне значення потенціальної енергії дорівнює максимальному значенню кінетичної енергії.

6. Запропонований метод вібромоніторингу та спосіб визначення власної резонансної частоти корпусу дрона дозволяє уникати резонансних явищ, адже має адаптивний алгоритм роботи. Політний контролер, змінюючи частоту обертання ротора двигуна, дозволяє відходити вгору або вниз від проблемних частотних зон. Таким чином, запропонований метод постійного моніторингу, разом з перелаштуванням частоти обертання двигунів, є універсальним і дозволяє уникнути резонансних явищ повністю, не залежно від розмірів БпЛА та умов експлуатації.

3. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

В розділі 2 приведено і детально розглянуто одну із найбільш популярних конструкцій дрона типу мультикоптер, а точніше квадрокоптер. Сьогодні існує велика кількість програмного забезпечення, яке дозволяє здійснювати імітаційне моделювання різноманітних процесів, явищ, конструкцій, тощо. До подібних слід віднести і вже класичні – MATLAB та FEMLAB. Однак хотілося би і тут запропонувати оригінальний метод дослідження конструкцій на основі програмного пакету SolidWorks [8-10]. Це досить потужний інструмент, який окрім безпосереднього проектування окремих деталей, елементів, вузлів, може здійснювати складальне креслення (що в нашому випадку надзвичайно зручно і корисно), а також проводити цілий ряд інструментальних досліджень, наприклад зусиль, моментів, статичних та динамічних навантажень, тощо.

На рисунку 3.1 представлено симуляцію одного променя (плеча) дрона, використовуючи метод скінчених елементів. На основі програмних консолей та вікон налаштування можна здійснювати динамічне моделювання поведінки даного елемента під дією прикладених зовнішніх сил з опцією лінійного гармонічного коливання.

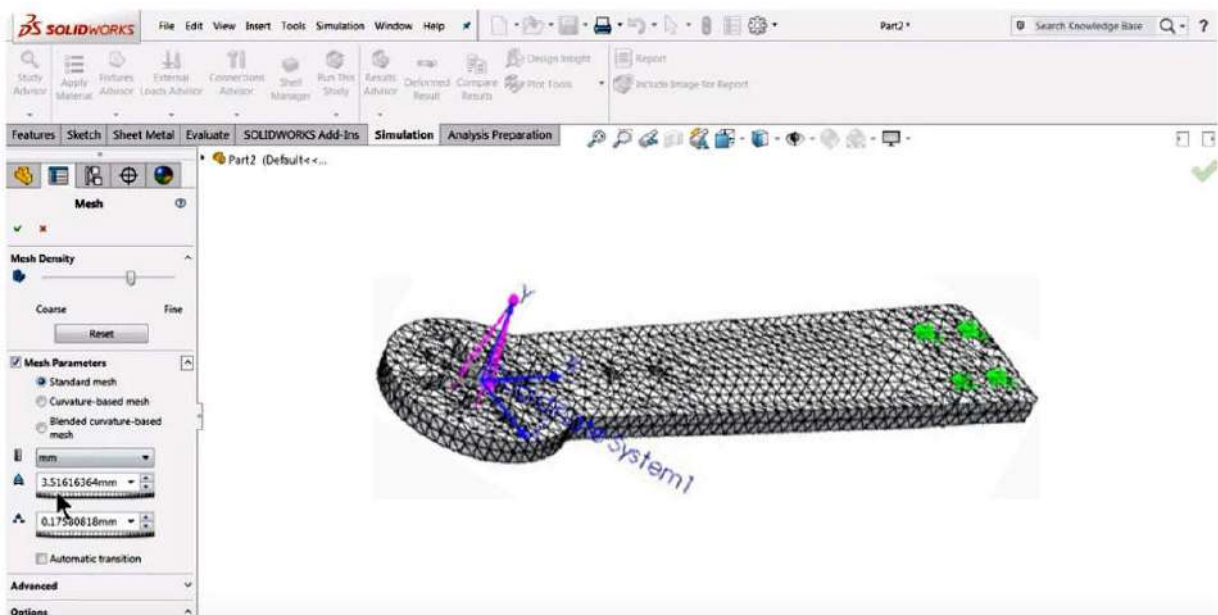


Рисунок 3.1 – Окремий промінь корпусу дрона

Це дозволяє імітувати вібраційні процеси даного елемента або корпусу цілком і досліджувати гармонічні втоми під дією синусоїдального навантаження.

Використовуючи метод скінчених елементів за допомогою меню *Mesh* можливі додаткові налаштувань сітки [11, 12].

Існують різноманітні методики руйнівного контролю, кожен з яких базується на власних критеріях оцінки пошкодження матеріалу. Програма підтримує наступні чотири критерії руйнування:

- максимальна напруга зсуву;
- максимальна нормальна напруга;
- напруга Мора-Кулона
- максимальна напруга за фон Мізесом (von Mises).

Скористаємось останнім критерієм. Він ґрунтується на припущенні, що матеріал набуває критичних руйнацій, коли енергія деформації перевищує певну межу. Тобто величина напруження за фон Мізесом – це та критична межа, перейшовши яку даний матеріал буде руйнуватись. Або з іншого боку, критерій текучості фон Мізеса стверджує, що якщо напруга фон Мізеса матеріалу під навантаженням дорівнює або перевищує межу текучості того самого матеріалу при простому розтягуванні, то матеріал буде текучим. Критерій руйнування зазвичай прогнозує пошкодження матеріалу, підданого впливу навантаження по багатьох осях. Матеріал може стати пластичним або крихким залежно від температури, норми навантаження, зовнішнього хімічного впливу та процесу формування. Немає єдиного критерію відмови, який найкраще застосовується до матеріалу у всіх умовах. Тому в кожному конкретному випадку приходиться обирати оптимальний критерій аналізу або навіть застосовувати кілька критеріїв одночасно.

Коли на тіло в початковому стані рівноваги або в недеформованому стані діє внутрішня сила самого тіла або зовнішня сила, тіло відповідно деформується, поки не досягне нового стану механічної рівноваги або деформованого стану (закон зменшення ентропії). Внутрішні сили тіла є результатом силового поля, такого як сила тяжіння, тоді як поверхневі сили є силами, які діють на тіло через контакт з іншими тілами. Співвідношення між

зовнішніми силами, які характеризують те, що називається напруженням, і деформацією тіла, яке характеризує деформацію, називають співвідношенням напруга-деформація. Ці співвідношення представляють властивості матеріалу, з якого складається тіло, і також відомі як основні рівняння.

Цей підхід є достатньо відомим, простим і найбільш вживаним. Він підходить для всіх крихких матеріалів, наприклад сталь, бетон, дерево, твердий пластик, тощо. Еквівалентна напруга за фон Мізесом для плоского напруженого стану має наступні значення:

- межа пружності – межа пружності визначає область, де енергія не втрачається під час процесу напруги та деформації. Тобто процеси, які не перевищують межі пружності, є оборотними. Ця межа також називається межею текучості. Вище цієї межі деформації перестають бути пружними і стають пластичними, причому деформація включає необоротну частину;

- верхня та нижня межі текучості: коли твердий пружний матеріал вже перебуває в пластичному діапазоні та досягає критичної точки, так званої верхньої межі текучості, відбувається стрибкоподібний процес переходу станів тіла (розрив, деформація, тощо) і цей стан впаде до нижньої межі текучості, від якої деформація відбувається під постійною напругою, доки вона знову не почне чинити опір деформації;

- напруга розриву: розрив, або руйнування – це пошкодження об'єкта, викликані надмірною напругою. Тому в цей момент очікується злам тіла. Однак існують такі матеріали (наприклад м'яка сталь), які мають властивість руйнуватися лише після великих пластичних деформацій. Ці матеріали називаються пластичними.

В обраному програмному середовищі SolidWorks здійсимо необхідні налаштування, обравши результат розв'язання задачі. На панелі інструментів Pre-defined Image необхідно обрати Von Mises Stress. Відображаються зображення напруги фон Мізеса та пов'язана з ним кольорова карта, а напруга фон Мізеса (вузлові значення) з'являється в дереві специфікацій під вибраним результатом рішення, рис. 3.2.

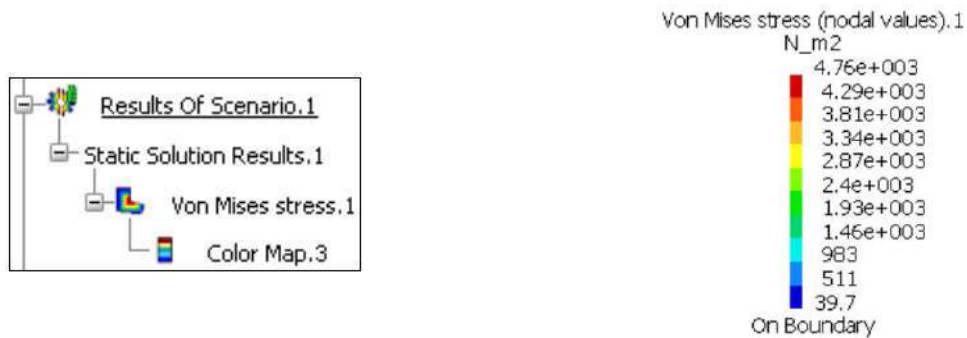


Рисунок 3.2 – Налаштування програмного середовища SolidWorks для аналізу методом фон Мізеса

За допомогою динамічних властивостей можна відкрити вікно Harmonic і обрати Solver/Direct sparse solver. Опція Direct Sparse solver доступна для наступних варіантів проведення аналізу наступних процесів:

- частотних;
- лінійних динамічних;
- нелінійних досліджень.

Можна задавати окремо верхні та нижні частотні межі, а також параметри кратних гармонік.

Створену в середовищі SolidWorks модель променя дрона можна піддати різноманітним динамічним навантаженням. Частота випробування активується зі спадного меню Dynamic та вибору параметру Remote Loads. Остаточними результатами дослідження лінійної динаміки моделі променя дрона є розподіл напруги за фон Мізесом (рис. 3.3). З рисунка моделі видно, що найбільш навантаженими місцями є отвори для кріплення з'єднувальних болтів рами дрона.

Аналогічно можна дослідити промінь дрона на дію згинальних навантажень в області кріплення двигуна, рис. 3.4. Імітування навантаження в цій області показує, що найбільш деформована область знаходиться на кінці плеча, і навіть є невелике зміщення.

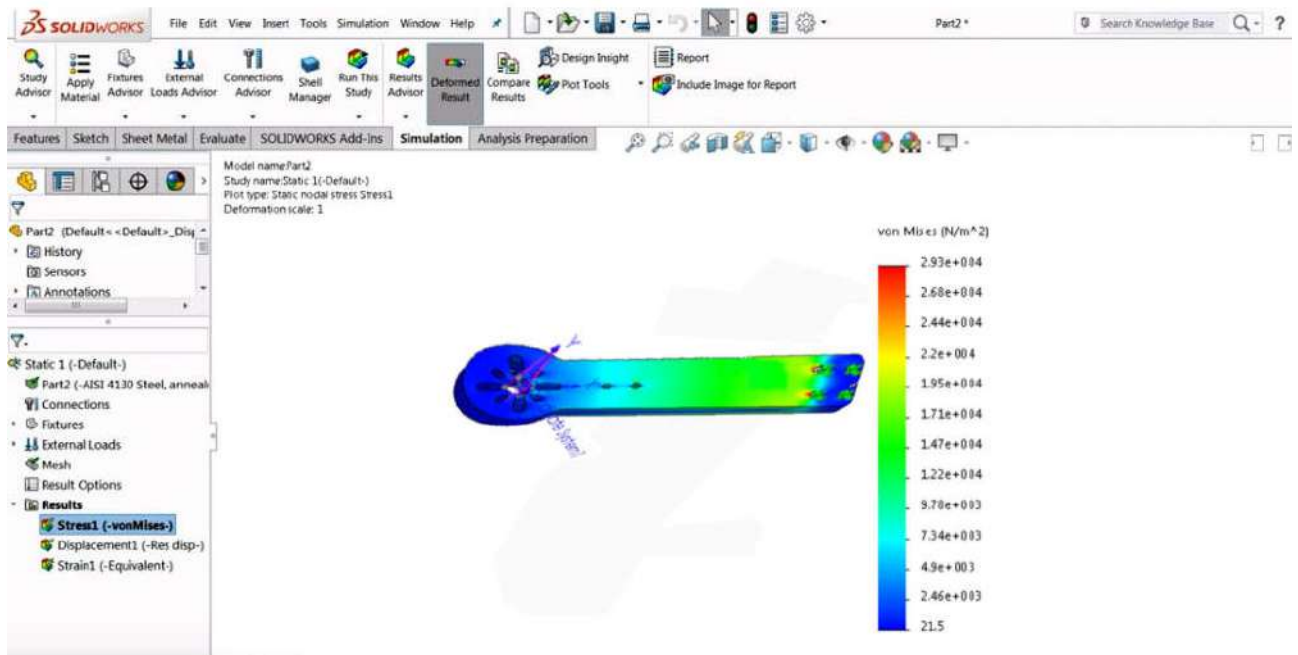


Рисунок 3.3 – Розподіл напруги за фон Мізесом в окремому промені корпусу дрона

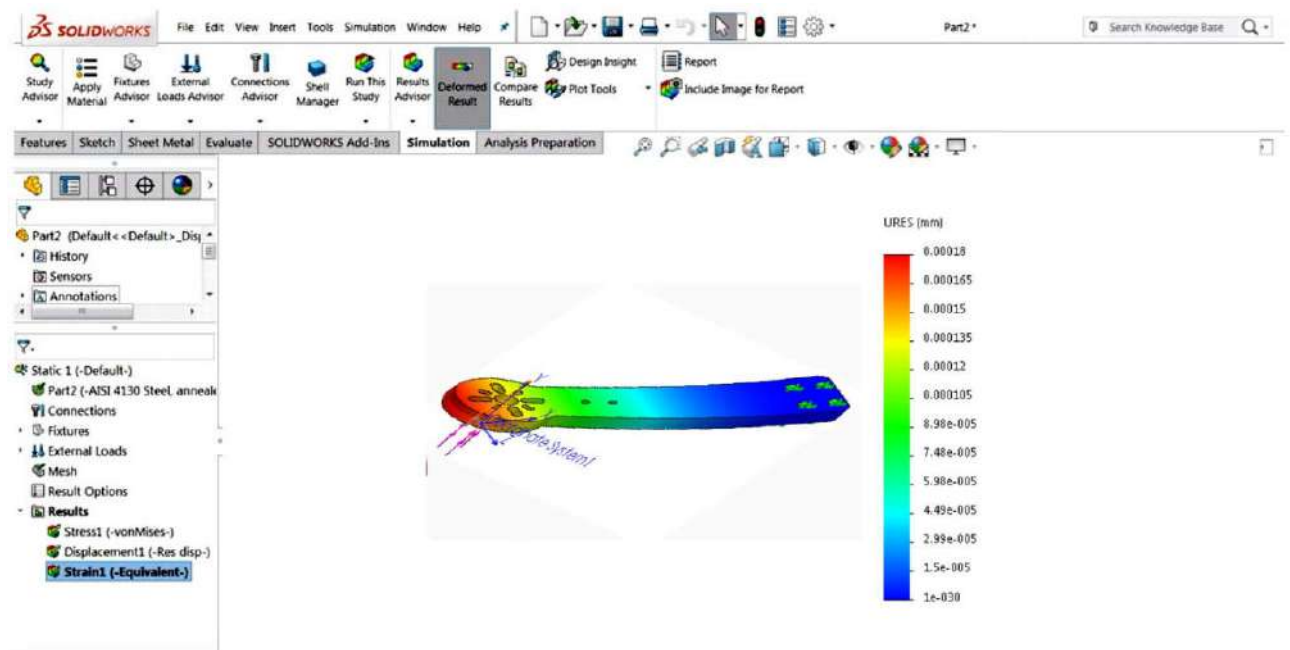


Рисунок 3.4 – Імітування навантаження в області кріплення двигуна

Таким чином, за допомогою програмного пакету SolidWorks можна проводити аналіз ряду механічних, вібраційних та резонансних навантажень окремих елементів або цілої конструкції безпілотних літальних апаратів.

Для побудови імітаційної моделі рекомендується використовувати наступний алгоритм:

- побудова досліджуваної конструкції на основі методу скінчених елементів;

- вибір типу досліджуваної характеристики (частотне дослідження, лінійне динамічне, нелінійне динамічне, структурний аналіз, аналіз вібрації, дослідження власної резонансної частоти тощо).

- вибір критерію аналізу (максимальна напруга зсуву, нормальна напруга, напруга Мора-Кулона або максимальна напруга за фон Мізеса).

- виведення результатів дослідження.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. В третьому розділі магістерської дипломної роботи приведена методика імітаційного моделювання конструкції безпілотного літального апарату типу мультикоптер, на основі якої будуються сучасні FPV-дрони.

2. Імітаційне моделювання проведене за допомогою досить поширеного програмного пакету SolidWorks, який дозволяє здійснювати аналіз ряду механічних, вібраційних та резонансних навантажень окремих елементів або цілої конструкції БпЛА. Дане програмне забезпечення дозволяє здійснювати складальне, а також проводити цілий ряд інструментальних досліджень, наприклад зусиль, моментів, статичних та динамічних навантажень, тощо.

3. Для аналізу досліджуваного об'єкта запропоновано використати критерій фон Мізеса, який ґрунтується на припущенні, що матеріал набуває критичних руйнацій, коли енергія деформації перевищує певну межу. Тобто гранично допустима величина напруження, за фон Мізесом, являється критерієм оцінки його властивостей.

4. Запропоновано власний оригінальний алгоритм проведення процедури імітаційного моделювання: побудова досліджуваної конструкції на основі методу скінчених елементів, вибір типу досліджуваної характеристики (частотне дослідження, лінійне динамічне, нелінійне динамічне, структурний аналіз, аналіз вібрації, дослідження власної резонансної частоти тощо), вибір критерію аналізу (максимальна напруга зсуву, нормальна напруга, напруга Мора-Кулона або максимальна напруга за фон Мізеса) та виведення результатів дослідження.

4. АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

4.1. Сенсори дрона

4.1.1. Контроль температури.

Відповідно до розділів 2-3 необхідно здійснити рекомендаційний підбір відповідного обладнання, його поєднання з іншими вузлами та блоками дрона, привести опис технічних характеристик, тощо. Один із запропонованих варіантів оптимізації роботи FPV-дронів – моніторинг температурних режимів двигунів (рис. 4.1).

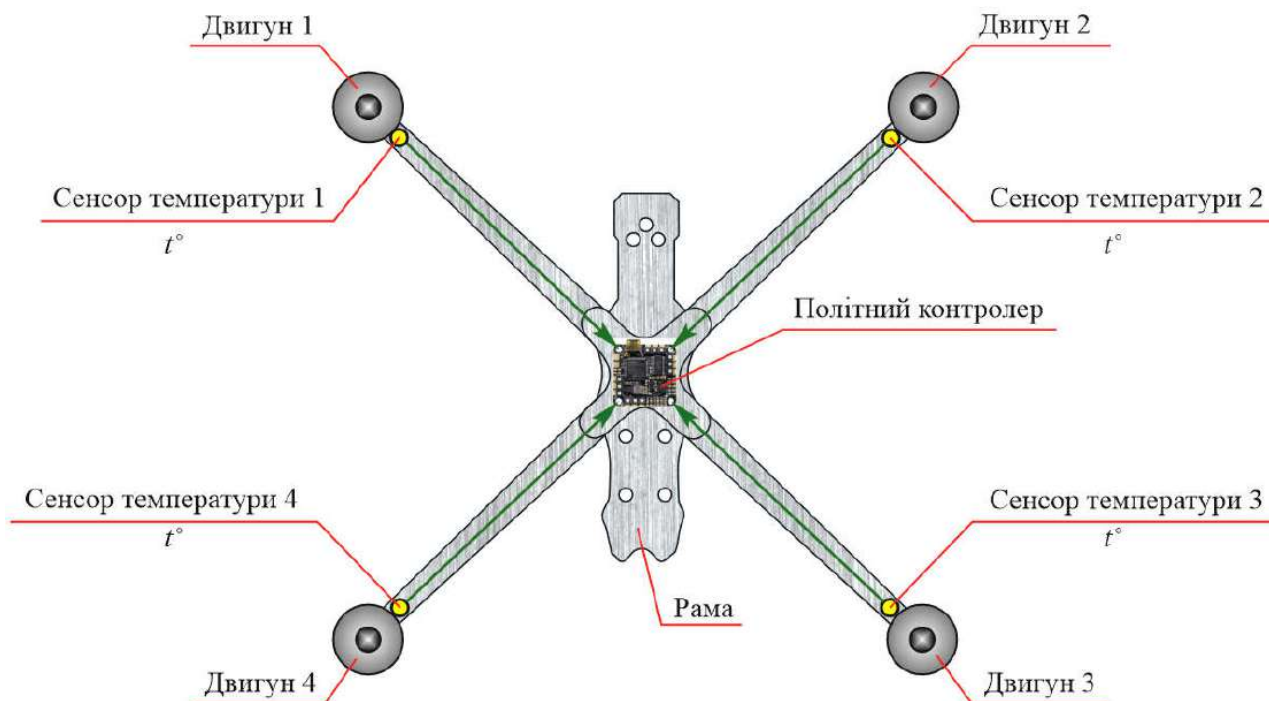


Рисунок 4.1 – Моніторинг температурних режимів двигунів дрона

Введення індивідуальних для кожного двигуна сенсора температури являється надзвичайно важливою функцією, адже струми обмоток двигунів десятки Ампер (інколи більше сотні Ампер). А при таких значеннях струмів досягнути перегрівання двигуна досить просто, причому за короткий проміжок часу. Наслідки ж цього можуть бути катастрофічними:

- перегрівання мідної обмотки, руйнування лакового покриття і, як наслідок, коротке замикання;
- часткова або повна втрата коерцитивної сили постійних магнітів, які надзвичайно чутливі до градієнтів температур (точка Кюрі).

Для цього можна використовувати найрізноманітніше обладнання, враховуючи, що радіотехнічна промисловість на сьогодні забезпечує надзвичайно широку номенклатуру температурних сенсорів. Це можуть бути як аналогові системи так і повністю цифрові. Стосовно форм-фактору – окремі сенсори температури чи інтегральна реалізація. Розглянемо деякі можливі апаратні реалізації, почавши з найпростіших. Так, наприклад, звичайна термопара являється достатньо простим та надзвичайно надійним варіантом температурного сенсора (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 – Приклади термопар

Принцип роботи термопари оснований на відомому ефекті Зеебека (рис. 4.3), який полягає у виникненні електрорушійної сили (ЕРС) між двома провідниками з різних матеріалів, з'єднаних між собою.

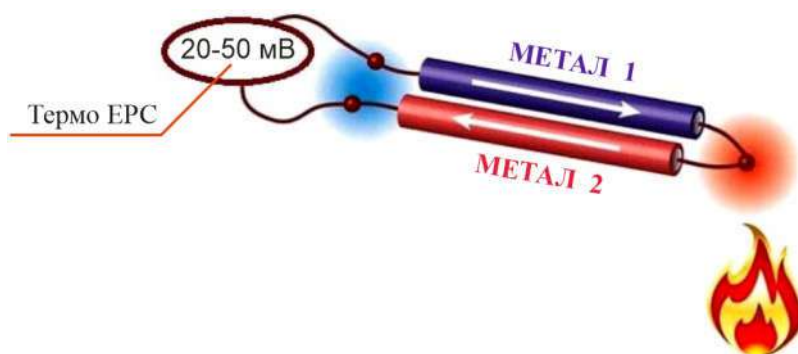


Рисунок 4.3 – Ефект Зеебека

По суті термопара являє собою термоелектричний перетворювач, оснований на термоелектричному ефекті.

