



**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
ДЛЯ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ
З ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ
БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ
ДЛЯ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА**



Посібник підготовлений за підтримки Уряду США,
наданої через Програму з аграрного і сільського розвитку (АГРО),
яка реалізується компанією «Chemonics Int»



МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ З ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

ПРИЗНАЧЕННЯ: сприяти розвитку професії оператора безпілотних літальних апаратів в агропромисловому виробництві через упровадження освітніх програм у закладах вищої освіти України з метою підсилення послуг агроскаутингу.

Київ
2026



УДК 378.6:[631:629.73](477)
М54

Автори:

М. Биков, А. Данкевич, В. Коваленко, В. Оверченко, М. Косолап,
П. Горячев, О. Приходько, Н. Пенюк

Розробник:

Микола Биков, короткостроковий консультант
Програми з аграрного і сільського розвитку (АГРО)

Координатор:

Олександр Приходько, менеджер із розвитку аграрних ринків
Програми з аграрного і сільського розвитку (АГРО)
*Програма АГРО зареєстрована
в Кабінеті Міністрів України за № 72012120СА00001.*

М54 **Методичні рекомендації для закладів вищої освіти з підготовки операторів безпілотних літальних апаратів для агропромислового виробництва: Програма з аграрного і сільського розвитку (АГРО) / М. Биков, А. Данкевич, В. Коваленко, В. Оверченко, М. Косолап, П. Горячев, О. Приходько, Н. Пенюк. — Київ : Нац. ун. біоресурсів і природокористування України, 2026. — 140 с. , іл.**

ISBN 978-617-8798-60-4

«Методичні рекомендації для закладів вищої освіти з підготовки операторів безпілотних літальних апаратів для агропромислового виробництва» є комплексним навчально-практичним виданням, спрямованим на формування професійних компетенцій операторів БПЛА для потреб агросектору України. У матеріалі системно розкрито роль безпілотних літальних апаратів у точному землеробстві, наведено їхню класифікацію, основи аеродинаміки та фізики польоту, принципи налаштування та калібрування, особливості використання програмного забезпечення, програмної діагностики й економічної доцільності впровадження БПЛА в агровиробництві.

Цей посібник став можливим завдяки щедрій підтримці уряду Сполучених Штатів. Зміст є відповідальністю авторів і не обов'язково відображає позицію уряду Сполучених Штатів. Докладніше про Програму з аграрного сільського розвитку (АГРО): <https://www.facebook.com/usaid.agro>. Програма впроваджується компанією «Chemonics International».

Видання поєднує теоретичні положення з практичними алгоритмами, чек-листами та прикладами реального застосування БПЛА для агроскаутингу, моніторингу посівів, обприскування, картографування та аналізу даних. Методичні рекомендації адресовані закладам вищої освіти, викладачам, студентам, а також фахівцям аграрної галузі й операторам БПЛА, які зацікавлені у впровадженні цифрових технологій та підвищенні ефективності сучасного агропромислового виробництва.

Класифікація JEL: № 250942

УДК 378.6:[631:629.73](477)

© Биков М., Данкевич А., Коваленко В., Оверченко В.,
Косолап М., Горячев П., Приходько О., Пенюк Н., 2026
© Національний університет біоресурсів
і природокористування України, 2026

ISBN 978-617-8798-60-4

ЗМІСТ

КОРОТКИЙ ЗМІСТ КОЖНОГО РОЗДІЛУ	4
ПЕРЕДМОВА	6
ВСТУП	8
АВТОРИ	9
РОЗДІЛ 1. Упровадження дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів у точному землеробстві	11
РОЗДІЛ 2. Класифікація дистанційно керованих безпілотних апаратів	27
РОЗДІЛ 3. Основи аеродинаміки та фізики польоту безпілотних літальних апаратів	48
РОЗДІЛ 4. Налаштування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів	60
РОЗДІЛ 5. Програмне забезпечення для планування та управління дистанційно керованими безпілотними апаратами	100
РОЗДІЛ 6. Програмна діагностика та підготовка програмного забезпечення до польотів сільськогосподарських БПЛА	112
РОЗДІЛ 7. Економічна ефективність упровадження дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів та цифрових інструментів у практику агровиробництва	121



КОРОТКИЙ ЗМІСТ КОЖНОГО РОЗДІЛУ

1. Упровадження дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів у точному землеробстві.

Розділ розкриває роль БПЛА у формуванні систем точного землеробства, які базуються на просторовому аналізі даних і диференційованому управлінні агротехнологіями. Описує принципи використання дронів для агромоніторингу, картографування, внесення добрив, обприскування, посіву та аналізу стану посівів за допомогою мультиспектральних знімків. Матеріал висвітлює технічні типи БПЛА, їхнє застосування, економічні переваги, а також обмеження та ризики експлуатації.

2. Класифікація дистанційно керованих безпілотних апаратів.

Матеріал описує систематизацію БПЛА за призначенням, середовищем роботи, рівнем автономності, конструктивними особливостями та сферами застосування. Визначає ключові категорії – повітряні, наземні, надводні та підводні системи, а також їхні підтипи (літакового, мультироторного, гібридного типу тощо). Матеріал наводить приклади застосування в аграрній сфері, обороні, логістиці, рятувальних операціях.

3. Основи аеродинаміки та фізики польоту безпілотних літальних апаратів.

Розділ пояснює ключові фізичні принципи польоту: підйомна сила, вага, тяга та аеродинамічний опір. Розглядає вплив погодних умов і параметрів конструкції на стабільність та ефективність польоту. Наводить формули та приклади для розрахунку аеродинамічних характеристик. Висвітлює специфіку використання різних типів БПЛА залежно від аеродинамічних параметрів.

4. Налаштування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів.

Матеріал описує процедури підготовки та калібрування БПЛА перед виконанням місії. Містить інструкції з перевірки технічного стану, налаштування сенсорів, обмежень висоти та швидкості, конфігурації сценаріїв аварійних дій (*Failsafe*). Окремо подано контрольні списки для передпольотної перевірки, з прикладами від компанії «Aerotas».



5. Програмне забезпечення для планування та управління дистанційно керованими безпілотними апаратами.

Розділ описує основні типи програмного забезпечення для управління БПЛА: від прошивок контролерів (*ArduPilot, PX4, BetaFlight*) до спеціалізованих програм для планування місій, збору та обробки даних. Наводить аналіз вимог до стабільності, безпеки та оновлення ПЗ. Описує методи інтеграції додаткових модулів та сенсорів.

6. Програмна діагностика та підготовка програмного забезпечення до польотів сільськогосподарських БПЛА.

Описує процедури тестування програмного забезпечення БПЛА перед використанням у польових умовах. Містить алгоритми виявлення помилок, перевірки сумісності модулів та оптимізації налаштувань для аграрних завдань. Висвітлює специфіку налаштування програм для картографування, обприскування та моніторингу полів.

7. Економічна ефективність упровадження дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів та цифрових інструментів у практику агровиробництва.

Розділ висвітлює економічну ефективність упровадження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сільському господарстві, порівнює їхні техніко-економічні показники з традиційною технікою, визначає показники окупності, оптимізації витрат і підвищення врожайності. Розділ формує цілісне уявлення про роль БПЛА як інструменту цифрової трансформації агровиробництва.

Кожний розділ містить прикінцевий список джерел інформації.



ПЕРЕДМОВА

Розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) став одним із найдинамічніших напрямів сучасної техніки та цифрових технологій. Від появи перших зразків як спеціалізованих військових інструментів до нинішнього широкого цивільного використання минуло лише кілька десятиліть, однак масштаби інтеграції БПЛА у виробничі, наукові та соціальні процеси постійно зростають. Сьогодні дрони є не лише інноваційним засобом збору даних чи моніторингу, але й ефективним інструментом підвищення продуктивності в аграрному секторі, забезпечення екологічного моніторингу, виконання рятувальних операцій, логістики та обслуговування інфраструктури.

Особливу роль у цьому процесі відіграє аграрна сфера, де точне землеробство та цифровізація агровиробництва базуються на здатності отримувати оперативну, високоточну й багатовимірну інформацію. Використання БПЛА для агроскаутингу, фотограмметрії, внесення агрохімікатів і контролю стану посівів сприяє підвищенню врожайності, раціональному використанню ресурсів і зменшенню екологічних ризиків. Водночас ефективність цих технологічних рішень значною мірою залежить від технічного стану апаратів, якісного налаштування, програмного забезпечення та високого рівня підготовки операторів.

Матеріали, викладені в цих рекомендаціях, ґрунтуються на поєднанні сучасних міжнародних підходів, вимог національних нормативних документів та практичного досвіду застосування БПЛА в різних галузях. Це забезпечує їхню актуальність як для освітніх програм, так і для системи професійної підготовки кадрів у виробничому середовищі.



Методичні рекомендації з підготовки та експлуатації БПЛА розроблено як комплексний освітньо-практичний ресурс, що охоплює ключові аспекти роботи з безпілотними системами: від класифікації й технічної будови до основ аеродинаміки, налаштування, програмного забезпечення та програмної діагностики. Кожен розділ містить структурований теоретичний матеріал, приклади з реальної практики, інструкції й алгоритми дій, що дозволяє здобувачам освіти, інженерам, агрономам і технічним фахівцям швидко опанувати необхідні знання та навички.

Ці методичні рекомендації є важливим компонентом підготовки:

- операторів безпілотних літальних апаратів (БПЛА);
- операторів дистанційно керованих літальних апаратів.



ЗАСТЕРЕЖЕННЯ: комерційні платформи, описані в посібнику як навчальні приклади, а не як рекомендації для закупівлі.



ВСТУП

Мета цих методичних рекомендацій – надати комплексне бачення процесу підготовки, налаштування та експлуатації БПЛА, яке дозволить забезпечити безпечну, ефективну та продуктивну роботу безпілотних систем у різних сферах діяльності.

Важливим принципом, закладеним у методику, є **інтеграція теоретичних знань із практичними навичками**. Такий підхід дозволяє не лише розуміти механізми роботи БПЛА, але й швидко приймати технічно обґрунтовані рішення в реальних умовах експлуатації, знижувати ризики аварій, підвищувати ефективність виконання завдань і забезпечувати відповідність польотів до чинних норм безпеки.

Опрацювання матеріалів цих рекомендацій дає змогу фахівцям:

- обирати та класифікувати БПЛА за призначенням та характеристиками;
- виконувати технічне обслуговування та налаштування апаратів;
- ефективно використовувати програмні платформи для управління та аналізу даних;
- проводити програмну діагностику та адаптацію налаштувань до умов місії;
- інтегрувати БПЛА у виробничі та наукові процеси з дотриманням стандартів безпеки.

Отже, ці методичні рекомендації є інструментом для формування професійної компетентності сучасного оператора та інженера БПЛА, здатного працювати в умовах швидких технологічних змін і високих вимог до якості й точності виконання завдань.



АВТОРИ:

Микола Іванович БИКОВ

Дорадник з агрономії (свідоцтво № 26/2017/2). Короткостроковий консультант Програми з аграрного і сільського розвитку (АГРО). Національний експерт із ґрунтозберігаючого землеробства ФАО (2021–23 роки). Освіта: спеціаліст – «Агроном із захисту рослин», Національний аграрний університет України, зараз – НУБіП; магістр із менеджменту, Хмельницький національний університет.

Микола Павлович КОСОЛАП

Кандидат с.-г. наук, доцент кафедри землеробства та гербології Національного університету біоресурсів і природокористування України. Створив курси «Гербологія», «Система землеробства *No-till*» в Національному аграрному університеті. Постійно викладає дисципліну «Система землеробства *No-till*».

Андрій Євгенович ДАНКЕВИЧ

Доктор економічних наук, професор кафедри економіки та права Національного університету харчових технологій; професор кафедри економічної безпеки, державного управління та адміністрування, Державний університет «Житомирська політехніка», ORCID: 0000-0003-1801-7516.

Павло Володимирович ГОРЯЧЕВ

Інструктор БПЛА *Victory Drones*, ГО «Центр підтримки аеророзвідки»; НРК, *Victory Robots*, БО БФ «Дігнітас»; технічний спеціаліст Школи НРК «*KillHouse*». Освіта: НТУУ «Київський політехнічний інститут», інженер-системотехнік за спеціальністю «Комп'ютеризовані системи управління і автоматика».

Назарій Олегович ПЕНЮК

Співзасновник компанії «Кроп Ленд» з понад п'ятирічним досвідом застосування БПЛА в агровиробництві для моніторингу полів, агрономічного аналізу та оптимізації виробничих процесів. Освіта: Фаховий коледж інфокомунікацій Національного університету «Львівська політехніка», спеціальність «Телекомунікації та радіотехніка»; Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, спеціальність «Агрономія».



КОНСУЛЬТАНТИ:

Віталій Петрович КОВАЛЕНКО

Доктор с.-г. наук, професор, декан агробіологічного факультету НУБіП України

Віталій Віталійович ОВЕРЧЕНКО

Кандидат с.-г. наук, доцент кафедри землеробства та гербології НУБіП України

КООРДИНАТОР

Олександр Васильович ПРИХОДЬКО

Менеджер із розвитку аграрних ринків Програми з аграрного і сільського розвитку (АГРО).



РОЗДІЛ 1

Упровадження дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів у точному землеробстві

Автори: Микола Іванович БИКОВ,
Микола Павлович КОСОЛАП

Консультант: Павло Володимирович ГОРЯЧЕВ

Після опрацювання цієї теми здобувач освіти:

- **набуде системного уявлення** про роль безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сучасних агровиробничих процесах, зокрема в точному землеробстві, розумітиме логіку побудови диференційованих агротехнологій на основі даних, отриманих за допомогою БПЛА;
- **навчиться аналізувати** технічні параметри, конструктивні особливості та функціональну ефективність різних типів БПЛА у контексті завдань агромоніторингу, внесення добрив, обприскування, посіву тощо;
- **оволодіє методикою** використання БПЛА в агротехнологічному моніторингу: від формування місій для обльоту до інтерпретації мультиспектральних знімків, створення ортофотопланів і побудови карт-завдань для змінного обробітку;
- **отримає практичні навички** планування та виконання агрономічних операцій із застосуванням БПЛА, зокрема: побудови маршрутів польоту, вибору обладнання відповідно до завдання, моделювання внесення засобів захисту рослин, посіву сидератів або створення 3D-моделей поля.



1.1. Роль БПЛА в точному землеробстві

У традиційному землеробстві одиницею застосування будь-якого технологічного заходу є поле незалежно від його фізичного розміру. Водночас, згідно з біологічними законами, будь-яка земельна ділянка має просторову різноманітність родючості. Ця неоднорідність родючості забезпечує ефективне функціонування природного процесу ґрунтоутворення і підтримки певного рівня родючості ґрунту. Застосування поля як одиниці виміру для оцінки будь-якого показника родючості ґрунту і прийняття технологічних рішень щодо його коригування не завжди є позитивним. Воно також може зумовлювати негативний вплив на родючість ґрунту на певних частинах поля, особливо при використанні високих норм коригувальних матеріальних ресурсів родючості, наприклад мінеральних добрив. У традиційному землеробстві вирівнювання родючості ґрунту в межах поля було одним із завдань агрономії, проте виконати його агрозаходами було складно через неможливість диференціації. Це виявилось однією з причин деградації ґрунту, яка спостерігалася в ХХ сторіччі.

Сьогодні точне землеробство – це високотехнологічна система управління агровиробничими процесами, що ґрунтується на використанні оперативних даних про просторові та часові зміни стану сільськогосподарських угідь. Вона охоплює широкий спектр цифрових інструментів, зокрема геоінформаційні системи (далі – ГІС), сенсори, супутникові й аерофотознімки, метеодані, а також алгоритми аналізу великих масивів інформації. Упровадження точного землеробства дозволяє значно підвищити ефективність використання ресурсів (води, добрив, насіння, пального), зменшити виробничі витрати, покращити якість урожаю та знизити екологічне навантаження завдяки локалізованому (адресному) підходу до обробітку угідь та диференціації їхнього застосування в межах поля.

Одним із ключових елементів функціонування системи точного землеробства є безпілотні апарати, які забезпечують *агромоніторинг сільськогосподарських угідь (отримання оперативної інформації про стан агроєкосистеми поля)* не в середньому, а за окремими локаціями (зонами), що стає основою для прийняття відповідних агротехнічних рішень.



Дистанційно керовані безпілотні літальні апарати (БПЛА) дозволяють з їхньою допомогою здійснювати високоточне картографування полів, моніторинг стану рослин, контроль вологості, фітосанітарної ситуації, виявлення осередків прояву ерозій, бур'янів і зон дефіциту елементів живлення та ін. У поєднанні з картою врожайності сільгоспкультур на конкретному полі це дає змогу провести комплексний аналіз причин різниці в урожайності й розробляти відповідні технології для окремих технологічних ділянок поля. На основі цих технологій спеціалісти розробляють відповідні нормативи виконання технологічних операцій (норма висіву, вид і норма внесення відповідних добрив, які можуть бути реалізовані іншими технічними засобами землеробства, зокрема сівалками, розкидачами мінеральних добрив, обприскувачами тощо).

Крім інформаційного забезпечення, БПЛА слугують засобом технічного виконання низки технологічних завдань (цільове внесення добрив і засобів захисту рослин). Вони забезпечують контроль рівня біологічних факторів ризику – бур'янів, шкідників та хвороб у межах поля або окремих його зон (технологічних ділянок). Використання БПЛА дає змогу швидко виявляти проблемні ділянки, часто до часу їхнього прояву в межах усього поля, що дозволяє своєчасно застосувати коригувальні управлінські заходи на малій площі з високою точністю, наприклад внесення інсектициду. У результаті різко зменшуються загальні витрати за одночасного максимального ефекту від внесення. Загалом це підвищує ефективність виробництва і забезпечує більш стійке управління сільськогосподарськими угіддями [1].

Сьогодні точне землеробство охоплює практично весь сільськогосподарський цикл (рис. 1.1). Елементи точного землеробства застосовуються в передпосівній підготовці, посіві, внесенні добрив і засобів захисту, під час жнив та в міжсезонний період. На кожному етапі реалізуються різні технології – автопілот, датчики, змінні норми внесення, моніторинг рослин і аналітичне програмне забезпечення. Це дозволяє аграріям ефективно управляти ресурсами, зменшувати витрати та підвищувати врожайність [1].



Рис 1.1. Використання точного землеробства



1.2. Основні типи БПЛА у сільському господарстві та їхнє поширення

Упродовж останнього десятиліття спостерігається стійке зростання кількості дистанційно керованих безпілотних апаратів (БПЛА) в агросередовищі. За даними звіту DJI, до кінця 2024 року у світі використовувалося близько 400 000 сільськогосподарських БПЛА, що на 33 % більше порівняно з 2023 роком і на 90 % більше, ніж у 2020 році [2].

У Європі ринок сільськогосподарських БПЛА оцінювався в 1,27 млрд доларів США у 2023 році та, за прогнозами, зросте до 17,64 млрд доларів до 2035 року, що відповідає середньорічному темпу зростання 24,46 % [3].

На рис. 1.2 відображено динаміку зростання ринку сільськогосподарських БПЛА у Європі у 2018–2035 роках. Згідно з прогнозом, обсяг ринку, що становив 1,59 млрд доларів США у 2024 році, зростатиме щорічно, досягнувши 17,65 млрд доларів у 2035 році. Це свідчить про стабільне впровадження БПЛА в агросекторі як інструменту точного землеробства, що дозволяє підвищити ефективність агровиробництва. Найбільш стрімке зростання прогнозується після 2030 року, що може бути пов'язано з технологічним проривом і ширшим доступом до інноваційних рішень.

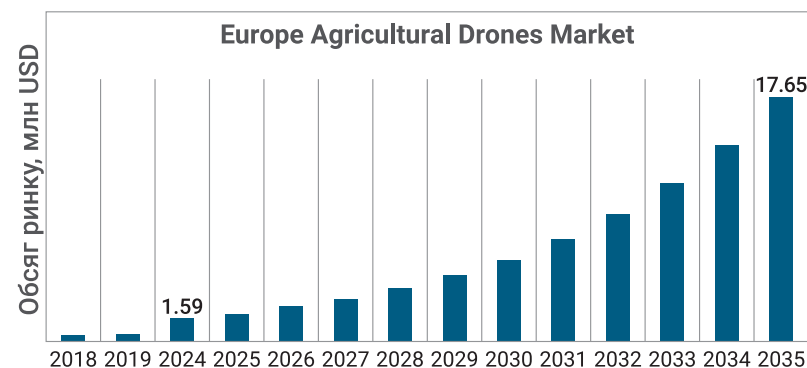


Рис. 1.2. Динаміка обсягу ринку БПЛА в Європі [3]



У табл. 1.1 наведено основні типи безпілотників, які використовуються в сільському господарстві.

Таблиця 1.1. Основні типи БПЛА у сільському господарстві

Тип БПЛА	Конструкція	Функції в агросфері
Коптери (мультироторні)	4–8 гвинтів, вертикальний зліт	Здійснення детального моніторингу посівів за допомогою RGB та мультиспектральних камер, локальне обприскування ЗЗР, точкове внесення добрив, оперативне виявлення фітосанітарних загроз, моніторинг важкодоступних ділянок і виконання завдань в умовах обмеженого простору або складного рельєфу
Літакові типи (fixed-wing)	Крила, горизонтальний політ	Масштабна аерофотозйомка великих територій, створення ортофотопланів і цифрових моделей рельєфу, виявлення зон вологозабезпечення та ерозійних процесів, побудова карт висот і ухилів, тривале картографування з високою точністю
Гібридні (VTOL)	Поєднання коптера та літака	Універсальні завдання – моніторинг великих площ із можливістю вертикального зльоту / посадки, швидке реагування на локальні зміни, обстеження полів у складних умовах, комбінація маневровості коптера та тривалості польоту літака

Коптери (мультироторні) призначені для точкового обприскування, внесення добрив і моніторингу на складних ділянках.



Літакові БПЛА (fixed-wing) охоплюють великі площі, виконують аерофотозйомку та створюють карти рельєфу.

Гібридні БПЛА (VTOL) поєднують маневровість коптера з тривалим польотом літака, підходять для виконання універсальних завдань.

Бізнес-модель «DaaS» компанії «ZenaTech» передбачає використання багатофункціональних автономних БПЛА «ZenaDrone 1000» та серії IQ для широкого спектра сервісних рішень – від геодезії до інспекції ліній електропередач або миття під тиском. Ці послуги будуть доступними та економічно ефективними завдяки бізнес-моделі, подібній до Uber, на основі звичайної підписки або оплати за використання. Клієнти отримують зручний доступ до БПЛА та уникнуть ручного або працемісткого виконання завдань. Це дозволить досягти найкращих результатів, зокрема геодезичної зйомки, інспекцій, служби безпеки, підтримки правоохоронних органів або точного землеробства, без необхідності купувати, експлуатувати або обслуговувати самі БПЛА [4].



1.3. Використання БПЛА як технологічного засобу в землеробстві

Дистанційно керовані безпілотні апарати літального типу можуть здійснювати такі технологічні операції в землеробстві:

1. Обприскування рослин засобами захисту із застосуванням БПЛА-обприскувачів здійснюється за заданим маршрутом з автоматичним розрахунком витрати робочої рідини відповідно до карти поля. Зональне обприскування здійснюється на попередньо виявлених зонах ураження хворобами або шкідниками. За допомогою мультиспектрального аналізу результатів моніторингу створюються карти-завдання. БПЛА-обприскувачі (наприклад DJI Agras T40, XAG V40) отримують маршрут із чітко визначеними координатами обробки, що дає змогу уникнути обробки здорових ділянок та суттєво знизити обсяг використаних препаратів. Такий підхід зменшує витрати на засоби захисту рослин (ЗЗР) на 30–50 % порівняно із суцільним методом і знижує хімічне навантаження на екосистему поля. Крім економії ресурсів, точкове обприскування сприяє ефективнішому управлінню захистом рослин і поліпшенню загального фітосанітарного стану посівів.

2. Посів дрібнонасіневих культур або сидератів. Посів проводиться з використанням БПЛА-розсіювачів, що забезпечують рівномірний розподіл насіння навіть у важкодоступних зонах. Посів дронами застосовується для висіву сидератів, дрібнонасіневих культур (наприклад люцерни, фацелії, гірчиці) розкидним способом. Особливо ефективний у важкодоступних зонах, на схилах або ділянках із надмірною вологістю, де механізована техніка не може працювати без пошкодження ґрунту. БПЛА-розсіювачі, як-от XAG R150 або DJI Agras T10, забезпечують рівномірний поверхневий розподіл з точним дозуванням. Посів може виконуватись за заздалегідь підготовленими картами-завданнями, що дозволяє точно дотримуватись норми висіву та мінімізувати перевитрати насіння. Такий підхід дозволяє пришвидшити агрономічний цикл, запобігти ерозії ґрунтів і зберегти вологу до наступного сезону.

3. Внесення рідких і твердих добрив – БПЛА дозволяють проводити диференційоване внесення добрив на основі попереднього



аналізу карт продуктивності та зон живлення. Для внесення рідких добрив застосовують БПЛА-обприскувачі (наприклад DJI Agras T40, XAG V20), які здатні рівномірно та ефективно вносити рідкі мінеральні добрива, мікроелементи або біопрепарати з урахуванням зонального підходу до живлення культур. БПЛА використовують попередньо згенеровані карти зон живлення на основі NDVI або мультиспектральної зйомки для диференційованого внесення, що дозволяє скорочувати витрати добрив на 25–40 % без втрати врожайності. Завдяки точному GPS-позиціонуванню, автоматичному контролю витрати та адаптивному алгоритму регулювання висоти польоту, забезпечується однакова концентрація робочого розчину на всіх ділянках обробки незалежно від рельєфу. Це підвищує ефективність засвоєння поживних речовин, знижує ризик перенасичення ґрунту та зменшує навантаження на навколишнє середовище.

4. Десикація та обробка біопрепаратами із застосуванням БПЛА забезпечує своєчасну підготовку посівів до збирання та зниження фітопатологічного тиску (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Внесення добрив повітряними ДБКА (дронами) [5]



Рис. 1.4. Прямий посів рису дронами.
В Індії запатентували нову технологію [6]

Наведені нижче дані дають змогу оцінити обсяг застосування БПЛА як технічних засобів виконання окремих технологічних операцій в Україні. Згідно з опитуванням 50 агропідприємств України, 59 % з них уже використовують БПЛА для внесення ЗЗР. БПЛА дозволяють проводити обробку у важкодоступних місцях та на перезволожених ґрунтах, коли наземна техніка не може зайти в поле (рис. 1.4). При цьому не спричиняють негативного впливу на щільність ґрунту і не потребують технологічних колій на полі. У період з 2021 по 2023 роки агродронами було оброблено 3,1 млн га сільськогосподарських земель. *AgTech*-сектор України налічує близько 70 стартапів, що працюють у різних напрямках: управління земельним банком, точне землеробство, використання БПЛА та інші інноваційні рішення. За останні роки кількість стартапів та інвестицій суттєво зросли, що свідчить про динамічний розвиток галузі навіть у складних умовах війни [7].

Використання БПЛА у сільському господарстві дозволяє значно знизити витрати на воду, паливо та засоби захисту рослин. Наприклад, норма внесення робочого розчину під час роботи дрона становить 8 л/га, тоді як для обприскувача – 200 л/га. Це дає



змогу зменшити витрати на підвезення води з 40 тис. грн до 5 тис. грн на 1000 га. Крім того, БПЛА не пошкоджують посіви, що дозволяє уникнути втрат урожаю на суму від 1,5 до 3 млн грн [8].

5. Інтеграція БПЛА в агротехнологічний моніторинг.

Сьогодні БПЛА відіграють ключову роль у моніторингу сільськогосподарських угідь. Для якісного збору інформації про стан агрофітоценозів сучасні БПЛА оснащуються мультиспектральними камерами, термосенсорами, системами позиціонування та автоматичної навігації. Розширений збір взаємозалежної інформації, наприклад рівень ураження хворобами залежно від кількості опадів, та її попередня обробка полегшує аграріям оцінку результатів моніторингу і прийняття оперативних технологічних рішень у режимі реального часу. Застосування таких рішень у межах виявлених проблемних точок поля підвищує стійкість і рівномірність агрофітоценозу в змінних умовах, що в цілому підвищує загальну продуктивність агросистем. БПЛА здатні виконувати широке коло завдань завдяки можливості обладнання різноманітними приладами спостереження, зокрема для такого:

А. Збирання високоточних просторових даних – через комплексні методи аерофотозйомки, спектрального аналізу і тривимірного моделювання – забезпечують об'єктивну кількісну оцінку просторової неоднорідності сільськогосподарських угідь. **Картографування полів** здійснюється за допомогою БПЛА, оснащених високоточними камерами та GPS-навігацією, що дає змогу створювати ортофотоплани з сантиметровою точністю. На їхній основі генеруються цифрові моделі рельєфу (*DSM*), карти висот і ухилів, що є критично важливими для планування зрошення, меліорації, розрахунку ерозійних ризиків. Окремо будуються карти щільності ґрунту на основі даних із сенсорів або проб ґрунту, отриманих за допомогою наземних дистанційних безпілотних систем. Інтеграція цих карт в ГІС дає змогу здійснювати диференційовану обробку полів, прогнозування зон продуктивності, оптимізацію логістики техніки та планування польових операцій. Ці дані стають основою для прийняття рішень у точному землеробстві, зменшення витрат ресурсів і підвищення врожайності.



В. Мультиспектральні та гіперспектральні знімки дозволяють проводити спектральний аналіз стану рослин завдяки розширеному діапазону довжин хвиль, які вловлюють не лише видиме світло, а й інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Це забезпечує високу точність визначення біофізичних параметрів рослин – вмісту хлорофілу, вологи, ступеня ураження патогенами або шкідниками. На основі таких знімків будуються карти вегетації, зони потенційної продуктивності, карти дефіциту елементів живлення, температурних аномалій, а також проводиться точне зонування полів для диференційованого внесення добрив і пестицидів. Гіперспектральна зйомка, що містить сотні вузьких спектральних каналів, дозволяє виявляти навіть мінімальні зміни у стані рослин, які неможливо зафіксувати традиційними методами, що є особливо цінним для ранньої діагностики хвороб і стресових чинників.

