

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету
Інформаційних технологій

/ Болбот І.М., д.т.н., проф. /

підпис ПІБ, вчене звання і ступінь

«__» _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
Комп'ютерних систем, мереж
та кібербезпеки

/ Касаткін Д.Ю., к.пед.н., доц. /

підпис ПІБ, вчене звання і ступінь

«__» _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему «Дослідження методів підвищення енергоефективності польоту БПЛА»

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

к. фіз.-мат. н., доц.

(науковий ступінь та вчене звання)

Нікітенко Є. В.

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к. фіз.-мат. н., доц.

(науковий ступінь та вчене звання)

Нікітенко Є. В.

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Перепелиця Д.Ю.

(ПІБ студента)

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
завідувач кафедри
комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки
/ Касаткін Д.Ю., к.пед.н., доц. /
_____ ПІБ, вчене звання і ступінь
підпис «___» _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
до виконання магістерської кваліфікаційної роботи здобувачу

Перепелиці Денису Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітня програма Комп'ютерні системи та мережі

Орієнтація освітньої програми Освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Дослідження методів підвищення енероефективності польоту БПЛА

Затверджена наказом ректора НУБіП України від «29» жовтня 2024р. № 1941 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14. 11. 2025р.

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи _____

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. _____
2. _____
3. _____

Перелік графічних документів (за потреби) Презентація виконаної роботи.

Дата видачі завдання «29» жовтня 2025р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ Нікітенко С. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Перепелиця Д.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання вихідних матеріалів та аналіз сучасних досліджень у сфері БПЛА	31.10.2025	Виконано
2	Аналіз класифікації, конструкцій та тенденцій розвитку БПЛА	03.11.2025	Виконано
3	Дослідження конструкції дронів та аналіз вібраційної стійкості	05.11.2025	Виконано
4	Дослідження факторів, що впливають на енергоспоживання БПЛА	08.11.2025	Виконано
5	Порівняння систем енергоживлення та визначення шляхів підвищення енергоефективності	10.11.2025	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	12.11.2025	Виконано
7	Підготовка графічного матеріалу та презентації	13.11.2025	Виконано
8	Подання завершеної роботи на кафедру	14.11.2025	Виконано

Студент _____ Перепелиця Д.Ю.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ Нікітенко Є. В.
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 66 сторінки, 25 рисунків, 6 таблиць, 15 джерел.

БЕСПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АЕРОДИНАМІКА, АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ, ЗОВНІШНІ ФАКТОРИ, СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ, FPV-ДРОН.

Об'єктом дослідження є безпілотні літальні апарати та особливості їх енергоспоживання під час польоту.

Метою роботи є аналіз факторів, що впливають на енергоефективність БПЛА, а також дослідження конструктивних, технологічних та експлуатаційних рішень, здатних зменшити витрати енергії та збільшити тривалість польоту.

У першому розділі узагальнено основні відомості про БПЛА, їх класифікацію, сфери використання та тенденції розвитку галузі.

Другий розділ присвячено аналізу конструкцій дронів, зокрема рами, силових установок, типів двигунів та акумуляторних батарей, а також розглянуто питання вібраційної стійкості корпусу.

У третьому розділі виконано детальний аналіз факторів, що впливають на енергоспоживання: погодних умов, характеристик батарей, конструктивних особливостей, режимів польоту та додаткового навісного обладнання.

У четвертому розділі досліджено ефективність існуючих систем, проведено порівняння типів акумуляторів та визначено напрями покращення енергоефективності.

Результати роботи демонструють, що оптимізація конструкції, вдосконалення енергоживлення та раціональне планування польоту здатні суттєво підвищити ефективність БПЛА та збільшити їх автономність.

ABSTRACT

Explanatory note: 66 pages, 25 figures, 6 tables, 15 sources.

UNMANNED AERIAL VEHICLES, ENERGY EFFICIENCY, AERODYNAMICS, BATTERY SYSTEMS, EXTERNAL FACTORS, ENERGY CONSUMPTION, FPV DRONE.

The object of this study is unmanned aerial vehicles (UAVs) and the characteristics of their energy consumption during flight.

The aim of the work is to analyze the factors that influence UAV energy efficiency, as well as to examine design, technological, and operational solutions that can reduce energy consumption and increase flight duration.

The first chapter summarizes the basic information about UAVs, their classification, fields of application, and current development trends in the industry.

The second chapter focuses on the analysis of drone designs, including frames, power units, types of motors, and battery systems. It also addresses the issue of structural vibration resistance.

The third chapter provides a detailed analysis of the factors affecting energy consumption: weather conditions, battery characteristics, structural features, flight modes, and additional mounted equipment.

The fourth chapter examines the efficiency of existing systems, compares different types of batteries, and identifies directions for improving energy efficiency.

The results of the study show that optimizing the design, improving the power supply system, and rational flight planning can significantly enhance UAV efficiency and increase their autonomy.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БПЛА	9
1.1 Що таке БПЛА та де їх використовують.....	9
1.2 Типи БПЛА.....	12
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ТА КОНСТРУКЦІЇ БПЛА	17
2.1 Економічні та політичні тенденції.....	17
2.2 Класифікація БПЛА та FPV-дронів	20
2.3 Конструкція дрона.....	26
2.4 Аналіз вібраційної стійкості конструкції дрона	33
РОЗДІЛ 3 ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ДРОНІВ ТА ФАКТОРИ, ЩО НА НЬОГО ВПЛИВАЮТЬ	44
3.1 Оцінка впливу зовнішніх факторів на розряд акумуляторних батарей дронів.....	44
3.2 Вплив інших факторів на енергоспоживання дрона.....	45
3.3 Визначення основних складових споживання енергії	47
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТА ВИБОРУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ	49
4.1 Методики порівняння та вибору технологій акумуляторних батарей.....	49
4.2 Вдосконалена методика вибору технологій акумуляторних батарей.....	52
4.3 Тестування запропонованої методики вибору акумуляторних батарей	57
ВИСНОВКИ	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	65

ВСТУП

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за останні роки зробив їх одним із ключових інструментів у цивільних, промислових та військових сферах. Завдяки поєднанню компактності, маневреності, точності та можливості автономної роботи дрони стали невід’ємною частиною сучасних технологічних процесів — від моніторингу територій і аерозйомки до логістики та розвідувальних операцій.

Одним із головних обмежень у використанні БПЛА залишається енергоефективність. Час перебування апарата в повітрі безпосередньо залежить від маси конструкції, типу акумуляторів, аеродинамічних характеристик, умов навколишнього середовища та режиму польоту. У зв’язку з розширенням сфер застосування та збільшенням вимог до автономності, питання оптимізації енергоспоживання набуває особливої актуальності.

Актуальність теми полягає в необхідності визначення та дослідження факторів, які найбільш суттєво впливають на витрати енергії, а також у пошуку оптимальних конструктивних і технологічних рішень для підвищення тривалості польоту. Зростання використання FPV-дронів, збільшення потреби у далекобійних і високоавтономних системах, а також розвиток альтернативних джерел енергії роблять це завдання стратегічно важливим.

Метою роботи є аналіз методів підвищення енергоефективності польоту БПЛА та визначення оптимальних технічних і експлуатаційних підходів, які дозволяють збільшити тривалість роботи безпілотних систем.

Отримані результати можуть бути використані під час проектування й модернізації БПЛА, планування польотних завдань та вибору оптимальних комплектуючих для підвищення енергоефективності.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БПЛА

1.1 Що таке БПЛА та де їх використовують.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА), або як їх ще часто називають — дрони, становлять сучасний тип авіаційної техніки, що відкриває широкі можливості для застосування у найрізноманітніших сферах діяльності людини. Сьогодні їх активно використовують у фото- та відеозйомці, геодезії, моніторингу сільськогосподарських угідь, будівництві, охороні об'єктів, а також у військовій галузі.

Основна перевага таких апаратів полягає у здатності здійснювати політ без безпосередньої участі людини на борту, що підвищує безпеку виконання завдань і знижує ризики для оператора. Завдяки високій маневреності, точності навігації та можливості оснащення різноманітними сенсорами, камерами й вимірювальними пристроями, дрони здатні ефективно виконувати як прості побутові, так і складні технічні чи дослідницькі операції.

З кожним роком сфера використання БПЛА лише розширюється. Вони допомагають проводити аерофотозйомку місцевості, відстежувати стан посівів, оцінювати масштаби надзвичайних ситуацій, здійснювати доставку невеликих вантажів і навіть брати участь у рятувальних операціях. Таким чином, безпілотники стали невід'ємною частиною сучасного технічного прогресу, поєднуючи в собі інноваційність, універсальність та практичність.

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) завдяки своїм унікальним характеристикам - маневреності, автономності, можливості тривалого перебування у повітрі та оснащенню сучасними сенсорами - сьогодні знаходять дедалі ширше застосування у найрізноманітніших галузях. Висока ефективність, відносна простота обслуговування і низька собівартість виконання завдань сприяють швидкому поширенню технології у цивільному та промисловому секторах.

Використання БПЛА у сільському господарстві.

Сільське господарство стало однією з перших галузей, де активно почали використовувати технологію дистанційного зондування землі. Якщо раніше моніторинг полів здійснювався за допомогою пілотованих літаків чи супутникових знімків, то сьогодні дрони дозволяють отримувати детальні дані з високою роздільною здатністю в режимі реального часу.

Основним напрямом використання є оцінка стану посівів, моніторинг вологи в ґрунті, прогноз урожайності, а також виявлення зон ураження шкідниками. Окрім аналітичних задач, безпілотники широко застосовують для обприскування рослин і внесення добрив — що суттєво скорочує витрати ресурсів і знижує вплив людського фактора.

БПЛА в енергетиці.

У сфері енергетики дрони забезпечують аудит та інспекцію ліній електропередач, трансформаторних підстанцій та інших об'єктів інфраструктури. За допомогою тепловізійних камер, мультиспектральних та ультрафіолетових сенсорів оператори можуть виявити місця пошкоджень проводів, деформацію опор, наявність сторонніх об'єктів у зоні охорони або навіть коронні розряди на високовольтних елементах. Це дає можливість запобігати аваріям та значно скорочує витрати на технічне обслуговування.

Геодезія, кадастр і картографія.

У геодезії та кадастрових роботах БПЛА стали незамінним інструментом. Використання високоточних камер і GPS-модулів дає змогу отримувати ортофотоплани, тривимірні моделі місцевості та точні топографічні карти. Ці дані використовуються при проектуванні інфраструктурних об'єктів, проведенні землевпорядних робіт і визначенні меж земельних ділянок.

Нафтогазова промисловість.

Дрони активно застосовуються для моніторингу протяжних трубопровідних систем і територій, де проходять лінії транспортування нафти чи газу. Завдяки тепловізійним і оптичним камерам безпілотники здатні оперативно виявляти витоки, пошкодження або несанкціоновані врізки. Крім того, БПЛА використовуються для екологічного моніторингу, виявлення розливів нафтопродуктів і контролю стану природних територій поблизу промислових об'єктів.

Гірнична промисловість і геологія.

Геологи застосовують безпілотники для детальної оцінки геоморфологічних характеристик місцевості, створення цифрових моделей рельєфу, визначення ділянок з аномальними ґрунтовими структурами. Дрони дозволяють збирати дані у важкодоступних районах, що значно підвищує точність розвідки та безпеку польових робіт.

Охорона та безпека.

У сфері охорони БПЛА використовують для патрулювання територій, моніторингу об'єктів у реальному часі та відстеження рухомих цілей. Оснащення дронів тепловізорами, нічними камерами і системами розпізнавання дозволяє виявляти порушників навіть у темний час доби. Такі технології застосовують як приватні охоронні структури, так і державні служби.

Будівництво.

У будівельній сфері дрони забезпечують візуальний контроль за ходом робіт, допомагають виявляти порушення технологій, вести фотофіксацію змін на об'єктах, а також складати об'ємні 3D-моделі споруд. Вантажні дрони можуть використовуватися для транспортування дрібних матеріалів або інструментів, що прискорює робочі процеси.

Силові структури та оборона.

У військовій сфері БПЛА відіграють стратегічно важливу роль. Вони використовуються для повітряної розвідки, коригування артилерійського вогню, радіоелектронного спостереження, а також для доставки вантажів у зони бойових дій. Безпілотники оснащуються системами захисту від перехоплення сигналів, оптико-електронними станціями та засобами передачі даних у реальному часі.

В останні роки дедалі частіше у військових діях застосовують і цивільні дрони подвійного призначення, адаптовані для розвідувальних місій, що свідчить про універсальність цієї технології.

Лісове господарство.

У лісовому господарстві БПЛА застосовуються для моніторингу стану лісових масивів, виявлення незаконних вирубок, пожеж і браконьєрської діяльності. За допомогою мультиспектральних камер здійснюється аналіз здоров'я дерев, облік диких тварин, контроль за природними змінами.

Дорожнє господарство.

У дорожньо-будівельній сфері безпілотники забезпечують високоточну зйомку дорожнього полотна, виявлення дефектів покриття та контроль якості виконання ремонтних робіт. Зібрані зображення використовують для проектування нових доріг і модернізації існуючої інфраструктури.

1.2 Типи БПЛА

Перш за все, безпілотні літальні апарати класифікують за масою на малі, середні та важкі. Такий поділ дозволяє швидко оцінити основне призначення апарату та його можливості в конкретних умовах експлуатації.

Найбільш універсальними та ефективними для більшості цивільних і комерційних завдань вважаються малі БПЛА вагою до 30 кг. Їх обирають через високу доступність, простоту експлуатації та легкість у транспортуванні.

Малі дрони не потребують спеціально обладнаних майданчиків для зльоту та посадки і не вимагають складних умов зберігання, що робить їх максимально мобільними. Крім того, реєстрація та облік таких апаратів значно простіші порівняно з більшими і важчими моделями, що робить їх оптимальним вибором для швидкого розгортання і роботи у польових умовах.

