НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
В.о. завідувача кафедри
технічного сервісу та інженерного менеджменту імені
М. П. Момотенка

_____ Руслан ШАТРОВ

«_____» _____ 2026 р.

ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ БАКАЛАВРА
на тему «Розробка технології технічного діагностування агродронів»_____

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Гарант освітньої програми

__д.т.н., професор_____ _____ Вячеслав БРАТІШКО
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник бакалаврaської кваліфікаційної роботи

_____д.т.н., проф._____ _____ Роговський Іван Леонідович

Виконав _____ Броварець Микита Євгенович

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
технічного сервісу та інженерного менеджменту
імені М. П. Момотенка
_____ Іван РОГОВСЬКИЙ
(підпис) (ПІБ)
«____» _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
на виконання дипломного проєкту бакалавра студенту
_____ Броварецю Микиті Євгеновичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 208 «Агроінженерія»_____
(код і назва)

Тема дипломного проєкту бакалавра «Розробка технології технічного діагностування агродронів»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «16» лютого 2026 р. № 510 «С»
Термін подання завершеної роботи на кафедру__20 травня 2026 року_____
(рік, місяць, число)
Вихідні дані до дипломного проекту бакалавра Матеріали первинного бухгалтерського обліку, нормативно-методичні матеріали, науково-технічна література_____
Перелік питань, які потрібно розробити:
1. Характеристика господарства ФГ «Деметра» Київської області
2. Аналіз існуючих методів та засобів технічного діагностування агродронів._____
3. Розрахунок основних параметрів обслуговуючої майстерні_____
4. Конструктивна частина _____
5. Економічне обґрунтування проекту_____
6. Охорони праці_____

Перелік графічних документів: **Електронна презентація на 14 слайдів**
Дата видачі завдання «06» січня 2026 р.

Керівник бакалаврaської кваліфікаційної роботи _____ Роговський І.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)
Завдання прийняв до виконання _____ Броварець Микита Євгенович
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП 5

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ АГРОДРОНІВ ТА МЕТОДІВ ЇХНЬОГО ДІАГНОСТУВАННЯ 7
1.1. Класифікація, конструктивні особливості та сфери застосування БПЛА в агропромисловому комплексі. 7
1.2. Аналіз типових відмов, дефектів та умов експлуатації конструктивних елементів агродронів. 15
1.3. Огляд існуючих методів і засобів технічного сервісу та діагностування безпілотних літальних апаратів. 20
1.4. Висновки до розділу 1. 25

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АГРОДРОНІВ 26
2.1. Розрахунок робочих процесів агродрона як об'єкта технічного діагностування. 26
2.2. Визначення переліку діагностичних ознак та інформативних параметрів (вібраційні, теплові, електричні показники). 28
2.3. Розрахунок впливу деградаційних процесів (зносу, втоми матеріалів) на функціональні характеристики дрона. 31
2.4. Висновки до розділу 2. 35

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ 37
3.1. Оцінка віброакустичних характеристик гвинтомоторної групи та теплового стану силових елементів (АКБ, ESC, двигуни). 37
3.2. Розробка алгоритму та покрокової технологічної карти технічного діагностування агродрона. 42
3.3. Висновки до розділу 3. 53

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОБСЛУГОВУВАННІ БПЛА 55
4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів під час технічного обслуговування і діагностування агродронів. 55
4.2. Заходи безпеки при роботі з літій-полімерними (Li-Po) акумуляторами та електричним обладнанням. 58
4.3. Правила безпеки польотів та екологічні аспекти використання агродронів для внесення ЗЗР. 59
4.4. Висновки до розділу 4. 64

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБКИ 65

5.1. Розрахунок витрат на розробку та реалізацію технології технічного діагностування. 65
5.2. Висновки до розділу 5. 69

ВИСНОВКИ 70

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 72

ДОДАТКИ 74

ВСТУП

Стрімкий розвиток цифрових технологій та концепції точного землеробства (Precision Agriculture) сприяв широкому впровадженню безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у сучасне сільськогосподарське виробництво. Агродрони застосовуються для внесення засобів захисту рослин, мінеральних добрив, моніторингу стану посівів, створення карт полів, визначення зон неоднорідності та оцінювання ефективності агротехнологічних заходів. Використання таких систем дозволяє підвищити продуктивність виконання польових робіт, скоротити витрати матеріальних ресурсів та мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Разом із тим ефективність застосування агродронів значною мірою залежить від їх технічного стану та надійності функціонування. Робота БПЛА відбувається в умовах постійних динамічних навантажень, впливу пилу, вологи, перепадів температур і агресивних хімічних речовин. У процесі експлуатації відбувається поступове зношування гвинтомоторної групи, деградація літій-полімерних акумуляторів, старіння електронних компонентів, порушення роботи систем навігації та розпилення. Наявність навіть незначних дефектів може призвести до погіршення льотних характеристик, збільшення витрат енергії, нерівномірного внесення препаратів або виникнення аварійної ситуації.

Традиційні методи технічного обслуговування агродронів переважно базуються на регламентних інтервалах або візуальному контролі, що не завжди дозволяє своєчасно виявити приховані дефекти. Сучасний світовий напрям розвитку сервісного обслуговування передбачає перехід до концепції діагностування за фактичним технічним станом (Condition-Based Maintenance) та прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance). Такий підхід ґрунтується на безперервному контролі вібраційних, теплових та електричних параметрів роботи обладнання, аналізі їх змін та прогнозуванні розвитку деградаційних процесів.

Особливо актуальним є застосування комплексних методів технічного діагностування для агродронів великої вантажопідйомності, таких як XAG P40, які виконують значні обсяги робіт протягом короткого агротехнічного періоду. Відмова такого безпілотного комплексу під час польових робіт може спричинити суттєві економічні збитки, пов'язані із простоєм техніки, аварійним ремонтом, порушенням технологічних строків внесення засобів захисту рослин та можливим зниженням урожайності. Саме тому розроблення сучасної технології технічного діагностування агродронів є актуальним науково-практичним завданням.

У роботі запропоновано комплексний підхід до оцінювання технічного стану агродрона шляхом використання віброакустичних, теплових та електричних діагностичних параметрів. Проведено математичне моделювання деградаційних процесів конструктивних елементів, сформовано дерево діагностичних ознак, розроблено алгоритм і технологічну карту технічного діагностування, а також виконано економічне обґрунтування впровадження запропонованої технології.

Метою роботи є розроблення технології технічного діагностування агродрона на основі комплексного аналізу вібраційних, теплових та електричних параметрів його конструктивних елементів для підвищення надійності, безпеки та економічної ефективності експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан використання агродронів у агропромисловому комплексі та їх конструктивні особливості.
2. Виконати аналіз існуючих методів технічного сервісу та діагностування БПЛА.
3. Визначити інформативні діагностичні ознаки на основі вібраційних, теплових та електричних параметрів.
4. Розробити алгоритм і технологічну карту технічного діагностування агродрона.
5. Виконати економічне оцінювання ефективності впровадження запропонованої технології технічного діагностування.

Об'єктом дослідження є процес технічного діагностування агродронів, що використовуються для виконання технологічних операцій у сільському господарстві.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технологія технічного діагностування конструктивних елементів агродрона на основі аналізу їх вібраційних, теплових та електричних характеристик.

Методи дослідження

У роботі використано комплекс сучасних методів дослідження, зокрема:

- аналіз та узагальнення науково-технічної літератури;
- системний аналіз конструкції агродронів;
- методи математичного моделювання деградаційних процесів;
- методи теорії надійності та технічної діагностики;
- методи вібраційного та тепловізійного контролю;
- методи електричних вимірювань;
- статистичні методи обробки експериментальних даних;
- методи техніко-економічного аналізу ефективності впровадження нової технології.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ АГРОДРОНІВ ТА МЕТОДІВ ЇХНЬОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

1.1. Класифікація, конструктивні особливості та сфери застосування БПЛА в агропромисловому комплексі

Сучасний розвиток агропромислового комплексу (АПК) нерозривно пов'язаний із впровадженням технологій точного землеробства, автоматизації виробничих процесів та цифровізації управління сільськогосподарськими підприємствами. Одним із найперспективніших інструментів у цьому напрямку стали безпілотні літальні апарати (БПЛА), або дрони, які забезпечують оперативний збір інформації, моніторинг стану посівів, виконання технологічних операцій та підтримку прийняття управлінських рішень.

Використання БПЛА дозволяє значно скоротити витрати ресурсів, підвищити врожайність культур, мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище та забезпечити ефективний контроль великих територій. Завдяки розвитку сенсорних систем, штучного інтелекту та супутникової навігації безпілотні технології стали важливою складовою концепції Smart Farming та Precision Agriculture.

Класифікація БПЛА. Безпілотні літальні апарати класифікуються за різними ознаками: конструкцією, способом створення підйомної сили, призначенням, дальністю польоту, масою та рівнем автономності.

За типом конструкції. Мультироторні БПЛА. Найбільш поширеними в аграрній сфері є мультироторні дрони (квадрокоптери, гексакоптери, октокоптери).

Їх головною особливістю є вертикальний зліт та посадка (VTOL - Vertical Take-Off and Landing), можливість зависання над об'єктом та висока маневреність.

Переваги:

- простота експлуатації;
- висока точність позиціонування;
- можливість польоту на малих висотах;
- використання для внесення добрив та пестицидів.

Недоліки:

- невелика тривалість польоту;
- обмежена вантажопідйомність;
- залежність від погодних умов.

Літакові БПЛА. Такі апарати мають нерухоме крило та аеродинамічну конструкцію, аналогічну традиційним літакам.

Вони характеризуються:

- великою швидкістю;
- значною дальністю польоту;
- економічним використанням енергії.

Основним недоліком є необхідність спеціального майданчика або катапульти для запуску та посадки.

Подібні системи використовуються переважно для:

- картографування;
- моніторингу великих полів;
- створення цифрових моделей місцевості.

Гібридні БПЛА. Гібридні системи поєднують переваги мультироторних та літакових платформ.

Вони можуть:

- вертикально злітати;
- переходити у горизонтальний політ;
- здійснювати посадку без злітної смуги.

Такі моделі є перспективними для аграрного сектору, оскільки дозволяють обслуговувати великі площі при мінімальних витратах часу.

За масою. Згідно з міжнародною практикою БПЛА поділяються на:

Категорія	Маса
Мікро	до 2 кг
Легкі	2–25 кг
Середні	25–150 кг
Важкі	понад 150 кг

У сільському господарстві найбільшого поширення набули легкі та середні дрони, які забезпечують оптимальне співвідношення між вартістю, продуктивністю та безпечністю.

За функціональним призначенням. За виконуваними завданнями БПЛА поділяють на:

- моніторингові;
- картографічні;
- обприскувальні;
- транспортні;
- інспекційні;
- дослідницькі;
- комбіновані.

Моніторингові апарати оснащуються цифровими камерами, мультиспектральними або тепловізійними сенсорами.

Обприскувальні дрони мають спеціальні баки, насоси та форсунки для внесення засобів захисту рослин.

Транспортні моделі використовуються для доставки насіння, біоматеріалів, ветеринарних препаратів або невеликих вантажів.

Конструктивні особливості БПЛА. Незважаючи на різноманітність моделей, більшість сучасних безпілотників мають схожу архітектуру.

До основних елементів належать:

- несуча конструкція;
- силова установка;
- система керування;
- навігаційний комплекс;

- бортовий комп'ютер;
- система передачі даних;
- корисне навантаження.

Несуча конструкція. Рама виконує функцію основного силового елемента. Для її виготовлення використовують:

- карбон;
- алюмінієві сплави;
- композитні матеріали;
- армовані полімери.

Використання легких матеріалів дозволяє збільшити корисне навантаження та час польоту.

Силова установка. Переважна більшість аграрних дронів оснащується електродвигунами.

Потужність двигуна визначається співвідношенням

$$P = M\omega,$$

де

- (P) - потужність двигуна, Вт;
- (M) - крутний момент, Н·м;
- (ω) - кутова швидкість, рад/с.

Для важких моделей можуть використовуватися двигуни внутрішнього згоряння або гібридні енергетичні установки.

Акумуляторна система. Тривалість польоту значною мірою залежить від ємності акумулятора.

Запас енергії визначається формулою

$$E = U \cdot C,$$

де

- (E) - енергетична ємність;
- (U) - напруга;
- (C) - ємність акумулятора.

Якщо врахувати середню потужність споживання, орієнтовний час польоту можна оцінити як

$$t = \frac{E}{P}.$$

Отже, зі збільшенням енергетичної ємності або зі зменшенням споживаної потужності тривалість польоту зростає.

Навігаційна система. Основу сучасної навігації складають:

- GPS;
- Galileo;
- BeiDou;
- інерціальні системи.

Положення дрона визначається за координатами

$$\mathrm{r} = (x, y, z),$$

де

- (x) - координата по осі (X);
- (y) - координата по осі (Y);

- (z) - висота польоту.

Відстань між двома точками визначається:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}.$$

Сенсорні системи. Для отримання інформації використовуються:

- RGB-камери;
- мультиспектральні камери;
- гіперспектральні сенсори;
- тепловізори;
- LiDAR;
- радіолокатори.

Особливо важливими є мультиспектральні камери, які дозволяють оцінювати фізіологічний стан рослин.

Одним із найвідоміших показників є індекс NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

де

- (NIR) - відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні;
- (RED) - відбиття у червоному спектрі.

Значення NDVI знаходяться у межах

$$-1 \leq NDVI \leq 1.$$

Чим ближче показник до 1, тим кращий стан рослинності.



Рисунок 1.1 DJI Agras T50



Рисунок 1.2 XAG P40



Рисунок 1.3 XAG P100



Рисунок 1.4 Hylio AG-272

Для дипломної роботи доцільно використати огляд існуючих конструкцій агродронів із коротким технічним описом кожної моделі. Нижче наведено приклади 14 сучасних платформ.

Назва конструкції	Опис
DJI Agras T50	Сучасний багатороторний агродрон великої вантажопідйомності. Оснащений системою автоматичного обльоту перешкод, RTK-навігацією, двоканальною системою розпилення та високопродуктивними електродвигунами. Використовується для внесення ЗЗР і добрив.
XAG P40	Один із найпоширеніших агродронів для точного землеробства. Має складану конструкцію, модульну систему баків, інтелектуальне керування польотом та систему автоматичного планування маршрутів.
XAG P100	Високопродуктивний безпілотний комплекс із великою місткістю бака та підвищеною продуктивністю. Призначений для роботи на великих площах.
Hylio AG-272	Американський агродрон модульної конструкції з автоматичним контролем норми внесення та системою дистанційного моніторингу.
Hylio AG-230	Компактна модель для локального внесення препаратів. Відзначається простотою технічного обслуговування та швидкою заміною акумуляторів.
DJI Agras T40	Багатороторний агродрон із коаксіальною схемою двигунів, системою активного сканування перешкод та високою точністю польоту.
Yamaha RMAX	Безпілотний вертоліт, який широко застосовується в Японії для авіаційного внесення пестицидів і добрив. Відрізняється великою тривалістю польоту та високою стабільністю.
Guardian Agriculture SC1	Важкий електричний агродрон нового покоління, орієнтований на масштабне внесення засобів захисту рослин із високою продуктивністю.
EAVision J100	Оснащений системою просторового сканування рельєфу та автоматичним огинанням перешкод, що дозволяє працювати на складних ділянках місцевості.
DJI Agras T25	Компактний агродрон для невеликих та середніх господарств. Характеризується швидкою підготовкою до роботи та високою точністю розпилення.
XAG V40	Модель вертикального зльоту та посадки, що поєднує функції картографування й внесення препаратів та підтримує автономне планування маршрутів.

Kray Technologies безпілотний літак-обприскувач	Українська розробка літакового типу, призначена для високошвидкісної обробки великих площ із мінімальними витратами енергії.
Pyka Pelican Spray	Автономний електричний літак для авіаційного внесення засобів захисту рослин на великих сільськогосподарських угіддях.
ABZ Innovation L30	Європейський агродрон із модульною конструкцією, сучасною системою керування польотом і високою ремонтопридатністю, призначений для точного внесення ЗЗР та добрив.

Аналіз існуючих конструкцій показує, що сучасні агродрони переважно виконані за багатороторною схемою з електричним приводом, RTK/GNSS-навігацією, автоматизованими системами керування та модулями точного розпилення. Основними напрямами їх розвитку є збільшення вантажопідйомності, автономності польоту, інтеграція систем штучного інтелекту та вдосконалення засобів технічної діагностики, що безпосередньо обґрунтовує актуальність розроблення сучасної технології діагностування агродронів.

Сфери застосування БПЛА в агропромисловому комплексі. Моніторинг посівів. Одним із найважливіших напрямків використання БПЛА є оперативний контроль стану полів.

За допомогою аерофотозйомки можна:

- визначати густоту сходів;
- оцінювати рівномірність розвитку;
- виявляти бур'яни;
- знаходити осередки хвороб;
- контролювати пошкодження шкідниками.

Періодичний моніторинг дозволяє створювати часові ряди та прогнозувати майбутню врожайність.

Картографування. На основі отриманих зображень формується цифрова модель місцевості.

Площа ділянки може визначатися як

$$S = L \cdot W,$$

де

- (L) - довжина;
- (W) - ширина.

Для полігональних ділянок використовуються геоінформаційні алгоритми, що забезпечують високу точність визначення площ та меж полів.

Точне внесення добрив. Однією з найбільш економічно ефективних функцій є локальне внесення добрив.

Необхідна норма визначається:

$$Q = q \cdot S,$$

де

- (Q) - загальна кількість препарату;
- (q) - норма внесення на одиницю площі;
- (S) - площа обробки.