С. 3D-моделювання та ортофотоплани – створення цифрових моделей рельєфу місцевості (*Digital Surface Model, DSM*) та ортофотопланів, які є геоприв'язаними аерофотознімками, виправленими з урахуванням спотворень рельєфу. Ці інструменти дають змогу отримати точне уявлення про морфологію поля, визначити ухили, пониження та підвищення, спрогнозувати шляхи стоку води, зони можливого підтоплення чи ерозії. 3D-моделі є основою для розроблення планів дренажу, терасування, проєктування інженерної інфраструктури та оптимізації маршрутів техніки.

Д. Моніторинг стану посівів. БПЛА, оснащені мультиспектральними сенсорами, застосовуються для створення індексів вегетації (*NDVI, GNDVI, SAVI*), що дає змогу здійснювати кількісний аналіз біомаси, оцінювати фотосинтетичну активність, виявляти ділянки з аномальною вегетацією та прогнозувати потенційний урожай. Такі БПЛА також дають змогу виявляти ознаки біотичних і абіотичних стресів (зневоднення, ураження шкідниками, грибкові інфекції), що дозволяє аграріям оперативно коригувати системи живлення, захисту або зрошення. Дані моніторингу інтегруються з ГІС та аграрним програмним забезпеченням, що дає змогу створювати карти-завдання для точкового втручання і зменшення витрат на добрива та ЗЗР.



Використання індексу вегетації *NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)* дає змогу оцінити фотосинтетичну активність рослин, виявляти стреси, дефіцит вологи та інші фізіологічні порушення; *RGB*-зображення – традиційна фотозйомка у видимому спектрі, яка забезпечує візуальну оцінку щільності покриття, пошкоджень рослин, бур'янів, шкідників.

Таким чином, завдяки застосуванню БПЛА (фотограмметрія, створення тривимірних моделей поля у вигляді хмар точок та автоматичному аналізу отриманих даних, аграрії можуть точно оцінювати стан поля, рельєф, а також виявляти проблемні зони або перешкоди. Це дозволяє ще до виїзду техніки на поле чітко спланувати маршрути, визначити обсяги робіт, вибрати потрібне обладнання та уникнути зайвих витрат пального, часу й ресурсів.

6. Обмеження та ризики використання БПЛА в землеробстві:

- **технічні обмеження:** обмежений час автономної роботи БПЛА (20–40 хв. у середньому), необхідність регулярної заміни акумуляторів, складність експлуатації в умовах сильного вітру, дощу або туману, а також залежність від точності налаштування бортових сенсорів і стабілізаційних систем;
- **юридичні обмеження:** обмеження польотів у прифронтових, міських або прикордонних зонах, вимоги до сертифікації операторів, ведення польотної документації та дотримання регламенту безпечного використання авіапростору (наприклад, не перевищувати висоту 120 м без спеціального дозволу);
- **економічна доцільність:** висока вартість БПЛА сільськогосподарського призначення (від \$5 000 до \$300 000 і більше), необхідність щорічного обслуговування, закупівлі змінних елементів (акумулятори, насоси, форсунки), платне програмне забезпечення для обробки даних і навчання персоналу знижують доступність для дрібних фермерів без державної або кооперативної підтримки;
- **кадровий фактор:** нестача фахівців, здатних ефективно керувати БПЛА, виконувати технічне обслуговування та інтерпретувати дані. Навіть після навчання, оператори потребують практичного



досвіду, щоб працювати з картами-завданнями, калібрувати камери, уникати помилок під час польоту, а також інтегрувати результати в систему управління господарством;

- **технічні ризики:** імовірність відмови апаратного забезпечення (двигуни, ESC, контролери), помилки навігації внаслідок втрати сигналу GPS у лісовій або перетнутій місцевості, ризик зіткнення з перешкодами (лінії електропередач, дерева), хакерські атаки на систему управління або перехоплення сигналу зв'язку. ПЗ може дати збій під час обробки великих обсягів даних або бути несумісним із форматом іншого обладнання (сенсори, тракторні системи тощо).

7. Перспективи розвитку застосування БПЛА в точному землеробстві:

Подальший розвиток застосування БПЛА пов'язаний як з розвитком техніки безпілотних летальних апаратів, розширенням спектру їхнього оснащення різноманітними датчиками і приладами дистанційного зондування, так і зі зростанням сфери їхнього застосування як технічного знаряддя управління ростом і розвитком сільськогосподарських культур та родючістю ґрунту в сучасних системах землеробства.

- **Інтеграція з штучним інтелектом та машинним навчанням:** автоматична обробка даних з БПЛА для точного прогнозування захворювань, потреб у зрошенні та дефіциту елементів живлення. Системи штучного інтелекту аналізують великі обсяги даних із супутників, метеостанцій, БПЛА і сенсорів, надаючи аграріям точні рекомендації щодо локального втручання. ШІ застовується для побудови прогнозних моделей урожайності, ідентифікації хвороб за зображеннями листків, автоматичної класифікації культур і фаз розвитку рослин.
- **IoT-мережі (Internet of Things networks) та наземні автономні платформи (UGV):** перспективним напрямом є поєднання аеробПЛА з наземними безпілотниками, які здійснюють міжрядну культивуацію, точкове підживлення, збір проб ґрунту, інспекцію культур на рівні ґрунтового покриву. Наземні системи, як-от *Ecorobotix* або *FarmDroid FD20*, дають змогу повністю



автоматизувати рутинні операції, мають низьке енергоспоживання і точну прив'язку до ГІС. У поєднанні з повітряними апаратами ці системи забезпечують замкнений цикл збору даних і виконання технологічних операцій.

- **Розширення автономності:** поява повністю автономних систем з автозаправками, автозавантаженням добрив, злітно-посадковими модулями. Станції типу *DroneDock* або *Hyllo HUB* дають розгортати цілодобові безпілотні операції в полі без участі людини, що значно підвищує продуктивність та оперативність обробки великих площ.
- **Розвиток єдиних цифрових екосистем:** інтеграція БПЛА, тракторів, сенсорів, метеостанцій і агроплатформ у єдині цифрові агроекосистеми з централізованим управлінням. Це створює передумови для формування повноцінних систем «розумного поля» (*Smart Field*), у яких БПЛА функціонують у тісній синхронізації з іншими елементами агровиробництва, підвищуючи ефективність і стійкість господарства до зовнішніх ризиків. IoT-мережі: поєднання БПЛА із сенсорними системами на полі для створення повноцінних цифрових агросистем.

З урахуванням окреслених перспектив розвитку повітряних і наземних безпілотних апаратів, за даними *MarketsandMarkets*, у 2023–2028 роках очікується зростання ринку послуг БПЛА для сільського господарства більш ніж на 30 %. Водночас розвивається сегмент сервісних компаній, які надають послуги за моделлю «БПЛА як сервіс» – від моніторингу до обприскування. Це дозволяє дрібним і середнім господарствам користуватись передовими технологіями без необхідності капітальних інвестицій.



КОНТРОЛЬНЕ ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАТЬ

Питання:

- Які основні типи БПЛА використовуються в агросекторі? Назвіть їхні функціональні особливості.
- Чим відрізняються коптери від літакових БПЛА?
- Які типи БПЛА використовуються в точному землеробстві? Порівняйте їхні функціональні особливості.
- Назвіть 3 приклади застосування БПЛА в агровиробництві та вкажіть, які дані при цьому використовуються.
- Як використання БПЛА впливає на витрати води, пального та ЗЗР?
- Які економічні показники демонструють переваги БПЛА в господарствах?

Задача:

Фермер має поле площею 120 га. Він хоче провести обстеження посівів з використанням коптера, який має час польоту 25 хвилин та покриває 15 га за один виліт. Скільки вильотів потрібно для повного обстеження поля? Скільки часу це займе?

Відповідь:

Потрібно 8 вильотів; загальний час – 200 хв.

Джерела інформації:

1. <https://www.gao.gov/assets/d24105962.pdf>
2. <https://agfundernews.com/dji-report-charts-rapid-rise-in-global-adoption-of-ag-spray-drones>
3. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/europe-agricultural-drones-market-44404>
4. <https://www.globalagtechinitiative.com/in-field-technologies/drones-uavs/global-drone-usage-and-adoption-continues-to-skyrocket-while-largely-benefiting-the-agriculture-industry>
5. <https://defenda.com.ua/dron>
6. <https://news.agropages.com/News/NewsDetail-49316.htm>
7. <https://kurkul.com/spetsproekty/1743-silске-gospodarstvo-40-priklad-rozvitku-v-ukrayini>
8. <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-inshe/nyuansy-zastosuvannya-droniv-u-hospodarstvakh-pidsumky>



РОЗДІЛ 2

Класифікація дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів

Автори: Микола Іванович БИКОВ,
Павло Володимирович ГОРЯЧЕВ

Після опрацювання цієї теми здобувач освіти:

- **ознайомиться з основами класифікації.** Слухач дізнається про класифікацію дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за середовищем функціонування (повітряні, наземні, надводні, підводні), конструкцією (моноблочні, модульні, складні), призначенням (розвідувальні, моніторингові, сільськогосподарські, рятувальні, військові) та способом запуску / переміщення (VTOL, ручний запуск, катапульта, автоматичний старт);
- **набуде знань.** Здобувач опанує інформацію про технічні характеристики основних типів БПЛА (маса, швидкість, тривалість польоту, дальність дії, вантажопідйомність, тип живлення), ознайомиться з прикладами конкретних моделей та їхніми функціональними можливостями, а також вивчить стандарти та нормативні документи (ISO, NATO STANAG, IEEE) у сфері безпілотної авіації;
- **дізнається про специфіку застосування.** Будуть розглянуті особливості використання БПЛА в різних галузях: агровиробництві (моніторинг посівів, обприскування), екологічному моніторингу, інфраструктурних інспекціях, пошуково-рятувальних операціях, військових завданнях та наукових дослідженнях;
- **навчиться визначати доцільність використання.** Студент зможе оцінювати переваги та обмеження різних типів БПЛА залежно від умов: площі території, погодних факторів, вимог до автономності, точності збору даних, мобільності та логістичних обмежень;
- **оволодіє розумінням функціоналу.** Здобувач отримає цілісне уявлення про роботу БПЛА: від принципів аеродинаміки та стабілізації польоту до інтеграції сенсорних систем, навігаційних модулів та програмного забезпечення для збору й обробки даних.



2.1. Класифікація за середовищем функціонування

Повітряні БПЛА (UAV): це апарати, які здійснюють політ у повітряному просторі без екіпажу на борту та функціонують у повітрі під впливом змінних атмосферних умов, що вимагає високого рівня стабілізації й точності керування. Основними особливостями їхньої експлуатації є необхідність безпечного зльоту та посадки, контроль за вітровим навантаженням, обмеження щодо тривалості польоту через ємність акумуляторів, а також потреба в безперебійному зв'язку з наземною станцією управління. БПЛА можуть виконувати як автоматичні, так і дистанційно керовані польоти. Такі апарати широко застосовуються для моніторингу, аерофотозйомки, сільськогосподарства, логістики, рятувальних операцій, у військових цілях та для наукових досліджень.

Основними характеристиками повітряних БПЛА є їхня маневреність, здатність працювати на значній висоті та в умовах, недоступних для наземних транспортних засобів. БПЛА часто використовуються на різній висоті – від кількох до сотень метрів, що визначає вимоги до систем навігації та сенсорного обладнання. Важливо дотримуватись авіаційного законодавства, зокрема обмежень польотів у контрольованих повітряних зонах.

До повітряних БПЛА належать апарати літакового, гвинтокрилого та мультироторного типу.

- **Літакового типу (Fixed-Wing UAV):** мають нерухоме крило, що створює підйомну силу завдяки руху вперед. Характеризуються великою дальністю та тривалістю польоту, високою ефективністю при моніторингу великих територій. Часто використовуються в агросекторі, картографуванні та розвідці.
- **Гвинтокрилого типу (Helicopter UAV):** обладнані одним основним і одним хвостовим роторами. Забезпечують стабільний зліт, посадку та зависання, підходять для точкових інспекцій і вертикальних злетів у складних умовах. Потребують більше технічного обслуговування.
- **Мультироторного типу (Multirotor UAV):** оснащені кількома роторами (4–8), що дозволяють злітати вертикально, зависати й маневрувати на місці. Це найпоширеніший тип для початкового навчання, відеозйомки, рятувальних операцій, інспекцій будівель і дрібномасштабних досліджень.



Рис 2.1. Планер: *Finwing Universeye Penguin* [1]

Tiger Drone (Finwing platform) (рис 2.1) – це безпілотний літальний апарат фіксованого крила, розроблений для тривалих польотів, аерофотозйомки та місій спостереження. Оснащений широким фюзеляжем для розміщення електроніки та сенсорів, підтримує встановлення автопілотів (*ArduPilot, PX4*) і телеметричних модулів, а також камер із високою роздільною здатністю. Завдяки аеродинамічній формі корпусу та стабільним льотним характеристикам *Tiger Drone* забезпечує плавний горизонтальний політ із хорошою ефективністю та дальністю [1].

Цей тип БПЛА використовується переважно в місіях, де важливі тривалість перебування в повітрі та якість збору візуальних і навігаційних даних: агромоніторинг, екологічні дослідження, картографування, пошукові операції. Конструкція апарата легко адаптувати його під різні завдання завдяки змінному корисному навантаженню та гнучкій конфігурації живлення. *Tiger Drone* є прикладом ефективного використання платформи фіксованого крила в інженерних і науково-дослідних проєктах.



Tiger Shark VTOL 3500 мм (рис 2.2.) – це гібридний безпілотний літальний апарат типу VTOL (*vertical take-off and landing*), що поєднує переваги вертикального зльоту / посадки з аеродинамічною економічністю фіксованого крила. Така конструкція дозволяє апарату злітати та сідати у вертикальному режимі як мультиротор, а після набору висоти переходити в горизонтальний політ, як класичний літак. *Tiger Shark* призначений для тривалих місій з великою дальністю, таких як аерофотозйомка, моніторинг посівів, картографування великих територій, спостереження або патрулювання [2].

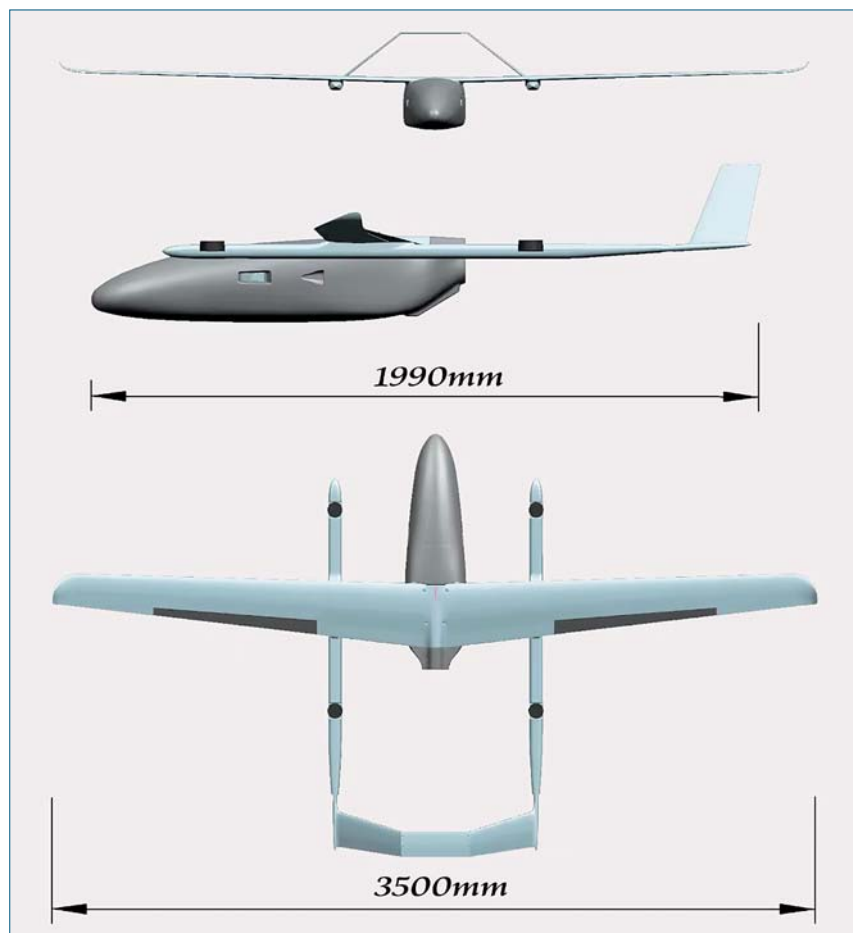


Рис. 2.2. *Tiger Shark VTOL 3500 mm* [2]



Платформа має розмах крила 3500 мм, оснащена окремими двигунами для вертикального й горизонтального польоту та виготовлена з легких композитних матеріалів, що забезпечують оптимальне співвідношення ваги і жорсткості. Вона сумісна з автопілотними системами типу *Pixhawk / ArduPilot*, підтримує встановлення сенсорного обладнання, камер і телеметричних модулів. Завдяки такій універсальності *Tiger Shark VTOL* ефективний як у сільському господарстві, так і в оборонних чи наукових цілях, де потрібна висока автономність і гнучкість розміщення.

Таблиця 2.1. Застосування повітряних БПЛА (UAV) у різних галузях із прикладами візуалізації

Тип застосування UAV	Опис застосування	Посилання
Аерофотозйомка та фотограмметрія	Створення карт, 3D-моделей та ортофотопланів	Pix4Dmapper https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software/
Сільське господарство та обприскування	Внесення добрив, захист посівів, моніторинг стану рослин	https://ag.dji.com/newsroom/agras-t50-and-t25-global-launch
Рятувальні операції та надзвичайні ситуації	Пошуково-рятувальні роботи, оцінка наслідків стихійних лих	https://enterprise.dji.com/public-safety
Інспекція інфраструктури	Моніторинг стану мостів, трубопроводів, промислових споруд	https://www.flyability.com/
Моніторинг екологічного стану	Вивчення дикої природи, оцінка екосистем, висадка лісів	https://enterprise.dji.com/public-safety/wildlife-protection
Безпека та оборона	Розвідка, моніторинг та забезпечення безпеки	DJI Enterprise



У табл. 2.1 наведено основні напрями застосування повітряних дистанційно керованих БПЛА (UAV), які охоплюють як комерційні, так і гуманітарні сфери. Від аерофотозйомки, фотограмметрії та точного землеробства до рятувальних операцій, моніторингу екологічного стану, інспекції критичної інфраструктури та завдань безпеки – UAV демонструють свою універсальність і високу ефективність. Для кожного напрямку застосування стисло описано функціональне пояснення й наведено посилання на ілюстративні матеріали, що демонструють практичне застосування UAV.



Характеристика DJI AGRAS T50

DJI AGRAS T50 використовує систему подвійного розпилення, передній та задній фазовані решітчасті радари та систему бінокулярного зору.

Джерело: <https://ag.dji.com/t50/specs>

Порівняння технічної характеристики.

У табл. 2.2 наведено порівняльні технічні характеристики різних типів дистанційно керованих БПЛА. Для кожного типу вказано основні параметри: масу, швидкість руху, тривалість автономної роботи, максимальну дальність дії, вантажопідйомність, тип живлення.

Таблиця 2.2. Технічні характеристики основних типів БПЛА

Тип	БПЛА (літакового типу)	БПЛА (мультиротор)
Маса	5–500кг	1–40 кг
Швидкість	60–300 км/год	30–150 км/год
Тривалість роботи	до 24 год	20–60 хв
Дальність дії	до 1500 км	до 40 км
Вантажопідйомність	до 100 кг	до 50 кг
Живлення	акумулятор / бензин	акумулятор/бензин



У табл. 2.3 наведено порівняльний аналіз двох основних типів дистанційно керованих БПЛА з урахуванням їхніх переваг і недоліків.

Таблиця 2.3. Порівняння типів БПЛА

Тип	Переваги	Недоліки
Повітряні (літакові)	велика дальність і тривалість польоту	потребують злітної смуги або катапульт
Повітряні (мультиротор)	точне зависання, маневреність	мала тривалість роботи, чутливість до вітру

Повітряні літакові БПЛА мають значну дальність і тривалість польоту, що робить їх ефективними для широкомасштабного моніторингу, однак вони потребують спеціальних умов для зльоту. Мультироторні апарати характеризуються маневреністю та точністю, але обмежені коротким часом роботи та вразливістю до вітру.

2.2. Класифікація дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів за конструкцією

Моноблочні: характеризуються цілісною конструкцією, у якій усі механічні, електронні та енергетичні елементи інтегровані в одному корпусі. Такі апарати відзначаються високою жорсткістю конструкції, простотою в експлуатації та обмеженою можливістю модернізації. Зазвичай застосовуються для масового виробництва або в умовах, де не потрібна зміна конфігурації.

Модульні: складаються з окремих функціональних блоків (модулів), які можна замінювати або оновлювати без необхідності змінювати всю конструкцію. Модульна система забезпечує гнучкість налаштувань для виконання різних завдань – наприклад зміни камери, сенсора або блока живлення. Це зручно для наукових цілей, тестування, навчання.

Складані (для транспортування): мають складану або розбірну конструкцію, що дозволяє зменшити габарити апарата для зручного перевезення. Зазвичай включають складані пропелери, шарнірні з'єднання або змінні вузли. Підходять для оперативного використання в польових умовах або тактичних операціях.



У табл. 2.4 наведено приклади дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів БПЛА, класифікованих за типом конструкції – моноблочна та складана (транспортабельна). Для кожного типу наведено конкретну модель, що демонструє її особливості та сферу застосування.

Таблиця 2.4. Класифікація безпілотних літальних апаратів за типом конструкції

Тип конструкції	Назва / Приклад	Посилання на сторінку з фото	Опис
Моноблочна	DJI Inspire 3	https://www.mynewsdesk.com/uk/dji/images/dji-inspire-3-car-shoot-horizontal-close-up-2789086	DJI Inspire 3 – це високотехнологічний кінематографічний дрон із моноблочною конструкцією. Усі елементи (сенсори, електроніка, камера, антени) інтегровані в єдиний аеродинамічний корпус. Такий підхід забезпечує жорсткість, зменшує кількість з'єднань, підвищує надійність і спрощує експлуатацію
Складана (транспортабельна)	Finwing Tiger	https://conservationdrones.org/2013/03/17/tiger-drone-test-flight-video/	Finwing Tiger – це безпілотний літальний апарат із можливістю складання основних елементів, таких як крила та опори. Завдяки цьому дрон зручно транспортувати навіть у польових умовах або на великі відстані. Підходить для тактичних місій, польових досліджень і мобільного моніторингу



2.3. Класифікація дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів за призначенням

Розвідувальні: призначені для збору інформації про місцевість, об'єкти, переміщення, а також стан інфраструктури. Часто використовуються у військовій сфері, під час надзвичайних ситуацій або для картографічної зйомки. БПЛА оснащені камерами денного та нічного бачення, тепловізорами, сенсорами руху, а в окремих випадках – передавачами даних у режимі реального часу. На рис. 2.3 зображений БПЛА «Лелека-100», який використовується як у військовій, так і в цивільній сфері. Це багатофункціональний безпілотний літальний апарат українського виробництва, створений компанією «DeViRo». «Лелека-100» входить до складу програмно-апаратного комплексу для збору, передавання та обробки даних у режимі реального часу. Його корпус виготовлений із сучасних композитних матеріалів (скловуглеволокна), а силова установка базується на електродвигуні, що забезпечує низький рівень шуму та екологічність польотів. Безпілотник призначений

Габарити – **1,98×1,14 м**
Швидкість вітру – до **20 м/с**



Злітна вага 4,5–5,5 кг	Дальність польоту 100 км	Тривалість польоту до 4 год	Максимальна швидкість 120 км/год
Вартість \$40 тис.	Мах висота польоту 100 км	Температура від -20°C до +40°C	Крейсерська швидкість 60–70 км/год

Рис. 2.3. Характеристика БПЛА «Лелека-100» [3]



для аерофотозйомки, патрулювання та картографування, з точним визначенням координат місця зйомки. Він може працювати вдень і вночі, зокрема у складних погодних умовах – за щільної хмарності та незначних опадів (до 20 хв. перебування в повітрі). Система керування адаптована до роботи в умовах радіоелектронного протистояння, як-от перебоїв зв'язку, спроб глушіння сигналів *GPS* та впливу активних радіоперешкод [3].

Моніторингові: призначені для тривалого спостереження за змінами в навколишньому середовищі, станом об'єктів інфраструктури, атмосферними явищами, рівнем води, викидами забруднювальних речовин та іншими показниками. Застосовуються в екології, метеорології, геології, урбаністиці, енергетиці та сільському господарстві. Такі апарати можуть бути обладнані спектральними камерами, газоаналізаторами, тепловізорами, лазерними далекомірами, ультразвуковими сенсорами, погодними модулями. Моніторинг здійснюється як у режимі реального часу (через потік даних), так і у вигляді періодичного збору інформації для подальшого аналізу.

На рис. 2.4 зображений БПЛА *DJI Mavic 3 Multispectral*, який застосовується для моніторингу сільськогосподарських угідь. Апарат оснащений 20 МП *RGB*-камерою та мультиспектральним модулем із чотирма сенсорами (зелений, червоний, червона крайка, *NIR*),



Рис 2.4. *Mavic 3 Multispectral* [4]



а також *RTK*-модулем для точного позиціонування та геоприв'язки зображень. Завдяки системі уникнення перешкод датчику освітленості та тривалості автономної роботи до 43 хв., дрон забезпечує ефективне обстеження до 200 га за один виліт, що робить його зручним інструментом для створення карт вегетаційних індексів та агромоніторингу [4].

Сільськогосподарські: використовуються для виконання завдань у сфері агровиробництва, зокрема моніторингу стану посівів, внесення добрив і засобів захисту рослин, аналізу вологості ґрунту, картографування ділянок, контролю росту культур, виявлення шкідників і хвороб. Часто застосовуються багатороторні БПЛА з системами точкового розпилення або розсіювання. Також використовуються дрони з мультиспектральними камерами для виявлення стресового стану рослин та оптимізації сівозміни. Завдяки зниженню витрат ресурсів і підвищенню точності обробки ділянок агродрони сприяють розвитку точного землеробства, підвищенню врожайності та зменшенню екологічного навантаження.



Рис. 2.5. БПЛА-обприскувач *TALOS T60X* [5]



На рис. 2.5 зображено БПЛА *Talos T60X*, який використовується для обприскування сільськогосподарських культур. Апарат оснащений баком об'ємом до 60 л і системою розпилення з продуктивністю до 28 л/хв, що дозволяє обробляти площі – до 70 акрів за годину. Завдяки автоматичному обльоту, системі обльоту рельєфу та трьом навігаційним камерам БПЛА забезпечує точне та рівномірне внесення рідких добрив або засобів захисту рослин навіть на складних ділянках поля [5].

Рятувальні: застосовуються в надзвичайних ситуаціях – під час пошуково-рятувальних операцій, доставки медикаментів або вантажів у зони, недоступні для людини, а також у зонах стихійних лих (повені, землетруси, пожежі). Такі апарати можуть бути оснащені тепловізорами, гучномовцями, прожекторами, сенсорами пошуку людей, маніпуляторами для евакуації постраждалих. Перевагами рятувальних БПЛА є швидке розгортання, доступ до важкодоступних територій, автономність дій та можливість роботи у складних умовах з мінімальним ризиком для персоналу.

На рис. 2.6 зображений квадрокоптер *DJI Mavic 3E*, призначений для виконання рятувальних завдань у складних умовах. Завдяки потужній 20 МП камері з 56-кратним зумом він дозволяє швидко виявляти людей або об'єкти з великої висоти, а вбудований RTK-модуль забезпечує точне визначення координат для оперативного реагування. Система всенапрямого уникнення перешкод, можливість нічної зйомки та робота в умовах низької освітленості дають змогу ефективно



Рис. 2.6. *DJI Mavic 3E Enterprise* [6]



діяти під час аварій, катастроф або пошукових робіт у важкодоступній місцевості. Вбудований гучномовець дає змогу передавати голосові повідомлення потерпілим або координувати дії груп на землі [6].

Військові: застосовуються для виконання бойових, розвідувальних, логістичних та охоронних завдань у збройних силах. Військові БПЛА можуть бути повітряними (ударні дрони, розвідники, носії), наземними (роботи-розвідники, сапери, платформи доставки боєприпасів, евакуаційні машини), надводними (патрульні дрони для охорони узбережжя, ударні БПЛА-камікадзе, носії озброєння) або підводними (розвідувальні апарати, міношукачі). Вони оснащуються сучасними сенсорами, крипто захищеними каналами зв'язку, системами автоматичного виявлення та розпізнавання цілей, високоточним озброєнням, засобами РЕБ (радіоелектронної боротьби) та елементами штучного інтелекту. Основними перевагами є зниження ризику для особового складу, здатність діяти в умовах радіоелектронних перешкод, автономність і висока точність ураження.

На рис. 2.7 зображений ударно-розвідувальний безпілотник *Bayraktar TB2*, який активно використовується у військових операціях. Апарат здатний перебувати у повітрі до 27 год., діяти на відстані до 150 км від наземної станції управління та оснащується високоточними боєприпасами, зокрема *MAM-L* та ПТКР *UMTAS*. Завдяки лазерному наведенню дрон виконує тактичну розвідку, спостереження за цілями та передачу даних у режимі реального часу для точного планування дій [7].



Рис. 2.7. *Bayraktar TB2* [7]



У табл. 2.5 наведено класифікацію дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів БПЛА за функціональним призначенням, з прикладами типових моделей для кожної категорії, описом їхнього застосування у практичних умовах та посиланнями на зображення апаратів у реальному середовищі експлуатації. Це дозволяє студентам візуально зіставити технічне призначення БПЛА з їхнім фактичним використанням у військовій, рятувальній, аграрній та моніторинговій сферах.