Між з'єднаними провідниками є контактна різниця потенціалів (термо ЕРС), величина якої залежить від конкретних матеріалів сплавів металів. Коефіцієнт пропорційності у цій залежності називають коефіцієнтом термо-ЕРС. У різних металів коефіцієнт термо-ЕРС різний і, відповідно, різниця потенціалів, що виникає між кінцями різних провідників, буде різною.

В якості матеріалів для термопар обирають наступні поєднання (табл. 4.1):

Таблиця 4.1 – Основні типи термопар та їх характеристики

Тип термопари	Тип термопари	Температурний діапазон, °C (довготривало)	Температурний діапазон, °C (короткочасно)
K	ТХА (хромель-алюмелеві)	0 до +1100	-180 до +1300
J	ТЖК (залізо-константанові)	0 до +700	-180 до +1200
N	ТНН (ніхросил-нісильові)	0 до +1100	-270 до +1300
R	ТПП 13 (платинородій-платинові)	0 до +1600	-50 до +1700
S	ТПП 10 (платинородій-платинові)	0 до 1600	-50 до +1750
B	ТПР (платинородій-платинородієві)	+200 до +1700	0 до +1820
T	ТМКн (мідь-константанові)	-185 до +300	-250 до +400
E	ТХКн (хромель-константанові)	0 до +800	-40 до +900

До речі, даний тип сенсорів настільки мініатюрний, простий і надійний, що його можна інтегрувати безпосередньо в корпус двигуна, прикріплюючи прямо до обмоток двигуна.



Рисунок 4.4 – Інтеграція термопари в мотор дрона

Вихід терморпары можна безпосередньо під'єднувати до мікроконтролера, використовуючи входи, які містять АЦП. Однак є рішення цифрового спраження аналогової частини з мікроконтролером, використовуючи зовнішній аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Подібних пристроїв є надзвичайно велика кількість, наприклад МАХ6675 (рис. 4.5) [13].

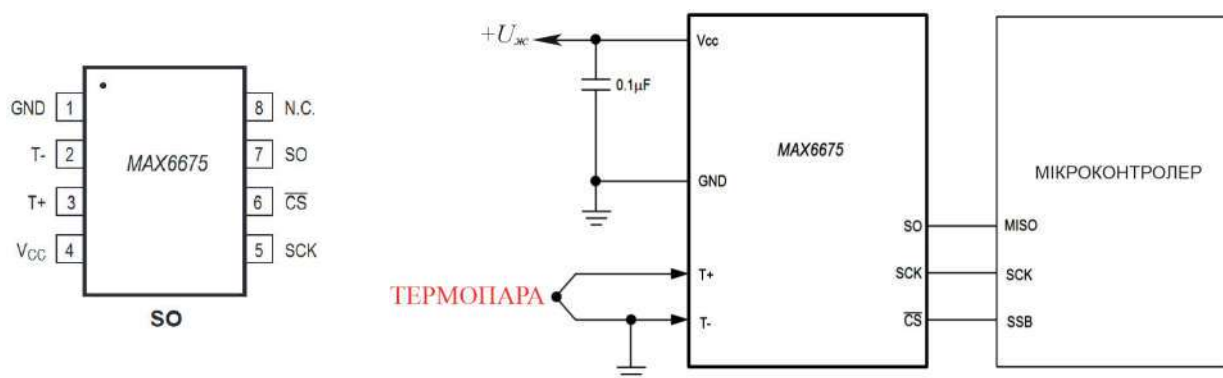


Рисунок 4.5 – Аналогово-цифровий перетворювач МАХ6675

Дана мікросхема представляє собою операційний підсилювач, 12-бітний перетворювач АЦП, схему компенсації температури холодного спаю і перетворювач в інтерфейс SPI. Є також вбудований контроль обриву терморпары. До модуля МАХ6675 також можна підключити різні терморпары К-типу (хромель-алюмель), забезпечуючи потрібний діапазон вимірювання (до +1024 °С) і точності (розрізнявальна здатність температури 0,25 °С). Розрядність АЦП – 12 Біт.

На базі даної мікросхеми навіть випускається готова плата перетворювача (рис. 4.6)



Рисунок 4.6 – Готовий модуль на основі МАХ6675

Наступним варіантом температурного контролю можна запропонувати інтегральні рішення. Достатньо поширеними, простими і надійними інтегральними сенсорами є DS1820 та DS1821.

DS1820 – калібрований цифровий датчик температури з однопровідним інтерфейсом 1-Wire та розрядністю 9 біт (рис. 4.7) [14].

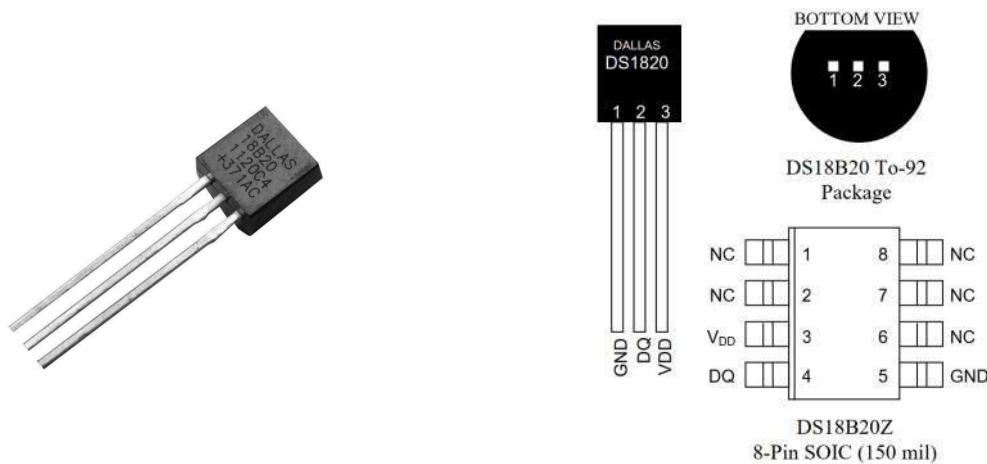


Рисунок 4.7 – Цифровий датчик температури DS1820

Модифікація DS18B20 володіє програмованою роздільною здатністю – 9-12 біт. Діапазон вимірюваних температур від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Точність вимірювання $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Для унікального інтерфейсу 1-Wire потрібен лише один порт (один провід і земля). Не потребує зовнішніх компонентів. Може живитися від лінії передачі даних, діапазон напруг живлення від 3,0 В до 5,5 В. Відсутність живлення в режимі очікування. Оскільки кожен сенсор DS18B20 містить унікальний серійний номер, кілька аналогічних пристроїв можуть працювати на одній шині 1-Wire. Це дозволяє розміщувати датчики температури в різних місцях, включають контроль навколишнього середовища HVAC, вимірювання температури всередині будівель, обладнання або машини, а також моніторинг і контроль процесів.

DS1821 – програмований 8-розрядний датчик, термостат з цифровим інтерфейсом 1-Wire (рис. 4.8) [15]. Тобто додатково є можливість роботи в якості цифрового термостату. Також працює в діапазоні від -55 до $+125^{\circ}\text{C}$. Відмінною особливістю датчика DS1821 є можливість програмування режимів

спрацьовування термостата. Точки спрацьовування термостата зберігаються в енергонезалежній пам'яті, тому пристрої DS1821 можна запрограмувати для автономної роботи в режимі термостата. Точність ± 1 °C. Напруга живлення: 2,7-5,5 В. Розміри: 4 x 20 мм.



Рисунок 4.8 – Цифровий програмований датчик температури DS1821

На рис. 4.9 показана блок-схема DS1821, а опис контактів наведено в таблиці 1. Вивід DQ функціонує як вихід термостата і як контакт вводу/виводу даних для зв'язку 1-Wire. Інтерфейс 1-Wire забезпечує доступ користувача до регістрів точки спрацьовування термостата (TH і TL) енергонезалежного EEPROM, регістру стану/конфігурації і регістру температури.

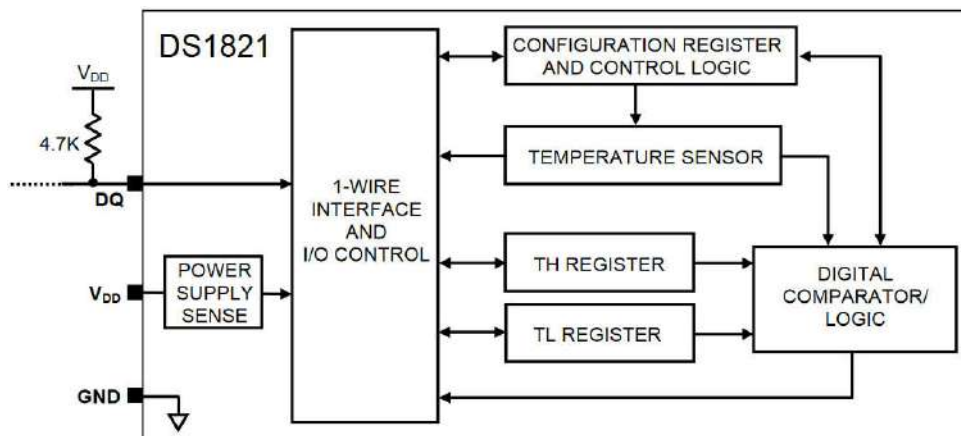


Рисунок 4.9 – Структурна схема мікросхемки DS1821

Існують багатофункціональні та комбіновані сенсори, які здійснюють моніторинг кількох параметрів. Так, наприклад HR202L – цифровий датчик температури та вологості [16]. Останній параметр може бути корисним для визначення наявності вологи, що потрапляє на двигуни або електронні складові дрона.



Рисунок 4.10 – Цифровий датчик температури та вологості

Модуль GY-68 BMP180 [17] є комбінованим сенсором, що поєднує в собі датчик атмосферного тиску і термометр, збудований на чіпі Bosch BMP180 (рис. 4.11). Тобто по суті – це барометр, термометр і альтиметр. Сенсор BMP180 побудований за магніторезистивною технологією, завдяки чому має високу точність та лінійність, а також низький рівень шумів.

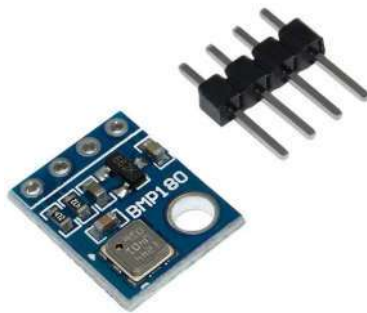


Рисунок 4.11 – Комбінований сенсор атмосферного тиску і температури

Технічні характеристики комбінованого сенсора BMP180:

- діапазон вимірювання тиску 30-110 кПа (-500...9000 м над р. моря);
- максимальна роздільна здатність показань 0,02 кПа (17см);
- діапазон вимірювання температури 0-65 °C;
- роздільна здатність за температурою 0,1 °C;
- напруга живлення 1,62-3,6 В (4,25 В max.);

- інтерфейси цифровий вихід I²C;
- вихідні дані (тиск і температура) 16 біт;
- розміри 21×18 мм

Малий розмір та низьке енергоспоживання датчика дозволяє використовувати його в мобільних пристроях, домашніх метеостанціях, літальних апаратах (функція альтиметру) та інш. Також модуль може бути використаний у комплекті з GPS модулем для уточнення висотних координат. Модуль може монтуватися як на друковану плату, так і підключатися за допомогою стандартних дротів (штиркові з'єднувачі не входять до комплекту).

Особливе місце займають безконтактні сенсори температури, серед яких слід виділити MLX90614 (GY-906) [18]. Сімейство MLX90614 представляє собою одно- та двозонний інфрачервоний термометр в корпусі TO-39 (рис. 4.12).



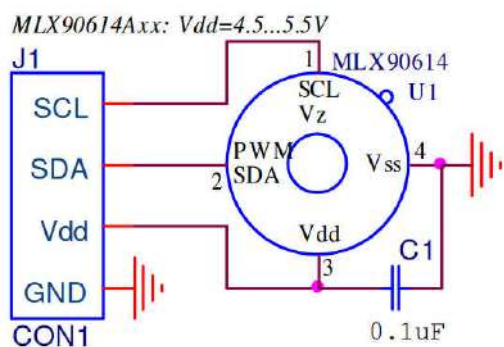
Рисунок 4.12 – Безконтактний сенсор температури MLX90614

Модуль GY-906, створений на основі інтегральної збірки MLX90614, призначений для безконтактного вимірювання абсолютної температури об'єктів. Дані температури можна зчитувати як через цифровий інтерфейс SMBus (аналогічний I²C), так і через ШІМ-вихід із частотою ШІМ 10 Гц або 1000 Гц. Датчик MLX90614 має широкі можливості програмування, калібрування та конфігурації. Модуль має зручні отвори для кріплення,

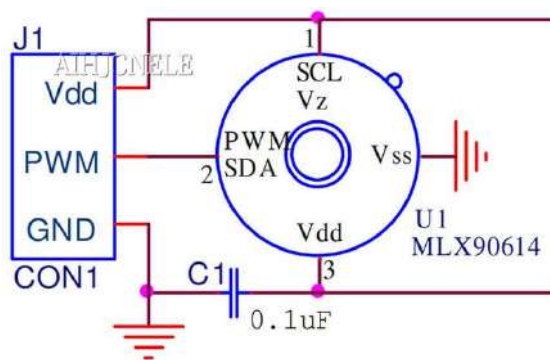
внутрішній стабілізатор, конденсатори фільтра живлення і підтягуючі резистори на цифровій шині.

Технічні характеристики датчика температури MLX90614:

- тип калібрування датчика заводське;
- температурний діапазон експлуатації від -40 до +85 °C;
- температурний діапазон вимірювань від -70 до +380 °C;
- напруга живлення від 2,7 до 3,6 В;
- цифровий інтерфейс SMBus сумісний;
- додатковий цифровий вихід ШІМ;
- роздільна здатність 0,02 °C;
- кут поля зору ~90°;
- розміри 1,6×1,1 см.



а)



б)

Рисунок 4.13 – Схеми підключення MLX90614:

а) I²C; б) додатковий цифровий вихід ШІМ

Датчик температури двигуна (інтегрований в двигун чи зовнішній) забезпечує моніторинг температури в реальному часі. Політний контролер, на основі цієї додаткової інформації від двигунів, може здійснювати оперативні регулювання режиму роботи та швидкості моторів, забезпечуючи оптимальний температурний режим. Введення запропонованого функціоналу дозволить збільшити безпеку польоту: безперервний моніторинг температури двигуна допоможе виявити проблему завчасно та вжити необхідних заходів. Зворотній зв'язок з двигунами стосовно температури допоможе оптимізувати льотні

характеристики дрона шляхом регулювати швидкість моторів або інших параметрів для того, щоб відповідати безпечним експлуатаційним режимам. Температурний моніторинг можна використовувати для обслуговування та діагностики: дані температури двигунів можна внести в журнал і використовувати для технічного обслуговування. Таким чином, моніторинг температури дозволяє зберегти дороге обладнання від деградації, втрати технічних, а отже, політних характеристик та поломок.

4.1.2. Акселерометричний контроль.

Наступним важливим параметром, який бажано контролювати окрім температури, є вібрація корпусу та окремих його елементів (в основному двигунів), рис. 4.14.

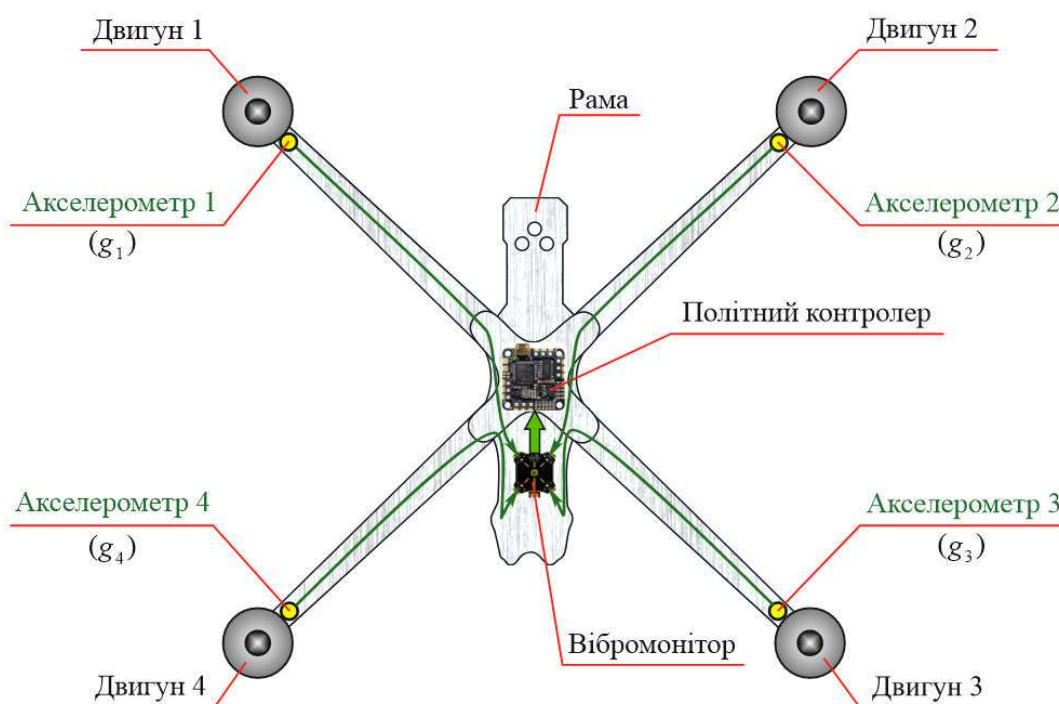


Рисунок 4.14 – Акселерометричний моніторинг конструкції дрона

За аналогією з моніторингом температури, акселерометрична телеметрія дозволяє вирішити наступні проблемні питання:

- контроль вібрації двигунів;

- контроль вібрації корпусу (рами);
- контроль цілісності та якості пропелерів;
- пошкодження дрона;
- антивібраційний контроль.

Для вирішення цих задач можна встановити як окремі акселерометри на підконтрольні елементи дрони, так і готові модулі (плати). Промисловістю випускаються інтегральні рішення, наприклад ADXL335 – мініатюрний, малопотужний 3-осьовий акселерометр, рис. 4.15, 4.16 [19].

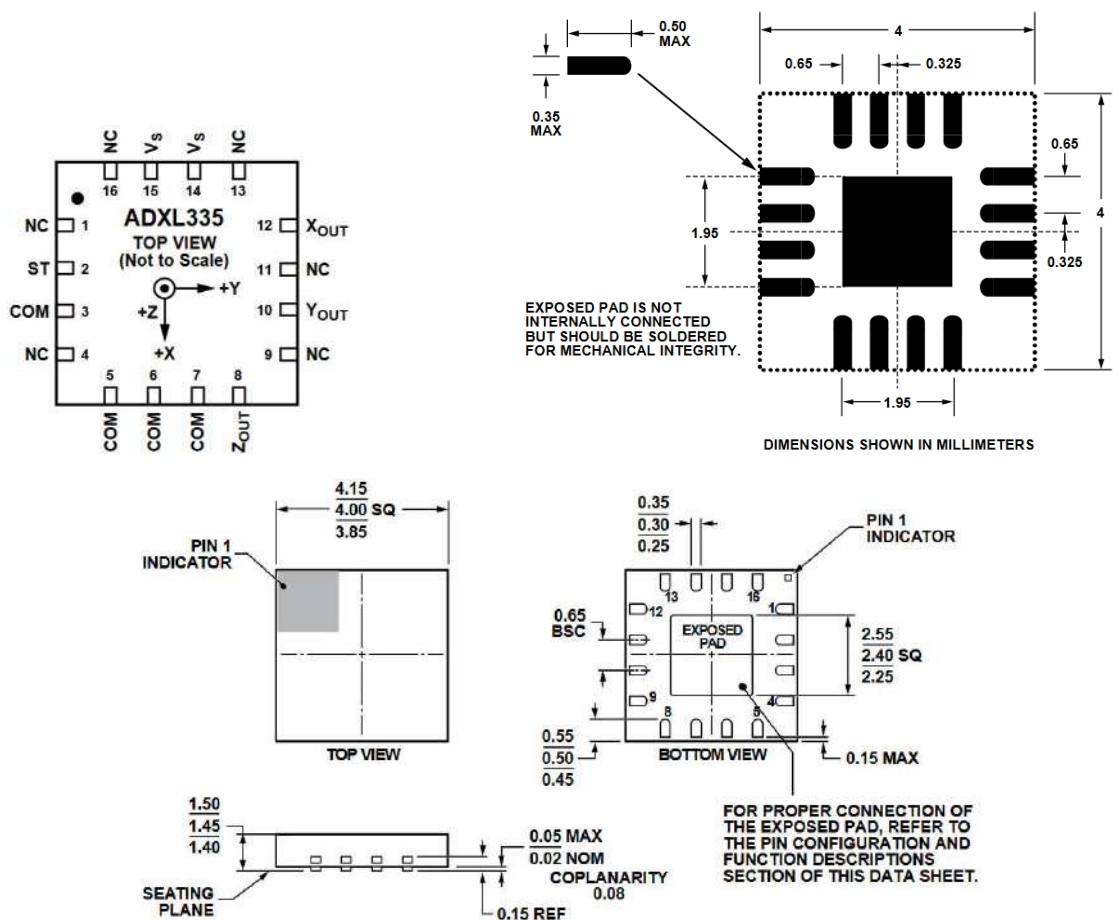


Рисунок 4.15 – Зовнішній вигляд, габаритні розміри та призначення виводів аналогового акселерометра ADXL335

ADXL335 вимірює прискорення в діапазоні ± 3 g. Він може вимірювати статичне прискорення сили тяжіння, а також динамічне прискорення в результаті руху, ударів або вібрації. Корпус мікросхем (LFCSP) має розміри лише $4 \times 4 \times 1,45$ мм. Низька потужність споживання енергії (350 мкА, при

напрузі 1,8-3,6 В) дозволяє використовувати даний пристрій в автономних та мобільних системах.

Унікальною властивістю акселерометра є його живучість: він витримує короткочасні удари і перевантаження до 10000 g. Має відмінну температурну стабільність. Ці останні дві риси дозволяють використовувати даний акселерометр на БПЛА та FPV-дронах. Мікросхема має достатньо мінімалістичну зовнішню обвіску: конденсатор фільтра живлення і по конденсатору на вихід кожної осі – C_X , C_Y і C_Z на контактах X_{OUT} , Y_{OUT} і Z_{OUT} (рис. 4.16). Дані конденсатори дозволяють регулювати смугу пропускання акселерометра в діапазоні від 0,5 Гц до 1600 Гц для осей X і Y, а також діапазон від 0,5 Гц до 550 Гц для осі Z.