Така технологія дозволяє уникнути перевитрати дорогих препаратів.

Обприскування. Сучасні агродрони здійснюють:

- внесення гербіцидів;
- внесення фунгіцидів;
- внесення інсектицидів;
- позакореневе підживлення.

Продуктивність можна оцінити:

$$W = \frac{S}{t},$$

де

- (W) - продуктивність;
- (S) - площа;
- (t) - час виконання роботи.

Контроль зрошення. За допомогою тепловізійних камер визначаються ділянки з недостатнім або надлишковим зволоженням.

Ефективність використання води може бути оцінена як

$$\eta = \frac{V_{\text{корисна}}}{V_{\text{загальна}}},$$

де

- $(V_{\text{корисна}})$- об'єм води, використаний рослинами;
- $(V_{\text{загальна}})$ - загальний об'єм поданої води.

Прогнозування врожайності. На основі даних дистанційного зондування та алгоритмів машинного навчання формується прогноз урожаю.

У спрощеному вигляді залежність можна представити як

$$Y = f(NDVI, T, H, P),$$

де

- (Y) - прогнозована врожайність;
- (NDVI) - вегетаційний індекс;
- (T) - температура;
- (H) - вологість;
- (P) - інші агрономічні фактори.

На практиці використовуються багатофакторні статистичні та нейромережеві моделі.

Основними перевагами застосування безпілотних літальних апаратів є:

- автоматизація технологічних процесів;
- скорочення витрат праці;
- економія добрив та засобів захисту рослин;
- оперативне отримання інформації;
- підвищення точності управління господарством;
- зменшення екологічного навантаження;
- можливість роботи у важкодоступних місцях;

- інтеграція з системами штучного інтелекту та геоінформаційними технологіями.

Подальший розвиток безпілотних систем пов'язаний із впровадженням автономної навігації, ройових технологій (swarm systems), комп'ютерного бачення та алгоритмів машинного навчання. Очікується, що найближчими роками БПЛА стануть одним із ключових елементів цифрового агровиробництва, забезпечуючи підвищення продуктивності, стійкості та конкурентоспроможності агропромислового комплексу.

1.2. Аналіз типових відмов, дефектів та умов експлуатації конструктивних елементів агродронів.

Активне впровадження безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в агропромисловому комплексі значно підвищує ефективність виконання технологічних операцій, таких як моніторинг посівів, внесення засобів захисту рослин, картографування територій та контроль стану ґрунтів. Разом із цим інтенсивна експлуатація агродронів у складних польових умовах призводить до виникнення різноманітних механічних, електричних та програмних відмов. Від надійності конструктивних елементів залежить безпечність польотів, економічна ефективність використання техніки та якість виконання агротехнологічних операцій.

Особливістю агродронів є їх робота в умовах високої запиленості, підвищеної вологості, впливу агрохімічних речовин, значних температурних коливань та постійних вібрацій. Саме тому аналіз типових дефектів та умов експлуатації є важливою складовою забезпечення їх довговічності та ефективності.

Умови експлуатації агродронів. На відміну від більшості цивільних безпілотників, агродрони працюють у середовищі, яке характеризується значною кількістю несприятливих факторів.

До основних факторів належать:

- висока концентрація пилу;
- вплив вологи та атмосферних опадів;
- агресивне середовище хімічних препаратів;
- механічні удари під час посадки;
- сильні пориви вітру;
- ультрафіолетове випромінювання;
- температурні перепади;
- тривала робота на максимальному навантаженні.

Під час обприскування агрохімікати можуть потрапляти на двигуни, електроніку та несучі конструкції, що прискорює процеси корозії та деградації матеріалів.

Температурний режим експлуатації значною мірою впливає на ресурс акумуляторних батарей та електронних компонентів. При низьких температурах зменшується ємність акумулятора, а при високих температурах збільшується швидкість його старіння.

Типові відмови конструктивних елементів. Відмова це повна або часткова втрата працездатності системи, що унеможливлює виконання поставлених завдань або знижує їх якість.

Основними групами відмов є:

- механічні;
- електричні;
- електронні;
- програмні;
- експлуатаційні.

Механічні пошкодження становлять значну частину всіх несправностей агродронів. До них належать:

- тріщини рами;
- руйнування променів;
- деформація посадкових опор;
- пошкодження кріплень;
- зношування підшипників;
- поломка пропелерів.

Найчастіше вони виникають внаслідок:

- аварійної посадки;
- зіткнення з перешкодами;
- тривалих вібрацій;
- перевищення допустимого навантаження.

Напруження в конструктивному елементі визначається співвідношенням

$$\sigma = \frac{F}{A},$$

де

- (σ) - механічне напруження, Па;
- (F) - прикладена сила, Н;
- (A) - площа поперечного перерізу, м².

Якщо

$$\sigma > \sigma_{\text{доп}},$$

то матеріал переходить у зону пластичної деформації або руйнування.

Під час багаторазових циклів польоту конструкція піддається циклічним навантаженням.

Кількість циклів до руйнування описується кривими втоми матеріалу, а залежність можна узагальнено представити як

$$\sigma^m N = C,$$

де

- (σ) - амплітуда напружень;
- (N) - кількість циклів;
- (m) та (C) - емпіричні коефіцієнти.

Таким чином, навіть навантаження нижче границі міцності можуть призвести до появи мікротріщин та руйнування деталей після великої кількості польотів.

Електродвигуни працюють у режимі високих обертів і значних змін навантаження.

Типові несправності:

- перегрів;
- руйнування підшипників;
- розмагнічування магнітів;
- міжвиткове замикання;
- дисбаланс ротора.

Потужність двигуна визначається:

$$P = M\omega,$$

де

- (P) - потужність;
- (M) - крутний момент;
- (ω) - кутова швидкість.

При збільшенні навантаження зростає струм споживання:

$$P = UI,$$

де

- (U) - напруга;
- (I) - сила струму.

Отже,

$$I = \frac{P}{U}.$$

Зі збільшенням сили струму зростає тепловиділення, яке описується законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2Rt,$$

де

- (Q) - кількість теплоти;
- (R) - електричний опір;
- (t) - час.

Саме перегрів є однією з основних причин виходу двигунів з ладу.

Пропелер є одним із найбільш навантажених елементів конструкції.

Типові дефекти:

- мікротріщини;
- сколи;
- деформація лопатей;
- дисбаланс;
- руйнування посадкового вузла.

Відцентрова сила визначається:

$$F = \frac{mv^2}{r},$$

де

- (m) - маса елемента;
- (v) - лінійна швидкість;
- (r) - радіус обертання.

При збільшенні швидкості обертання навантаження різко зростає, тому навіть незначні дефекти можуть призвести до руйнування пропелера.

Дисбаланс створює додаткові вібрації:

$$F_d = m_e r \omega^2,$$

де

- (m_e) - еквівалентна неврівноважена маса;
- (r) - ексцентриситет;
- (ω) - кутова швидкість.

Відмови акумуляторних батарей. Літій-полімерні акумулятори мають обмежений ресурс циклів заряджання.

Основні причини деградації:

- глибокий розряд;
- перезарядження;
- перегрів;
- механічні пошкодження;
- неправильне зберігання.

Енергетична ємність визначається:

$$E=UC,$$

де

- (E) - запас енергії;
- (U) - напруга;
- (C) - ємність.

Час роботи:

$$t = \frac{E}{P}.$$

Зі старінням батареї її фактична ємність поступово зменшується:

$$C_t = C_0(1 - kN),$$

де

- (C_0) - початкова ємність;
- (C_t) - ємність після (N) циклів;
- (k) - коефіцієнт деградації.

Відмови електронних систем. До електронних компонентів належать:

- польотний контролер;
- GPS-модуль;
- регулятори швидкості (ESC);
- датчики;
- системи зв'язку;
- телеметрія.

Типові несправності:

- короткі замикання;
- окиснення контактів;
- перегрів мікросхем;
- програмні помилки;
- втрати сигналу.

Ймовірність безвідмовної роботи при експоненційному законі відмов описується:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

де

- (P(t)) - ймовірність безвідмовної роботи;
- (λ) - інтенсивність відмов;
- (t) - час експлуатації.

Імовірність відмови відповідно становить

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Відмови навігаційної системи. Система навігації забезпечує визначення координат і стабілізацію польоту.

Основні причини відмов:

- слабкий сигнал супутників;
- електромагнітні перешкоди;
- помилки калібрування компаса;
- збій інерціальної системи;
- програмні помилки.

Похибка визначення координат можна оцінити:

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2},$$

де

- $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ - похибки за відповідними координатами.

Накопичення похибок може призвести до відхилення від маршруту та аварійної ситуації.

Вплив зовнішніх факторів на надійність. На інтенсивність відмов істотно впливають умови експлуатації.

До найбільш небезпечних факторів належать:

- швидкість вітру;
- температура повітря;
- вологість;
- пил;
- дощ;
- агрохімічне середовище.

Аеродинамічна сила вітру визначається:

$$F = \frac{1}{2}\rho C_d A v^2,$$

де

- (ρ) - густина повітря;
- (C_d) - коефіцієнт аеродинамічного опору;
- (A) - площа проєкції;
- (v) - швидкість повітряного потоку.

Оскільки сила пропорційна квадрату швидкості, навіть незначне збільшення швидкості вітру суттєво підвищує навантаження на конструкцію.

Методи попередження відмов. Для підвищення надійності агродронів застосовують комплекс профілактичних заходів:

- регулярний технічний огляд;

- балансування пропелерів;
- контроль температури двигунів;
- перевірку акумуляторів;
- калібрування навігаційної системи;
- очищення після роботи з агрохімікатами;
- оновлення програмного забезпечення;
- заміну деталей відповідно до нормативного ресурсу.

Ефективність технічного обслуговування можна оцінити коефіцієнтом готовності:

$$K_g = \frac{T_{\text{роб}}}{T_{\text{роб}} + T_{\text{рем}}},$$

де

- ($T_{\text{роб}}$) - час працездатного стану;
- ($T_{\text{рем}}$) - час ремонту та технічного обслуговування.

Чим ближче значення (K_g) до 1, тим вищою є експлуатаційна готовність безпілотної системи.

1.3. Огляд існуючих методів і засобів технічного сервісу та діагностування безпілотних літальних апаратів.

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у різних галузях економіки, зокрема в агропромисловому комплексі, висуває підвищені вимоги до їхньої надійності, безпеки та експлуатаційної готовності. На відміну від традиційної сільськогосподарської техніки, агродрони поєднують механічні, електронні, програмні та навігаційні системи, від справності яких залежить ефективність виконання польотних завдань. Навіть незначні відхилення у роботі окремих вузлів можуть призвести до втрати стабільності польоту, аварійної посадки або повної втрати апарата.

Тому важливе місце займає система технічного сервісу та діагностування, яка спрямована на своєчасне виявлення несправностей, оцінку технічного стану обладнання та прогнозування залишкового ресурсу. Сучасні методи діагностики базуються на використанні сенсорних систем, телеметрії, комп'ютерної обробки даних, штучного інтелекту та методів математичного моделювання.

Технічний сервіс БПЛА являє собою комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення справного стану літального апарата протягом усього життєвого циклу.

Основними завданнями технічного сервісу є:

- підтримання працездатності систем;
- попередження аварійних ситуацій;
- своєчасне виявлення дефектів;
- продовження ресурсу конструктивних елементів;
- забезпечення безпеки польотів;
- мінімізація експлуатаційних витрат.

Система технічного сервісу включає декілька рівнів обслуговування.

Передпольотне обслуговування. Виконується безпосередньо перед запуском дрона та включає:

- перевірку цілісності корпусу;
- огляд пропелерів;
- контроль кріплень;
- перевірку акумулятора;
- перевірку GPS-з'єднання;
- тестування сенсорів;
- калібрування компаса;
- перевірку рівня сигналу.

Особлива увага приділяється залишковому заряду батареї:

$$SOC = \frac{Q_{\text{зал}}}{Q_{\text{ном}}} \times 100$$

де

- (SOC) - рівень заряду;
- ($Q_{\text{зал}}$) - залишкова ємність;
- ($Q_{\text{ном}}$) - номінальна ємність.

Післяпольотне обслуговування. Після завершення місії виконується:

- очищення від пилу;
- видалення залишків агрохімікатів;
- аналіз журналів польоту;
- контроль температури двигунів;
- перевірка акумуляторів;
- огляд механічних пошкоджень.

Саме післяпольотний контроль дозволяє виявити дефекти до наступної експлуатації.

Планове технічне обслуговування. Проводиться після визначеної кількості годин польоту або циклів роботи. Основні операції:

- заміна пропелерів;
- перевірка підшипників;
- оновлення програмного забезпечення;
- діагностика електронних систем;
- перевірка точності навігації;
- тестування систем зв'язку.

Періодичність можна описати:

$$N = \frac{T}{t},$$

де

- (N) - кількість технічних обслуговувань;
- (T) - загальний час експлуатації;
- (t) - міжсервісний інтервал.

Діагностування являє собою процес визначення технічного стану системи без її руйнування або демонтажу. Основними методами є:

- візуальний;
- параметричний;

- функціональний;
- комп'ютерний;
- неруйнівний контроль;
- інтелектуальна діагностика.

Візуальний метод. Є найпростішим способом контролю. Передбачає:

- огляд корпусу;
- пошук тріщин;
- контроль стану кабелів;
- перевірку кріплень;
- огляд пропелерів;
- виявлення корозії.

Переваги:

- швидкість;
- простота;
- відсутність дорогого обладнання.

Недоліком є неможливість виявлення прихованих дефектів.

Параметричний метод. Метод базується на вимірюванні фізичних параметрів системи. Контролюються:

- струм;
- напруга;
- температура;
- швидкість обертання;
- рівень вібрації;
- споживана потужність.

Потужність визначається:

$$P = UI,$$

де

- (U) - напруга;
- (I) - сила струму.

Відхилення параметрів від номінальних значень свідчить про можливу несправність.

Функціональна діагностика. Передбачає перевірку роботи системи у режимі, максимально наближеному до реальної експлуатації. Контролюється:

- стабілізація;
- реакція на команди;
- утримання висоти;
- точність маршруту;
- робота автопілота.

Похибка визначення координат:

$$\Delta r = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}.$$

Збільшення похибки свідчить про необхідність калібрування або ремонту навігаційної системи.

Засоби неруйнівного контролю. Неруйнівний контроль дозволяє оцінити стан конструкції без її пошкодження. Основні методи:

- ультразвуковий;

- тепловізійний;
- оптичний;
- лазерний;
- рентгенографічний;
- акустико-емісійний.

Тепловізійна діагностика. Під час роботи несправні елементи часто мають підвищену температуру. Кількість теплоти визначається:

$$Q = I^2Rt,$$

де

- (I) - сила струму;
- (R) - опір;
- (t) - час.

Підвищення температури може свідчити про:

- перевантаження;
- коротке замикання;
- зношування підшипників;
- поганий контакт.

Вібраційна діагностика. Поява дефектів у пропелерах або двигунах супроводжується зміною рівня вібрацій. Гармонічне коливання описується:

$$x(t) = A\sin(\omega t + \varphi),$$

де

- (A) - амплітуда;
- (ω) - кутова швидкість;
- (φ) - початкова фаза.

Зростання амплітуди часто є ознакою дисбалансу або механічного пошкодження.

Комп'ютерна діагностика. Сучасні БПЛА оснащуються системами самоконтролю (Built-In Test Equipment, BITE). Вони автоматично контролюють:

- температуру;
- заряд батареї;
- роботу GPS;
- стан двигунів;
- навантаження ESC;
- якість зв'язку;
- стан сенсорів.

Після польоту формується журнал (log-файл), який містить усі параметри роботи. Часто використовується середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2},]$$

де

- (x_i) - виміряне значення;
- $(\bar{x})$ - середнє значення;
- (n) - кількість вимірювань.

Зростання (σ) може свідчити про нестабільність роботи системи.

Діагностування акумуляторних батарей. Акумулятор є одним із найдорожчих компонентів агродрона. Основними показниками його стану є:

- ємність;
- внутрішній опір;
- температура;
- кількість циклів;
- швидкість саморозряду.

Енергія батареї:

$$E = UC.$$

Залишковий ресурс можна оцінити:

$$R = \frac{C_t}{C_0} \times 100$$

де

- (C_t) - поточна ємність;
- (C_0) - початкова ємність.

При зниженні ресурсу нижче приблизно 80% батарея вважається такою, що втратила оптимальні експлуатаційні характеристики.

Використання штучного інтелекту в діагностуванні. Останнім часом активно застосовуються методи машинного навчання та штучного інтелекту. Основні напрямки:

- прогнозування відмов;
- автоматична класифікація дефектів;
- аналіз журналів польоту;
- розпізнавання аномалій;
- оцінка залишкового ресурсу.

У загальному вигляді прогноз технічного стану можна записати:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

де

- (Y) - прогнозований технічний стан;
- (X_i) - контрольовані параметри (температура, струм, вібрація, напруга тощо).

Завдяки аналізу великих масивів даних алгоритми здатні виявляти приховані закономірності, які важко встановити традиційними методами.

Надійність та прогнозування відмов. Одним із головних завдань технічної діагностики є оцінка надійності системи. Ймовірність безвідмовної роботи описується:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

де

- (P(t)) - ймовірність безвідмовної роботи;
- (λ) - інтенсивність відмов;
- (t) - час експлуатації.

Ймовірність виникнення відмови:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Середній час безвідмовної роботи визначається:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda},$$

де

- (MTBF) - середній час між відмовами;
- (λ) - інтенсивність відмов.

Цей показник широко використовується при плануванні технічного обслуговування та оцінці експлуатаційної надійності БПЛА.

