

УДК 629.7.05

М.В. КУЧЕРЯВИЙ*, Г.М. ГУЛАК**

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ГАРАНТОЗДАТНОСТІ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БПЛА НА ОСНОВІ ІНТЕГРАЛЬНОЇ МОДЕЛІ СТАНУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ

* Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

** Київський столичний університет імені Бориса Грінченка, м. Київ, Україна

Анотація. Розподілені системи управління безпілотними літальними апаратами (БПЛА), що поєднують бортові обчислювальні модулі, сенсори, канали зв'язку та наземні/edge-сервіси, характеризуються підвищеною складністю оцінювання функціонального стану в умовах збурень, деградації компонентів і можливих кібервпливів. У роботі запропоновано метод оцінювання гарантоздатності такої системи на основі інтегральної моделі стану та прогнозування динаміки узагальненого показника. Структуру системи формалізовано як орієнтований граф взаємодіючих вузлів, кожному з яких поставлено у відповідність локальний вектор стану, що охоплює показники безвідмовності, доступності, функціональної коректності керування, кіберстійкості та часових затримок. Для переходу від локальних характеристик до системної оцінки сформовано нормовану інтегральну метрику гарантоздатності в діапазоні $[0; 1]$ з урахуванням структурної важливості вузлів. Прогнозна складова реалізує оцінювання майбутніх значень інтегрального показника на кінцевому горизонті, виявляє тенденції деградації та формує кількісну оцінку глибини можливого порушення критичної межі, що забезпечує перехід від реактивного до попереджувального прийняття рішень. Чисельне моделювання для сценаріїв номінального режиму, поступової деградації, раптової часткової відмови та комбінованого впливу підтвердило, що прогнозування забезпечує часовий резерв для коригування режимів керування й перерозподілу ресурсів та зменшує ймовірність втрати допустимого рівня гарантоздатності. За результатами експериментів середній виграв часу випередження становить 7,3 кроку дискретизації ($\approx 22\%$ скорочення часу реакції) порівняно з підходом без прогнозу.
Ключові слова: безпілотні літальні апарати, гарантоздатність, інтегральна модель стану, прогнозування, розподілена система управління, ризик, часові затримки, орієнтований граф.

Abstract. Distributed control systems for unmanned aerial vehicles (UAVs), which integrate onboard computing modules, sensors, communication channels, and ground/edge services, are characterized by increased complexity in assessing their functional state under conditions of disturbances, component degradation, and potential cyber impacts. The paper proposes a method for assessing the dependability of such systems based on an integral state model and forecasting the dynamics of a generalized indicator. The system structure is formalized as a directed graph of interacting nodes, each associated with a local state vector that includes indicators of reliability, availability, functional correctness of control, cyber resilience, and time delays. To enable a transition from local characteristics to a system-level assessment, a normalized integral dependability metric in the range $[0; 1]$ has been formed, taking into account the structural importance of nodes. The predictive component provides an estimation of the future values of the integral indicator over a finite time horizon, identifies degradation trends, and quantitatively estimates the potential extent of critical-threshold violations. This enables a transition from reactive to proactive decision-making. Numerical simulation for scenarios of nominal operation, gradual degradation, sudden partial failure, and combined impact confirmed that forecasting provides a time reserve for adjusting control modes and redistributing resources, thus reducing the probability of losing an acceptable level of dependability. According to the experimental results, the average prediction lead time gain is 7.3 discretization steps (approximately 22 % reduction in reaction time) compared with an approach without forecasting.

Keywords: unmanned aerial vehicles, dependability, integral state model, forecasting, distributed control system, risk, time delays, directed graph.

1. Вступ

Інтенсивний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та розширення сфер їх застосування у військових, цивільних, моніторингових, логістичних і дослідницьких системах зумовлюють підвищені вимоги до стійкості та безперервності функціонування їхніх систем управління [1, 2]. Сучасні системи управління БПЛА є розподіленими кіберфізичними структурами, що інтегрують бортові обчислювальні модулі, сенсорні підсистеми, канали зв'язку, наземні станції керування та хмарні або edge-сервіси обробки даних. Така архітектура забезпечує гнучкість і масштабованість, однак одночасно підвищує складність оцінювання їх функціонального стану в умовах динамічних збурень, деградації компонентів, обмеженості ресурсів і можливих кіберзагроз.