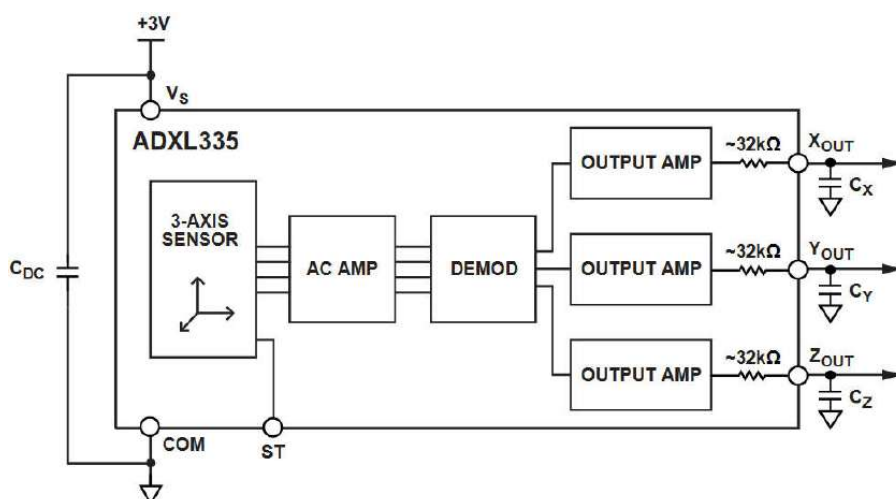


Рисунок 4.16 – Структура та підключення акселерометра ADXL335

За принципом дії розрізняють механічні, електричні, електромеханічні та інші. Акселерометри можуть бути реалізовані на основі мікроелектромеханічних систем (MEMS), рис. 4.17. Вони поєднують у собі мікроелектронні та мікромеханічні компоненти. MEMS технології дозволяють створювати конденсатори з рухомими обкладками на кремнієвій підкладці, що істотно зменшує розмір пристрою та вартість. Для наглядності внутрішня будова MEMS акселерометра представлена на збільшеному фото (рис. 4.17). В даному випадку – це одновісний пристрій, який здійснює коливання лише в площині x. Але загальний принцип зрозумілий. Для літальних апаратів більше підходять 3-

осьові акселерометри. В цьому випадку МЕМС-структура ускладнюється, забезпечуючи 3 ступеня свободи.

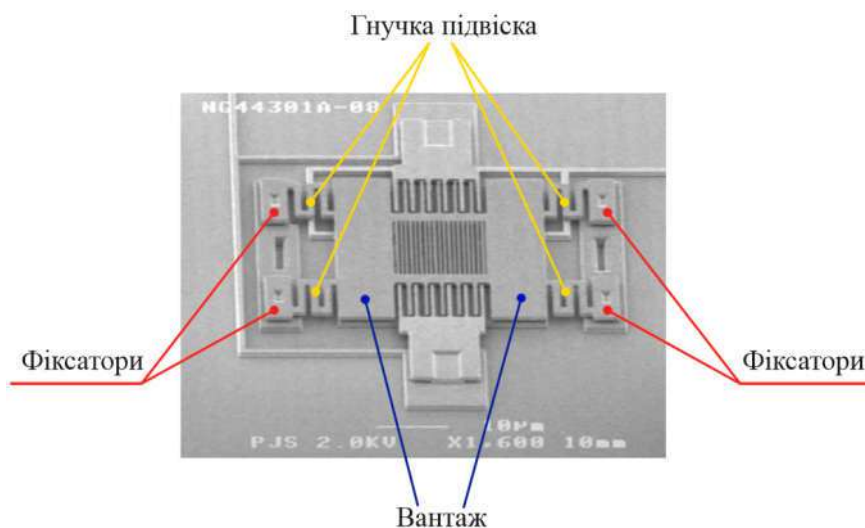


Рисунок 4.17 – Структура та підключення акселерометра

Вихід акселерометра може бути аналоговим або цифровим. В останньому випадку в структуру акселерометра включено АЦП (як правило із сигма-дельта модуляцією). На рис. 4.16 представлено аналоговий акселерометр. Приклад цифрового акселерометра ADXL345 [20] представлено на рис. 4.18, 4.19.

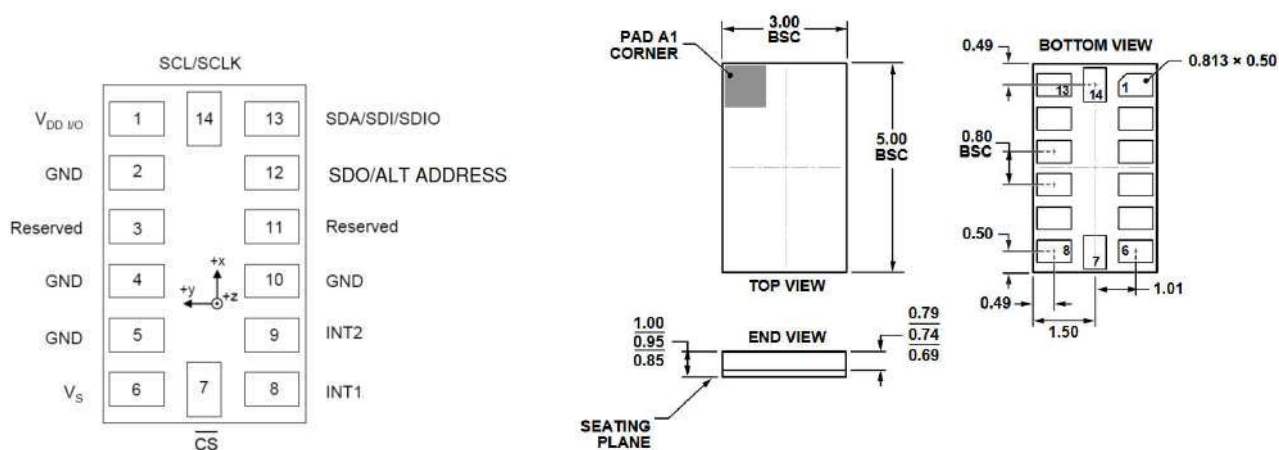


Рисунок 4.18 – Зовнішній вигляд, габаритні розміри та призначення виводів цифрового акселерометра ADXL345

ADXL345 – мініатюрний і тонкий, 3-осьовий акселерометр із наднизьким енергоспоживанням (23 мкА в режимі вимірювання, 0,1 мкА в режимі

очікування) з високою роздільною здатністю (13 біт) та діапазоном вимірювання $\pm 2 \dots \pm 16$ g. Діапазон напруг живлення: від 1,8 В до 3,6 В.

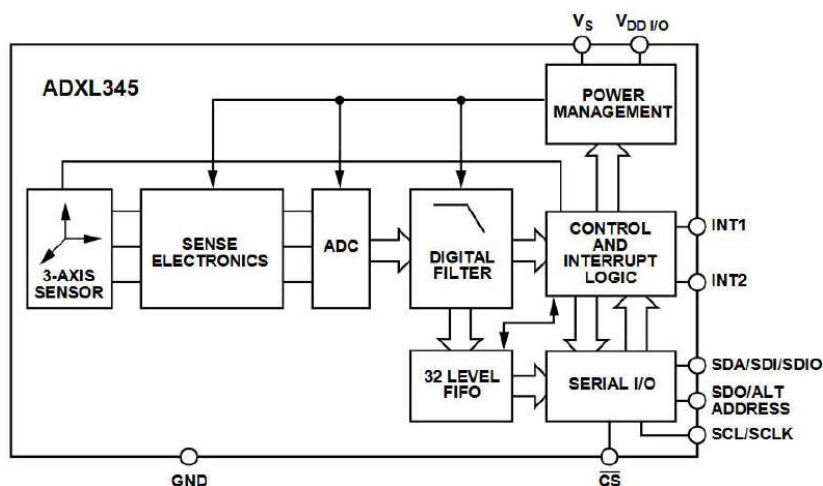


Рисунок 4.19 – Структура акселерометра ADXL345

ADXL345 добре підходить для мобільних та автономних пристроїв. Корпус типу LGA – $3 \times 5 \times 1$ мм. Цифрові результати вимірювання представляються у вигляді 16-розрядних чисел в додатковому коді і доступні через цифрові інтерфейси SPI (трьох- або чотирьохпровідні) або I²C. Інтерфейс I²C присутній на всіх політних контролерах сучасних дронів. Тому наявність даного протоколу спрощує апаратно-програму реалізацію. Для вибору інтерфейсу використовується вивід CS: якщо на CS низький рівень – SPI, якщо ж високий – I²C. Для зберігання даних використовується 32-рівневий буфер «першим прийшов, першим вийшов» (FIFO). Даний акселерометр так, як і попередній, витримує короткочасні ударні навантаження 10000 g.

Може бути представлений вже у вигляді готової плати, рис.



Рисунок 4.20 – Реалізація акселерометра ADXL345 у вигляді готової плати

Існують також комбіновані пристрої, які в одному корпусі містять: акселерометр, гіроскоп, альтиметр, барометр, тощо. Приклад подібного пристрою – GY-521 (GY-25) на основі мікросхем MPU-6000 або MPU-6050, рис. 4.21.



Рисунок 4.21 – Комбіновані пристрої:

а) GY-521; б) GY-25 на основі мікросхеми MPU-6050

Модулі GY-xx на основі мікросхем MPU-6000 або MPU-6050 забезпечують визначення просторового положення за допомогою 3-осьового гіроскопа та 3-осьового акселерометра. І що надзвичайно важливо в нашому випадку – наявність сенсора температури на одному кристалі. Тобто, даний модуль дуже зручний для проектування БПЛА і квадрокоптерів, адже одночасно забезпечує моніторинг обох важливих параметрів – температури двигунів і вібрацію (рис. 4.22).

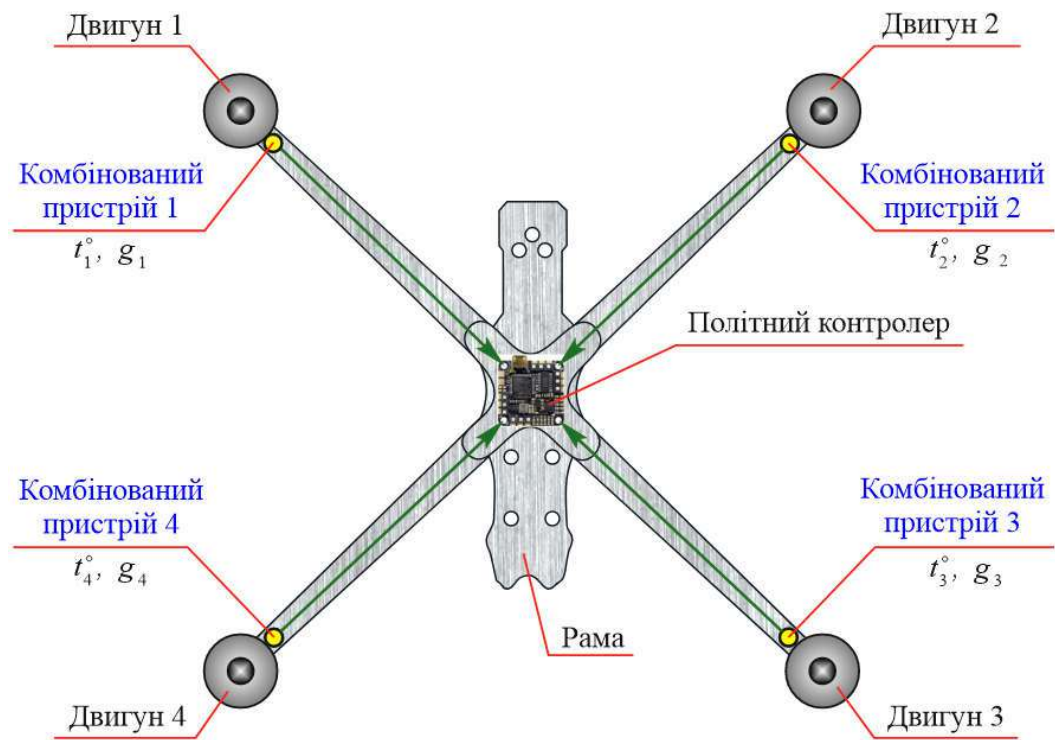


Рисунок 4.22 – Комбінований моніторинг стану дрона

При налаштуванні чіпу MPU-6050, необхідно використовувати регістри для самотестування гіроскопа та акселерометра, що дозволяє користувачеві перевірити механічні та електричні частини гіроскопа та акселерометра. В даному контексті функція гіроскопа не використовується, тому розглянемо лише процедуру само тестування акселерометричної частини. Код для самотестування включено до програмного забезпечення MotionApps™, яке надається компанією InvenSense. Коли самоперевірка активована, бортова електроніка активує відповідний датчик. Ця активація імітує зовнішню силу. Задіяний датчик, у свою чергу, вироблятиме відповідний вихідний сигнал. Вихідний сигнал використовується для спостереження за відповіддю самоперевірки. Ця відповідь самоперевірки використовується для визначення того, чи пройшла деталь самоперевірку. Ця зміна відповіді самоперевірки від заводської настройки має бути в межах, наведених у MPU- 6000/MPU-6050. В іншому випадку елемент вважається таким, що не пройшов самоперевірку.

Отримання заводського значення акселерометра (FT). Якщо програмне забезпечення InvenSense MotionApps не використовується, необхідно виконати описану нижче процедуру отримати заводське значення корекції відповіді самоперевірки (FT). Дана процедура проводиться для конкретних регістрів – № 13-16. Заводське значення корекції відповіді самоперевірки (FT) розраховується, наступним чином. $FT[Xa]$, $FT[Ya]$, і $FT[Za]$ стосуються

заводських значень налаштування (FT) для осей X, Y і Z акселерометра відповідно. У наведених нижче рівняннях заводські значення налаштування для прискорення мають бути в десятковому форматі, і вони визначаються об'єднанням верхніх бітів самоперевірки акселерометра (біти 4-2) з нижніми біти самоперевірки акселерометра (біти 1-0). Під час самоперевірки акселерометра повний діапазон має бути встановлений на $\pm 8g$.

$$\begin{cases} FT[Xa] = 4096 * 0.34 * \frac{0.92 \left(\frac{XA_TEST-1}{2^{5-2}} \right)}{0.34} & \text{if } XA_TEST \neq 0. \\ FT[Xa] = 0 & \text{if } XA_TEST = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} FT[Ya] = 4096 * 0.34 * \frac{0.92 \left(\frac{YA_TEST-1}{2^{5-2}} \right)}{0.34} & \text{if } YA_TEST \neq 0. \\ FT[Ya] = 0 & \text{if } YA_TEST = 0. \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} FT[Za] = 4096 * 0.34 * \frac{0.92 \left(\frac{ZA_TEST-1}{2^{5-2}} \right)}{0.34} & \text{if } ZA_TEST \neq 0. \\ FT[Za] = 0 & \text{if } ZA_TEST = 0. \end{cases}$$

Причому параметри XA_TEST, XG_TEST, YA_TEST, YG_TEST, ZA_TEST і ZG_TEST – 5-бітне значення без знаку, а FT[Xa], FT[Xg], FT[Ya], FT[Yg], FT[Za] і FT[Zg] – визначається за допомогою цього значення, як пояснено вище.

4.1.3. Додаткове обладнання.

При використанні великої кількості додаткових модулів може виникнути дефіцит портів політного контролера дрона. В цьому випадку передбачені необхідні розгалужувачі та концентратори інтерфейсів. Наприклад, для розширення CAN-портів можна порекомендувати спеціалізований хаб Holybro CAN HUB – концентратор датчиків на 4 порти (рис. 4.23).



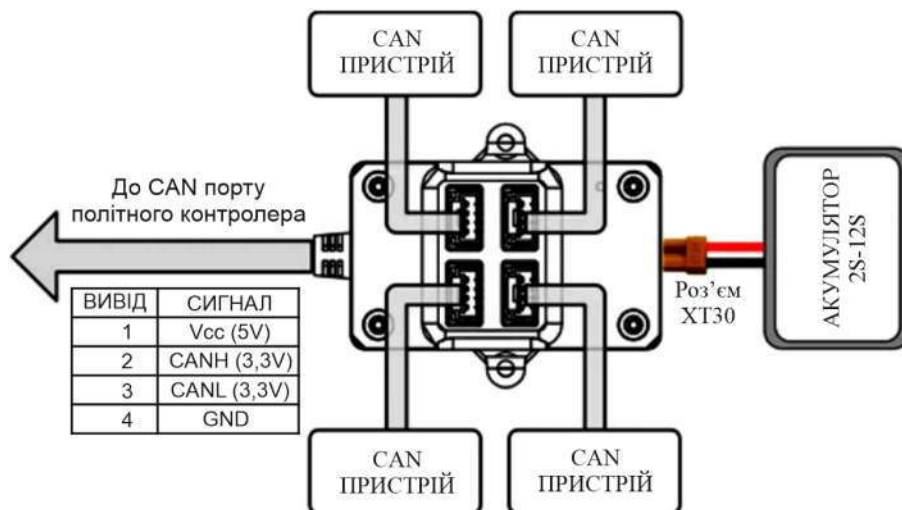


Рисунок 4.23 – CAN HUB для дрона

Це модуль розширення CAN-портів з живленням, розроблений для різних польотних контролерів і периферійних пристроїв, що їх підтримують. Даний пристрій містить інтегрований понижуючий перетворювач напруги живлення 5В/1А для кожного порту. Загальний струм 4 портів не може перевищувати 3А. Через роз'єм живлення ХТ30 можна під'єднувати акумулятори номіналом 2-12S. Існують розгалужувачі і на більше число портів.

4.2. Підбір двигунів.

Одним із найважливіших елементів будь-якого літального апарату є його двигун, а в даному випадку система двигунів (мультикоптер). Саме від вибору даного елемента будуть залежати всі функціональні та технічні характеристики БПЛА. Вибір двигуна для FPV дрона – це важливий аспект, від якого залежать маневреність, швидкість, стабільність і тривалість польоту дрона. Розглянемо ряд найбільш важливих факторів оптимального вибору конструкції FPV дрона та, зокрема, системи електричних двигунів.

1. Розмір двигуна.

Двигуни FPV мають позначення типу "2207", "2306", тощо. Перші дві цифри вказують на діаметр статора (22 мм або 23 мм), а останні дві цифри – на висоту статора (07 мм або 06 мм). Більші розміри статора зазвичай

забезпечують більше обертів та крутного моменту, що корисно для важких чи агресивних польотів. Вибір розміру залежить від типу дрона:

- мікро-дрони: 1102-1306;
- середні дрони (5-дюймові дрони: 2204-2306);
- великі дрони (7+ дюймів): 2506 і більше).

2. Кількість обертів за хвилину на вольт (KV).

Параметр KV означає кількість обертів за хвилину на кожен вольт поданої напруги. Високі значення KV забезпечують більшу швидкість обертів, тоді як низькі KV дозволяють більшу стабільність та ефективність:

- 5000 і більше KV – зазвичай для маленьких та швидких дронів;
- 2300–2700 KV – найбільш поширені для 5-дюймових гоночних дронів;
- 1700–2000 KV – для великих, стабільніших дронів;
- 100–500 KV – наднизькі значення параметру KV використовуються для важких великих дронів, що потребують значного тягового зусилля.

Низький KV забезпечує вищий крутний момент, що є необхідним для важких завдань, проте знижує максимальну швидкість. Вибір KV також залежить від розміру пропелерів: великі пропелери ефективніше працюють на низьких оборотах, тоді як менші пропелери потребують вищих оборотів, а отже і вищого KV.

4.3. Вибір пропелерів.

Правильний вибір пропелерів для FPV-дронів значно впливає на характеристики польоту, швидкість, маневреність, а також на час роботи батареї акумуляторів. Розглянемо основні фактори для вибору пропелерів і які саме варіанти підійдуть для різних завдань. Пропелери для FPV-дронів характеризуються рядом параметрів: кількість лопатей, розмір (діаметр), крок, матеріал.

Пропелери мають від двох до восьми лопатей:

- дволопатеві – забезпечують менший опір, високу швидкість і ефективність, але можуть бути менш стабільними і використовуються для максимальної швидкості на коротких дистанціях;

- трьохлопатеві – більш універсальні, з гарним балансом між тягою і маневреністю.

- чотирьохлопатеві та більше – забезпечують високу тягу, кращу стабільність і плавність польоту, але знижують швидкість і скорочують час польоту через більший опір.

Діаметр пропелера (D , вимірюється в дюймах) – це максимальний діаметр круга, який описують лопаті. Для більшості дронів даний параметр варіюється в межах $D=2''-30''$. Вибір діаметра пропелера дрона залежить від необхідного розміру та призначення самого дрона:

- мінімальний діаметр – для мініатюрних і гоночних дронів діаметр пропелера може починатися від 2-3 дюймів (5-8 см).

- середній діаметр – для звичайних дронів споживчого класу (наприклад DJI) використовуються пропелери діаметром 5-10 дюймів (12-25 см).

- максимальний діаметр: для великих професійних або промислових дронів, що піднімають важкі вантажі, пропелери можуть досягати діаметра 20-30 дюймів (50-75 см) і більше.

Стандартні розміри для FPV-дронів зазвичай 5-7 дюймів:

- 5-дюймові пропелери – найпопулярніші для гоночних дронів, оскільки забезпечують високу швидкість і маневреність.

- 6-дюймові – для дальніх польотів, адже вони зазвичай забезпечують трохи більший час польоту.

- 7-дюймові – використовуються на важчих дронах для дальніх та стабільних польотів, мають вищу ефективність у використанні енергії.

Загалом, менші пропелери використовуються для швидких маневрів і польотів на короткі дистанції, тоді як більші пропелери надають більше підйомної сили і підходять для тривалих польотів та важких вантажів.

Крок лопатей λ залежить від кута нахилу лопатей пропелера α і фактично означає відстань, пройдену гвинтом по прямій осі за один оборот (рис. 2):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\lambda}{2\pi R}, \quad (4.2)$$

де α – кута нахилу лопатей пропелера; R – радіус пропелера.

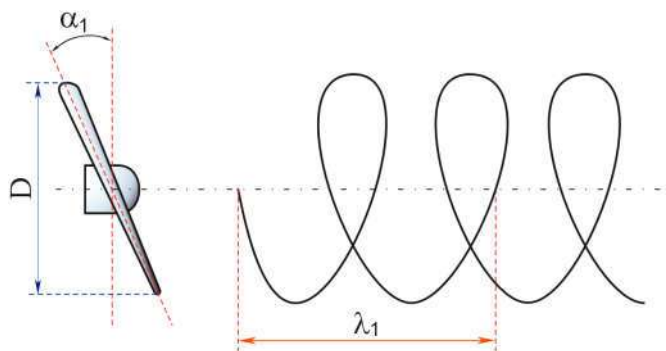
Даний параметр характеризує підйомну силу безпілотної: пропелери з більшим кроком (рис. 2, а) забезпечують більшу тягу і швидкість, але вимагають більше енергії, що знижує час польоту та менш ефективні для точного маневрування; пропелери з меншим кроком (рис. 2, б) дають більше обертів на хвилину (RPM), що забезпечує стабільність та точність контролю, але знижує швидкість і підходить для спокійних, плавних польотів з меншою швидкістю.

З рисунку слідує, що:

$$\alpha_1 > \alpha_2 \rightarrow \lambda_1 > \lambda_2 \quad (4.3)$$

Діапазон значень кроку пропелера дрона варіюється у межах $\lambda=2''-14''$ і залежить від конструкції дрона та призначення пропелера. Зазвичай, для дронів малого та середнього розміру, використовуються пропелери з наступними характеристиками кроку:

- мінімальний крок – приблизно від 2 до 4 дюймів;
- максимальний крок – від 4 до 10 дюймів для стандартних дронів і навіть більше (до 14 дюймів) для професійних моделей або великих промислових дронів.



а)

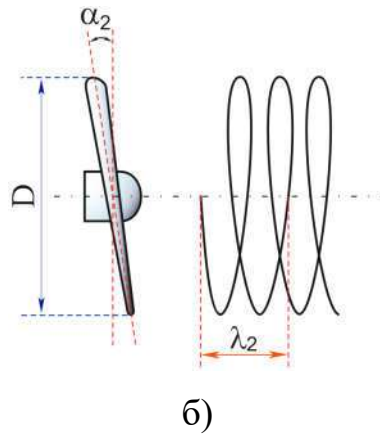


Рисунок 4.24 – Залежність кроку двигуна дрона від кута нахилу лопатей:
 а) великий крок лопатей пропелера; б) малий крок лопатей пропелера;
 D – діаметр пропелера дрона; α – кут нахилу лопатей; λ – крок лопатей

Співвідношення кроку та діаметру лопатей (1) можна модернізувати, ввівши пряму залежність відношення кроку до діаметра пропелера (λ/D):

$$k = \frac{\lambda}{D}, \quad (4.4)$$

Інтерпретація даного співвідношення наступна:

- низьке співвідношення ($k < 0,5$) свідчить про те, що пропелер підходить для високої підйомної сили на низьких швидкостях та забезпечує стабільний політ, що корисно саме для FPV-дронів, які знімають відео; зазвичай такі пропелери мають великий діаметр та менший крок;

- середнє співвідношення ($k = 0,6-0,8$) використовується для універсальних дронів, які потребують балансу між маневреністю та швидкістю; підходить для споживчих квадрокоптерів, таких як DJI Phantom або аналогічні моделі;

- високе співвідношення ($k > 0,8$) забезпечує вищу швидкість, але меншу підйомну силу; подібне співвідношення підходить для високошвидкісних дронів, таких як гоночні; зазвичай має великий крок порівняно з діаметром.