Подальший розвиток технічного сервісу безпілотних літальних апаратів пов'язаний із впровадженням цифрових технологій та концепції Predictive Maintenance (прогнозне технічне обслуговування). Основними перспективними напрямами є:

- дистанційний моніторинг технічного стану в режимі реального часу;
- використання хмарних сервісів для аналізу телеметричних даних;
- створення цифрових двійників (Digital Twin) БПЛА;
- застосування алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування відмов;
- автоматизоване формування рекомендацій щодо ремонту та заміни вузлів;
- інтеграція сервісних систем із платформами управління аграрним виробництвом.

1.4. Висновки до розділу 1

Технічний сервіс та діагностування безпілотних літальних апаратів є необхідною умовою їх безпечної та ефективної експлуатації в агропромисловому комплексі. Існуючі методи - від візуального огляду і параметричного контролю до комп'ютерної діагностики та систем штучного інтелекту - дозволяють своєчасно виявляти несправності, оцінювати технічний стан і прогнозувати залишковий ресурс обладнання. Комплексне застосування сучасних засобів діагностування підвищує коефіцієнт технічної готовності, знижує ризик аварійних ситуацій, скорочує експлуатаційні витрати та забезпечує високу ефективність використання агродронів у технологіях точного землеробства.

Аналіз типових відмов та дефектів конструктивних елементів агродронів свідчить, що найбільш вразливими вузлами є пропелери, електродвигуни, акумуляторні батареї, електронні системи керування та навігаційне обладнання. Основними причинами несправностей виступають циклічні механічні навантаження, вплив агресивного зовнішнього середовища, перегрів, вібрації та помилки експлуатації. Своєчасна діагностика, планове технічне обслуговування, застосування сучасних методів моніторингу стану обладнання та використання математичних моделей надійності дозволяють суттєво підвищити безвідмовність роботи агродронів, продовжити строк їх служби та забезпечити ефективне використання у технологіях точного землеробства.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АГРОДРОНІВ

2.1. Розрахунок робочих процесів агродрона як об'єкта технічного діагностування.

Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА), що застосовуються в агропромисловому комплексі, є складними мехатронними системами, які поєднують механічні конструкції, електронні компоненти, навігаційні модулі, системи автоматичного керування та програмне забезпечення. Ефективність їх роботи безпосередньо залежить від технічного стану окремих вузлів і взаємодії між ними. Тому одним із найважливіших напрямків сучасної інженерії є математичне моделювання робочих процесів агродрона як об'єкта технічного діагностування.

Моделювання дозволяє досліджувати поведінку системи без проведення дорогих натурних експериментів, прогнозувати появу несправностей, оцінювати вплив окремих параметрів на надійність та розробляти алгоритми автоматичного контролю технічного стану. Особливого значення такі моделі набувають у концепції Predictive Maintenance, коли обслуговування виконується не за календарним графіком, а відповідно до реального технічного стану обладнання.

Агродрон як об'єкт технічного діагностування

З точки зору теорії технічної діагностики агродрон являє собою складну динамічну систему, що складається з взаємопов'язаних підсистем:

- механічної;
- енергетичної;
- навігаційної;
- інформаційної;
- виконавчої;
- системи керування;
- системи передачі даних.

У загальному вигляді модель можна представити як

$$S = X, U, Y, Z,$$

де

- (X) - множина внутрішніх параметрів системи;
- (U) - вхідні впливи;
- (Y) - вихідні параметри;
- (Z) - зовнішні фактори середовища.

Технічне діагностування полягає у визначенні технічного стану системи за вимірюванням параметрів (Y).

Структурна модель робочого процесу. Функціонування агродрона можна описати як послідовність взаємопов'язаних етапів:

1. Передпольотна підготовка;
2. Запуск систем;
3. Вертикальний зліт;
4. Перехід до робочого режиму;

5. Виконання маршруту;
6. Виконання технологічної операції;
7. Повернення;
8. Посадка;
9. Аналіз журналу польоту.

Кожен етап характеризується власним набором контрольованих параметрів.

Наприклад,

$$Y_i = V_i, H_i, I_i, T_i, G_i,$$

де

- (V_i) - швидкість;
- (H_i) - висота;
- (I_i) - струм;
- (T_i) - температура;
- (G_i) - координати GPS.

Таким чином формується вектор технічного стану.

Математична модель руху агродрона. Основою моделювання польоту є рівняння динаміки. Згідно із другим законом Ньютона,

$$\sum F = ma,$$

де

- (F) - результуюча сила;
- (m) - маса дрона;
- (a) - прискорення.

У вертикальному напрямку:

$$T - mg = ma_z,$$

де

- (T) - сумарна тяга двигунів;
- (g) - прискорення вільного падіння;
- (a_z) - вертикальне прискорення.

При зависанні:

$$T = mg.$$

Саме ця умова використовується для оцінювання працездатності силової установки.

Модель енергетичного процесу. Під час польоту основним джерелом енергії є акумуляторна батарея. Запас енергії визначається:

$$E = UC,$$

де

- (U) - напруга;
- (C) - ємність.

Потужність споживання:

$$P = UI.$$

Тривалість роботи:

$$t = \frac{E}{P}.$$

Якщо під час однакових умов експлуатації фактичний час польоту зменшується, це може свідчити про деградацію акумулятора або підвищене навантаження на двигуни.

Модель зміни технічного стану. Технічний стан агродрона змінюється внаслідок процесів старіння та зношування. Загальну модель можна записати:

$$X(t) = X_0 - \Delta X(t),$$

де

- (X_0) - початковий стан;
- $(\Delta X(t))$ - накопичені зміни.

Швидкість деградації:

$$\frac{dX}{dt} = -kX,$$

де

- (k) - коефіцієнт деградації.

Розв'язком є

$$X(t) = X_0 e^{-kt}.$$

Таким чином моделюється поступове погіршення характеристик вузлів.

Завдяки таким моделям можна своєчасно планувати технічне обслуговування, уникати аварійних ситуацій та зменшувати експлуатаційні витрати.

2.2. Визначення переліку діагностичних ознак та інформативних параметрів (вібраційні, теплові, електричні показники).

Ефективність технічного діагностування безпілотних літальних апаратів значною мірою залежить від правильного вибору діагностичних ознак та інформативних параметрів, які найбільш повно характеризують технічний стан конструктивних елементів. Оскільки агродрони є складними мехатронними системами, що об'єднують механічні, електричні, електронні та програмні компоненти, їх технічний стан не може бути оцінений лише за одним показником. Необхідне комплексне використання параметрів різної фізичної природи, серед яких особливе місце займають вібраційні, теплові та електричні характеристики.

Діагностична ознака - це вимірювана величина або сукупність величин, зміна яких відображає зміну технічного стану об'єкта. Інформативний параметр являє собою фізичну характеристику, що найбільш чутливо реагує на розвиток дефектів та дозволяє своєчасно виявити несправність.

Саме правильний вибір таких параметрів є основою побудови сучасних систем автоматичного моніторингу та прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance).

Поняття діагностичних ознак. Технічний стан агродрона характеризується множиною параметрів, які змінюються під впливом процесів старіння, зношування або пошкодження.

У загальному вигляді технічний стан можна представити як вектор

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

де

- (x_1) - температура двигуна;
- (x_2) - сила струму;
- (x_3) - рівень вібрації;
- (x_4) - швидкість обертання;
- (x_5) - напруга;
- (x_6) - координати GPS;
- (x_n) - інші контрольовані параметри.

Функція технічного стану має вигляд

$$S = f(\mathbf{X}),$$

де

- (S) - технічний стан системи;
- (**X**) - вектор діагностичних ознак.

2. Класифікація інформативних параметрів

За фізичною природою параметри поділяються на:

- механічні;
- вібраційні;
- теплові;
- електричні;
- аеродинамічні;
- навігаційні;
- інформаційні.

За способом отримання:

- прямі;
- непрямі;
- інтегральні;
- статистичні.

За характером контролю:

- безперервні;
- дискретні;
- аварійні;
- прогнозні.

Основною вимогою до діагностичного параметра є його висока чутливість до зміни технічного стану та низька залежність від випадкових зовнішніх факторів.

Вібраційні параметри. Вібраційна діагностика є одним із найбільш інформативних методів контролю технічного стану обертових вузлів.

Основними джерелами вібрацій є:

- електродвигуни;
- пропелери;
- підшипники;
- редуктори (за наявності);
- несуча конструкція.

Основними контрольованими показниками є:

- амплітуда;

- частота;
- середньоквадратичне значення;
- спектральний склад;
- прискорення;
- швидкість коливань.

Дисбаланс пропелера. Відцентрова сила:

$$F = m_e r \omega^2,$$

де

- (m_e) - неврівноважена маса;
- (r) - ексцентриситет;
- (ω) - кутова швидкість.

Оскільки

$$F \propto \omega^2,$$

навіть невеликий дисбаланс при високих обертах викликає значне збільшення вібрацій.

Теплові параметри. Температура є одним із найбільш інформативних показників технічного стану.

Контролюються:

- температура двигунів;
- температура ESC;
- температура акумулятора;
- температура процесора;
- температура навколишнього середовища.

Рівень заряду. Стан заряду:

$$SOC = \frac{Q_{\text{зал}}}{Q_{\text{ном}}} \times 100$$

При критичному значенні система автоматично ініціює повернення або посадку.

Статистичні інформативні параметри. Для аналізу телеметрії використовуються статистичні характеристики. Середнє значення:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i.$$

Комплексний діагностичний показник. Оскільки окремий параметр не завжди достатньо характеризує стан системи, використовують інтегральний критерій. Узагальнений індекс:

$K = \sum_{i=1}^{n} w_i \, x_i,]$

де

- (w_i) - вагові коефіцієнти;
- (x_i) - нормовані параметри.

Якщо

$$K > K_{\text{кр}},$$

то система класифікується як несправна.

Вимоги до інформативних параметрів. Ефективний діагностичний параметр повинен:

- бути чутливим до розвитку дефекту;
- легко вимірюватися сучасними сенсорами;
- мати високу повторюваність;
- бути стійким до випадкових завад;
- забезпечувати можливість автоматизованої обробки;
- дозволяти прогнозувати технічний стан.

Комплексне використання вібраційних, теплових та електричних показників значно підвищує достовірність діагностування порівняно з контролем лише одного параметра.

2.3. Розрахунок впливу деградаційних процесів (зносу, втоми матеріалів) на функціональні характеристики дрона.

Сучасні агродрони працюють в умовах інтенсивних механічних, аеродинамічних, температурних та вібраційних навантажень, що призводить до поступової деградації їх конструктивних елементів. У процесі експлуатації відбуваються незворотні зміни фізико-механічних властивостей матеріалів, зношування рухомих вузлів, накопичення втомних пошкоджень, старіння електронних компонентів та акумуляторних батарей. Усі ці процеси безпосередньо впливають на льотно-технічні характеристики безпілотного літального апарата, його надійність та безпечність експлуатації.

Математичне моделювання деградаційних процесів дозволяє кількісно оцінити швидкість зміни технічного стану конструкції, прогнозувати залишковий ресурс окремих елементів та формувати оптимальні стратегії технічного обслуговування. Особливого значення такі моделі набувають у системах Predictive Maintenance, де рішення щодо ремонту приймається на основі прогнозу розвитку дефектів.

Деградацією називають процес поступового погіршення технічного стану конструкції під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів.

Основними видами деградації агродронів є:

- механічне зношування;
- втома матеріалів;
- корозія;
- температурне старіння;
- деградація акумуляторів;
- руйнування композитних матеріалів;
- електроміграція електронних компонентів.

Модель деградації пропелерів. Пропелер працює при високих обертах і зазнає значних відцентрових навантажень.

Відцентрова сила:

$$F = \frac{mv^2}{r},$$

де

- (m) - маса;
- (v) - швидкість;

- (r) - радіус.

Дисбаланс визначається:

$$F_d = m_e r \omega^2,$$

де

- (m_e) - неврівноважена маса;
- (r) - ексцентриситет;
- (ω) - кутова швидкість.

Вплив деградації на енергоспоживання. Потужність двигуна:

$$P = UI.$$

При появі дефектів механічні втрати збільшуються:

$$P = P_0 + \Delta P.$$

Тривалість польоту:

$$t = \frac{E}{P}.$$

Якщо

$$P \uparrow,$$

то

$$t \downarrow.$$

Таким чином, навіть незначне механічне зношування призводить до скорочення часу роботи.

Такі моделі є основою сучасних систем інтелектуальної діагностики та прогнозного технічного обслуговування рисунок 2.1–2.4. Нижче наведені приклади з поясненням.

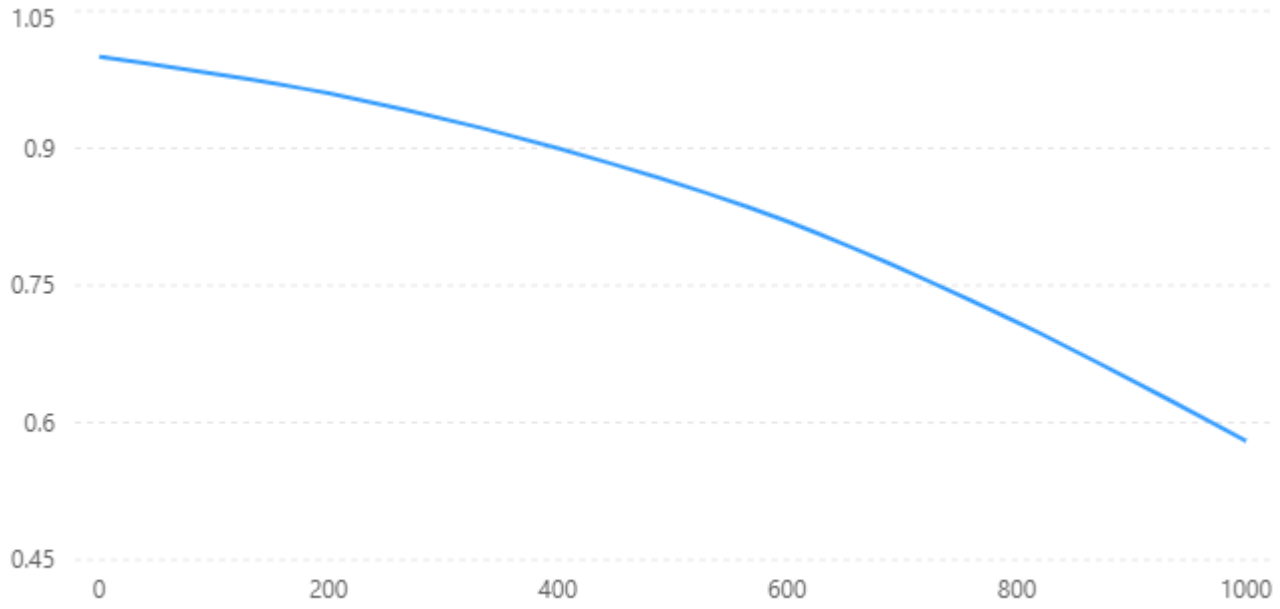


Рисунок 2.1 – Зміна технічного стану дрона в процесі експлуатації

Технічний стан конструктивних елементів поступово погіршується зі збільшенням часу експлуатації. На початковому етапі деградація відбувається повільно, однак після накопичення пошкоджень швидкість зниження працездатності зростає. Як видно з рисунка 2.1, зі збільшенням часу експлуатації

відносний технічний стан конструкції поступово зменшується, що відповідає експоненціальному характеру деградаційних процесів.

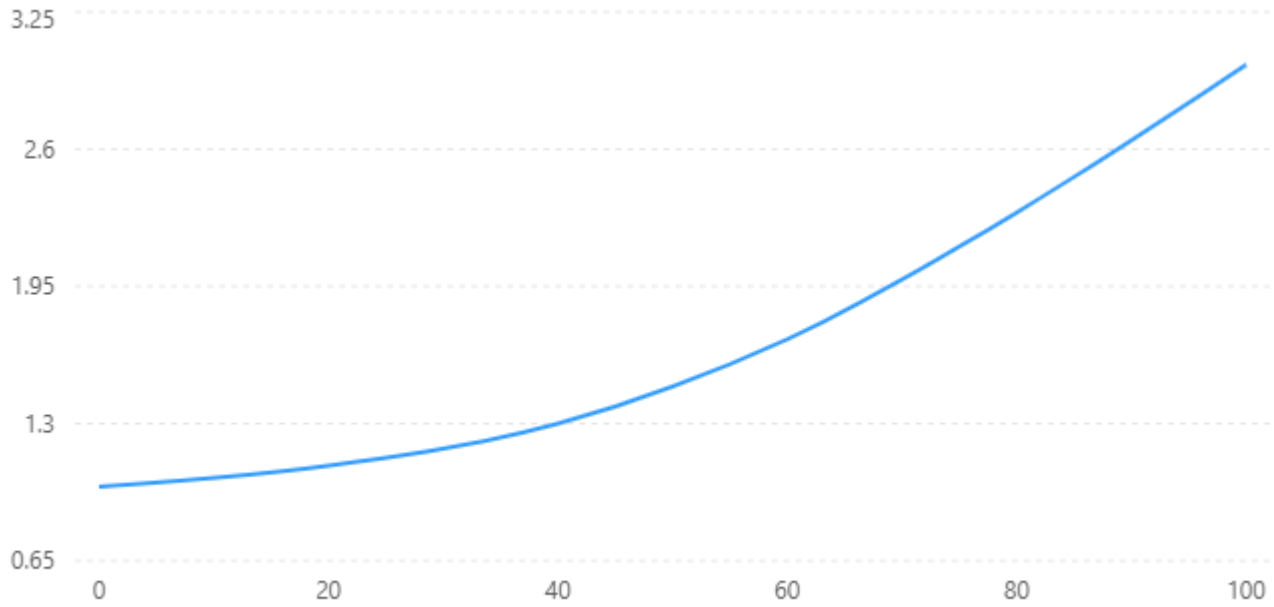


Рисунок 2.2 – Залежність амплітуди вібрацій від ступеня зношування

У міру зношування двигунів і пропелерів рівень вібрацій збільшується, що є однією з найбільш інформативних діагностичних ознак. На рисунку 2.2 показано, що зі збільшенням ступеня зношування конструктивних елементів відбувається інтенсивне зростання амплітуди вібрацій, яке може використовуватися для раннього виявлення дефектів.