Таблиця 2.5. Класифікація за призначенням
дистанційно керованих БПЛА.

Категорія призначення	Типовий приклад	Опис	Посилання на джерела
Розвідувальні	Лелека-100, Фурія, Shark	Українські БПЛА, призначені для ведення аеророзвідки, спостереження та збору даних у режимі реального часу. Оснащені оптико-електронними системами, здатні працювати в умовах радіоелектронної боротьби	Лелека-100 в роботі, Фурія в небі. https://espresso.tv/poyasnuemo-leleki-shcho-nesutne-nove-zhittya-asmert-rosiyanamvse-pro-ukrainskiy-bpla-leleka-100-yakiy-nazivayut-ochima-ukrainskoi-artilerii Shark на випробуваннях https://military.com/uk/news/chehiyuzatsikavyv-ukrayinskyj-dron-shark-jogopomityly-navyprobuvannya



Категорія призначення	Типовий приклад	Опис	Посилання на джерела
Моніторингові	DJI Mavic 3 Multispectral	Квадрокоптер з високоякісною камерою та мультиспектральним сенсором, використовується для тривалого спостереження за об'єктами, інфраструктурою та навколишнім середовищем. Оснащений GPS та можливістю передачі даних у реальному часі	DJI Mavic 3M в дії https://enterprise.dji.com/mavic-3-m
Сільськогосподарські	DJI Agras T40	Безпілотник для точного землеробства: обприскування, внесення добрив, моніторинг стану посівів. Оснащений мультиспектральними камерами та системами RTK-навігації	DJI Agras T40 в роботі https://www.dji.com/t40
Рятувальні	DJI Mavic 3T	Дрон, обладнаний тепловізором, гучномовцем та системами виявлення, використовується для пошуку та порятунку людей у важкодоступних місцях, під час стихійних лих	DJI Mavic 3T в дії https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise
Військові	Bayraktar TB2	Бойовий безпілотник для виконання ударних, розвідувальних та спеціальних операцій. Оснащений високоточними боєприпасами, системами РЕБ та ШІ для автономного виконання завдань	Bayraktar TB2 в операції https://uk.wikipedia.org/wiki/Bayraktar_TB2



2.4. Класифікація за способом запуску / переміщення

Вертикальний зліт і посадка (VTOL) – це здатність повітряного безпілотного апарата злітати та сідати вертикально без злітної смуги. Такі апарати поєднують переваги літаків (ефективність польоту на великі відстані) і коптерів (зліт і посадка в обмеженому просторі). Конструктивно VTOL-дрони можуть бути мультикоптерами, літаками з відкидними пропелерами або гібридними системами з вертикальними та горизонтальними двигунами. Вони особливо ефективні в умовах обмеженої інфраструктури – наприклад, у міській забудові, лісовій місцевості або на кораблях.

Ручний запуск – це найпростіший спосіб запуску повітряного безпілотного апарата, за якого оператор тримає його в руках і запускає шляхом кидка в повітря або активації двигуна з рук. Такий метод переважно використовується для легких БПЛА літакового типу, які мають достатні аеродинамічні характеристики для миттєвого підйому після кидка. Перевагами ручного запуску є мобільність, простота реалізації та відсутність потреби в додатковому обладнанні. Водночас цей спосіб потребує певних навичок від оператора та не підходить для важких або габаритних апаратів.

Запуск із катапульты – спосіб старту повітряного безпілотного апарата, за якого спеціальний пристрій (катапульта) надає апарату необхідне прискорення для початку польоту. Катапульты можуть бути механічними (пружинними), пневматичними, гідравлічними або електромагнітними. Вони дозволяють запускати БПЛА з обмежених ділянок місцевості, де відсутня злітна смуга. Такий спосіб особливо актуальний для апаратів літакового типу, які потребують початкової швидкості для створення підйомної сили. Перевагами є безпечний і стабільний запуск навіть у складних погодних умовах, точність старту та можливість автоматизації процесу.

Автоматичний (дистанційний старт із платформи) – це спосіб старту повітряного безпілотного апарата, за якого ініціація відбувається за попередньо запрограмованою командою або командою оператора з контрольного пункту, без безпосередньої фізичної взаємодії з апаратом. Зазвичай використовується з наземною стартовою платформою або мобільною станцією. Такий запуск може здійснюватися за допомогою автопілотної системи або через інтерфейс програмного забезпечення. Перевагами є висока точність старту, мінімізація



людського фактору, можливість запуску у важкодоступних місцях, а також інтеграція з автоматизованими сценаріями місії (наприклад запуск за графіком або після аналізу погодних умов).

У табл. 2.6 наведено класифікацію дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів БПЛА за способом запуску або переміщення, зокрема з вертикальним зльотом і посадкою (VTOL), ручним запуском, стартом із катапульты та автоматичним запуском із платформи. Кожний спосіб супроводжується стислим описом, прикладом апарата з ілюстрацією й технічними характеристиками, які демонструють умови використання та функціональні переваги. Таблиця ілюструє різноманіття технічних підходів до запуску БПЛА залежно від їхніх конструкції, маси та середовища експлуатації.

Таблиця 2.6. Класифікація дистанційно керованих БПЛА
за способом запуску / переміщення

Спосіб запуску / переміщення	Опис	Приклад апарата (з фото)	Опис апаратів, які представлені як приклад
Вертикальний зліт і посадка (VTOL)	Здатність БПЛА злітати та сідати вертикально без злітної смуги. Поєднує ефективність польоту літака та маневреність коптера	https://wingtra.com/	Професійний VTOL-дрон для геодезії. Має вертикальний зліт і посадку, оснащений камерою Sony RX1RII, підтримує RTK-навігацію. Призначений для високоточного картографування на великих площах
Ручний запуск	Оператор запускає легкий БПЛА, кидаючи його в повітря або активуючи двигун з рук. Підходить для легких літаків з хорошою аеродинамікою	https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/tekever/ar4-modular-uas/#product-gallery-1	Надкомпактний квадрокоптер із запуском з руки. Оснащений камерою 12 Мп, GPS-стабілізацією, жестовим управлінням. Ідеальний для оперативного фото- і відео-захоплення



Спосіб запуску / переміщення	Опис	Приклад апарата (з фото)	Опис апаратів, які представлені як приклад
Запуск із катапульти	Катапульта надає БПЛА початкову швидкість для польоту. Застосовується для запуску без злітної смуги, особливо в польових умовах	https://ukrspecsystems.com/drones/shark-m-uas	Українська пневматична катапульта для запуску БПЛА до 20 кг. Швидко розгортається, працює незалежно від місцевості. Використовується військовими та рятувальниками
Автоматичний запуск з платформи	Запуск ініціюється дистанційно або за розкладом без участі людини. Працює з автопілотом або хмарними системами управління	https://www.targetarm.com/?utm_source=chatgpt.com	Автоматична станція для запуску дронів DJI Matrice 30. Оснащена зарядкою, зв'язком, термоконтролем. Дає змогу запускати дрони цілодобово без присутності оператора



Рекомендовані джерела інформації

- ISO 21895:2020 – *Unmanned Aerial Vehicles – Classification and terminology*.
- *ArduPilot Documentation* – <https://ardupilot.org>
- *PX4 Autopilot* – <https://px4.io/>
- *NATO STANAG 4586 – Standard Interfaces of UAV Control Systems*.
- Публікації *IEEE Robotics and Automation Magazine*.

Висновок

Розділ дає здобувачу освіти комплексне розуміння класифікації дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (БПЛА), сучасних безпілотних технологій та їхнього практичного застосування. Систематизація знань за критеріями середовища функціонування, конструкції, призначення та способу запуску дозволяє чітко орієнтуватися в різноманітті моделей і технічних рішень. Аналіз технічних характеристик і прикладів використання демонструє широкі можливості БПЛА – від аграрного моніторингу та екологічних досліджень до рятувальних і військових операцій. Отримані знання дають змогу обирати доцільний тип апаратів залежно від умов, завдань і ресурсів, а також ефективно використовувати БПЛА у професійній діяльності.



ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

- Які основні критерії застосовуються для класифікації дистанційно керованих БПЛА?
- Чим відрізняються літакові, гвинтокрилі та мультироторні БПЛА за характеристиками та сферою застосування?
- Які переваги та недоліки мають моноблочні, модульні та складані конструкції БПЛА?
- Наведіть приклади розвідувальних, моніторингових та сільськогосподарських безпілотників і поясніть специфіку їхнього застосування.
- Які особливості має вертикальний зліт і посадка (VTOL) порівняно з ручним запуском або запуском із катапульты?
- Як технічні характеристики (маса, швидкість, тривалість роботи, вантажопідйомність) впливають на вибір БПЛА для конкретного завдання?
- Чому для роботи у вітряну погоду на великих площах перевага надається БПЛА літакового типу?
- Які чинники необхідно враховувати при визначенні доцільності використання того чи іншого типу БПЛА?
- Як використання мультиспектральних камер розширює функціональні можливості БПЛА в сільському господарстві?
- Які стандарти та нормативні документи регламентують класифікацію та експлуатацію БПЛА?

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАНЬ

Питання: Який тип БПЛА краще використовувати для моніторингу сільськогосподарських полів площею понад 1000 га в умовах сильної вітряності?

Варіанти:

- А) Мультироторний БПЛА.
- Б) БПЛА літакового типу.
- В) Наземний БПЛА.
- Г) Підводний БПЛА.

Правильна відповідь: Б) БПЛА літакового типу.



Джерела інформації:

1. <https://diydrone.com/profiles/blogs/finwing-based-tiger-drone-test-flight>
2. <http://www.drones-mart.com/product/10026/Tiger-Shark-VTOL-3500mm-airframe>
3. <https://espresso.tv/poyasnuemo-leleki-shcho-nesut-ne-nove-zhittya-a-smert-rosiyanam-vse-pro-ukrainskiy-bpla-leleka-100-yakiy-nazivayut-ochima-ukrainskoi-artilerii>
4. <https://talosdrones.com/products/dji-mavic-3-multispectral>
5. <https://talosdrones.com/products/talos-t60x-sprayer-drone>
6. https://ecodrive.in.ua/kvadrokopter-dji-mavic-3e-cp-en-00000411-01/?utm_source=google&utm_campaign=PM_drones&utm_medium=cpc&utm_term=&gad_source=1&gad_campaignid=20758980711&gbraid=0AAAAAot7CEL7_5__T5kuKWoda8DrFzf55&gclid=Cj0KCQjwxo_CBhDbARIsADWpDH6_eCGh_IBv8zRICNjbhrH6_B6y3i1RbG5q3YzQs21yZNVjlpBKedkaAtK-EALw_wcB
7. <https://nv.ua/ukraine/events/bayraktar-tb2-aist-100-switchblade-puma-chto-mogut-ukrainskie-bespilotniki-novosti-ukrainy-50250235.html>



РОЗДІЛ 3

Основи аеродинаміки та фізики польоту безпілотних літальних апаратів

Автори: Микола Іванович БИКОВ
Павло Володимирович ГОРЯЧЕВ

Після опрацювання цієї теми здобувач освіти:

- ознайомиться з основами класифікації безпілотних літальних апаратів (БПЛА) за призначенням, конструктивними особливостями, типами систем автономності та сферами застосування;
- набуде знань про основи аеродинаміки та фізики польоту, зокрема підйомну силу, вагу, тягу та аеродинамічний опір, а також про вплив погодних умов на стабільність і безпечність польоту;
- дізнається про специфіку застосування різних типів БПЛА в аграрному, оборонному, моніторинговому, рятувальному та картографічному напрямках з урахуванням аеродинамічних характеристик;
- навчиться обирати оптимальний тип БПЛА залежно від завдань, середовища та аеродинамічних параметрів;
- оволодіє розумінням функціоналу апаратних і програмних систем, взаємодії сил у польоті, принципів стабільності, рівноваги та впливу погодних факторів на роботу БПЛА.



У цьому розділі наведено глибоке і детальне пояснення основних принципів аеродинаміки, які визначають фізику польоту безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Розтлумачено ключові поняття, а також докладно розглянуто сили, які впливають на рух та стабілізацію БПЛА в повітрі, зокрема підйомну силу, вагу, тягу та аеродинамічний опір. Особливу увагу приділено умовам досягнення рівноваги та стабільності апарату в польоту, а також механізмам, що забезпечують збереження заданого курсу та висоти. Окремо проаналізовано вплив різноманітних погодних факторів, як-от вітру, температури, атмосферного тиску, опадів і вологості – на безпеку, стабільність і точність виконання польотних завдань.

3.1. Фізичні принципи польоту БПЛА

Підйомна сила (L) виникає внаслідок особливої форми різниці тиску над і під крилом або пропелером БПЛА. Завдяки особливій формі крила повітряний потік над його верхньою поверхнею прискорюється швидше, ніж під нижньою. Відповідно до закону Бернуллі, зі збільшенням швидкості руху повітря над крилом тиск повітряного потоку зменшується. Різниця тиску між верхньою та нижньою поверхнями крила створює підйомну силу, що протидіє вазі апарату і забезпечує його утримання в повітрі. Величина підйомної сили залежить від характеристик повітряного потоку, площі крила та аеродинамічних особливостей його профілю. Формула підйомної сили:

$$L = \frac{C_L V^2 \rho S}{2} \quad (3.1)$$

де C_L – коефіцієнт підйомної сили, що залежить від конструкції крила та кута атаки; зі збільшенням коефіцієнта зростає підйомна сила;
 V – швидкість польоту відносно потоку повітря (м/с);
 ρ – густина повітря (кг/м³), зі збільшенням густини підйомна сила зростає;
 S – площа крила (м²), чим більша площа, тим більшою є підйомна сила.



Вага (W) – сила тяжіння, яка діє на апарат у напрямку до центру Землі. Це фундаментальна фізична сила, яка впливає на будь-який об'єкт із масою, розташованою у гравітаційному полі. Вага прямо пропорційна масі апарата (m), яка визначається як кількість речовини, що міститься в об'єкті, та прискоренню вільного падіння ($g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$), яке характеризує прискорення тіла під дією гравітації без урахування опору повітря. Точне визначення ваги апарату є необхідним для розрахунку підйомної сили та забезпечення стабільного польоту:

$$W=mg \quad (3.2)$$

Для стабільного польоту необхідно, щоб підйомна сила дорівнювала вазі апарата.

Тяга (T) – це сила, яка генерується двигуном або двигунами БПЛА, спрямована вперед уздовж осі руху апарату. Вона забезпечує переміщення апарата, набір швидкості, виконання маневрів і підтримання заданої траєкторії польоту, компенсуючи аеродинамічний опір. Величина тяги залежить від типу двигуна (електричний, бензиновий або реактивний), кількості та розташування двигунів, їхнього розміру й кроку, а також потужності системи приводу, гвинтів або турбін, їхнього розміру й кроку, а також потужності системи приводу. Оптимізація параметрів тяги дозволяє досягти балансу між ефективністю споживання енергії і необхідною потужністю для виконання польотних завдань.

Аеродинамічний опір (D) – сила, яка протидіє руху БПЛА внаслідок його взаємодії з повітряним середовищем. Вона виникає через два основні механізми. Профільний опір зумовлений тертям повітря об поверхню корпусу, крила та інших елементів, що порушують обтічний контур апарата. Його величина залежить від форми апарата, гладкості поверхні та властивостей матеріалів. Індуктивний (вихровий) опір пов'язаний з утворенням вихорів на кінцях крил унаслідок різниці тиску між верхньою та нижньою поверхнями крила. Це явище супроводжується додатковими втратами енергії. Мінімізація аеродинамічного опору є важливим завданням під час проектування БПЛА, оскільки він безпосередньо впливає



на ефективність використання енергії та максимальну дальність польоту. Формула аеродинамічного опору:

$$D=\frac{\rho V^2 C_d A}{2} \quad (3.3)$$

де C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору, що залежить від форми апарата, гладкості поверхні, аеродинамічних характеристик конструкції;
 A – площа поперечного перерізу (площа проєкції об'єкта, перпендикулярно до напрямку руху), м^2 .

3.2. Аеродинамічні характеристики літальних апаратів

Коефіцієнт підйомної сили (C_L) – характеризує ефективність крила щодо створення підйомної сили та змінюється залежно від кута атаки, профілю крила та швидкості польоту.

Коефіцієнт аеродинамічного опору (C_d) – визначає величину опору руху, його зменшення підвищує ефективність польоту.

Аеродинамічна якість – співвідношення коефіцієнтів підйомної сили та опору:

$$E=\frac{C_L}{C_d} \quad (3.4)$$

Чим вища аеродинамічна якість, тим менші енергетичні витрати та більша тривалість польоту.

Рівновага у польоті БПЛА – це стан, за якого всі сили, що діють на апарат, взаємно врівноважені, і він перебуває у стабільному та керованому режимі. Умови рівноваги включають вертикальну і горизонтальну компоненти:

- **вертикальна рівновага** досягається тоді, коли підйомна сила повністю компенсує вагу апарата. Це означає, що апарат не змінює висоту та утримує заданий рівень польоту;
- **горизонтальна рівновага** виникає, коли тяга двигуна дорівнює аеродинамічному опору. Тоді апарат рухається з постійною швидкістю без прискорення або сповільнення.



Забезпечення рівноваги є важливою умовою безпеки польоту, оскільки навіть незначні дисбаланси можуть спричинити втрату стабільності та неконтрольовані маневри.

Стабільність – це властивість літального апарата повертатися до початкового або заданого положення після порушення рівноваги під дією зовнішніх чи внутрішніх чинників. Вона має вирішальне значення для безпечного та прогнозованого керування БПЛА, бо забезпечує збереження керованості під час зміни умов польоту, зокрема при вітрі, турбулентності або виконанні маневрів. Стабільність залежить від багатьох чинників, як-от форми та розташування крил, хвостових стабілізаторів, розміщення центру ваги і конструктивних особливостей апарата. Основні види стабільності:

- **поздовжня стабільність** – забезпечує стабільність за тангажем і запобігає коливанням у площині «вгору-вниз»;
- **поперечна стабільність** – характеризує стійкість за креном і необхідна для збереження рівного положення під час маневрування;
- **курсорова стабільність** – стабільність за напрямком руху, важлива для утримання заданого курсу.

На рис 3.1 показано дрон у польоті з нахилом під кутом до вертикалі. Схематично зображено сили, що діють на апарат: силу тяжіння,

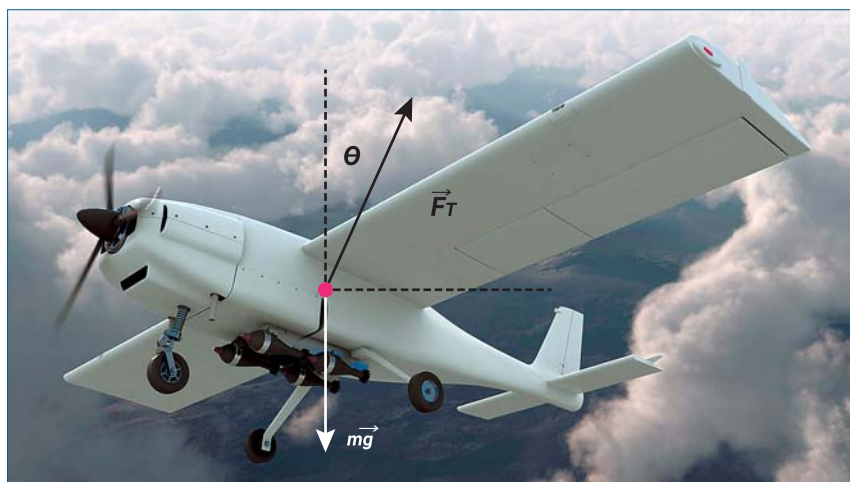


Рис. 3.1. Сили в польоті під кутом: тяга та сила тяжіння [1]



спрямовану вертикально вниз, і силу тяги, створену обертанням пропелерів і спрямовану під кутом. Такий нахил дрона характерний для руху вперед: коли апарат змінює положення у просторі, тяга має вертикальний та горизонтальний складники [1].

Ця конфігурація дозволяє зрозуміти механіку польоту: вертикальна складова тяги врівноважує вагу дрона й забезпечує його утримання в повітрі, тоді як горизонтальна складова спричиняє поступальний рух. Змінюючи кут нахилу та величину тяги, дрон може маневрувати, прискорюватися або гальмувати. Зображення ілюструє практичне застосування другого закону Ньютона під час аналізу руху тіла за умови зміни напряму дії сили.

На зображенні рис 3.2 показано схематичне пояснення утворення підйомної сили на аеродинамічному профілі – типовій формі крила або лопаті пропелера. Повітряний потік, що обтікає профіль, розділяється: над верхньою поверхнею повітря рухається швидше,

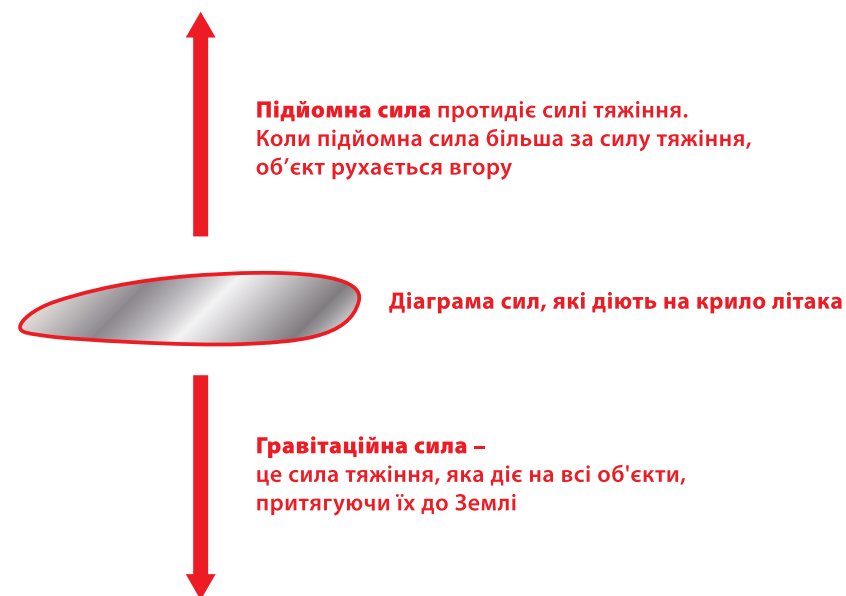


Рис. 3.2. Принцип утворення підйомної сили на аеродинамічному профілі [2]



ніж під нижньою. Через це, згідно з принципом Бернуллі, над крилом утворюється зона зниженого тиску, а під ним – зона підвищеного тиску. Різниця тисків формує підйомну силу, спрямовану вгору, що дозволяє тілу підійматися в повітря або підтримувати стабільний політ [2].

Цей принцип є основою роботи як літаків, так і безпілотних літальних апаратів (дронів). У дронів підйомна сила створюється не лише завдяки формі лопатей, а й їхнім обертанням: швидке обертання змушує повітря проходити над профілем і формує відповідну аеродинамічну реакцію. Завдяки зміні швидкості обертання окремих пропелерів дрон може змінювати висоту, курс, крен і тангаж, що забезпечує повноцінне маневрування в тривимірному просторі.

На рис. 3.3 зображено схематичну ілюстрацію утворення тяги пропелером квадрокоптера з поясненням на основі рівняння Бернуллі. Центральним елементом є диск пропелера,

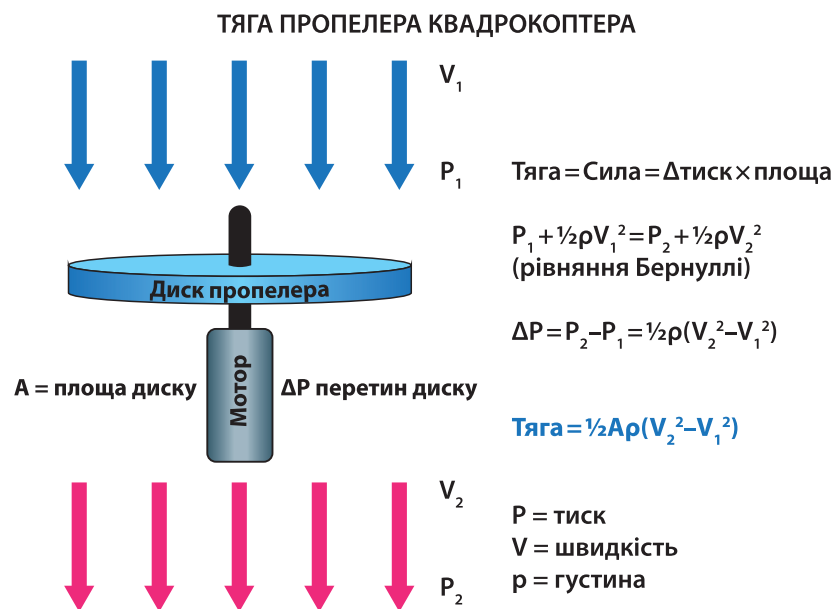


Рис. 3.3. Тяга пропелера квадрокоптера на основі рівняння Бернуллі [3]



який розділяє два потоки повітря: зверху – з меншим тиском і швидкістю (P_1, V_1), і знизу – з вищими значеннями (P_2, V_2). Це відображає роботу пропелера, який прискорює повітряний потік, створюючи різницю тисків (ΔP) між верхньою і нижньою частинами [3].

Праворуч наведено виведення формули тяги:

- використано рівняння Бернуллі для ідеального нестисливого потоку;
- тяга T обчислюється як добуток площі диска A на перепад тиску:

$$T = \frac{1}{2}\rho A \rho (V_2^2 - V_1^2) \quad (3.5)$$

Ця формула показує, що чим більша різниця квадратів швидкостей повітря над і під диском пропелера, тим більша сила тяги генерується. Таким чином, тяга залежить від швидкості повітря, його густини та площі, яку охоплює пропелер.

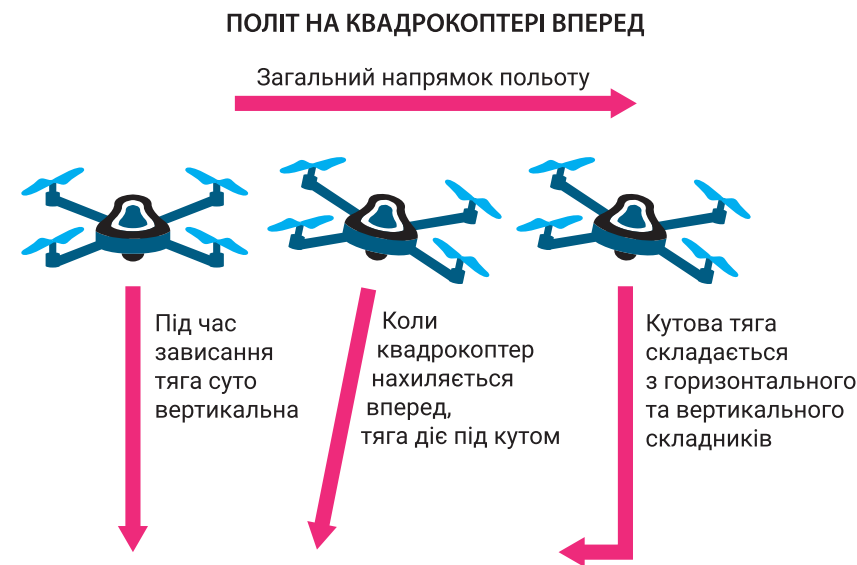


Рис. 3.4. Принцип створення поступального руху дрона: розклад сили тяги під час польоту вперед [2]



На рис. 3.4 показано механіку поступального польоту квадрокоптера вперед (*forward flight*). Ілюстрація складається з трьох фаз, які відображають зміну положення дрона та напрямку сили тяги (дві перші стрілки), а також загальний напрямок польоту (горизонтальна стрілка) [2].

У першій фазі (зліва) дрон зависає – його сила тяги спрямована суворо вертикально вгору, що врівноважує силу тяжіння. У другій фазі (центр) дрон нахилиється вперед (*pitch forward*), і напрямок сили тяги змінюється, утворюючи кут від вертикалі. У третій фазі (справа) похила сила тяги має два складники: вертикальний (який продовжує протидіяти гравітації) та горизонтальний, який забезпечує поступальний рух уперед. Таким чином, маневрування вперед досягається за рахунок нахилу корпусу дрона й утворення горизонтальної компоненти сили тяги.

3.3. Вплив погодних умов на безпечність і точність польоту

Вітер

Попутний вітер збільшує дальність польоту, зустрічний – зменшує швидкість, а боковий – ускладнює утримання курсу та може вимагати додаткових корекцій.

Температура

Висока температура знижує густину повітря, зменшуючи ефективність створення підйомної сили. Це вимагає збільшення швидкості польоту або зменшення ваги апарата.

Дош і вологість

Дош збільшує вагу апарата, погіршує аеродинаміку та може впливати на електронні компоненти, що підвищує ризик аварії.

Атмосферний тиск

Впливає на густину повітря. При зниженому тиску повітря стає менш щільним, що вимагає збільшення тяги для підтримки висоти польоту.



3.4. Визначення критичних умов

Критичні ситуації – це умови, що загрожують стабільності та безпеці польоту БПЛА під час перевищення нормальних експлуатаційних меж. У таких випадках літальний апарат може втратити контрольованість, стабільність або мати нижчу ефективність виконання завдання, що потенційно призводить до аварій або повної втрати апарата. Важливо передбачати і своєчасно реагувати на критичні умови, використовуючи знання аеродинаміки, фізики польоту та аналізу погодних умов.

Великий кут атаки – це ситуація, коли кут між хордою крила та напрямком потоку повітря що набігає, стає настільки великим, що ламінарний (гладкий) потік повітря відривається від верхньої поверхні крила, переходячи в турбулентний (вихровий). Це порушує ефективне створення підйомної сили, оскільки верхня поверхня крила більше не здатна підтримувати необхідну різницю тисків. Як наслідок, підйомна сила різко падає, що може призвести до неконтрольованого зниження висоти або навіть втрати керованості.