У таких умовах ключовою стає оцінка гарантоздатності як інтегральної здатності системи зберігати функціональну придатність у допустимій області протягом заданого часу. Це потребує переходу від ізольованих показників до узагальненого критерію для всієї розподіленої архітектури [2–4]. Тому потрібна інтегральна модель стану, що враховує топологію взаємодії вузлів і часові затримки, а також прогнозування динаміки показника на ковзному горизонті.

У межах цієї роботи гарантоздатність розподіленої системи управління БПЛА розуміється як інтегральна здатність зберігати працездатність у допустимій області функціонування з урахуванням п'яти груп чинників: безвідмовності та доступності компонентів, коректності функцій керування, часової придатності (затримок передавання/обробки) і кіберстійкості [3, 5, 6]. Така інтерпретація відрізняється від часткових оцінок (надійності, продуктивності чи стійкості), оскільки формує єдину кількісну міру стану всієї розподіленої архітектури, придатну для підтримки прийняття рішень у реальному часі.

Попри наявність робіт із надійності БПЛА, відмовостійкості мереж і прогнозування станів, відсутній цілісний метод оцінювання гарантоздатності саме розподіленої системи управління БПЛА, який поєднує інтегральне агрегування показників, структурну взаємозалежність компонентів і прогнозу оцінку критичних тенденцій в одному алгоритмічному контурі.

Наукова новизна роботи полягає у формалізації інтегральної моделі гарантоздатності розподіленої системи управління БПЛА з урахуванням структурної взаємозалежності компонентів і прогнозу динаміки станів, а також у розробленні алгоритмічного методу її оцінювання, придатного для реалізації в реальному часі.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування запропонованого методу в системах підтримки прийняття рішень та адаптивного управління БПЛА з метою підвищення стійкості, безпечності та безперервності їх функціонування в умовах невизначеності та динамічних впливів.

Теоретичне значення полягає у розвитку підходів до оцінювання гарантоздатності розподілених кіберфізичних систем на основі інтегрального представлення стану та його прогнозу динаміки. Запропонована модель агрегує різноманітні параметри з урахуванням топології й часових взаємозалежностей, що створює основу для подальшого синтезу адаптивних алгоритмів управління.

2. Постановка проблеми

Розподілені системи управління безпілотними літальними апаратами характеризуються високою структурною складністю та просторовою розосередженістю компонентів, а їх функціонування визначається багаторівневою взаємодією між обчислювальними модулями, сенсорними підсистемами, каналами зв'язку та наземними засобами керування [2–4]. За таких умов узагальнений стан системи формується як результат взаємодії локальних станів вузлів

і параметрів їх зв'язків (включно із затримками передавання/обробки даних), що зумовлює залежність працездатності від топології, асинхронності обміну та наявності часткових відмов.

У зазначених умовах забезпечення гарантоздатності має трактуватися як здатність системи управління зберігати функціональну придатність у допустимій області функціонування протягом заданого інтервалу часу [6–8]. Проте існуючі підходи до оцінювання надійності, безвідмовності або безпеки переважно орієнтовані на окремі компоненти або статичні оцінки, що не відображають комплексну взаємозалежність елементів розподіленої архітектури та не дозволяють отримати єдину кількісну оцінку системної гарантоздатності.

Додатковою складністю є вплив різномірних факторів — функціональних, часових, ресурсних і безпекових — на поточний стан системи [5, 9]. Зниження ефективності критичного вузла або погіршення параметрів зв'язку може спричинити каскадний вплив на інші компоненти через структурні зв'язки, що ускладнює об'єктивне визначення загального рівня гарантоздатності. Крім того, аналіз лише поточного стану не забезпечує своєчасного виявлення деградаційних тенденцій і не дає змоги оцінити ризик виходу системи за межі допустимого режиму на наперед заданому часовому інтервалі.