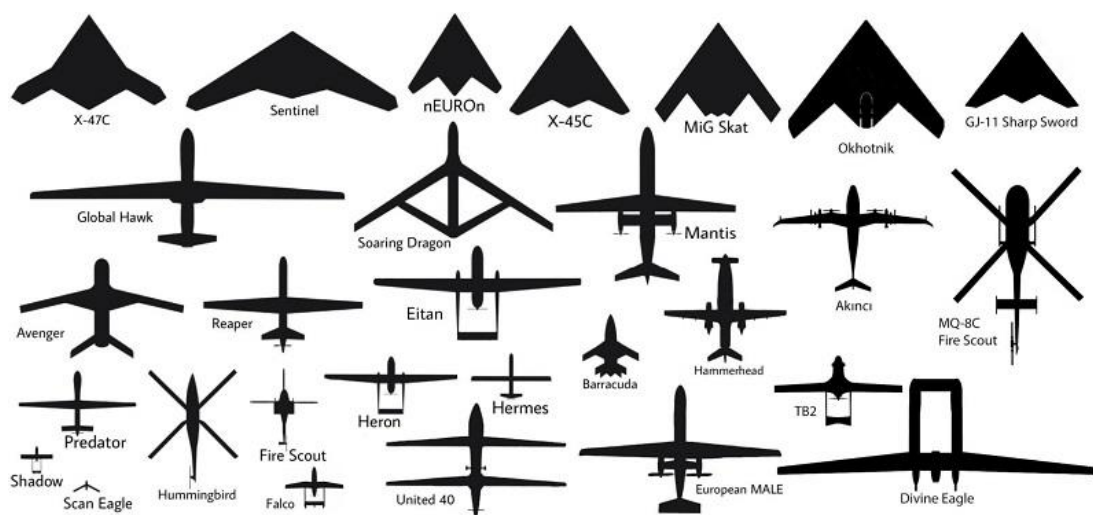


Рисунок 1.1 - Типи БПЛА за формою та конструкцією

Існує кілька методів поєднання пристроїв у розумному будинку для забезпечення зручного інтерфейсу та взаємодії для кінцевого користувача. Розглянемо чотири основні архітектури, які використовуються у розумних будинках, та розкриємо їх основні переваги та недоліки.

Класифікуючи за розміром, БПЛА бувають:

1. Мікро та нанодрони

Мікродрони – це надкомпактні безпілотники, розміром із велику комаху, що поміщаються у кишені. Найвідомішими серед них є моделі Black Hornet від норвезької компанії Prox Dynamics, довжина яких трохи більше 100 мм, а ширина близько 25 мм. Ці дрони активно використовували британські військові в Афганістані з 2013 року, адже вони дозволяють спостерігати за ситуацією за рогом або за стіною, де можуть ховатися супротивники.

Комплекс для роботи з дроном важить всього 1,3 кг і включає пульт, що керується однією рукою, док-станцію та батареї. Black Hornet здатен зависати в повітрі до 25 хвилин на одній батареї та до 2,5 години за рахунок додаткового живлення. Радіус дії мікродрону — 1 км, а максимальна швидкість — 5 м/с. Моделі можуть оснащуватися двома камерами, приладом нічного бачення та сенсором інфрачервоного випромінювання.

Завдяки зовнішньому вигляду, що нагадує комаху або маленького птаха, Black Hornet залишається непомітним для ворога. Крім того, це один із небагатьох безпілотників, здатних ефективно працювати в приміщеннях.



Рисунок 1.2 - Мікро-дрон Black Hornet

2. Малі тактичні дрони

Ці БПЛА вже не ховаються в кишені, але натомість мають інші важливі переваги та сфери застосування. Вони можуть залишатися в повітрі до 12 годин без посадки й працювати на відстані до 90 км, що робить їх придатними для тривалих розвідувальних місій. Типовий представник цього класу — розвідувальний дрон Fulmar від французької компанії Thales, призначений для збору широкого спектра розвідувальних даних.

Загалом дрони цього класу оптимізовані для збору розвідувальної інформації: їхній розмір, маршова витривалість і льотні характеристики роблять їх ефективними інструментами для спостереження, патрулювання й підтримки прийняття рішень на полі бою або в цивільних операціях.



Рисунок 1.3 - Малий тактичний дрон літакового типу в польоті.

3. Тактичні БПЛА

Більшість військових безпілотників належать до класу тактичних або середніх БПЛА. Це справжні «робочі конячки» сучасних армій, що поєднують тривалу тривалість польоту, великий радіус дії та універсальність у виконанні бойових і розвідувальних завдань.

У збройних силах США такі апарати класифікують за двома основними категоріями: MALE (Medium Altitude Long Endurance) — дрони середньої висоти з тривалим часом польоту, та HALE (High Altitude Long Endurance) — безпілотники, здатні діяти на великих висотах протягом багатьох годин.

Одним із найвідоміших представників цього класу є ізраїльський Heron, розроблений компанією Israel Aerospace Industries. Цей БПЛА може перебувати в повітрі до 52 годин, піднімаючись на висоту понад 10 000 метрів. Його маса перевищує одну тонну, а розмах крил сягає 16 метрів. Завдяки своїй надійності та ефективності Heron перебуває на озброєнні армій таких країн, як США, Австралія, Марокко, Туреччина, Індія та Канада.



Рис. 1.4 - Ізраїльський тактичний БПЛА Heron.

4. Великі ударні беспілотники

Найвідомішими у світі військовими беспілотниками вважаються великі літальні апарати армії США. Серед них особливо виділяються моделі MQ-1 Predator та його потужніший наступник MQ-9 Reaper, створені компанією General Atomics. Вартість одного такого дрона сягає приблизно 16,9 мільйона доларів. Reaper має радіус дії до 1000 км і здатний перебувати в повітрі понад 14 годин.

Найбільшим і найдорожчим серед беспілотників вважається RQ-4 Global Hawk, створений компанією Northrop Grumman. Його ціна перевищує 130 мільйонів доларів, не враховуючи наземної інфраструктури. Цей гігант здатний літати на висоті до 18 000 метрів, тобто вище, ніж більшість цивільних літаків.

Основне завдання Global Hawk — ведення стратегічної розвідки: він використовується для спостереження за зонами конфліктів і може перехоплювати сигнали мобільного зв'язку.



Рисунок 1.5 - Стратегічний розвідувальний БПЛА RQ-4 Global Hawk

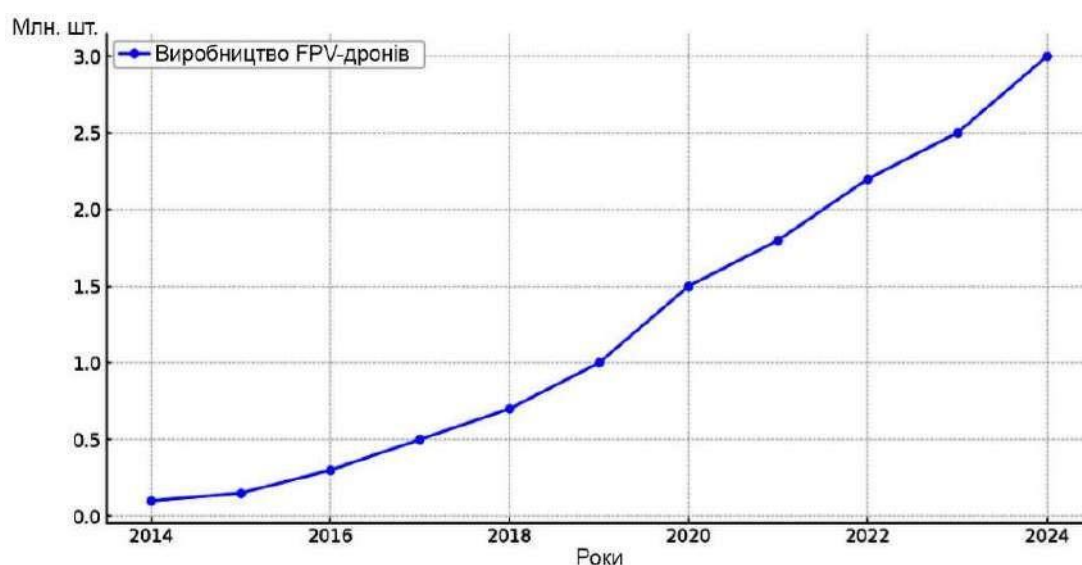
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ТА КОНСТРУКЦІЇ БПЛА

2.1 Економічні та політичні тенденції

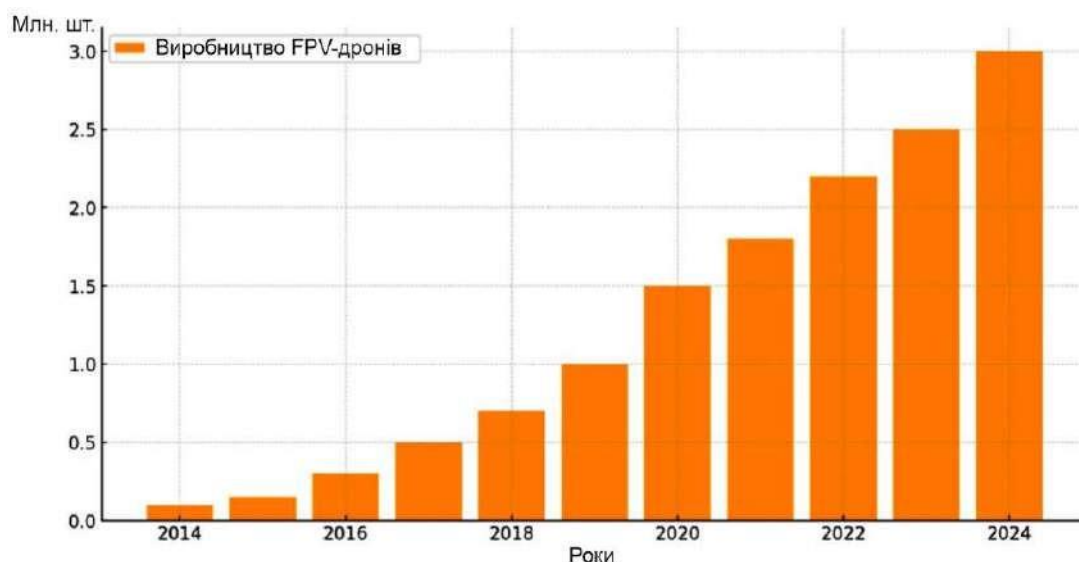
На сучасному етапі розвитку науки і техніки сфера авіоніки та безпілотних систем перебуває на піку свого технологічного вдосконалення. Вона демонструє стабільний ріст і швидкі темпи інновацій, що можна вважати одним із ключових факторів розвитку технічного прогресу у світі (рис. 2.1). Детальний аналіз глобального ринку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) свідчить, що починаючи з 2014 року обсяги їх виробництва у світі зросли в десятки, а подекуди й у сотні разів. Така динаміка пояснюється не лише технічним прогресом, а й активним залученням БПЛА у військовій, цивільній, аграрній та промисловій сферах.

Згідно з аналітичними прогнозами, до кінця 2025 року очікується подальше зростання на рівні 16%, а до 2030 року — на 19–24%, що вказує на сталу тенденцію розширення цього ринку.

За даними кількох провідних дослідницьких агентств, у 2023 році загальна вартість світового ринку безпілотників оцінювалась приблизно у 25 мільярдів доларів США, і має чітку тенденцію до подальшого зростання.



а)



б)

Рисунок 2.1 - Ріст виробництва FPV-дронів в глобальному масштабі:

а) графік; б) діаграма

Одним із найдинамічніших напрямів сучасних безпілотних систем стали FPV-дрони (First Person View) — апарати, що забезпечують оператору можливість керування з відчуттям “присутності” в польоті завдяки відеозв’язку в реальному часі. На сьогодні FPV-дрони становлять близько 70% від загального світового виробництва БПЛА, поступово витісняючи традиційні моделі у деяких сегментах.

Зокрема, Україна у 2025 році планує випустити понад мільйон FPV-дронів, що є вражаючим показником навіть за світовими мірками. Така кількість свідчить не лише про розвиток виробничої бази, а й про стратегічне розуміння ролі БПЛА в сучасних оборонних і технологічних процесах. FPV-технології відкрили новий рівень ефективності, адже дозволяють оператору бачити політ очима самого дрона, що суттєво підвищує точність і швидкість виконання завдань. Подібні апарати широко застосовуються як у військовій сфері, так і для цивільних потреб — у сфері аерозйомки, моніторингу інфраструктури, сільського господарства та досліджень. Розвиток безпілотних систем став можливим завдяки прогресу мікромініатюрної електроніки та технологій зберігання енергії. Саме ці напрями визначили нинішній вигляд БПЛА: малі габарити, висока автономність, потужність і надійність.

Зменшення розмірів електронних компонентів дозволило знизити вагу апаратів, водночас підвищивши їхню маневровість та енергоефективність. А вдосконалення акумуляторних систем дало змогу перейти від теплових двигунів до електричних, що зменшило вібрації, шум і спростило обслуговування.

За відносно короткий період ця галузь перетворилася на міждисциплінарну сферу, тісно пов'язану з електронікою, матеріалознавством, комп'ютерним моделюванням, штучним інтелектом та зв'язком. Зараз на ринку з'являються дрони з елементами машинного зору, автоматичного керування та інтелектуального планування траєкторій, що робить їх значно автономнішими та функціональнішими.

Станом на 2025 рік, основними центрами виробництва безпілотників залишаються Китай, США, Ізраїль, Туреччина, Південна Корея, Індія, Великобританія, Франція та Німеччина. Кожна з цих країн має власні пріоритети: одні концентруються на цивільних застосуваннях, інші — на військових програмах. У будь-якому випадку, можна впевнено стверджувати, що безпілотні літальні апарати стали одним із найважливіших технологічних напрямів ХХІ століття, які формують нову епоху у сфері безпеки, транспорту та промисловості.

2.2 Класифікація БПЛА та FPV-дронів

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) становлять надзвичайно різноманітну групу технічних засобів, що відрізняються за своїми характеристиками, конструкцією, функціональним призначенням та способом керування. З огляду на широкий спектр їх застосування, для систематизації таких апаратів застосовують кілька основних класифікаційних ознак. У сучасній науково-технічній літературі та нормативних документах прийнято виділяти низку критеріїв, за якими здійснюється розподіл БПЛА.

1. За типом конструкції:

1) Гелікоптерного типу (мультикоптери)

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

2) Літакового типу (з фіксованим крилом): забезпечують більшу дальність польоту та тривалість перебування у повітрі, що робить їх ефективними для моніторингу, розвідки та доставки вантажів.

3) Змішаного типу (поєднують переваги попередніх двох схем, тобто здатні до вертикального зльоту та подальшого горизонтального польоту. Такі моделі набувають популярності у військовій і транспортній сферах)

2. За масою:

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

3. За габаритними розмірами:

- 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 функціональним 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 згорання (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).

Зазначені класифікаційні ознаки можуть змінюватися або комбінуватися залежно від специфіки використання безпілотників. Наприклад, у військовій сфері основними критеріями є дальність польоту, тривалість перебування у повітрі та вантажопідйомність, тоді як у цивільних застосуваннях більше значення мають компактність, енергоефективність та простота експлуатації.