Недостатня швидкість польоту виникає, коли БПЛА рухається повільніше за критичну швидкість, необхідну для підтримки стабільної підйомної сили. При цьому повітряний потік, над аеродинамічними поверхнями, стає недостатнім, що призводить до зриву ламінарного потоку повітря на крилі. Це явище, відоме як «звалювання», супроводжується різкою втратою висоти та керованості, переходячи в неконтрольоване зниження. Щоб уникнути такого стану, потрібно ретельно контролювати швидкість та дотримуватися рекомендованих швидкісних режимів польоту.

Небезпечні метеорологічні умови (сильні пориви вітру, грози, обледеніння) створюють екстремальні зовнішні навантаження, які можуть перевищувати проєктні характеристики БПЛА. Сильні пориви вітру порушують стабільність апарата, бо спричиняють значні кренові та тангажні коливання. Грози небезпечні через турбулентність, електромагнітні перешкоди для навігаційних систем і ризик удару блискавки. Обледеніння збільшує вагу апарата, змінює аеродинамічну форму крил і гвинтів та знижує підйомну силу та ефективність гвинтів. Усі ці фактори можуть спричинити втрату



керованості, аварійне завершення польоту або повне знищення апарата. Тому важливо уникати польотів у таких умовах або використовувати спеціалізовані системи захисту та компенсування ризиків.

Висновок. Аеродинаміка є фундаментальною основою успішної експлуатації БПЛА, оскільки саме вона визначає здатність апарата підійматися, утримувати висоту, маневрувати та ефективно виконувати завдання. Розуміння взаємодії основних сил – підйомної, ваги, тяги та аеродинамічного опору – дозволяє оптимізувати конструкцію та параметри експлуатації. Знання впливу погодних умов і критичних ситуацій, пов'язаних із великим кутом атаки, недостатньою швидкістю чи складними атмосферними явищами, є запорукою безпечного польоту. Компетентність у цих питаннях дає змогу обирати оптимальні режими польоту та знижувати ризики під час виконання місій.



ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

- Які основні сили діють на БПЛА під час польоту та яку роль вони виконують?
- Що таке коефіцієнт підйомної сили та від чого він залежить?
- Як формується аеродинамічний опір і які його види існують?
- У чому полягає різниця між вертикальною та горизонтальною рівновагою БПЛА?
- Що таке поздовжня, поперечна та курсова стабільність?
- Як вітер впливає на дальність і стабільність польоту?
- Чому висока температура та знижений тиск зменшують ефективність створення підйомної сили?
- Які ризики виникають при великому куті атаки та як їх уникнути?
- Що таке «звалювання» і за яких умов воно відбувається?
- Які погодні умови вважаються критичними для польоту БПЛА?

Джерела інформації:

1. <https://blogs.berkshirecc.edu/berkshiretechnologist/2020/02/18/physics-of-drone-flight-now-with-maths/>
2. <https://thercdronehub.com/how-do-drones-work/>
3. https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/propeller-thrust/?utm_source=chatgpt.com



РОЗДІЛ 4

Налаштування дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів

Автори: Микола Іванович БИКОВ
Павло Володимирович ГОРЯЧЕВ
Назарій Олегович ПЕНЮК

Після опрацювання цієї теми здобувач освіти:

- **ознайомиться з основами класифікації дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (БПЛА)**, принципами їхнього налаштування, видами сенсорів, типами систем живлення та засобів зв'язку;
- **набуде знань** щодо алгоритмів передпольотної підготовки, калібрування, планування місій, налаштування обмежень і сценаріїв аварійних дій (*Failsafe*);
- **дізнається про специфіку застосування різних типів БПЛА** в повітряному, наземному, водному та підземному середовищах, а також про особливості налаштування апаратів для аграрних, розвідувальних, моніторингових та інших завдань;
- **навчиться визначати доцільність використання** конкретних параметрів і конфігурацій залежно від типу апарата, завдань місії, середовища експлуатації та вимог безпеки;
- **оволодіє розумінням функціоналу апаратної та програмної частин БПЛА**, зокрема систем навігації, стабілізації, зв'язку, енергоживлення та контролю польоту.



Налаштування дистанційно керованих БПЛА є критичним етапом підготовки до експлуатації, оскільки саме на цьому етапі закладаються параметри стабільної та безпечної роботи апарата. Правильно проведене налаштування визначає стабільність, точність, безпеку й ефективність виконання завдань. Воно дозволяє адаптувати систему до специфіки місії, умов довкілля, типу навантаження та сценарію використання. Неналежне або застаріле налаштування може призвести до серйозних збоїв, втрати апарата чи невиконання завдання.

Налаштування має виконуватись:

- після збірки, модифікації або ремонту БПЛА;
- при зміні місії або параметрів навантаження;
- після оновлення програмного забезпечення;
- перед польотами в новій географічній зоні;
- при зміні пілота або оператора системи.

Незалежно від призначення апарата – аграрні роботи, моніторинг, розвідка або доставка – ключовим є забезпечення повної синхронізації між апаратним і програмним забезпеченням та вимогами до виконання завдання. Це передбачає узгодження фізичних параметрів апарата (маса, потужність двигунів, тип сенсорів), логіки алгоритмів автопілота та умов місії (висота, рельєф, погодні умови, тривалість завдань). Відсутність такої синхронізації може призвести до помилок навігації, нестабільності руху БПЛА або навіть втрати апарата. Тому важливо налаштувати всі компоненти системи як єдине ціле, з урахуванням особливостей апарата та специфіки завдань, що виконуються.

4.1. Підготовка БПЛА до роботи

Перед налаштуванням необхідно здійснити всебічну перевірку технічного стану безпілотного апарата, з дотриманням стандартних інженерних протоколів обстеження, наприклад: перевірка вузлів за чеклистами технічної готовності, вимірювання напруги та опору електричних ланцюгів, діагностика обміну даними між модулями системи. Ця перевірка є базовим етапом, який дозволяє виявити механічні пошкодження, ознаки зношення компонентів, потенційно небезпечні несправності, а також гарантує коректність взаємодії всіх систем. Важливо не лише виявити дефекти, а й переконатися



у справності кріплень, кабельних з'єднань, гвинтів, навігаційних елементів і систем живлення.

Після тривалого зберігання, транспортування, ремонту або попереднього польоту обов'язково є детальна перевірка БПЛА. Слід оцінити стан корпусу, проводних з'єднань, цілісність пропелерів, батарей (заряд / розряд) і модулів зв'язку. Цей крок дозволяє запобігти критичним відмовам у повітрі та гарантує, що подальше калібрування і налаштування здійснюватиметься на справному обладнанні.

Якщо чеклисти перевірки та підготовки апарата не надані виробником, рекомендується створити їх для себе і постійно їх покращувати після кожної місії на етапі «аналіз після дії», додаючи в нього пункти, які можуть знадобитися на наступних місіях.

Загальний огляд для всіх типів БПЛА, оцінка цілісності апаратів (табл. 4.1).

Візуальний огляд корпусу: передбачає перевірку на наявність механічних пошкоджень, тріщин, деформацій, забруднень, які можуть вплинути на цілісність, мобільність, аеродинаміку. Повітряні апарати перевіряються щодо пошкоджень обтічників, стабілізаторів і лопатей, а також можливих порушень геометрії. Для мультироторних систем важливо перевіряти відсутність люфтів променів.

Особливу увагу приділяють всім різьбовим з'єднанням, місцям стику панелей, вентиляційним отворам і зонам монтажу навантаження. Під час огляду можуть бути виявлені типові проблеми, зокрема:

- розкручені через вібрацію різьбові з'єднання;
- мікротріщини від вібрації;
- тріщини, вм'ятини та порушення геометрії після падінь або зіткнень;
- корозія металевих компонентів, особливо після експлуатації у вологих умовах;
- залишки ґрунту, пилу, сажі або рослинності, що можуть перешкоджати вентиляції та охолодженню;
- сліди вологи всередині корпусу.

Нерівномірність стику панелей може свідчити про деформацію рами чи внутрішніх кріплень, що потребує додаткової діагностики в усіх типах апаратів. Візуальний огляд також включає легкий



фізичний контроль конструкції: обережні спроби розхитати промені мультироторів, перевірку крил літальних апаратів на надійність кріплення, а також інші безпечні механічні впливи на елементи та з'єднання БПЛА з метою перевірки їхньої цілісності.

Аналіз стану електроживлення: для всіх типів БПЛА – перевіряється рівень заряду акумуляторів (зокрема акумуляторів в наземній станції керування), їхня фізична цілісність: відсутність здуття, пошкоджень корпусу, корозії контактів, слідів перегрівання, протікання або механічного впливу. Стабільність напруги перевіряється під навантаженням як у режимі очікування, так і в активному русі / польоті.

Таблиця 4.1. Налаштування БПЛА

Етап	Об'єкт	Метод перевірки	Очікуваний результат
Візуальний огляд корпусу	Рама, стики	Візуальний	Відсутність тріщин, деформацій
Пропелери / гвинти	Лопаті, вал	Перевірка фіксації, балансування, пам'ятати про симетрію	Без вібрацій, тріщин
Електроживлення	Батареї	Вольтметр, візуально	±3 % від номіналу, без «надуття» / корозії
Комунікація	Анени, кабелі, з'єднання	Вимірювання сигналу, візуальний контроль	Стабільний обмін
Датчики / модулі	GPS, IMU, гіроскоп	Тест калібрування	Значення в межах допуску
Програмне забезпечення	Firmware (внутрішня програма), картографія	Перевірка версії, завантаження карт	Актуальні версії

Перевірка стану гвинтів і кріплень: оцінюється цілісність лопатей (відсутність тріщин, сколів, вигинів та інших пошкоджень). Перевіряється щільність фіксації гвинтів на валах моторів, балансування пропелерів, а також ступінь зносу або корозії металевих деталей. Частими проблемами є ослаблені кріплення, які можуть спричинити



вібрації в польоті, знижувати ефективність створення підйомної сили або навіть призвести до відриву гвинта під час роботи. У гвинтових системах з фіксованими кулачками необхідно перевіряти відсутність сторонніх предметів у механізмі. Для безпечного польоту гвинти повинні бути встановлені симетрично та обертатися рівно й без сторонніх шумів під час ручного прокручування. Усі перевірки гвинтів повинні виконуватися лише з фізично відключеним електроживленням, щоб уникнути травмування персоналу.

На рис 4.1 зображено інженера або оператора БПЛА, який виконує документування передпольотної перевірки. Він використовує чеклист компанії «Aerotas», відкритий на планшеті-кліпборді, та вручну заповнює необхідні дані (табл. 4.2). Поруч бачимо транспортний кейс з обладнанням, у якому видно: дрон *DJI Phantom* (типовий для аерофотозйомки), 4 акумулятори, контролер, зарядний блок, а також друковані матеріали – польотну інструкцію або оновлений чеклист [1].



Рис. 4.1. Передпольотна перевірка дрона за стандартами «Aerotas» [1]



Таблиця 4.2. Контрольний список компанії «Aerotas»

Aerotas КОНТРОЛЬНИЙ СПИСОК ДЛЯ ОГЛЯДУ ДРОНА	
<p>ПЛАНУВАННЯ МІСЦІ</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Перевірте геозонування дрона (dji.com/flysafe) <input type="checkbox"/> Перевірте обмеження на польоти FAA <input type="checkbox"/> Перевірте прогноз погоди <input type="checkbox"/> Отримайте дозвіл на проліт над місцем <input type="checkbox"/> Перевірте систему на наявність оновлень <input type="checkbox"/> Створіть траєкторію польоту <input type="checkbox"/> Збережіть траєкторію польоту офлайн 	<p>ПЕРЕДПОЛЬОТНИЙ ОГЛЯД</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Планер (без тріщин або розривів) <input type="checkbox"/> Акумулятор (без здуття або пошкоджень) <input type="checkbox"/> Пропелери (без тріщин або сколів) <input type="checkbox"/> Двигуни (чисті та неушкоджені) <input type="checkbox"/> Камера та стабілізатор (очищені та вільні) <input type="checkbox"/> Контролер (антена висунута)
<p>КОНТРОЛЬНИЙ СПИСОК УПАКОВКИ</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> БПЛА <input type="checkbox"/> Акумулятори для польоту (заряджені) <input type="checkbox"/> Контролер (заряджений) <input type="checkbox"/> Планшет (заряджений) <input type="checkbox"/> Карти пам'яті SD <input type="checkbox"/> Пропелери <input type="checkbox"/> Кабелі планшета <input type="checkbox"/> Контрольні списки для роботи 	<p>ПІДГОТОВКА ДО ПОЛЬОТУ</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Увімкніть контролер та літальний апарат <input type="checkbox"/> Переконайтеся, що на SD-карті достатньо місця <input type="checkbox"/> Перевірте загальний стан (зелена смужка в додатку DJI) <input type="checkbox"/> Виберіть місію на автопілоті <input type="checkbox"/> Переконайтеся, що обрана висота є відповідною до місцевості <input type="checkbox"/> Завантажте місію і натисніть «Пуск»
<p>ПІДГОТОВКА МІСЦЯ</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Перевірте місце на наявність перешкод (дерева, лінії електропередач, зміна висоти) <input type="checkbox"/> Перевірте погоду на придатність (швидкість вітру, температура та видимість) <input type="checkbox"/> Встановіть наземні контрольні точки <input type="checkbox"/> За потреби зберіть наземні дані 	<p>ПІСЛЯ ПОЛЬОТУ</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Вимкніть живлення та сховайте все обладнання <input type="checkbox"/> Запишіть інформацію про політ у льотні журнали <input type="checkbox"/> Розпочніть новий проект aerotas.com/app <input type="checkbox"/> Отримайте кошторис на доступні послуги з аналізу даних <input type="checkbox"/> Завантажте дані
<p>support@aerotas.com (949) 335-4323 aerotas.com/resources</p>	



Використання контрольних списків – це найпростіший і найнадійніший спосіб забезпечити точну зйомку за допомогою дронів.

Процедури налаштування параметрів БПЛА.

Процедура налаштування передбачає дії для адаптації програмного забезпечення та апаратної частини БПЛА до конкретних умов польоту.

Основними складниками є:

- встановлення базових параметрів, що відповідають масі й конструкції апарата згідно з технічними характеристиками та інструкціями до пристрою. Це включає визначення і налаштування таких величин, як коефіцієнти підйомної сили (для повітряних апаратів), тягові характеристики двигунів (для наземних і водних систем), обмеження потужності, швидкості обертання або пересування. Для БПЛА критично важливим є балансування між потужністю двигунів і аеродинамікою;
- оцінка відповідності обраного типу сенсорів (*IMU*, *GPS*, магнітометрів, ультразвукових або гідролокаційних датчиків) до завдань місії та розміщення цих сенсорів на корпусі апарата для мінімізації завад або втрат сигналу. Наприклад, водонепроникні сенсори для водних систем повинні мати відповідний ступінь захисту апарата. Характеристики живлення враховують тип батарей (*Li-Po*, *Li-Ion*, *NiMH*), їхню ємність, напругу, струм навантаження та відповідність до енергоспоживання системи [2].

Важливо. Неправильно задані базові параметри можуть призвести до перевантаження двигунів, нестабільної роботи автопілота, некоректної стабілізації руху, надмірного енергоспоживання, втрати зв'язку або навіть виходу апарата з ладу. Це ставить під загрозу безпеку експлуатації незалежно від типу середовища: повітря, ґрунт, підземні або водні умови. Налаштування обмежень по висоті, відстані, швидкості та допустимих зонах експлуатації відповідно до регламентів безпеки та сценарію використання передбачає введення параметрів, які запобігають виходу БПЛА за межі безпечного робочого простору.



Встановлення обмежувальних факторів (табл.4.3):

- для повітряних БПЛА обмежується максимальна висота польоту (щоб уникнути зіткнення з авіацією, вежами, електролініями), радіус дії (щоб залишатися в межах зони контролю та зв'язку), швидкість (для стабільного польоту в умовах вітру) та встановлюється конфігурація дій при втраті зв'язку (*failsafe*). Також налаштовуються «зони *No-Fly*» – території, до яких апарат не повинен заходити (аеропорти, військові об'єкти, густонаселені райони);
- для всіх типів апаратів важливими є налаштування алгоритмів регулювання швидкості та сили реакції (алгоритми *PID*-контролерів) силової частини апарата на команди оператора. Занадто чутливі налаштування викликають «перерегулювання», яке може перевантажити мотори, перевернути апарат, зробити його неконтрольованим, а надто грубі налаштування ускладнюють виконання місії через нездатність апарата виконувати потрібні маневри.

Таблиця 4.3. Налаштування БПЛА

Категорія налаштування	Конкретні параметри	Мета налаштування	Типові помилки / ризики
Базові технічні параметри	Коефіцієнт підйомної сили, потужність двигунів, тяга, швидкість, крутний момент	Оптимізація руху згідно з масою, конструкцією і сценарієм	Перевантаження двигунів, втрата стабільності, перегрів
Сенсорні системи	<i>IMU</i> , <i>GPS</i> , компас, ультразвук, гідролокатор, <i>IP</i> -рейтинг	Забезпечення точності та стабільності орієнтації, зв'язку	Завади сигналу, невідповідне розміщення, водонепроникність
Енергоживлення	Тип батареї (<i>Li-Po</i> , <i>Li-Ion</i> , <i>NiMH</i>), ємність, напруга, струм, напруга попередження, напруга вимкнення, сценарії дій при розрядці	Відповідність живлення до споживання	Недостатня потужність, перегрів, коротке автономне існування, передчасне вимкнення в польоті, неочікуване вимкнення



Категорія налаштування	Конкретні параметри	Мета налаштування	Типові помилки / ризики
Обмеження висоти / маршруту	Висота, радіус, швидкість, ухили, типи зон	Безпечна експлуатація в межах технічних і правових обмежень	Перевищення меж, вихід за межі зони контролю
<i>Failsafe</i> -конфігурації	Дії при втраті сигналу: <i>Hover, RTH (Return to Home), Land</i> . Час очікування до застосування сценарію	Уникнення втрати апарата	Неправильна конфігурація – втеча / падіння / травмування людей
Обмежені зони (геозони)	<i>No-fly zones</i> , приватна власність, судноплавні маршрути	Відповідність до норм безпеки та законодавства	Неправильні координати, застарілі дані, пропущені зони
Оцінка місцевості	Топографія, гідрографія, тип ґрунтів, глибина, течія, карти висот	Планування маршруту, безпечне маневрування	Неправильне трактування ландшафту, зіткнення або блокування
Розподіл енергоспоживання	Поділ живлення між мотором та сенсорами	Оптимальна стабільність систем	Раптове відключення сенсорів, порушення навігації
Налаштування «фільтрів»	Фільтрація паразитних вібрацій рами	Підвищення точності даних <i>IMU</i> (гіроскопа)	Перегрів моторів, вимкнення апарата, некерованість, втрата апарата
Налаштування <i>PID</i> -контролера	Налаштування швидкості і якості реакції апарата на команди оператора	Оптимальні налаштування реакції на команди та правильне налаштування компенсації «помилки керування»	Неконтрольований набір висоти, занадто різкі чи занадто повільні маневри, перекидання, втрата апарата



Категорія налаштування	Конкретні параметри	Мета налаштування	Типові помилки / ризики
Порядок розташування моторів та сервоприводів	Налаштування контролера, який мотор за що відповідає	Правильне розуміння контролером, який мотор «лівий», який «правий»	Переплутані маневри «наліво» та «направо», мультикоптер перекидається, у крила реагує на команду не той закрилос
Напрямок руху моторів	Налаштування контролера, які мотори керуються «інверсно»	Правильне керування моторами при подачі на них команд «Вперед» і «Назад»	«Танковий розворот» замість руху прямо. Мультикоптер перекидається. Крило чи водний ДКБА рухається навпаки
Напрямок пропелерів	Вказуємо контролеру напрямок, у якому крутяться пропелери (на камеру чи від неї)	На коптерах половина пропелерів має напрямок <i>CW</i> і половина <i>CCW</i> , поворот здійснюється перерозподілом обертів між ними	Апарат злітає, але при спробі повернути вліво чи вправо по <i>Yaw</i> перекидається (або вимикає мотори)

Налаштування дій при окремих виробничих ситуаціях.

Конфігурація дій на випадок втрати зв'язку (*failsafe*) або помилки навігації залежить від типу дистанційно керованого апарата. Можливі дії включають: повернення на точку старту (*RTL* чи *RTH*), аварійне приземлення, утримання в поточній позиції, перехід у режим очікування на заданій висоті, виконання останньої отриманої команди або спеціально налаштовані режими (наприклад підйом до отримання сигналу). Для режиму *Return to Home* зазвичай налаштовують висоту повернення, для аварійного приземлення – відсоток газу. Наприклад, якщо встановити 100 %, то апарат підніматиметься доти, доки не знайде сигнал.



Важливим налаштуванням є час очікування від моменту зникнення сигналу до застосування сценарію *failsafe*, який дозволяє апарату не реагувати на короткочасні переривання зв'язку.

У всіх випадках дії мають бути заздалегідь запрограмовані з урахуванням місії, обмежень середовища (повітря, ґрунт, підземні тунелі, водне середовище) та безпеки для навколишнього середовища і людей. Неправильно налаштовані дії в разі втрати сигналу можуть спричинити втрату апарата, аварійну ситуацію або загрозу іншим учасникам повітряного чи наземного простору. Після кожного налаштування *failsafe* необхідно провести тестування поведінки апарата при втраті зв'язку в умовах, наближених до реальних, у контрольованому середовищі.

На рис 4.2 наведено інтерфейс вкладки *Safety Setup* у програмному забезпеченні *QGroundControl*, яка використовується для конфігурації безпечної поведінки безпілотного літального апарата в разі критичних ситуацій. У секції *Low Battery Failsafe Trigger* встановлено пороги для трьох рівнів заряду акумулятора: *Battery Warn Level* – 15 % (рівень попередження), *Battery Failsafe Level* – 7 % (рівень активації процедури повернення на базу), *Battery Emergency Level* – 5 % (критичний рівень, коли апарат може здійснити посадку на поточній позиції) [3].

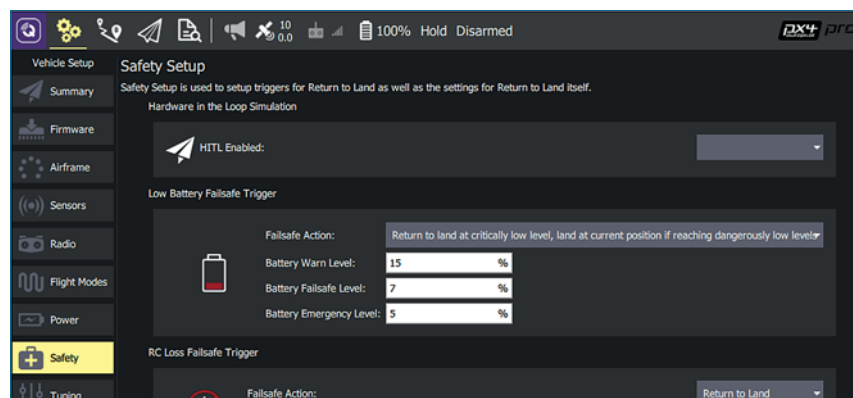


Рис. 4.2. Налаштування аварійних режимів (*Failsafe*) за низького заряду акумулятора та втрати зв'язку з оператором у *PX4 / QgroundControl* [3]



Також активовано *RC Loss Failsafe Trigger*, що забезпечує автоматичну активацію функції *Return to Land* при втраті зв'язку з пультом керування. Такі налаштування критично важливі для запобігання аваріям під час польоту та захисту обладнання.

4.2. Система живлення та її налаштування

Система живлення є важливим елементом будь-якого дистанційно керованого БПЛА. Вона забезпечує безперервну роботу всіх модулів, рушійних систем, навігаційного обладнання, засобів зв'язку та датчиків. Надійність і правильне налаштування системи живлення безпосередньо впливають на тривалість місії, безпечне керування та ефективність виконання завдань. Втрата живлення в більшості випадків означає втрату апарата.

Успішна експлуатація БПЛА значною мірою залежить від стабільності та надійності системи живлення. Правильний добір джерел енергії, їхнє налаштування та регулярне технічне обслуговування дозволяють уникнути критичних ситуацій та забезпечити тривалу роботу апарата в польових умовах.

В БПЛА часто використовують акумулятори як основне джерело живлення через автономність, легкість встановлення та високу енергетичну щільність. Найпоширенішими є літій-полімерні (*Li-Po*), літій-іонні (*Li-Ion*) та літій-залізо-фосфатні (*LiFePO4*) батареї. Кожен тип має свої особливості: *Li-Po* – легкі та потужні, але чутливі до перезаряду і механічних пошкоджень; *Li-Ion* – стабільніші при тривалому зберіганні; *LiFePO4* – довговічніші та безпечніші, але важчі. Вибір типу акумулятора залежить від завдання, тривалості місії, маси апарата та вимог до безпеки. Перед використанням батареї піддають циклу повного заряджання / розряджання для стабілізації параметрів, а також перевіряють на відповідність до номінальної ємності та напруги кожного елемента акумуляторної збірки.

Вимоги до системи живлення.

Для БПЛА особливо важливо, щоб потужність джерела живлення відповідала тяговим характеристикам апарата – здатності підтримувати необхідну підйомну силу та стабільність польоту.



Це стосується як квадрокоптерів з багатьма осями, так і фіксовано-крилих платформ. Живлення повинне забезпечувати безперебійну роботу на пікових навантаженнях, які виникають під час зльоту, маневрування та корекції курсу в умовах вітру.

Налаштування системи живлення включає:

- **вибір джерел живлення** (*Li-Po, Li-Ion, LiFePO4* акумулятори) залежить від типу апарата, робочого струму та очікуваної тривалості місії. Для цього аналізують енергоспоживання на кожному етапі місії, враховують пікові навантаження та очікувані температурні умови. Обирається конфігурація з урахуванням максимальної безпеки, стабільності та сумісності з контролерами живлення, з подальшим тестуванням на макетах або в симуляції. Також перевіряється балансування елементів батареї та відповідність внутрішнього опору до встановлених норм;
- **параметричне калібрування контролерів живлення:** перевірка точності вимірювання напруги, струму й температури. Процедура передбачає підключення каліброваних джерел сигналу до входів контролера живлення та зчитування фактичних даних, які потім порівнюють зі стандартними еталонними значеннями. Відхилення фіксуються, після чого вносяться коригувальні коефіцієнти у програмне забезпечення. Також перевіряється швидкодія контролера в умовах змінного навантаження та стабільність вимірів у динаміці місії. У разі потреби оновлюється прошивка контролера до останньої стабільної версії для забезпечення сумісності з новими акумуляторами та навісним обладнанням;
- **налаштування порогів аварійного відключення або аварійного повернення** (*Failsafe*), якщо напруга падає нижче за критичний рівень. Встановлення порогів виконується через відповідне програмне забезпечення (наприклад *Mission Planner* або *QGroundControl*) з урахуванням типу батареї, її номінальної напруги та особливостей навантаження. Оператор задає порогові значення напруги (*Low Battery Warning, Critical Battery Action*) та визначає реакцію апарата – наприклад, автоматичне повернення на базу (*RTL*), м'яка посадка або вимкнення навантаження. Після внесення змін проводиться тестування-симуляція поведінки системи, щоб переконатися в адекватній реакції при досягненні критичних



параметрів. У складних місіях зі змінним навантаженням рекомендується використовувати додаткові алгоритми компенсації просядок напруги та адаптивного порогового моніторингу.

На рис. 4.3 показано вкладку *Power Setup* у середовищі *QGround Control*. Вкладка використовується для конфігурації параметрів акумулятора та калібрування регуляторів швидкості (*ESC*). Вказано такі налаштування: *Number of Cells (in Series)*: 3S – трипослідовно з'єднані елементи акумулятора. *Full Voltage (per cell)*: 4.05 V – напруга повністю зарядженого осередку. *Empty Voltage (per cell)*: 3.40 V – мінімально допустима напруга. *Battery Max*: 12.2 V, *Battery Min*: 10.2 V – обчислені межі напруги батареї. *Voltage divider*: 10.17793941 – коефіцієнт поділу для точного вимірювання напруги. *Amps per volt*: 15.39 – калібрування струмового датчика [4].

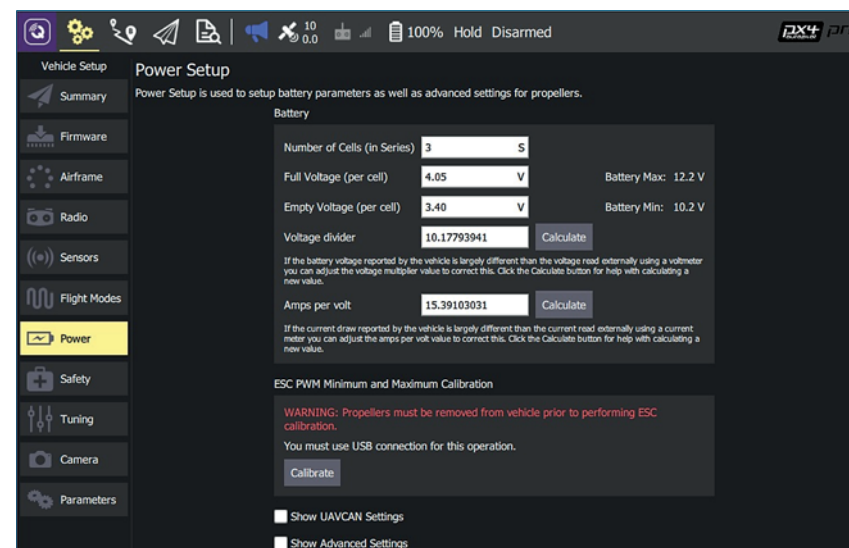


Рис. 4.3. Налаштування параметрів живлення та калібрування *ESC* у *PX4/QgroundControl* [4]

У нижній частині екрану також наведено попередження щодо *ESC PWM Calibration*: перед виконанням калібрування *ESC* необхідно зняти пропелери та користуватися *USB*-з'єднанням для безпечної конфігурації. Це критичний етап у підготовці до польоту для забезпечення точного управління тягою та захисту апарата.