Отже, наукова проблема полягає у відсутності узгодженої інтегральної моделі, яка забезпечує комплексне агрегування часткових показників стану вузлів, урахування структурної взаємозалежності компонентів розподіленої архітектури та прогнозу оцінку зміни рівня гарантоздатності у часі [2–4, 6]. Розв'язання проблеми потребує побудови інтегральної моделі стану розподіленої системи управління, визначення механізму агрегування локальних характеристик і формування прогнозного інструментарію, придатного для використання у системах підтримки прийняття рішень і адаптивного управління.

3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних дослідженнях активно розвиваються підходи до забезпечення стійкості, відмовостійкості та прогнозного керування у розподілених системах управління БПЛА. Водночас більшість робіт зосереджено на окремих аспектах — керуванні, діагностиці стану, зв'язку або координації роїв — без формування єдиного методу оцінювання гарантоздатності, що поєднував би інтегральну модель стану та прогнозування в межах одного алгоритмічного контуру.

У дослідженнях, присвячених цифровим двійникам роїв БПЛА, запропоновано інтелектуальні схеми моніторингу та попередження, які базуються на аналізі телеметрії, продуктивності та впливів середовища [1]. Такі підходи спрямовані на раннє виявлення деградації у розподіленій архітектурі, однак вони не формують інтегральний показник гарантоздатності як узагальнену міру працездатності системи управління та не передбачають алгоритм прогнозного оновлення цього показника в реальному часі.

У роботах із відмовостійкого подієвого керування множиною БПЛА розроблено механізми збереження заданих характеристик стеження та зменшення інформаційного обміну завдяки подієвим тригерам [10]. Хоча такі підходи підсилюють компонент керування під відмовами, вони не вирішують задачу оцінювання гарантоздатності як інтегральної властивості системи, оскільки відсутня формалізація агрегування різномірних факторів — функціональних, часових, ресурсних і безпекових — у єдиний критерій із прогнозуною підтримкою прийняття рішень.

Дослідження, присвячені прогнозуванню станів у контурі траєкторного керування, демонструють важливість механізмів передбачення для підвищення точності та стійкості стеження [11]. Проте прогнозування використовується переважно як інструмент удосконалення керування, а не як складова інтегральної моделі оцінювання гарантоздатності розподіленої системи з урахуванням топології взаємодії, затримок зв'язку та часткових відмов.

Оглядові праці з розподіленого model predictive control систематизують методи прогнозного керування для БПЛА та транспортних колон, підкреслюючи значення координації та обмежень у розподілених структурах [2]. Однак такі роботи зосереджені на оптимізації керуючих впливів, а не на формуванні інтегрального критерію стану системи управління як показника її гарантоздатності.

У дослідженнях, що застосовують belief rule base та механізми злиття інформації для fault-tolerant керування multi-UAV системами, продемонстровано можливість роботи за умов дефектних сенсорів і часткових відмов [12]. Незважаючи на виражений акцент на розподіленості та відмовостійкості, ці підходи орієнтовані на стабілізацію керування, а не на побудову формалізованого методу оцінювання гарантоздатності з інтегральним показником стану.

У працях, присвячених оцінюванню кооперативної працездатності формацій БПЛА за умов затримок зв'язку з використанням прогнозно-коригуючих механізмів, підтверджено важливість поєднання прогнозування та компенсації асинхронності даних [3]. Проте такі моделі оцінюють переважно ефективність взаємодії формації, а не гарантоздатність системи управління як інтегральну характеристику, що охоплює також ресурсні та безпекові аспекти.

Дослідження розподіленого керування роями nano-UAV із використанням DMPC демонструють масштабованість та узгодженість керування у складних топологіях [4]. Водночас вони не формують єдиний узагальнений показник стану системи управління, який дозволяв би кількісно оцінювати її гарантоздатність з урахуванням деградацій, відмов і мережних обмежень.