Співвідношення між кроком пропелера та діаметром лопатей – важливий параметр, який визначає, наскільки ефективно дрон перетворює оберти двигуна в тягу. Це співвідношення має значний вплив на швидкість, тягу та загальні

льотні характеристики дрона і допомагає вибрати оптимальний тип пропелера для різних типів польотів і умов.

Таким чином, зі зменшенням діаметра і збільшенням кроку можна знизити опір повітря і підняти швидкість підйому дрону, тобто вплинути на маневреність апарату (що важливо, наприклад, для квадрокоптерів гоночних). В іншому випадку, якщо збільшити діаметр та зменшити крок пропелера, ми знизимо динамічні характеристики безпілота, але підвищимо його вантажопідйомність при одночасному підвищенні плавності та стабільності польоту (якість, важлива при аерофотозйомках).

Вибір пропелерів є критичним фактором для досягнення оптимальної продуктивності дронів. Пропелери визначають швидкість, стабільність та ефективність дрону, тому вибір залежить від типу дрону та завдань, які він виконуватиме. Нижче наведені рекомендації для вибору пропелерів для різних типів дронів.

1. Мікродрони і дрони для FPV:

- розмір: 2-5 дюймів;
- кількість лопатей: 3 або 4 лопаті для більшої маневреності та контролю;
- матеріал: пластик – легкий матеріал, що забезпечує високу швидкість обертання;
- форма: пропелери з більшим кроком (кутом атаки) забезпечують швидке прискорення, що ідеально для FPV польотів.

Рекомендація: для забезпечення швидкого відгуку і маневреності необхідно обрати три- або чотирилопатеві пропелери 3-5 дюймів з більшим кроком. Для тривалого польоту краще підходять дволопатеві пропелери.

2. Квадрокоптери для аерозйомки:

- розмір: 6-12 дюймів;
- кількість лопатей: 2 лопаті для кращої стабільності та довшого польоту;
- матеріал: карбон або нейлон з композитами для більшої міцності та стабільності;
- форма: з меншим кроком для плавності та стабільності при польотах.

Рекомендація: для стабільності та довгого часу польоту найкраще підходять дволопатеві пропелери середнього діаметра (8-10 дюймів).

3. Гоночні дрони:

- розмір: 4-6 дюймів;
- кількість лопатей: 2 або 3 лопаті для більшої маневреності та швидкості;
- матеріал: пластик або нейлон – важливо мінімізувати вагу;
- форма: пропелери з більшим кроком для максимальної швидкості та прискорення;

Рекомендація: орієнтуватися на пропелери з більшим кутом атаки і трилопатеві для максимальної маневреності, але це зменшить тривалість польоту.

4. Вантажні дрони (індустріальні):

- розмір: 15-30 дюймів і більше, в залежності від розміру дрону;
- кількість лопатей: 2 лопаті, іноді 3 для більшого підйому;
- матеріал: карбон або армовані композити для міцності;
- форма: зазвичай з меншим кутом атаки для підйому важких вантажів та плавного польоту.

Рекомендація: пропелери великого розміру з меншим кутом атаки для максимальної вантажопідйомності та ефективності.

5. Безшумні дрони (для огляду або пошукових місій):

- розмір: 6-10 дюймів;
- кількість лопатей: зазвичай 2, але використовують спеціальну аеродинамічну форму;
- матеріал: легкий пластик або нейлон з додатковими шумопоглинаючими елементами;
- форма: пропелери з меншим кутом атаки та більш гладкими краями для зменшення шуму.

Рекомендація: вибір аеродинамічних дволопатевих пропелерів з м'якими краями та додатковим шумозаглушенням.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Введення теплового моніторингу двигунів дрону дозволяє запобігти наступним проблемам, притаманним експлуатації дронів:

- перегрівання мідної обмотки, руйнування лакового покриття і, як наслідок, коротке замикання;
- часткова або повна втрата коерцитивної сили постійних магнітів, які надзвичайно чутливі до градієнтів температур (точка Кюрі).

Пропонується конкретна апаратна реалізація моніторингу температурних режимів двигунів. Введення запропонованого функціоналу дозволить збільшити безпеку польоту: безперервний моніторинг температури двигуна допоможе виявити проблему завчасно та вжити необхідних заходів. Зворотній зв'язок з двигунами стосовно температури допоможе оптимізувати льотні характеристики дрона шляхом регулювання швидкості моторів або інших параметрів для того, щоб відповідати безпечним експлуатаційним режимам. Температурний моніторинг можна використовувати для обслуговування та діагностики: дані температури двигунів можна внести в журнал і використовувати для технічного обслуговування. Таким чином, моніторинг температури дозволяє зберегти дороге обладнання від деградації, втрати технічних, а отже, політних характеристик та поломок.

2. Окрім теплового, пропонується здійснювати також акселерометричний моніторинг конструкції дрона (дигунів, пропелерів, корпусу). В реальних умовах експлуатації дронів можуть виникнути небажані вібрації двигунів, пропелера або корпусу, викликані процесами зношування або деградації окремих вузлів, дисбалансу пропелера або лопатів, частковим пошкодженням його елементів. Акселерометрична телеметрія дозволяє вирішити наступні проблемні питання:

- контроль вібрації двигунів;
- контроль вібрації корпусу (рами);
- контроль цілісності та якості пропелерів;
- пошкодження дрона;

- антирезонансний контроль.

Пропонується конкретна апаратна реалізація акселерометричного моніторингу з детальним описом, схемами та технічними особливостями.

3. Знайдено ефективне та універсальне рішення відразу двох проблемних питань – температури та вібрації, на основі комбінованого пристрою, який в інтегральному виконанні в одному корпусі містить 3-осьовий MEMS гіроскоп, 3-осьовий MEMS акселерометр, бортовий цифровий процесор руху (DMP) і цифровий сенсор температури. Дане рішення надзвичайно важливе та зручне для проектування БПЛА і квадрокоптерів, адже одночасно забезпечує температурний та акселерометричний моніторинг.

4. Підвищення ефективності роботи FPV-дронів – задача комплексна. Тому наряду з моніторингом пропонується оптимізація підбору пари “двигун-пропелер”, від якого будуть залежати всі функціональні та технічні характеристики БПЛА – маневреність, швидкість, стабільність, тривалість польоту, тощо. Проведено аналіз та розглянуто ряд найбільш важливих факторів оптимального вибору пропелерів FPV-дронів. Розглянута залежність кроку лопатей від кута нахилу лопатей пропелера. Також введений коефіцієнт прямого співвідношення кроку та діаметру лопатей та надана його детальна інтерпретація. Так, низьке співвідношення ($k < 0,5$) свідчить про те, що пропелер підходить для високої підйомної сили на низьких швидкостях та забезпечує стабільний політ, що корисно саме для FPV-дронів, які знімають відео; зазвичай такі пропелери мають великий діаметр та менший крок; середнє співвідношення ($k = 0,6-0,8$) використовується для універсальних дронів, які потребують балансу між маневреністю та швидкістю; підходить для споживчих квадрокоптерів, таких як DJI Phantom або аналогічні моделі; високе співвідношення ($k > 0,8$) забезпечує вищу швидкість, але меншу підйомну силу; подібне співвідношення підходить для високошвидкісних дронів, таких як гоночні; зазвичай має великий крок порівняно з діаметром. Окрім того надані практичні рекомендації в підборі пари двигун-пропелер їх впливу на характеристику польоту БПЛА.

ВИСНОВКИ

1. Робота полягає у підвищенні ефективності режимів роботи FPV-дронів шляхом підбору, вдосконалення та моніторингу стану окремих вузлів. В рамках наукових досліджень за тематикою роботи проведено аналітичний огляд існуючих рішень, здійснено оригінальну класифікацію безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та FPV-дронів.

2. Розроблено математичний апарат аналізу механічних впливів на елементи конструкції безпілотного літального апарату. Показано, що механічні складові та авіоніка знаходяться під дією двох дестабілізуючих факторів – температури та вібрації, які виникають на деяких режимах роботи БпЛА. Доведено, що використання механічних демпферних або амортизаційних систем в корпусі БпЛА ускладнено і носить обмежений характер, адже зберігається вірогідність виникнення резонансних явищ на основній частоті або на гармоніках. Створено математичну модель визначення власної резонансної частоти корпусу літального апарату методом Релея, оснований на припущенні, що досліджуваний елемент конструкції вібрує за гармонійним законом з експоненціальною функцією згасання коливань і при цьому максимальне значення потенціальної енергії дорівнює максимальному значенню кінетичної енергії. Запропонований метод вібромоніторингу та спосіб визначення власної резонансної частоти корпусу дрона дозволяє уникати резонансних явищ, адже має адаптивний алгоритм роботи є універсальним і дозволяє уникнути резонансних явищ повністю, не залежно від розмірів БпЛА та умов експлуатації. Для аналізу вібраційної стійкості окремих елементів конструкції літального апарату, пропонується оригінальна дослідна установка у вигляді мультикоптерного варіанту. Запропоновані ідеї можуть бути інтерпольовані на будь-яку конструкцію БпЛА.

3. На основі розробленої математичної моделі в середовищі SolidWorks проведено імітаційне моделювання та стрес-аналіз елементів конструкції безпілотного літального апарату типу мультикоптер, на основі якої будуються сучасні FPV-дрони. Імітаційне моделювання дозволяє здійснювати аналіз ряду механічних, вібраційних та резонансних навантажень окремих елементів або цілої

конструкцій БпЛА, а також проводити цілий ряд інструментальних досліджень, наприклад зусиль, моментів, статичних та динамічних навантажень, тощо. Для аналізу досліджуваного об'єкта запропоновано використати критерій фон Мізеса, який ґрунтується на припущенні, що матеріал набуває критичних руйнацій, коли енергія деформації перевищує певну межу. Запропоновано власний оригінальний алгоритм проведення процедури імітаційного моделювання: побудова досліджуваної конструкції на основі методу скінчених елементів, вибір типу досліджуваної характеристики (частотне дослідження, лінійне динамічне, нелінійне динамічне, структурний аналіз, аналіз вібрації, дослідження власної резонансної частоти тощо), вибір критерію аналізу (максимальна напруга зсуву, нормальна напруга, напруга Мора-Кулона або максимальна напруга за фон Мізеса) та виведення результатів дослідження.

4. Запропонована апаратна реалізація теплового та акселерометричного моніторингу, оснований на введенні додаткових електронних складових – сенсорів температури та вібрації. Отримана сенсорна телеметрія дозволяє штатному політному контролеру уникати деструктивних явищ елементів конструкції БпЛА. Запропоновані рішення дозволять покращити ефективність роботи літальних апаратів, безпеку польоту та збільшити час напрацювання до відмови.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. China ABC *[Електронний ресурс]* : <https://ukrainian.cri.cn/chinaabc/chapter21/chapter210116.htm> – Назва з екрана.
2. Бамбуковий вертоліт. *[Електронний ресурс]* : https://uk.wikipedia.org/wiki/Бамбуковий_вертоліт. – Назва з екрана.
3. Prisacariu, V., 2017. The history and the evolution of UAVs from the beginning till the 70s. *Journal of Defense Resources Management (JoDRM)*, 8(1), pp.181-189.
4. *[Електронний ресурс]* : <https://www.statista.com/statistics/428911/global-production-volume-forecast-for-unmanned-aerial-systems-or-drones/>. – Назва з екрана.
5. *[Електронний ресурс]* : <https://oscarliang.com/> – Назва з екрана.
6. Сайт Flymod. *[Електронний ресурс]* : https://flymod.net/item/brotherhobby_avenger_28065?srsltid=AfmBOopblV5wOpAHbO0rjIzMzzjLe7r8ATw2pD92WFn3Dpew1duhGZe3. – Назва з екрана.
7. Сайт Flymod. *[Електронний ресурс]* : <https://www.t-drones.com/>. – Назва з екрана.
8. SolidWorks *[Електронний ресурс]* : <https://www.solidworks.com/> – Назва з екрана.
9. Інженерна графіка в SolidWorks: Навчальний посібник/ С. І. Пустюльга, В. Р. Самостян, Ю. В. Клак. – Луцьк: Вежа, 2018. –172с.
10. Solidworks teacher training manual. Created By Solid Solutions Ireland Solid Solutions Ireland: Arena House, Arena Road, Sandford, Dublin 18. – 54 p.
11. Система конечноэлементных расчётов FEMLAB 3.x. Документация. URL: http://matlab.exponenta.ru/femlab/book6/2_1_4.php (дата звернення: 9.09.2020).
12. Документація Simulink. *[Електронний ресурс]* : URL: <https://docs.exponenta.ru/simulink/index.html>. (дата звернення: 7.11.2024). – Назва з екрана.

13. Мікросхема MAX6675 Analog Devices *[Електронний ресурс]* : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX6675.pdf>. – Назва з екрана.

14. Мікросхема DS1820 Analog Devices *[Електронний ресурс]* : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18S20.pdf> – Назва з екрана.

15. Мікросхема DS1821 Analog Devices *[Електронний ресурс]* : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18S20.pdf> – Назва з екрана.

16. Цифровий сенсор температури та вологості HR202L *[Електронний ресурс]* : <http://www.aosong.com/en/products-110.html>. – Назва з екрана.

17. Комбінований сенсор GY-68 BMP180 Bosch Sensortec *[Електронний ресурс]* : <https://www.bosch-sensortec.com/search.html?q=BMP180>. – Назва з екрана.

18. Безконтактний сенсор температури GY-906 MLX90614 *[Електронний ресурс]* : <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/218977/ETC2/MLX90614/97/1/MLX90614.html>. – Назва з екрана.

19. Сайт Analog Device. *[Електронний ресурс]*. – Режим доступу : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>. (Дата звернення 28.11.2024).

20. Сайт Analog Device. *[Електронний ресурс]*. – Режим доступу : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf>. (Дата звернення 29.11.2024).

ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ



Хмельницький національний університет
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
*Кафедра телекомунікацій, медійних
та інтелектуальних технологій*

Сілідуєв Роман Анатолійович

**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ
РОБОТИ FPV-ДРОНІВ**

Науковий керівник – к.т.н., доцент, Стецюк В. І.

Хмельницький, 2024 р.



МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

2

Підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів

НАУКОВІ ЗАДАЧІ

1. Провести аналітичний огляд існуючих рішень, здійснити класифікацію безпілотних літальних апаратів та FPV-дронів;
2. Сформуванати математичний апарат аналізу механічних впливів на елементи конструкції безпілотного літального апарату;
3. Провести імітаційне моделювання та стрес-аналіз конструкцій дрона;
4. Запропонувати апаратну реалізацію теплового та акселерометричного моніторингу.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ: теплові та вібраційні процеси безпілотних літальних апаратів

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ: FPV-дрони



МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1

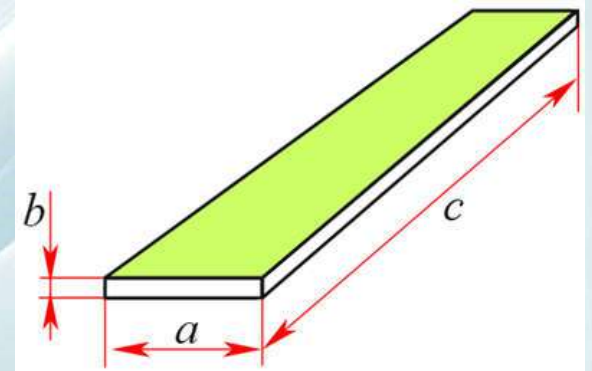
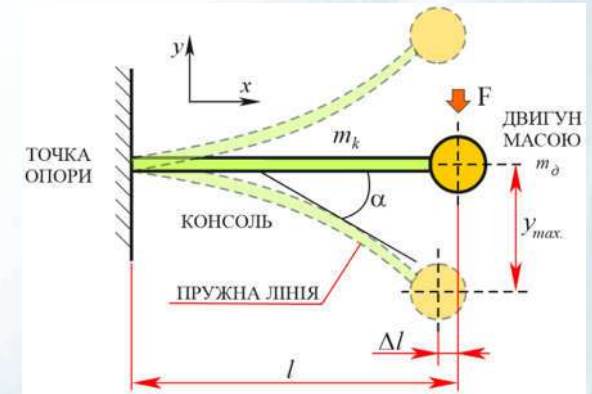
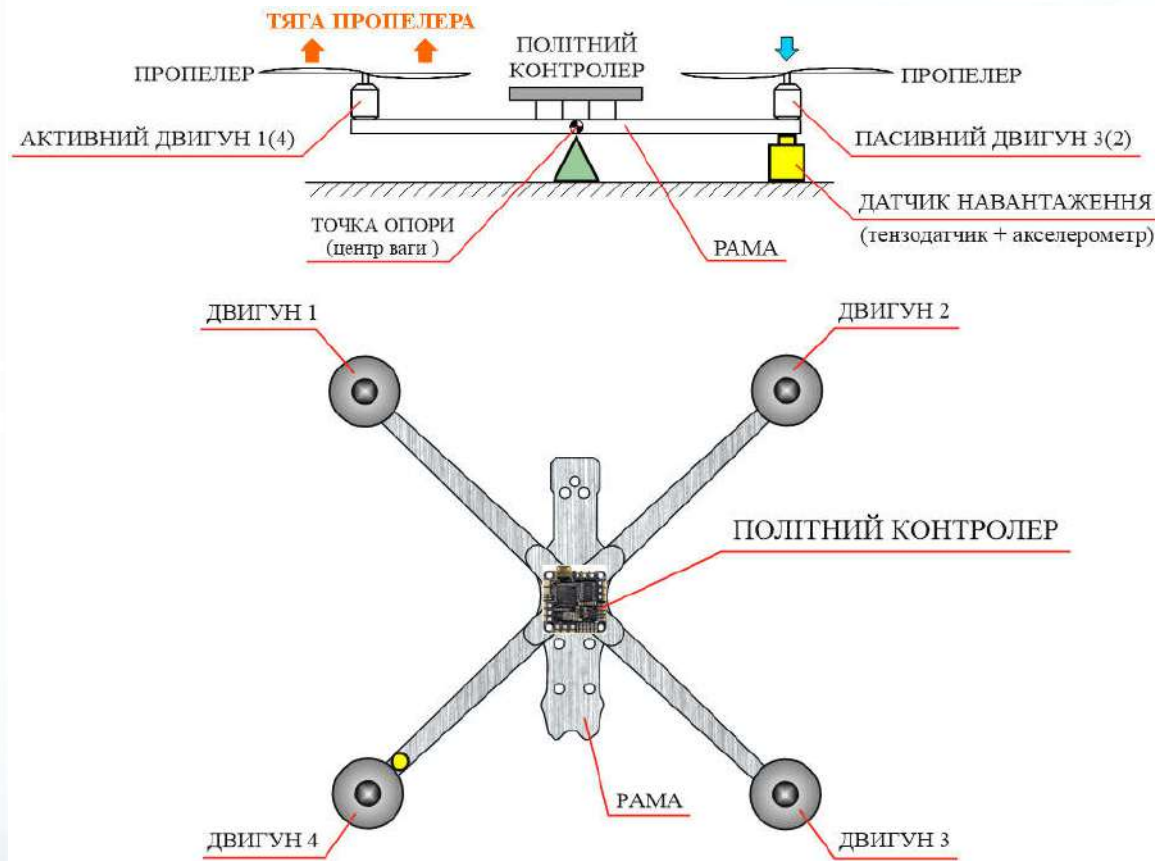


Рисунок 3.1 – Варіант експериментальної установки



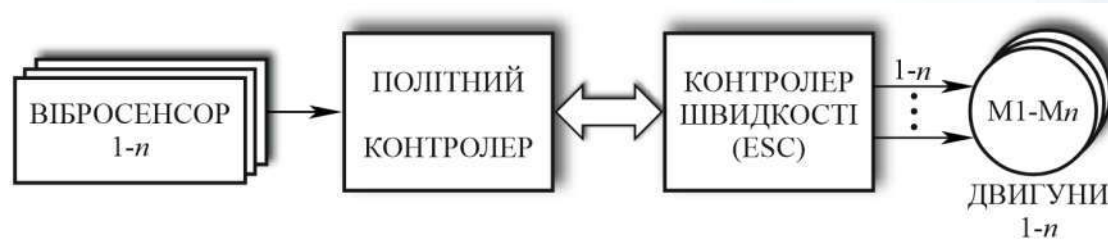


Рисунок 3.2 – Узагальнена модель акселерометричного моніторингу

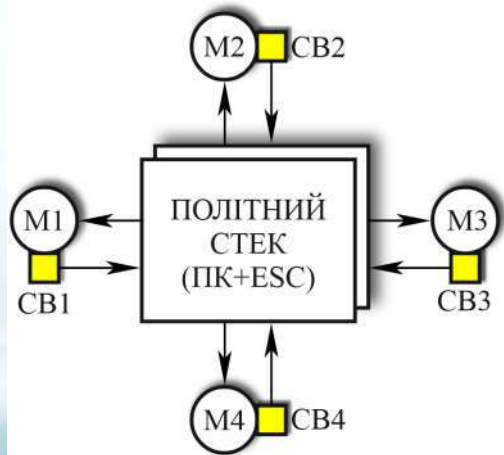
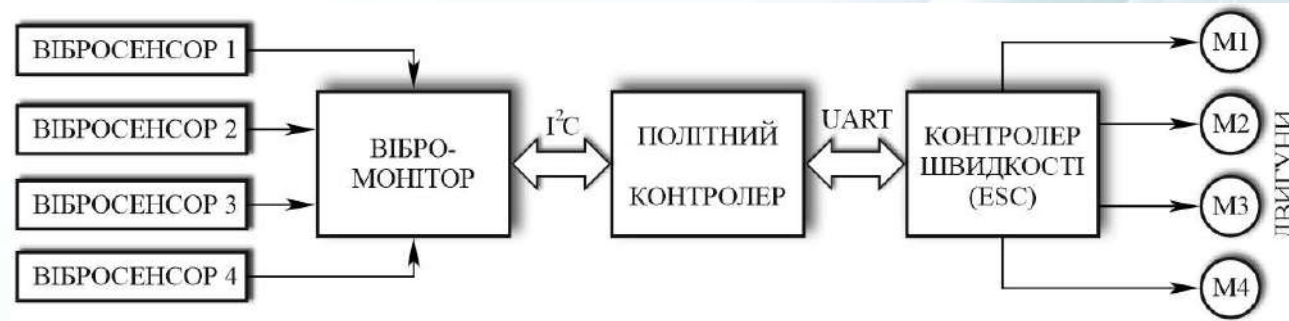


Рисунок 3.2 – Модель акселерометричного моніторингу на рівні цифрових протоколів

Рисунок 3.3 – Модель акселерометричного моніторингу досліджуваної конструкції квадрокоптера:

M1-M4 – двигуни дрона; CB1-CB4 – сенсор вібрацій; ПК – політний контролер; ESC – контролер швидкості.