**Важливо:**

- **використання сертифікованих зарядних пристроїв**, що відповідають параметрам батареї та підтримують багатоступеневий контроль заряджання (балансування комірок, захист від перегріву, таймери тощо);
- **зберігання акумуляторів**. Якщо акумулятор не планується використовувати якийсь час (для літєвих – 3–5 днів), його заряджають / розряджають до номінальної напруги, і в цьому стані він може зберігатися довгий час без погіршення своїх характеристик. Цей режим називається «Storage», він присутній у сучасних зарядних пристроях. *Li-Po*, *Li-Ion* та інші акумулятори є пожежонебезпечними, тому їх слід зберігати в спеціальних металевих ящиках. Акумулятори з пошкодженою оболонкою або здуттям вважаються дуже небезпечними і підлягають утилізації.

Під час кожного циклу обслуговування проводиться:

- **оцінка зносу батарей**: аналіз фактичної ємності, часу розряду, наявності просідання напруги під навантаженням. Для цього використовуються як вбудовані логфайли контролера живлення, так і зовнішні тестери або спеціалізоване програмне забезпечення (*Battery Analyzer*, *Smart Battery Checker* тощо). Час від часу батареї повністю заряджають і розряджають у контрольованих умовах зі стабільним навантаженням, фіксуючи зміну напруги в часі. Показники порівнюють із паспортними значеннями. Якщо фактична ємність зменшена на понад 20–25 %, батарея вважається деградованою і потребує заміни. Візуально перевіряють відсутність ознак здуття або протікання, що є критичними симптомами втрати герметичності або хімічного зносу комірок;
- **інспекція на фізичні пошкодження**: перевірка корпусу на роздування, контактів – на корозію, виявлення змін в опірності. Оператор візуально оглядає батарею та її елементи щодо зовнішніх дефектів: тріщин, витоку електроліту, знебарвлення або обвуглення корпусу, що може свідчити про перегрів або коротке замикання. Контакти акумулятора перевіряють на наявність окислення, обриву або послаблення з'єднань. Додатково вимірюється внутрішній опір за допомогою спеціалізованих тестерів, що дозволяє оцінити ступінь зносу комірок і здатність батареї



витримувати навантаження без критичних просадок напруги. Якщо параметри значно відхиляються або є підозрілі ознаки, акумулятор відбраковується та передається на утилізацію відповідно до вимог безпеки;

- **контроль температурного режиму**: під час заряджання та роботи батарей в польових умовах важливо забезпечити дотримання рекомендованого виробником температурного діапазону (зазвичай від +10 до +45 °C), щоб уникнути перегріву або перенапруги, які можуть спричинити деградацію елементів або займання. Якщо батарея активно розряджалася та нагрілася, перед встановленням на заряджання необхідно дочекатися її охолодження. У польових умовах застосовують термодатчики та вбудовані температурні монітори, які передають інформацію до наземної станції або автопілота. Якщо допустимий температурний поріг перевищений, система автоматично знижує навантаження, активує охолодження (за наявності) або переходить у режим енергозбереження. Перед місією також виконується попередній прогрів акумуляторів (наприклад у зимовий період) для досягнення оптимального робочого стану. В наземних БПЛА (ДКБА) встановлюють системи підігріву акумуляторів для роботи за низьких температур. Системи активного моніторингу температури повинні регулярно тестуватись на точність і коректність спрацювання захисту. Заряджання акумуляторів проводиться під постійним наглядом, у добре провітрюваних приміщеннях. Більшість літєвих батарей не розраховані на ефективну роботу за температури нижче +5 °C та вище +35 °C. За низьких температур суттєво зменшується доступна ємність акумулятора, що призводить до скорочення часу польоту та ризику передчасного спрацювання аварійних режимів. У разі заряджання за температури нижче +5 °C батарея автоматично нагрівається до приблизно +20 °C, і лише після цього розпочинається процес заряджання, що необхідно враховувати при плануванні місії. За інтенсивного використання БПЛА у циклі політ – зарядка – політ можливе **перегрівання контактів з'єднання між батареєю та апаратом**, особливо за високих температур навколишнього середовища або за наявності забруднень і зношення контактних груп.

**Типові несправності та діагностика (табл. 4.4):****Таблиця 4.4.** Поширені проблеми БПЛА

Проблема	Можливі причини
Глибокий розряд акумулятора	Тривале зберігання без підзарядки, перевищення часу польоту
Втрата ємності	Старіння акумуляторів, часте використання на високих токах
Перегрів елементів живлення	Недостатнє охолодження, перевищення допустимого струму
Коротке замикання	Пошкодження ізоляції, некоректне з'єднання елементів
Просадка напруги під час маневрування	Невідповідність типу батареї до потреб апарата, деградація комірок
Нестабільна робота навігаційних модулів	Коливання напруги, паразитні імпульси, погане заземлення

Наслідки неправильного налаштування БПЛА.**Неправильне налаштування може призвести до такого:**

1. Аварійної зупинки апарата під час польоту або на маршруті.
2. Втрати зв'язку чи контролю над апаратом.
3. Збоїв у роботі навігаційних обчислень або автопілота.
4. Неможливості виконання місії.
5. Перевантаження інших модулів через імпульсні просадки напруги.
6. Втрати апарата внаслідок повного відключення електроживлення.



На рис. 4.4 зображено професійну систему аналізу акумуляторів, яка складається з апаратного модуля *Professional Laptop Battery Analyzer*, комп'ютера з програмним забезпеченням для візуалізації результатів та різних типів підключених батарей.

- Апаратна частина підключається до комп'ютера через *USB*-з'єднання та передає дані про напругу, струм, ємність і ступінь зносу батареї.
- Програмне забезпечення на ноутбучі в режимі реального часу відображає технічні параметри: поточну ємність, рівень заряду, температуру, кількість циклів, а також графіки заряду / розряду.
- Нижня частина зображення демонструє приклади батарей різних форматів, які можуть бути протестовані, – від стандартних до сучасних плоских акумуляторів.
- Підключення здійснюється через універсальні або тонкопрофільні роз'єми, що дозволяє працювати з більшістю літій-іонних акумуляторів ноутбуків та сумісних дронів систем.



Рис. 4.4. Система *Battery Analyzer* для діагностики стану акумуляторів з візуалізацією інтерфейсу та підключенням тестованих батарей [5]

4.3. Програмне забезпечення та його налаштування на БПЛА

Оновлення прошивки: оцінюється, чи встановлена прошивка відповідає останній стабільній версії (оновленням), а також перевіряється наявність оновлень для автопілота, контролера руху,



модулів навігації, камер, сенсорів та інших периферійних пристроїв відповідно до типу БПЛА. Для повітряних апаратів важливо, щоб прошивка підтримувала режими стабілізації, автозльоту, посадки, польоту за точками та аварійного повернення.

Прошивка має бути сумісною з програмним забезпеченням і конфігурацією апарата. До типових проблем належать: застарілі версії, які не підтримують нові функції або містять критичні помилки; некоректне оновлення, яке призводить до втрати налаштувань або непрацездатності апарата, а також переривання процесу оновлення через нестабільне живлення чи помилки підключення. Перед виконанням оновлення необхідно створювати резервні копії конфігурацій та зберігати документацію про змінені параметри.

Активування та налаштування навігаційних (GNSS) модулів: оцінюється працездатність і точність навігаційної системи, відповідно до типу БПЛА. Для повітряних апаратів (коптерів, літаків) перевіряється робота супутникових систем (*GPS, Galileo, BeiDou*), наявність фіксації позиції (*3D Fix*), кількість супутників, стабільність і якість сигналу. Аналогічні перевірки виконуються і для надводних та наземних апаратів.

У всіх типах БПЛА навігаційні модулі мають бути синхронізовані з іншими сенсорами (компасом, барометром, одометром, гідродатчиками), щоб забезпечити коректну роботу автопілота та дотримання маршруту. До типових проблем належать повільна ініціалізація навігаційного модуля, втрата сигналу через електромагнітні завади, некоректне розміщення антен або сенсорів, помилки геопозиціонування, неправильна конфігурація модуля, застаріле програмне забезпечення, а також нестабільна робота у складних умовах (щільна забудова, тунелі, водне середовище). У польових умовах необхідно перевіряти працездатність навігаційної системи до початку місії, оскільки відмова навігації може призвести до втрати керування апаратом або неможливості повернення в базову точку.



У середовищі *QGroundControl* налаштування навігаційного модуля *GPS* здійснюється через вкладку *Vehicle Setup / Parameters / GPS* (рис. 4.5).

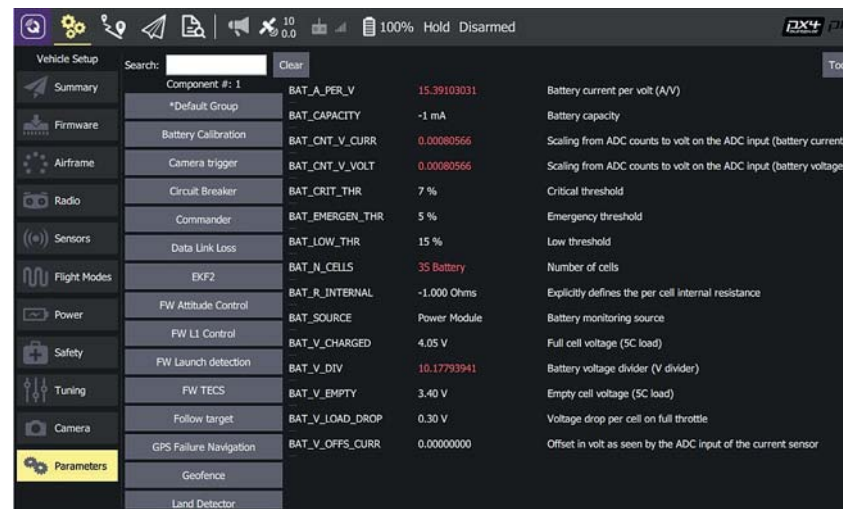


Рис. 4.5. Інтерфейс налаштування параметрів GPS у *QgroundControl* [6]

Тут оператор може:

- обрати активний порт для підключення GPS-модуля (наприклад *GPS_1_CONFIG*);
- встановити тип протоколу (*u blox, NMEA, Trimble* тощо);
- задати швидкість обміну даними (*baud rate*) та параметри *RTK*-синхронізації.

У верхній частині інтерфейсу відображається статус *GPS* (наприклад, кількість супутників, фіксація координат, *RTK*-режим) [6].

Цей процес дозволяє забезпечити стабільну роботу навігації безпілотного апарата з можливістю високоточної прив'язки до координат. Рекомендується перевірити зв'язок із супутниками перед початком місії.

Тест-з'єднання з наземною станцією: оцінюється стабільність і якість каналу зв'язку між безпілотним апаратом і наземним



пунктом керування. Для повітряних БПЛА перевіряється наявність стійкого телеметричного з'єднання, передача даних у реальному часі (координати, висота, швидкість, рівень заряду батареї, статус сенсорів), а також відповідь апарата на команди керування.

Перевірка передбачає контроль роботи всіх каналів RC або віртуального джойстика, швидкість реагування на команди, а також аналіз затримки сигналу, втрат пакетів і впливу. До типових проблем належать розриви зв'язку, зниження рівня через завади, несумісність програмного забезпечення, неправильне налаштування COM-портів або протоколів (наприклад, MAVLink), а також обмеження пропускну здатності в умовах підземної експлуатації або в середовищі щільної забудови.

Окремо перевіряється відеоканал: якість і стабільність зображення, відсутність критичної затримки, коректність перемикання між камерами (за їхньої наявності) та правильність встановлення камер.

4.4. Перевірка роботи дистанційно керованих БПЛА

Мета перевірки: забезпечити надійність, безпеку та стабільну роботу систем керування, навігації та обробки даних перед виконанням основних завдань.

Повітряні БПЛА.

Це найпоширеніший тип безпілотних систем, який використовується для аерофотозйомки, картографування, агромоніторингу, патрулювання.

ЕТАПИ ПЕРЕВІРКИ.

Чутливість до керівних сигналів:

Визначає, наскільки точно та швидко апарат реагує на команди зміни нахилу (*Roll* та *Pitch*), повороту (*Yaw*) та набору або зниження висоти (*Throttle*). Оптимальна чутливість забезпечує надійне керування під час маневрування, польоту у складних умовах і виконання точних завдань. Надмірна чутливість, навпаки, ускладнює виконання плавних маневрів і може призвести до нестабільності апарата. Для досягнення балансу часто використовують «*rate profiles*» – профілі керування з різною чутливістю: у крайніх



положеннях стіків вона підвищена, а в середніх – зменшена. Це дозволяє пілоту точно утримувати апарат у зависанні (середні положення) і швидко виконувати інтенсивні маневри під час набору чи зниження висоти (крайні положення). Затримка реакції або неточність керування можуть свідчити про перевантаження автопілота або несправність регуляторів швидкості (*ESC*).

Перевірка повернення до точки зльоту (RTL):

перевірка коректного повернення до точки зльоту при втраті зв'язку (режим *RTL – Return to Launch*).

Стабілізація польоту:

оцінюється здатність безпілотника автоматично утримувати задану висоту та просторове положення навіть під впливом зовнішніх факторів (вітру, турбулентності). Стабілізований політ свідчить про коректну роботу гіроскопів і барометричних датчиків.

Перевіряється в польоті, зокрема в умовах вітру: апарат не повинен самовільно коливатись, втрачати висоту або підніматись без команди оператора.

Перемикання режимів польоту:

перевіряється коректність і зміни режимів польоту (*Manual, Stabilize, Loiter, Auto* тощо). Кожен режим має активуватися без затримки, викликати передбачену поведінку апарата, а перехід між режимами не повинен спричиняти збоїв.

Зокрема, перехід у режим *Auto* має запускати запрограмовану місію, а *Loiter* – забезпечувати зависання в заданій точці.

Перевірка функцій безпеки:

включає тести на автоматичну посадку за критичного рівня заряду батареї, у разі втрати сигналу або виходу за межі дозволеної зони (*GeoFence*).

Перевіряється також реакція апарата на симульовані аварійні ситуації.

Типовою є проблема, коли після переходу з режиму *Stabilize* на *Loiter* апарат зависає з відчутною затримкою або починає самостійно зміщуватись. Це свідчить про некоректну роботу модуля *GPS*, магнітометра або порушення калібрування автопілота. Рекомендується



перевірити журнал польоту (*log*-файли) на наявність повідомлень про збої або втрати сигналу.

4.5. Калібрування сенсорів і стабілізаційних систем БПЛА

Калібрування сенсорів – етап підготовки дистанційно керованих апаратів до експлуатації, що забезпечує точність навігації, стабільність руху та безпеку виконання завдань. Цей процес виконується відповідно до рекомендацій програмного забезпечення, з урахуванням специфіки кожного типу БПЛА.

Мета калібрування: забезпечити стабільність польоту, правильну орієнтацію у просторі та точне позиціонування в умовах тривимірного руху.

Ключові етапи калібрування:

гіроскоп – визначає швидкість обертання апарата. Калібрування здійснюється через поступове обертання апарата навколо осей X, Y і Z у стабільному середовищі без вібрацій. Після цього апарат фіксують у нерухомому положенні для запису базових параметрів;

акселерометр – оцінює прискорення та положення відносно горизонту. Апарат обережно нахиляють у шість положень (вверх, вниз, вліво, вправо, вперед, назад), а дані фіксують для визначення реального вектора гравітації та вирівнювання осей;

компас (магнітометр) – забезпечує орієнтацію за напрямком магнітного поля Землі. Апарат обертають у всіх напрямках для збору магнітного профілю. Необхідно уникати металевих предметів і джерел електромагнітного поля поблизу;

барометр – вимірює висоту над рівнем моря. Калібрування проводиться на фіксованій висоті з контролем температури та тиску, щоб уникнути хибних зрушень у навігації;

модулі GPS / RTK-GPS – забезпечують високоточне позиціонування у відкритому просторі. Після увімкнення необхідно дочекатися фіксації супутників (мінімум 8–12), а RTK-система синхронізується з базовою станцією;

IMU (інерціальний модуль) – комплексне калібрування, що поєднує дані з гіроскопа, акселерометра та магнітометра. Вимагає точного виконання алгоритму послідовних нахилів і обертів.

Умови калібрування: відкритий простір, рівна поверхня, відсутність електромагнітних завад, стабільна температура.

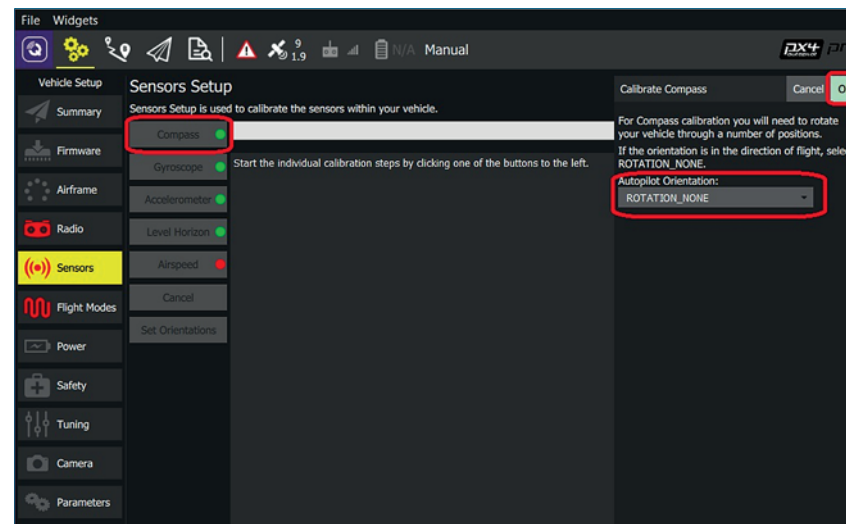


Рис. 4.6. Калібрування компаса, вибір параметрів [7]

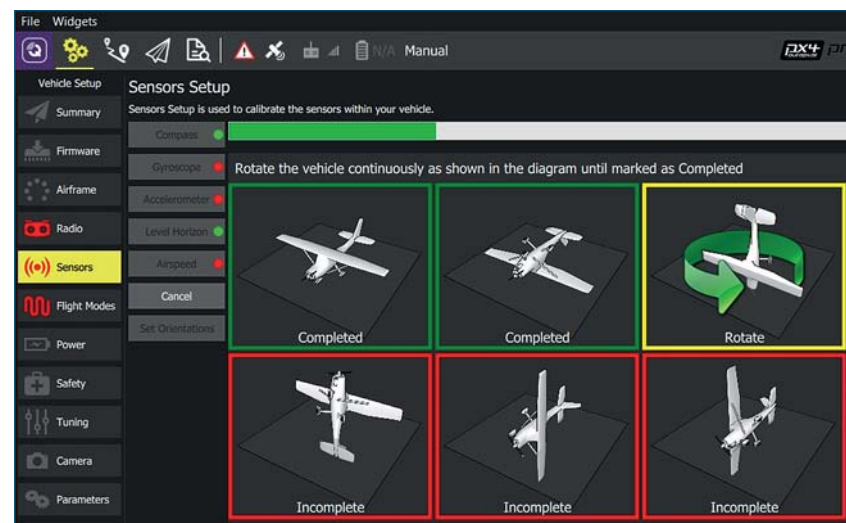


Рис. 4.7. Процес калібрування для всіх орієнтацій транспортного засобу. [7]



На рис. 4.6 і 4.7 показано екран калібрування компаса (магнітометра) у програмі *QGroundControl* для автопілота *PX4*. Інтерфейс демонструє:

- схематичне зображення апарата (літака або квадрокоптера) в різних орієнтаціях (червоний колір означає «ще не виконано», жовтий – «у процесі», зелений – «завершено»);
- інструкцію: оператор повинен розмістити БПЛА в заданій позиції, після чого поступово повернути навколо вказаної осі доти, доки індикатор не змінить колір на зелений;
- процедура передбачає покрокове обертання у кількох позиціях для точного калібрування як внутрішніх, так і зовнішніх магнітометрів.

Калібрування забезпечує компенсацію:

- для **Hard Iron**-ефектів – постійних магнітних відхилень від сталих зовнішніх полів;
- для **Soft Iron**-ефектів – нерівномірного спотворення поля через матеріали конструкції.

Після завершення всіх фаз індикатори змінюють колір на **зелений**, а прогрес-бар заповнюється – це означає, що зміни збережено та компас готовий до експлуатації [7].

Встановлення місії БПЛА через програмне забезпечення.

Планування місії БПЛА передбачає побудову маршруту польоту з точками Waypoint з урахуванням завдань і специфіки повітряного середовища. Визначаються точні координати, висоти польоту на кожному сегменті маршруту, швидкість руху між точками, а також дії, які потрібно виконати в зазначених точках (наприклад, фотофіксацію з потрібною роздільною здатністю, включення розпилювача для обприскування, обертання камери для огляду території). Крім того, налаштовуються параметри орієнтації апарата (*yaw, pitch, roll*), кут зйомки, час затримки у точці (*hold time*) та інші технічні характеристики. Обов'язково задаються умови безпеки, зокрема сценарії дій у разі втрати *GPS*-сигналу, розряду батареї, втрати зв'язку або непередбачених перешкод. Серед таких сценаріїв – повернення до точки старту (*Return-to-Launch*), автопосадка або зависання в повітрі з подальшим очікуванням команди оператора.



Основні етапи планування місії (загальні для всіх типів апаратів):

- **створення маршруту** – це побудова траєкторії руху з урахуванням геометрії місцевості, висоти (для повітряних). Вказуються контрольні точки, швидкість руху, напрямок і параметри очікування в кожній точці;
- **додавання завдань** – визначаються функції, які апарат має виконати на маршруті: фото- або відеофіксація, сканування, відбір проб, сівба, обприскування, вимірювання параметрів середовища тощо;
- **встановлення параметрів запуску та завершення** – налаштовуються умови старту (ручний запуск, автозапуск), дії після завершення місії (повернення на базу, зупинка, перехід у режим очікування), а також сценарії на випадок непередбачених ситуацій (втрата зв'язку, розряд батареї, збої сенсорів);
- **імітація місії в режимі моделювання** – передбачає перевірку точності маршруту, завдань і сценаріїв у віртуальному середовищі, дозволяє виявити помилки до запуску;
- **завантаження місії** – сформований план передається на бортовий комп'ютер або автопілот за допомогою дротового або бездротового з'єднання (*USB, Wi-Fi*, телеметрія), після чого апарат готовий до виконання завдання.

4.6. Засоби зв'язку та їхнє налаштування

Керування БПЛА здійснюється завдяки системам зв'язку, які забезпечують стабільну передачу команд управління, телеметричних даних, відеопотоків та зворотного зв'язку. Тип і конфігурація засобів зв'язку обираються залежно від типу апарата (повітряний, наземний, підземний, водний), особливостей середовища експлуатації та характеристик місії.

Засоби зв'язку є ключовим елементом в архітектурі будь-якої системи БПЛА. Вибір технології, правильне налаштування та забезпечення стійкості до зовнішніх впливів визначають ефективність і безпечність дистанційного керування в умовах різних середовищ. Студент повинен володіти навичками адаптації систем зв'язку до технічного завдання місії, типу апарата та вимог до обсягу і затримки передавання даних.



Радіозв'язок (UHF/VHF, 433/868/915 МГц).

Це один із найпоширеніших типів бездротового зв'язку в системах БПЛА, що працюють на середніх відстанях. Частоти 433, 868 та 915 МГц забезпечують низьку затримку передачі сигналу, що дозволяє ефективно використовувати їх у відкритому просторі. Повітряні та наземні апарати активно застосовують радіоканали для керування рухом пристрою, збору телеметрії та обміну даними з наземною станцією.

Налаштування здійснюється через програмне забезпечення конфігурації передавачів (наприклад *Mission Planner*), де задаються параметри частоти, ширини каналу, потужності передавача й типу модуляції. Важливо узгодити параметри передавача і приймача, використовувати виносну антену та уникати завад у смузі частот. На рис. 4.8 показано інтерфейс програмного забезпечення *Mission Planner* під час налаштування модулів телеметричного радіозв'язку *3DR Radio*, які працюють у діапазоні 433/868/915 МГц. У лівій частині інтерфейсу вибрано меню *Initial Setup*–*Optional Hardware*–*3DR Radio*, яке відповідає за конфігурацію як наземного (Local), так і повітряного (*Remote*) модулів зв'язку.

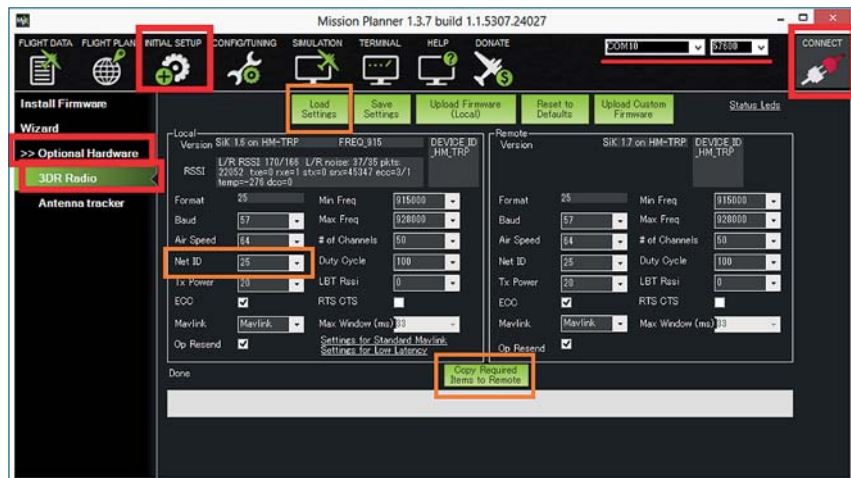


Рис. 4.8. Налаштування радіомодулів телеметрії
3DR Radio у *Mission Planner* [8]



Параметри, доступні для налаштування: *COM*-порт і швидкість з'єднання (57 600 бод) – у верхній правій частині інтерфейсу; *Net ID* – ідентифікатор мережі (має бути однаковим для обох модулів); *Tx Power* – потужність передавача (наприклад 20 = 100 мВт); *Air Speed*, *Baud Rate* – швидкість обміну між модулями та ПК; *Duty Cycle*, *ECC*, *LBT*, *RTS/CTS* – додаткові функції для надійності та відповідності до регуляторних вимог; *Copy Required Items to Remote* – кнопка синхронізації параметрів між модулями.

Застосування програми.

Mission Planner використовується:

- для налаштування системи;
- для телеметрії між оператором і БПЛА/ДКБА;
- для конфігурації частотного діапазону, швидкості, потужності та протоколів зв'язку;
- для синхронізації параметрів між модулями без апаратного програмування.

Це важливо для повітряних безпілотних апаратів, де радіоканал використовується для телеметрії, керування місією та безпечного виконання польотів у реальному часі.

Wi-Fi / LTE / 5G-з'єднання.

Сучасні безпілотні системи (особливо наземного типу), що працюють у населених пунктах або на об'єктах із розвинутою телеком-інфраструктурою, використовують широкосмугові канали *Wi-Fi*, *LTE* або *5G*. Це дозволяє передавати великі обсяги даних у режимі реального часу – відео, карти, аналітичні дані.

Налаштування передбачає підключення до наявної мережі (*SSID*, пароль), конфігурацію параметрів *IP*-адресації (статична або *DHCP*), налаштування *VPN* каналів, інтеграцію з хмарними платформами (наприклад *MAVLink-over-LTE*). Для водних ДКБА використовується наземна або надводна антена *LTE/5G*, вмонтована в надбудову апарата.



Рис. 4.9. Схема підключення Wi-Fi зв'язку для безпілотного апарата через Raspberry Pi [9]

На рис. 4.9 схематично зображено бездротове підключення наземної станції до безпілотного літального апарата через Wi-Fi з використанням компаньйон-комп'ютера Raspberry Pi. Опис схеми: ліворуч – ноутбук, який передає команди, із відкритим інтерфейсом планування місій (QGroundControl або Mission Planner). У центрі – Raspberry Pi, як проміжний вузол, що підключений до автопілота та Wi-Fi-модуля (USB Wi-Fi-адаптер). Праворуч зображено дрон, який приймає сигнали керування через Wi-Fi.

Супутниковий зв'язок (Iridium, Inmarsat, Starlink).

Цей тип зв'язку використовується для глобального покриття, зокрема під час польотів за межами прямої видимості, морських місій або дослідницьких операцій у віддалених регіонах. Супутникові канали можуть працювати зі значною затримкою, проте забезпечують стабільну роботу на великих відстанях.

Налаштування передбачає реєстрацію терміналу в супутниковій мережі, налаштування доступу до каналу передачі та узгодження форматів даних (наприклад, TCP / IP-тунелі). Для деяких рішень потрібна попередня активація SIM-карт або укладення супутникових контрактів.



Рис. 4.10. PLANET 9523 UAV Terminal – Iridium Satellite Modem для безпілотних систем [9]

На рис. 4.10 зображено супутниковий термінал Iridium PLANET 9523 UAV Terminal – пристрій, призначений для підключення безпілотних літальних або наземних платформ до мережі Iridium Certus. Термінал оснащений інтерфейсами ETH, TTL, PWR для підключення автопілотів (Pixhawk/ArduPilot/PX4) або компаньйон-комп'ютера (Raspberry Pi). Пристрій підтримує передавання пакетів MAVLink, IP та MQTT. Забезпечує роботу через легкий, малопрофільний GNSS-приймач та зовнішню LTE/Starlink-сумісну антену.

Дротовий зв'язок (Ethernet, оптичні канали).

У складних техногенних умовах, де бездротові сигнали поширюються нестабільно або не проходять зовсім, застосовують дротові канали зв'язку. Такий підхід дає змогу забезпечити гарантовану швидкість передавання даних і підвищити рівень інформаційної безпеки.

Налаштування передбачає конфігурацію мережевого обладнання (світчі, PoE-інжектори), адресацію вузлів, забезпечення фізичного захисту кабельної лінії та вибір типу інтерфейсу (Ethernet або оптоволокно). Дротовий канал також може використовуватись як резервний канал для діагностики та оновлення програмного забезпечення.