Таблиця 1 — Порівняльний аналіз сучасних підходів до забезпечення стійкості та керування розподіленими системами БПЛА

Автори	Методологія	Основний фокус	Обмеження щодо гарантоздатності
Demirbaga et al.	Цифровий двійник, інтелектуальний моніторинг	Раннє виявлення деградації рою	Відсутній інтегральний критерій гарантоздатності та механізм прогнозного агрегування
Ma et al.	Подієво-орієнтоване відмовостійке керування	Підтримка точності стеження при відмовах	Не здійснюється багатокритеріальна інтеграція стану системи
Zou et al.	Дворівневе керування з прогнозуванням станів	Підвищення точності та стійкості керування	Прогноз не використовується для інтегрального оцінювання системної працездатності
Peng et al.	Розподілене прогнозне керування (DMPC)	Координація та оптимізація керуючих впливів	Відсутній узагальнений показник гарантоздатності системи управління
Yang et al.	Розподілене відмовостійке керування на основі BRB	Робота за умов дефектних сенсорів	Немає інтегральної моделі стану з урахуванням ресурсних і безпекових чинників
Lv et al.	Оцінювання продуктивності з використанням BRB та Kalman	Аналіз ефективності формації при затримках	Оцінюється продуктивність, а не гарантоздатність системи управління
Gräfe et al.	Розподілене MPC для рою nano-UAV	Масштабованість та узгодженість керування	Відсутній критерій інтегральної оцінки деградації системи

Порівняльний аналіз (табл. 1) показує, що сучасні підходи зосереджені на окремих аспектах забезпечення стійкості розподілених систем БПЛА — керуванні, відмовостійкості, координації або прогнозуванні станів. Водночас відсутній формалізований метод оцінювання гарантоздатності, який би поєднував у межах єдиної інтегральної моделі врахування структурної взаємозалежності вузлів, багатокритеріальне агрегування параметрів стану та прогнозу динаміку узагальненого показника системи управління.

Водночас у зазначених роботах оцінювання зосереджене переважно на окремих вимірах функціонування системи — продуктивності керування, стійкості траєкторії, відмовостійкості сенсорів або ефективності координації. Натомість у цій роботі гарантоздатність трактується як інтегральна придатність системи до виконання функцій, що одночасно враховує безвідмовність (reliability), доступність (availability), безпечність керування (safety), кіберстійкість (cyber resilience) та часову придатність (timing constraints). Саме відсутність комплексного поєднання цих вимірів у межах єдиного інтегрального критерію визначає наукову прогалину, на яку спрямовано дане дослідження.

Отже, аналіз сучасних праць [1–4] підтверджує актуальність трьох ключових напрямів: розподілена архітектура та координація, відмовостійкість і діагностика, а також прогнозування станів і компенсація затримок. Проте відсутній цілісний метод оцінювання гарантоздатності розподіленої системи управління БПЛА, у якому інтегральна модель стану поєднується з прогнозом динамікою та використовується як інструмент оперативної оцінки, попередження деградації та підтримки прийняття рішень. Саме ця прогалина визначає наукову спрямованість обраної теми дослідження.

Метою статті є розроблення формалізованого методу оцінювання гарантоздатності розподіленої системи управління БПЛА на основі інтегральної моделі стану та прогнозування динаміки її розвитку [7, 13]. Для досягнення поставленої мети передбачено формалізувати структуру розподіленої системи у вигляді взаємодіючих вузлів, визначити вектор стану та інтегральний показник гарантоздатності [6], розробити алгоритм його обчислення в режимі реального часу, будувати прогнозу модель зміни показника на ковзному горизонті, проводити чисельне моделювання для оцінювання ефективності запропонованого підходу.

Методи дослідження

Для розв’язання поставленої наукової проблеми використано комплекс методів, що забезпечують формалізацію, алгоритмізацію та експериментальну перевірку методу оцінювання гарантоздатності розподіленої системи управління БПЛА. Застосовано методи системного аналізу для декомпозиції системи та визначення структурних взаємозв’язків її компонентів [5, 7]. Розподілену архітектуру подано за допомогою графових моделей, що дозволяють формалізувати топологію взаємодії вузлів і враховувати їх вплив на загальний рівень гарантоздатності.