Основна резонансна частота досліджуваної коливальної системи:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (3.1)$$

де D – динамічна жорсткість;
 m – загальна маса консолі.

Динамічна жорсткість:

$$D = E \cdot I \quad (3.3)$$

Диференціальне рівняння пружної лінії для нашого випадку:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (3.5)$$

де M – згинаючий момент; EI – жорсткість балки.

Основна резонансна частота конструкції FPV-дрона

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E \frac{1}{12} ab^3}{m_k + m_o}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Eab^3}{12(m_k + m_o)}} \quad (3.7)$$

Загальна маса консолі, в свою чергу дорівнює:

$$m = m_k + m_o \quad (3.2)$$

де m_k – маса консолі; m_o – маса двигуна.

Модуль Юнга (модуль пружності):

$$E = \frac{Fl}{S\Delta l} \quad (3.4)$$

Інтегруючи диференціальне рівняння (3.5), отримаємо:

$$\begin{cases} \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI}; \\ \alpha(x) = \frac{dy}{dx} = \int \frac{M(x)dx}{EI} + \xi \\ y(x) = \int dx \int \frac{M(x)dx}{EI} + \xi x + \chi \end{cases} \quad (3.6)$$



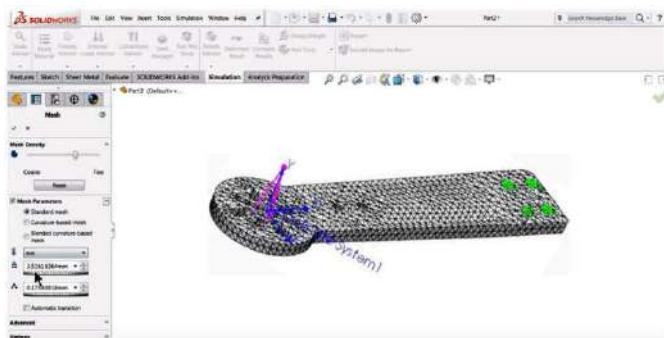


Рисунок 4.1 – Окремий промінь корпуса дрона: метод скінчених елементів

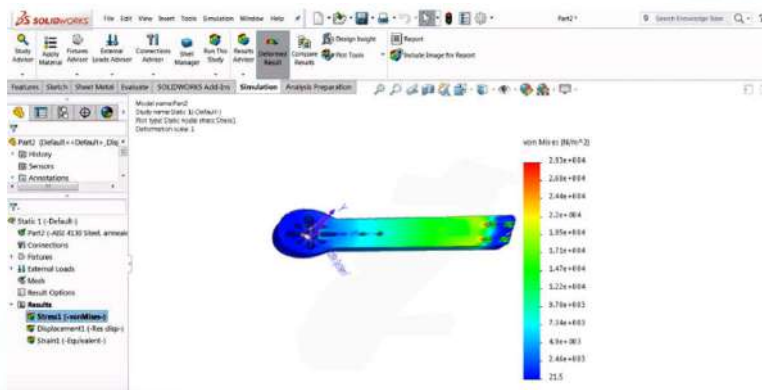


Рисунок 4.2 – Розподіл напруги за фон Мізесом в окремому промені корпуса дрона

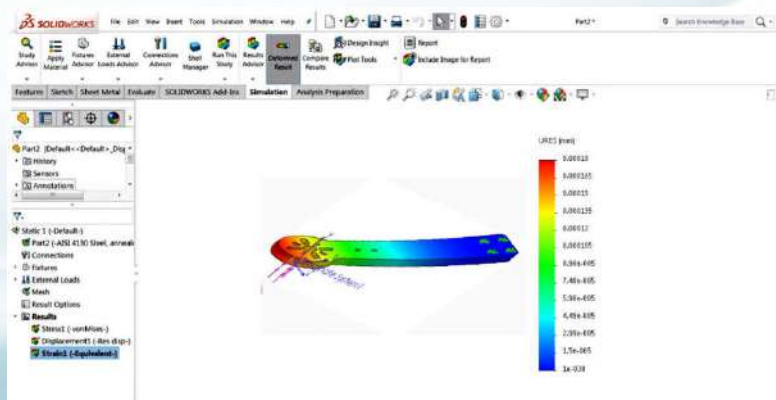
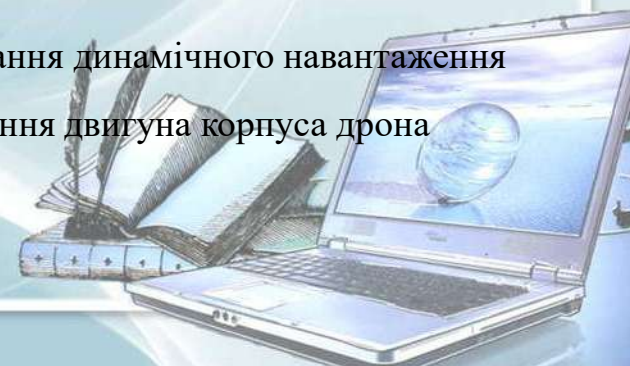


Рисунок 4.3 – Імітування динамічного навантаження в області кріплення двигуна корпуса дрона



ТЕПЛОВИЙ МОНІТОРИНГ

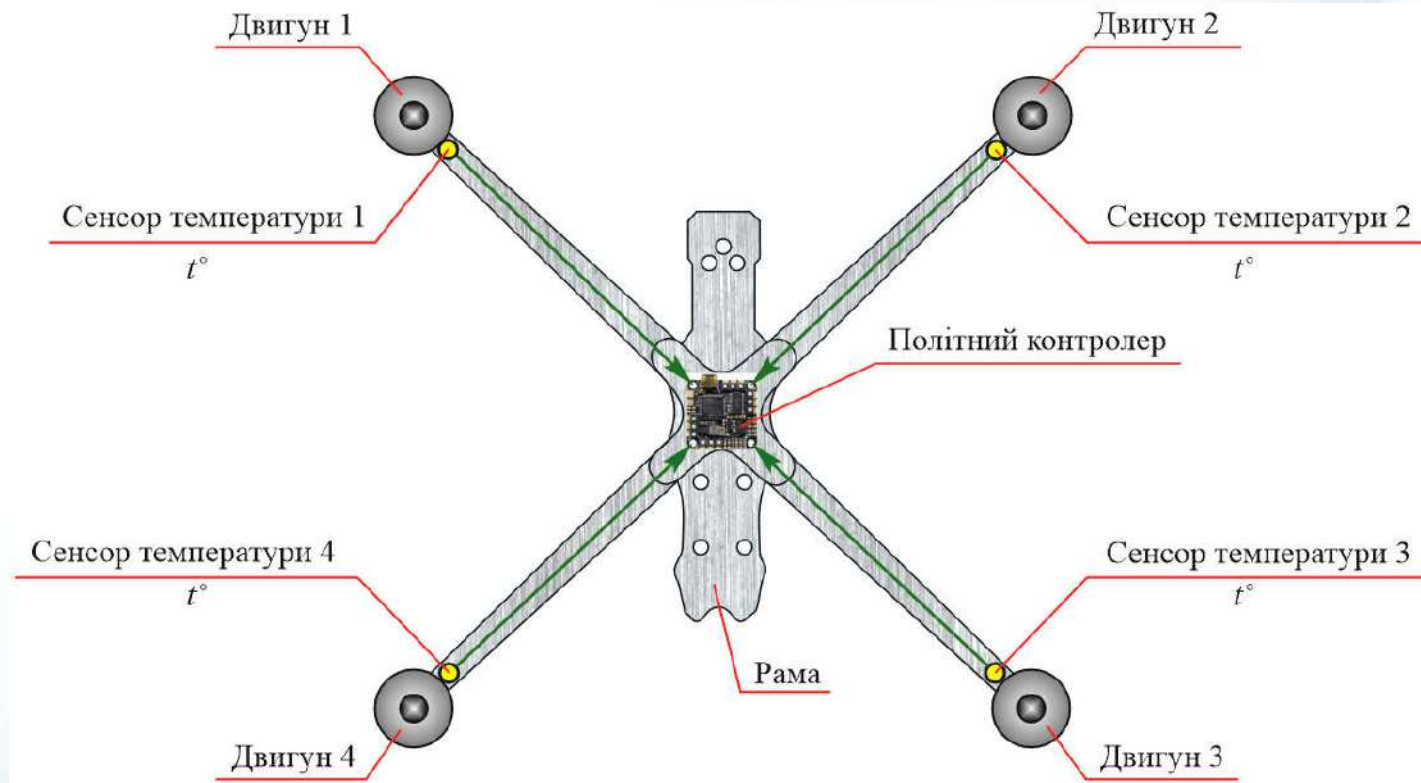


Рисунок 5.1 – Моніторинг температурних режимів двигунів дрона





Рисунок 5.2 – Інтеграція терморпери в мотор дрона

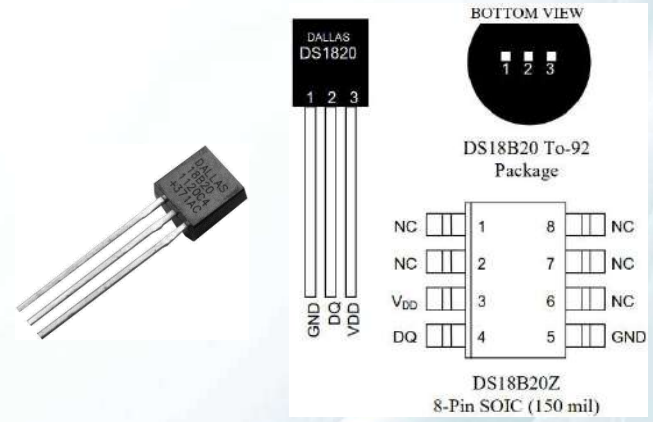


Рисунок 5.3 – Цифровий датчик температури DS1820

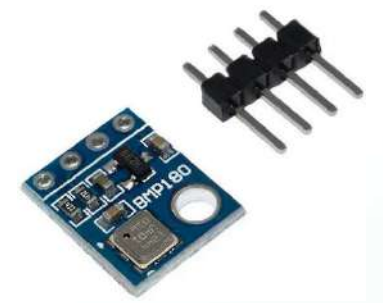


Рисунок 5.5 – Комбінований сенсор атмосферного тиску і температури



Рисунок 5.4 – Цифровий датчик температури та вологості



Рисунок 5.6 – Безконтактний сенсор температури MLX90614



АКСЕЛЕРОМЕТРИЧНИЙ МОНІТОРИНГ

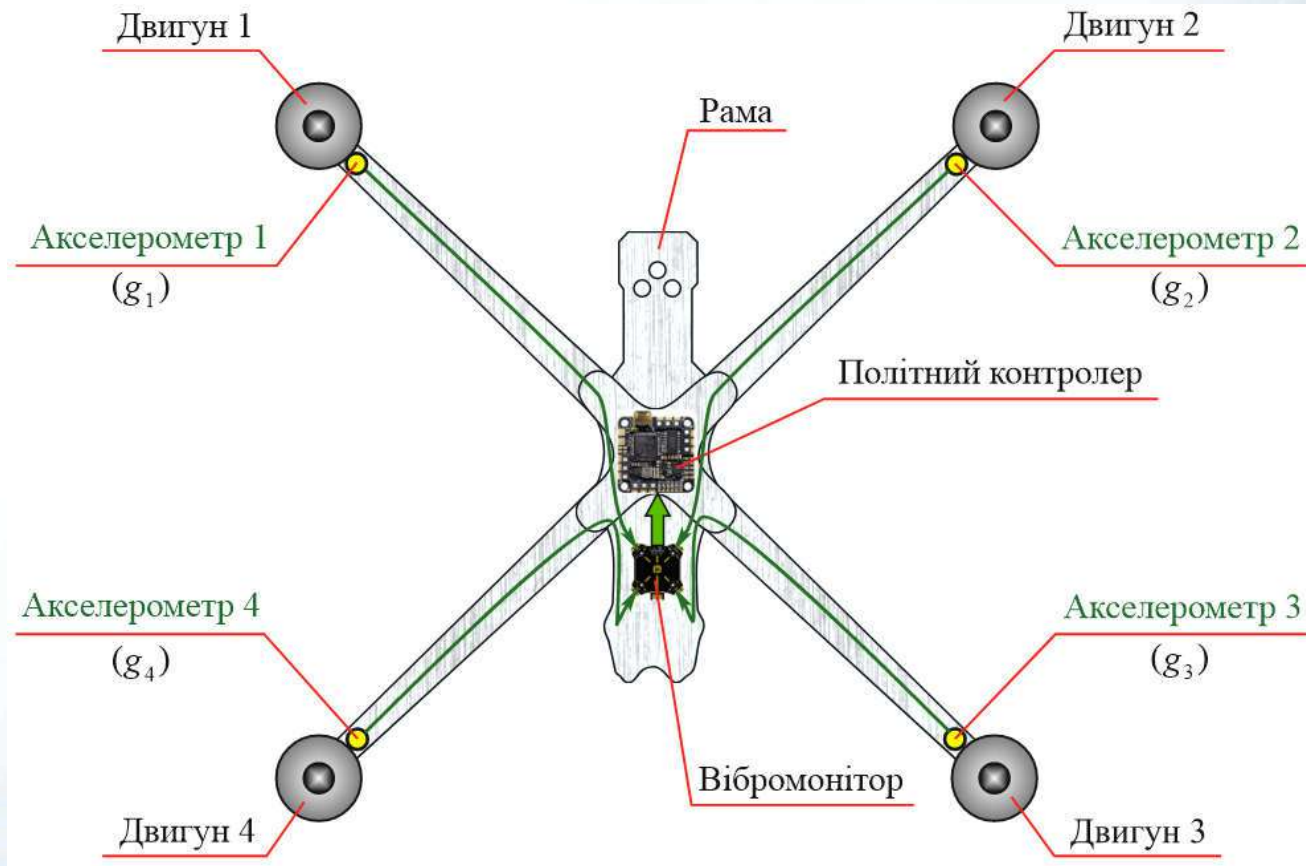


Рисунок 5.7 – Акселерометричний моніторинг конструкції дрона



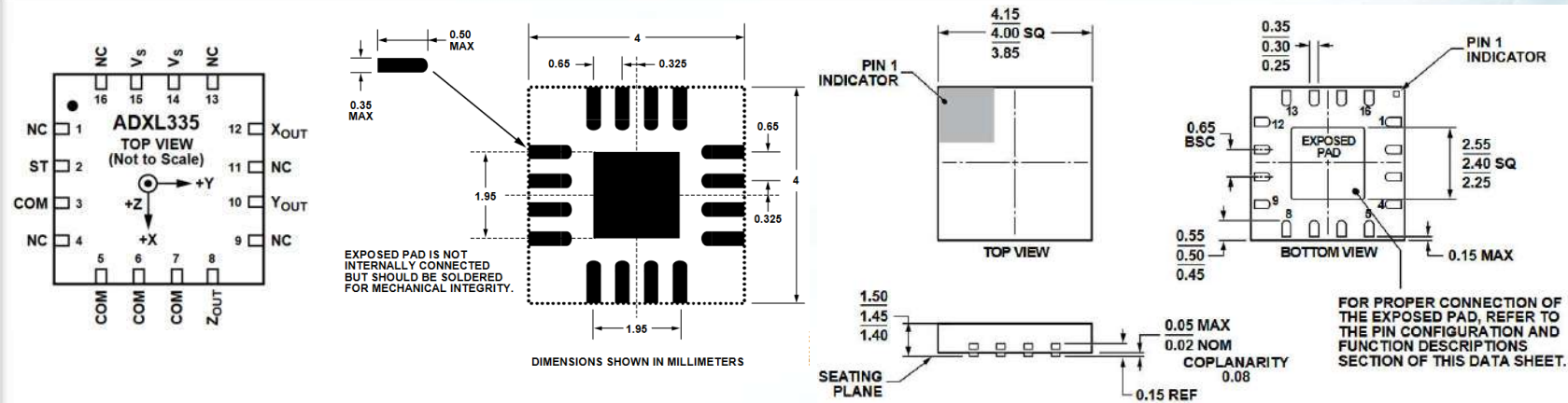


Рисунок 5.8 – Зовнішній вигляд, габаритні розміри та призначення виводів аналогового акселерометра ADXL335

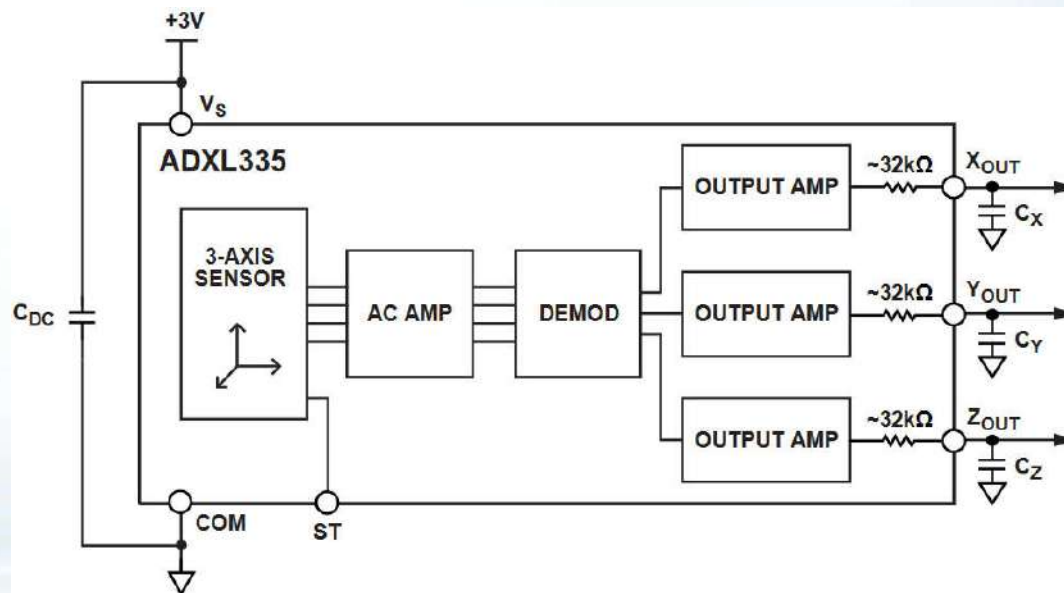


Рисунок 5.9 – Структура та підключення аналогового акселерометра ADXL335



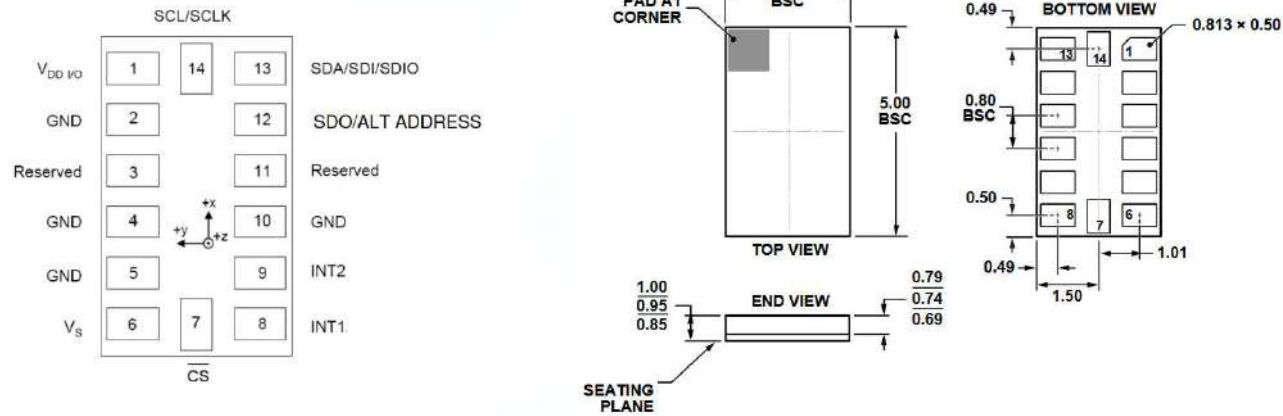


Рисунок 5.10 – Зовнішній вигляд, габаритні розміри та призначення виводів цифрового акселерометра ADXL345

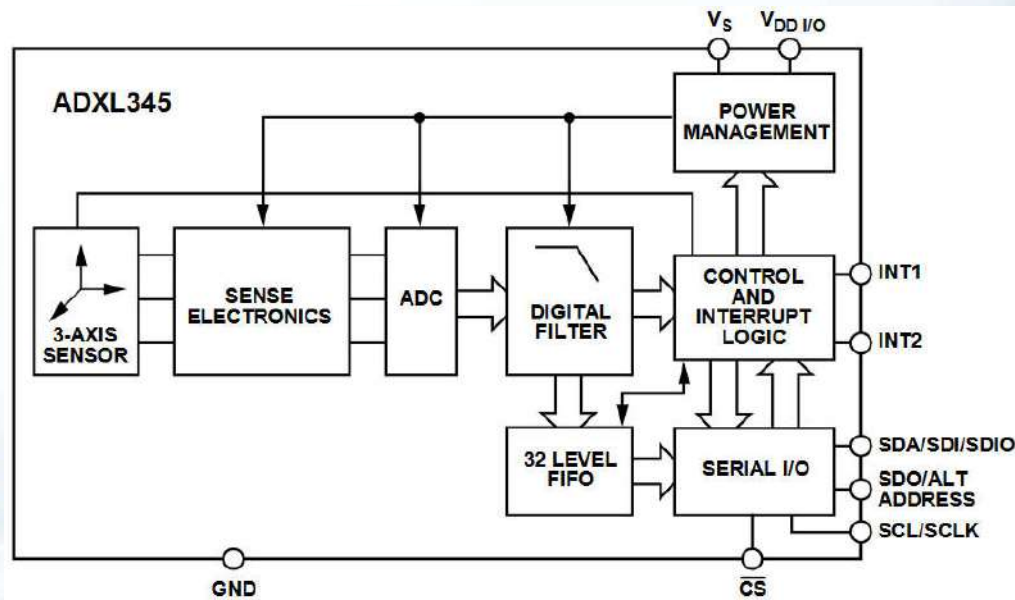


Рисунок 5.11 – Структура та підключення цифрового акселерометра ADXL345



КОМБІНОВАНИЙ МОНІТОРИНГ

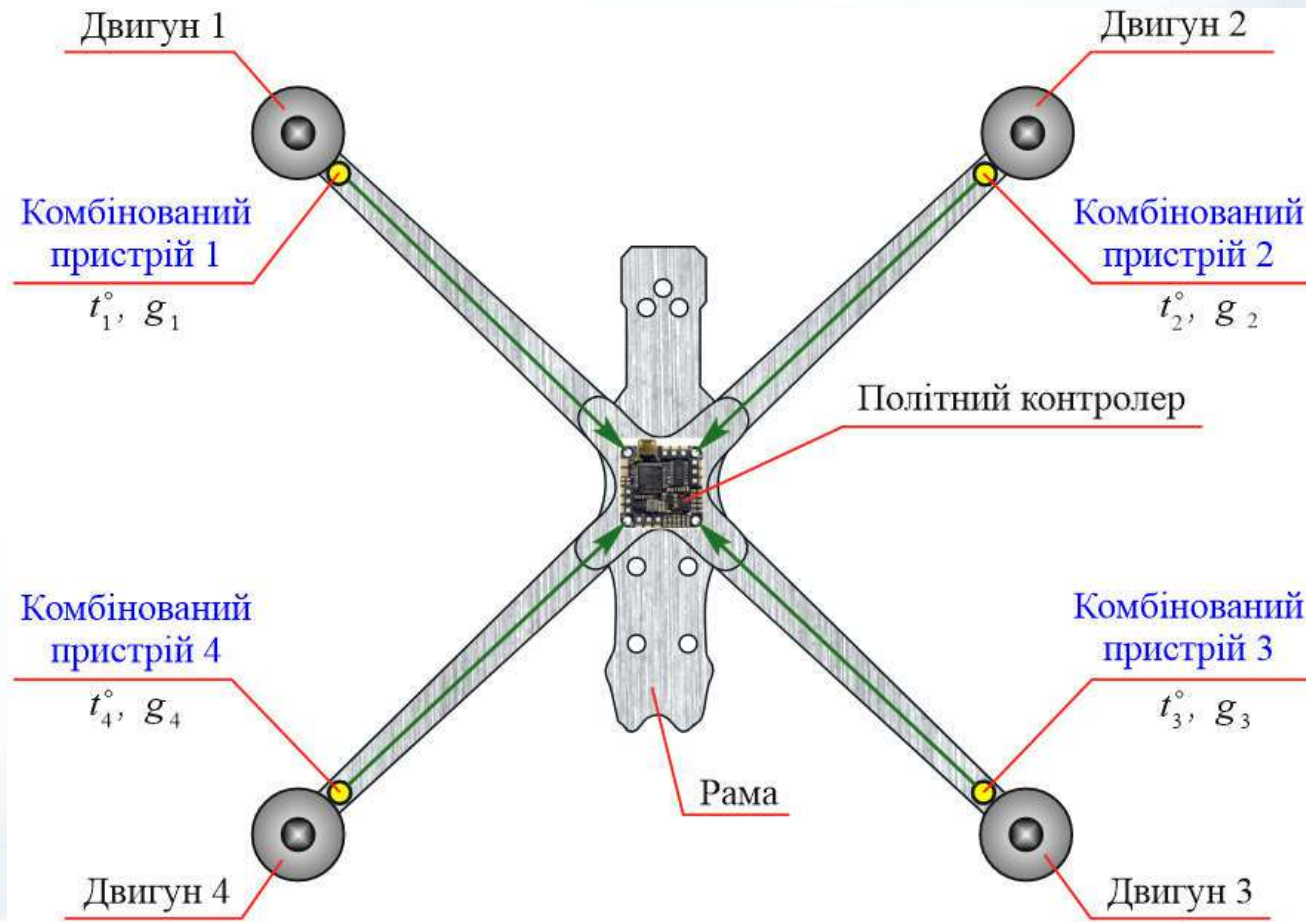
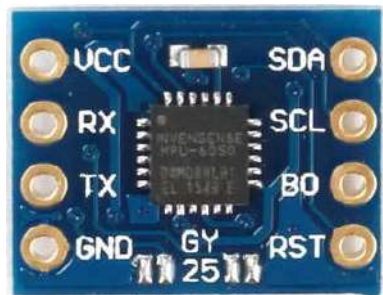
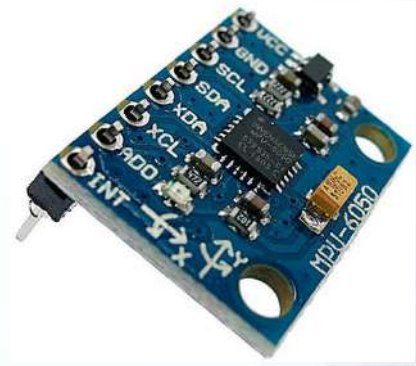