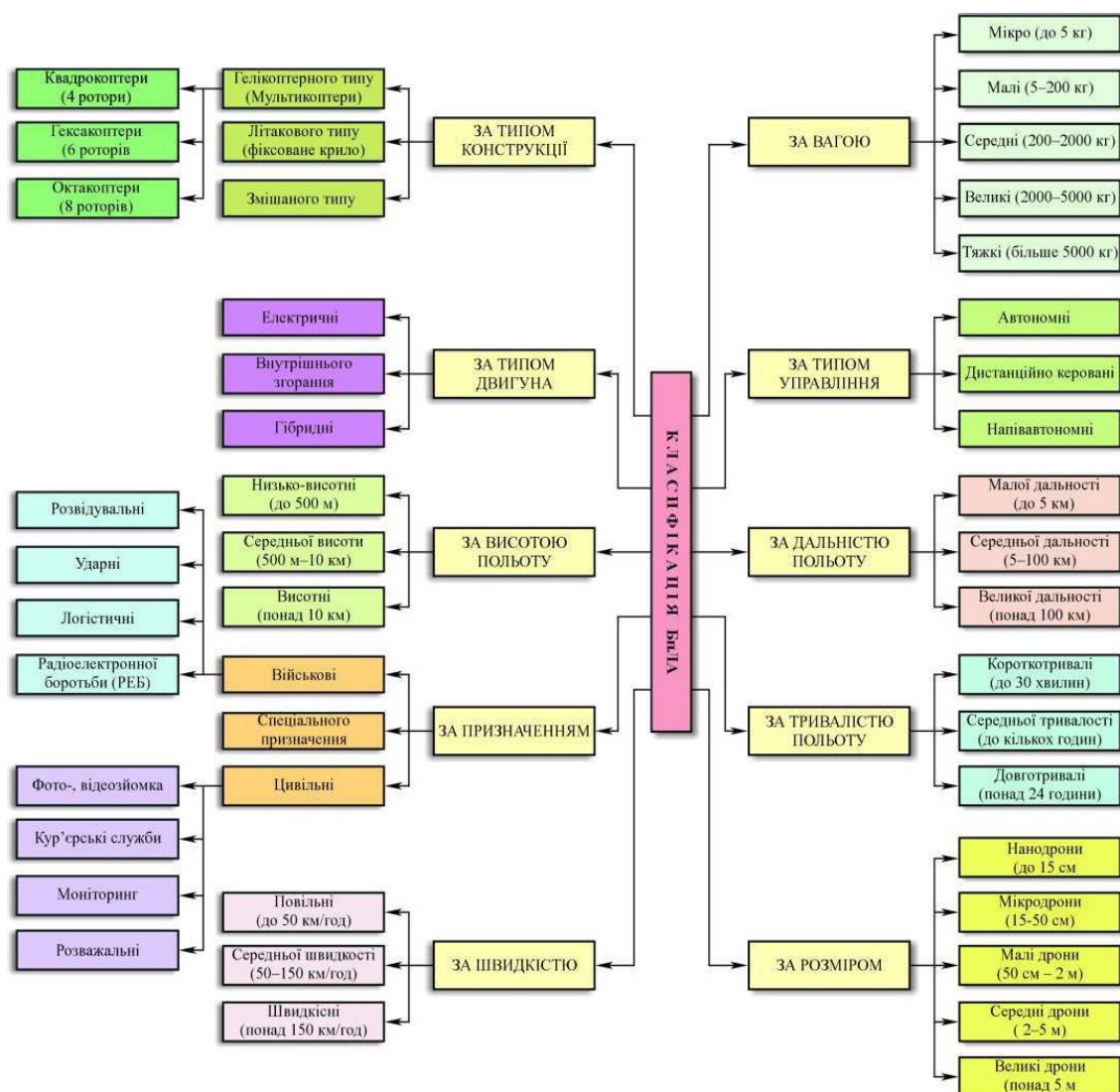


Рисунок 2.2 - Класифікація БПЛА

FPV-дрони (від англ. First Person View – «вигляд від першої особи») мають власну класифікацію, що зумовлена їхнім призначенням, конструкцією та технічними характеристиками. Основні напрямки поділу таких дронів можна визначити за кількома критеріями.

1. За призначенням:

1) Гоночні дрони (Racing drones)

- велика швидкість;
- компактність і легкість;
- маневреність.

2) Фрістайл-дрони (Freestyle drones)

- розроблені для виконання фігур вищого пілотажу;
- поєднують швидкість із точним керуванням.

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.

Єдиної загальноприйнятої класифікації FPV-дронів не існує. Їхні ознаки часто перетинаються та можуть одночасно належати до кількох категорій. Проте наведена система класифікації є узагальненою, створеною на основі аналізу доступних джерел і практичного досвіду використання цих літальних апаратів.

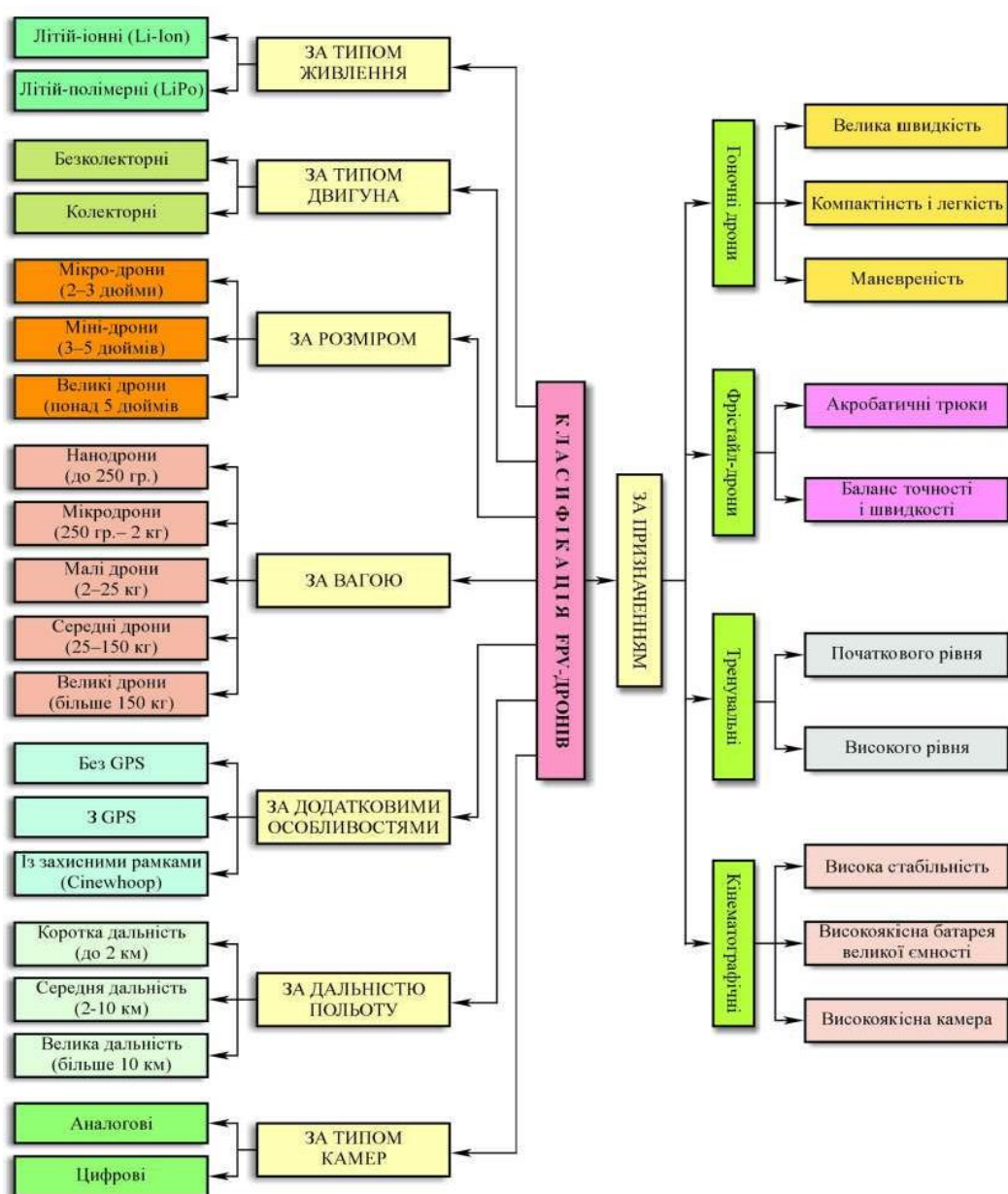


Рисунок 2.3 - Класифікація FPV-дронів

2.3 Конструкція дрона

Дрони, як різновид безпілотних літальних апаратів, можуть мати різну конструктивну будову. У межах цієї роботи основна увага зосереджується на класичному мультикоптері, який використовується як базова модель для досліджень. Такий дрон може нести FPV-камеру та інше додаткове обладнання залежно від поставлених завдань — це можуть бути виконавчі механізми, системи скидання, модулі управління, радары чи засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Типова конструкція FPV-дрона наведена на рис. 2.4.

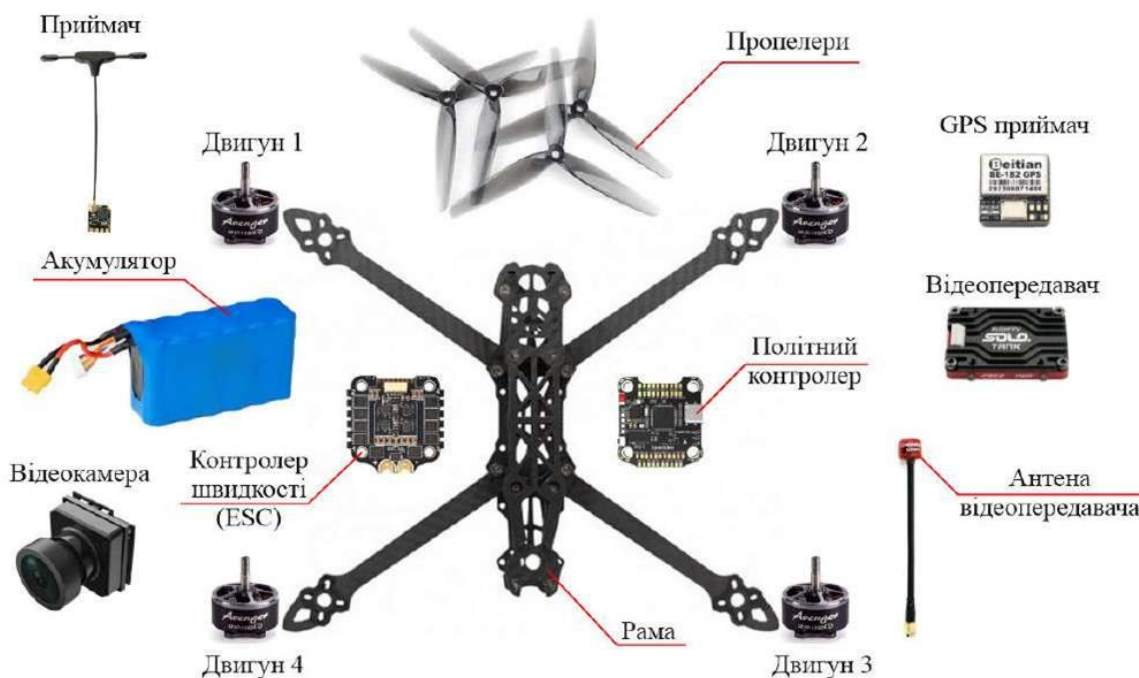


Рисунок 2.4 - Комплектація FPV-дрона

Складові FPV-дрона включають:

- раму;
- двигуни;
- пропелери;
- політний контролер;
- контролер швидкості (ESC);
- GPS-приймач;
- акумулятор;

- відеокамеру;
- відеопередавач;
- антену відеопередавача;
- приймач команд керування з антеною.

1) Рама (Frame):

Призначення: слугує основою дрона, несе на собі всі компоненти, забезпечує їх взаємодію та захист;

Форма та розмір: Х-подібна, Н-подібна; діаметри від 5", 6", 7" тощо;

Матеріали: карбон, пластик, алюміній, вуглецеве волокно;

Особливості: поєднує легкість і міцність.

2) Політний контролер (Flight Controller, FC):

Призначення: основна бортова електронна система дрона, його “мозок”, що відповідає за управління та координацію всіх компонентів;

Функції:

- а) керування моторами;
- б) підтримка параметрів польоту (швидкість, маневреність, крен, тангаж);
- в) обробка сигналів від радіопередавача;
- г) моніторинг бортових сенсорів (акселерометр, гіроскоп, альтиметр тощо);
- д) обробка команд від пілота;
- е) налаштування режимів польоту (акробатичний, стабілізований).

3) Мотори:

Призначення: забезпечують рушійну силу для польоту дрона;

Тип: безщіткові мотори (brushless motors), що відзначаються високою ефективністю та тривалим терміном служби;

Розташування: встановлюються на протилежних краях рами (зазвичай 4, 6 або 8 моторів, інколи інша кількість).

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

Призначення: контролюють швидкість обертання моторів відповідно до команд політного контролера;

Особливості: забезпечують плавність руху та оптимальну енергоефективність.

5) FPV-камера:

Призначення: передає відео у реальному часі на окуляри або монітор пілота;

Особливості: широкий кут огляду, мінімальна затримка відео (висока швидкість оновлення кадрів).

6) Відеопередавач (VTX):

Призначення: передає відеосигнал від камери на окуляри або екран;

Характеристики: потужність (мВт), частота 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 керування;

Види: кругова поляризація (для VTX) та лінійна (для радіозв'язку).

8) Радіосистема (радіопередавач і приймач):

Призначення: забезпечує зв'язок між пілотом і дроном для керування;

Частоти: 2,4 ГГц або 900 МГц (для більшої дальності);

Особливості: підтримка різних протоколів (FrSky, Crossfire).

9) Акумулятор (зазвичай LiPo або 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 дрона;

Типи: дволопатеві, трилопатеві або багатолопатеві;

Матеріали: пластик або карбон.

11) GPS-модуль (за потреби):

Призначення: визначає місцезнаходження дрона та забезпечує функцію “повернення додому” (RTH);

Особливості: використовується переважно на довготривалих або кінематографічних дронах.

12) Датчики:

Призначення: забезпечують позиціонування та стабільність польоту;

Типи: барометр, альтиметр, гіроскоп, магнітометр, дальномір тощо.

13) Додаткові та супутні компоненти FPV-дрона:

а) FPV-окуляри або монітор:

Призначення: відображають відео з камери дрона для пілота;

Особливості: вбудовані приймачі сигналу, регулювання яскравості та контрасту.

б) OSD (On-Screen Display):

Призначення: відображає телеметричну інформацію на екрані (рівень батареї, висота, швидкість);

Інтеграція: вбудований у політний контролер або окремий модуль.

в) Battery Eliminator Circuit (BEC):

Призначення: перетворює напругу акумулятора на необхідні напруги для електроніки дрона;

Особливості: може бути вбудований у ESC або існувати як окремий модуль.

FPV-дрон являє собою складну систему, в якій кожен компонент відіграє важливу роль у забезпеченні стабільності, керованості та комфортного польоту.

Вибір рами для FPV-дрона залежить від ряду факторів: типу польотів, поставлених цілей, розмірів двигунів, акумуляторів та інших складових. Розглянемо основні критерії, на які слід звертати увагу при підборі рами.

Діагональ рами визначає загальний розмір дрона та допустимі розміри пропелерів. Найпоширеніші варіанти:

- 3–4 дюйми – компактні дрони;
- 5 дюймів – спортивні FPV-дрони;
- 6–7 дюймів – для дальніх польотів.

