

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2025-1(39)-266-277

УДК 631.937.33

Юрій Олександрович Денисов¹, Сергій Вікторович Єрмолов²

¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки»

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: den711td@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>.

ResearcherID: G-1144-2016. Scopus Author ID: 56338219200

²аспірант кафедри «Електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій»

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: sergey.ermolow@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8786-2430>.

ResearcherID: MBI-0037-2025

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БПЛА МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПУ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Швидке зростання механізації всіх сільськогосподарських робіт не може повністю зменшити участь людини, тому автоматизація сільського господарства є надзвичайно важливою. З погляду автоматизації це дослідження підкреслює вирішальну роль БПЛА в точному та розумному сільському господарстві. БПЛА можуть надавати чітке зображення з високою роздільною здатністю для використання в комерційних цілях, таких як сільське господарство. У статті вперше систематизовано ефективність використання БПЛА з додатковим обладнанням та оцінено доцільність їх застосування на дроні саме для потреб землеробства. Проаналізовано можливі способи підвищення ефективності застосування БПЛА при їх комбінуванні з додатковими датчиками та сенсорами. Вказано, що саме приводить до підвищення ефективності в польових умовах у порівнянні з існуючими аналогами.

Ключові слова: штучний інтелект; аграрний сектор; БПЛА; додавання датчиків та сенсорів; моніторинг посівів; розумне землеробство; інтернет речей, системи живлення.

Рис.: 3. Бібл.: 28.

Актуальність теми дослідження. Технологічний прогрес має глибокий вплив на суспільства, економіку та життя людей. Ці трансформації можна візуалізувати за допомогою технологічного прогресу. Безпілотні літальні апарати (БПЛА), також відомі як дистанційно керовані літальні апарати, є яскравим прикладом візуалізації змін БПЛА не потребують пілота і можуть керуватися автономно або дистанційно БПЛА є невід'ємною частиною безпілотних авіаційних систем, включаючи засоби зв'язку і наземні станції управління БПЛА [1–6].

За даними AUVSI, в офіційному звіті Міжнародної асоціації безпілотних транспортних систем (Association for Unmanned Vehicle Systems) під назвою «The Economic Impact of Unmanned Systems Integration in the United States» (Економічний вплив інтеграції безпілотних транспортних систем у США) зазначено, що використання БПЛА в сільському господарстві має перевагу над усіма іншими видами використання. Зауважено, що приблизно 80 % ринку БПЛА займе сільське господарство США до 2027 року [15].

За умови державної підтримки Україна може зайняти 5–10 % (базовий сценарій) та 15–18 % (оптимістичний сценарій) світового ринку в сільському господарстві до 2040 року. У вартісному вираженні український ринок послуг на основі БПЛА в аграрному секторі, який займають компанії Drone UA та UkrSpec_Systems, може сягнути 600 000 мільйонів гривень, а продажі БПЛА могли б суттєво підтримати український бюджет у вигляді фінансових кредитів.

Постановка проблеми. БПЛА можуть надавати чіткі зображення з високою роздільною здатністю для комерційного використання, наприклад, у сільському господарстві. Пізніше, з появою та інтеграцією сучасних навігаційних датчиків, БПЛА стали невід'єм-

ною частиною збройних сил. Розвиток технології не лише зняв обмеження на використання БПЛА у військових цілях, але й відкрив їхні крила для комерційних цілей, пов'язаних із сільським господарством, дослідженнями, рекреацією, доставкою товарів і фотограмметрією. Однак на сьогодні сфери, у яких багатороторні БПЛА можуть бути використані для сільськогосподарських потреб, недостатньо досліджені [10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняними та зарубіжними авторами проведено низку наукових досліджень щодо використання БПЛА в сільському господарстві. Серед найбільш відомих учених можна назвати таких, як С. Бурлака [1], S. A. Nahiyoan [18], F. Endara [12], R. Tyagi [26]. В опублікованих дослідженнях наведено системний аналіз використання різних моделей БПЛА для аерофотозйомки територій з метою картографування. Однак нині ще не визначено повний перелік завдань, які можна виконувати за допомогою БПЛА, особливо в сільському господарстві (фермерстві); використання БПЛА в сільському господарстві є новинкою для України, оскільки БПЛА в основному використовуються у військових цілях, і лише після військових випробувань вони почали широко застосовуватися в сільському господарстві. Використання БПЛА в сільському господарстві є новинкою для України [7–11; 28].

Мета дослідження полягає в аналізі шляхів підвищення ефективності БПЛА мультироторного типу в сільському господарстві.

Виклад основного матеріалу. До основних систем БПЛА належать (рис. 1):

1. Силові установки (двигуни). Залежно від типу силової установки БПЛА можна розділити на ті, що приводяться в рух електродвигунами та двигунами внутрішнього згоряння. Однією з основних переваг рідинних (бензинових, водневих) двигунів (поршневих, роторних, газотурбінних, реактивних) є їхня здатність виконувати завдання протягом 8–10 годин роботи літального апарату без дозаправки. [12–14].

2. Комп'ютерна система управління. Системою управління БПЛА керує бортовий комп'ютер. У наш час використовуються відкриті операційні системи, такі як Linux, або сучасні пропріетарні операційні системи реального часу, такі як QNX, VME, VxWorks і XOberon.