Рисунок 5.12 – Комбінований моніторинг стану дрона





a)



б)

Рисунок 5.13 – Комбіновані пристрої:
 а) GY-521; б) GY-25 на основі мікросхем MPU-6050 і MPU-6050

$$\begin{cases} FT[Xa] = 4096 * 0.34 * \frac{0.92 \left(\frac{XA_TEST-1}{2^{5-2}} \right)}{0.34} & \text{if } XA_TEST \neq 0. \\ FT[Xa] = 0 & \text{if } XA_TEST = 0. \end{cases}$$

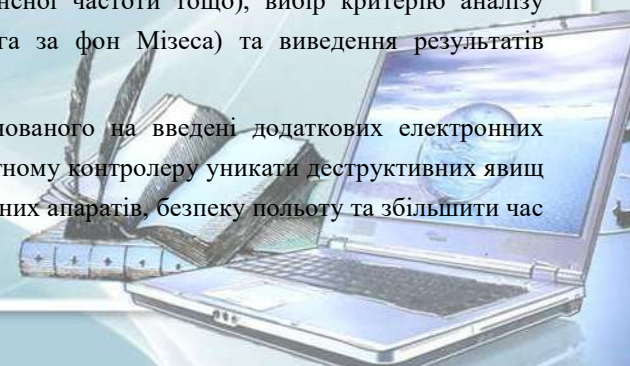
$$\begin{cases} FT[Ya] = 4096 * 0.34 * \frac{0.92 \left(\frac{YA_TEST-1}{2^{5-2}} \right)}{0.34} & \text{if } YA_TEST \neq 0. \\ FT[Ya] = 0 & \text{if } YA_TEST = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} FT[Za] = 4096 * 0.34 * \frac{0.92 \left(\frac{ZA_TEST-1}{2^{5-2}} \right)}{0.34} & \text{if } ZA_TEST \neq 0. \\ FT[Za] = 0 & \text{if } ZA_TEST = 0. \end{cases}$$

(5. 1)



- 1. Робота полягає у підвищенні ефективності режимів роботи FPV-дронів шляхом підбору, вдосконалення та моніторингу стану окремих вузлів. В рамках наукових досліджень за тематикою роботи проведено аналітичний огляд існуючих рішень, здійснено оригінальну класифікацію безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та FPV-дронів.
- 2. Розроблено математичний апарат аналізу механічних впливів на елементи конструкції безпілотного літального апарату. Показано, що механічні складові та авіоніка знаходяться під дією двох дестабілізуючих факторів – температури та вібрації, які виникають на деяких режимах роботи БпЛА. Доведено, що використання механічних демперних або амортизаційних систем в корпусі БпЛА ускладнено і носить обмежений характер, адже зберігається вірогідність виникнення резонансних явищ на основній частоті або на гармоніках. Створено математичну модель визначення власної резонансної частоти корпусу літального апарату методом Релея, оснований на припущенні, що досліджуваний елемент конструкції вібує за гармонійним законом з експоненціальною функцією згасання коливань і при цьому максимальне значення потенціальної енергії дорівнює максимальному значенню кінетичної енергії. Запропонований метод вібромоніторингу та спосіб визначення власної резонансної частоти корпусу дрона дозволяє уникати резонансних явищ, адже має адаптивний алгоритм роботи є універсальним і дозволяє уникнути резонансних явищ повністю, не залежно від розмірів БпЛА та умов експлуатації. Для аналізу вібраційної стійкості окремих елементів конструкції літального апарату, пропонується оригінальна дослідна установка у вигляді мультикоптерного варіанту. Запропоновані ідеї можуть бути інтерпольовані на будь-яку конструкцію БпЛА.
- 3. На основі розробленої математичної моделі в середовищі SolidWorks проведено імітаційне моделювання та стрес-аналіз елементів конструкції безпілотного літального апарату типу мультикоптер, на основі якої будуються сучасні FPV-дрони. Імітаційне моделювання дозволяє здійснювати аналіз ряду механічних, вібраційних та резонансних навантажень окремих елементів або цілої конструкції БпЛА, а також проводити цілий ряд інструментальних досліджень, наприклад зусиль, моментів, статичних та динамічних навантажень, тощо. Для аналізу досліджуваного об'єкта запропоновано використати критерій фон Мізеса, який ґрунтується на припущенні, що матеріал набуває критичних руйнацій, коли енергія деформації перевищує певну межу. Запропоновано власний оригінальний алгоритм проведення процедури імітаційного моделювання: побудова досліджуваної конструкції на основі методу скінчених елементів, вибір типу досліджуваної характеристики (частотне дослідження, лінійне динамічне, нелінійне динамічне, структурний аналіз, аналіз вібрації, дослідження власної резонансної частоти тощо), вибір критерію аналізу (максимальна напруга зсуву, нормальна напруга, напруга Мора-Кулона або максимальна напруга за фон Мізеса) та виведення результатів дослідження.
- 4. Запропонована апаратна реалізація теплового та акселерометричного моніторингу, оснований на введенні додаткових електронних складових – сенсорів температури та вібрації. Отримана сенсорна телеметрія дозволяє штатному політному контролеру уникати деструктивних явищ елементів конструкції БпЛА. Запропоновані рішення дозволять покращити ефективність роботи літальних апаратів, безпеку польоту та збільшити час напрацювання до відмови.



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!



ДОДАТОК Б. ПУБЛІКАЦІЇ



EUROPEAN CONFERENCE

Conference Proceedings



XIV International Science Conference
«Current problems of mankind and ways
to solve them»

December 02-04, 2024

Munich, Germany

CURRENT PROBLEMS OF MANKIND AND WAYS TO SOLVE THEM

Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference

Munich, Germany
(December 02-04, 2024)

UDC 01.1

ISBN – 9-789-40377-086-4

The XIV International Scientific and Practical Conference «Current problems of mankind and ways to solve them», December 02-04, 2024, Munich, Germany. 439 p.

Text Copyright © 2024 by the European Conference (<https://eu-conf.com/>).

Illustrations © 2024 by the European Conference.

Cover design: European Conference (<https://eu-conf.com/>).

© Cover art: European Conference (<https://eu-conf.com/>).

© All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced, distributed, or transmitted, in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. The content and reliability of the articles are the responsibility of the authors. When using and borrowing materials reference to the publication is required. Collection of scientific articles published is the scientific and practical publication, which contains scientific articles of students, graduate students, Candidates and Doctors of Sciences, research workers and practitioners from Europe, Ukraine and from neighboring countries and beyond. The articles contain the study, reflecting the processes and changes in the structure of modern science. The collection of scientific articles is for students, postgraduate students, doctoral candidates, teachers, researchers, practitioners and people interested in the trends of modern science development.

The recommended citation for this publication is: Ismayilova G., Safarova K.F., Mammadova M.H. Responses of wheat genotypes to different concentrations of 2,4-d during in vitro cultivation of immature embryos. Abstracts of XIV International Scientific and Practical Conference. Munich, Germany. Pp. 14-18.

URL: <https://eu-conf.com/en/events/current-problems-of-mankind-and-ways-to-solve-them/>

АКСЕЛЕРОМЕТРИЧНИЙ МОНІТОРИНГ СТАНУ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Віктор Стецюк

к.т.н., доцент

Хмельницький національний університет

Роман Сілідуєв

магістр

Хмельницький національний університет

Одним із важливим параметрів, який бажано контролювати для безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та дронів зокрема є вібрація корпусу та його окремих елементів (в основному двигунів), рис. 1. Акселерометрична телеметрія дозволяє вирішити наступні проблемні питання:

- контроль вібрації двигунів;
- контроль вібрації корпусу (рама);
- контроль цілісності та якості пропелерів;
- пошкодження дрона;
- антирезонансний контроль.

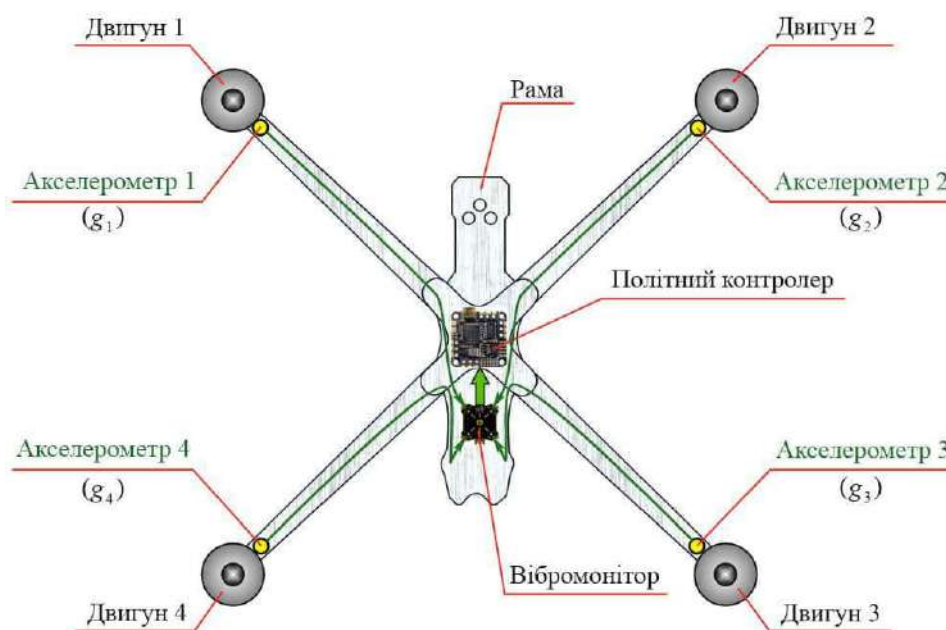


Рисунок 1. Акселерометричний моніторинг конструкції дрона

Здійснювати акселерометричний контроль можна по різному, однак найбільш практичним і технологічним способом є використання інтегральних акселерометрів, які випускаються промисловістю в досить широкій номенклатурі, як окремі пристрої, так і готові модулі (плати). Прикладом є мініатюрний, малопотужний 3-осьовий акселерометр ADXL335 рис. 2, 3 [1].

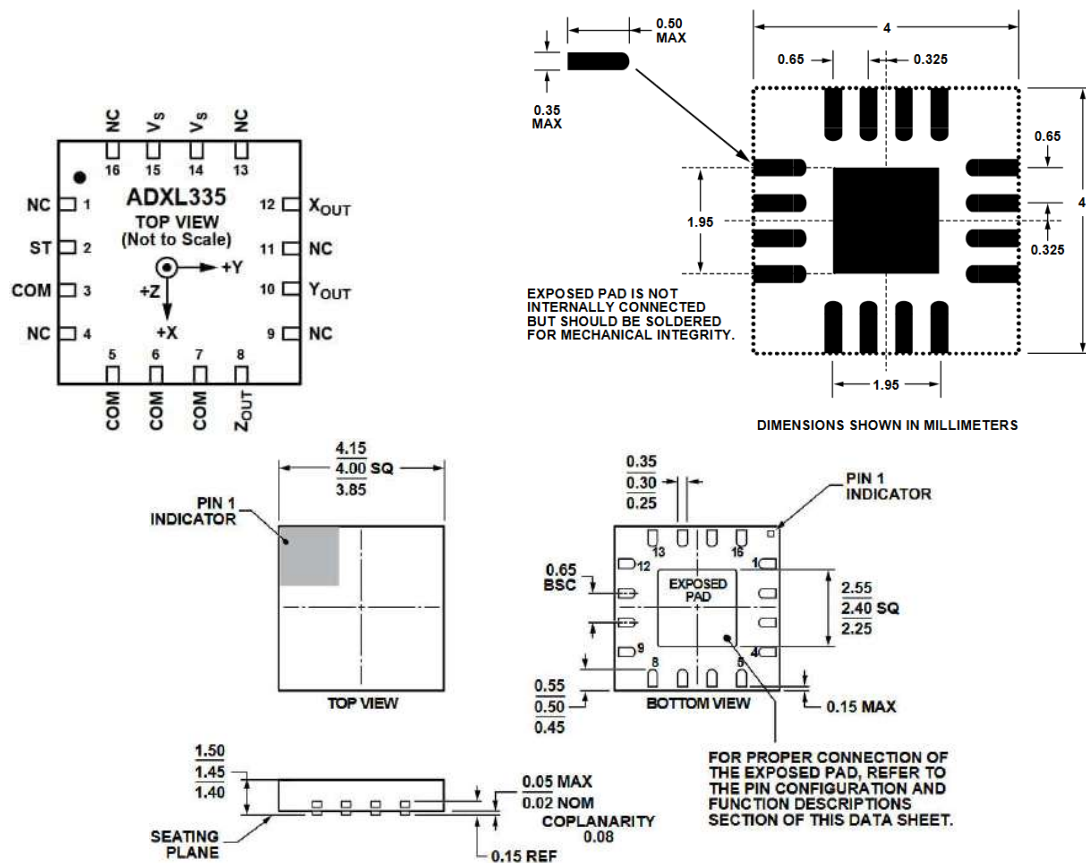


Рисунок 2. Зовнішній вигляд, габаритні розміри та призначення виводів аналогового акселерометра ADXL335

ADXL335 вимірює прискорення в діапазоні ± 3 g. Він може вимірювати статичне прискорення сили тяжіння, а також динамічне прискорення в результаті руху, ударів або вібрації. Корпус мікросхем (LFCSP) має розміри лише $4 \times 4 \times 1,45$ мм. Низька потужність споживання енергії (350 мкА, при напрузі 1,8-3,6 В) дозволяє використовувати даний пристрій в автономних та мобільних системах.

Унікальною властивістю акселерометра є його живучість: він витримує короткочасні удари і перевантаження до 10000 g. Має відмінну температурну стабільність. Ці останні дві риси дозволяють використовувати даний акселерометр на БПЛА та FPV-дронах. Мікросхема має достатньо мінімалістичну зовнішню обвіску: конденсатор фільтра живлення і по конденсатору на вихід кожної осі – C_x , C_y і C_z на контактах X_{OUT} , Y_{OUT} і Z_{OUT} (рис. 3). Дані конденсатори дозволяють регулювати смугу пропускання акселерометра в діапазоні від 0,5 Гц до 1600 Гц для осей X і Y, а також діапазон від 0,5 Гц до 550 Гц для осі Z.

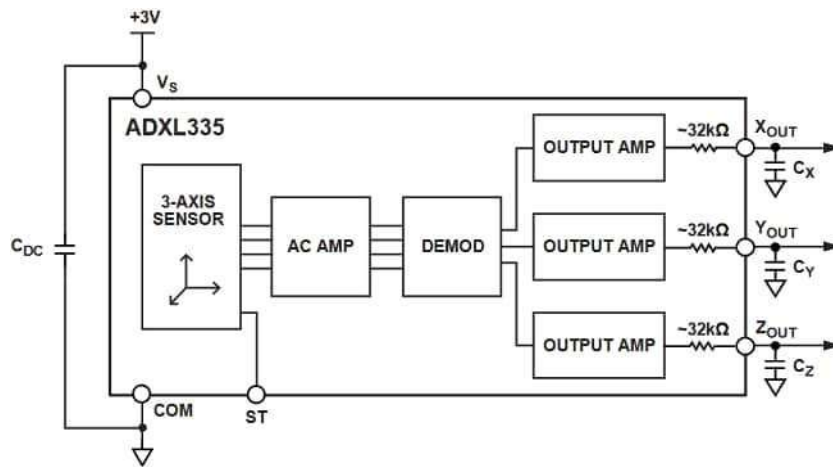


Рисунок 3. Структура та підключення акселерометра ADXL335

За принципом дії розрізняють механічні, електричні, електромеханічні та інші. Акселерометри можуть бути реалізовані на основі мікроелектромеханічних систем (MEMS). Вони поєднують у собі мікроелектронні та мікромеханічні компоненти. MEMS технології дозволяють створювати конденсатори з рухомими обкладинками на кремнієвій підкладці, що істотно зменшує розмір пристрою та вартість. Для наглядності внутрішня будова MEMS акселерометра представлена на збільшеному фото (рис. 4). В даному випадку – це одновісний пристрій, який здійснює коливання лише в площині x . Але загальний принцип зрозумілий. Для літальних апаратів більше підходять 3-осьові акселерометри. В цьому випадку MEMS-структура ускладнюється, забезпечуючи 3 ступеня свободи.

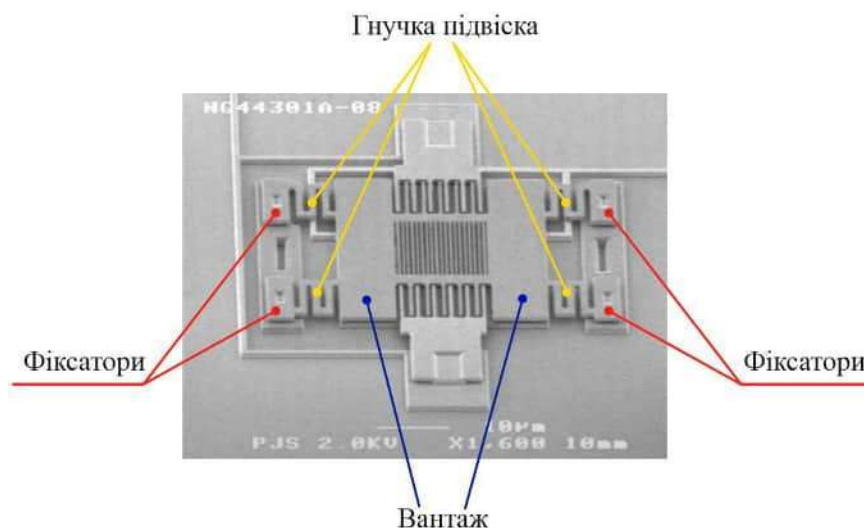


Рисунок 4. Структура та підключення акселерометра

Вихід акселерометра може бути аналоговим або цифровим. В останньому випадку в структуру акселерометра включено АЦП (як правило із сигма-дельта

модуляцією). На рисунках 2, 3 представлено простий аналоговий акселерометр. Приклад цифрового акселерометра ADXL345 представлено на рис. 5, 6 [2].

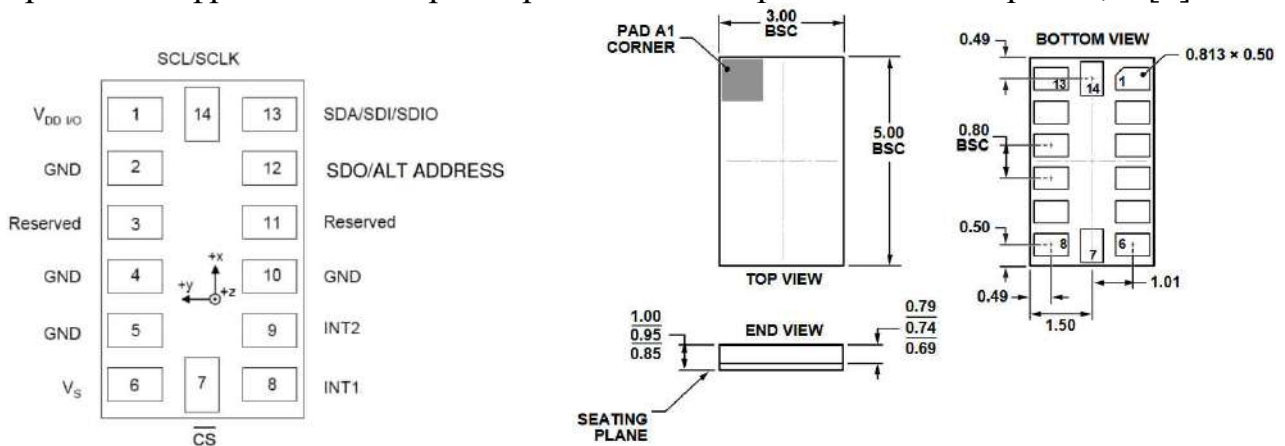


Рисунок 5. Зовнішній вигляд, габаритні розміри та призначення виводів цифрового акселерометра ADXL345

ADXL345 – мініатюрний і тонкий, 3-осьовий акселерометр із наднизьким енергоспоживанням (23 мкА в режимі вимірювання, 0,1 мкА в режимі очікування) з високою роздільною здатністю (13 біт) та діапазоном вимірювання $\pm 2 \dots \pm 16$ g. Діапазон напруг живлення: від 1,8 В до 3,6 В.