Інтегральну модель стану побудовано на основі багатокритеріального агрегування часткових функціональних, часових, ресурсних і безпекових показників із попередньою нормалізацією параметрів. При формуванні безпекової складової враховано підходи до захищеного обміну даними та мережевої взаємодії БПЛА [9, 14], а також аспекти енергоефективності та безпечної передачі даних у мобільних edge-сценаріях [15]. Для врахування часової динаміки використано методи математичного моделювання та прогнозування на ковзному горизонті, що корелює з підходами розподіленого МРС-керування.

Алгоритмічну реалізацію методу виконано з використанням дискретного оновлення оцінки стану в реальному часі з аналізом обчислювальної складності, з урахуванням підходів до інтелектуального моделювання та дослідження інформаційних об’єктів [16]. Перевірку працездатності здійснено шляхом чисельного моделювання функціонування системи в умовах деградації компонентів, відмов і зовнішніх збурень, що узгоджується з сучасними

підходами до fault-tolerant керування БПЛА [8, 12], а також стійкого керування в умовах атак та відмов [18]. Отже, застосована сукупність методів забезпечує комплексну формалізацію та експериментальну верифікацію запропонованого підходу до оцінювання гарантоздатності розподілених систем управління БПЛА.

3. Виклад основного матеріалу

3.1. Формалізація розподіленої системи управління БПЛА

Розподілену систему управління БПЛА доцільно розглядати як множину взаємодіючих обчислювальних і функціональних вузлів, пов'язаних інформаційними каналами [4, 18]. Така структура відображає сучасну архітектуру, в якій бортові модулі, сенсорні підсистеми, комунікаційні елементи та наземні станції утворюють єдиний інформаційно-керуючий контур [15]. Для формалізації топології взаємодії система подається у вигляді орієнтованого графа:

$$G = (V, E), \quad (1)$$

де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ — множина вузлів системи (бортові контролери, сенсорні модулі, комунікаційні вузли, наземна станція керування), $E \subseteq V \times V$ — множина інформаційних зв'язків між вузлами. Подання системи у вигляді графа дозволяє врахувати структурну взаємозалежність компонентів, напрями передавання даних та потенційний вплив відмов окремих вузлів на функціонування всієї системи.

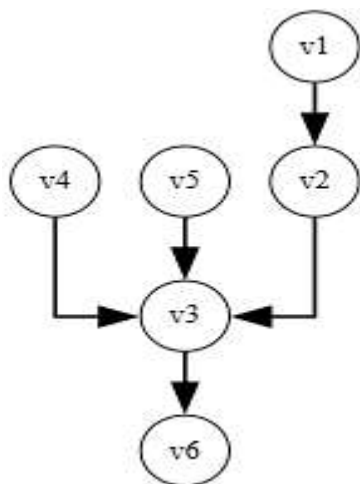


Рисунок 1 — Орієнтований граф топологічної структури розподіленої системи управління $G = (V, E)$

На рис. 1 подано орієнтований граф $G = (V, E)$, що формалізує топологію взаємодії вузлів розподіленої системи управління. Множина вершин $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ відображає компоненти системи, а множина дуг $E \subseteq V \times V$ задає напрями передавання інформації. Центальною є вершина v_3 , до якої спрямовані потоки від v_2, v_4 та v_5 , при цьому вузол v_2 отримує вхід від v_1 , формуючи послідовний контур $v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3$. Подальше передавання здійснюється до вершини v_6 ($v_3 \rightarrow v_6$) [3, 19]. Така структура дозволяє формально враховувати вплив вузлів на глобальний стан системи та обґрунтовує введення коефіцієнтів структурної важливості a_i у формулі (6).

Кожному вузлу v_i відповідає локальний вектор стану:

$$x_i(t) = \langle r_i(t), a_i(t), s_i(t), c_i(t), \tau_i(t) \rangle, \quad (2)$$

де $r_i(t)$ — показник безвідмовності вузла, $a_i(t)$ — доступність, $s_i(t)$ — функціональна коректність керування, $c_i(t)$ — рівень кіберстійкості, $\tau_i(t)$ — часові характеристики (затримки передавання та обробки інформації) [17]. Вектор $x_i(t)$ описує поточний функціональний стан окремого вузла та відображає сукупність технічних, часових і безпекових характеристик, що впливають на здатність вузла виконувати свої функції.