Великі рами (7 дюймів і більше) підходять для тривалих польотів та стабільної відеозйомки, тоді як малі рами більш ефективні для спортивних польотів або польотів у закритих приміщеннях.

За формою рами поділяють на:

- 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.

Матеріали, з яких виготовляють раму FPV-дрона, мають різні властивості та впливають як на міцність конструкції, так і на її поведінку в польоті.

Карбонове волокно – найпоширеніший варіант: воно поєднує високу жорсткість, малу вагу та добре тримає ударні навантаження, зменшуючи ризик критичних пошкоджень під час падіння. Єдиний мінус — висока вартість.

Пластик або нейлон – легкі матеріали, що використовуються переважно в маленьких або навчальних коптерах. Часто деталі друкують на 3D-принтері, проте вони зазвичай поступаються цілнолитим за міцністю.

До слабких місць карбону можна віднести його електропровідність: випадковий контакт оголених проводів із рамою здатен викликати коротке замикання та пошкодити електроніку. Окрім цього, карбон частково екранує радіосигнал, що інколи впливає на якість зв'язку.

Маса рами впливає на характер польоту: легкі конструкції дають дрону більше швидкості та чутливості до керування, тоді як важчі рами додають стабільності та краще захищають начинку під час жорстких приземлень.

Також важливі особливості кріплення та розміщення обладнання. Слід врахувати, як саме встановлюється FPV-камера та камера запису, чи достатньо місця для електроніки — регуляторів, контролера, акумулятора. У деяких моделях передбачене регулювання кута нахилу камер, що особливо корисно під час швидкісних FPV-польотів.

Найчастіше у FPV-дронах використовують рами діаметром від 5" до 10" (12,7–25,4 мм). Для проведення стрес-аналізу в цій роботі обрано раму формату 7" (приблизно 180 мм), що показано на рис. 2.5.

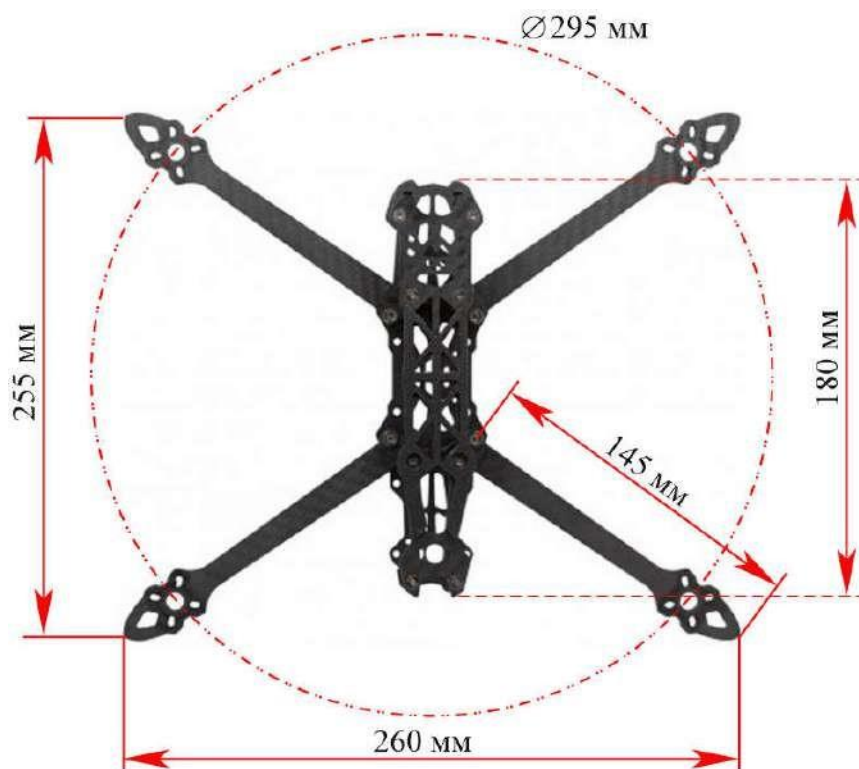


Рисунок 2.5 - Розміри рами FPV-дрона

Як уже зазначалося, конструкції дронів можуть істотно відрізнятися, однак підхід до аналізу та моделювання вібрацій корпусу, його деталей та інших компонентів загалом залишається універсальним.

Рама дронів є модульними: вони складаються з багатьох окремих елементів, які після збирання формують жорсткий несучий каркас (рис. 2.6). Це потрібно враховувати під час оцінювання вібраційної стійкості конструкції та її ключових вузлів — передусім пари «двигун–пропелер». Саме ці елементи є найцікавішими з точки зору вібраційного моніторингу.



Рисунок 2.6 - Деталі рами дрона



Рисунок 2.7 - Рама дрона в зібраному вигляді



Рисунок 2.8 - Розташування елементів на рамі дрона

2.4 Аналіз вібраційної стійкості конструкції дрона

Дослідження впливу вібрацій на конструкцію безпілотного літального апарата доцільно починати з аналізу окремих вузлів, поступово переходячи до оцінки поведінки всієї системи. Основним джерелом коливань у дронах зазвичай виступають електродвигуни разом із пропелерами. Обидві ці складові можуть генерувати вібрації з різних причин.

Для двигуна характерними є такі фактори виникнення коливань:

- дисбаланс ротора (заводські похибки, зношування, потрапляння дрібних частинок);
- спрацювання підшипників;
- ненадійно зафіксовані або нерівномірно намотані котушки статора;
- внутрішні резонансні явища.

Пропелер, своєю чергою, може створювати небажані вібрації через:

- нестійкі повітряні потоки;
- опади чи інші атмосферні явища;
- дисбаланс або нерівномірність маси лопатей;
- зношення матеріалу;
- деформації чи порушення геометрії;
- часткові пошкодження поверхні;
- резонансні процеси в самому пропелері.

Вплив таких коливань на роботу БПЛА може проявлятися у вигляді:

- погіршення керованості та стабільності в польоті;
- неконтрольованих нахилів;
- спотворення показань датчиків (висотоміра, гіроскопа, сенсорів тиску й температури);
- негативного впливу на авіоніку;

- погіршення точності навігації та стабілізації.

У більшості сучасних дронів застосовуються безколекторні двигуни постійного струму (BLDC - Brushless Direct Current). Вони давно зарекомендували себе в технічних галузях завдяки високому коефіцієнту корисної дії, хорошему співвідношенню маси та створюваної тяги, а також плавності роботи. Розвиток цих двигунів разом з появою легких і містких батарей дозволив перейти від ДВЗ до електричних силових установок. Проте BLDC-двигуни потребують спеціалізованих контролерів керування.

На рисунках 2.9 і 2.10 наведено два приклади моторів різної конструкції. BrotherHobby Avenger 2806.5 має більш масивний корпус і відносно невелику кількість обмоток, тоді як T-Motor Antigravity MN6007 II вирізняється значним діаметром і тонким корпусом із більшим числом котушок. Порівняння цих варіантів дає змогу оцінити їх з погляду стійкості до вібрацій.

Незалежно від виробника чи моделі, будова таких двигунів містить однакові ключові елементи:

- статор із електротехнічної сталі;
- ротор;
- мідні обмотки;
- постійні магніти;
- підшипники.

Статор — нерухома частина електродвигуна, сформована зі стопки тонких металевих пластин, на які намотані котушки. Залежно від конструкції двигун може мати одно-, дво- або трифазну схему. В однофазних варіантах ротор містить лише одну пару магнітних полюсів.

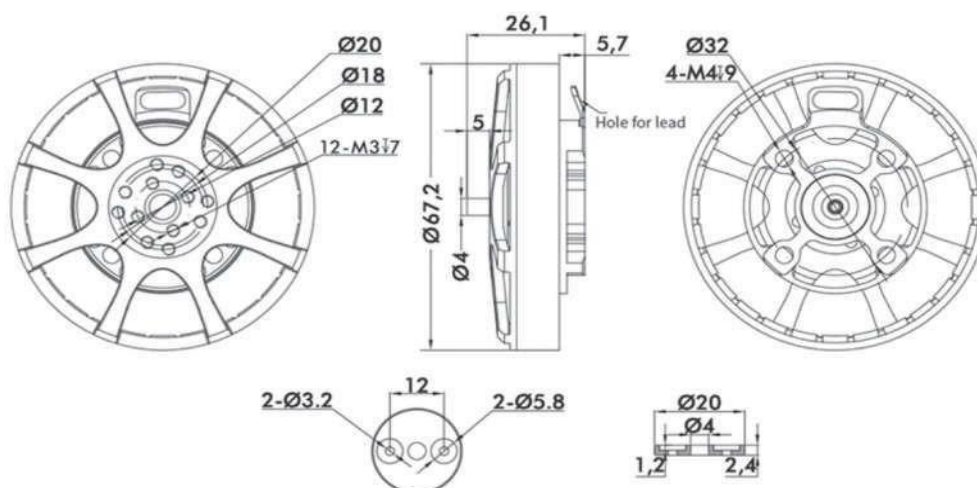
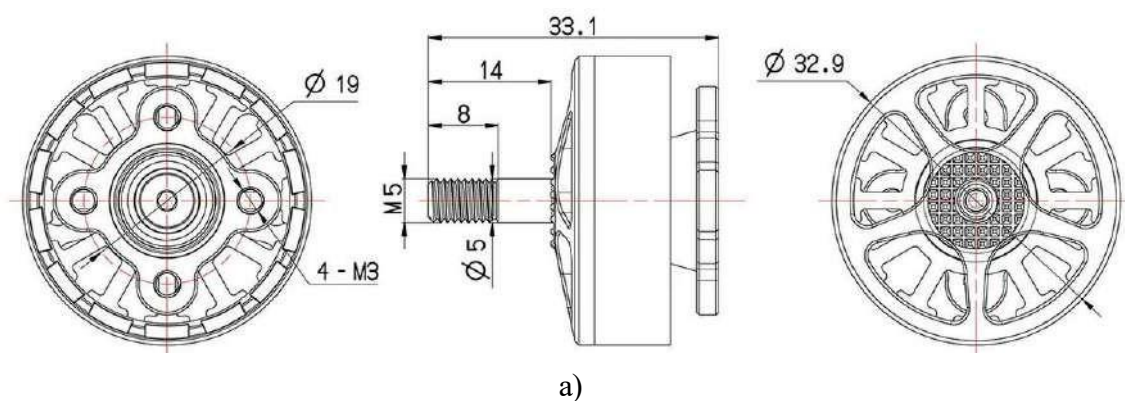


Рисунок 2.9 – Варіанти конструкцій двигунів дронів:

a) BrotherHobby Avenger 2806.5 1700KV

б) T-Motor Antigravity MN6007 II 320KV

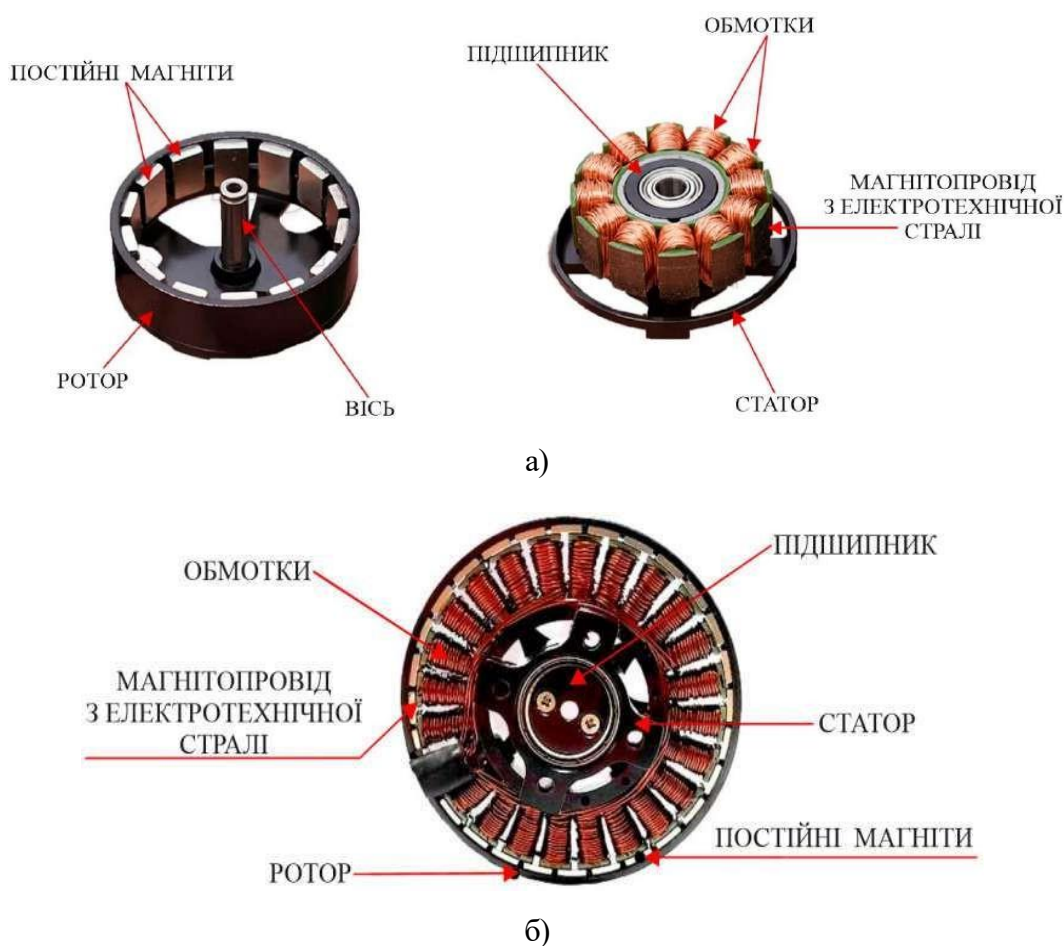


Рисунок 2.10 – Будова двигуна дрона
 а) BrotherHobby Avenger 2806.5 1700KV
 б) T-Motor Antigravity MN6007 II 320KV

Подібні двигуни проявляють свою ефективність переважно на значних обертах, адже на малих швидкостях їхня робота ускладнюється: з'являється ривковість і зменшується стабільність. Двофазні моделі характеризуються більш рівномірним ходом і кращою ефективністю порівняно з однофазними, а також не потребують складних систем керування. Трифазні двигуни мають більшу кількість полюсів, завдяки чому забезпечується максимально плавне обертання серед усіх варіантів. Проте за підвищену стабільність доводиться розплачуватися нижчою частотою обертання, оскільки швидкість прямо залежить від кількості полюсів p : чим їх більше, тим менше максимальні оберти. Водночас велика кількість полюсів забезпечує найвищу стійкість до вібрацій і суттєвий крутний момент. Тобто збільшення числа полюсів безпосередньо сприяє зменшенню власних коливань двигуна.

Ротор є рухомою частиною електродвигуна. Він складається з корпусу з розташованими по колу постійними магнітами та осі, яка слугує одночасно і опорою всередині двигуна, і валом для монтажу пропелера. Магніти, взаємодіючи з магнітним полем статора, змушують ротор обертатися.