3. Система телеметричного зв'язку, в якій для зв'язку з БПЛА і високошвидкісної передачі даних на наземний центр управління використовується командна радіолінія. Переважно вона організована на ультракоротких хвилях 200–400 МГц, L (1–2 ГГц), S (2–4 ГГц), C (3,4–8 ГГц) і X (7–10,7 МГц) у діапазонах прямої видимості. Надлегкі, компактні, прості БПЛА використовуються в мережах мобільних операторів (покоління 2G, 780–960, 925–960 МГц або 1,7–2,2, 2,5–2,7 ГГц), Wi-Fi (2,4–2,5, 5,15–5,35, 5,65–6,425 ГГц), WiMAXMobile (2,3–13,5 ГГц) і LTE (0,79–0,87, 1,7–1,8 і 2,5–2,7 ГГц).

4. Навігаційні системи. Навігаційні системи, що використовуються більшістю БПЛА, є супутниковими радіонавігаційними системами. Найпоширенішими з них є GPS / NAVSTAR (США), Beidou (BDS) / GNSS (Китай), Galileo (ЄС), DORIS (Франція), QZSS (Японія) та IRNSS (Індія). Сигнали супутникових радіонавігаційних систем генеруються в діапазоні частот 1,1–1,6 ГГц [16–19].

Додатковим способом підвищення автономності та точності навігаційних систем БПЛА є встановлення барометра та лазерного висотоміра. Цей пристрій дозволяє забезпечити вищу точність визначення координат за рахунок використання додаткових каналів об'єднання навігаційних даних, а також використання електронних топографічних карт з барометричними даними і висотними профілями для створення автоматичного профілю польоту БПЛА [21].

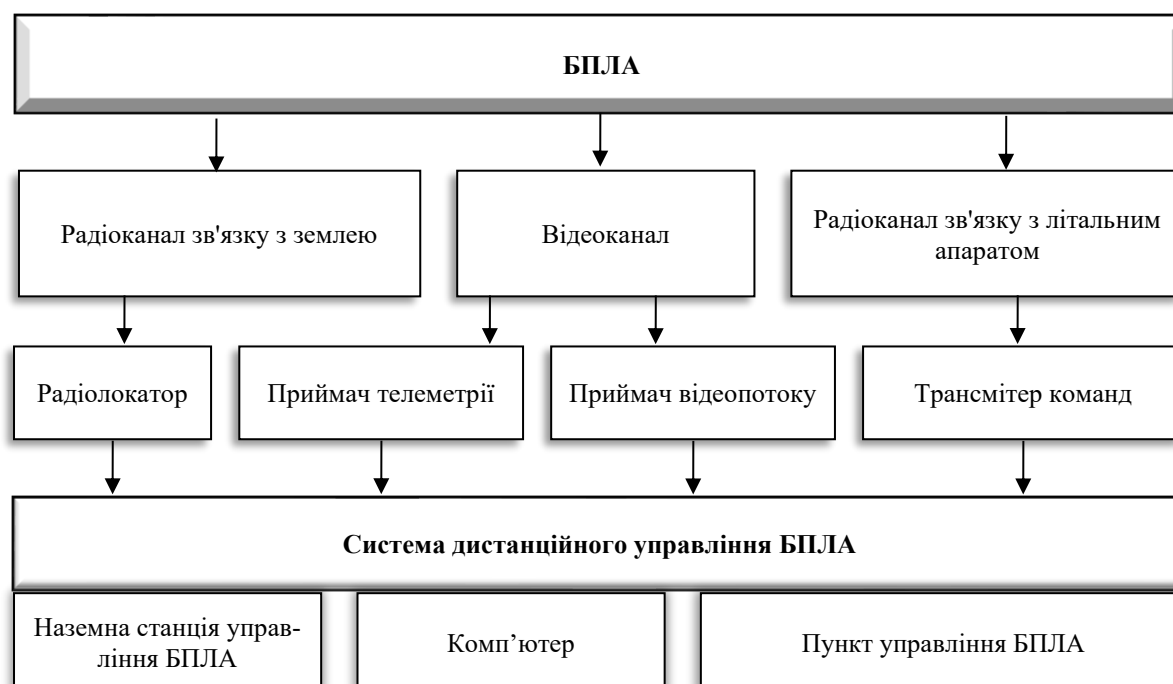


Рис. 1. Основні складові компоненти сучасних систем БПЛА

Джерело: розроблено авторами.

Залежно від переліку завдань, БПЛА можуть оснащуватися наступними системами та пристроями (табл. 1): – розвідувальними системами (фотоелектронної, тепловізійної, радіолокаційної, радіотехнічної, радіологічної, хімічної, бактеріологічної та інших видів розвідки); – засобами радіоелектронної боротьби або постановки радіоелектронних перешкод; – апаратурою наведення та корекції керованої зброї; – автопілотним та посадочним обладнанням; – транспортними касетами, відсіками, кріпленнями та ін.

Сучасні технології в сільському господарстві є ключем до вдосконалення виробничих процесів та підвищення продуктивності. До них відносяться автоматизація, Інтернет речей (IoT), БПЛА та аналітика даних. Автоматизація замінює ручні робочі процеси автоматизованими системами для підвищення швидкості та ефективності; IoT дозволяє збирати дані та обмінюватися ними між сільськогосподарськими пристроями, датчиками та обладнанням, що полегшує моніторинг росту рослин. Основною метою точного землеробства є використання оптимальної кількості ресурсів у потрібний час і в потрібному місці для виробництва продукції кращої якості [20].