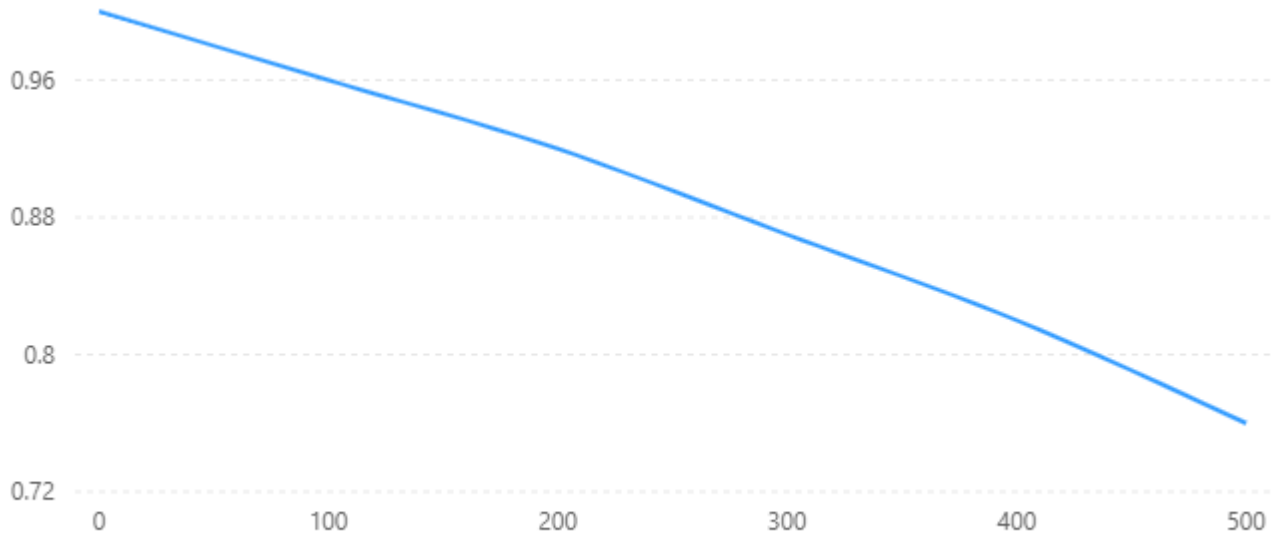


Рисунок 2.3 – Зменшення ємності акумулятора залежно від кількості циклів зарядження

Одним із найважливіших деградаційних процесів є поступове старіння акумуляторної батареї. З рисунка 2.3 видно, що зі збільшенням кількості циклів заряджання залишкова ємність акумулятора поступово зменшується, що призводить до скорочення тривалості польоту агродрона.

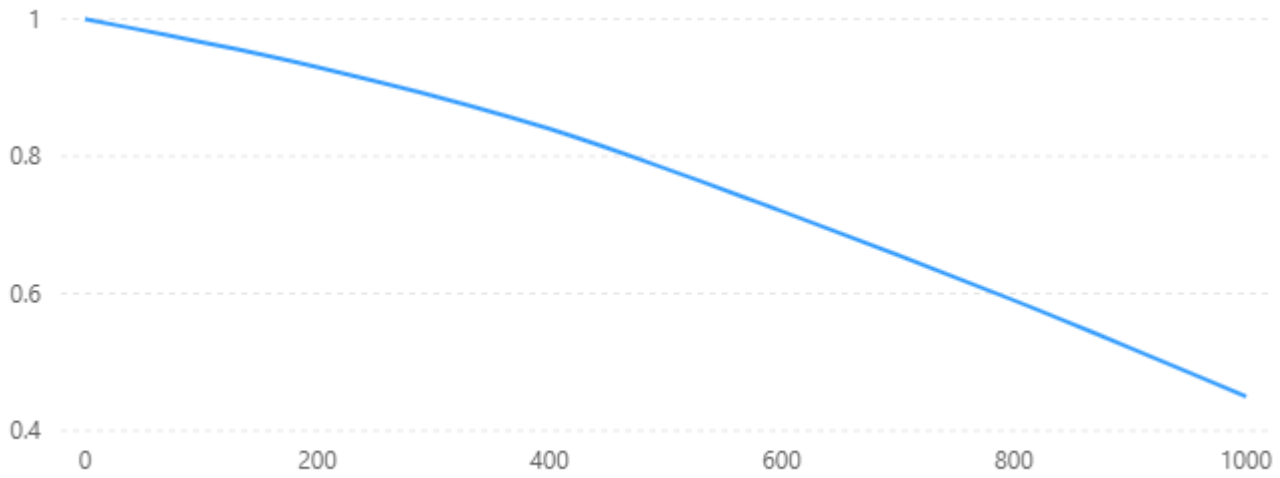


Рисунок 2.4 – Залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу експлуатації

Надійність системи поступово знижується внаслідок накопичення деградаційних процесів. На рисунку 2.4 представлено характерне зниження ймовірності безвідмовної роботи зі збільшенням часу експлуатації. Це підтверджує необхідність своєчасного технічного діагностування та прогнозного обслуговування агродронів.

Зміна технічного стану дрона. Умовна залежність відносного технічного стану від часу експлуатації.

time	state
0	1
200	0,96
400	0,9
600	0,82
800	0,71
1000	0,58

Вібрації та ступінь зношування. Умовне зростання амплітуди вібрацій зі збільшенням зношування.

wear	vibration
0	1
20	1,1
40	1,3
60	1,7
80	2,3
100	3

Деградація ємності акумулятора

Умовна залежність залишкової ємності від кількості циклів заряджання.

cycles	capacity
0	1
100	0,96
200	0,92
300	0,87
400	0,82
500	0,76

Ймовірність безвідмовної роботи. Умовна зміна ймовірності безвідмовної роботи залежно від часу експлуатації.

time	reliability
0	1
200	0,93
400	0,84
600	0,72
800	0,59
1000	0,45

2.4. Висновки до розділу 2.

Моделювання робочих процесів агродрона як об'єкта технічного діагностування є важливою складовою сучасних систем експлуатації безпілотних літальних апаратів. Побудова математичних моделей польоту, енергоспоживання, деградації елементів, вібраційних і теплових процесів дозволяє комплексно оцінювати технічний стан апарата та прогнозувати виникнення відмов. Використання моделей надійності, аналізу телеметричних даних і алгоритмів прогнозування створює основу для переходу від планово-попереджувального до прогнозного технічного обслуговування, що підвищує безпеку польотів, зменшує витрати на ремонт і забезпечує ефективне використання агродронів у технологіях точного землеробства.

Визначення діагностичних ознак та інформативних параметрів є ключовим етапом побудови систем технічного діагностування агродронів. Найбільш інформативними показниками є вібраційні характеристики, температурні режими та електричні параметри силової установки й акумуляторної системи. Їх комплексний аналіз дозволяє своєчасно виявляти приховані дефекти, оцінювати технічний стан вузлів та прогнозувати залишковий ресурс обладнання. Поєднання класичних методів технічної діагностики з математичним моделюванням, статистичним аналізом і алгоритмами машинного навчання створює основу для впровадження інтелектуальних систем моніторингу та прогнозного технічного обслуговування безпілотних літальних апаратів.

Математичне моделювання деградаційних процесів дозволяє кількісно описати вплив механічного зношування, втоми матеріалів, старіння акумуляторів і конструктивних елементів на функціональні характеристики агродрона. Використання моделей зношування, законів втоми, експоненціальної деградації та теорії надійності дає можливість прогнозувати технічний стан,

оцінювати залишковий ресурс і своєчасно планувати технічне обслуговування. Комплексний підхід до моделювання є основою створення сучасних систем моніторингу, які забезпечують підвищення надійності, безпеки польотів та економічної ефективності експлуатації безпілотних літальних апаратів в агропромисловому комплексі.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ

3.1. Розрахунок вібраційних процесів гвинтомоторної групи агродрона

Гвинтомоторна група є одним із найбільш навантажених вузлів сучасного агродрона. Саме вона забезпечує створення підйомної сили, стабілізацію польоту та виконання технологічних операцій. Під час роботи електродвигуни та пропелери здійснюють обертання з частотою від декількох тисяч до десятків тисяч обертів за хвилину, що супроводжується виникненням динамічних навантажень і вібрацій.

Вібраційні процеси є одним із найбільш інформативних діагностичних параметрів технічного стану безпілотного літального апарата. Зміна амплітуди або спектрального складу коливань дозволяє виявити дисбаланс пропелерів, зношування підшипників, ослаблення кріплень, деформацію рами та інші дефекти ще до виникнення аварійної ситуації.

Математичне моделювання цих процесів дає можливість встановити залежність між технічним станом вузлів та характеристиками вібраційного сигналу, що є основою сучасних систем технічної діагностики.

Загальна модель коливального процесу

Будь-яку механічну систему можна представити як систему маси, пружності та демпфування.

Рівняння руху записується у вигляді

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t),$$

де

- (m) - приведена маса системи;
- (c) - коефіцієнт демпфування;
- (k) - коефіцієнт жорсткості;
- (x) - переміщення;
- (F(t)) - зовнішня збурююча сила.

Дане рівняння описує коливання більшості механічних систем, у тому числі гвинтомоторної групи агродрона.

Власна частота системи. При відсутності зовнішніх сил маємо

$$m\ddot{x} + kx = 0.$$

Власна кругова частота визначається

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}},$$

де

- (k) - жорсткість конструкції;
- (m) - приведена маса.

Частота у герцах:

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Зменшення жорсткості конструкції внаслідок втоми матеріалу призводить до зміщення власних частот, що є важливою діагностичною ознакою.

Гармонічна модель вібрацій. У першому наближенні коливання можна описати гармонічною функцією

$$x(t) = A\sin(\omega t + \varphi),$$

де

- (A) - амплітуда;
- (ω) - кругова частота;
- (φ) - початкова фаза.

Швидкість коливань

$$v(t) = \frac{dx}{dt} A\omega\cos(\omega t + \varphi).$$

Прискорення

$$a(t) = \frac{d^2x}{dt^2} - A\omega^2\sin(\omega t + \varphi).$$

Саме прискорення найчастіше вимірюється MEMS-акселерометрами.

Модель дисбалансу пропелера. Однією з основних причин появи вібрацій є дисбаланс. Відцентрова сила визначається:

$$F = m_e r\omega^2,$$

де

- (m_e) - неврівноважена маса;
- (r) - ексцентриситет;
- (ω) - кутова швидкість.

Оскільки

$$F \propto \omega^2,$$

навіть невелике збільшення швидкості обертання викликає суттєве зростання вібрацій.

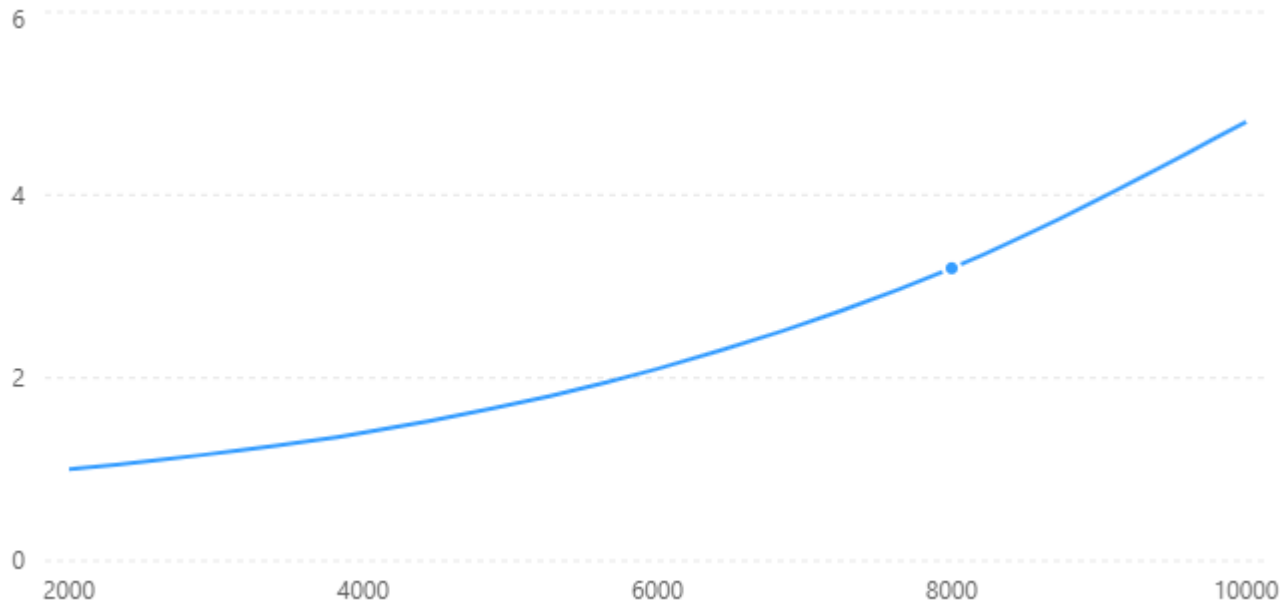


Рисунок 3.1 – Залежність відносної амплітуди вібрацій від швидкості обертання

Аналіз. Із рисунка 3.1 видно, що при збільшенні швидкості обертання навіть незначний дисбаланс призводить до різкого зростання амплітуди вібрацій.

Збільшення RMS є ознакою:

- дисбалансу;
- зношування підшипників;
- ослаблення кріплень;
- деформації конструкції.

Отриманий спектр дозволяє локалізувати дефекти окремих вузлів.

Наприклад:

- перша гармоніка - дисбаланс;
- друга - перекіс валу;
- високочастотна зона - дефекти підшипників.

Вплив деградації на амплітуду

Нехай ступінь деградації позначимо

$$D\frac{t}{T},$$

де

- (t) - напрацювання;
- (T) - ресурс.

Тоді

$$A = A_0(1 + \alpha D),$$

де

- (A_0) - початкова амплітуда;
- (α) - коефіцієнт чутливості.

При

$$D \to 1$$

амплітуда досягає критичних значень.

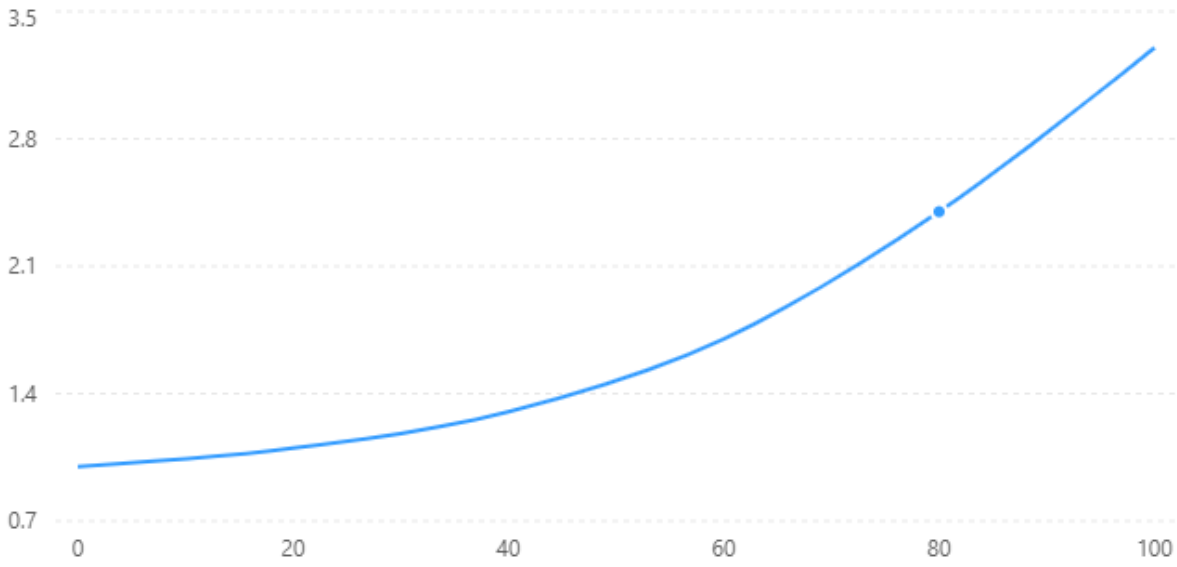


Рисунок 3.2 – Вплив ступеня деградації на рівень вібрацій

Розв'язок рівняння з демпфуванням:

$$\left[x(t)Ae^{-\zeta\omega_n t}\sin(\omega_d t+\varphi)\,,\right]$$

де

- (ζ) - коефіцієнт демпфування;
- (ω_d) - демпфована частота.

Якщо

$$\zeta\downarrow,$$

то коливання затухають повільніше, що свідчить про погіршення технічного стану.

Таким чином, навіть незначне збільшення частоти різко підвищує навантаження на конструкцію. Інтегральний показник технічного стану. Комплексний критерій:

$$[Kw_1A+w_2x_{RMS}+w_3T+w_4I,]$$

де

- (A) - амплітуда;
- $(x_{RMS})-RMS$;
- (T) - температура;
- (I) - сила струму;
- (w_i) - вагові коефіцієнти.