Котушки зазвичай виконані у вигляді намотаного на осердя статора мідного дроту. Намотування здійснюється до повного заповнення пазів, після чого котушки з'єднуються згідно із заданою фазністю та виводяться для підключення до силової електроніки. Подача струму на обмотки створює електромагнітні поля, що взаємодіють із магнітами ротора, приводячи його у рух.

Підшипники - це вузли, що забезпечують мінімізацію тертя між рухомими частинами. У дронах переважно використовуються закриті кулькові підшипники, які не потребують частого обслуговування.

Коректне розташування всіх елементів двигуна дозволяє максимально ефективно перетворювати електричну енергію на механічну. Проте з часом будь-який двигун неминуче піддається зношуванню, насамперед це стосується вузлів тертя. У результаті виникає биття, що спричиняє вібрації. Робота моторів дрона супроводжується складними умовами: різкими змінами навантаження, високими перевантаженнями, вертикальними та боковими силами, характерними для тривимірного режиму польоту.

Для коректного функціонування BLDC-двигуни потребують наявності датчиків зворотного зв'язку (наприклад, сенсорів Холла). Отримана від них інформація передається до контролера швидкості ESC, який регулює положення та частоту обертання ротора. У промислових системах для цих цілей часто застосовують оптичні енкодери: інкрементні в асинхронних двигунах та абсолютні — у синхронних.

Коливання, що виникають у двигуні або пропелері, передаються на несучу конструкцію дрона, оскільки жорстке кріплення не забезпечує можливостей для гасіння. Теоретично інтеграція демпферних або амортизаційних елементів могла б частково знизити прояви резонансу, однак подібні рішення майже не застосовуються, ймовірно через складність конструкції та вартість.

Водночас досвід у сфері віброзахисту свідчить, що механічні системи амортизації забезпечують лише частковий ефект, оскільки резонансні явища можуть виникати навіть разом із такими елементами. Пропонований же підхід до вібромоніторингу дозволяє повністю уникнути проблеми, адже передбачає адаптивний алгоритм, який не залежить від конкретної причини або частоти виникнення коливань.



Рисунок 2.11 – Узагальнена модель акселерометричного моніторингу

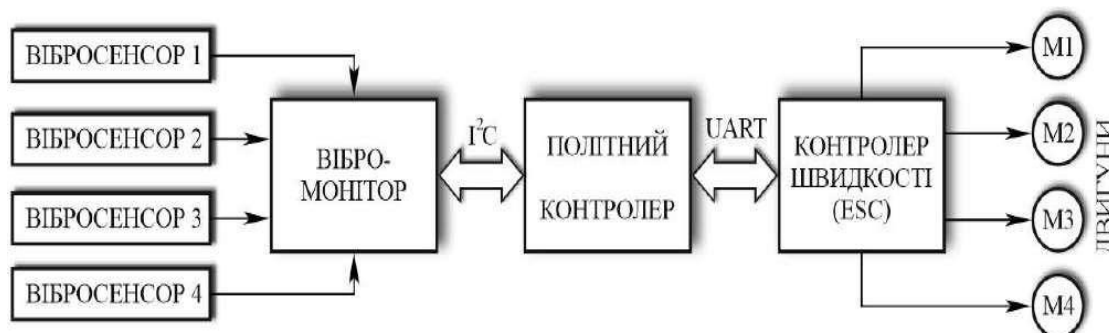


Рисунок 2.12 – Модель акселерометричного моніторингу на рівні цифрових протоколів

Для оцінювання вібраційної стійкості двигуна, пропелера або їхньої сумісної роботи пропонується використати спеціальну експериментальну установку. Мультикоптерний варіант (рис. 2.13) реалізований за принципом важеля. У роботі задіюється пара двигунів, розташованих один навпроти одного: один мотор приводиться в дію, а другий працює в режимі пасивного елемента (наприклад, комбінація 1/4 та симетрична 3/2).

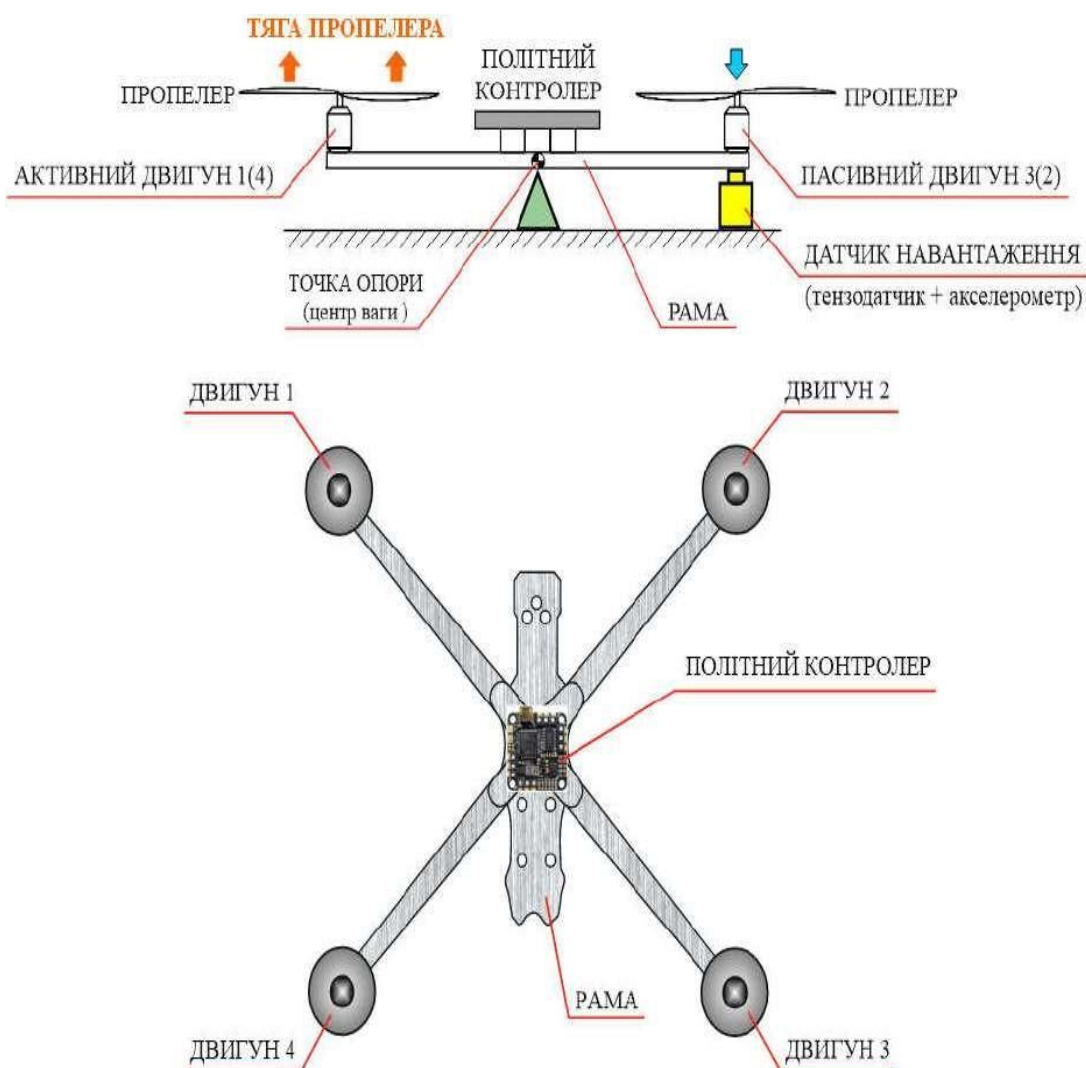


Рисунок 2.13 – Мультикоптерний варіант експериментальної установки

Активний двигун під час обертання пропелера генерує тягову силу. Ця сила через плече квадрокоптера передається до протилежної його точки, де розміщено вимірювальні елементи. У даній конфігурації це акселерометр, що реєструє прискорення та коливання, а також тензодатчик, який фіксує величину прикладеного навантаження. Опрацювання отриманих даних дозволяє визначити власну частоту обертання ротора та коливальної ділянки плеча мультикоптера. Для подальшого аналізу перейдемо до розгляду моделі затиснутої консолі (балки) та її деформації в умовах плоского згину, як показано на рис. 2.14.

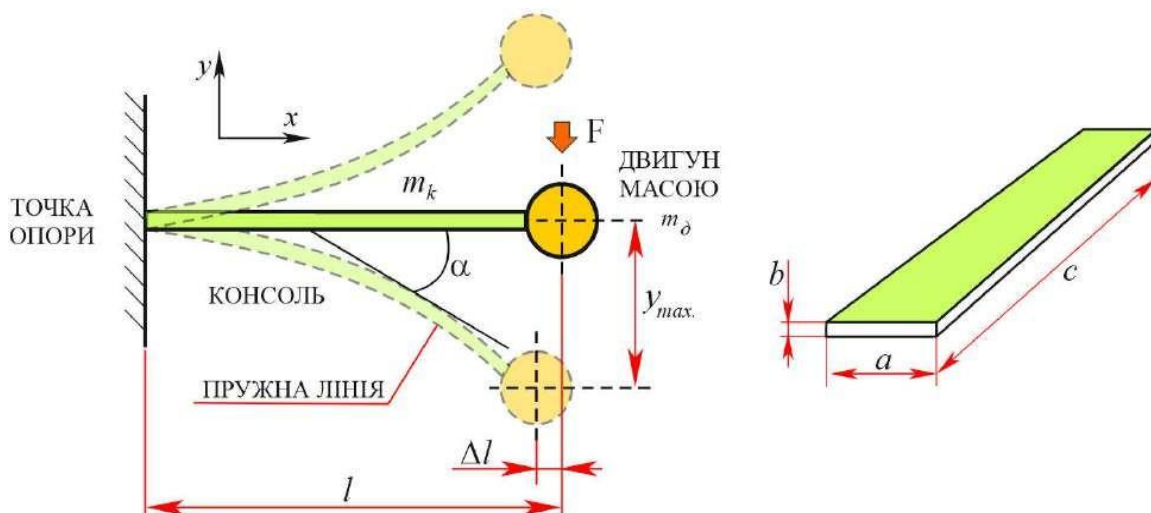


Рисунок 2.14 – Визначення власної резонансної частоти методом Релея:

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 тягової сили пропелера та супутніх вібрацій консоль зазнає деформацій, здійснюючи вертикальні коливання з амплітудним зміщенням на величину x . Для дослідження поведінки такої системи та визначення її власної резонансної частоти застосуємо метод Релея. Він ґрунтується на припущенні, що балка коливається за гармонійним законом із поступовим експоненційним згасанням амплітуди, а максимальні значення потенціальної енергії $E_{П.макс.}$ повинно дорівнювати максимальному значенню кінетичної енергії $E_{К.макс.}$:

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

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.

Для використання методу Релея необхідно визначити аналітичні вирази для динамічної жорсткості системи та її повної маси. Остання знаходиться найпростішим способом: у технічній документації на конкретний двигун наведені всі основні параметри, зокрема й значення його маси (див. 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

Маса рами також є відомим параметром. Її можна знайти у технічних характеристиках виробника або визначити шляхом прямого зважування. Загалом рами дронів виготовляють із різних матеріалів — дерева, алюмінію, склотекстоліту, пластику чи карбону. Наприклад, рама, зображена на рис. 2.4–2.7 у кількох варіантах виконання, має таку масу:

- карбонова рама має масу 126 г;
- рама зі склотекстоліту — приблизно 180 г.

Звідси можна визначити, що маса одного карбонового плеча становить близько 15 г.

Для дрона класу 7", наприклад, використовується двигун BrotherHobby Avenger 2806.5 1700KV з масою 41 г. Таким чином, повна маса одного плеча разом із встановленим двигуном дорівнює приблизно 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 - це фізична характеристика матеріалу, що визначає його здатність протидіяти пружним деформаціям.

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

де F – сила, прикладена до консолі (рис. 2.14); S – площа поперечного перерізу консолі; l – довжина консолі; Δl – модуль зміни довжина консолі.

Усі необхідні параметри вже визначені. Щодо модуля Юнга, варто нагадати значення цієї характеристики для матеріалів, що нас цікавлять (див. 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

Підсумовуючи можна сказати, що у цьому розділі проведено аналіз вібраційної поведінки окремих елементів FPV-дрона класу 7". Було показано, що під дією тяги пропелера та супутніх коливань консолей плеча зазнає вертикальних коливальних рухів, а їх амплітуда може бути визначена через метод Релея. Використання даного методу дозволяє співвіднести максимальні значення потенціальної та кінетичної енергії, що дає змогу розрахувати власну резонансну частоту конструктивного елемента.

Для практичної реалізації аналізу були приведені дані щодо маси консолі та двигуна, а також характеристики матеріалів, включаючи модуль Юнга та густину, що дозволяє коректно визначити динамічну жорсткість системи. Наведені таблиці з масами поширених двигунів та значеннями модуля пружності для різних матеріалів забезпечують основу для розрахунків та моделювання коливальних процесів у конструкції дрона.

Таким чином, представлена методика дозволяє оцінити вібраційну стійкість окремих елементів БПЛА, враховуючи їх масові та механічні параметри, а також характеристики матеріалів. Отримані результати створюють базу для подальшого впровадження системи вібромоніторингу та оптимізації конструкції дрона для уникнення резонансних явищ під час польоту.

РОЗДІЛ 3 ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ДРОНІВ ТА ФАКТОРИ, ЩО НА НЬОГО ВПЛИВАЮТЬ

3.1 Оцінка впливу зовнішніх факторів на розряд акумуляторних батарей дронів

Основні зовнішні чинники, що впливають на швидкість розряду акумуляторів дронів, включають температуру повітря, вологість, атмосферний тиск та швидкість вітру. Температура безпосередньо впливає на хімічні процеси всередині батарей, знижуючи їх ефективність у дуже низьких або високих значеннях. При низьких температурах ємність акумулятора зменшується, а можливість швидкої зарядки обмежується, що ускладнює виконання завдань у зимових умовах або під час пошуково-рятувальних операцій. Крім того, атмосферний тиск та швидкість вітру можуть значно впливати на енергоспоживання під час польоту дронів.

Оцінка цих факторів є ключовою для точного моделювання розряду батарей у реальних умовах експлуатації. Вона дозволяє коригувати маршрути та режими польоту з метою зменшення витрат енергії та подовження часу виконання завдань. Приклад адаптації маршруту польоту залежно від погодних умов наведено на рисунку 3.1.

Для систем з бездротовою зарядкою додатково слід враховувати вплив таких факторів, як пориви вітру, дощ, сніг чи туман. У таких випадках особливо актуальною є розробка точної математичної моделі для планування польотів та заряджання груп дронів, яка враховувала б вплив зовнішніх умов. Враховуючи викладене, ще одним важливим аспектом для забезпечення безперервного спостереження є оптимізація дальності польоту та кількості використовуваних дронів.