Найбільш поширеними сферами застосування БПЛА у сільському господарстві є збір даних і картографування змін на сільськогосподарських угіддях, аналіз даних, прийняття рішень щодо управління ресурсами на основі результатів аналізу, а також менш поширені застосування, такі як внесення пестицидів і забезпечення зручності. Сільськогосподарська галузь широко використовує традиційні технології дистанційного зондування на основі супутників і повітряних платформ. Потенційні супутники для картографування та моніторингу рослинності базуються на просторовій, часовій та просторово-часовій роздільній здатності бортових датчиків, таких як MODIS, OLI та AVHRR [27].

Таблиця 1 – Основні можливості БПЛА в сільському господарстві, що оснащені додатковим обладнанням

Тип додаткового обладнання	Ключові показники	Застосування в сільському господарстві	Продуктивність БПЛА з додатковим обладнанням	Обмеження
Камера RGB	Роздільна здатність і частота кадрів	Моніторинг росту культур і виявлення хвороб	Вища роздільна здатність забезпечує детальні зображення та покращує завдання класифікації зображень (наприклад, визначення моделей поширення хвороби)	Обмежений спектральний діапазон не може вловити вміст хлорофілу або ледь помітні зміни здоров'я врожаю
Мультиспектральний сенсор	Спектральний діапазон (від видимого до ближнього інфрачервоного) і NDVI	Моніторинг стану рослинності та виявлення бур'янів	Дозволяє розраховувати вегетаційні індекси, такі як NDVI, і покращує прогнози моделей штучного інтелекту щодо здоров'я та сили рослин	Чутливий до атмосферних умов (наприклад, хмарності та інтенсивності світла)
Гіперспектральний датчик	Спектральна роздільна здатність і обсяг даних	Моніторинг поживних речовин і виявлення захворювань	Вища спектральна роздільна здатність покращує точність виявлення дефіциту поживних речовин і захворювань культур і має вирішальне значення для детальної класифікації AI / ML	Створює великі набори даних, які можуть уповільнити обробку моделі штучного інтелекту / ML і є дорогим для розгортання
Теплова камера	Температурна чутливість і просторова роздільна здатність	Управління зрошенням і виявлення нестачі води	Надає точні термічні дані та дозволяє моделям ШІ оптимізувати зрошення шляхом раннього виявлення нестачі води в культурах	Нижча просторова роздільна здатність і менш ефективний для дрібних деталей поля порівняно з RGB
LIDAR	Щільність і діапазон точок	Топографічне картографування та оцінка біомаси	Створює точні 3D-моделі рельєфу та біомаси та покращує прогнозування врожайності на основі ШІ та точність карт рельєфу	Обмежене використання в місцях з густою рослинністю
Радар із синтезованою апертурою (SAR)	Глибина проникнення і роздільна здатність	Моніторинг вологості ґрунту	Корисно для будь-якої погоди та освітлення	Вимагає високих технічних знань для точної інтерпретації

Джерело: розроблено авторами.

Одним з основних застосувань БПЛА в сільському господарстві є моніторинг посівів (рис. 2). Завдяки спеціалізованим камерам і датчикам, встановленим на літальному апараті, можна отримувати зображення полів з високою роздільною здатністю. Це дає змогу отримати детальні зображення, які можна використовувати для аналізу густоти посівів, виявлення хвороб і шкідників та оцінки стану рослинності [24]. Зібрані дані можуть допомогти фермерам робити об'єктивні оцінки та ухвалювати своєчасні рішення щодо впровадження заходів зі зрошення, внесення добрив та захисту рослин.

Використання БПЛА в поєднанні з мультиспектральними й тепловими датчиками дозволяє, наприклад, визначити просторову протяжність вимірювань рівня води на комерційних виноградниках у вологих районах. Використання безпілотних літальних апаратів принесло користь багатьом застосуванням дистанційного зондування. У багатьох випадках це пов'язано з вартістю, необхідністю швидкого реагування або необхідністю проведення спостережень в умовах, які є шкідливими або небезпечними для екіпажу [22].

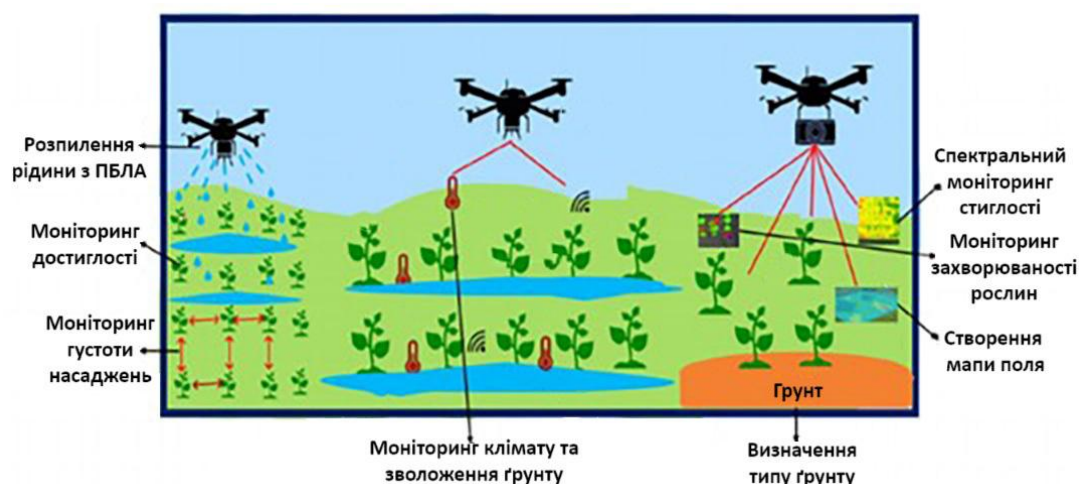


Рис. 2. Основні області застосування БПЛА в сільському господарстві: обприскування, моніторинг, аналіз обґрунтування, картографування полів

Джерело: розроблено авторами.