Рис. 4.11. Система дротового підключення («Tether») для безпілотних апаратів [10]

На рис. 4.11 зображено систему підключення дротового зв'язку для дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів. Такий тип зв'язку встановлюється через *Ethernet* або оптоволоконні канали та застосовується для стабільної передачі даних, подачі живлення і проведення діагностики. Найчастіше дротове підключення використовує кабельну прив'язну систему (*Tethered System*), у якій спеціалізований кабель з'єднує дрон із наземною станцією. Через цей кабель можна одночасно передавати живлення (наприклад за технологією *PoE*) та телеметрію (через *TCP/IP* або *UDP*), а також відео та інші високошвидкісні потоки даних, зокрема від камер або *LiDAR*-сенсорів. У конструкції кабелю часто поєднують мідні й оптоволоконні жили для одночасної підтримки енергоживлення й передачі даних.

Налаштування дротового з'єднання передбачає конфігурацію мережевих параметрів (*IP*-адрес, портів, протоколів), встановлення *PoE*-інжекторів або світців (комутаторів), а також фізичний захист кабелю від натягу, перегинів і механічних чи пошкоджень. На борту апарата використовується компаньйон-комп'ютер (наприклад *Raspberry Pi* або *Jetson*), який керує передаванням даних через *Ethernet* до автопілота та наземної станції (наприклад



QGroundControl). Така система ідеальна для місій із фіксованою позицією дрона (моніторинг натопву, об'єктів критичної інфраструктури) або як резервний канал для діагностики, оновлення прошивки чи безпечного аварійного управління.

4.7. Налаштування наземних станцій управління БПЛА

Налаштування наземної станції управління дистанційно керованим безпілотним апаратом забезпечує ефективне, безпечне та стабільне виконання місій в автоматичному або ручному режимі. Конфігурація наземної станції виконується з урахуванням типу апарата (повітряного, наземного, підземного або водного), його функціонального призначення, особливостей середовища експлуатації та характеристик каналів зв'язку.

Наземна станція управління є апаратно-програмним комплексом, який поєднує модулі прийому-передачі телеметрії, обчислювальні блоки, системи позиціонування, інтерфейси оператора, зі спеціалізованим програмним забезпеченням для налаштування місії, моніторингу стану апарата та резервного збереження даних. Її налаштування здійснюється поетапно, з обов'язковою перевіркою кожного елемента на сумісність і працездатність.

Основні етапи налаштування наземної станції:

Початкова конфігурація обладнання передбачає підключення живлення, перевірку справності блоків зв'язку (радіомодемів, *Ethernet*-інтерфейсів, супутникових терміналів, гідроакустичних модулів), оновлення прошивок апаратних компонентів та ініціалізацію контролерів управління.

Налаштування каналів зв'язку та протоколів обміну забезпечується встановленням стабільного каналу обміну даними з бортовими системами ДКБА. Для повітряних платформ зазвичай використовується *MAVLink* по радіоканалу (433/915 МГц), для водних – супутниковий або гідроакустичний канал. Під час налаштування визначаються робочі частоти, бітрейт (швидкість передавання), параметри шифрування, механізми резервування каналів та можливість використання дублювальних модемів.



Ініціалізація телеметрії та позиціонування. Виконується налаштування прийому координат з *GPS*-модуля апарата, зчитування інформації з інерційних сенсорів (*IMU*), а також запуск системи логування польотних параметрів. Для підземних дистанційно керованих апаратів активуються внутрішні алгоритми інерціальної навігації.

Завантаження та перевірка місії. Через графічний інтерфейс програм наземного керування, таких як *Mission Planner* або *QGroundControl*, створюється або імпортується маршрут, встановлюються точки *Waypoint*, параметри висоти чи глибини руху, а також дії в контрольних точках (обприскування, фотофіксація тощо). Для наземних систем передбачено налаштування алгоритмів динамічної зміни маршруту відповідно до рельєфу місцевості або перешкод.

Активація моніторингових та діагностичних систем. Налаштовуються системи сповіщення про критичні відхилення параметрів (перегрів акумуляторів, втрату сигналу позиціонування, перевантаження двигунів, порушення герметичності тощо). Це дає змогу оператору оперативно реагувати на зміни стану апарата під час місії.

Забезпечення резервного збереження даних. Визначаються параметри архівації телеметрії, маршрутів і команд. Дані можуть зберігатися як локально на наземній станції, так і на бортовому пристрої апарата. У системах із підвищеним ризиком втрати зв'язку реалізується дублювання даних через автономні логери.

Налаштування інтерфейсів обслуговування. Інтерфейси технічного обслуговування повинні забезпечувати доступ:

- до журналів подій та помилок;
- до функцій віддаленого оновлення конфігурацій;
- до запуску вбудованих процедур самодіагностики.

Для водних і підземних апаратів важливою є можливість локальної діагностики без доступу до інтернету чи мобільного зв'язку.

Мультифункціональні станції, які обслуговують кілька типів апаратів, налаштовуються з урахуванням модульності систем – кожен



блок (телеметрії, відеоспостереження, діагностики) повинен бути адаптований до потреб конкретного ДКБА.

Рис. 4.12 демонструє вкладку налаштування радіомодуля у програмі *Mission Planner* – одному з основних інструментів дистанційного керування БПЛА. Інтерфейс призначений для конфігурації телеметрійного зв'язку між наземною станцією та БПЛА і дозволяє синхронізувати параметри зв'язку через *COM*-порт.

У вікні відображаються параметри локального та віддаленого модулів зв'язку: частоти, швидкість обміну даними (*Baud*), потужність передавача (*TX Power*), кількість каналів та інші параметри.

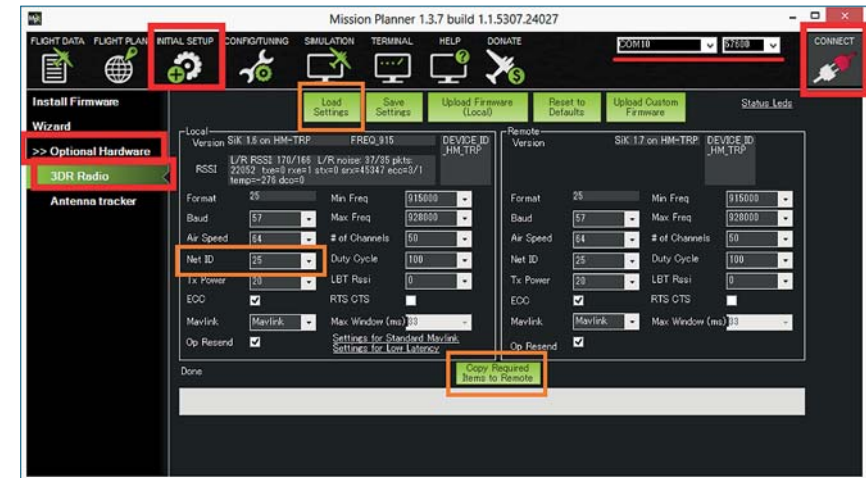


Рис. 4.12. Інтерфейс *Mission Planner* – Програмне забезпечення для налаштування наземних станцій керування БПЛА [11].

4.8. Налаштування системи управління БПЛА

Налаштування системи управління – це дії для адаптації інтерфейсів, каналів зв'язку, режимів роботи й реакцій апарата до конкретної місії, типу апарата та умов експлуатації. Коректно налаштована система забезпечує стабільність, безпечність і точність виконання завдань.



Налаштування системи управління є базовою компетенцією оператора, оскільки саме воно забезпечує надійність роботи апарата, безпечність виконання завдань і здатність гнучко реагувати на зміну умов експлуатації. Знання і розуміння принципів налаштування дозволяють ефективно використовувати можливості ДКБА у практиці.

Етапи налаштування системи управління:

Вибір типу інтерфейсу.

Для повітряних апаратів: поєднуються RC-пульт і програма (наприклад *MissionPlanner*), яка дозволяє проводити точне налаштування параметрів польоту, створювати й завантажувати маршрути, задавати точки *Waypoint*, висоту, швидкість, час затримки та дії в кожній точці. RC-пульт використовується як основний орган мануального управління для запуску, посадки, перемикання режимів (наприклад *Stabilize*, *Loiter*, *RTL*), а також для екстреного втручання у разі виникнення нештатної ситуації. обов'язковими процедурами є калібрування стіків, перевірка зв'язку між пультом і автопілотом, а також програмування каналів перемикачів, які відповідають за ключові функції апарата під час виконання місії.

Для апаратів усіх типів: більшість систем підтримують функцію безпосереднього керування з пульта – іноді як основний канал, іноді як резервний. Оператор спочатку вмикає пульт, потім апарат і очікує підтвердження з'єднання на пульті. Якщо з'єднання нема, необхідно перевірити та налаштувати параметри зв'язку як на пульті, так і на апараті. Після встановлення з'єднання, оператор послідовно виконує на пульті всі доступні команди керування (перемикання режимів, повороти тощо) і перевіряє, чи апарат правильно реагує. Таку перевірку ручного керування необхідно виконувати перед кожною місією, навіть якщо вона планується в автоматичному режимі.

Налаштування режимів керування (*Flight / Drive Modes*). Режими керування визначають логіку дій апарата під час виконання місії або ручного управління. Вибір і правильне налаштування режимів безпосередньо впливають на безпеку, ефективність і автономність виконання завдань.



Manual (ручний режим): оператор повністю керує апаратом у реальному часі через RC-пульт. Використовується на етапі зльоту, посадки або у випробуваннях.

Stabilize / Assist (режим стабілізації): апарат автоматично утримує рівновагу за допомогою гіроскопів, але переміщення контролює оператор. Зручний для тренувань і точних маневрів.

Auto: повністю автономне виконання маршруту, складеного заздалегідь у програмі. Апарат проходить контрольні точки *Waypoint* і виконує дії (фото, зупинка, розворот), реагує на зовнішні події відповідно до заданої логіки.

Loiter / Hold: режим утримання позиції в просторі; для повітряних апаратів – за координатами GPS, для водних – з урахуванням глибини й течії. Використовується для очікування або пауз у місії.

RTL (Return to Launch): автоматичне повернення в точку старту. Програмується як аварійний або завершальний сценарій.

Guided / Follow / DepthHold: дистанційне керування окремими командами через комп'ютер або планшет. Наприклад, оператор може задати точку на карті, до якої апарат рухатиметься в напіваавтономному режимі.

Режими задаються через інтерфейс програмного забезпечення (наприклад у *Mission Planner* чи *QGroundControl*), де оператор може визначити до шести основних режимів і призначити перемикання між ними через відповідні канали RC-пульта. Для наземних і водних апаратів часто використовується фіксований профіль режимів, адаптований до обмеженого типу завдань.

Калібрування органів управління: забезпечує точну інтерпретацію команд оператора системою автопілота, щоб запобігти відхиленням або нестабільній поведінці апарата під час виконання місії.

Калібрування стіків RC-пульта: виконується в спеціальному розділі програмного забезпечення, де система визначає мінімальні, максимальні та нейтральні положення стіків. Це дозволяє уникнути некоректної реакції на команди (наприклад, самовільного руху або повороту).

Калібрування гіроскопа та акселерометра: апарат встановлюють у горизонтальному положенні на рівній поверхні. Після запуску



процедури програмне забезпечення фіксує поточні значення орієнтації та приймає їх за «нульові». Це важливо для стабільності під час руху, особливо для повітряних і підводних апаратів.

Калібрування компаса: процедура виконується в режимі обертання, коли апарат повільно повертають навколо трьох осей, доки програма не збере достатньо даних для визначення магнітного поля. Під час виконання процедури необхідно уникати джерел електромагнітних завад.

Усі калібрувальні дії потрібно виконувати відповідно до інструкцій програмного забезпечення (наприклад *Mission Planner* або *QGroundControl*) та контролювати їхнє завершення за візуальними або звуковими індикаторами. Недбале або неповне калібрування може спричинити серйозні аварії або втрату контролю над апаратом.

Інтеграція додаткових модулів – дає змогу адаптувати ДКБА до виконання спеціалізованих завдань. Вона охоплює фізичне підключення обладнання, налаштування програмної логіки, а також перевірку взаємодії між основною системою управління та навантаженням.

Підключення корисного навантаження: на апарат можуть встановлюватися відео- та фотокамери, тепловізори, маніпулятори, розпилювачі, сенсори газу, води, температури тощо. Під час підключення враховують тип вихідного сигналу, споживану потужність і спосіб механічного кріплення.

Програмне налаштування: через програму керування (наприклад *Mission Planner* або *QGroundControl*) оператор задає дії, які має виконувати апарат за певних умов. Наприклад, активувати розпилювач на визначеній ділянці, увімкнути камеру в заданій точці маршруту, щоб зчитати показники сенсора під час зависання на місці.

Логіка запуску: робота модулів програмується за умовними сценаріями типу «якщо – то», які можуть враховувати час, координати, висоту, швидкість, або команди з *RC*-пульта. Наприклад: якщо висота >5 м і швидкість <2 м/с, увімкнути зйомку.



Затримки та умови активації: визначаються таким чином, щоб уникнути хибного запуску або повторного включення. Затримка може задаватися вручну або розраховуватися відповідно до швидкості проходження маршруту. Також необхідно враховувати теплові режими роботи обладнання, потребу в охолодженні та встановлені обмеження безпеки.

Тестування взаємодії: кожен модуль повинен бути перевірений у симуляторі чи в контрольованих умовах. Це дозволяє виявити конфлікти, перевантаження системи або затримки сигналу.

Правильне налаштування додаткових модулів істотно розширює функціонал ДКБА та дозволяє адаптувати його до потреб аграрних, рятувальних, інженерних чи екологічних завдань.

Основні кроки інтеграції навантаження:

1. Підключення й налаштування корисного навантаження (камери, сенсори).
2. Визначення логіки запуску, затримок, умов активації.

Приклад повного циклу налаштування БПЛА (табл. 4.5):

1. З'єднання *RC*-пульта з автопілотом.
2. Калібрування стіків, компаса.
3. Призначення каналів.
4. Створення місії в *Mission Planner*.
5. Налаштування аварійної поведінки.
6. Перевірка в симуляторі або тестовий запуск.

Таблиця 4.5. Особливості налаштування для різних типів БПЛА

Тип апарата	Основні інтерфейси	Особливості налаштування системи
Повітряний	<i>RC</i> -пульт + <i>Mission Planner</i>	Стабільність, автопілот, <i>GPS</i>



4.9. Приклади налаштування наземних станцій БПЛА

Приклад: квадрокоптери для моніторингу посівів.

Обладнання станції: ноутбук із встановленим *Mission Planner* або *QGroundControl*, USB-телеметрійний модуль (915 МГц), антенний модуль із підсиленням сигналу, джойстик або планшет як альтернативний контролер.

Типове налаштування:

1. Встановлення прошивки на автопілот (наприклад *ArduCopter*).
2. Синхронізація телеметрії через *COM*-порт.
3. Формування маршруту місії: задання точок *Waypoint*, висоти польоту, наприклад 25 м), режиму виконання (*Auto*).
4. Налаштування дій у точках: фотозйомка із затримкою, *Hover*, *RTL (Return to Launch)*.
5. Контроль стану батареї: активація попередження при напрузі <10,5 В.
6. Перевірка якості сигналу радіозв'язку (*RSSI* > 70 %).
7. Тест польоту в режимі *Loiter* або *Stabilize* для оцінки керованості.

Примітка: для польотів на значні відстані варто використовувати супутниковий модем (наприклад *Iridium*) або модуль стільникового зв'язку *4G/LTE*.

Висновок. Правильне налаштування БПЛА забезпечує його ефективну, безпечну та надійну експлуатацію. Комплексна підготовка охоплює перевірку технічного стану, калібрування сенсорів, оптимізацію параметрів енергоживлення, налаштування алгоритмів автопілота та засобів зв'язку. Потрібно врахувати тип апарата та умови експлуатації, щоб мінімізувати ризики збоїв, втрати контролю чи аварійних ситуацій. Здобуті знання та практичні навички дають змогу адаптувати БПЛА до різних сценаріїв, підвищуючи точність і стабільність його роботи, а також забезпечити відповідність роботи до технічних і нормативних вимог.



ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

- Які основні етапи налаштування БПЛА перед виконанням місії?
- У яких випадках необхідно проводити повторне налаштування апарата?
- Що таке параметри *Failsafe* та для чого вони налаштовуються?
- Які типи сенсорів використовуються в БПЛА та як їхнє розміщення впливає на точність роботи?
- Які ризики може спричинити неправильне налаштування PID-контролера?
- Чим відрізняються типи акумуляторів *Li-Po*, *Li-Ion* та *LiFePO4* і коли доцільно їх застосовувати?
- Які особливості налаштування засобів зв'язку для БПЛА різних типів?
- Як проводиться калібрування компаса та IMU, і чому важливо уникати магнітних завад під час цього процесу?
- Що таке геозони (*No-Fly Zones*) та як вони впливають на планування місії?
- Які основні причини перегріву елементів живлення та як цьому запобігти?

Джерела інформації:

1. <https://www.aerotas.com/blog/new-aerotas-checklist>
2. <https://www.aerotas.com/using-checklists>
3. https://docs.px4.io/v1.12/en/config/safety.html#BAT_CRIT_THR
4. <https://docs.px4.io/v1.12/en/config/battery.html>
5. https://batteryworld.gr/index.php?product_id=31094&route=product%2Fproduct
6. <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/qgc-user-guide/index.html>
7. <https://docs.px4.io/v1.12/en/config/compass.html>
8. <https://ardupilot.org/plane/docs/common-configuring-a-telemetry-radio-using-mission-planner.html>
9. <https://ardupilot.org/dev/docs/making-a-mavlink-wifi-bridge-using-the-raspberry-pi.html>
10. <https://vectorbirds.com/professional-drones/tether-solutions>
11. <https://ardupilot.org/copter/docs/common-configuring-a-telemetry-radio-using-mission-planner.html>



РОЗДІЛ 5

Програмне забезпечення для планування та управління дистанційно керованими безпілотними апаратами

Автори: Микола Іванович БИКОВ
Павло Володимирович ГОРЯЧЕВ

Після опрацювання цієї теми здобувач освіти:

- **ознайомиться з основами класифікації** програмного забезпечення (ПЗ) для дистанційно керованих безпілотних апаратів за функціональним призначенням: планувальне, контрольне та конфігураційне ПЗ;
- **набуде знань** про ключові можливості сучасних платформ, зокрема для планування маршрутів, моніторингу в режимі реального часу, конфігурації апаратних систем, інтеграції з GIS, а також підтримки різних типів БПЛА (повітряних, наземних, водних);
- **дізнається про специфіку** застосування таких програм, як *Mission Planner*, *QGroundControl*, *UgCS*, *BlueROV Companion Software*, *ROS*, у різних галузях: від сільського господарства до оборонної та наукової сфер;
- **навчиться визначати доцільність використання** конкретної платформи залежно від типу БПЛА, завдань місії, умов середовища та вимог до точності й безпеки;
- **оволодіє розумінням функціоналу** інструментів планування, контролю та конфігурації, методів побудови маршрутів, налаштування автоматичних сценаріїв польоту, моніторингу виконання місій та їхньої корекції в режимі реального часу.



Від сільського господарства до оборонної промисловості та моніторингу довкілля, основою ефективного використання дистанційно керованих безпілотних апаратів є надійне програмне забезпечення. ПЗ дає змогу виконувати планування маршрутів, управління режимами роботи, контроль місій у реальному часі, дистанційну діагностику систем, автоматизацію зльоту та посадки, адаптацію до змін у навколишньому середовищі та обробку зібраних даних. Сучасні ПЗ часто інтегрують алгоритми штучного інтелекту для оптимізації рішень у режимі реального часу.

Функції ПЗ охоплюють увесь життєвий цикл використання БПЛА: від первинного калібрування систем і планування місії до збирання телеметричних даних, збереження журналів завдань та візуалізації результатів. Метою цього розділу є дати студентам повне уявлення про доступні типи ПЗ, навчити працювати з ними на практиці та усвідомлювати їхню роль у життєвому циклі експлуатації БПЛА.

5.1. Основні типи програмного забезпечення

Програмне забезпечення для управління БПЛА поділяється за функціональним призначенням і включає розширені можливості:

- обробка сенсорних даних та інтеграція зі сторонніми геоінформаційними системами (*GIS*);
- управління кількома апаратами одночасно (*fleet control*);
- прогнозування маршруту з урахуванням змін погоди;
- автоматичне виявлення перешкод і повторна маршрутизація;
- управління корисним навантаженням (камерами, обприскувачами, маніпуляторами тощо);
- звітність після виконання місії з візуалізацією охопленої території або глибини занурення.

Розширене ПЗ також підтримує зберігання місій, импорт-експорт шаблонів маршрутів, налаштування зон безпеки та визначення заборонених для польоту територій (*No-fly zones*).

Основні типи програмного забезпечення:

контрольне ПЗ (*GCS – Ground Control Software*) – дозволяє в реальному часі спостерігати за переміщенням апарата, коригувати маршрут, перемикає режими. Залежно від типу БПЛА, контрольне ПЗ виконує низку специфічних функцій. Для повітряних апаратів



забезпечується телеметрія польоту, стабілізація висоти, контроль навантаження (камери, розпилювачі), а також попередження про перешкоди чи втрату сигналу. Усі ці функції реалізуються через інтерфейс контрольного ПЗ, який відображає карту місії, стан апарата, телеметричні дані та дає змогу миттєво втручатись у процес виконання завдання;

конфігураційне ПЗ – використовується для налаштування контролера польоту, сенсорів, каналів зв'язку та безпечних режимів роботи. Для повітряних БПЛА воно забезпечує точне налаштування параметрів автопілота, стабілізації, обмежень за висотою, а також калібрування компасів, гіроскопів і барометрів. Загалом конфігураційне ПЗ є інструментом попереднього програмування та узгодження всіх систем апарата відповідно до умов його експлуатації; **планувальне ПЗ** – використовується для створення маршрутів, зон покриття і точок виконання дій. До його функцій належать:

- розрахунок траєкторій руху з урахуванням рельєфу чи водного середовища;
- оптимізація маршруту для зменшення енергоспоживання;
- визначення зон дії відповідно до типу сенсорів або робочих органів (камери, обприскувачі, лідари, маніпулятори);
- налаштування параметрів місії (висота, глибина, швидкість, тип завдання);
- збереження шаблонів маршрутів для повторного використання.

Планувальне ПЗ також дозволяє враховувати метеоумови, заборонені зони для польоту або переміщення, задавати резервні сценарії на випадок втрати зв'язку чи відхилення від маршруту та інтегруватися з картографічними сервісами (наприклад *Google Maps*, *OpenStreetMap* або гідрографічними картами).

Приклади ПЗ:

- **UgCS (Universal Ground Control Software)** – багатофункціональна платформа для планування місій повітряних і наземних БПЛА. Підтримує тривимірне моделювання рельєфу, побудову оптимальних маршрутів, роботу з великими масивами даних, а також одночасне управління декількома дронами. Використовується для обстеження інфраструктури, лісового нагляду, агроаналізу;
- **QGroundControl** – кросплатформне ПЗ для моніторингу і управління БПЛА, наземними і підводними апаратами. Підтримує PX4 та MAVLink, дозволяє керувати апаратом у реальному часі,



калібрувати сенсори, переглядати відеопотік і змінювати маршрут місії. Застосовується у військових і цивільних сферах;

- **Mission Planner** – одна з найбільш поширених платформ для роботи системами на базі *ArduPilot*. Програма дає змогу планувати, запускати і аналізувати місії для повітряних апаратів, а також підтримує наземні й водні роботизовані системи. Вона містить розширений набір інструментів, зокрема модулі телеметрії, аналізу логів, калібрування сенсорів і автоматизації зльоту та посадки.

На рис. 5.1. наведено інтерфейс програмного забезпечення *UgCS* під час планування маршруту польоту квадрокоптера *DJI Matrice 350 RTK* у гірській місцевості. На тривимірній карті відображено траєкторію сканування жовтими, синіми та зеленими лініями з векторами руху, що демонструють запланований шлях з урахуванням рельєфу. Візуалізація враховує як зміну висоти над рівнем моря (*AMSL*), так і висоту над поверхнею землі (*AGL*), що є критичним для безпечного обльоту складної місцевості. Ліворуч у вікні налаштувань відображено параметри зони сканування, зокрема: допустиму похибку висоти над рельєфом (*AGL tolerance*), максимальний ухил (*Max slope*), мінімальну довжину сегмента маршруту, можливість використання подвійної сітки сканування та функції уникнення перешкод. У нижній частині інтерфейсу розміщено графік *Elevation profile*, який показує зміну висоти маршруту

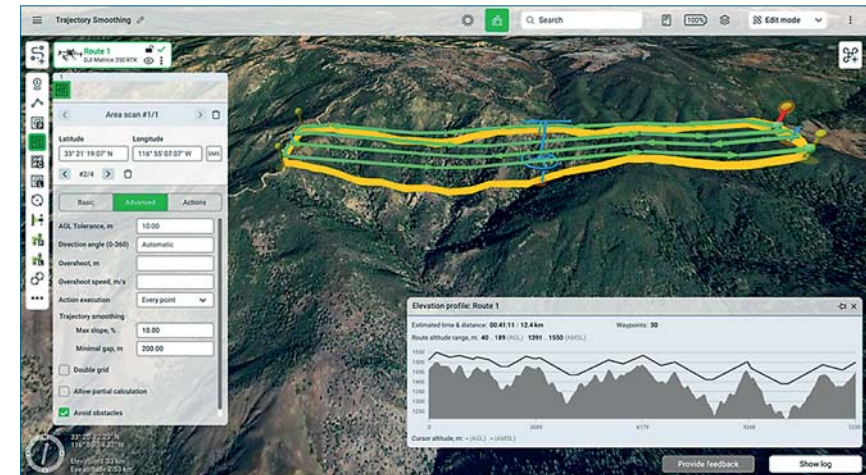


Рис. 5.1. Планування польоту дрона в *UgCS* з урахуванням рельєфу місцевості та профілю висот [1]



вздовж усього польоту, у метрах. На графіку зображено діапазон висот, кількість точок маршруту (30), його довжину (12,4 км) та орієнтовний час виконання місії (40 хв). Такий інтерфейс дозволяє інженеру або пілоту оптимізувати місію для безпечного польоту та якісного збору даних.

Огляд популярних програмних платформ для БПЛА

Далі розглянемо характеристики, сумісність, функціонал і прикладне використання платформ з урахуванням типу БПЛА. Для повітряних апаратів особлива увага приділяється стабілізації польоту, автоматизації зльоту та посадки, а також обробці аерофотознімків. Для наземних роботизованих платформ важливими є алгоритми обходу перешкод, стабільність руху по нерівній поверхні, інтеграції з модулями *LIDAR* або ультразвуковими сенсорами. Водні апарати своєю чергою потребують підтримки гідролокаційних систем, стабілізації на течії, обробки даних з глибиномірів і підводних камер. Огляд також містить аналіз сумісності програм із різними контролерами (*ArduPilot*, *PX4* тощо) та операційними системами.

Нижче наведено короткі профілі найпопулярніших програмних платформ з детальним описом їхніх функцій залежно від типу БПЛА. Кожна платформа пропонує власні інструменти для планування траєкторій польоту / руху, керування апаратами в реальному часі, аналізу зібраних даних, роботи з телеметрією, зображеннями, сенсорами, а також реалізації сценаріїв автономного виконання місії. Розглянуті платформи підтримують стандартні протоколи зв'язку (наприклад *MAVLink*), інтегруються з картографічними сервісами та забезпечують безперебійну роботу у складних умовах експлуатації, наприклад за сильного вітру, на перетнутій місцевості або при змінних водних потоках.

Mission Planner – одне з найпопулярніших безкоштовних програмних рішень для планування та аналізу польотів. Воно сумісне з платформами **ArduPilot**, **ArduCopter**, **ArduPlane** та **ArduRover**. За допомогою *Mission Planner* оператор може:

- **повністю контролювати політ БПЛА** – створювати маршрути, задавати висоту, швидкість, радіус поворотів, а також виконувати, автоматичний зліт і посадку;
- **налаштовувати параметри автопілота** (*PID*-регулятори, **GPS**, компас, телеметрію);



- **зчитувати та аналізувати журнали польотів (logs)** для перевірки стабільності, енергоспоживання, точності навігації;
- **керувати кількома типами платформ** – коптерами, літаками, наземними роверами;
- використовувати **віртуальні симулятори** для навчання без реального польоту.

QGroundControl – кросплатформне програмне забезпечення (*Windows, macOS, Linux, Android, iOS*), яке підтримує автопілоти **ArduPilot**, **PX4**, **ArduRover** і **VTOL**-системи.

Програма має **інтуїтивний графічний інтерфейс**, що робить її зручною для початківців та придатною для навчальних і лабораторних занять. Основні можливості платформи:

- **інтерактивне планування місії у 2D- та 3D-форматах** із використанням карт *Google, Bing, Mapbox*;
- **автоматичне калібрування сенсорів** – компаса, гіроскопа, акселерометра, радіоканалу;
- **відеонагляд у реальному часі** з підтримкою потокового відео з камери дрона під час польоту;
- **моніторинг стану системи**: рівень заряду батареї, якість *GPS*-сигналу, параметри польоту, стан двигунів;
- **дистанційне керування апаратом** і запис польотних даних завдяки модулю телеметрії.

UgCS – це комерційна платформа для планування та управління польотами, яка підтримує одночасну роботу кількох безпілотних апаратів. Її основні можливості:

- **тривимірне планування польотів (3D mission planning)** з урахуванням рельєфу місцевості, ліній електропередач, будівель та зон обмеження польоту;
- **підтримка більшості популярних платформ** – *DJI, ArduPilot, PX4, Mikrokopter, MAVLink*-сумісних систем;
- **модульна структура**, що дозволяє підключати додаткові аналітичні інструменти (*GIS*, геодані, карти висот);
- **управління кількома дронами одночасно**, що важливо для масштабних зйомок або інвентаризації;
- **планування польотів за профілем рельєфу**, що дозволяє підтримувати постійну висоту над поверхнею, навіть у складному ландшафті.