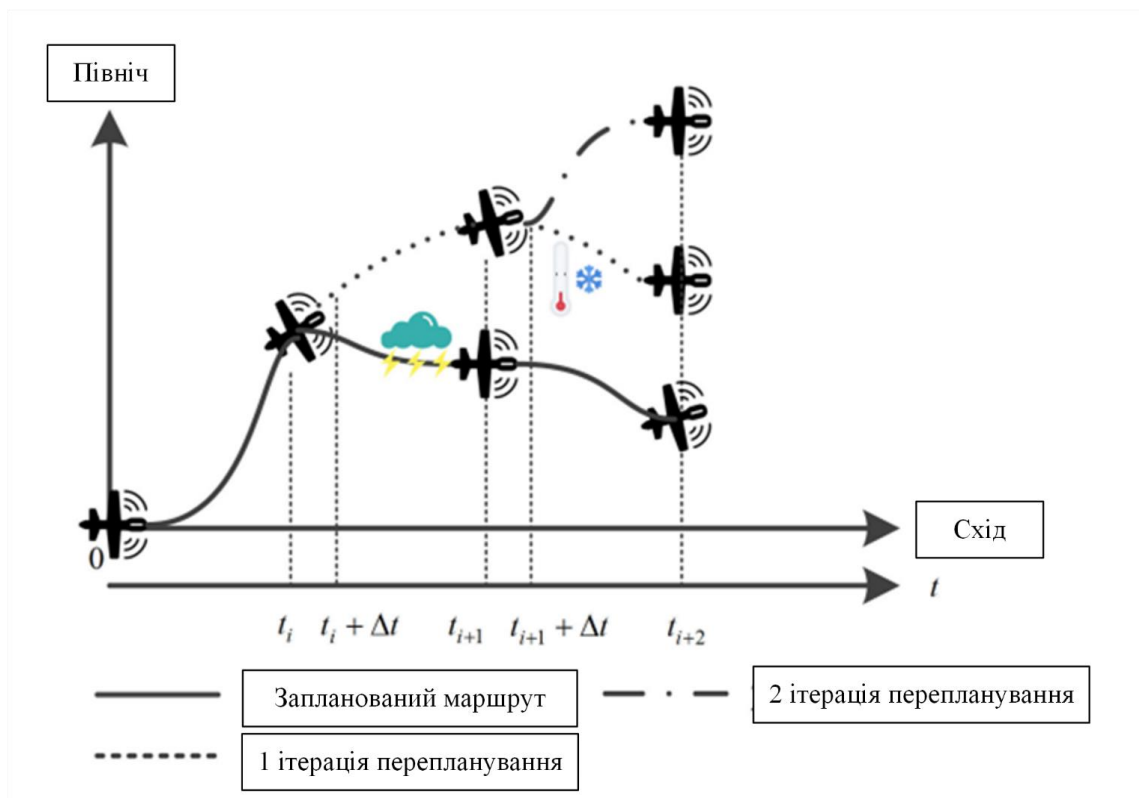


Рисунок 3.1 - Приклад перепланування маршруту польоту в залежності від погодних умов

3.2 Вплив інших факторів на енергоспоживання дрона

Енергоспоживання дронів визначається поєднанням конструкційних характеристик, умов навколишнього середовища та динаміки польоту. Кожен із цих аспектів включає низку взаємопов'язаних факторів, які суттєво впливають на витрату енергії та тривалість виконання завдань.

Навіть одна додаткова хвилина польоту підвищує цінність апарата в роботі, тому конструктори шукають різні шляхи зменшення втрат енергії та підвищення ефективності її використання.

Одним із ключових технічних підходів є зменшення маси конструкції. Для цього використовують легкі композитні матеріали, вуглецеві волокна та алюмінієві сплави. Менша вага означає менше енергоспоживання під час зльоту та стабілізації польоту, що безпосередньо впливає на тривалість роботи безпілота.

Важливу роль відіграють аеродинамічні властивості корпусу. Розробники прагнуть до мінімального опору повітря, оптимізують форму корпусу, розташування гвинтів та елементів конструкції. Навіть невеликі зміни у конфігурації можуть суттєво зменшити енергозатрати при тривалих польотах або підвищити стійкість під час сильного вітру.

Ще один напрям — раціональне керування енергоспоживанням. Для цього використовуються сучасні контролери та програмні алгоритми, які регулюють роботу двигунів, сенсорів, камер і систем зв'язку в режимі реального часу. Такі системи дозволяють уникати перевантаження акумуляторів та зменшують втрати енергії при зміні режимів польоту.

Останніми роками зростає інтерес до альтернативних джерел живлення. Крім традиційних літєвих акумуляторів, досліджується використання сонячних батарей, водневих паливних елементів та гібридних енергетичних систем. Завдяки цьому безпілотники отримують можливість виконувати польоти значно довшої тривалості, зокрема для наукових чи спостережних місій.

Також суттєвий вплив на енергоефективність має оптимізація маршруту польоту. Використання систем навігації, які враховують напрямок вітру, рельєф місцевості та висоту, дозволяє уникнути зайвих маневрів і скорочує витрати енергії. Це особливо важливо для автономних місій, коли апарат виконує завдання без постійного контролю оператора.

<p>Конструкція дрона:</p> <ul style="list-style-type: none"> – маса дрона; – кількість двигунів; – діаметр гвинтів; – розміри корпусу дрона; – маса акумуляторної батареї; – максимальна кидкість та вантажопідйомність 	<p>Умови навколишнього середовища:</p> <ul style="list-style-type: none"> – щільність повітря; – вітрові умови; – температура навколишнього середовища. 	<p>Динаміка польоту дрона:</p> <ul style="list-style-type: none"> – повітряна швидкість; – режими руху (зліт, посадка, зависання, крейсерський політ) – кут атаки – кут нахилу під час польоту – висота польоту
--	---	---

Рисунок 3.2 - Фактори, що впливають на енергоспоживання БПЛА

3.3 Визначення основних складових споживання енергії

Система електроживлення сучасних дронів забезпечує стабільну роботу різноманітного бортового обладнання, яке відповідає за ключові функції для ефективного виконання завдань. До нього належать як основні елементи — силові установки та системи автоматичного управління польотом, так і додаткові модулі, що розширюють можливості апарата, наприклад, гіростабілізовані оптико-електронні прилади, системи передачі відео та навігаційні засоби.

У зв'язку зі зростанням попиту на дрони та розширенням їх використання у цивільній, комерційній і військовій сферах, дрони оснащуються дедалі більшою кількістю додаткового обладнання. Це, своєю чергою, створює додаткове навантаження на електроживлення і безпосередньо впливає на час автономної роботи, а також на здатність апарата виконувати завдання на великій відстані або протягом тривалого часу.

У таблиці 3.1 наведено результати щодо частки електроспоживання основного обладнання поширених моделей дронів, що демонструють розподіл енергії між різними системами апарата.

Таблиця 3.1 - Частка енергоспоживання основних систем дронів

№ з/п	Назва обладнання	Частка споживання
1.	Силова установка (електродвигуни)	99,3%
2.	Система автоматичного управління польотом	0,03%
3.	Навігаційне обладнання	0,008%
4.	Модем керування та телеметрії	0,03%
5.	Система передачі відео (з підсилувачем потужності)	0,14%
6.	Система підігріву акумуляторної батареї	0,28%
7.	Гіростабілізована оптико-електронна система	0,17%

Аналіз показав, що найбільша частка енергоспоживання дрона припадає на силову установку – 99,3% від загальної витрати електроенергії. Це цілком логічно, адже саме електродвигуни забезпечують рух апарата та підтримку його у повітрі. Інші системи, такі як підігрів акумулятора (0,28%) та гіростабілізована оптико-електронна система (0,17%), впливають на енергоспоживання значно менше, однак їх робота є критичною для точності виконання завдань, стабільності польоту та передачі даних.

Висока питома вага споживання силової установки підкреслює важливість оптимізації аеродинамічних характеристик, конфігурації пропелерів та загальної маси дрона. Використання легких матеріалів, таких як карбон або алюмінієві сплави, дозволяє зменшити енергетичні витрати під час зльоту та стабілізації польоту, що безпосередньо впливає на тривалість автономної роботи.

Крім того, застосування сучасних контролерів і алгоритмів управління енергоспоживанням дозволяє регулювати роботу двигунів та бортових систем у режимі реального часу, запобігаючи перевантаженню акумуляторів та оптимізуючи витрати електроенергії. Такий підхід разом із плануванням маршруту польоту з урахуванням погодних умов і рельєфу місцевості сприяє максимальному подовженню часу виконання завдань безпілотником.

РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА ОЦІНКИ ТА ВИБОРУ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

4.1 Методики порівняння та вибору технологій акумуляторних батарей

Науковці у всьому світі приділяють значну увагу питанням розробки моделей та вибору оптимальних технологій акумуляторних батарей, які використовуються як накопичувачі енергії в системах електроживлення для різних сфер застосування. Серед широкого кола досліджень варто відзначити кілька ключових напрямів та отримані результати.

Однією з найбільших сфер застосування акумуляторних батарей сьогодні є електромобілі. В ряді досліджень пропонуються методики оцінки батарей, що враховують їх технічні характеристики, параметри виробників та специфіку експлуатації у транспортних засобах. Інші роботи аналізують критерії вибору акумуляторів, проводячи порівняльний техніко-економічний аналіз різних технологій та визначаючи найбільш придатні для сучасних електромобілів рішення. Водночас у деяких роботах досліджуються перспективні технології, які можуть замінити існуючі літій-іонні батареї, наприклад, твердотілі та кремнієві акумулятори. Крім того, окремі дослідження концентруються на хімічному складі батарей і питаннях моніторингу та керування процесами їх зарядки і розрядки, що забезпечує безпечну та ефективну експлуатацію електромобілів.

Ще однією важливою сферою застосування акумуляторних батарей як джерела енергії для основного рушія є водний транспорт. У ряді досліджень порівнюються різні типи батарей за їх хімічними властивостями, ємністю, розмірами, вагою, енергетичною щільністю, вартістю та тривалістю життєвого циклу, що дозволяє визначити оптимальні рішення для гібридних рушіїв суден. Результати таких порівнянь показують, що для водного транспорту найбільш придатними є літій-залізо-фосфатні батареї, які забезпечують баланс між ефективністю, надійністю та економічністю.

Також значним напрямом використання акумуляторів є системи зберігання енергії в складі електричних мереж, зокрема мікро- та нано-мереж. У цих випадках пропонуються багатокритеріальні підходи для оцінки технологій батарей, включаючи використання нечіткої логіки для комплексного аналізу їх ефективності у складі мереж, що включають вітрогенератори, сонячні панелі та акумулятори. За результатами таких оцінок, для мікро-мереж найбільш доцільним вибором є літій-іонні батареї, які поєднують надійність та високу ефективність. Інші дослідження зосереджуються на виборі батарей з точки зору мінімізації загальної вартості системи, що дозволяє оптимізувати економічну складову при впровадженні акумуляторних накопичувачів у мережеві структури.

У багатьох дослідженнях розглядаються існуючі та новітні технології акумуляторних батарей для великомасштабних систем накопичення енергії, які можуть виступати альтернативою гідроакумулятивним електростанціям. За результатами таких оглядів, для цього типу застосувань найбільш придатними вважаються натрієві та літій-іонні батареї, тоді як нові перспективні технології з високою енергетичною щільністю поки що не готові до практичного використання.

Дослідження гібридних систем електрифікації віддалених територій показують, що для мікромереж сільських місцевостей оптимальним вибором є літій-іонні акумуляторні батареї, оскільки вони забезпечують надійне резервне живлення. Моделювання ефективності інтегрованих у мережу систем зберігання енергії дозволяє визначити оптимальні рішення для різних типів батарей, що допомагає підвищити загальну продуктивність та надійність систем.

Імітаційні моделі та техніко-економічні оцінки, проведені для фотоелектричних систем із підключенням до мережі, демонструють, що літій-іонні акумулятори забезпечують нижчу вартість виробленої електроенергії у порівнянні зі свинцево-кислотними. Водночас, оцінка систем з урахуванням тарифів на електроенергію та часу використання показує, що жодна з батарей не є повністю економічно вигідною в усіх умовах, проте літій-іонні рішення мають явну перевагу з точки зору ефективності та вартості.

Проведений аналіз показує, що питання вибору та оцінки акумуляторних батарей вже досліджене для таких сфер, як електромобілі, водні транспортні засоби, системи накопичення електроенергії та мікро-мережі. У наукових роботах запропоновано різні підходи до оцінки батарей, зокрема методи, що базуються на нейронних мережах, нечіткій логіці, багатокритеріальних моделях прийняття рішень та техніко-економічному аналізі. Ці дослідження дозволяють сформулювати комплексне уявлення про критерії відбору батарей і створюють основу для подальших розробок у сфері інтеграції накопичувачів енергії, включаючи застосування у відновлюваній енергетиці, підкреслюючи важливість врахування як технічних, так і економічних аспектів при плануванні автономних енергетичних систем.

Водночас огляд літератури демонструє, що хоча методики оцінки батарей розробляються активно, певні аспекти залишаються недостатньо вивченими. У ряді робіт основними критеріями вибору виступають ціна, маса та об'єм батареї, проте вони не враховують таких важливих факторів, як безпека використання та вартість експлуатації. Деякі дослідження фокусуються на вартості придбання батареї та кількості циклів до її виходу з ладу, але не охоплюють інші критичні параметри системи. Найбільш комплексний підхід передбачає врахування технологічних, економічних та соціальних критеріїв, проте більшість таких моделей застосовуються або для підключених до мережі систем, або для автономних транспортних засобів.

Отже, на сьогодні ще не існує повністю комплексної методики вибору акумуляторних батарей для автономних систем на базі дронів, які мають специфічні вимоги та особливості експлуатації. Додатково, для повноцінної оцінки батарей у таких системах необхідно враховувати фактори безпеки, вартість експлуатації, ефективність з точки зору енергозбереження та вплив на навколишнє середовище, що дозволить створити більш точну та надійну методику для систем безперервного спостереження.

4.2 Вдосконалена методика вибору технологій акумуляторних батарей

Спираючись на раніше розглянуті методики відбору акумуляторних батарей, у роботі запропоновано удосконалену процедуру оцінки та вибору технологій батарей для використання в автономних системах спостереження на основі дронів. Методика включає два основні етапи.

На першому етапі, який можна назвати попереднім відбором, відсіюються ті технології акумуляторів, що не відповідають ключовим вимогам системи і, відповідно, не придатні для її використання. На другому етапі проводиться детальне порівняння всіх технологій, які пройшли попередній відбір, тобто тих, що можуть ефективно інтегруватися у систему.