Перевагами використання БПЛА в сільському господарстві є автоматизація та ефективність: оскільки БПЛА можуть виконувати автоматизовані завдання без втручання людини, зменшується ручна праця і підвищується продуктивність: БПЛА оснащені сучасними датчиками та навігаційними системами, які дозволяють їм точно картографувати поля, моніторити посіви та вносити речовини на окремі ділянки поля. Зниження витрат, зменшення впливу на навколишнє середовище, віддалений моніторинг, швидкість і продуктивність, підвищення точності обробки, доступ до важкодоступних ділянок, інтеграція з технологіями Інтернету речей (IoT) [23].

Недоліки використання БПЛА в сільському господарстві такі: висока вартість: налаштування та обслуговування системи БПЛА є досить дорогим; витрати на придбання та утримання БПЛА є значним тягарем, особливо для малого аграрного бізнесу. БПЛА Yamaha коштують близько 2,5 млн грн, а Agrus – близько 385 000 грн, але їхня ефективність значно нижча. Технічні проблеми: БПЛА – це складні технічні системи, які можуть потребувати постійного технічного обслуговування та ремонту. Несправності обладнання можуть вплинути на продуктивність та ефективність. Обмежена гнучкість: БПЛА часто запрограмовані на виконання конкретних завдань і можуть бути менш гнучкими, ніж людська праця. Вони можуть мати труднощі з адаптацією до мінливих або незвичних умов у польових умовах.

Безпека і конфіденційність: Використання БПЛА порушує питання безпеки та конфіденційності даних: Існує ризик несанкціонованого доступу до систем БПЛА та перехоплення даних, що може мати негативний вплив на сільськогосподарську діяльність. Соціальні аспекти: Використання БПЛА в сільському господарстві може призвести до скорочення робочих місць, особливо для тих, хто займається фізичною працею в сільському господарстві. Це може вплинути на соціально-економічну ситуацію в сільській місцевості та вимагати перекваліфікації робочої сили [25].

Вразливість до технічних збоїв: системи БПЛА схильні до ризику технічних збоїв і хакерських вторгнень.

Вимоги до інфраструктури: Ефективне використання БПЛА може вимагати подальших змін в інфраструктурі, таких як спеціалізовані посадкові майданчики та зарядні станції.

Інновації та навчання: Застосування БПЛА вимагає технічних знань і навичок в аграрному секторі. Враховуючи ці переваги та недоліки, використання систем БПЛА в сільському господарстві має бути ретельно збалансованим і враховувати конкретні потреби та умови кожного сільськогосподарського підприємства [26].

Ефективність використання БПЛА в сільському господарстві залежить від багатьох факторів, і кожне господарство має проаналізувати власні умови та потреби, щоб визначити найкращий спосіб використання цих технологій. Найефективнішим способом збільшення використання БПЛА в сільському господарстві є розробка БПЛА з новими можливостями, що вимагає вдосконалення сенсорної бази. Додавання нових датчиків, які надають більш точну інформацію про стан посівів, дозволить фермерам контролювати і підтримувати свої посіви максимально ефективно (табл. 2).

Таблиця 2 – Підвищення активності БПЛА при використанні нових датчиків

Аграрна задача для БПЛА	Використаний датчик БПЛА	Проблеми ШІ	Висота	Витривалість	Режим польоту
Оцінка площі	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Класифікація	100–500 м	1–3 год	Автономний
Ґрунтові умови	Мультиспектральний, гіперспектральний і термічний	Регресія	50–200 м	20–40 хв	Ручний / автономний
Параметри культури	RGB, мультиспектральний, гіперспектральний та LIDAR	Регресія і класифікація	50–400 м	1–4 год	Автономний
Хвороби сільськогосподарських культур	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Регресія і класифікація	50–300 м	2–5 год	Ручний / автономний
Шкідники сільськогосподарських культур	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Виявлення та класифікація об'єктів	20–100 м	20–60 хв	Повністю автономний
Водний стрес культур	RGB, мультиспектральний і теплові	Індексний аналіз та регресія	50–500 м	1–3 год	Автономний
Бур'яни	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Класифікація та виявлення об'єктів	50–200 м	1–2 год	Автономний
Прогноз врожайності	RGB, мультиспектральна та стереокамера	Регресія та виявлення об'єктів	100–400 м	1–3 год	Повністю автономний
Рішення про збирання врожаю	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Регресія та виявлення об'єктів	50–300 м	2–5 год	Ручний / автономний
Планування зрошення	RGB і теплові	Індексний аналіз і регресія	50–150 м	20–60 хв	Автономний
Моніторинг поживних речовин	Гіперспектральний і багатоспектральний	Класифікація та регресія	100–500 м	1–3 год	Автономний
Стадія росту культури	RGB і мультиспектральний	Класифікація та виявлення об'єктів	50–200 м	1–2 год	Повністю автономний
Післязбиральний моніторинг	RGB, мультиспектральний і гіперспектральний	Регресія і класифікація	50–300 м	1–4 год	Автономний
Раннє виявлення захворювання	Теплові, гіперспектральні та RGB	Виявлення та класифікація об'єктів	50–400 м	1–3 год	Ручний / автономний

Джерело: розроблено авторами.