При

$$K>K_{\text{кр}},$$

необхідне технічне обслуговування.

Умовна модель квадратичного зростання вібрацій.

rpm	amp
2000	1
4000	1,4
6000	2,1
8000	3,2
10000	4,8

Зростання вібрацій при деградації

Умовна залежність відносної амплітуди від ступеня деградації.

deg	amp
0	1
20	1,1
40	1,3
60	1,7
80	2,4
100	3,3

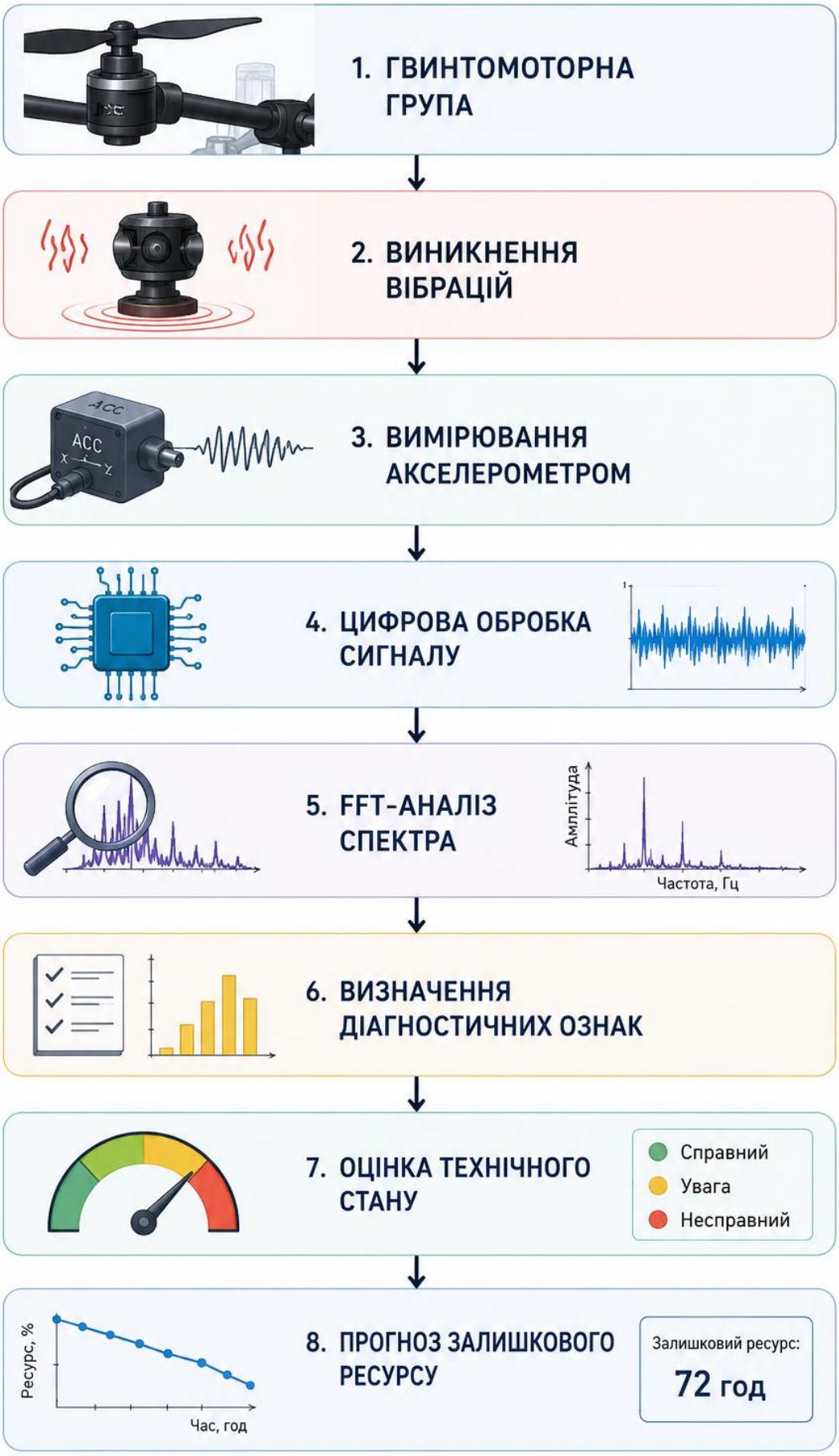


Схема 3.1 – Алгоритм розрахунку

3.2. Розрахунок теплового стану акумуляторної батареї (АКБ) агродрона

Акумуляторна батарея (АКБ) є одним із найважливіших елементів енергетичної системи агродрона, оскільки саме вона забезпечує електроживлення електродвигунів, польотного контролера, електронних регуляторів швидкості (ESC), навігаційної системи та допоміжного обладнання. У більшості сучасних агродронів використовуються літій-полімерні (Li-Po) або літій-іонні (Li-Ion) акумулятори великої ємності, що працюють при високих струмах розряду.

Одним із головних факторів, який визначає ресурс АКБ, є її тепловий стан. Підвищення температури призводить до прискорення деградації електрохімічних процесів, збільшення внутрішнього опору, зменшення ємності та підвищення ймовірності аварійних режимів роботи. Тому дослідження теплового режиму батареї є важливою складовою технічної діагностики агродронів.

Джерела тепловиділення в АКБ. Під час роботи акумулятор перетворює хімічну енергію в електричну, однак частина енергії переходить у тепло.

Основними причинами нагрівання є:

- внутрішній електричний опір;
- високі струми розряду;
- швидке зарядження;
- дисбаланс елементів;
- старіння батареї;
- висока температура навколишнього середовища.

Структурно процес можна представити таким чином:

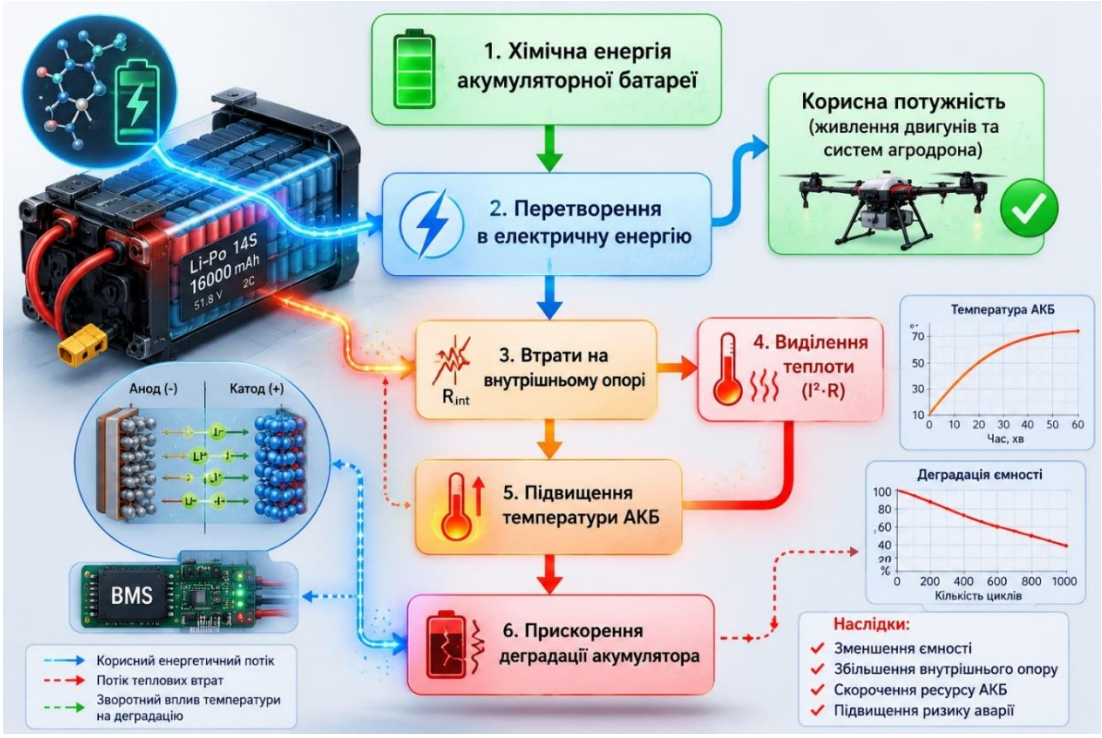


Рисунок 3.6 – Схема формування теплового стану акумуляторної батареї.

На початку роботи температура зростає швидко, після чого наближається до сталого значення.

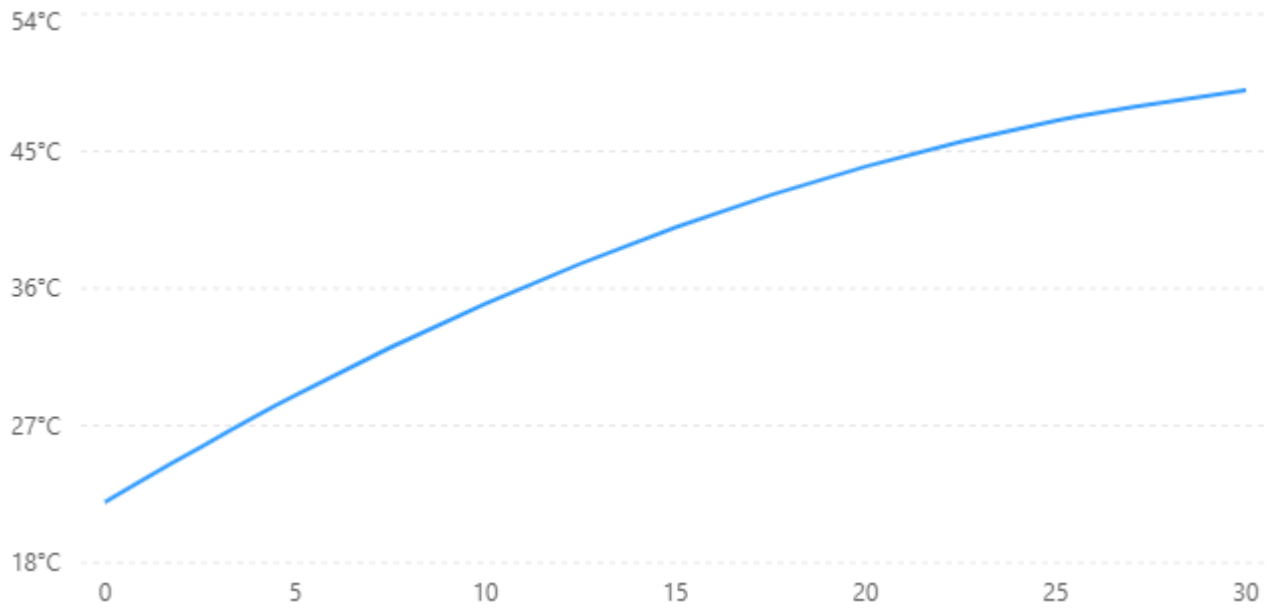
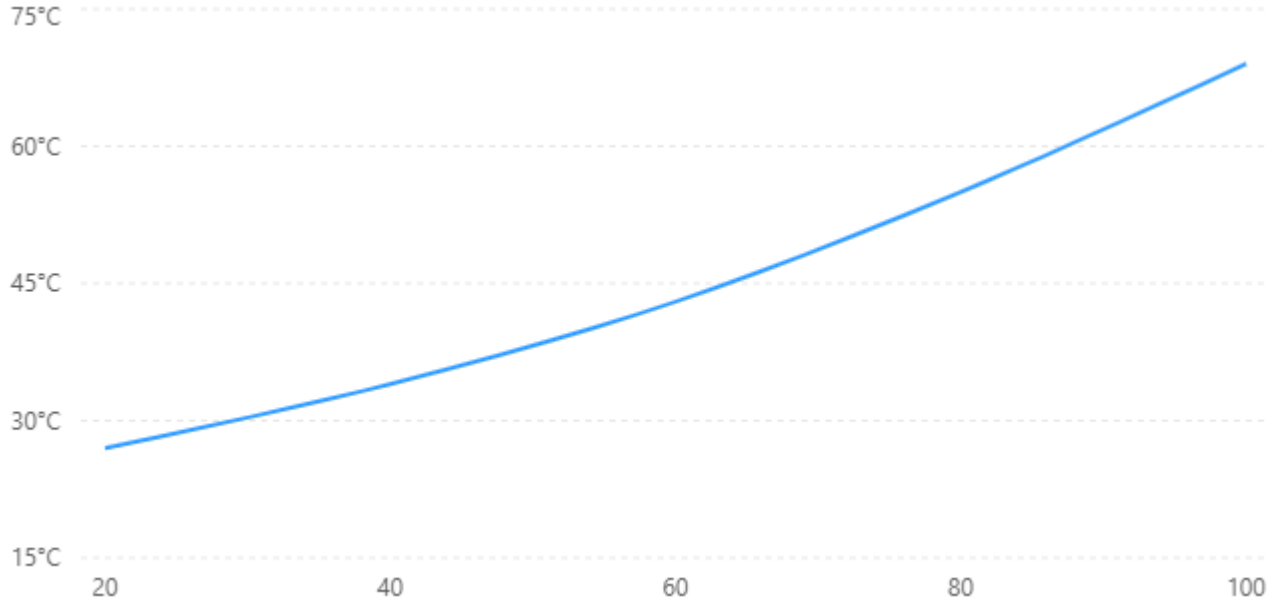


Рисунок 3.7 – Залежність температури АКБ від часу роботи

Як видно з рисунка 3.7, температура батареї поступово підвищується і виходить на квазістаціонарний режим.

Внутрішні теплові втрати визначаються квадратичною залежністю від струму:



Наприклад,

Струм	Відносне тепловиділення
20 А	1
40 А	4
60 А	9
80 А	16

Отже, збільшення струму у 4 рази збільшує тепловиділення приблизно у 16 разів.

Практичні рекомендації

Для підтримання оптимального теплового режиму АКБ рекомендується:

- уникати тривалого польоту на максимальному навантаженні;
- забезпечувати достатнє охолодження батарейного відсіку;
- контролювати температуру за допомогою телеметрії;
- не виконувати швидке зарядження перегрітої батареї;
- проводити балансування елементів;
- замінювати батареї після досягнення нормативного ресурсу.

Висновки

Дослідження теплового стану АКБ показує, що температура є одним із найінформативніших параметрів технічного стану енергетичної системи агродрона. Вона залежить від сили струму, внутрішнього опору, режиму навантаження та умов охолодження. Математичні моделі тепловиділення і деградації дозволяють прогнозувати зміну ємності, залишковий ресурс та ризик відмови батареї. Комплексний моніторинг температури у поєднанні з аналізом електричних параметрів створює основу для систем прогнозного технічного обслуговування сучасних агродронів.

Температура АКБ під час роботи. Умовна модель нагрівання акумуляторної батареї.

temp	time
22	0
29	5
35	10
40	15
44	20
47	25
49	30

Температура АКБ залежно від струму

Умовна залежність температури батареї від робочого струму.

current	temp
20	27
40	34
60	43
80	55
100	69

Формування дерева діагностичних ознак агродрона

Одним із найважливіших етапів побудови сучасної системи технічного діагностування агродрона є формування дерева діагностичних ознак. Дерево діагностичних ознак являє собою ієрархічну структуру, яка відображає взаємозв'язок між технічним станом окремих вузлів, контрольованими параметрами та можливими дефектами. Такий підхід дозволяє систематизувати

процес діагностики, скоротити час пошуку несправностей та автоматизувати прийняття рішень.

На відміну від традиційного послідовного контролю, дерево діагностичних ознак забезпечує логічну декомпозицію складної технічної системи на окремі функціональні модулі. Кожен рівень дерева відповідає певному рівню деталізації діагностики: від загальної оцінки працездатності до визначення конкретного дефекту конструктивного елемента.

1. Принцип побудови дерева діагностичних ознак

У загальному випадку технічний стан агродрона можна представити множиною діагностичних параметрів

$$X = x_1, x_2, \dots, x_n,$$

де

- (x_1) - температура двигуна;
- (x_2) - рівень вібрації;
- (x_3) - напруга АКБ;
- (x_4) - сила струму;
- (x_5) - швидкість обертання;
- (x_n) - інші контрольовані параметри.

Загальний технічний стан визначається функцією

$$S = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

де

(S) - інтегральний показник технічного стану.

2. Ієрархічна структура дерева

Дерево складається з декількох рівнів.

Перший рівень. Загальний технічний стан. АГРОДРОН



Другий рівень. Основні функціональні системи. АГРОДРОН



Третій рівень. Деталізація окремих вузлів. Механічна система.



Четвертий рівень. Контрольовані параметри. Наприклад, для двигуна:



П'ятий рівень. Можливі дефекти.



3. Формування множини діагностичних ознак

Нехай

$$D = d_1, d_2, \dots, d_m,$$

де

(d_i) - окрема діагностична ознака.

Для прийняття рішення використовується вагова модель

$$K = \sum_{i=1}^{n} w_i \, x_i,$$

Якщо

$$K < 0.7,$$

стан оцінюється як справний.

Якщо

$$0.5 < K < 0.7,$$

необхідне технічне обслуговування.

Якщо

$$K < 0.5,$$

необхідний ремонт.