5.2. Розроблення маршрутів та зон для виконання завдань БПЛА

Побудова маршрутів визначає ефективність місії та безпосередньо впливає на її тривалість, точність збору даних і витрати енергії. Параметри маршруту залежать від типу БПЛА, його призначення, конфігурації сенсорів, умов середовища (рельєф, течія, перешкоди), а також завдання місії.

Поширені форми маршрутів для повітряних БПЛА.

Лінійні маршрути (Linear routes) – це послідовність прямих відрізків між двома або кількома точками, що формують трасу спостереження. Їхні переваги:

- забезпечують оптимальне використання акумулятора завдяки прямолінійному польоту;
- дозволяють проводити регулярний моніторинг протяжних ділянок із високою просторовою точністю;
- підтримують повторні польоти тим самим маршрутом для порівняння змін у часі (*time-series*-аналіз).

Грид-сітки (Grid pattern) – найпоширеніша форма маршруту для аерофотозйомки та картографування великих площ. БПЛА рухається паралельними лініями, зазвичай під кутом 90° або 45°, із перекриттям кадрів під час руху по різних лініях (одна й та сама ділянка місцевості потрапляє на кілька фото). Переваги форми маршруту:

- забезпечує повне покриття території з необхідним перекриттям знімків (*front overlap* 70–80 %, *side overlap* 60–70 %);
- легко масштабується для ділянок будь-якої форми та площі;
- придатна для автоматичної обробки у фотограмметричних програмах (*Pix4D*, *Metashape*).

Полігональні зони (Polygonal area) застосовуються для огляду ділянок неправильної форми, коли потрібно облетіти межі або виконати обстеження в межах визначеної території. Переваги полігональних зон:

- маршрут будується всередині довільного полігону, який задається вручну або імпортується з ГІС;
- оператор задає щільність проходів і кут сканування, керуючи якістю даних;
- підтримується робота на різних висотах (мультишарові зони) для зонального моніторингу.



Комбіновані місії поєднують ґрид-сітку для загального моніторингу та полігональні або лінійні сегменти для детального огляду. Це дозволяє одночасно отримати загальну картину поля та детальні дані з критичних зон, оптимізуючи витрати часу і енергії.

Моніторинг виконання завдань у реальному часі.

Системи моніторингу дають змогу відстежувати перебіг виконання завдання, своєчасно реагувати на непередбачувані ситуації та оперативно втручатися в хід місії. Для цього використовується телеметрія: *GPS*-позиція, швидкість, рівень заряду акумулятора, температура, якість сигналу зв'язку. За наявності камери – підтримується відеопотік майже в реальному часі. Для повітряних ДКБА моніторинг дозволяє відстежувати курс польоту, висоту, рівень заряду акумулятора, навантаження на пропелери.

Важливими функціями є:

- виявлення відхилень від маршруту або параметрів роботи;
- оперативне коригування траєкторії;
- Передавання команди автоматичного повернення в точку старту (*RTL*).

5.3. Налаштування режимів виконання завдань

БПЛА можуть працювати в різних режимах, що визначають ступінь автоматизації їхніх дій і участі оператора (табл. 5.1). Основними є автономний, напіваавтономний і ручний режими, кожен з яких має особливості використання для повітряних, наземних та водних апаратів.

Для повітряних БПЛА автономний режим передбачає повне виконання польоту за заздалегідь спланованим маршрутом з автоматичним зльотом і посадкою. Напіваавтономний режим дозволяє змінювати траєкторію або виконувати додаткові дії під час місії, а ручний – використовується при виконанні складних маневрів або в разі втрати зв'язку з базовою станцією.



Таблиця 5.1. Режими роботи БПЛА

Режим	Опис
Автономний	БПЛА виконує маршрут без втручання оператора. Застосовується для повторюваних місій
Напівавтономний	Оператор може змінювати завдання протягом місії
Ручний	Повне управління оператором в режимі реального часу – необхідне для точних або екстрених операцій

Приклади:

- автономний обліт поля за попередньо створеним маршрутом у *Mission Planner*;
- напівавтономна місія: оператор додає точку огляду в реальному часі, щоб уточнити виявлену проблему;
- ручне керування в умовах обмеженого простору – навігація в ангарі.

5.4. Приклад роботи з програмою: інструкція створення автономної місії в *Mission Planner* (відеоінструкція англійською мовою)

Мета:

опанувати створення автономних місій у програмі *Mission Planner*. Інструкція демонструє побудову маршрутів для БПЛА, встановлення висот, налаштування зльоту та посадки, запис місії до контролера та її запуск у тестовій зоні (наприклад на футбольному полі).

Покрокова інструкція

1. Відкриття планувальника місій:
 - запустіть програму *Mission Planner*;
 - перейдіть у вкладку «*Plan*»;
 - виберіть зону тестування на мапі (наприклад, футбольне поле).
2. Створення маршрутних точок:
 - додайте точки маршруту в послідовності: 1–2–3–4–5–6 (останній – посадка);
 - для кожної точки встановіть висоту польоту 3 м.

**3. Встановлення дій для місії:**

- призначте команди для точок маршруту:
 - Точка 1 – *TAKEOFF*,
 - Точки 2–5 – *WAYPOINT*,
 - Точка 6 – *LAND*.
- переконайтесь, що для всіх точок задано висоту 3 м.

4. Запис місії в дрон:

- натисніть кнопку «*Write*» для запису місії;
- увійдіть у вкладку «*Data*»;
- оберіть «*Actions*» – «*Arm*» – «*Do Action*». Після цього місія запускається.

5. Повтор місії з 8 точками:

- додайте точки маршруту з 1 по 8;
- встановіть висоту всіх точок на 5 м;
- призначте: *TAKEOFF* – точка 1; *LAND* – точка 8 (висота 0 м);
- запишіть місію та надішліть через телеметрію;
- активуйте дрон (дія *ARM*, що вмикає мотори та перевіряє системи перед польотом) і запустіть місію.

6. Розширений сценарій з 11 точками:

- додайте точки маршруту з 1 до 11;
- встановіть висоту для всіх точок: 6 м;
- призначте: *TAKEOFF* – точка 1, *LAND/RTL* – точка 11;
- перевірте стабільність утримання висоти;
- запишіть місію та увімкніть режим *AUTO MODE*.

7. Завершення та спостереження:

- у режимі *AUTO* дрон виконує місію автоматично;
- під час польоту контролюйте рівень заряду батареї;
- за потреби увімкніть режим у *STABILIZE*.

Корисні поради

- Завжди перевіряйте встановлену висоту перед польотом.
- Використовуйте симулятор перед польотами в реальному середовищі.
- Для зручності тримайте БПЛА в полі зору та забезпечте стабільний зв'язок через телеметрію.
- Уникайте перешкод у зоні тестування.



Автоматичне планування місій у *Mission Planner* (Дрон). Інструкція розроблена на основі джерела [2].



Це частина серії навчальних відео щодо використання програмного забезпечення наземного керування *Mission Planner*. У відео розглядаються базові функції вкладок *Flight Data* та *Flight Plan* у *Mission Planner*.

Із міркувань безпеки у цьому відео демонструється реальний запис тестового польоту в зоні з малою висотою та низькою швидкістю.

Висновок. Програмне забезпечення є центральною ланкою в управлінні безпілотними системами, яка забезпечує повний цикл від планування місії до аналізу результатів. Розвиток програмних платформ дозволяє підвищити ефективність, безпеку та гнучкість виконання завдань, мінімізувати вплив людського фактору та інтегрувати нові технології, зокрема штучний інтелект і автоматичне уникнення перешкод. Компетентне використання ПЗ дає змогу оптимізувати маршрути, керувати кількома апаратами одночасно, збирати та обробляти дані в реальному часі, що робить його невід'ємною частиною професійної діяльності операторів БПЛА.



ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

- Які основні типи програмного забезпечення для БПЛА ви знаєте та які їхні функції?
- У чому полягає різниця між планувальним, контрольним і конфігураційним ПЗ?
- Які можливості надає *UgCS* для тривимірного планування місій?
- Для чого використовується *QGroundControl* та з якими протоколами він сумісний?
- Які завдання вирішує *BlueROV Companion Software* у підводних місіях?
- Як реалізується моніторинг виконання завдань у реальному часі?
- Які режими роботи БПЛА ви знаєте та в чому їхні відмінності?
- Як конфігураційне ПЗ допомагає налаштувати роботу сенсорів і контролера польоту?
- У яких випадках доцільно використовувати автономний режим виконання місії?
- Чому важливо інтегрувати програмне забезпечення БПЛА з картографічними сервісами та *GIS*?

Джерела інформації

1. <https://www.sphengineering.com/flight-planning/ugcs>
2. https://www.youtube.com/watch?v=xQPv2VRDi0g&ab_channel=MohamedZiedchaari



РОЗДІЛ 6

Програмна діагностика та підготовка програмного забезпечення до польотів сільськогосподарських БПЛА

Автори: Микола Іванович БИКОВ
Павло Володимирович ГОРЯЧЕВ

Після опрацювання цієї теми здобувач освіти:

- **ознайомиться з основами класифікації** інструментів та методів програмної діагностики сільськогосподарських БПЛА, видами налаштувань та поведінкових алгоритмів;
- **набуде знань** про порядок проведення комплексної перевірки програмного забезпечення, зокрема оновлення прошивок, калібрування сенсорів, налаштування поведінкових сценаріїв, планування місій та аналізу логів;
- **дізнається про специфіку застосування** програмної діагностики у сільськогосподарських місіях: агроскаутингу, фотограмметрії, внесення агрохімікатів, моніторингу стану культур;
- **навчиться визначати доцільність використання** конкретних налаштувань та програмних інструментів залежно від типу БПЛА, особливостей місії, погодних умов і регламентів;
- **оволодіє розумінням функціоналу** програмних платформ (*DJI Assistant 2, DJI Fly, DroneDeploy, Pix4D, QGIS, Airdata UAV* тощо) та їхніх можливостей для забезпечення точності, стабільності й безпеки польотів.



Ефективне використання БПЛА в сільському господарстві передбачає технічну справність обладнання та належну роботу програмного забезпечення, яке координує роботу дрона. Програмна діагностика БПЛА проводиться перед кожним польотом і повинна запобігти потенційним збоєм системи керування, які можуть негативно вплинути на точність агроскаутингу, фотограмметрії або внесення агрохімікатів.

Особливу увагу приділяють методикам налаштування програмного середовища, зокрема поведінковим алгоритмам (наприклад логіці повернення дрона в разі втрати сигналу), адаптації програмного інтерфейсу до цілей місії (режимів розпилення, фотозйомки або обльоту полів), конфігурації систем точного позиціонування (*RTK*) та інтеграції з цифровими картографічними платформами.

6.1. Сутність програмної діагностики та її функціональне призначення

Програмна діагностика є частиною системи експлуатаційного контролю БПЛА, що забезпечує функціональну надійність, безпечну експлуатацію та високу точність виконання завдань. Вона охоплює не лише перевірку оновлень та калібрування, а й системний аналіз узгодженості програмно-апаратних модулів: стан датчиків, параметри системи позиціонування, логіку переходу між режимами польоту та відповідність налаштувань до конкретного агропромислового сценарію. На цьому етапі оцінюється, наскільки програмне забезпечення дрона правильно обробляє телеметрію, реагує на зміни зовнішніх умов (наприклад, магнітні аномалії чи втрату зв'язку) та забезпечує передбачувану поведінку системи в разі непередбачуваних ситуацій (табл. 6.1, 6,2).

**Програмна діагностика охоплює:**

- перевірку коректності функціонування вбудованих мікропроцесорних систем;
- відповідність версій прошивок до актуальних технічних вимог;
- стан калібрування критичних сенсорних модулів (*IMU*, компас, барометр);
- наявність та правильність конфігурацій планувальників польотних місій;
- інтеграцію з геоінформаційними сервісами та модулями *RTK*-корекції.

Мета програмної діагностики – забезпечити відповідність між запланованим маршрутом польоту, очікуваною поведінкою системи стабілізації та телеметричними показниками, що надходять з бортових сенсорів у режимі реального часу. Ця відповідність важлива як для точкових аграрних завдань (наприклад зонального моніторингу стану культур або прецизійного внесення препаратів), так і для загальної надійності польотної місії. Порушення такої відповідності може свідчити про дефект апаратного модуля, порушення калібрування або збої у програмному керуванні, що вимагає негайного втручання або переналаштування системи. Отже, діагностика виконує не лише контрольну, а й прогностичну функцію, дозволяючи передбачити сценарії можливої відмови і своєчасно втрутитись у логіку поведінки БПЛА до прояву проблем.

Таблиця 6.1. Комплексний чеклист програмної підготовки БПЛА до польотів

Етап	Об'єкт контролю	Інструмент
1. Оновлення ПЗ	БПЛА, контролер, батарея, <i>RTK</i> -модуль	<i>DJI Fly, Pilot, Pilot 2</i> і інші
2. Калібрування	Інерціальні модулі, компас, підвіс	<i>DJI Assistant 2, DJI Fly</i>
3. Поведінкові налаштування	<i>RTH</i> (повернення додому), <i>Failsafe</i>	<i>DJI Fly, DJI Pilot</i>
4. Поточна діагностика	<i>GPS</i> , температура, система бачення	<i>DJI Fly, DJI Pilot</i>



Етап	Об'єкт контролю	Інструмент
5. Планування місії	Контури полів, висота, перекриття	<i>DroneDeploy, Pix4D, DJI Pilot1/2</i>
6. Перевірка знімків	Ортофотоплани, корекція перспективи	<i>QGIS, Google Earth Pro, Pix4D</i>
7. Аналіз логів	Стрес-навантаження, телеметрія, електросистеми та споживання енергії	<i>Airdata UAV, DJI Fly, Pilot1/2</i>
8. Контроль акумуляторів	Вольтаж, внутрішній опір, циклічність	<i>Multimeter, Battery Analyzer, DJI Fly, Pilot1/2</i>

Таблиця 6.2. Характеристика інструментів програмної діагностики

Інструмент	Характеристика
<i>DJI Assistant 2</i>	Настільна (<i>desktop</i>) програма для глибокої діагностики БПЛА <i>DJI</i> . Використовується для оновлення прошивок, калібрування <i>IMU</i> , компаса, підвісу. Дозволяє зчитувати логфайли типу <i>DAT</i> для подальшого технічного аналізу
<i>DJI Fly / DJI Pilot</i>	Мобільні застосунки для повсякденного керування польотами. Забезпечують доступ до базових налаштувань: поведінка <i>RTH</i> , калібрування, перевірка статусу <i>GPS</i> , стану батарей, сенсорів, завантаження карт. <i>DJI Pilot</i> підтримує <i>Enterprise</i> -моделі з розширеним функціоналом
<i>DroneDeploy / Pix4D</i>	Програмні платформи для планування місій, збору зображень та побудови ортофотопланів. <i>DroneDeploy</i> – хмарна система з простим інтерфейсом. <i>Pix4D</i> – професійна фотограмметрична система з підтримкою <i>GCP</i> та експорту до <i>GIS</i>
<i>QGIS / Google Earth Pro</i>	Інструменти для просторової візуалізації, накладання карт, меж полів, ортофотопланів. <i>QGIS</i> підтримує багат шаровий аналіз і просторову аналітику. <i>Google Earth Pro</i> – швидкий перегляд <i>KML</i> , висот та історичних супутникових знімків



Інструмент	Характеристика
Airdata UAV	Хмарна платформа для аналізу логфайлів польоту (аналітика IMU, GPS, сигналу, стану та роботи батарей). Автоматично створює звіти про помилки, навантаження на систему та потенційні загрози. Важливий інструмент для постпольотного аудиту та контролю ризиків
Мультиметр	Універсальний ручний прилад для вимірювання напруги, струму, опору на контактах батарей і електронних компонентів. Дозволяє оперативно виявити електричні несправності
Battery Analyzer / Tester	Спеціалізований пристрій для перевірки ємності, циклічності, внутрішнього опору акумуляторів. Дозволяє прогнозувати деградацію батарей та запобігти використанню несправних елементів живлення

Інтернет-ресурси для ознайомлення з інструментами

- **DJI Assistant 2:** <https://www.dji.com/downloads/softwares/dji-assistant-2>
- **DJI Fly:** <https://www.dji.com/global/fly-app>
- **DJI Pilot 2:** <https://enterprise.dji.com/pilot-2>
- **DroneDeploy:** <https://www.dronedeploy.com/>
- **Pix4D:** <https://www.pix4d.com/>
- **QGIS:** <https://qgis.org/en/site/>
- **Google Earth Pro:** <https://www.google.com/earth/versions/#earth-pro>
- **Airdata UAV:** <https://www.airdata.com/>
- **Battery Analyzer** приклади: <https://www.isdt.co/> (наприклад, ISDT BattGo або iSDT BG-8S).
- **Multimeter** (огляди та моделі): <https://www.fluke.com> або <https://www.uni-trend.com> (Fluke, UNI-T – провідні бренди).



6.2. Програмне налаштування: функціональні параметри та поведінкові сценарії

Після первинної діагностики наступним етапом є налаштування програмного забезпечення для адаптації роботи БПЛА до конкретних цілей польоту, типу місії, умов середовища та обмежень регламенту польотів. Налаштування ПЗ виконується через штатні або сторонні програмні інтерфейси (зокрема *DJI Fly, Pilot, GS RTK, Mission Planner, QGroundControl*), що дозволяють керувати поведінковими алгоритмами, логікою переходів між режимами, межами дій платформи та інтеграцією з геоданими.

Основні категорії програмних налаштувань:

1. **Алгоритми *Failsafe*:** визначають поведінку дрона в разі втрати сигналу (*Return to Home, Hover, Land*). В аграрному контексті перевагу надають *RTH*, але з динамічною прив'язкою до висоти над рослинністю.
2. **Зони обмеження польотів:** налаштовуються або згідно з геозонами виробника (*GeoUnlock*), або вручну (для місій з обльотом ліній електропередач, складів, ферм).
3. ***RTH* та початкова точка:** задається точка старту з урахуванням висотного профілю місцевості та наявності перешкод. Мінімальна рекомендована висота – на 20–30 м вище за найвищу точку на маршруті.
4. **Режим польоту** – залежно від завдання: стабілізований (*Stabilized*), GPS-підтримуваний (*P-GPS*), режим ручного контролю (*Manual*) або повністю автоматичний (*Waypoint Missions*).
5. **Конфігурація камери:** виставлення параметрів експозиції, *ISO*, інтервалу між кадрами, типу формату (*RAW/JPEG*) для подальшої обробки в фотограмметрії або *NDVI*-аналізі.
6. **Прив'язка до *RTK* або *NTRIP*:** підключення до станцій точного позиціонування в режимі реального часу (через *SIM, Wi-Fi* або *Bluetooth*), що актуально при обльотах для створення ортофотопланів високої точності.



7. Реєстрація телеметрії: налаштування частоти запису параметрів (логування *IMU*, *GPS*, батарей, відео) із подальшим завантаженням у сервіси, наприклад *Airdata UAV*.

8. Інтерфейс пілота / оператора: адаптація елементів керування (розміщення джойстиків, перемикачів режимів, відображення *HUD*, маршруту).

Приклад: поведінковий сценарій обльоту поля.

Для планової фотозйомки поля з подальшим створенням ортофотоплану:

- використовується програма *Mission Planner* з шаблоном *Grid*;
- перекриття знімків встановлюється 80 % фронтальне та 70 % бокове;
- інтервал між кадрами – 2 секунди, швидкість польоту – 5 м/с.
- камера в режимі фіксованого фокусу, *ISO* – авто, формат – *JPEG+RAW*;
- увімкнено *RTK*-корекцію через *NTRIP*;
- запрограмовано поведінку *RTH* при низькому заряді – повернення на базу, якщо рівень заряду батареї опускається до 30 %.

Цей приклад показує, що програмне налаштування – це не просто серія технічних опцій, а вбудована частина логіки точного сільськогосподарства, де кожен параметр впливає на достовірність даних, безпеку виконання і якість результату.

6.3. Найкращі практики кібербезпеки для операцій БПЛА

6.3.1. Безпечне управління мікропрограмним забезпеченням:

- завжди завантажуйте оновлення мікропрограмного забезпечення з офіційних каналів виробника (перевіряйте *HTTPS*, перевіряйте цифрові підписи);
- уникайте сторонніх репозиторіїв мікропрограмного забезпечення або «зламаних» версій;
- ведіть журнали версій мікропрограмного забезпечення;
- тестуйте оновлення на некритичних системах перед розгортанням на операційному флоті.



6.3.2. Безпека телеметрії та зв'язку:

- увімкніть шифрування для потоків телеметрії, де це підтримується (шифрування *MAVLink*, *SRTP* для відео);
- використовуйте протоколи зі стрибкоподібною зміною частоти або розширеним спектром для зменшення ризику перехоплення;
- уникайте передачі чутливих даних (*GPS*-координати критичної інфраструктури) незашифрованими каналами;
- моніторте спроби перешкод або глушіння сигналу.

6.3.3. Безпека наземної станції керування (*GCS*):

- підтримуйте операційні системи та програмне забезпечення *GCS* в актуальному стані (*Windows Update*, *macOS Security Updates*);
- встановіть надійне антивірусне / антишкідливе програмне забезпечення;
- використовуйте надійні паролі та увімкніть багатофакторну автентифікацію (*MFA*), де це доступно;
- фізично захищайте пристрої *GCS*, коли вони не використовуються (замкнене сховище, кабельні замки);
- уникайте використання публічного *Wi-Fi*.

6.3.4. Безпека хмарних платформ:

- розумійте політику резидентності даних (де зберігаються зображення / телеметрія, хто має доступ);
- перегляньте умови обслуговування хмарних платформ (*DroneDeploy*, *Pix4D*, *Airdata UAV*);
- для чутливих застосувань розгляньте локальну обробку замість завантаження в хмару;
- увімкніть двофакторну автентифікацію (*2FA*) для хмарних облікових записів;
- регулярно перевіряйте дозволи доступу користувачів.

6.3.5. Операційна безпека (*OPSEC*):

- уникайте публікації планів польотів або зображень чутливих місць у соціальних мережах;
- вимкніть автоматичне геотегування для фото / відео при роботі поблизу критичної інфраструктури



- проінформуйте операторів про обов'язки щодо інформаційної безпеки
- повідомляйте про підозрілу активність (глушіння сигналу, не-санкційовані дрони) владі.

Висновок. Програмна діагностика та налаштування ПЗ є важливим елементом підготовки сільськогосподарських БПЛА до польотів. Від правильності цього етапу залежить безпека польоту, точність збору даних, ефективність внесення препаратів та стабільність виконання місії. Системний підхід, що поєднує багаторівневу перевірку апаратних та програмних модулів, налаштування поведінкових алгоритмів та інтеграцію з геоінформаційними платформами, дозволяє мінімізувати ризики та підвищити продуктивність аграрних операцій. Використання спеціалізованих інструментів діагностики та налаштувань робить процес керуванням, прогнозованим і відповідним до високих стандартів точного землеробства.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

- Що таке програмна діагностика БПЛА та які її основні завдання?
- Які етапи входять до комплексної підготовки програмного забезпечення перед польотом?
- Для чого проводиться калібрування *IMU* та компаса і як це впливає на точність польоту?
- Що таке алгоритми *Failsafe* та як вони застосовуються у сільськогосподарських місіях?
- Як налаштовується поведінка *Return to Home (RTH)* для аграрних завдань?
- Які програмні інструменти використовуються для планування польотів і створення ортофотопланів?
- Яку роль відіграють *RTK*-корекція та *NTRIP*-підключення у підвищенні точності БПЛА?
- Для чого здійснюється аналіз логів польотів і які параметри тоді перевіряються?
- Як проводиться контроль стану та роботи акумуляторів і чому він важливий перед польотом?
- У чому полягає інтеграція БПЛА з геоінформаційними системами і як вона допомагає виконувати завдання в сільському господарстві?



РОЗДІЛ 7

Економічна ефективність упровадження дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів та цифрових інструментів у практику агровиробництва

Автор Андрій Євгенович ДАНКЕВИЧ

Після опрацювання цієї теми здобувач освіти:

- сформує цілісне розуміння економічних, технічних і організаційних аспектів використання сучасних дронів у сільському господарстві. Навчиться оцінювати **економічну доцільність і ефективність упровадження БПЛА** на основі аналізу витрат, очікуваної окупності, підвищення врожайності та зниження собівартості продукції;
- **дізнається, як обчислювати економічний ефект** від оптимізації застосування добрив, засобів захисту рослин і палива, а також аналізувати вплив цих технологій на екологічну та енергетичну стійкість господарства;
- **зможе поєднувати знання з агрономії, економіки підприємства та цифрових технологій** для впровадження інноваційних підходів в агробізнесі. Підготується до роботи в умовах цифрової трансформації сільського господарства, упровадження технологій точного землеробства та сталого використання ресурсів на основі аналітики, що базується на даних, зокрема отриманих завдяки БПЛА.



Цифрова агрономіка сьогодні є новим інструментом формування доданої вартості в сільському господарстві. БПЛА інтегрують точність, ефективність і екологічність, формуючи основу сучасного цифрового сільського господарства. Їхнє застосування дозволяє агровиробникам підвищувати економічну результативність, знижувати витрати та впроваджувати інноваційні підходи до управління виробництвом.

Нині агроном має бути не лише експертом у рослинництві, а й активним користувачем цифрових аналітичних інструментів. Для аналізу даних потрібно вміти інтерпретувати графіки, карти NDVI, працювати з геоданими, API-системами (наприклад, із *Cropwise* чи *SmartESS*). Водночас дрони є фізичним інструментом, помічником агронома. Саме дрони дозволяють у режимі реального часу моніторити стан посівів, перевіряти дані супутникової аналітики та оперативно проводити технологічні операції тоді, коли це неможливо чи економічно недоцільно робити традиційними агрегатами.

Ринок агродронів динамічно розвивається. Якщо у 2024 році він оцінювався в 73,19 млрд доларів США, то, за прогнозами, у 2035 році він зросте до 130,61 млрд доларів США із середньорічним темпом приросту 5,3 % протягом прогнозованого періоду.

Обсяг європейського ринку у 2023 році становив 1,94 млрд доларів США, а у 2024 році зріс до 2,6 млрд (на 33,7 %) (рис. 7.1). Відповідно до звіту *The Business Research Company*, до 2028 року він може сягнути 7,62 млрд доларів США, а до 2034 року – 17,64 млрд доларів США. Зокрема, прогнозують, що інвестиції в агродрони в Німеччині зростуть з 450 млн доларів США у 2024 році до 5,0 млрд доларів США у 2035 році. Очікується, що в період з 2025 по 2035 роки складний річний темп зростання (CAGR) становитиме 24,45 %.

Зростання попиту на технології точного землеробства, ймовірно, стимулюватиме впровадження аграрних дронів у країнах Європи. Основним рушієм ринку є потреба в підвищенні точності моніторингу врожаю. Прогнозується, що до 2035 року тільки сегмент програмного забезпечення на європейському ринку сільськогосподарських дронів досягне 6,34 млрд доларів США.

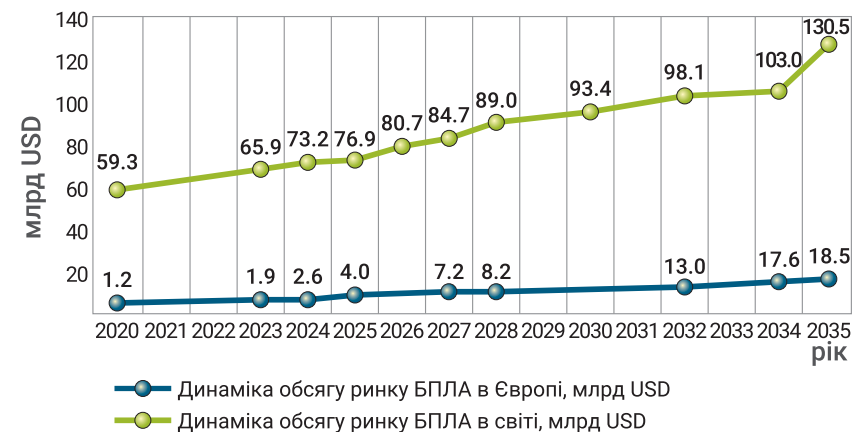


Рис. 7.1. Динаміка обсягу ринку БПЛА в Європі та світі.
(Підготовлене авторами на основі [1] і власних досліджень)

Компанії, які є найбільшими учасниками ринку дронів: «Romeo Drones», «Insitu», «Skydio», «Mapteks», «Mavinci», «Yamaha Motor», «DroneDeploy», «SenseFly», «Quantum Systems», «DJI», «Parrot», «Aerialtronics», «AgEagle», «Precision Hawk», «Delair».

Ключові можливості ринку: упровадження технологій точного землеробства, інтеграція практик сталого сільського господарства, передові рішення для моніторингу стану культур, розвиток нормативно-правової бази, партнерство в галузі агротехнологічних інновацій.

Наприклад, у Нідерландах вже застосовують невеликі безпілотники для боротьби зі шкідниками: вони знищують їх за допомогою пропелерів і водночас здатні розпізнавати та не пошкоджувати корисних комах, як-от бджіл, сонечок та джмелів. А в Бельгії розробили спеціалізований дрон для підрахунку фруктів і ягід у садах та на плантаціях, що допомагає виробникам точніше прогнозувати врожай. В Ізраїлі розробили літального автономного робота, який може самостійно збирати фрукти в садах вдень і вночі, без допомоги людини.

Ключова динаміка ринку: зростання врожайності сільськогосподарських культур, посилення нормативно-правових вимог, швидкий технологічний розвиток безпілотних систем, підвищення вартості робочої сили та розширення впровадження технологій точного землеробства.



Зростання світової індустрії дронів зумовлене швидким прогресом у сфері штучного інтелекту, інтеграції сенсорів та розвитку модульного дизайну. Водночас це зростання загострило конкуренцію, зробивши брендинг стратегічним пріоритетом, а не лише маркетинговим інструментом.