Крім того, важливим елементом є розробка нових систем управління для БПЛА (табл. 3). За допомогою нових алгоритмів і програмного забезпечення, БПЛА можуть стати більш ефективними у виконанні різних завдань, включаючи точне розпилення добрив, полив та виявлення патогенів рослин.

Таблиця 3 – Підвищення ефективності БПЛА за рахунок використання нових алгоритмів

Оснащення БПЛА	Автоматизована платформа	Використаний алгоритм	Переваги	Недоліки вдосконалення
БПЛА використовується для швидкої та точної класифікації рослин	БПЛА з датчиками RGB	CNN і випадковий ліс	Висока точність з датчиками RGB	Високі обчислювальні вимоги, виклики обробки в реальному часі
Покращений аналіз росту рослин за допомогою БПЛА та ML	БПЛА з мультиспектральними сенсорами	Глибоке навчання та SVM	Вища точність з мультиспектральними датчиками	Чутливий до змін освітлення
Системи LIDAR	БПЛА з камерами LIDAR і інфрачервоного діапазону (NIR).	Дерева рішень SVM	Швидкий час обробки	Складність калібрування може обмежувати точність
Точне виявлення захворювання на ранніх стадіях	БПЛА з гіперспектральними камерами	YOLO і CNN	Висока точність моніторингу захворювання	Шум навколишнього середовища та зміни температури можуть вплинути на точність
Виявлення захворювання на ранній стадії за допомогою БПЛА та ML	БПЛА з RGB і мультиспектральними сенсорами	SVM	Надійний результат F1 (85 %)	Фактори навколишнього середовища (наприклад, погода) можуть впливати на виявлення
Точне виявлення бур'янів за допомогою гіперспектрального зображення	БПЛА з гіперспектральним зображенням	Найближчий сусід і дерева рішень	Точна ідентифікація бур'янів	Проблеми навколишнього середовища та освітлення
Високоточне виявлення бур'янів за допомогою ML	БПЛА з мультиспектральними камерами	Випадковий ліс SVM	Висока точність виявлення (91 %)	Для оптимальної роботи потрібне рівномірне освітлення

Примітка: RGB (Red, Green, Blue - червоний, зелений, синій) - адитивна кольорова модель, що описує спосіб синтезу кольору; SVM – метод опорних векторів; CNN - convolutional neural network, згортокна нейронна мережа; ML - Machine Learning, машинне навчання

Джерело: розроблено авторами.

Розробка нових методів може включати інтеграцію БПЛА з іншими передовими технологіями, такими як супутникова навігація, штучний інтелект, сенсорні мережі та пристрої Інтернету речей. Така інтеграція створює можливості для розширення можливостей і потенціалу БПЛА, дозволяючи їм працювати в більш складних і різноманітних умовах. Для вирішення цієї проблеми використовуються наступні підходи: управління батареями для забезпечення адекватної зарядки і відповідного графіка заміни батарей [24].

Мінімізація розрядження акумуляторів БПЛА полягає в тому, щоб передбачити автоматичне перемикання на зовнішнє живлення в процесі заміни без зупинки роботи БПЛА (рис. 3, а). Одним із можливих шляхів вирішення цієї проблеми є бездротова зарядка – це нова ідея в зарядці акумуляторів БПЛА. Наразі цікавою є можливість заряджати БПЛА безпосередньо від ліній електропередач вздовж траєкторії польоту БПЛА. Для цього використовуються методи, засновані на магнітному резонансі.

Сонячна енергія. Цей варіант ідеальний, оскільки БПЛА часто потрібно перебувати на великій висоті протягом тривалого часу. БПЛА використовують сонячну енергію вдень, але стаціонарні батареї можуть використовуватися додатково вночі або в поганих погодних умовах. Передові технології сонячних панелей, довший час польоту на великій відстані, економічна ефективність та екологічно чистий дизайн роблять БПЛА на сонячних батареях привабливим варіантом (рис. 3, б). На БПЛА встановлюється гіперспектра-

льна камера Gamma 3, із сенсором у діапазоні 400-1000 нанометрів. Номінальна потужність фотоелементів – 90-100 Вт, тип панелі — монокристал кремнію; розмір панелей - 100×100 мм. Додаткове живлення БПЛА - Li батареї.

*а**б*

Рис. 3. Зовнішній вигляд БПЛА з автоматичним перемиканням на зовнішнє живлення (а) та БПЛА на сонячних батареях (б)

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Розглянуто доцільність застосування БПЛА для потреб сільського господарства в порівнянні із їх застосуванням у зарубіжній практиці. Наведено основні комплектації БПЛА згідно їх практичного використання в польових умовах. Систематизовано можливості облаштування БПЛА додатковим обладнанням та оцінено доцільність їх застосування. Названо оптимальні способи підвищення ефективності застосування БПЛА при їх комбінуванні з додатковими датчиками та сенсорами. Вказано, що саме приводить до підвищення ефективності в польових умовах в порівнянні з існуючими аналогами.