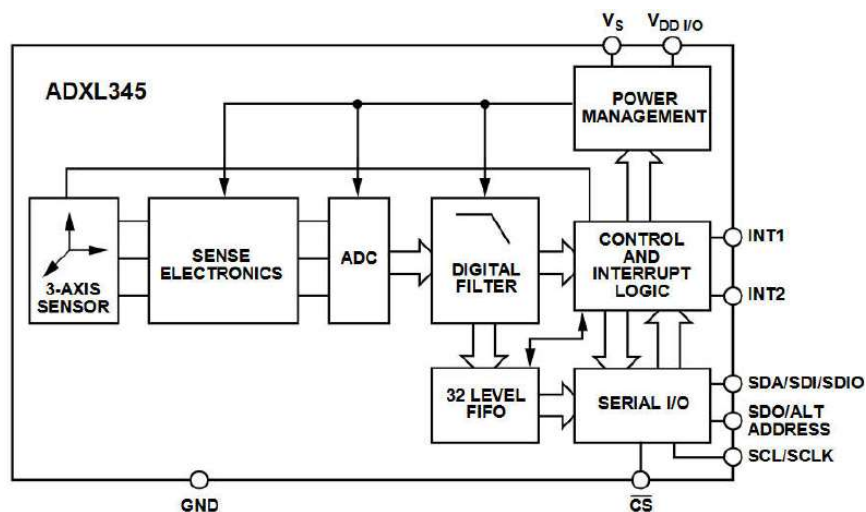


Рисунок 6. Структура акселерометра ADXL345

ADXL345 добре підходить для мобільних та автономних пристроїв. Корпус типу LGA – 3×5×1 мм. Цифрові результати вимірювання представляються у вигляді 16-розрядних чисел в додатковому коді і доступні через цифрові інтерфейси SPI (трьох- або чотирьохпроводні) або I²C. Інтерфейс I²C присутній на всіх політичних контролерах сучасних дронів. Тому наявність даного протоколу спрощує апаратно-програму реалізацію. Для вибору інтерфейсу використовується вивід CS: якщо на CS низький рівень – SPI, якщо ж високий – I²C. Для зберігання даних використовується 32-рівневий буфер

«першим прийшов, першим вийшов» (FIFO). Даний акселерометр так, як і попередній, витримує короточасні ударні навантаження 10000 g.

Може бути представлений вже у вигляді готової плати, рис. 7.



Рисунок 7. Реалізація акселерометра ADXL345 у вигляді готової плати

Таким чином, реалізувати акселерометричний контроль на борту БПЛА на основі сучасних засобів мікроелектроніки досить просто і дешево. Вартість вказаних у роботі пристроїв складає – 3-4 \$, що несуттєво в порівнянні з вартістю літального апарата. Однак користь подібно моніторингу надзвичайно велика: від продовження терміну експлуатації і до запобігати частковому або повного руйнування БПЛА.

Список літератури

1. Сайт Analog Device. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>. (Дата звернення 28.11.2024).
2. Сайт Analog Device. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf>. (Дата звернення 29.11.2024).



International Science Group

ISG-KONF.COM

XIV

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC
AND PRACTICAL CONFERENCE**

**"THE LATEST TECHNOLOGIES IN SCIENTIFIC ACTIVITY
AND THE EDUCATIONAL PROCESS"**

Porto, Portugal

December 03-06, 2024

ISBN 979-8-89619-788-1

DOI 10.46299/ISG.2024.2.14

THE LATEST TECHNOLOGIES IN SCIENTIFIC ACTIVITY AND THE EDUCATIONAL PROCESS

Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference

Porto, Portugal
December 03 – 06, 2024

UDC 01.1

The 14th International scientific and practical conference “The latest technologies in scientific activity and the educational process” (December 03 – 06, 2024) Porto, Portugal. International Science Group. 2024. 427 p.

ISBN – 979-8-89619-788-1

DOI – 10.46299/ISG.2024.2.14

EDITORIAL BOARD

<u>Pluzhnik Elena</u>	Professor of the Department of Criminal Law and Criminology Odessa State University of Internal Affairs Candidate of Law, Associate Professor
<u>Liudmyla Polyvana</u>	Department of accounting, Audit and Taxation, State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine
<u>Mushenyk Iryna</u>	Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of Mathematical Disciplines, Informatics and Modeling. Podolsk State Agrarian Technical University
<u>Prudka Liudmyla</u>	Odessa State University of Internal Affairs, Associate Professor of Criminology and Psychology Department
<u>Marchenko Dmytro</u>	PhD, Associate Professor, Lecturer, Deputy Dean on Academic Affairs Faculty of Engineering and Energy
<u>Harchenko Roman</u>	Candidate of Technical Sciences, specialty 05.22.20 - operation and repair of vehicles.
<u>Belei Svitlana</u>	Ph.D., Associate Professor, Department of Economics and Security of Enterprise
<u>Lidiya Parashchuk</u>	PhD in specialty 05.17.11 "Technology of refractory non-metallic materials"
<u>Levon Mariia</u>	Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Scientific direction - morphology of the human digestive system
<u>Hubal Halyna Mykolaivna</u>	Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

ТЕПЛОВИЙ МОНІТОРИНГ ДВИГУНІВ ДРОНІВ

Стецюк Віктор

к.т.н., доцент

Хмельницький національний університет

Роман Сілідуєв

магістр

Хмельницький національний університет

Тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) і дронів, в тому числі, активно формуються під впливом технологічного прогресу, військових, комерційних і наукових потреб. Одними із ключових факторів сприяння розвитку даних напрямків техніки є мікромініатюризація електроніки і розробка новітніх компактних засобів акумулювання енергії підвищеної щільності. Області застосування БПЛА надзвичайно широкі: наука, аграрний сектор, екологія, військові застосування, логістика, ігрові та розважальні платформи, кінематограф, та багато іншого.

Безперервно відбуваються процеси вдосконалення апаратно-програмного забезпечення. Спостерігаються тенденції вдосконалення окремих вузлів, розробки в області створення нових матеріалів, наприклад композитів, які забезпечують легкість, міцність та надійність конструкцій дронів. Тенденції розвитку акумуляторів для дронів базуються на потребі підвищення енергоефективності, тривалості польотів, безпеки та зменшення ваги акумуляторних систем. Ключовими напрями розвитку акумуляторів є: підвищення енергетичної щільності (твердотільні батареї, нові хімічні склади), зменшення ваги (легкі композити або полімери, оптимізація дизайну для мінімізації зайвих елементів), прискорення зарядки (нові електродні матеріали, наприклад, графенові), збільшення циклів заряду-розряду, інтеграція ультраконденсаторів для миттєвого накопичення енергії, розробка технологій покращення стабільності електролітів і катодних матеріалів для довшого терміну служби, впровадження відновлюваних та гібридних джерел енергії (сонячні елементи, водневі системи), розробка інтелектуальних системи управління (ШІ-алгоритми для оптимізації енерговитрат і управління зарядом, модулі прогнозування залишкової ємності та попередження деградації), впровадження новітніх концепцій живлення (змінні акумуляторні блоки, бездротова зарядка).

Однак є і ряд наукових і технічних задач, які потребують вирішення. До проблемних аспектів роботи дронів відноситься питання теплового моніторингу двигунів. Введення індивідуальних для кожного двигуна сенсора температури являється надзвичайно важливою функцією, адже струми обмоток двигунів десятки Ампер (інколи більше сотні Ампер). А при таких значеннях струмів досягнути перегрівання двигуна досить просто, причому за короткий проміжок часу. Наслідки ж цього можуть бути катастрофічними:

- перегрівання мідної обмотки, руйнування лакового покриття і, як наслідок, коротке замикання;

- часткова або повна втрата коерцитивної сили постійних магнітів, які надзвичайно чутливі до градієнтів температур (точка Кюрі).

Один із запропонованих варіантів оптимізації роботи FPV-дронів – моніторинг температурних режимів двигунів (рис. 1).

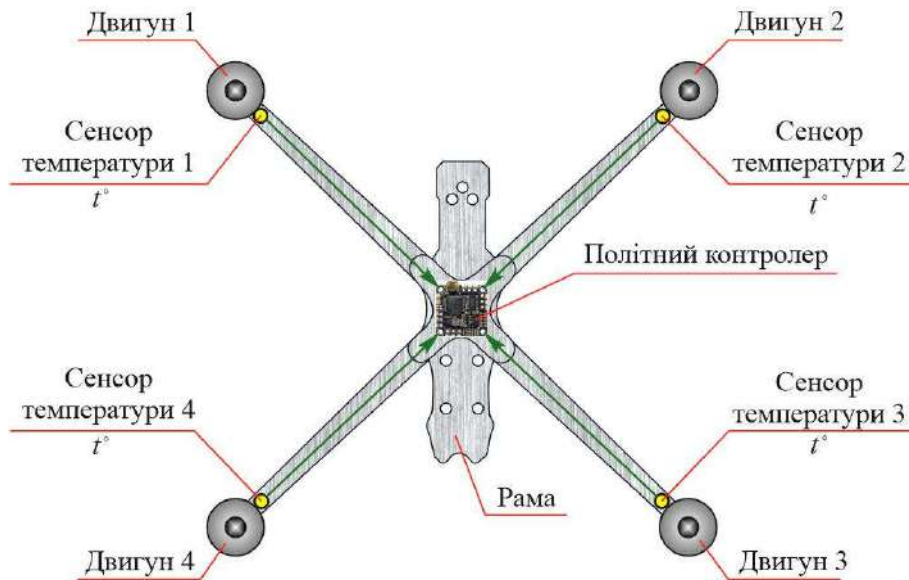


Рисунок 1. Моніторинг температурних режимів двигунів дрона

Для цього можна використовувати найрізноманітніше обладнання, враховуючи, що радіотехнічна промисловість на сьогодні забезпечує надзвичайно широку номенклатуру температурних сенсорів. Це можуть бути як аналогові системи так і повністю цифрові. Стосовно форм-фактору – окремі сенсори температури чи інтегральна реалізація. Розглянемо деякі можливі апаратні реалізації, почавши з найпростіших. Так, наприклад, звичайна термопара являється достатньо простим та надзвичайно надійним варіантом температурного сенсора (рис. 2).



Рисунок 2. Приклади термопар

До речі, даний тип сенсорів настільки мініатюрний, простий і надійний, що його можна інтегрувати безпосередньо в корпус двигуна, прикріплюючи прямо до обмоток двигуна (рис. 3).



Рисунок 3. Інтеграція термопари в мотор дрона

Вихід термопари можна безпосередньо під'єднувати до мікроконтролера, використовуючи входи, які містять АЦП. Однак є рішення цифрового спряження аналогової частини з мікроконтролером, використовуючи зовнішній аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Подібних пристроїв є надзвичайно велика кількість, наприклад MAX6675 (рис. 4) [1].

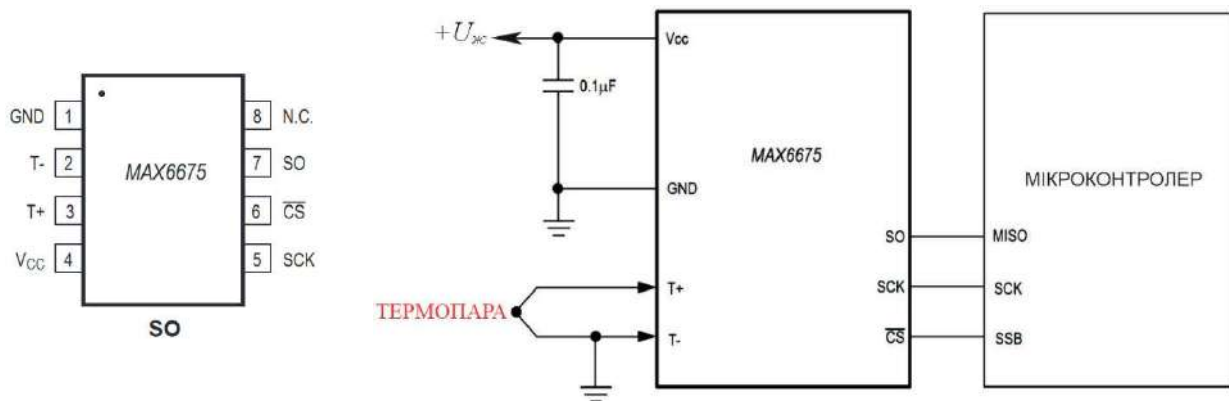


Рисунок 4. Аналогово-цифровий перетворювач MAX6675

Дана мікросхема представляє собою операційний підсилювач, 12-бітний перетворювач АЦП, схему компенсації температури холодного спаю і перетворювач в інтерфейс SPI. Є також вбудований контроль обриву термопари. До модуля MAX6675 також можна підключити різні термопари К-типу (хромель-алюмель), забезпечуючи потрібний діапазон вимірювання (до +1024 °C) і точності (розрізнявальна здатність температури 0,25 °C). Розрядність АЦП – 12 Біт.

На базі даної мікросхеми випускається готова плата (рис. 5).



Рисунок 5. Готовий модуль на основі MAX6675

Наступним варіантом температурного контролю можна запропонувати інтегральні рішення. Достатньо поширеними, простими і надійними інтегральними сенсорами є DS1820 [2] та DS1821 [3].

DS1820 – калібрований цифровий датчик температури з однопровідним інтерфейсом 1-Wire та розрядністю 9 біт (рис. 6).

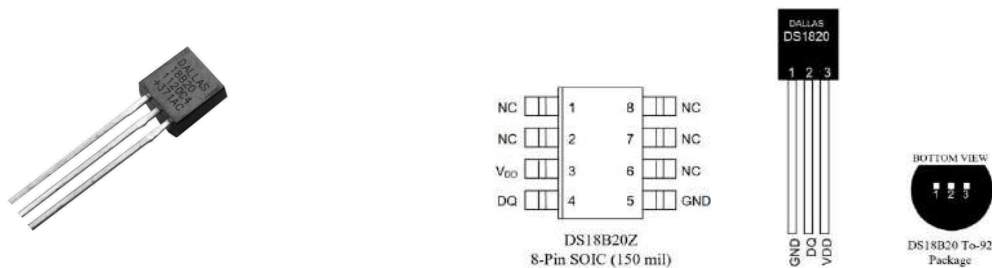


Рисунок 6. Цифровий датчик температури DS1820

Модифікація DS18B20 володіє програмованою роздільною здатністю – 9-12 біт. Діапазон вимірюваних температур від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Точність вимірювання $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Для унікального інтерфейсу 1-Wire потрібен лише один порт (один провід і земля). Не потребує зовнішніх компонентів. Може живитися від лінії передачі даних, діапазон напруг живлення від 3,0 В до 5,5 В. Відсутність живлення в режимі очікування. Оскільки кожен сенсор DS18B20 містить унікальний серійний номер, кілька аналогічних пристроїв можуть працювати на одній шині 1-Wire. Це дозволяє розміщувати датчики температури в різних місцях, включають контроль навколишнього середовища HVAC, вимірювання температури всередині будівель, обладнання або машини, а також моніторинг і контроль процесів.

DS1821 – програмований 8-розрядний датчик, термостат з цифровим інтерфейсом 1-Wire (рис. 7). Тобто додатково є можливість роботи в якості цифрового термостату. Також працює в діапазоні від -55 до $+125^{\circ}\text{C}$. Відмінною особливістю датчика DS1821 є можливість програмування режимів спрацьовування термостата. Точки спрацьовування термостата зберігаються в енергонезалежній пам'яті, тому пристрої DS1821 можна запрограмувати для автономної роботи в режимі термостата. Точність $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Напруга живлення: 2,7-5,5 В. Розміри: 4 x 20 мм.

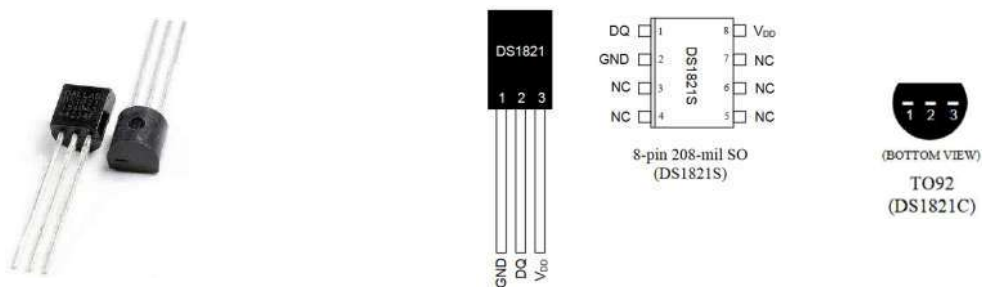


Рисунок 7. Цифровий програмований датчик температури DS1821

Існують багатофункціональні та комбіновані сенсори, які здійснюють моніторинг кількох параметрів. Так, наприклад HR202L – цифровий датчик температури та вологості [4]. Останній параметр може бути корисним для визначення наявності вологи, що потрапляє на двигуни або електронні складові дрона.



Рисунок 8. Цифровий датчик температури та вологості

Модуль GY-68 BMP180 є комбінованим сенсором, що поєднує в собі датчик атмосферного тиску і термометр, збудований на чіпі Bosch BMP180 (рис. 9) [5]. Тобто по суті – це барометр, термометр і альтиметр. Сенсор BMP180 побудований за магніторезистивною технологією, завдяки чому має високу точність та лінійність, а також низький рівень шумів.

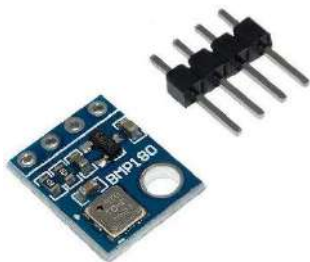


Рисунок 9. Комбінований сенсор атмосферного тиску і температури

Технічні характеристики комбінованого сенсора BMP180:

- діапазон вимірювання тиску 30-110 кПа (-500...9000 м над р. моря);
- максимальна роздільна здатність показань 0,02 кПа (17см);
- діапазон вимірювання температури 0-65 °C;
- роздільна здатність за температурою 0,1 °C;
- напруга живлення 1,62-3,6 В (4,25 В max.);
- інтерфейси цифровий вихід I²S;
- вихідні дані (тиск і температура) 16 біт;
- розміри 21×18 мм

Малий розмір та низьке енергоспоживання датчика дозволяє використовувати його в мобільних пристроях, домашніх метеостанціях, літальних апаратах (функція альтиметру) та інш. Також модуль може бути використаний у комплекті з GPS модулем для уточнення висотних координат. Модуль може монтуватися як на друковану плату, так і підключатися за допомогою стандартних дротів (штиркові з'єднувачі не входять до комплекту).

Датчик температури двигуна (інтегрований в двигун чи зовнішній) забезпечує моніторинг температури в реальному часі. Політний контролер, на основі цієї додаткової інформації від двигунів, може здійснювати оперативні регулювання режиму роботи та швидкості моторів, забезпечуючи оптимальний температурний режим. Введення запропонованого функціоналу дозволить збільшити безпеку польоту: безперервний моніторинг температури двигуна допоможе виявити проблему завчасно та вжити необхідних заходів. Зворотній зв'язок з двигунами стосовно температури допоможе оптимізувати льотні характеристики дрона шляхом регулювати швидкість моторів або інших параметрів для того, щоб відповідати безпечним експлуатаційним режимам. Температурний моніторинг можна використовувати для обслуговування та діагностики: дані температури двигунів можна внести в журнал і використовувати для технічного обслуговування. Таким чином, моніторинг температури дозволяє зберегти дорогоцінне обладнання від деградації, втрати технічних, а отже, політних характеристик та поломок.

Список літератури

1. Мікросхема MAX6675 Analog Devices [Електронний ресурс] : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX6675.pdf>. – Назва з екрана.
2. Мікросхема DS1820 Analog Devices [Електронний ресурс] : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18S20.pdf> – Назва з екрана.
3. Мікросхема DS1821 Analog Devices [Електронний ресурс] : <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS18S20.pdf> – Назва з екрана.
4. Цифровий сенсор температури та вологості HR202L [Електронний ресурс] : <http://www.aosong.com/en/products-110.html>. – Назва з екрана.
5. Комбінований сенсор GY-68 BMP180 Bosch Sensortec [Електронний ресурс] : <https://www.bosch-sensortec.com/search.html?q=BMP180>. – Назва з екрана.
6. Безконтактний сенсор температури GY-906 MLX90614 [Електронний ресурс] : <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/218977/ETC2/MLX90614/97/1/MLX90614.html>. – Назва з екрана.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ FPV-ДРОНІВ

Безпілотні літальні апарати та, як частковий випадок, FPV-дрони набули великої популярності на протязі кількох останніх років. Аналіз ринку показує збільшення виробництва БПЛА країнами світу в сотні разів, а капіталовкладення сягнули кілька десятків мільярдів доларів. Слід констатувати, що даним процесам сприяв значний прогрес новітніх технологій, зокрема мікромініатюризація електронних компонентів та пристрої акумулювання електричної енергії. Обидва цих чинника зіграли вирішальну роль в появі та розвитку безпілотних літальних апаратів. Мікромініатюризація електронних компонентів дозволила зменшити форм-фактор та максимально знизити вагу. А розробки в області акумулювання енергії дозволили перейти від теплових двигунів до електричних машин, забезпечивши ряд суттєвих переваг. Однак існує великий спектр наукових і технічних задач, які ще потрібно вирішити. Причому це стосується фактично всіх складових БПЛА та матеріалів, з яких вони виготовлені. Тобто, підвищення ефективності роботи FPV-дронів – комплексна задача, причому на довготривалу перспективу. В роботі акцентується увага на одній із найголовніших складових – двигуні. Адже, від вибору саме даного елемента будуть залежати всі функціональні та технічні характеристики БПЛА. Вибір двигуна для FPV дрона – це важливий аспект, від якого залежать маневреність, швидкість, стабільність і тривалість польоту дрона. Проведено аналіз та розглянуто ряд найбільш важливих факторів оптимального вибору системи двигунів FPV-дронів. Надано практичні рекомендації в підборі пари двигун-пропелер їх впливу на характеристику польоту.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, FPV-дрони, параметри, електричний двигун, пропелер, оптимізація.

V. I. Stetsiuk, R. A. Siliduev
Khmelnitsky National University

IMPROVING THE EFFICIENCY OF FPV-DRONES

Unmanned aerial vehicles and, as a partial case, FPV drones have gained a lot of popularity over the past few years. Market analysis shows that the production of unmanned aerial vehicles (UAVs) by the countries of the world has increased hundreds of times, and capital investments have reached several tens of billions of dollars. A whole spectrum of related industries is involved in the process of development, manufacture and operation of UAVs. This is accompanied by the appearance of new materials, the development of unique hardware and software, new methods of signal processing, etc. This is how FPV drones with machine vision and artificial intelligence appear, their integration with other systems and complexes is observed, and their navigational qualities are improved. It should be stated that these processes were facilitated by the significant progress of the latest technologies, in particular, microminiaturization of electronic components and devices for storing electrical energy. Both of these factors played a decisive role in the emergence and development of unmanned aerial vehicles. Microminiaturization of electronic components made it possible to reduce the form factor and reduce the weight as much as possible. And developments in the field of energy storage made it possible to move from heat engines to electric machines, providing a number of significant advantages. However, there is a wide range of scientific and technical problems that still need to be solved. Moreover, this applies to virtually all components of UAVs and the materials from which they are made. That is, increasing the efficiency of FPV drones is a complex task, and for a long-term perspective. The work focuses on one of the most important components - the engine. After all, all the functional and technical characteristics of the UAV will depend on the choice of this particular element. Choosing a motor for an FPV drone is an important aspect that affects the maneuverability, speed, stability and flight duration of the drone. When choosing an UAV engine, you should pay attention to a number of factors and characteristics: the size of the engine, the KV parameter - the number of revolutions per minute per volt, and the choice of propeller. The paper analyzes and considers a number of the most important factors for the optimal choice of the engine system of FPV drones. Practical recommendations are given in the selection of the engine-propeller pair and their influence on the flight characteristics.

Keywords: unmanned aerial vehicles, FPV drones, parameters, electric motor, propeller, optimization.

Вступ.