I етап – попередній відбір

Автономні системи спостереження на базі дронів мають критичні обмеження щодо забезпечення мобільності, зокрема максимальні допустимі масу та об'єм акумуляторної батареї. Для оцінки впливу цих обмежень на вибір технології батареї пропонується використовувати два основні критерії: мінімальне значення об'ємної щільності енергії (E_{d_min} , Вт·год/л) та мінімальне значення питомої густини енергії (S_{e_min} , Вт·год/кг). Розрахунок базується на використанні максимальних допустимих значень ваги (m_{max} , кг) та об'єму (v_{max} , л) для системи за формулами (4.1) та (4.2):

$$S_{e_min} = \frac{E}{m_{max}}, \quad (4.1)$$

$$E_{d_min} = \frac{E}{v_{max}}, \quad (4.2)$$

де E – загальна необхідна енергія для роботи системи впродовж визначеного проміжку часу, Вт·год.

II етап - багатокритеріальний відбір.

Після відсівання технологій акумуляторних батарей, що не відповідають базовим вимогам до системи, проводиться порівняння тих варіантів, які залишилися. Для цього застосовано методику багатокритеріального аналізу, побудовану на визначенні вектора вагових коефіцієнтів за основним методом Сааті. Проте такий підхід не дає можливості згрупувати критерії для оцінки їхнього окремого впливу на систему безперервного спостереження. З урахуванням цього критерії були розподілені, а для кожного типу батареї введено відповідний індекс за формулою:

$$I_{bat} = E_i + T_i + P_i, \quad (4.3)$$

де E_i – експлуатаційний індекс; T_i – технічний індекс; P_i – економічний індекс; I_{bat} – загальний індекс технології акумуляторної батареї.

Кожен із трьох індексів відображає відповідний критерій, значення якого дорівнює сумі добутків вагових коефіцієнтів (w_i) та величин цих критеріїв. Параметри критеріїв визначаються залежно від їхнього впливу на роботу системи безперервного спостереження.

Щоб уможливити коректне зіставлення показників, що виражені в різних одиницях виміру, усі значення індексів нормалізуються до інтервалу від 0 до 1; нормалізоване значення кожного критерію обчислюється за формулою:

$$N_i = \frac{(i_n - i_{min})}{(i_{max} - i_{min})} \quad (4.4)$$

де i_n – значення показника; i_{min} – мінімальне значення показника; i_{max} – максимальне значення показника.

Експлуатаційний індекс E_i характеризує властивості батареї, що змінюються залежно від умов роботи автономних систем спостереження. Він охоплює такі показники:

– діапазон робочих температур T_r – враховує здатність системи безперервного спостереження стабільно функціонувати як у зимовий, так і в літній період за різних кліматичних умов;

– показник безпечності S_s – відображає ймовірність виникнення аварійних ситуацій, пов’язаних із ризиком займання, задимлення або вибуху батареї;

– показник саморозряду η – враховує зміни стану батареї під час тривалого простою, що можуть спричинити втрату ємності внаслідок внутрішніх або поверхневих процесів саморозряду.

Експлуатаційний індекс визначається за такою формулою:

$$E_i = T_r \cdot w_{tr} + S_s \cdot w_{ss} + \eta \cdot w_{\eta}. \quad (4.5)$$

Для оцінювання діапазону робочих температур пропонується використовувати різницю між максимально допустимою T_{max} та мінімальною експлуатаційною температурою. Це значення визначається за формулою:

$$T_r = T_{max} - T_{min} \quad (4.6)$$

Показник безпечності S_s є комплексним показником, базуючись на аналізі публікацій, спрямованих на тему безпечності акумуляторних батарей. У складі цього показника пропонується врахувати максимальний час безпечного заряджання, максимальну швидкість розрядки T_{sd} , максимальну потужність заряджання P_{mc} . Показник безпечності пропонується розраховувати за формулою:

$$S_s = T_s + T_{sd} + P_{mc}. \quad (4.7)$$

Для визначення показника саморозряду η пропонується використовувати метод визначення необоротних та оборотних втрат ємності батареї, запропонований:

$$\eta = \frac{(C - C_1)}{C} \cdot 100\%, \quad (4.8)$$

де C – номінальна ємність батареї, Вт·год; C_1 – ємність розряду, Вт·год.

Розрахунок експлуатаційного індексу дозволяє отримати дані щодо стійкості батареї до змінних зовнішніх умов експлуатації, технічної досконалості, а також безпечності експлуатації в заданих умовах.

В системі безперервного спостереження експлуатаційний індекс має одне з найважливіших значень, оскільки визначає можливість безперервного використання системи протягом тривалого часу без погіршення її експлуатаційних характеристик та технічних відмов.

Технічний індекс T_i відповідає за фактори які впливають на технічні характеристики (специфікацію) системи безперервного спостереження, він враховує показники:

– питома густина енергії S_e , який відповідає за кількість накопиченої у батареї енергії на одиницю ваги батареї;

– об'ємна щільність енергії E_d , який відповідає за кількість накопиченої в батареї енергії на її об'єм;

– показник життєвого циклу L , який відповідає за максимальну тривалість безперервного використання батареї (цикли “заряд”-”розряд”) в роках.

– показник стабільності номінальної ємності при зміні температури навколишнього середовища S_t .

Технічний індекс розраховується за наступною запропонованою формулою:

$$T_i = S_e \cdot w_{se} + E_d \cdot w_{ed} + L \cdot w_l + S_t \cdot w_{st}. \quad (4.9)$$

Показник питомої енергії та щільності енергії розраховуються за формулами:

$$S_e = \frac{E}{m} \quad (4.10)$$

де E – кількість накопиченої енергії, Вт·год; m – вага батареї, кг.

$$E_d = \frac{E}{v} \quad (4.11)$$

де v – об'єм батареї, м³.

Показник життєвого циклу L розраховується за формулою (2.12), і залежить від часу заряджання C_r , розряджання D_r та гарантійної кількості робочих циклів батареї C_l .

$$L = (C_r + D_r) \cdot C_l \quad (4.12)$$

Показник стабільності номінальної ємності за умов зміни температури навколишнього середовища визначається у вигляді температурного коефіцієнта ємності акумуляторної батареї, який обчислюється за такою формулою:

$$S_t = \Delta C / (C_0 \cdot \Delta T) \cdot 100\%, \quad (4.13)$$

$$\Delta C = C_0 - C_1, \quad (4.14)$$

$$\Delta T = T_0 - T_1, \quad (4.15)$$

де C_0, C_1 – ємність при T_0 та T_1 , Вт·год, T_0, T_1 – поточна (мінімальна) та еталонна температура навколишнього середовища, °С.

Розрахування технічного індексу дає змогу, зокрема, отримати об'єктивні дані щодо майбутніх габаритів системи безперервного спостереження та тривалості її роботи в заданих умовах. У межах нашої системи цей індекс може мати вищий пріоритет порівняно з іншими, оскільки мобільність і тривалість автономної роботи є ключовими вимогами.

Економічний індекс відображає вплив вартості акумуляторної батареї на загальний бюджет створення системи та, відповідно, на можливість реалізації обраної концепції. Він ураховує такі показники:

– вартість батареї C_b , що безпосередньо формує загальну вартість системи, оскільки значна частина витрат може припадати саме на акумулятор;

– вартість обслуговування батареї C_s , яка опосередковано впливає на рівень автономності системи безперервного спостереження.

Економічний індекс визначається за такою формулою:

$$P_i = C_b \cdot w_{cb} + C_s \cdot w_{cs} \quad (4.16)$$

Інформація про вартість батареї зазвичай надається виробником, проте дані щодо вартості її обслуговування відсутні, тому цей показник визначається окремо. Він значною мірою залежить від місця розташування системи безперервного спостереження, якості збирання акумуляторного модуля, можливості заміни окремих компонентів у разі їхнього виходу з ладу та інших експлуатаційних факторів.

Таким чином, цей етап дає змогу виконати багатокритеріальне порівняння можливих технологій акумуляторних батарей на основі розподілених критеріїв, що дозволяють оцінити внесок кожного показника у функціонування системи.

Запропонована методика охоплює всі ключові техніко-економічні параметри акумуляторних батарей, включаючи їхню стійкість до змін зовнішніх умов, технічні характеристики, рівень безпеки, а також дає змогу оцінити орієнтовні габарити майбутньої системи безперервного спостереження. Додатково враховується тривалість життєвого циклу, що дозволяє прогнозувати час автономної роботи системи, а також вартість батареї та її експлуатаційних витрат. Такий підхід є ефективним інструментом для порівняльного аналізу різних типів акумуляторних батарей.

4.3 Тестування запропонованої методики вибору акумуляторних батарей

Попередній відбір.

Згідно з початковим етапом процедури вибору здійснюється попередній добір технологій акумуляторних батарей, придатних для використання на базі безпілотних літальних апаратів. Конструкція проєктованої системи не допускає перевищення маси акумуляторного блока понад 300 кг та об'єму більш ніж 0,12 м³. Крім того, за результатами попередніх розрахунків визначено, що для забезпечення роботи автономної системи безперервного спостереження необхідний енергетичний запас становить 25 687,3 Вт/год. Таким чином, отримано значення S_{e_min} та E_{d_min} :

$$S_{e_min} \approx 85,5 \text{ (Вт} \cdot \text{ год/кг)}, \quad (4.17)$$

$$E_{d_min} \approx 214 \text{ (Вт} \cdot \text{ год/л)}. \quad (4.18)$$

На початковому етапі методики, спираючись на дані баз технологій акумуляторних батарей, були відсіяні ті варіанти батарей (виділені червоним), які не відповідали ключовим критеріям для забезпечення найбільшої енергоефективності живлення. Результати представлені на рисунках 4.1 та 4.2 відповідно.

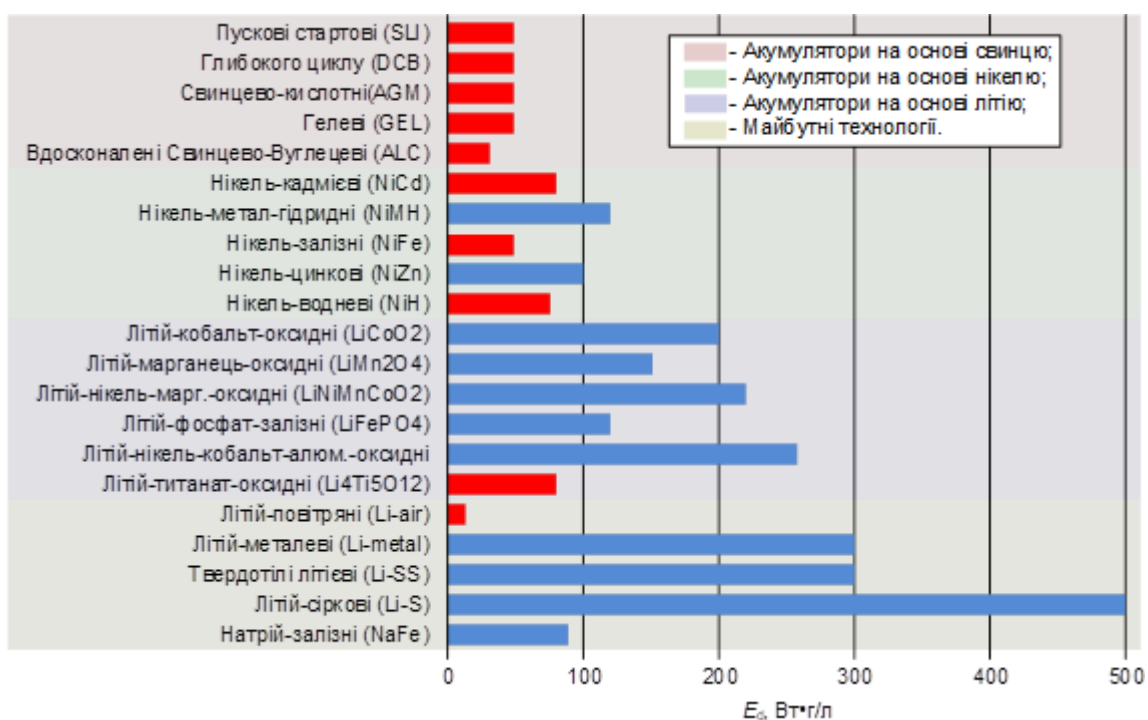


Рисунок 4.1 - Значення об'ємної щільності енергії (Вт· год/л)

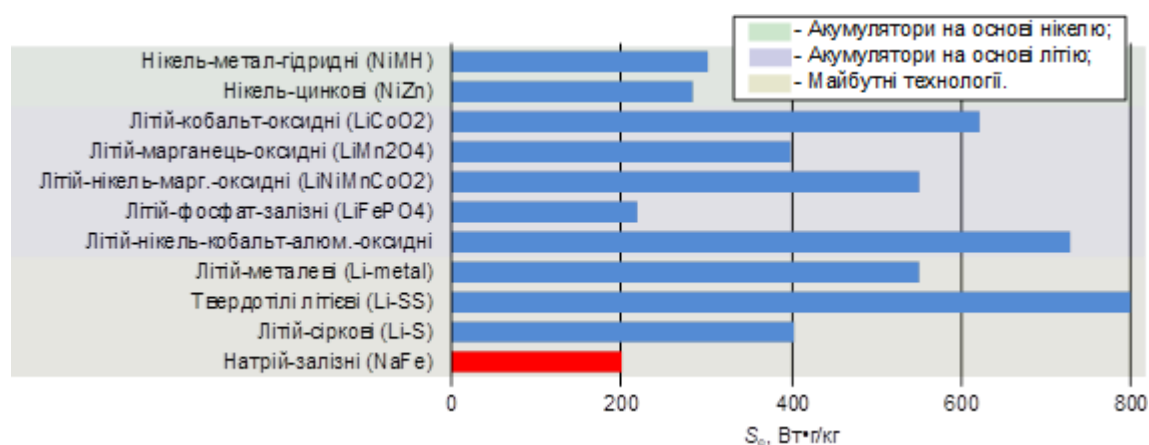


Рисунок 4.2 - Значення питомої густини енергії (Вт· год/л)

Значення енергетичної щільності та питомої ваги енергії наведені приблизно і можуть змінюватися залежно від хімічного складу, технології виготовлення та інших умов. Результати попереднього відбору, згруповані за типами технологій, наведені в таблиці 2.1. Вони демонструють, що літєві акумуляторні батареї здебільшого відповідають мінімальним технічним вимогам і придатні для використання, тоді як свинцеві батареї виявилися непридатними для найбільшої енергоефективності.

Таблиця 4.1 Результати попереднього відбору

Нікелеві	Літієві	Свинцеві	Майбутні
NiMH	LiCoO ₂	-	Li-metal
NiZn	LiMn ₂ O ₄	-	Li-S
-	LiNiMnCoO ₂	-	Li-SS
-	LiFePO ₄	-	-
-	LiNiCoAlO ₂ (NCA)	-	-

Застосування багатокритеріального відбору

Оскільки для деяких перспективних технологій акумуляторних батарей, зокрема літій-металевих та натрій-іонних, наразі відсутні достовірні дані щодо їхніх параметрів і характеристик у відкритих джерелах, ці технології були виключені з подальшого порівняння. З появою нових відомостей методику слід буде застосувати повторно, що в майбутньому може призвести до перегляду найбільш придатної технології для даної сфери використання.