Перспектива подальших досліджень. Ефективність застосування БПЛА в сільському господарстві – величезна. За допомогою «хмарних» засобів обробки даних з дронів і малої безпілотної авіації фермери відстежують не тільки сходи рослин, але і можуть спостерігати за відхиленням техніки від заданого курсу польових робіт, не виходячи з офісу. Одним із перспективних напрямків є розробка інтелектуальних систем управління БПЛА. Такі системи дозволять БПЛА самостійно приймати рішення про виконання завдань, що підвищить їх енергоефективність, автономність конкурентоспроможність.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів.

Під час написання наукової статті в деяких випадках був використаний штучний інтелект (GPT-4). ШІ дозволяє швидше знайти потрібну інформацію, яка була перевірена та вказана в списку використаних джерел.

Список використаних джерел

1. Бурлака, С., & Далека, А. (2024). Технології БПЛА для сільського господарства. *Вісник Хмельницького Національного Університету. Технічні науки*, 339(4), 259–264. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-41>.
2. Родінков, Ю., & Савицький, А. (2024). Математична модель керування безпілотних літальних апаратів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337 (3(2), 298–304. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-45>.
3. Станкевич, С. В. (2022). Агродрони – майбутє сільського господарства. *II Всеукраїнська науково-практична конференція «Ефективність агротехнологій Житомирщини»* (с. 80–81). 17-18 листопада 2022 р., Житомир, ЖАТФК, 2022.
4. Ahmad, A., Saraswat, D., & Gamal, A. E. (2022). A survey on using deep learning techniques for plant disease diagnosis and recommendations for development of appropriate tools. *Smart Agricultural Technology*, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100083>.

5. Agrawal, J., & Arafat, M. Y. (2024). Transforming farming: A review of ai-powered UAV technologies in precision agriculture. *Drones*, 8(11), 664. <https://doi.org/10.3390/drones8110664>.
6. Anushi, Jain, S., Bhujel, S., Shrivastava, U., Rishabh, Mohapatra, A., Rimpika, & Mishra, G. (2023). Advancements in Drone Technology for Fruit Crop Management: A Comprehensive Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 4367–4378. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113617>.
7. Borikar, GP, Gharat, C, Deshmukh, SR. (2022). Application of drone systems for spraying pesticides in advanced agriculture: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1259, 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1259/1/012015>.
8. Canicatti, M., & Vallone, M. (2024). Drones in vegetable crops: A systematic literature review. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100396. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100396>.
9. Crusiol, L. G. T., Sun, L., Sun, Z., Chen, R., Wu, Y., Ma, J., & Song, C. (2022). In-Season monitoring of maize leaf water content using ground-based and uav-based hyperspectral data. *Sustainability*, 14(15), 9039. <https://doi.org/10.3390/su14159039>.
10. Dandrifosse, S., Jago, A., Huart, J. P., Michaud, V., Planchon, V., & Rosillon, D. (2024). Automatic quality control of weather data for timely decisions in agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100445>.
11. Ganesh Kumar, S. S., & Gudipalli, A. (2024). A comprehensive review on payloads of unmanned aerial vehicle. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27(4), 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.08.001>.
12. Endara, F., Pérez, C., Rodriguez, J., Ortiz-Villalba, D., & Llanos, J. (2021). Analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) based on solar energy. In: *Recent advances in electrical engineering, electronics and energy: proceedings of the CIT 2020*, 288–99. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72212-8_21.
13. Islam, M. R., Oliullah, K., Kabir, M. M., Alom, M., & Mridha, M. F. (2023). Machine learning enabled IoT system for soil nutrients monitoring and crop recommendation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 100880. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100880>.
14. Frauendorf, J. L., & Almeida de Souza, E. (2022). The different architectures used in 1G, 2G, 3G, 4G, and 5G networks. *The architectural and technological revolution of 5G* (pp. 83–107). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10650-7_7.
15. Katekar, V., & Cheruku, J. K. (2023). The application of drone technology for sustainable agriculture in India. *Current Agriculture Research Journal*, 10(3), 352–365. <https://doi.org/10.12944/carj.10.3.19>.
16. Makam, S., Komatineni, B. K., Meena, S. S., & Meena, U. (2024). Unmanned aerial vehicles (UAVs): An adoptable technology for precise and smart farming. *Discover Internet of Things*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s43926-024-00066-5>.
17. Marcone, A., Impollonia, G., Croci, M., Blandinières, H., Pellegrini, N., & Amaducci, S. (2024). Garlic yield monitoring using vegetation indices and texture features derived from UAV multispectral imagery. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100513. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100513>.
18. Nahiyoon, S. A., Ren, Z., Wei, P., Li, X., Li, X., Xu, J., Yan, X., & Yuan, H. (2024). Recent development trends in plant protection uavs: A journey from conventional practices to cutting-edge technologies—a comprehensive review. *Drones*, 8(9), 457. <https://doi.org/10.3390/drones8090457>.
19. Pansy, D. L., & Murali, M. (2023). UAV hyperspectral remote sensor images for mango plant disease and pest identification using MD-FCM and XCS-RBFNN. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11678-9>.
20. Rivera, G., Porras, R., Florencia, R., & Sánchez-Solís, J. P. (2023). LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances. *Computers and Electronics in Agriculture*, 207, 107737. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107737>.
21. Sahni, R. K., Kumar, S. P., Thorat, D., Rajwade, Y., Jyoti, B., Ranjan, J., & Anand, R. (2024). Drone spraying system for efficient agrochemical application in precision agriculture. In *Applications of computer vision and drone technology in agriculture 4.0* (pp. 225–244). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8684-2_13.
22. Seong, M., Jo, O., & Shin, K. (2024). Age of information minimization in UAV-assisted data harvesting networks by multi-agent deep reinforcement curriculum learning. *Expert Systems With Applications*, 124379. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124379>.