Логічним розвитком цивілізації в будь-якій області науки і техніки є винайдення нових методів, матеріалів, технологій, вдосконалення певних технологічних процесів та засобів, тощо. Так склалось еволюційно: від примітиву до високих технологій з різницею лише у градієнтах часової послідовності. Тобто в одних областях еволюція відбувалася повільними темпами, певні засоби і методи не змінювалися століттями, а в інших відлік йшов на десятиліття, роки або навіть місяці. Останнє твердження якраз відноситься до розвитку електроніки, її апаратної та особливо програмної реалізації. На сьогоднішній час область авіоніки та безпілотних систем знаходяться на піку свого технологічного розвитку, переживаючи неймовірний підйом (рис. 1).

Проаналізувавши світовий ринок в області безпілотних літальних апаратів (БПЛА), слід відзначити, що з 2014 року виробництво БПЛА країнами світу зросло в сотні разів. Крім того, прогноз на кінець 2024 року складає приріст порядку 16% в порівнянні із попередніми роками, а до 2030 року – 19-24%. Згідно з різними ринковими звітами, у 2023 році розмір світового ринку БПЛА оцінювався приблизно в 25 мільярдів доларів США, з постійною тенденцією до нарощування [1].

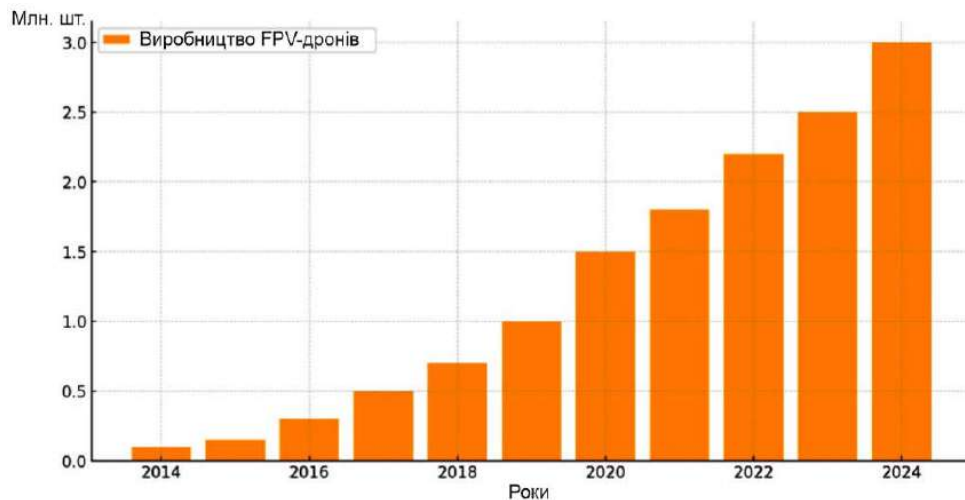


Рисунок 1. Діаграма виробництва FPV-дронів в глобальному масштабі

Одним із найбільш популярних напрямків безпілотних систем є FPV-дрони (First Person View). На сьогоднішній час FPV-дрони стали значним сегментом загального світового ринку виробництва БПЛА, займаючи 70% від загального. Наприклад, Україна в 2024 році планує випустити понад мільйон FPV-дронів. Це величезний обсяг для однієї країни, що свідчить про зростання популярності таких дронів. Технологія FPV дозволяє операторам керувати безпілотником за допомогою живого відео, забезпечуючи захоплюючий досвід польоту в режимі реального часу. Ринок безпілотних літальних апаратів неухильно зростає завдяки розвитку відповідних технологій, зростанню інтересу до даного виду техніки і розширенню областей застосування. Так, стосовно новітніх технологій слід констатувати наявність розробок, насамперед, в області мікромініатюрної електроніки та засобів акумулювання енергії. Обидва цих чинника зіграли вирішальну роль в появі та розвитку безпілотних літальних апаратів. Мікромініатюризація електронних компонентів дозволила зменшити форм-фактор та максимально знизити вагу. А розробки в області акумулювання енергії дозволили перейти від теплових двигунів до електричних машин, забезпечивши ряд суттєвих переваг.

За короткий часовий інтервал дана область науки, техніки і технологій набула найбільшої популярності, утворивши симбіотичні зв'язки зі спорідненими галузями. Ми спостерігаємо як постійно з досить високою періодичністю з'являються нові матеріали, нові розробки та методи, що безпосередньо пов'язані з областю безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Так з'являються FPV-дрони з машинним зором та штучним інтелектом, спостерігається їх інтеграція з іншими системами та комплексами, тощо.

Станом на 2024 рік у світовому виробництві безпілотних літальних апаратів домінують кілька ключових країн із значними відмінностями у військовому та цивільному застосуванні: Китай, США, Ізраїль, Туреччина, Південна Корея, Індія, Великобританія, Франція, Німеччина і т. д.

Основна частина.

Враховуючи актуальність даної тематики, слід зазначити необхідність подальших наукових досліджень в області авіоники та БПЛА. Перед науковцями, розробниками та інженерами постійно постають певні технічні проблеми та задачі, вирішення яких потребує комплексного підходу до апаратно-програмної реалізації. БПЛА складається з великої кількості елементів, вузлів та блоків, кожен з яких виконує своє призначення. І необхідно виробити ряд критеріїв оптимального підбору та інструкцій налаштування всіх складових.

Одним із найважливіших елементів будь-якого літального апарату є його двигун, а в даному випадку система двигунів (мультикоптер). Саме від вибору даного елемента будуть залежати всі функціональні та технічні характеристики БПЛА. Вибір двигуна для FPV дрона – це важливий аспект, від якого залежать маневреність, швидкість, стабільність і тривалість польоту дрона. Розглянемо ряд найбільш важливих факторів оптимального вибору конструкції FPV дрона та, зокрема, системи електричних двигунів.

1. Розмір двигуна.

Двигуни FPV мають позначення типу "2207", "2306", тощо. Перші дві цифри вказують на діаметр статора (22 мм або 23 мм), а останні дві цифри – на висоту статора (07 мм або 06 мм). Більші розміри статора зазвичай забезпечують більше обертів та крутного моменту, що корисно для важких чи агресивних польотів. Вибір розміру залежить від типу дрона:

- мікро-дрони: 1102-1306;
- середні дрони (5-дюймові дрони: 2204-2306);
- великі дрони (7+ дюймів): 2506 і більше).

2. Кількість обертів за хвилину на вольт (KV).

Параметр KV означає кількість обертів за хвилину на кожен вольт поданої напруги. Високі значення KV забезпечують більшу швидкість обертів, тоді як низькі KV дозволяють більшу стабільність та ефективність:

- 5000 і більше KV – зазвичай для маленьких та швидких дронів;
- 2300–2700 KV – найбільш поширені для 5-дюймових гоночних дронів;
- 1700–2000 KV – для великих, стабільніших дронів;
- 100–500 KV – наднизькі значення параметру KV використовуються для важких великих дронів, що потребують значного тягового зусилля.

Низький KV забезпечує вищий крутний момент, що є необхідним для важких завдань, проте знижує максимальну швидкість. Вибір KV також залежить від розміру пропелерів: великі пропелери ефективніше працюють на низьких оборотах, тоді як менші пропелери потребують вищих оборотів, а отже і вищого KV.

3. Пропелери.

Правильний вибір пропелерів для FPV-дронів значно впливає на характеристики польоту, швидкість, маневреність, а також на час роботи батареї акумуляторів. Розглянемо основні фактори для вибору пропелерів і які саме варіанти підійдуть для різних завдань. Пропелери для FPV-дронів характеризуються рядом параметрів: кількість лопатей, розмір (діаметр), крок, матеріал.

Пропелери мають від двох до восьми лопатей:

- дволопатеві – забезпечують менший опір, високу швидкість і ефективність, але можуть бути менш стабільними і використовуються для максимальної швидкості на коротких дистанціях;
- трьохлопатеві – більш універсальні, з гарним балансом між тягою і маневреністю.
- чотирьохлопатеві та більше – забезпечують високу тягу, кращу стабільність і плавність польоту, але знижують швидкість і скорочують час польоту через більший опір.

Діаметр пропелера (D , вимірюється в дюймах) – це максимальний діаметр круга, який описують лопаті. Для більшості дронів даний параметр варіюється в межах $D=2''-30''$. Вибір діаметра пропелера дрона залежить від необхідного розміру та призначення самого дрона:

- мінімальний діаметр – для мініатюрних і гоночних дронів діаметр пропелера може починатися від 2-3 дюймів (5-8 см).
- середній діаметр – для звичайних дронів споживчого класу (наприклад DJI) використовуються пропелери діаметром 5-10 дюймів (12-25 см).
- максимальний діаметр: для великих професійних або промислових дронів, що піднімають важкі вантажі, пропелери можуть досягати діаметра 20-30 дюймів (50-75 см) і більше.

Стандартні розміри для FPV-дронів зазвичай 5-7 дюймів:

- 5-дюймові пропелери – найпопулярніші для гоночних дронів, оскільки забезпечують високу швидкість і маневреність.
- 6-дюймові – для дальніх польотів, адже вони зазвичай забезпечують трохи більший час польоту.
- 7-дюймові – використовуються на важких дронах для дальніх та стабільних польотів, мають вищу ефективність у використанні енергії.

Загалом, менші пропелери використовуються для швидких маневрів і польотів на короткі дистанції, тоді як більші пропелери надають більше підйомної сили і підходять для тривалих польотів та важких вантажів.

Крок лопатей λ залежить від кута нахилу лопатей пропелера α і фактично означає відстань, пройдену гвинтом по прямій осі за один оборот (рис. 2):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\lambda}{2\pi R}, \quad (1)$$

де α – кута нахилу лопатей пропелера; R – радіус пропелера.

Даний параметр характеризує підйомну силу безпілота: пропелери з більшим кроком (рис. 2, а) забезпечують більшу тягу і швидкість, але вимагають більше енергії, що знижує час польоту та менш ефективні для точного маневрування; пропелери з меншим кроком (рис. 2, б) дають більше обертів на хвилину (RPM), що забезпечує стабільність та точність контролю, але знижує швидкість і підходить для спокійних, плавних польотів з меншою швидкістю.

З рисунку слідує, що:

$$\alpha_1 > \alpha_2 \rightarrow \lambda_1 > \lambda_2 \quad (2)$$

Діапазон значень кроку пропелера дрона варіюється у межах $\lambda=2''-14''$ і залежить від конструкції дрона та призначення пропелера. Зазвичай, для дронів малого та середнього розміру, використовуються пропелери з наступними характеристиками кроку:

- мінімальний крок – приблизно від 2 до 4 дюймів;
- максимальний крок – від 4 до 10 дюймів для стандартних дронів і навіть більше (до 14 дюймів) для професійних моделей або великих промислових дронів.

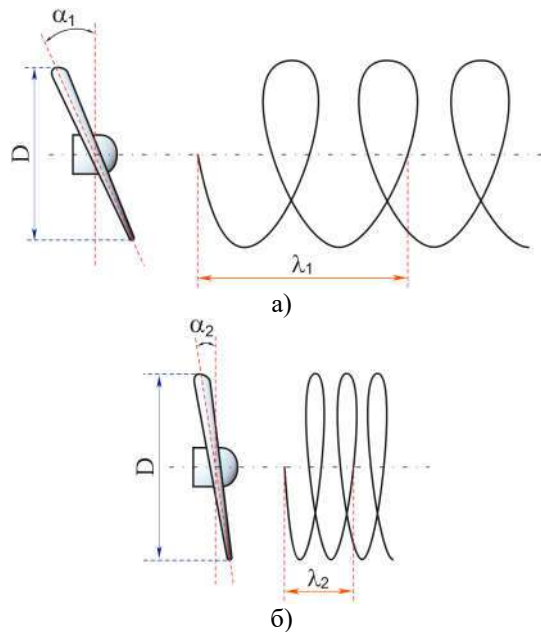


Рисунок 2. Залежність кроку двигуна дрона від кута нахилу лопатей:
 а) великий крок лопатей пропелера; б) малий крок лопатей пропелера;
 D – діаметр пропелера дрона; α – кут нахилу лопатей; λ – крок лопатей

Співвідношення кроку та діаметру лопатей (1) можна модернізувати, ввівши пряму залежність відношення кроку до діаметра пропелера (λ/D):

$$k = \frac{\lambda}{D}, \quad (3)$$

Інтерпретація даного співвідношення наступна:

- низьке співвідношення ($k < 0,5$) свідчить про те, що пропелер підходить для високої підйомної сили на низьких швидкостях та забезпечує стабільний політ, що корисно саме для FPV-дронів, які знімають відео; зазвичай такі пропелери мають великий діаметр та менший крок;
- середнє співвідношення ($k = 0,6-0,8$) використовується для універсальних дронів, які потребують балансу між маневреністю та швидкістю; підходить для споживчих квадрокоптерів, таких як DJI Phantom або аналогічні моделі;
- високе співвідношення ($k > 0,8$) забезпечує вищу швидкість, але меншу підйомну силу; подібне співвідношення підходить для високошвидкісних дронів, таких як гоночні; зазвичай має великий крок порівняно з діаметром.

Співвідношення між кроком пропелера та діаметром лопатей – важливий параметр, який визначає, наскільки ефективно дрон перетворює оберти двигуна в тягу. Це співвідношення має значний вплив на швидкість, тягу та загальні льотні характеристики дрона і допомагає вибрати оптимальний тип пропелера для різних типів польотів і умов.

Таким чином, зі зменшенням діаметра і збільшенням кроку можна знизити опір повітря і підняти швидкість підйому дрону, тобто вплинути на маневреність апарату (що важливо, наприклад, для квадрокоптерів гоночних). В іншому випадку, якщо збільшити діаметр та зменшити крок пропелера, ми знизимо динамічні характеристики безпілота, але підвищимо його вантажопідйомність при одночасному підвищенні плавності та стабільності польоту (якість, важлива при аерофотозйомках).

Вибір пропелерів є критичним фактором для досягнення оптимальної продуктивності дронів. Пропелери визначають швидкість, стабільність та ефективність дрону, тому вибір залежить від типу дрону та завдань, які він виконуватиме. Нижче наведені рекомендації для вибору пропелерів для різних типів дронів.

1. Мікродрони і дрони для FPV:

- розмір: 2-5 дюймів;
- кількість лопатей: 3 або 4 лопаті для більшої маневреності та контролю;
- матеріал: пластик – легкий матеріал, що забезпечує високу швидкість обертання;
- форма: пропелери з більшим кроком (кутом атаки) забезпечують швидке прискорення, що ідеально для FPV польотів.

Рекомендація: для забезпечення швидкого відгуку і маневреності необхідно обрати три- або чотирилопатеві пропелери 3-5 дюймів з більшим кроком. Для тривалого польоту краще підходять дволопатеві пропелери.

2. Квадрокоптери для аерозйомки:

- розмір: 6-12 дюймів;
- кількість лопатей: 2 лопаті для кращої стабільності та довшого польоту;
- матеріал: карбон або нейлон з композитами для більшої міцності та стабільності;
- форма: з меншим кроком для плавності та стабільності при польотах.

Рекомендація: для стабільності та довгого часу польоту найкраще підходять дволопатеві пропелери середнього діаметра (8-10 дюймів).

3. Гоночні дрони:

- розмір: 4-6 дюймів;
- кількість лопатей: 2 або 3 лопаті для більшої маневреності та швидкості;
- матеріал: пластик або нейлон – важливо мінімізувати вагу;
- форма: пропелери з більшим кроком для максимальної швидкості та прискорення;

Рекомендація: орієнтуватися на пропелери з більшим кутом атаки і трилопатеві для максимальної маневреності, але це зменшить тривалість польоту.

4. Вантажні дрони (індустріальні):

- розмір: 15-30 дюймів і більше, в залежності від розміру дрону;
- кількість лопатей: 2 лопаті, іноді 3 для більшого підйому;
- матеріал: карбон або армовані композити для міцності;
- форма: зазвичай з меншим кутом атаки для підйому важких вантажів та плавного польоту.

Рекомендація: пропелери великого розміру з меншим кутом атаки для максимальної вантажопідйомності та ефективності.

5. Безшумні дрони (для огляду або пошукових місій):

- розмір: 6-10 дюймів;
- кількість лопатей: зазвичай 2, але використовують спеціальну аеродинамічну форму;
- матеріал: легкий пластик або нейлон з додатковими шумопоглинаючими елементами;
- форма: пропелери з меншим кутом атаки та більш гладкими краями для зменшення шуму.

Рекомендація: вибір аеродинамічних дволопатевих пропелерів з м'якими краями та додатковим шумозаглушенням.

Висновки.

Робота присвячена підвищенню ефективності роботи FPV-дронів шляхом оптимального підбору електричного двигуна за конкретними параметрами та типорозміром пропелера. Від даного вибору будуть залежати всі функціональні та технічні характеристики БпЛА – маневреність, швидкість, стабільність, тривалість польоту, тощо. Проведено аналіз та розглянуто ряд найбільш важливих факторів оптимального вибору системи двигунів FPV-дронів. Розглянута залежність кроку лопатей від кута нахилу лопатей пропелера. Також введений коефіцієнт прямого співвідношення кроку та діаметру лопатей та надана його детальна інтерпретація. Так, низьке співвідношення ($k < 0,5$) свідчить про те, що пропелер підходить для високої підйомної сили на низьких швидкостях та забезпечує стабільний політ, що корисно саме для FPV-дронів, які знімають відео; зазвичай такі пропелери мають великий діаметр та менший крок; середнє співвідношення ($k = 0,6-0,8$) використовується для універсальних дронів, які потребують балансу між маневреністю та швидкістю; підходить для споживчих квадрокоптерів, таких як DJI Phantom або аналогічні моделі; високе співвідношення ($k > 0,8$) забезпечує вищу швидкість, але меншу підйомну силу; подібне співвідношення підходить для високошвидкісних дронів, таких як гоночні; зазвичай має великий крок порівняно з діаметром. Окрім того надані практичні рекомендації в підборі пари двигун-пропелер їх впливу на характеристику польоту БпЛА.

Література:

1. <https://www.statista.com/statistics/428911/global-production-volume-forecast-for-unmanned-aerial-systems-or-drones/>.
2. <https://oscarliang.com/>

References:

1. <https://www.statista.com/statistics/428911/global-production-volume-forecast-for-unmanned-aerial-systems-or-drones/>.
2. <https://oscarliang.com/>

Завідувачу кафедри
телекомунікацій, медійних та
інтелектуальних технологій
(ТМІТ) Підченко С.К.
здобувача вищої освіти студента
2 курсу, гр. ТРМ-23-1
Сілідуєва Романа Анатолійовича

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Strike Plagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіантах. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

10.12.2024 р.



Сілідуєв Р. А.

РІШЕННЯ КАФЕДРИ
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ, МЕДІЙНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
 ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів

Автор: Сілдусв Роман Анатолійович

Спеціальність: 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Освітня програма: Електронні інформаційно-комунікаційні системи та мережі

Науковий керівник: к.т.н., доц. Стецюк Віктор Іванович

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	<u>Відповідає</u>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження: запозичення у розмірі 4,4% є випадковими збігами переважно із бібліографічним записом джерел посилань та типовими бланками, та не є плагіатом.

Відповідальний за контроль

плагіату за системою Strike Plagiarism та Anti-Plagiarism (ХНУ):

12.12.2024 р.

12.12.2024

Зав. каф. ТМІТ

12.12.2024 р.

Олег ПИВОВАР

Стецюк В. І.

Сергій ПІДЧЕНКО

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 11%

ID: 157893 Назва: Метод підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів Додано в БД: 2024-12-11 Автора: Сіддуєв Роман Анатолійович Керівники: Стецюк Віктор Іванович Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	85103	1305	2732 (3%)	43 (3%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Роман СІЛДУЄВ

Співавтор:

Назва: Метод підвищення ефективності режимів роботи FPV дронів

Експерт: Віктор СТЕЦІЮК, к.т.н., доц

Підрозділ: Кафедра телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій

Коефіцієнт подібності 1:4.4%

Коефіцієнт подібності 2:1.6%

Мікропробіли: 0

Заміна букв: 13

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2024-12-12 11:20:08.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Дата 12.12.2024р

експерт

Доц. каф. ТМІТ

 Пубовар С.С.

В І Д З И В

на дипломну роботу магістра Сілідуєва Романа Анатолійовича
**«МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ
РОБОТИ FPV-ДРОНІВ»**

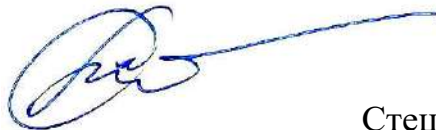
Тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів (БпЛА) і дронів активно формуються під впливом технологічного прогресу, військових, комерційних і наукових потреб. Тематика даної наукової роботи надзвичайно актуальність і полягає у підвищенні ефективності режимів роботи FPV-дронів шляхом підбору, вдосконалення та моніторингу стану окремих вузлів.

Розв'язується ряд актуальних науково-практичних задач, а саме: класифікація безпілотних літальних апаратів та FPV-дронів, створення математичного апарату аналізу механічних впливів на елементи конструкції безпілотного літального апарату, проведення імітаційного моделювання та стрес-аналіз елементів конструкції дрона.

Під час виконання магістерської роботи студент Сілідуєв Р. А. з належною наполегливістю виконував всі поставлені задачі, зарекомендував себе кваліфікованим науковцем в області телекомунікацій та радіотехніки з глибокими системними теоретичними знаннями та добрими практичними навичками.

В цілому дипломна робота Сілідуєва Р. А. «Метод підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів» повністю відповідає вимогам до робіт магістерського освітнього рівня, заслуговує на оцінку “відмінно”, а її автор – на присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка».

Науковий керівник _____



Стецюк В. І.

“ 29 ” листопада 2024 р.

РЕЦЕНЗІЯ

на дипломну роботу магістра групи ТРМ-23-1

Сілідуєва Романа Анатолійовича

Тема

«МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РОБОТИ FPV-ДРОНІВ»

Робота присвячена підвищенню ефективності режимів роботи FPV-дронів шляхом підбору, вдосконалення та моніторингу стану окремих вузлів.

Актуальність теми обумовлена надзвичайно широким попитом на безпілотні літальні апарати.

В магістерській роботі ставиться та виконується ряд задач, серед яких:

- 1) провести аналітичний огляд існуючих рішень, здійснити класифікацію безпілотних літальних апаратів та FPV-дронів;
- 2) сформулювати математичний апарат аналізу механічних впливів на елементи конструкції безпілотного літального апарату;
- 3) здійснити імітаційне моделювання та стрес-аналіз елементів конструкції дрона;
- 4) запропонувати апаратну реалізацію теплового та акселерометричного моніторингу.

За змістом робота є докладною та містить достатньо посилань на літературу. Викладення матеріалу є послідовним та логічно правильним. Наведені у роботі формули, припущення та висновки мають достатнє обґрунтування та детальне пояснення. Мова викладення роботи є технічно грамотною, зрозумілою та не перенасиченою спеціальними термінами.

З точки зору оформлення магістерська робота представлена пояснювальною запискою, що складається зі вступу, чотирьох основних розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Оформлення пояснювальної записки знаходиться на належному рівні.

Серед позитивних сторін магістерської роботи слід відмітити наступне:

- детально розроблений математичний апарат розрахунку власної резонансної частоти дрона;
- наявність імітаційного моделювання;
- оригінальні апаратні рішення теплового та акселерометричного моніторингу.

До недоліків слід віднести відсутність в роботі моделювання літального апарату безпосередньо у повітрі.

Наприкінці необхідно відзначити, що дана робота Сілідуєва Р. А. «Метод підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів» повністю відповідає вимогам до робіт магістерського освітнього рівня, заслуговує на оцінку «відмінно», а її автор – на присвоєння кваліфікації магістра зі спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка».

Рецензент

Мартинович Валерій Володимирович, д.т.н., проф.

« 11 » 12 2024 р.