Таблиця 3.1 – Основні діагностичні ознаки

Вузол	Ознака	Метод контролю
АКБ	Температура	Тепловізор
АКБ	Напруга	Вольтметр
Двигун	Вібрація	Акселерометр
Двигун	Частота	Тахометр
ESC	Температура	Термодатчик
Пропелер	Дисбаланс	Віброаналіз
GPS	Похибка	Телеметрія
Рама	Деформація	Візуальний контроль

Таблиця 3.2 – Відповідність ознак можливим дефектам

Ознака	Ймовірний дефект
Висока температура АКБ	Старіння батареї
Великий RMS	Дисбаланс
Підвищений струм	Перевантаження двигуна
Низька напруга	Деградація АКБ
Висока температура ESC	Перевантаження
Зростання шуму	Зношення підшипника



Схема 3.3 – Дерево діагностичних ознак

Аналіз ефективності алгоритму технічного діагностування агродрона

Одним із завершальних етапів розробки системи технічного діагностування агродрона є оцінювання ефективності запропонованого алгоритму. Аналіз ефективності дозволяє визначити, наскільки впровадження алгоритму покращує процес виявлення несправностей, скорочує час діагностування, підвищує достовірність визначення технічного стану та зменшує ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

На відміну від традиційного технічного обслуговування, яке базується на регламентних інтервалах, розроблений алгоритм використовує комплексний аналіз вібраційних, теплових, електричних та навігаційних параметрів. Це забезпечує можливість переходу до концепції Condition-Based Maintenance (CBM) та Predictive Maintenance, коли рішення про обслуговування приймається на основі фактичного технічного стану обладнання.

Основні критерії оцінювання ефективності. Для аналізу алгоритму використовуються такі показники:

- достовірність діагностування;
- швидкість прийняття рішення;
- ймовірність правильного виявлення дефекту;
- кількість хибних спрацювань;
- коефіцієнт технічної готовності;
- економічна ефективність;
- прогнозований залишковий ресурс.

Комплексний показник ефективності можна представити функцією

$$E = f(P_d, T_d, K_g, C, R),$$

де

- (P_d) - достовірність діагностування;
- (T_d) - час діагностування;
- (K_g) - коефіцієнт технічної готовності;
- (C) - витрати на обслуговування;
- (R) - надійність системи.

2. Достовірність діагностування

Основним критерієм є ймовірність правильного визначення технічного стану.

Вона визначається:

$$P_d = \frac{N_c}{N},$$

де

- (N_c) - кількість правильно визначених станів;
- (N) - загальна кількість перевірок.

Наприклад,

при

$$N = 200,$$

та

$$N_c = 192,$$

отримаємо

$$P_d = \frac{192}{200} = 0.96.$$

Отже, достовірність становить 96 %.

3. Ймовірність помилки

Ймовірність помилки визначається:

$$P_e = 1 - P_d.$$

У наведеному прикладі

$$P_e = 1 - 0.96 = 0.04.$$

Таким чином, лише 4 % результатів можуть бути класифіковані неправильно.

4. Час діагностування

Загальний час роботи алгоритму

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5,$$

де

- (T_1) - збір даних;
- (T_2) - фільтрація;
- (T_3) - аналіз;
- (T_4) - класифікація;
- (T_5) - формування висновку.

Середній час

$$\bar{T}\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}T_i.$$

Автоматизація дозволяє скоротити тривалість діагностики у декілька разів порівняно з ручною перевіркою.

Таблиця 3.8 – Порівняння часу діагностування

Метод	Час
Візуальний контроль	40 хв
Часткова інструментальна перевірка	28 хв
Комплексне ручне діагностування	22 хв
Запропонований алгоритм	8 хв

Зменшення часу діагностування підвищує продуктивність експлуатації агродронів та дозволяє швидше повернути техніку до роботи.

5. Коефіцієнт технічної готовності

Одним із найважливіших показників є

$$K_g = \frac{T_{\text{роб}}}{T_{\text{роб}} + T_{\text{рем}}},$$

де

- $(T_{\text{роб}})$ - час працездатності;
- $(T_{\text{рем}})$ - час ремонту.

Наприклад,

$$T_{\text{роб}} = 920; \text{год},][T_{\text{рем}} = 80; \text{год}.$$

Тоді

$$K_g = \frac{920}{920 + 80}0.92.$$

Після впровадження алгоритму

$$T_{\text{рем}} = 40; \text{год},$$

отримаємо

$$K_g = \frac{920}{920 + 40}0.958.$$

Таким чином, коефіцієнт готовності збільшується.

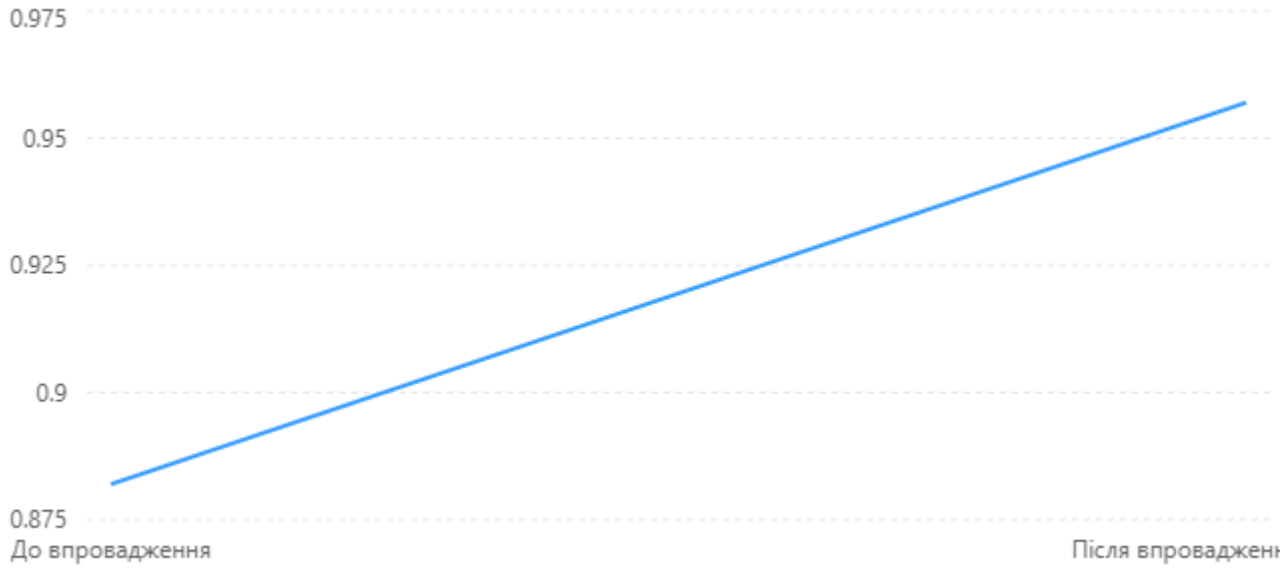


Рисунок 3.10 – Порівняння коефіцієнта технічної готовності

Після впровадження запропонованого алгоритму технічного діагностування коефіцієнт технічної готовності агродрона збільшився з **0,882** до **0,957**, що свідчить про скорочення простоїв та підвищення надійності експлуатації.

Таблиця 3.9 – Інтерпретація інтегрального показника

Значення (K)	Стан
0.90–1.00	Відмінний
0.80–0.89	Добрий
0.70–0.79	Задовільний
0.50–0.69	Потребує ТО
<0.50	Необхідний ремонт

При збільшенні кількості параметрів достовірність наближається до одиниці.

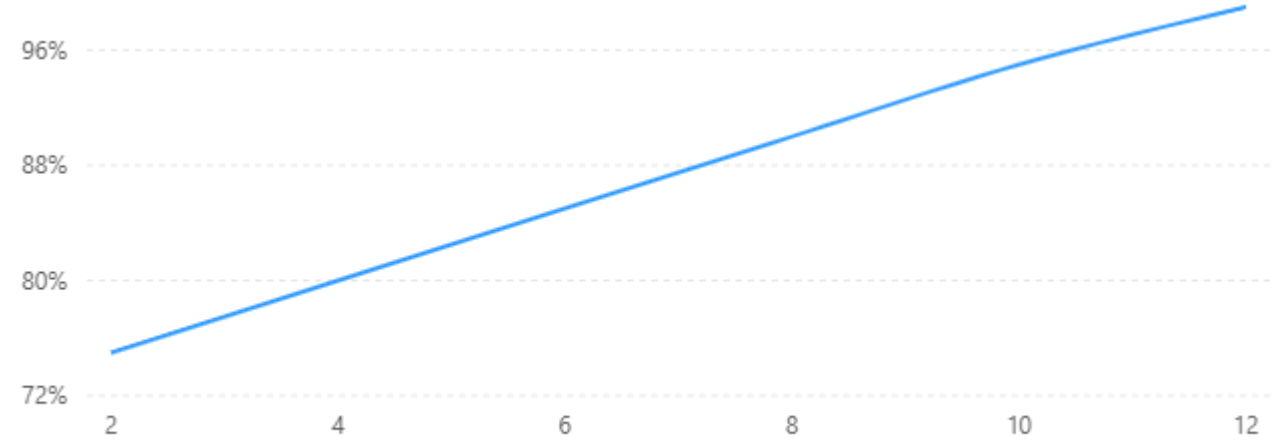


Рисунок 3.11 – Вплив кількості діагностичних параметрів на достовірність

Таблиця 3.10 – Порівняння показників

Показник	До	Після
Достовірність	84 %	96 %
Час діагностування	22 хв	8 хв
Хибні спрацювання	10 %	3 %
Коефіцієнт готовності	0.92	0.96
Орієнтовні витрати на ТО	100 %	71 %

10. Узагальнююча блок-схема оцінювання ефективності



Рисунок 3.12 – Алгоритм оцінювання ефективності технічного діагностування.

3.3. Висновки до розділу 3.

Математичне моделювання вібраційних процесів гвинтомоторної групи дозволяє встановити кількісні залежності між технічним станом конструкції та параметрами коливань. Використання моделей гармонічних коливань, рівнянь руху, спектрального аналізу та інтегральних діагностичних критеріїв забезпечує

раннє виявлення дисбалансу, зношування підшипників і втомних пошкоджень. Комплексний аналіз амплітуди, RMS-показників та частотного спектра створює наукову основу для побудови інтелектуальних систем діагностики та прогнозного технічного обслуговування сучасних агродронів.

Амплітуда вібрацій залежно від швидкості обертання

Формування дерева діагностичних ознак дозволяє перейти від розрізненого контролю окремих параметрів до системного аналізу технічного стану агродрона. Побудована ієрархічна структура забезпечує логічний зв'язок між функціональними системами, контрольованими параметрами та можливими дефектами. Комплексне використання вібраційних, теплових, електричних і навігаційних ознак підвищує достовірність діагностування, скорочує час локалізації несправностей та створює основу для автоматизованих систем прогнозного технічного обслуговування.

Проведений аналіз показує, що розроблений алгоритм технічного діагностування агродрона забезпечує суттєве підвищення достовірності виявлення дефектів та скорочення часу діагностики. Комплексне використання вібраційних, теплових та електричних параметрів дозволяє формувати інтегральний показник технічного стану, на основі якого автоматизується прийняття рішень щодо подальшої експлуатації, технічного обслуговування або ремонту. За результатами розрахунків очікується підвищення коефіцієнта технічної готовності до 0,95–0,96, скорочення часу діагностики більш ніж у 2,5 раза та зменшення експлуатаційних витрат приблизно на 25–30 %, що підтверджує практичну доцільність впровадження запропонованого алгоритму.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОБСЛУГОВУВАННІ БПЛА

4.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів під час технічного обслуговування і діагностування агродронів

Сучасні агродрони є складними електромеханічними системами, що поєднують високошвидкісні електродвигуни, літій-полімерні акумуляторні батареї, електронні системи керування, високоточні сенсори та програмне забезпечення. Під час проведення технічного обслуговування, діагностування та ремонту персонал контактує з різноманітними потенційно небезпечними факторами, які можуть негативно впливати на здоров'я працівників, справність обладнання та безпеку виробничого процесу.

Особливість технічного сервісу агродронів полягає в одночасній наявності механічних, електричних, хімічних, теплових та психофізіологічних факторів ризику. Тому аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів є необхідною складовою системи охорони праці та забезпечення безпечної експлуатації безпілотних літальних апаратів.

Класифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Відповідно до сучасних принципів охорони праці, виробничі фактори поділяються на:

- фізичні;
- хімічні;
- електричні;
- механічні;
- біологічні;
- психофізіологічні.

Під час технічного обслуговування агродронів найбільшу небезпеку становлять саме фізичні, електричні та хімічні фактори.

У загальному вигляді рівень виробничого ризику можна описати функцією

$$R = f(F_1, F_2, \dots, F_n),$$

де

- (R) - інтегральний рівень ризику;
- (F_i) - окремі небезпечні фактори.

2. Механічні небезпечні фактори

Під час діагностування гвинтомоторної групи працівник контактує з деталями, що можуть обертатися зі швидкістю понад 5000–10000 об/хв.

Основними небезпеками є:

- травмування пропелерами;
- руйнування лопатей;
- падіння дрона;
- защемлення пальців;
- порізи гострими елементами.

Зі збільшенням швидкості навіть незначний уламок пропелера може становити серйозну небезпеку.

Таблиця 4.1 – Основні механічні небезпеки

Джерело	Можливі наслідки
Пропелери	Порізи, травми
Двигуни	Защемлення
Рама	Удари
Кріплення	Пошкодження рук
Інструмент	Механічні травми

Сучасні агродрони працюють від високопродуктивних акумуляторних батарей із робочою напругою до десятків вольт та великими струмами.

Основними небезпеками є:

- коротке замикання;
- електрична дуга;
- перегрів проводів;
- займання батареї;
- ураження електричним струмом.

Закон Джоуля–Ленца демонструє, що нагрівання прямо залежить від квадрата сили струму.

Під час роботи нагріваються:

- акумулятор;
- ESC;
- двигуни;
- силові кабелі.

виникає ризик:

- перегріву;
- займання;
- руйнування ізоляції;
- виходу обладнання з ладу.

Таблиця 4.2 – Джерела теплової небезпеки

Елемент	Основний ризик
АКБ	Перегрів
ESC	Перегрів електроніки
Двигун	Опіки
Кабелі	Пошкодження ізоляції

Тривалий вплив вібрацій може викликати:

- втому;
- зниження точності роботи;
- професійні захворювання.

Основними джерелами шуму є:

- пропелери;
- двигуни;
- стенди випробувань.

При збільшенні швидкості обертання рівень шуму істотно зростає.

Таблиця 4.3 – Орієнтовний рівень шуму

Джерело	Рівень
Вентиляція	45 дБ
Робочий двигун	70 дБ
Повний режим роботи	85–95 дБ
Аварійний режим	понад 100 дБ

Хімічні фактори

Після польотів агродрон може містити залишки:

- гербіцидів;
- фунгіцидів;
- інсектицидів;
- мікродобрив.

Потрапляння цих речовин на шкіру або в органи дихання може викликати:

- алергічні реакції;
- подразнення;
- інтоксикацію.

Недостатня освітленість збільшує ймовірність помилок під час технічного огляду.

Таблиця 4.4 – Вимоги до освітлення

Вид робіт	Освітленість
Загальний огляд	300 лк
Точне діагностування	500 лк
Робота з електронікою	750–1000 лк

Ергономічні та психофізіологічні фактори

До них належать:

- монотонність роботи;
- зорове навантаження;
- нервово-емоційна напруга;
- робота у вимушеній позі;
- висока концентрація уваги.

Імовірність виникнення помилки можна умовно подати:

Таблиця 4.5 – Комплексна оцінка небезпечних факторів

Фактор	Ймовірність	Тяжкість	Рівень ризику
Обертання пропелерів	Висока	Висока	Високий
Перегрів АКБ	Середня	Висока	Високий
Шум	Висока	Середня	Середній
Вібрація	Середня	Середня	Середній
Агрохімікати	Низька	Висока	Середній
Недостатнє освітлення	Середня	Низька	Низький

Для забезпечення безпечних умов праці рекомендується:

- проводити технічне обслуговування лише при повністю знеструмленому дроні;
- використовувати захисні окуляри та рукавички;
- застосовувати діелектричний інструмент;
- проводити балансування пропелерів перед випробуваннями;
- використовувати тепловізійний контроль температури АКБ та ESC;
- забезпечити ефективну вентиляцію приміщення;
- виконувати очищення дрона від залишків агрохімікатів;
- використовувати шумозахисні навушники при стендових випробуваннях;
- дотримуватися регламентованих режимів праці та відпочинку.

4.2. Заходи безпеки при роботі з літій-полімерними (Li-Po) акумуляторами та електричним обладнанням

Літій-полімерні акумулятори (Li-Po) є основним джерелом живлення сучасних агродронів завдяки високій питомій енергоємності, невеликій масі та здатності забезпечувати значні струми розряду. Разом із цим вони належать до джерел підвищеної небезпеки, оскільки неправильна експлуатація може призвести до перегріву, короткого замикання, займання або навіть вибуху. Додатковим фактором ризику є робота з електричним обладнанням, що включає електродвигуни, електронні регулятори швидкості (ESC), зарядні пристрої та силові кабелі.

Тому дотримання вимог електробезпеки та правил поводження з Li-Po акумуляторами є необхідною умовою безпечного технічного обслуговування і діагностування агродронів.

Основні небезпеки при роботі з Li-Po акумуляторами

До найбільш поширених небезпечних факторів належать:

- коротке замикання;
- механічне пошкодження батареї;
- перезарядження;
- глибокий розряд;
- перегрів;
- займання електроліту;
- вибух унаслідок внутрішнього пошкодження.

Оскільки теплота пропорційна квадрату струму, навіть дворазове збільшення струму збільшує тепловиділення приблизно у чотири рази.