Для визначення вагових коефіцієнтів у методиці використовувався метод експертних оцінок, результати якого представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Вагові коефіцієнти показників

E_i		T_i		P_i	
w_{tr}	0,03	w_{se}	0,32	w_{sb}	0,1
w_{ss}	0,23	w_{ed}	0,09	w_{cs}	0,02
w_{η}	0,04	w_l	0,06	-	-
-	-	w_{st}	0,11	-	-

Пріоритет було надано показнику питомої енергії з коефіцієнтом 0,32 та показнику безпеки з коефіцієнтом 0,23, що дозволяє забезпечити основні вимоги до системи при мінімальній вазі та максимальній безпеці. Розподіл значень показників за технологіями акумуляторних батарей наведено в таблиці 4.3.

За допомогою розробленої методики оцінки та на основі результатів моделювання визначаються сумарні значення індексів. Чим вище сума індексів, тим більш придатною є технологія для надання найкращої енергоефективності з урахуванням розподілу вагових коефіцієнтів оцінюваних показників.

Як показано на рисунку 4.3, нікель-метал-гідридні батареї (NiMH) демонструють найвищий експлуатаційний індекс, де вирішальним є показник безпеки. Літій-кобальт-оксидні (LiCoO₂), літій-марганцеві (LiMn₂O₄), літій-нікель-марганцево-оксидні (LiNiMnCoO₂) та літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні (NCA) батареї за експлуатаційним індексом показали нижчі результати. Дані щодо безпеки NiMH акумуляторів підтверджують їх стабільність та високу стійкість до неконтрольованого теплового розповсюдження та загоряння порівняно з іншими технологіями.

Таблиця 4.3 Диференційний розподіл значень показників

Параметр	NiMH	NiZn	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiNiMnCoO ₂	LiFePO ₄	NCA
$T_r, ^\circ\text{C}$	65	70	80	80	80	95	80
$T_r, \text{p.u.}$	0	0,167	0,5	0,5	0,5	1	0,5
$T_r \cdot w_{tr}$	0	0,005	0,015	0,015	0,015	0,03	0,015
S_s (коефіцієнт)	18	9	9	9	9	16	9
$S_s, \text{p.u.}$	1	0	0	0	0	0,778	0
$S_s \cdot w_{ss}$	0,23	0	0	0	0	0,179	0
η (% на місяць)	15	30	2	2	2	2	2
$\eta, \text{p.u.}$	0,464	1	0	0	0	0	0
$\eta \cdot w_\eta$	0,019	0,04	0	0	0	0	0
E_i	0,249	0,045	0,015	0,015	0,015	0,209	0,015
$S_e, \text{Вт}\cdot\text{г/кг}$	120	150	200	150	220	120	220
$S_e, \text{p.u.}$	0	0,3	0,8	0,3	1	0	1

$S_e \cdot w_{se}$	0	0,096	0,256	0,096	0,32	0	0,32
$E_d, \text{ВТ} \cdot \text{г/л}$	300	250	620	400	550	220	730
$E_d, \text{р.у.}$	0,157	0,059	0,784	0,353	0,647	0	1
$E_d \cdot w_{ed}$	0,014	0,005	0,071	0,032	0,058	0	0,09
$L, \text{днів}$	500	300	1000	700	2000	2000	500
$L, \text{р.у.}$	0,118	0	0,412	0,235	1	1	0,118
$L \cdot w_L$	0,007	0	0,025	0,014	0,06	0,06	0,007
$S_t, \text{коєф.}$	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
$S_t, \text{р.у.}$	0	0,5	1	0,5	1	0,5	1
$S_t \cdot w_{st}$	0	0,055	0,11	0,055	0,11	0,055	0,11
T_i	0,021	0,156	0,461	0,197	0,548	0,115	0,527
$C_b, \text{у.о.} \cdot \text{кВт} \cdot \text{г}$	300	400	600	500	700	500	800
$C_b, \text{р.у.}$	0	0,2	0,6	0,4	0,8	0,4	1
$C_b \cdot w_{cb}$	0	0,02	0,06	0,04	0,08	0,04	0,1
$C_s, \text{у.о.} \cdot \text{кВт} \cdot \text{г}$	150	200	300	250	350	250	400
$C_s, \text{р.у.}$	0	0,2	0,6	0,4	0,8	0,4	1
$C_s \cdot w_{cs}$	0	0,004	0,012	0,008	0,016	0,008	0,02
P_i	0	0,024	0,072	0,048	0,096	0,048	0,12
I_{bat}	0,27	0,225	0,548	0,26	0,659	0,372	0,662

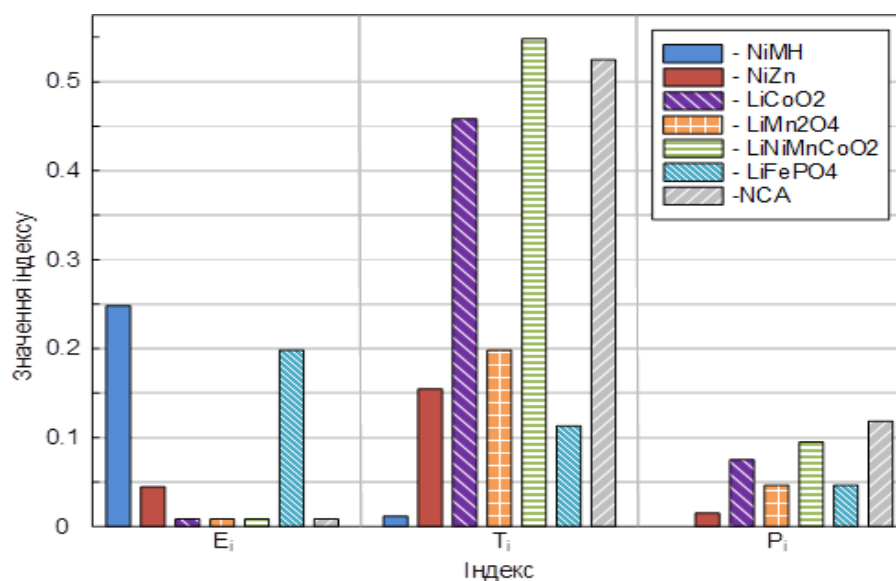


Рисунок 4.3 - Результати розрахунку індексів технологій батареї

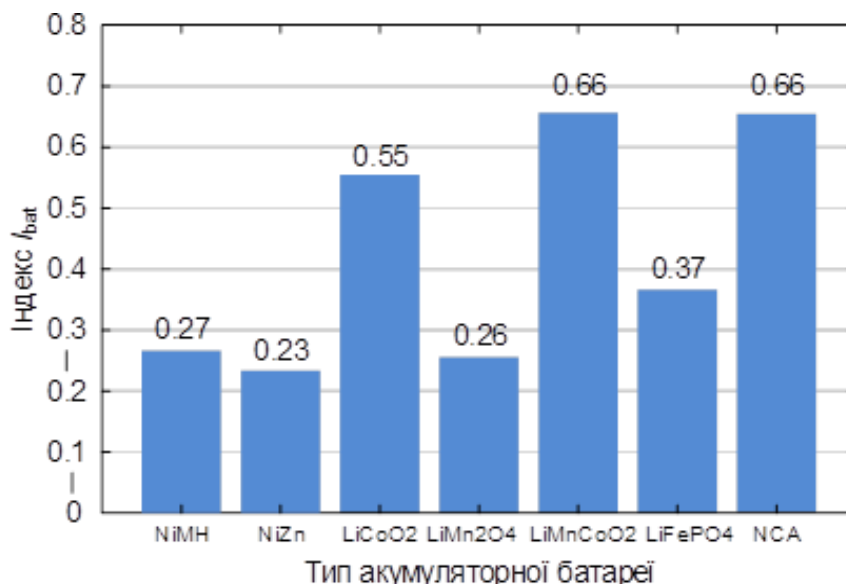


Рисунок 4.4 - Результати значень розрахунку загального індексу технологій акумуляторної батареї I_{bat}

Згідно з даними, представленими на рисунку 4.3, літій-нікель-марганцево-оксидні (LiNiMnCoO_2) та літій-нікель-кобальт-алюміній-оксидні (NCA) акумуляторні батареї демонструють найбільшу відповідність для нашого застосування з точки зору технічного індексу, який визначається питомою енергією. Літій-фосфат-залізни (LiFePO_4) та нікель-метал-гідридні (NiMH) батареї мають найнижчі показники питомої енергії, що безпосередньо впливає на масу акумуляторів — один із ключових критеріїв при виборі технології для автономної системи.

Як видно на рисунку 4.3, NCA та LiNiMnCoO_2 батареї також демонструють найвищий економічний індекс, на який найбільший вплив має вартість батареї. Найнижчу оцінку за ціною та, відповідно, найбільшу вартість мають NiMH акумулятори.

Результати розрахунків, представлені на рисунку 4.4, свідчать, що максимальний загальний індекс (сума окремих індексів) досягають LiNiMnCoO_2 та NCA батареї, що підтверджує їхню перевагу для даної сфери застосування.

ВИСНОВКИ

У роботі було проведено комплексне дослідження сучасних безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з акцентом на методах підвищення енергоефективності їхнього польоту. На основі отриманих результатів можна зробити такі узагальнені висновки.

У першому розділі розглянуто загальні відомості про БПЛА, їх призначення та сфери застосування. Було проаналізовано основні типи безпілотників, що дозволило сформулювати цілісне розуміння їх класифікаційних ознак та функціональних можливостей. Такий аналіз показав, що вимоги до енергоефективності суттєво різняться залежно від класу апарата та типу його місії.

Другий розділ був присвячений дослідженню тенденцій розвитку ринку БПЛА, а також особливостям конструкції дронів та FPV-апаратів. Детальний розгляд конструктивних елементів, зокрема рами, силових установок, електроніки та модулів управління, дав змогу встановити, які компоненти формують найбільший внесок у споживання енергії. Додаткову увагу приділено аналізу вібраційної стійкості, оскільки коливання конструкції негативно впливають як на аеродинамічну ефективність, так і на роботу електронних модулів, що опосередковано збільшує витрати енергії під час польоту.

У третьому розділі проведено детальну оцінку факторів, що впливають на процес розрядження акумуляторних батарей та загальне енергоспоживання дрона. Було визначено, що найбільший вплив мають зовнішні фактори (температура, вологість, атмосферний тиск, швидкість вітру), а також конструктивні особливості апарата та профіль польотної місії. Окремо проаналізовано основні складові енергоспоживання — силові установки, системи стабілізації, модулі передачі даних та додаткові навігаційні системи. Дослідження продемонструвало, що оптимізація режимів роботи двигунів, зменшення маси й аеродинамічного опору, а також грамотний вибір акумуляторних систем є ключовими чинниками підвищення ефективності.

У четвертому розділі здійснено узагальнений аналіз ефективності різних технічних рішень та методів оптимізації. Особливу увагу приділено оцінці енергетичних показників різних типів акумуляторних батарей, що дозволило визначити найбільш перспективні для використання у БПЛА з урахуванням їх енергетичної щільності, маси, ресурсу циклів та стабільності роботи в різних умовах. Отримані результати підтвердили доцільність застосування сучасних літєвих хімії, які забезпечують кращий баланс між енергоємністю, масою та довговічністю.

Загалом проведене дослідження дозволило сформулювати комплексне бачення того, які фактори визначають енергоефективність польоту БПЛА та якими методами її можна підвищити. Отримані результати можуть бути використані як при проєктуванні нових дронів, так і для практичної оптимізації існуючих платформ. Робота створює основу для подальших досліджень у напрямі підвищення автономності польоту та впровадження більш ефективних систем енергозабезпечення в безпілотних літальних апаратах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Statista. Estimated global production volume for unmanned aerial systems (drones), 2013–2022 [Електронний ресурс] / Statista. – Режим доступу: <https://www.statista.com/statistics/428911/global-production-volume-forecast-for-unmanned-aerial-ystems-or-drones/>
2. OscarLiang. OscarLiang.com – FPV & Drone Tech Blog [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://oscarliang.com/>
3. Flymod. BrotherHobby Avenger 2806.5 – опис та характеристики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://flymod.net/item/brotherhobby_avenger_28065
4. Чепис, О. В. Енергоефективність в безпілотних літальних апаратах [Електронний ресурс] / О. В. Чепис. — Режим доступу: <http://www.konferenciaonline.org.ua/ru/article/id-1927/>
5. Medikovski M. O., Shunevich O. V. Research on the effectiveness of methods for assessing the importance coefficients // VISNIK. — 2011. — С. 201–176.
6. BU-214: Summary Table of Lead-based Batteries [Електронний ресурс]. Battery University. — Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-214-summary-table-of-lead-based-batteries>
7. BU-215: Summary Table of Nickel-based Batteries [Електронний ресурс]. Battery University. — Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries>
8. U-216: Summary Table of Lithium-based Batteries [Електронний ресурс]. Battery University. — Режим доступу: <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>

9. Adedeji B. P. A novel method for estimating parameters of battery electric vehicles // *Intelligent Systems with Applications*. – 2022. – Vol. 15. – Article 200089. – ISSN 2667-3053. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200089>
10. Zhao G., Wang X., Negnevitsky M. Connecting battery technologies for electric vehicles from battery materials to management // *iScience*. – 2022. – Vol. 25, Issue 2. – Article 103744. – ISSN 2589-0042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103744>
11. Zhang S., Li Y., Dong Q. Autonomous navigation of UAV in multi-obstacle environments based on a Deep Reinforcement Learning approach // *Applied Soft Computing*. — 2022. — Vol. 115. — Article 108194. — ISSN 1568-4946.
12. Maini P., Yu K., Sujit P. B., Tokekar P. Persistent monitoring with refueling on a terrain using a team of aerial and ground robots // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). — 2018. — P. 8493–8498. — DOI: 10.1109/IROS.2018.8593508.
13. Лось А. М. Автономні системи електроживлення комплексів безперервного спостереження на базі безпілотних літальних апаратів : кваліфікаційна робота [Електронний ресурс] / А. М. Лось. — Київ : Міністерство освіти і науки України, 2025. — Режим доступу: <https://ir.stu.cn.ua/server/api/core/bitstreams/722ed88c-ab9b-47ac-8b21-8b5e3ec95d35/content>
14. Сілізуєв Р. А. Метод підвищення ефективності режимів роботи FPV-дронів [Електронний ресурс] / Р. А. Сілізуєв. — 2024. — Режим доступу: <https://elar.khmnu.edu.ua/items/a1b1bc65-af7f-4c14-af05-d6ba66f11f0d>
15. Кравчук А. Р., Ткачук А. Г., Добржанський О. О., Богоявленська Ю. В., Ткачук Д. Ю. Аналіз методів автономної навігації БПЛА в умовах відсутності GPS-сигналу // *Технічна інженерія*. — 2025. — № 1(95). — С. 235–242. — DOI: 10.26642/ten-2025-1(95)-235-242.