Цифрові інструменти монетизації: зростання світової індустрії дронів зумовлене швидким прогресом у сфері штучного інтелекту; інтеграції сенсорів та розвитку модульного дизайну сприяли впровадження методів точного землеробства, брак робочої сили в аграрному секторі, регуляторна підтримка, прагнення фермерів до економічної ефективності та операційної гнучкості, а також зростання чисельності населення світу й попиту на продукти харчування. Табл. 7.1. наводить ключові переваги використання безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві, зокрема їхню оперативність, точність, економічну ефективність, екологічність, автоматизацію процесів, масштабованість і здатність виконувати багатофункціональні завдання навіть у важкодоступних ділянках.

Таблиця 7.1. Економічні ефекти застосування повітряних БПЛА в агровиробництві. Джерело: власні дослідження авторів та [1]

ОПЕРАТИВНІСТЬ	ТОЧНІСТЬ	ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ
Отримання даних за 1 політ, день	Виявлення проблем з точністю до 2–5 см (NDVI, зйомка)	Економія добрив, ЗЗР, води (до –30 %)
ПІДВИЩЕННЯ ВРОЖАЙНОСТІ (на 5–20 %)	АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ	БЕЗПЕЧНІСТЬ ТА ЕКОЛОГІЧНІСТЬ
Раннє реагування на хвороби та стрес рослин, без технологічного витоптування посівів	Дозволяє скоротити час підготовки управлінських звітів із 5–6 год до 20–30 хв , із мінімальним ризиком ручних помилок	Зменшення витрат ресурсів – потенціал зниження викидів CO ₂ та доступ до вуглецевих кредитів
МАСШТАБОВАНІСТЬ	БАГАТО-ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ	ДОСТУПНІСТЬ ВАЖКИХ ДІЛЯНОК
Для будь-яких господарств	Моніторинг, карти, 3D-рельєф, NDVI, NDRE, індекси вегетації, формування карт-завдань для точного внесення добрив і ЗЗР	Ділянки із заболоченням, складним рельєфом і обмеженим доступом техніки



Геоінформаційні технології в сільському господарстві можуть використовуватися як на регіональному, так і на державному рівнях для узгодження управлінських рішень як між різними рівнями влади, так і між господарствами одного рівня. Серед найвідоміших провайдерів цього сервісу варто згадати компанії «Cropio», «eLeaf», «PrecisionAgriculture», «Astrium-Geo» та «MapExpert». Використання цих систем дає змогу оперативно відстежувати стан сільськогосподарських угідь. Користувачі також можуть отримувати в режимі реального часу звіти та повідомлення про виробничі процеси, прогнозувати врожайність полів і загальний стан господарства, та навіть отримувати супутню інформацію про ринки агропродукції, валютні котирування та біржові ціни на сільськогосподарські товари. Перспективним напрямом застосування досліджень є аналіз застосування технологій дистанційного зондування земель для моніторингу тінювих процесів в аграрному секторі.

Китай, Індонезія, країни Південної Африки, В'єтнам уже тривалий час використовують дрони-обприскувачі й накопичили значний практичний досвід. У Європі лідерами у впровадженні таких технологій є Німеччина, Велика Британія, Франція, Італія, Іспанія. В Україні ж основною проблемою залишається офіційна реєстрація препаратів із визначеними характеристиками (дозволені або рекомендовані для внесення дронами) та чітко встановленими нормами застосування, що могло б забезпечити агрономам більшу нормативну визначеність. Наразі ж дозування препаратів часто здійснюється фактично на відповідальність самих фахівців.

Основними типами БПЛА, що використовуються в агросекторі є: 1) коптери (багатороторні апарати) – здатні зависати в повітрі, що дозволяє проводити детальну фото- та відеозйомку; 2) апарати літакового типу (крила) – можуть покривати значно більші площі, але вимагають злітно-посадкової смуги або ручного запуску; 3) гібридні системи (поєднання коптера та літака) – поєднують переваги коптера й літака: дають змогу здійснювати моніторинг великих територій із можливістю вертикального зльоту та посадки, швидко реагувати на локальні зміни й обстежувати поля в складних умовах.



Отже, БПЛА – це універсальний інструмент цифрового землеробства, що поєднує економічну ефективність, екологічну доцільність і технологічну точність. БПЛА є інструментом агронома для переходу від традиційного підходу до рішень на основі аналітики й автоматизованих рішень.

На рис. 7.1. перелічено основні сфери використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в аграрному секторі, які охоплюють картографію та моніторинг, точне землеробство, польові операції й екологічну стійкість. Використання дронів дозволяє здійснювати діагностику стану культур, виявлення шкідників і хвороб, контроль зрошення та ерозійних процесів; воно підвищує ефективність точного землеробства завдяки зонуванню полів і контролю норм внесення добрив; забезпечує оперативне внесення засобів захисту рослин і добрив, зокрема у важкодоступних місцях, а також сприяє екологічній стійкості через зменшення використання хімікатів, оптимізацію ресурсів та скорочення вуглецевого сліду.

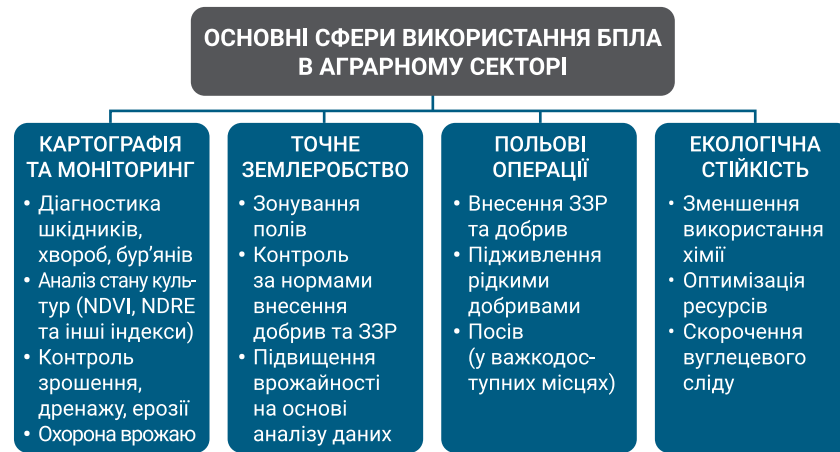


Рис. 7.1. Основні сфери використання БПЛА в аграрному секторі. (Власні дослідження авторів та [1])

Сьогодні дрони використовують насамперед для моніторингу посівів – тобто спостереження за станом рослин на різних фазах їхнього розвитку. За допомогою БПЛА оцінюють забур'яненість, ураження хворобами й шкідниками, забезпеченість рослин



елементами живлення та водою. Дрони дозволяють виявляти технологічні помилки, зокрема перекриття під час виконання польових операцій і ділянки просіву.

Крім того, вони застосовуються для обміру полів, створення візуальних та NDVI-карт, карт диференційованого внесення добрив і засобів захисту рослин. БПЛА використовують і для виконання технологічних операцій – внесення добрив, ЗЗР, біологічних агентів (наприклад трихограми), а також для спостереження за станом ґрунту, побудови ґрунтових карт і оцінки неоднорідності ґрунтового покриву за кількістю гумусу.

Картографування полів дозволяє агровиробникам візуально оцінити стан земель, контролювати закономірності росту та приймати обґрунтовані управлінські рішення. Система моніторингу врожаю використовує дрони для оцінки стану рослин, раннього виявлення проблем і своєчасного втручання для боротьби з хворобами і шкідниками.

Аерофотознімання дає змогу збирати дані про стан полів із висоти, спостерігаючи за всіма процесами на землі. Хоча супутники є економічно ефективними для масового збору даних, дрони, що літають ближче до поверхні, мають свої переваги: висока роздільна здатність, можливість детального обстеження окремих ділянок і гнучке реагування на зміни. Дрони і супутники не є повністю взаємозамінними, а вдало доповнюють одне одного.

Безпілотні літальні апарати є одним з основних інструментів точного землеробства, адже забезпечують швидкий і точний збір даних про стан посівів та ґрунтів. Завдяки сучасним камерам і сенсорам дрони дозволяють створювати карти вегетації, визначати неоднорідність розвитку культур, контролювати внесення добрив і засобів захисту, а також перевіряти якість виконання агротехнічних операцій. Інтеграція даних БПЛА з програмним забезпеченням для управління господарством дає змогу ухвалювати обґрунтовані рішення та оптимізувати використання ресурсів.

Використання БПЛА також підвищує **екологічну стійкість** сільськогосподарського виробництва. Дрони дозволяють вносити хімічні препарати лише в необхідних зонах, що скорочує їхнє використання



на 25–40 %, зменшує навантаження на екосистему та знижує ризик потрапляння пестицидів у ґрунтові води. Оптимізація ресурсів із використанням БПЛА охоплює воду, добрива, паливо та робочий час, підвищуючи ефективність і економічну доцільність аграрних операцій, зменшення карбонового сліду (викидів вуглецю в атмосферу). Наприклад завдяки технології дронів-обприскувачів у 2021 році в Україні аграрії знизили викиди вуглецю на 14 тис. тонн [4].

Економіка використання технології БПЛА в агровиробництві.

В агротехнологічних операціях на полі БПЛА дозволяють суттєво економити ресурси та підвищувати ефективність виробництва (табл. 7.2). Зокрема, завдяки дронам можна досягти:

- зниження витрат на паливо, ЗЗР та добрива на 15–30 %;
- економії води до 97 % під час внесення розчинів;
- підвищення врожайності на 5–15 % завдяки точному контролю стану посівів та відсутності технологічних колій (витоптувань);
- скорочення часу агромоніторингу в 3–5 разів.

Завдяки цьому окупність інвестицій у дрон ($\approx 200\ 000\text{--}500\ 000$ грн) може складати всього 2 сезони на площі обробітку понад 500 га.

Таблиця 7.2. Порівняння техніко-економічних показників традиційних оприскувачів і БПЛА у агровиробництві. (Власні дослідження авторів та [1]; [5])

Показник	Традиційні обприскувачі	БПЛА (дрони-обприскувачі)
Норма виробітку, га	250 га/день	100 га/день
Вартість обробки 1 га/\$	\$10–25	\$7–11
Споживання води, л/га	200 л/га	5–8 л/га
Споживання ЗЗР	Повне внесення	До 30% економії ЗЗР
Втрати в зонах проходу техніки (колії)	2–6 % площі	0 %
Витрати на пальне / електроенергію	\$2–4 (дизель)	\$0.2–0.5 (1.5–3.5 кВт·год/га)
Складність обслуговування	Висока (гідравліка, ДВЗ)	Низька (модулі, батареї, ПЗ)
Доступність у важких умовах	Обмежена (після дощу, у горах, болотах)	Висока мобільність, мінімальні вимоги до рельєфу



Показник	Традиційні обприскувачі	БПЛА (дрони-обприскувачі)
Обмеження	Прохідність, погода	Батарея, погода
Екологічність	Викиди CO ₂ , ущільнення ґрунту	Зменшення викидів діоксиду вуглецю та витрат ресурсів
Обмеження по висоті культур	Є (~1.2–1.5 м)	Немає
Вартість техніки	\$30 000–250 000+	\$10 000–40 000
Точка рентабельності	170 000 га	1400–1700 га
Окупність інвестицій	5–7 сезонів	1–2 сезони

Обприскування з повітря дає змогу вчасно виконати обробіток в умовах, коли наземна техніка не може заїхати у поле через підвищену вологість ґрунту або ризики значного пошкодження рослин через технологічні колії. За розрахунками, точка рентабельності для сервісної компанії, яка надає послуги внесення ЗЗР за допомогою БПЛА, становить 1500–1700 га. За умови, що мінімальне замовлення на відстані до 50 км охоплюватиме площу не менше 50 га. Стартовий капітал для входу в бізнес оцінюють у межах 70–80 тисяч доларів США, причому рекомендується мати мінімум два дрони для резерву на випадок виходу одного з ладу протягом сезону.

Для фермерського господарства з площею 450 га придбання дрона матиме позитивний економічний ефект порівняно з використанням самохідного обприскувача для десикації вже у другому сезоні роботи (табл. 7.3). Водночас хоча агродрон коштує значно менше, ніж самохідна техніка, необхідність інвестицій і наявності фахівців зі спеціальними компетенціями може ускладнювати його придбання для невеликих господарств. У таких умовах економічно доцільним рішенням може бути використання послуг спеціалізованих сервісних компаній, які мають підготовлений персонал, необхідне обладнання та надають аутсорсингові послуги з виконання агротехнологічних операцій із застосуванням БПЛА.



Таблиця 7.3. Економічний ефект використання дронів на прикладі мінімізації втрат врожаю: розрахунок для придбання власного дрона та замовлення послуги в підрядника

Показники	га
Площа ріпаку в господарстві, га	450,0
Площа технологічних проходів (5 %), га	22,5
Урожайність, т/га	3,2
Втрата врожаю, т	72,0
Ціна ріпаку, грн/т	23 000,0
Втрати господарства через витоптування ріпаку, грн	1 656 000,0

Варіант 1. Купити дрон	
Вартість сільськогосподарського дрона XAG P100 PRO (Робочий комплект)	1 259 000,0
Вартість причепа з обладнанням, необхідним для проведення робіт (4 дверей, 2 відсіки, спеціальне кріплення під дрони. Освітлення 360° (3 зовнішні ліхтарі, акумулятор 12В 60А, зарядка для акумулятора). Смартфон для керування дроном. Набір дронориста (анемометр, тестер кислотності води, засоби захисту дихальних органів, ліхтарик налобний, рукавички хімістійкі, мірне відро та стакан, набір інструментів 108 од., вогнегасник, каністра металева 20 л, шланг з грушою для заправки генератора.)	199 500,0
Змішувально-заправна станція 200 л	48 000,0
Генератор Matarì MX14000E 10,5 кВт	110 000,0
Операційні витрати на обробіток 450 га (ЗП, ТО, 1 аварійний ремонт, пальне)	58 690,0
Усього витрат на придбання дрона і обробіток, грн	1 675 190,0
Додатковий дохід господарства від збереженого врожаю (мінімізація витоптування), грн	1 656 000,0



Варіант 2. Найняти послугу внесення дроном	
Ринкова вартість послуги десикації дроном, грн/га	400,0
Усього витрат при обробітку 450 га, грн	180 000,0
Додатковий дохід господарства від збереженого врожаю (мінімізація витоптування), грн	1 656 000,0

Для локальних обробок агродрони є єдиним економічно доцільним рішенням, оскільки заганяти в поле великий обприскувач це надто довго і дорого.

Технологія ультрамалооб'ємного обприскування (УМО) є найвигіднішою для внесення ЗЗР: вона дозволяє знизити використання води на 96 %, витрати робочого розчину на 30 % та підвищує ступінь всмоктування речовини в кутикулу до 100 %, зменшує операційні витрати на паливо й логістику – у 20 разів. Рослина отримує таку саму кількість діючої речовини, як і при стандартному обприскуванні, але нанесення відбувається більш прицільно.

Дрони дозволяють працювати вночі, за низьких температур повітря та при поривах вітру. Вони дають змогу обробляти суцільні посіви без створення технологічних колій, що дозволяє зберегти від 2 до 10 % майбутнього врожаю залежно від культури. За годину сучасний дрон може обробити до 18 га посівів, витрачаючи при цьому лише 2–2,5 л палива, що становить 0,11–0,13 л/га порівняно з 1,5 л/га для самохідного обприскувача.

Для ефективної роботи з дроном налаштовується 4 параметри: ширина паралельного прольоту, висота, норма виливу та швидкість польоту. Найбільш відповідна ширина – 7,5 м, оптимальна висота – 4 м над посівами. На рівних полях можна працювати зі швидкістю до 23 км/год, а там, де рельєф складний, – не більше 10–12 км/год.

Попри численні переваги використання БПЛА в сільському господарстві має проблемні аспекти: висока вартість сучасних дронів і програмного забезпечення, потреба в кваліфікованих операторах із цифровими компетенціями, складність інтеграції з наявними агросистемами, а також нормативні обмеження щодо польотів і обробки даних.



Проблемні аспекти застосування БПЛА в агросекторі. Сьогодні агродрони є прогресивним, проте все ще допоміжним інструментом агронома порівняно з самохідними оприскувачами. Це зумовлено низкою проблем, які потребують вирішення.

1. 90 % проблем практики пов'язані з людським фактором, зокрема: а) некомпетентністю оператора в конкретній ситуації та б) нехтуванням технічними режимами роботи техніки заради збільшення обсягів обробки та прибутку. Лише 10 % випадків пов'язані з гарантійними проблемами техніки.
2. Технологія ультрамалооб'ємного обприскування (УМО) з нормою 5–10 л/га робочого розчину, яка є ключовою економічною перевагою, підходить не для всіх препаратів. Зокрема, вона не підходить для внесення ґрунтових гербіцидів та фунгіцидів, а також для продуктів, які потребують розчинення у великій кількості рідини, таких як карбамід, КАС чи сульфат магнію. У результаті близько 90% польових робіт із застосуванням агродронів припадає на десикацію соняшнику та обробіток високорослих культур і полів нестандартної конфігурації.
3. На одній дисекації, яка триває обмежений час – близько 2 місяців, економічна окупність проекту є сумнівною. Власнику потрібно планувати завантаження персоналу та обладнання протягом усього року.
4. БПЛА в агросекторі – це не лише купівля дрона, а економічна доцільність усього напрямку:
 - крім дрона, необхідно мати штат: одна бригада – 2 дрони, 2 оператори та 1 мікроавтобус);
 - додаткове обладнання для виїзної бригади (генератори, зарядні станції, освітлення, прожектори, драбина, діжка, розкладні стільці та ін.);
 - постійні витрати на навчання та підвищення кваліфікації пілотів;
 - регулярне технічне обслуговування (ТО);
 - системна заміна швидкозношуваних елементів дрону (після обробки 300 га потрібно замінювати атомайзери та один комплект лопатей, вартість приблизно 90 доларів США);
 - при аварії дрона орієнтовна ціна ремонту від 10 тис. грн;



- ненормований графік роботи виїзних бригад;
 - сюрпризи з GPS-навігацією: похибки в координатах призводять до додаткових витрат на наземну техніку;
 - недостатня інтеграція БПЛА з наявними агросистемами (*FMIS*, *ERP*) ускладнює передачу та аналіз даних [3].
5. Технічні та організаційні проблеми. Тривале створення карт-завдань для БПЛА зменшує час їхнього ефективного використання, а отже – добову норму виробітку й окупність. Для обробки великих масивів даних (аерофотознімків) потрібні потужні комп'ютери або хмарні сервіси. Тож окупність проекту варто планувати на період понад 2 сезони.
 6. На БПЛА процес обприскування складніше впорядкувати, ніж на наземних обприскувачах. Якщо в наземних агрегатів вдається підтримувати розмір краплі ± 50 мкм, то в агродронів цей діапазон становить 50–300 мкм і може стати причиною втрат робочого розчину.
 7. Використання дронів значною мірою залежить від погодних умов, як локальних, так і глобальних. При швидкості вітру понад 5 м/с існує ризик значного знесення крапель робочого розчину на десятки чи сотні метрів. Тому розрахунковий термін окупності агродронів слід збільшувати на ~20% через можливі погодні простоя.
 8. Кадрові та освітні проблеми. Для ефективного використання БПЛА потрібні фахівці, які поєднують знання в агрономії, ІТ та геоінформаційних технологіях. Не кожне підприємство сьогодні може утримувати спеціаліста з такими компетенціями. Зокрема, важливі навички: працювати з ГІС (*GIS*), картами *NDVI*, системами точного землеробства; аналіз даних із дронів (фотограмметрія, обробка зображень, побудова 3D-моделей полів); розуміння економічних показників ефективності цифрових технологій (*ROI*, *CAPEX*, *OPEX*); навички інтеграції даних БПЛА в системи управління господарством (*FMIS*, *ERP*-рішення). Хоча після завершення війни очікується збільшення числа пілотів, наразі помітна відсутність системної підготовки у вищих аграрних навчальних закладах, курсів та сертифікацій із використання дронів.



9. Нормативно-правові та інфраструктурні проблеми. Законодавство щодо використання БПЛА недосконале. Існують обмеження на польоти над населеними пунктами, дорогами чи стратегічними об'єктами. Водночас немає єдиних стандартів для збору та зберігання агроданих, що створює ризики для безпеки та конфіденційності інформації. Усе ще бракує сервісної інфраструктури. Не всі регіони мають сертифіковані центри обслуговування й ремонту дронів.

Перспективи використання БПЛА в агросекторі.

1. У найближчі роки основними користувачами БПЛА будуть сервісні компанії, які надають послуги з внесення пестицидів. З часом технології стануть доступнішими для звичайних аграріїв та кооперативів, можливо, у форматі спільної власності кількох господарств. Після завершення війни очікується поява досвідчених операторів, які швидко адаптують нові технології і підвищать ефективність агропроцесів.
2. Прогнозується серійне виробництво дронів з високою вантажопідйомністю та тривалістю польоту. Наприклад, *Agrobee 200* може літати до 1 год 20 хв, переносити до 200 кг пестицидів та обробляти до 380 га на день. Виробник планує моделі з ємністю баків від 100 до 900 л, що дозволяє застосування як у малих господарствах, так і на великих агрокомплексах.
3. Для повноцінного використання технології БПЛА необхідно розробляти та апробувати нові засоби захисту рослин, придатні для ультрамалооб'ємного обприскування (УМО), що забезпечить ефективну та економічно доцільну обробку культур.
4. Перспективи ринку сільськогосподарських дронів охоплюють платформи з фіксованим крилом, роторним пропелером та гібридні моделі. Зниження вартості дронів та розвиток батарей відкриває можливості для масового впровадження навіть на малих фермах.
5. Подальший розвиток БПЛА тісно пов'язаний із розвитком штучного інтелекту (ШІ) – інструменту, який трансформує



підходи до управління полем, технікою, врожаєм і прибутками. Використання аналітики даних у поєднанні з БПЛА допомагає прогнозувати врожайність, контролювати стан посівів і поступово створювати розумні фермерські господарства з мінімальною ручною працею. Перші кроки в цьому напрямку включають:

- А) формування самонавчальних агромоделей, що адаптуються до власних даних господарства. Наприклад, врахування локальних ґрунтових особливостей для прогнозу врожайності без щорічного ручного оновлення моделі;
- Б) використання ШІ для автоматизації оцінки викидів CO₂ та розрахунку потенціалу вуглецевих кредитів. Це дозволить: прогнозувати зміни органічної речовини залежно від обробітку; розраховувати вуглецевий баланс поля на 3–5 років наперед; адаптувати під це технологію (глибина оранки, мульчування тощо);
- В) інтеграцію з агробанкінгом і страхуванням. Завдяки точним прогнозам урожайності ШІ може стати основою для нових фінансових інструментів – агрострахування, кредитів під заставу врожаю, контрактного продажу за форвардними контрактами.

6. **IoT-мережі (Internet of Things networks) та наземні автономні платформи (UGV):** поєднання аеро-БПЛА з наземними безпілотниками дозволяє виконувати міжрядну культивування, точкове підживлення, збір проб ґрунту та інспекцію культур на рівні ґрунтового покриву. Наземні системи, як-от *Ecorobotix* або *FarmDroid FD20*, автоматизують рутинні операції, мають низьке енергоспоживання і точну прив'язку до ГІС. У поєднанні з повітряними апаратами ці системи забезпечують замкнений цикл збору даних і виконання технологічних операцій.

7. **Розширення автономності:** з'являються повністю автономні системи з автозаправками, автозавантаженням добрив, злітно-посадковими модулями. Такі станції, як *DroneDock* чи *Hyllo HUB*, дають змогу розгортати цілодобові безпілотні операції в полі без участі людини, підвищуючи продуктивність та оперативність обробки великих площ.



8. Розвиток єдиних цифрових екосистем: інтеграція БПЛА, тракторів, сенсорів, метеостанцій та агроплатформ у єдині цифрові агроекосистеми з централізованим управлінням дозволяє створювати «розумні поля» (*Smart Field*). У таких системах БПЛА працюють у синхронізації з іншими елементами агровиробництва, підвищуючи ефективність і стійкість господарства до зовнішніх ризиків. *IoT*-мережі забезпечують інтеграцію БПЛА із сенсорними системами на полі для створення повноцінних цифрових агросистем.

9. Підвищення цифрової компетентності спеціалістів: зростає потреба у просвітницькій роботі та підготовці кадрів. Це може охоплювати: запровадження у вищих навчальних закладах відповідних курсів та дисциплін, регулярні воркшопи для агрономів; інструкції зі зчитування карт продуктивності; навчання роботі з чатботами, які збирають погодні дані від польових робітників.



Висновок. Розділ демонструє економічні ефекти використання дистанційно керованих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та дає здобувачу освіти комплексне розуміння сучасних безпілотних технологій і принципів їхнього застосування в агросекторі.

Стратегічне значення БПЛА:

- 1) **упровадження дронів** – це не короткочасний тренд, а трансформація підходів до сільськогосподарського виробництва;
- 2) **економічна доцільність:**
 - точка рентабельності для сервісних компаній – 1500–1700 га;
 - фермерські господарства можуть отримати економічний ефект на площі 450 га вже у другому сезоні роботи;
- 3) **основні резерви економії:**
 - зниження витрат на засоби захисту рослин до 30%;
 - зменшення витрат води до 96%;
 - зростання урожайності на 5% завдяки точнішому контролю посівів;
- 4) **ризик:** основний фактор – людський: некваліфіковане управління або порушення технічних режимів;
- 5) **перспективи цифрової трансформації:**
 - поєднання людського досвіду та машинного аналізу;
 - інтеграція штучного інтелекту для прогнозування та оптимізації агропроцесів;
 - необхідність системного збору якісних даних, міждисциплінарної команди та навчання персоналу.

Функціональні висновки. Здобуті знання дозволяють оцінювати доцільність використання конкретних БПЛА та цифрових інструментів залежно від умов, завдань і ресурсів, а також розуміти їхні обмеження і переваги.

Таким чином, опрацювання теми формує основу для компетентного вибору, налаштування та ефективної експлуатації БПЛА у професійній діяльності.



ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

- Який очікуваний розмір європейського ринку сільськогосподарських дронів у 2034 році?
- Хто є ключовими гравцями на ринку сільськогосподарських дронів?
- Які економічні ефекти застосування безпілотних літальних апаратів в агровиробництві?
- Які ключові сфери застосування сільськогосподарських дронів?
- Назвіть питому вагу економії різних матеріально-технічних ресурсів при використанні технології внесення БПЛА.
- Яка точка рентабельності при використанні БПЛА на внесенні ЗЗР?
- Поясніть суть технології ультрамалооб'ємного обприскування (УМО)?
- Порівняйте техніко-економічні показники роботи традиційних оприскувачів та безпілотних літальних апаратів в агровиробництві.
- Який стартовий капітал потрібен для старту бізнесу з надання послуг внесення агродронами?
- З якими економічними викликами стикається агровиробник при апробації технології безпілотних літальних апаратів в агросекторі?
- Назвіть перспективні напрямки використання БПЛА в агросекторі.
- Яка роль штучного інтелекту (ШІ) в подальшому розвитку БПЛА?
- Якими компетенціями повинен володіти агроном при роботі з технологією БПЛА?

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ЗНАТЬ

Питання. Назвіть найпоширеніший вид польових робіт, де найчастіше використовується технологія БПЛА.

Варіанти:

- А) дискування,
- Б) десикація,
- В) моніторинг стану посівів,
- Г) посів.

Правильна відповідь: Б) десикація.



Джерела інформації

1. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/drones-market-1124>
2. Dankevych A., Sosnovska O., Dobrianska N., Nikolenko L., Mazur Yu., Ingram K.(2021). Ecological and economic management of innovation activity of enterprises. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 5, 112–118. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-5/118>
3. <https://aggeek.net/ru-blog/kupiti-dron-chi-vzyati-v-orendu>
4. <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya/drony-na-varti-vashykh-statkiv-abo-yak-zmenshyty-vytraty>
5. Denysiuk O., Svitlyshyn I., Tsaruk I., Vikarchuk O., Dankevych A.(2022). Diversification in the enterprises' activities for sustainable development in the agricultural sector. Rivista di studi sulla sostenibilita, Pages 18 p. 85–102, doi 10.3280/RISS2022-002007.
6. Prodanchuk M., Dankevych A., Aksonova O., Tomchuk O. (2023). Digital Tools for Accounting and Analytical Support of Enterprises: Innovation and Management Aspect. Economics Ecology Socium, 7, 27–39. DOI: <https://doi.org/10.61954/2616-7107/2023.7.4-3>. (Web of Science та має ISSN 2616-7107).
7. Land governance development in Ukraine in the light of european experience / V. Dankevych, Y. Dankevych, A. Dankevych, V. Naumchuk / Modern trends in digital transformation of marketing & management: collective monograph; Edited by O. Chukurna, V. Zamlinskyi. – Košice: Vysoká škola bezpečnostného manažérstva v Košiciach, 2023. – P. 408–433. – ISBN: 978-80-8185-061-5.
8. Данкевич В., Данкевич А. Интернет речей та штучний інтелект як ключові елементи інноваційного розвитку підприємств в епоху цифрових викликів // Актуальні проблеми економіки. 2024. № 7. С. 165–173. DOI: 10.32752/1993-6788-2024-1-277-165-173.

Навчальне видання

БИКОВ Микола Іванович
КОСОЛАП Микола Павлович
ДАНКЕВИЧ Андрій Євгенович
ГОРЯЧЕВ Павло Володимирович
ПЕНЮК Назарій Олегович
КОВАЛЕНКО Віталій Петрович
ОВЕРЧЕНКО Віталій Віталійович
ПРИХОДЬКО Олександр Васильович

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
ДЛЯ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ
З ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ
БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ
ДЛЯ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА

Програма з аграрного і сільського розвитку (АГРО)

Оригінал-макет та верстка *О. В. Кочетков*

Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. 8,37. Обл.-вид. арк.5,41.

Видавництво Національного університету
біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041
Тел. + 38 (044) 527-81-55
E-mail: nubip_druk@ukr.net
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4097 від 17.06.2011

ISBN 978-617-8798-60-4



9 786178 798604