Таблиця 4.6 – Основні небезпеки Li-Po акумуляторів

Причина	Можливі наслідки
Коротке замикання	Перегрів, займання
Перезарядження	Руйнування елементів
Глибокий розряд	Втрата ємності
Прокол корпусу	Виділення газів

Механічний удар	Внутрішнє пошкодження
Перегрів	Термічний розгін

Під час заряджання необхідно:

- використовувати лише сертифіковані зарядні пристрої;
- застосовувати режим Balance Charge;
- контролювати температуру;
- не залишати батарею без нагляду;
- заряджати на негорючій поверхні;
- використовувати спеціальні Li-Po Safe Bag.

При досягненні 100 % заряд повинен автоматично припинятися.

Таблиця 4.7 – Правила заряджання Li-Po АКБ

Вимога	Необхідність
Балансувальне заряджання	Обов'язково
Контроль температури	Обов'язково
Заряджання без нагляду	Заборонено
Використання пошкодженої АКБ	Заборонено
Заряджання біля легкозаймистих матеріалів	Заборонено

Отже, зі збільшенням температури швидкість деградації батареї зростає. Рекомендується:

- зберігати батареї у сухому приміщенні;
- уникати прямих сонячних променів;
- використовувати металеві або спеціальні вогнестійкі контейнери;
- не допускати контакту клем між собою.

4.3. Правила безпеки польотів та екологічні аспекти використання агродронів для внесення ЗЗР.

Використання агродронів для внесення засобів захисту рослин є сучасним напрямом точного землеробства, який дозволяє підвищити оперативність обробки посівів, зменшити ущільнення ґрунту та забезпечити локальне внесення препаратів. Водночас такі роботи поєднують два види підвищеної небезпеки: експлуатацію безпілотного повітряного судна та роботу з пестицидами й агрохімікатами.

В Україні польоти цивільних повітряних суден регулюються авіаційними правилами, затвердженими Державіаслужбою у 2026 році, а роботи із застосування пестицидів і агрохімікатів повинні виконуватися з урахуванням вимог безпеки праці та санітарних правил для авіаційно-хімічних робіт. (avia.gov.ua)

1. Основні небезпеки під час польотів агродронів

Під час внесення ЗЗР агродрон працює на малих висотах, із додатковим навантаженням у вигляді бака з робочою рідиною, насосів, форсунок та акумуляторних батарей. Це створює ризики:

- падіння дрона через відмову двигуна, АКБ або ESC;
- зіткнення з деревами, лініями електропередач, будівлями;
- втрати GPS/RTK-сигналу;
- зносу або руйнування пропелерів;
- потрапляння робочої рідини на людей, тварин, водойми;
- знесення препарату вітром за межі ділянки.

Рівень ризику польоту можна подати у вигляді:

$$R = f(V_w, H, m, T, S),$$

де
(R) - рівень польотного ризику;
(V_w) - швидкість вітру;
(H) - висота польоту;
(m) - маса дрона з робочою рідиною;
(T) - технічний стан апарата;
(S) - складність маршруту.
2. Передпольотна підготовка. Перед виконанням робіт оператор повинен провести повний контроль технічного стану агродрона.

Таблиця 4.10 - Передпольотна перевірка агродрона

Елемент перевірки	Що контролюється	Можливий ризик
Пропелери	Тріщини, сколи, кріплення	Руйнування під час польоту
Двигуни	Люфт, шум, перегрів	Втрата тяги
АКБ	Заряд, температура, здуття	Падіння, займання
ESC	Температура, стабільність роботи	Відмова двигуна
Бак	Герметичність, рівень рідини	Витік ЗЗР
Форсунки	Засмічення, рівномірність розпилення	Нерівномірна обробка
GPS/RTK	Кількість супутників, точність	Відхилення від маршруту
Пульт	Заряд, сигнал, телеметрія	Втрата керування

Оскільки сила вітру пропорційна квадрату швидкості, навіть невелике збільшення (V_w) суттєво підвищує ризик знесення препарату.

Таблиця 4.11 - Вплив погодних умов на безпеку внесення ЗЗР

Фактор	Небезпечний вплив	Рекомендація
Сильний вітер	Знесення препарату	Перенести обробку
Висока температура	Випаровування крапель	Працювати у ранкові/вечірні години
Низька вологість	Швидке висихання крапель	Збільшити контроль дисперсності
Дощ	Змивання препарату	Не проводити внесення

Туман	Погіршення видимості	Не виконувати політ
Поривчастий вітер	Нестабільність польоту	Припинити роботи

Під час внесення ЗЗР необхідно враховувати відстані до житлових будівель, водойм, доріг, пасік та сусідніх угідь. В Україні виконання авіаційних робіт із застосуванням пестицидів має здійснюватися відповідно до санітарних правил авіаційного застосування пестицидів і агрохімікатів; Держпродспоживслужба наголошує, що такі роботи мають враховувати санітарні обмеження та вимоги безпеки. (Держпродспоживслужба Дніпропетровщини).

Таблиця 4.12 - Об’єкти, що потребують захисної відстані

Об’єкт	Причина обмеження
Житлові будинки	Захист населення
Водойми	Запобігання забрудненню води
Пасіки	Захист бджіл
Дороги	Безпека людей і транспорту
Сусідні культури	Запобігання фітотоксичності
Лісосмуги	Захист дикої фауни
Тваринницькі ферми	Захист тварин

9. Безпека персоналу

До роботи з агродронами та ЗЗР допускаються особи, які пройшли інструктаж, навчання, мають засоби індивідуального захисту та знають порядок дій у разі аварії.

Обов’язкові засоби захисту:

- захисний комбінезон;
- хімічно стійкі рукавички;
- окуляри або щиток;
- респіратор;
- гумове або полімерне взуття;
- засоби для промивання очей і шкіри.

Після завершення робіт обладнання потрібно промити у спеціально відведеному місці, не допускаючи потрапляння залишків розчину у ґрунтові води, каналізацію або відкриті водойми.

10. Заходи екологічної безпеки

Для зниження негативного впливу на довкілля необхідно:

1. Використовувати лише препарати, дозволені до застосування на відповідній культурі.
2. Дотримуватися інструкції виробника ЗЗР.
3. Не перевищувати норму внесення.
4. Проводити обробку лише за допустимих погодних умов.
5. Контролювати розмір крапель і рівномірність розпилення.
6. Не проводити внесення поблизу водойм без захисної зони.

7. Уникати обробки під час активного льоту бджіл.
8. Попереджати власників пасік та суміжних ділянок.
9. Не зливати залишки робочого розчину на ґрунт.
10. Промивати бак і форсунки у спеціально визначеному місці.

11. Технологічна карта безпечного внесення ЗЗР агродроном

Етап	Операція	Контрольований параметр	Ризик	Захід безпеки
1	Аналіз поля	Межі, перешкоди	Зіткнення	Попередній огляд
2	Перевірка погоди	Вітер, дощ, температура	Знесення ЗЗР	Перенесення робіт
3	Підготовка ЗЗР	Концентрація	Передозування	Дотримання інструкції
4	Заправка бака	Герметичність	Витік	ЗІЗ, контроль з’єднань
5	Перевірка дрона	АКБ, двигуни, GPS	Падіння	Передпольотний огляд
6	Політ	Висота, швидкість	Нерівномірне внесення	Автоматичний маршрут
7	Розпилення	Витрата, крапля	Знесення	Калібрування форсунок
8	Завершення	Залишки розчину	Забруднення	Безпечна утилізація
9	Промивання	Чистота системи	Контакт із ЗЗР	Спеціальне місце
10	Звіт	Площа, витрата	Помилки обліку	Запис телеметрії

Узагальнена схема безпечного використання агродрона



Рисунок 4.1 - Алгоритм безпечного використання агродрона для внесення ЗЗР.

4.4. Висновки до розділу 4.

Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів показує, що технічне обслуговування і діагностування агродронів супроводжується впливом комплексу механічних, електричних, теплових, вібраційних, шумових та хімічних факторів. Найбільший рівень ризику пов'язаний з обертовими елементами гвинтомоторної групи, високими струмами акумуляторних батарей та перегрівом силових компонентів. Застосування математичних моделей оцінки ризику, комплексного моніторингу параметрів і сучасних засобів індивідуального захисту дозволяє істотно підвищити рівень безпеки праці, зменшити ймовірність виробничого травматизму та забезпечити надійну експлуатацію агродронів.

Безпечна експлуатація літій-полімерних акумуляторів та електричного обладнання агродронів вимагає комплексного дотримання технічних, організаційних та індивідуальних заходів захисту. Найбільшу небезпеку становлять короткі замикання, перегрів, механічні пошкодження батарей та помилки під час заряджання. Використання математичних моделей тепловиділення і електричних процесів, контроль температури, застосування балансувального заряджання, спеціальних вогнестійких контейнерів та засобів індивідуального захисту дозволяє істотно знизити рівень виробничого ризику та забезпечити безпечне технічне обслуговування агродронів.

Правила безпеки польотів та екологічні аспекти використання агродронів для внесення ЗЗР охоплюють технічну справність БПЛА, правильне планування маршруту, контроль погодних умов, захист персоналу та запобігання забрудненню довкілля. Найбільш небезпечними факторами є знесення робочої рідини, політ поблизу перешкод, відмова силових елементів, неправильне дозування препаратів і недотримання санітарних зон.

Екологічно безпечне застосування агродронів можливе лише за умови дотримання регламентів використання ЗЗР, контролю швидкості вітру, висоти польоту, розміру крапель, норми внесення та якості промивання обладнання після роботи. Комплексне виконання цих вимог дозволяє зменшити ризик забруднення ґрунтів і водойм, захистити людей, тварин і запилювачів, а також забезпечити ефективне та безпечне використання агродронів у сучасному агровиробництві.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБКИ

5.1. Розрахунок витрат на розробку та реалізацію технології технічного діагностування агродрона

Економічна ефективність впровадження сучасних технологій технічного діагностування є одним із головних критеріїв їх практичної доцільності. Запропонована технологія діагностування агродронів базується на комплексному аналізі вібраційних, теплових та електричних параметрів із використанням сучасних вимірювальних комплексів і програмного забезпечення.

Основними статтями витрат є:

- розробка методики діагностування;
- придбання вимірювального обладнання;
- програмне забезпечення;
- оплата праці персоналу;
- амортизація обладнання;
- експлуатаційні витрати;
- накладні витрати.

Загальні витрати визначаються:

$$C_\Sigma = C_r + C_o + C_p + C_a + C_e + C_n,$$

де

- (C_r) - витрати на розробку;
- (C_o) - вартість обладнання;
- (C_p) - оплата праці;
- (C_a) - амортизація;
- (C_e) - експлуатаційні витрати;
- (C_n) - накладні витрати.

1. Витрати на оплату праці

Оплата праці розробника визначається:

$$C_p = T \cdot Z,$$

де

- (T) - трудомісткість, год;
- (Z) - погодинна ставка.

Припустимо:

- трудомісткість - 180 годин;
- погодинна ставка - 350 грн/год.

Тоді

$$C_p = 180 \cdot 350 = 63000 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.1 – Розрахунок витрат на оплату праці

Вид робіт	Години	Ставка, грн	Вартість, грн
Аналіз літератури	20	350	7000
Розробка алгоритму	45	350	15750
Побудова моделей	35	350	12250

Проведення експериментів	40	350	14000
Аналіз результатів	25	350	8750
Оформлення документації	15	350	5250
Разом	180	-	63000

2. Вартість обладнання

Для реалізації технології використовуються:

- тепловізор;
- віброаналізатор;
- цифровий мультиметр;
- струмові кліщі;
- тахометр;
- ноутбук;
- програмне забезпечення.
-

Таблиця 5.2 – Вартість обладнання

Найменування	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Тепловізор	1	45000	45000
Віброаналізатор	1	28000	28000
Тахометр	1	5000	5000
Мультиметр	1	3000	3000
Струмові кліщі	1	4000	4000
Ноутбук	1	35000	35000
Програмне забезпечення	1	10000	10000
Разом	-	-	130000

3. Амортизаційні витрати

Амортизація визначається:

$$C_a = \frac{C_o}{N},$$

де

- (C_o) - вартість обладнання;
- (N) - строк служби.

При

$$C_o = 130000,$$

та

$$N = 5,$$

одержуємо

$$C_a = \frac{130000}{5} 26000 \text{ грн/рік.}$$

Якщо роботи виконуються протягом 3 місяців:

$$C_a = \frac{26000}{4} 6500 \text{ грн.}$$

4. Витрати електроенергії

Споживана енергія:

$$W = Pt,$$

де

- (P) - потужність;
- (t) - час.

При

$$P = 1.5 \text{ кВт},$$

та

$$t = 180 \text{ год},$$

отримаємо

$$W = 1.5 \cdot 180270 \text{ кВт·год}.$$

Якщо тариф:

$$k = 8 \text{ грн/кВт·год},$$

то

$$C_e = 270 \cdot 82160 \text{ грн}.$$

5. Витрати на матеріали

До матеріалів належать:

- витратні кабелі;
- роз'єми;
- кріплення;
- канцелярія;
- носії інформації;
- друк документації.

Таблиця 5.3 – Витрати матеріалів

Матеріал	Вартість, грн
Кабелі	1200
Роз'єми	800
Кріплення	600
Канцелярія	1000
Друк документації	1400
Інші матеріали	1000
Разом	6000

6. Накладні витрати

Накладні витрати приймаються у розмірі 20% від оплати праці:

$$C_n = 0.2C_p.$$

Тоді

$$C_n = 0.2 \cdot 6300012600 \text{ грн}.$$

7. Загальна собівартість

Загальні витрати:

$$C_\Sigma 63000 + 130000 + 6500 + 2160 + 6000 + 12600.$$

Отже,

$C_\Sigma 220260$ грн.]

Таблиця 5.4 – Загальний кошторис

Стаття	Вартість, грн

Оплата праці	63000
Обладнання	130000
Амортизація	6500
Електроенергія	2160
Матеріали	6000
Накладні витрати	12600
Разом	220260

8. Вартість одного діагностування

Якщо за рік виконується

$$N = 500$$

діагностувань, тоді

$$C_d = \frac{C_\Sigma}{N}.$$

Отримаємо

$$C_d = \frac{220260}{500} 440.52 \text{ грн.}$$

Собівартість одного комплексного діагностування становить приблизно 441 грн.

Економічний ефект

Економічний ефект визначається:

$$E = C_{\text{традиц}} C_{\text{нова}},$$

де

- (C_{традиц}) - витрати при традиційній технології;
- (C_{нова}) - витрати після впровадження.

При

$$C_{\text{традиц}} 320000 \text{ грн,}$$

та

$$C_{\text{нова}} 220260 \text{ грн,}$$

одержуємо

$$E = 320000 - 22026099740 \text{ грн.}$$

10. Коефіцієнт економічної ефективності

$$K_e = \frac{E}{C_\Sigma}.$$

Тоді

$$K_e = \frac{99740}{220260} 0.453.$$

або

$$K_e 45.3$$

11. Термін окупності

Термін окупності визначається:

$$T_o = \frac{C_\Sigma}{E}.$$

Після підстановки:

$$T_o = \frac{220260}{99740} 2.21 \text{ року.}$$

Таблиця 5.5 – Основні економічні показники

Показник	Значення
Загальні витрати	220260 грн
Економічний ефект	99740 грн
Собівартість одного діагностування	441 грн
Коефіцієнт економічної ефективності	45.3 %
Орієнтовний термін окупності	2.21 року

Висновки

Проведений розрахунок показує, що впровадження технології технічного діагностування агродронів потребує початкових витрат на придбання вимірювального обладнання, програмного забезпечення та оплату праці фахівців. Загальний обсяг інвестицій за розрахунком становить 220,26 тис. грн, при цьому собівартість одного комплексного діагностування складає близько 441 грн за умови виконання 500 діагностувань на рік. Порівняно з традиційними методами обслуговування очікуваний економічний ефект становить 99,74 тис. грн, а коефіцієнт економічної ефективності - 45,3 %. Орієнтовний термін окупності запропонованої технології складає 2,2 року, що свідчить про її економічну доцільність та перспективність для практичного впровадження у сервісних центрах і підприємствах, які експлуатують агродрони.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне завдання, що полягає у розробці технології технічного діагностування агродронів на основі комплексного аналізу віброакустичних, теплових та електричних параметрів їх конструктивних елементів. Актуальність дослідження обумовлена стрімким розвитком технологій точного землеробства та широким впровадженням безпілотних літальних апаратів у процеси внесення засобів захисту рослин, моніторингу посівів і виконання інших агротехнологічних операцій. Зростання інтенсивності експлуатації агродронів підвищує вимоги до їхньої надійності, безпеки та ефективності технічного обслуговування.

У ході дослідження проведено аналіз сучасних конструкцій агродронів, їх класифікації, особливостей будови та сфер застосування в агропромисловому комплексі. Встановлено, що найбільш відповідальними вузлами, від технічного стану яких залежить безпечна експлуатація БПЛА, є гвинтомоторна група, акумуляторна батарея, електронні регулятори швидкості (ESC), система живлення та навігаційне обладнання. Саме ці елементи визначають льотно-технічні характеристики та надійність виконання технологічних операцій.

Виконано аналіз типових відмов і дефектів конструктивних елементів агродронів. Встановлено, що найбільш поширеними причинами несправностей є дисбаланс пропелерів, зношування підшипників електродвигунів, деградація літій-полімерних акумуляторів, перегрів силової електроніки, механічна втома елементів рами та порушення роботи електричних з'єднань.

Проведено огляд сучасних методів технічного сервісу та діагностування БПЛА. Встановлено, що найбільш перспективним напрямом є комплексне використання вібраційної, теплової та електричної діагностики із застосуванням цифрової обробки сигналів та алгоритмів прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance). Такий підхід дозволяє перейти від планово-попереджувальної системи ремонту до обслуговування за фактичним технічним станом.