23. Song, Y., Bi, J., & Wang, X. (2024). Design and implementation of intelligent monitoring system for agricultural environment in IoT. *Internet of Things*, 25, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101029>.
24. Surendran, U., Nagakumar, K. C. V., & Samuel, M. P. (2024). Remote sensing in precision agriculture. In *Digital agriculture* (pp. 201–223). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43548-5_7
25. Su, J., Zhu, X., Li, S., & Chen, W.-H. (2022). AI meets UAVs: A survey on AI empowered UAV perception systems for precision agriculture. *Neurocomputing*. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.11.020>.
26. Tyagi, R., & Pandey, P. C. (2024). Applications of drones in precision agriculture: Future of smart and sustainable farming. In *Remote sensing in precision agriculture* (pp. 429–453). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91068-2.00003-5>.
27. Wonde, K. M., Tsehay, A. S., & Lemma, S. E. (2022). Training at farmers training centers and its impact on crop productivity and households' income in Ethiopia: A propensity score matching (PSM) analysis. *Heliyon*, Article e09837. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09837>.
28. Zhou, J., Xu, Y., Gu, X., Chen, T., Sun, Q., Zhang, S., & Pan, Y. (2023). High-Precision mapping of soil organic matter based on UAV imagery using machine learning algorithms. *Drones*, 7(5), 290. <https://doi.org/10.3390/drones7050290>.

References

1. Burlaka, S., & Daleka, A. (2024). Tekhnolohii BPLA dlia silskoho hospodarstva [UAV technologies for agriculture]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu. Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 339(4), 259–264. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-41>
2. Rodinkov, Ju., & Savycjkyj, A. (2024). Matematychna modelj keruvannja bezpilotnykh litaljnykh aparativ [Mathematical model of unmanned aerial vehicle control]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu. Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337(3(2)), 298–304. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-45>.
3. Stankevych, S. V. (November 17–18, 2022). Aghrodrony – Majbutje siljsjkogho ghospodarstva [Agro-drones are the future of agriculture]. *II Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia “Ektyv-nist ahrotekhnolohii Zhytomyrshchyny” - II All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “Efficiency of Agricultural Technologies in Zhytomyr Region”* (p. 80–81). ZhATFK.
4. Ahmad, A., Saraswat, D., & Gamal, A. E. (2022). A survey on using deep learning techniques for plant disease diagnosis and recommendations for development of appropriate tools. *Smart Agricultural Technology*, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100083>.
5. Agrawal, J., & Arafat, M. Y. (2024). Transforming farming: A review of ai-powered UAV technologies in precision agriculture. *Drones*, 8(11), 664. <https://doi.org/10.3390/drones8110664>
6. Anushi, Jain, S., Bhujel, S., Shrivastava, U., Rishabh, Mohapatra, A., Rimpika, & Mishra, G. (2023). Advancements in Drone Technology for Fruit Crop Management: A Comprehensive Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 4367–4378. <https://doi.org/10.9734/ijec/2023/v13i113617>.
7. Borikar, GP, Gharat, C, Deshmukh, SR. (2022). Application of drone systems for spraying pesticides in advanced agriculture: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1259, 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1259/1/012015>.
8. Canicatti, M., & Vallone, M. (2024). Drones in vegetable crops: A systematic literature review. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100396. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100396>.
9. Crusiol, L. G. T., Sun, L., Sun, Z., Chen, R., Wu, Y., Ma, J., & Song, C. (2022). In-Season monitoring of maize leaf water content using ground-based and uav-based hyperspectral data. *Sustainability*, 14(15), 9039. <https://doi.org/10.3390/su14159039>.
10. Dandrifosse, S., Jago, A., Huart, J. P., Michaud, V., Planchon, V., & Rosillon, D. (2024). Automatic quality control of weather data for timely decisions in agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 100445. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100445>.
11. Ganesh Kumar, S. S., & Gudipalli, A. (2024). A comprehensive review on payloads of unmanned aerial vehicle. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27(4), 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2024.08.001>.