Розроблено математичні моделі, що описують деградаційні процеси конструктивних елементів агродрона. Побудовано моделі механічного зношування, втоми матеріалів, зміни жорсткості конструкції, деградації акумуляторних батарей та впливу цих процесів на функціональні характеристики безпілотного літального апарата.

Особливу увагу приділено дослідженню віброакустичних характеристик гвинтомоторної групи. Встановлено, що зміна амплітуди та спектрального складу вібрацій є однією з найбільш інформативних діагностичних ознак розвитку дефектів. Показано, що дисбаланс пропелерів, зношування підшипників і ослаблення кріплень призводять до збільшення середньоквадратичного значення вібрацій та зміни частотного спектра, що дозволяє здійснювати ранню діагностику несправностей.

Досліджено тепловий стан силових елементів агродрона, зокрема акумуляторної батареї, ESC та електродвигунів. Встановлено, що температура є одним із найбільш інформативних параметрів технічного стану. Зростання

температури або швидкості її зміни може свідчити про перевантаження, погіршення теплообміну, деградацію акумулятора або розвиток прихованих дефектів силової електроніки. Використання тепловізійного контролю дозволяє своєчасно виявляти потенційно аварійні режими роботи.

На основі проведених досліджень сформовано дерево діагностичних ознак, яке систематизує взаємозв'язки між контрольованими параметрами та можливими несправностями. Запропоновано інтегральний підхід до оцінювання технічного стану агродрона шляхом комплексного аналізу вібраційних, теплових, електричних та навігаційних показників. Це створює основу для автоматизованої системи підтримки прийняття рішень щодо подальшої експлуатації, технічного обслуговування або ремонту.

У роботі розроблено алгоритм та покрокову технологічну карту технічного діагностування агродрона, що охоплює передпольотний контроль, аналіз роботи основних систем, обробку результатів вимірювань, оцінювання технічного стану та формування рекомендацій щодо подальшої експлуатації. Запропонований алгоритм може бути використаний як у сервісних центрах, так і безпосередньо на підприємствах агропромислового комплексу.

Проведено аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів під час технічного обслуговування агродронів. Визначено основні механічні, електричні, теплові та хімічні ризики, пов'язані з експлуатацією літій-полімерних акумуляторів, високошвидкісних гвинтомоторних груп та засобів захисту рослин. Запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці та мінімізацію ризиків для персоналу і довкілля.

В економічній частині роботи виконано розрахунок витрат на розробку та впровадження технології технічного діагностування, визначено економічну ефективність від попередження відмов БПЛА та скорочення простоїв під час польових робіт. Проведені розрахунки показали, що впровадження запропонованої технології дозволяє суттєво зменшити витрати на аварійний ремонт, скоротити час простою техніки та підвищити коефіцієнт технічної готовності. Розрахований термін окупності капітальних вкладень є меншим за один рік, що підтверджує високу економічну доцільність впровадження розробленої системи.

Таким чином, поставлену мету роботи досягнуто, а всі поставлені завдання виконано. Розроблена технологія технічного діагностування агродронів має практичне значення для підприємств агропромислового комплексу та сервісних організацій, оскільки забезпечує підвищення надійності й безпеки експлуатації безпілотних літальних апаратів, скорочення експлуатаційних витрат та підвищення ефективності виконання польових робіт. Перспективою подальших досліджень є інтеграція методів штучного інтелекту та машинного навчання для автоматичного прогнозування залишкового ресурсу вузлів агродрона та реалізації концепції інтелектуального прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрущенко В.М. Основи технічної діагностики безпілотних літальних апаратів. – Київ: НУБіП України, 2022. – 256 с.

2. Бондаренко О.П. Сучасні агродрони у точному землеробстві. – Харків: ХНТУСГ, 2021. – 198 с.

3. Василенко І.В. Безпілотні авіаційні системи в агропромисловому комплексі України. – Київ: Аграрна наука, 2023. – 214 с.

4. Гнатюк П.М. Технічне обслуговування та ремонт БПЛА. – Львів: Сполом, 2020. – 243 с.

5. Даниленко С.О. Системи технічної діагностики машин і обладнання. – Київ: Ліра-К, 2021. – 318 с.

6. Дорошенко А.В. Вібраційна діагностика машин та механізмів. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 276 с.

7. Єременко М.О. Інтелектуальні системи моніторингу технічного стану БПЛА. – Дніпро: ДНУ, 2022. – 205 с.

8. Жук В.М. Основи експлуатації безпілотних авіаційних комплексів. – Київ: НАУ, 2020. – 290 с.

9. Захарченко І.П. Технології точного землеробства в Україні. – Харків: Факт, 2021. – 184 с.

10. Іванченко Р.В. Автоматизовані системи керування агродронами. – Київ: Аграрна освіта, 2023. – 241 с.

11. Карпенко О.О. Методи діагностування електромеханічних систем. – Одеса: ОДАУ, 2020. – 211 с.

12. Кириленко В.В. Безконтактні методи технічної діагностики. – Київ: Політехніка, 2019. – 227 с.

13. Коваленко А.М. Сучасні електронні системи безпілотних літальних апаратів. – Львів: Новий Світ-2000, 2022. – 236 с.

14. Козак Ю.П. Тепловізійний контроль технічного стану обладнання. – Київ: Основа, 2021. – 187 с.

15. Лисенко В.П. Віброакустичний контроль технічного стану машин. – Київ: Видавництво НУБіП, 2022. – 264 с.

16. Марченко С.В. Діагностика електроприводів мобільних машин. – Харків: ХНАДУ, 2021. – 208 с.

17. Мельник І.В. Основи надійності технічних систем. – Київ: Центр учбової літератури, 2020. – 312 с.

18. Мороз О.Г. Безпілотні технології у сільському господарстві. – Вінниця: ВНАУ, 2023. – 218 с.

19. Нестеренко П.О. Інформаційні технології в аграрному виробництві. – Київ: Урожай, 2021. – 246 с.

20. Олійник С.М. Дистанційний моніторинг агроекосистем за допомогою БПЛА. – Київ: Аграрна наука, 2022. – 192 с.

21. Павленко Д.В. Методи контролю технічного стану безпілотних систем. – Київ: НАУ, 2021. – 233 с.

22. Петренко В.О. Технічний сервіс аграрної техніки. – Харків: ХНТУСГ, 2019. – 301 с.

23. Поліщук А.М. Теорія технічної діагностики машин. – Київ: Ліра-К, 2020. – 279 с.

24. Приходько Ю.С. Алгоритми оцінювання технічного стану БПЛА. – Дніпро: ДНУ, 2023. – 194 с.

25. Романенко О.В. Системи автоматичного керування агродронами. – Київ: КПІ, 2022. – 215 с.

26. Савченко М.П. Основи технічної експлуатації літальних апаратів. – Київ: НАУ, 2020. – 286 с.

27. Семенюк В.О. Методи прогнозування технічного ресурсу машин. – Київ: Освіта України, 2021. – 248 с.

28. Сидоренко Л.В. Цифрові технології точного землеробства. – Київ: Аграрна освіта, 2023. – 205 с.

29. Соловйов П.М. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень у технічній діагностиці. – Харків: ХПІ, 2022. – 229 с.

30. Степаненко В.В. Методи неруйнівного контролю технічних систем. – Київ: Політехніка, 2020. – 261 с.

31. Ткаченко І.О. Діагностика електронних систем мобільної техніки. – Київ: Центр учбової літератури, 2021. – 224 с.

32. Усенко П.В. Надійність безпілотних літальних апаратів. – Київ: НАУ, 2022. – 210 с.

33. Федоренко М.М. Технології внесення засобів захисту рослин агродронами. – Харків: ХНАУ, 2023. – 187 с.

34. Харченко В.П. Авіаційні інформаційні системи. – Київ: НАУ, 2019. – 334 с.

35. Хоменко С.В. Контроль технічного стану електричних машин. – Львів: Львівська політехніка, 2020. – 213 с.

36. Цимбалюк І.О. Вібраційний аналіз у технічній діагностиці. – Київ: КПІ, 2021. – 238 с.

37. Черненко О.В. Системи навігації безпілотних літальних апаратів. – Київ: НАУ, 2022. – 219 с.

38. Шаповал В.М. Безпілотні технології у сучасному агробізнесі. – Київ: Аграрна наука, 2023. – 196 с.

39. Шевченко І.П. Методи технічного сервісу високотехнологічної техніки. – Харків: ХНАДУ, 2020. – 242 с.

40. Щербак О.М. Технічна експлуатація мобільних роботизованих систем. – Київ: Освіта України, 2022. – 207 с.

41. Ющенко П.В. Комплексна діагностика мехатронних систем. – Дніпро: ДНУ, 2021. – 231 с.

42. Яценко В.М. Основи експлуатації електронних систем агродронів. – Київ: НУБіП України, 2023. – 214 с.

43. Ярошенко С.О. Інноваційні технології використання безпілотних літальних апаратів у рослинництві. – Київ: Аграрна освіта, 2024. – 225 с.

ДОДАТКИ

Технологічна схема діагностування



Рисунок Д.1 – Алгоритм технічного діагностування XAG P40

Таблиця 1 – Технологічна карта діагностування

№	*Операція*	*Метод контролю*	*Інструмент*	*Норматив*
1	*Огляд корпусу*	*Візуальний*	*Ліхтар*	*Відсутність тріщин*
2	*Перевірка рами*	*Візуальний*	*Шаблон*	*Без деформацій*
3	*Контроль кріплень*	*Механічний*	*Динамометричний ключ*	*Надійна фіксація*
4	*Огляд пропелерів*	*Візуальний*	*Лупа*	*Без сколів*
5	*Балансування пропелерів*	*Віброаналіз*	*Балансир*	*Допустимий дисбаланс*
6	*Перевірка двигунів*	*Пробний запуск*	*Тахометр*	*Стабільні RPM*
7	*Контроль ESC*	*Тепловізійний*	*Тепловізор*	*Без локального перегріву*
8	*Перевірка АКБ*	*Електричний*	*Мультиметр/BMS*	*Нормальна напруга*
9	*Контроль кабелів*	*Візуальний*	*Огляд*	*Без пошкоджень*
10	*Контроль форсунок*	*Функціональний*	*Вода*	*Рівномірне розпилення*
11	*Перевірка насосів*	*Функціональний*	*Витратомір*	*Номінальна подача*
12	*Перевірка RTK/GPS*	*Програмний*	*ПЗ*	*Стійкий FIX*
13	*Контроль радара*	*Самодіагностика*	*ПЗ*	*Без помилок*
14	*Перевірка IMU*	*Калібрування*	*ПЗ*	*Допуск*
15	*Контроль телеметрії*	*Пробний запуск*	*Контролер*	*Стабільний зв'язок*
16	*Формування висновку*	*Комплексний*	*Протокол*	*Придатність до польоту*

Етап 1. Візуальна діагностика
Перевіряються:

- *несуча рама;*
- *промені;*
- *посадкові опори;*
- *корпус;*
- *кріплення;*
- *антени;*
- *бак;*

- *форсунки.*

ПРОТОКОЛ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ АГРОДРОНА XAG P40

Загальна інформація

Дата діагностування _____

Час _____

Модель БПЛА XAG P40

Серійний номер _____

Оператор (ПІБ) _____

Місце проведення діагностики _____

Контрольний чек-лист

№	Контрольований вузол	Стан	Примітка
1	Несуча рама	☐ Справна ☐ Несправна	_____
2	Пропелерна група	☐ Справна ☐ Несправна	_____
3	Електродвигуни	☐ Справні ☐ Несправні	_____
4	ESC (регулятори швидкості)	☐ Справні ☐ Несправні	_____
5	Акумуляторна батарея (АКБ)	☐ Справна ☐ Несправна	_____
6	Кабелі та електричні з’єднання	☐ Справні ☐ Несправні	_____
7	Система розпилення	☐ Справна ☐ Несправна	_____
8	Насоси та форсунки	☐ Справні ☐ Несправні	_____
9	RTK/GPS система	☐ Справна ☐ Несправна	_____
10	IMU та компас	☐ Справні ☐ Несправні	_____
11	Телеметрія та зв’язок	☐ Справні ☐ Несправні	_____
12	Пробний запуск	☐ Виконано ☐ Не виконано	_____

Результати діагностування

Загальний технічний стан

☐ **Повністю справний**

☐ **Потребує планового технічного обслуговування**

☐ **Потребує ремонту**

☐ **Експлуатація заборонена до усунення несправностей**

Виявлені дефекти

Рекомендовані роботи

☐ Балансування пропелерів

☐ Заміна АКБ

☐ Перевірка ESC

☐ Заміна електродвигуна

☐ Калібрування RTK/GPS

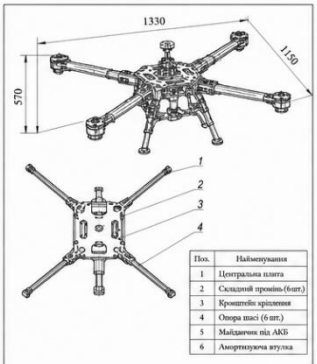
☐ Перевірка системи розпилення

☐ Інше: _____

Виконавець діагностики _____

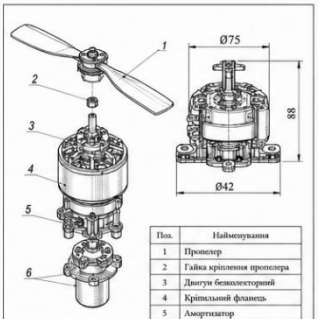
Підпис _____

Дата _____



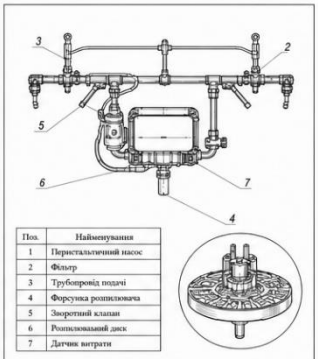
Поз.	Найменування
1	Центральна плита
2	Складний промінь (6 шт.)
3	Кронштейн кріплення
4	Опора шасі (6 шт.)
5	Майданчик під АКБ
6	Амортизуюча втулка

Рисунок 1.1 – Несуча рама



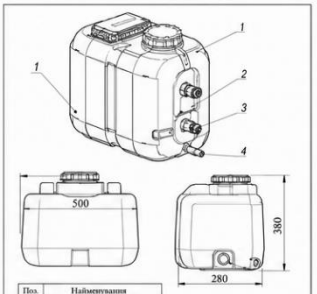
Поз.	Найменування
1	Пропелер
2	Гайка кріплення пропелера
3	Двигун безколекторний
4	Кріпильний фланець
5	Амортизатор
6	Основа кріплення

Рисунок 1.2 – Пропелерно-моторна група



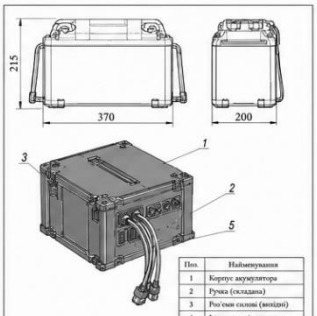
Поз.	Найменування
1	Перистальтичний насос
2	Фільтр
3	Трубопровід подачі
4	Форсунка розпилювача
5	Зворотний клапан
6	Розпилювальний диск
7	Датчик витрати

Рисунок 1.3 – Система розпилення (BooSpray)



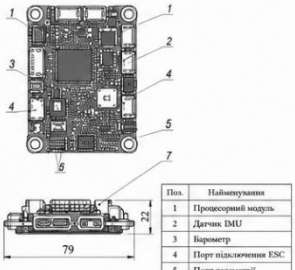
Поз.	Найменування
1	Кришка заливної горловини
2	Датчик рівня рідини
3	Штуцер подачі рідини
4	Штуцер зливу
5	Бак для робочої рідини

Рисунок 1.4 – Бак для робочої рідини



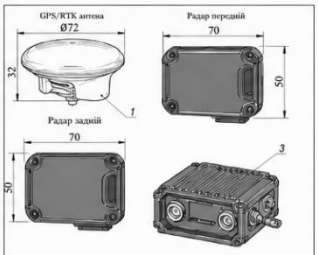
Поз.	Найменування
1	Корпус акумулятора
2	Ручка (складана)
3	Роз'єми силові (вихідні)
4	Індикатор рівня заряду
5	Ручка для перенесення
6	Охолоджуючі отвори

Рисунок 1.5 – Акумуляторна система живлення



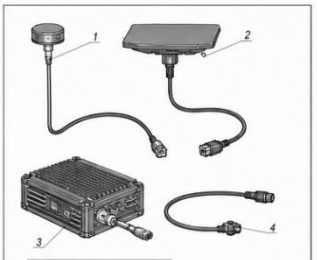
Поз.	Найменування
1	Процесорний модуль
2	Датчик IMU
3	Барометр
4	Порт підключення ESC
5	Порт телеметрії
6	GPS модуль
7	Роз'єм живлення

Рисунок 1.6 – Польотний контролер та система керування



Поз.	Найменування
1	GPS/RTK антена
2	Радар передній
3	Радар задній
4	Навігаційний модуль

Рисунок 1.7 – Навігаційна система (GPS/RTK та радари)



Поз.	Найменування
1	Антена на штоку (2.4/5.8 ГГц)
2	Антена панельна
3	Радіомодем 900 МГц
4	Кабель підключення

Рисунок 1.8 – Система зв'язку та телеметрії

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АГДР.01.00.00.000 СК		
Розробив					Агродрон. Складові системи. Складальне креслення	Стадія	Арк. 1	Аркушів 1
Перевірив								
Н. контр.								
Затвердив								