12. Endara, F., Pérez, C., Rodriguez, J., Ortiz-Villalba, D., & Llanos, J. (2021). Analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) based on solar energy. In: *Recent advances in electrical engineering, electronics and energy: proceedings of the CIT 2020*, 288–99. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72212-8_21.
13. Islam, M. R., Oliullah, K., Kabir, M. M., Alom, M., & Mridha, M. F. (2023). Machine learning enabled IoT system for soil nutrients monitoring and crop recommendation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 100880. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100880>.
14. Frauendorf, J. L., & Almeida de Souza, E. (2022). The different architectures used in 1G, 2G, 3G, 4G, and 5G networks. *The architectural and technological revolution of 5G* (pp. 83–107). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10650-7_7.
15. Katekar, V., & Cheruku, J. K. (2023). The application of drone technology for sustainable agriculture in India. *Current Agriculture Research Journal*, 10(3), 352–365. <https://doi.org/10.12944/carj.10.3.19>.
16. Makam, S., Komatineni, B. K., Meena, S. S., & Meena, U. (2024). Unmanned aerial vehicles (UAVs): An adoptable technology for precise and smart farming. *Discover Internet of Things*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s43926-024-00066-5>.
17. Marcone, A., Impollonia, G., Croci, M., Blandinières, H., Pellegrini, N., & Amaducci, S. (2024). Garlic yield monitoring using vegetation indices and texture features derived from UAV multispectral imagery. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100513. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100513>.
18. Nahiyoon, S. A., Ren, Z., Wei, P., Li, X., Li, X., Xu, J., Yan, X., & Yuan, H. (2024). Recent development trends in plant protection uavs: A journey from conventional practices to cutting-edge technologies—a comprehensive review. *Drones*, 8(9), 457. <https://doi.org/10.3390/drones8090457>.
19. Pansy, D. L., & Murali, M. (2023). UAV hyperspectral remote sensor images for mango plant disease and pest identification using MD-FCM and XCS-RBFNN. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11678-9>.
20. Rivera, G., Porras, R., Florencia, R., & Sánchez-Solís, J. P. (2023). LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances. *Computers and Electronics in Agriculture*, 207, 107737. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107737>.
21. Sahni, R. K., Kumar, S. P., Thorat, D., Rajwade, Y., Jyoti, B., Ranjan, J., & Anand, R. (2024). Drone spraying system for efficient agrochemical application in precision agriculture. In *Applications of computer vision and drone technology in agriculture 4.0* (pp. 225–244). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8684-2_13.
22. Seong, M., Jo, O., & Shin, K. (2024). Age of information minimization in UAV-assisted data harvesting networks by multi-agent deep reinforcement curriculum learning. *Expert Systems With Applications*, 124379. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124379>.
23. Song, Y., Bi, J., & Wang, X. (2024). Design and implementation of intelligent monitoring system for agricultural environment in IoT. *Internet of Things*, 25, 101029. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101029>.
24. Surendran, U., Nagakumar, K. C. V., & Samuel, M. P. (2024). Remote sensing in precision agriculture. In *Digital agriculture* (pp. 201–223). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43548-5_7.
25. Su, J., Zhu, X., Li, S., & Chen, W.-H. (2022). AI meets UAVs: A survey on AI empowered UAV perception systems for precision agriculture. *Neurocomputing*. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.11.020>.
26. Tyagi, R., & Pandey, P. C. (2024). Applications of drones in precision agriculture: Future of smart and sustainable farming. In *Remote sensing in precision agriculture* (pp. 429–453). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91068-2.00003-5>.
27. Wonde, K. M., Tsehay, A. S., & Lemma, S. E. (2022). Training at farmers training centers and its impact on crop productivity and households' income in Ethiopia: A propensity score matching (PSM) analysis. *Heliyon*, Article e09837. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09837>.
28. Zhou, J., Xu, Y., Gu, X., Chen, T., Sun, Q., Zhang, S., & Pan, Y. (2023). High-Precision mapping of soil organic matter based on UAV imagery using machine learning algorithms. *Drones*, 7(5), 290. <https://doi.org/10.3390/drones7050290>.

Отримано 20.01.2025

Yurii Denisov¹, Serhii Yermolov²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: den71td@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2293-7964>.

ResearcherID: [G-1144-2016](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964). Scopus Author ID: [56338219200](https://orcid.org/0000-0003-2293-7964)

²PhD Student of the Department of Electric Engineering and Information and Measuring Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: sergey.ermolow@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8786-2430>.

ResearcherID: [MBI-0037-2025](https://orcid.org/0009-0002-8786-2430)

WAYS TO INCREASE THE ACTIVITY OF MULTI-ROTOR UAVS IN AGRICULTURE

Rapid growth of mechanization of all agricultural work cannot completely reduce human participation, so agricultural automation is extremely important. In terms of automation, this study highlights crucial role of UAVs in accurate and intelligent agriculture. In the article, possibilities of using unmanned aerial vehicles (UAVs) in agriculture are considered. Advantages of using UAVs in comparison with traditional methods are described, as well as prospects for the development of this direction in the agricultural sector are highlighted. Of course, using of unmanned aerial vehicles is widespread in many countries of the world, and results of research in this direction, despite short period of implementation of this technology, are presented in numerous scientific publications. The volume of the global market for Unmanned Aircraft Systems is constantly increasing, and Ukraine, given high development of the aircraft industry, can become one of the leading manufacturers of integrated solutions and services to meet the ever-growing needs of this market. Ukraine has potential to use unmanned aerial vehicles in agriculture in terms of technical, economic and human resources.

UAVs can provide clear, high-resolution images for commercial use, including agriculture. However, at present, the area of increasing the activity of multi-rotor UAVs for agricultural needs is not sufficiently studied.

Many scientific works of domestic and foreign authors are devoted to the use of UAVs in agriculture. Nevertheless, today, the full list of works that can be performed with the help of UAVs, in particular in agriculture (agronomy), has not yet been determined.

Using unmanned aerial vehicles in agriculture is the innovation for Ukraine, since UAVs were primarily used for military needs and only after military tests began to be widely used in agriculture.

An important section of research on ways to improve the functionality of UAVs in the agricultural sector is to improve ways to control UAVs when using these advanced technologies as machine learning and the Internet of things.

The analysis of the most effective ways to increase the activity of UAVs in agriculture is carried out and it is stated that development of UAVs with new capabilities and improvement of their sensor base are the main ways of their modernization.

It is noted that addition of new sensors that provide more accurate information about the state of crops will allow farmers to monitor and care for plants as efficiently as possible.

Keywords: artificial intelligence; agricultural sector; UAV; adding sensors and sensors; crop monitoring; smart farming; Internet of things.

Fig.: 3. References: 28.