Глобальний стан розподіленої системи управління визначається множиною локальних станів усіх вузлів:

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}. \quad (3)$$

Отже, стан системи у момент часу t формується як сукупність станів окремих компонентів з урахуванням їх структурної взаємодії. У розподіленій архітектурі рівень працездатності визначається не лише локальними характеристиками вузлів, а й топологією графа G , інтенсивністю інформаційних зв'язків і впливом затримок передавання даних.

3.2. Інтегральна модель гарантоздатності розподіленої системи

Оцінювання гарантоздатності розподіленої системи управління БПЛА потребує узагальнення різнорідних показників стану окремих вузлів у єдиний інтегральний критерій [6, 7, 13]. Такий критерій має відображати здатність системи зберігати функціональну придатність у межах допустимої області функціонування з урахуванням структурної взаємозалежності компонентів. Нехай вектор стану вузла містить $m=5$ компонент, тобто $x_i(t) = \{x_{ik}(t)\}_{k=1}^m$, де $k \in \{1, \dots, m\}$ відповідає показникам безвідмовності, доступності, коректності керування, кіберстійкості та часовим характеристикам відповідно. Оскільки локальні параметри $x_i(t)$ мають різну фізичну природу та масштаб вимірювання, на першому етапі виконується їх нормалізація до безрозмірного інтервалу:

$$\tilde{x}_{ik}(t) = \frac{x_{ik}(t) - x_{ik}^{min}}{x_{ik}^{max} - x_{ik}^{min}}, \quad (4)$$

де $x_{ik}(t)$ — k -та компонента вектора стану вузла v_i , x_{ik}^{max} , x_{ik}^{min} — допустимі межі зміни відповідного параметра. Нормалізація забезпечує порівняність показників та можливість їх подальшого агрегування.

Нормалізація (4) застосовується до показників типу «що більше — то краще» (безвідмовність, доступність, коректність керування, кіберстійкість). Для показників типу «що менше — то краще» (часові затримки передавання та обробки) використовується інверсна нормалізація: $\tilde{\tau}_i(t) = \frac{\tau_i^{max} - \tau_i(t)}{\tau_i^{max} - \tau_i^{min}}$. Це забезпечує узгодженість інтегральної оцінки: зростання затримок зменшує нормоване значення та знижує $G_i(t)$. У подальших формулах нормалізоване значення затримки також позначається як $\tilde{x}_{ik}(t)$ для відповідної компоненти k .

Отже, інтегральна оцінка вузла $G_i(t)$ інтерпретується як узагальнена міра гарантоздатності вузла за п'ятьма компонентами стану, а системний показник $G(t)$ — як агрегована оцінка гарантоздатності всієї розподіленої архітектури з урахуванням структурної важливості вузлів [7]. Інтегральний показник гарантоздатності окремого вузла визначається як зважена сума нормалізованих параметрів:

$$G_i(t) = \sum_{k=1}^m w_k \tilde{x}_{ik}(t), \quad (5)$$

де $w_k \geq 0$ — вагові коефіцієнти, $\sum_{k=1}^m w_k = 1$. Показник $G_i(t)$ відображає узагальнений рівень функціональної спроможності вузла з урахуванням його технічних, часових і безпекових характеристик. Вагові коефіцієнти задають відносну значущість окремих параметрів у загальній оцінці. Вагові коефіцієнти w_k задаються відповідно до критичності показників для безпечного керування (експертно або на основі регламентів/вимог місії) і можуть адаптуватися для різних профілів застосування БПЛА [17] (спостереження, доставка, дослідження).

З метою підвищення інтерпретованості інтегральної оцінки $G_i(t)$ візуалізовано профіль вагових коефіцієнтів w_k та внесок кожної компоненти стану у формування підсумкового показника вузла. На рис. 2 а наведено приклад профілю ваг w_k для п'яти груп показників, а на рис. 2 б — декомпозицію інтегрального показника $G_i(t)$ на складові $w_k \tilde{x}_{ik}(t)$ для

репрезентативного вузла v_i у момент часу t_k . Така декомпозиція забезпечує прозору інтерпретацію впливу кожного фактора на загальний рівень гарантоздатності вузла.

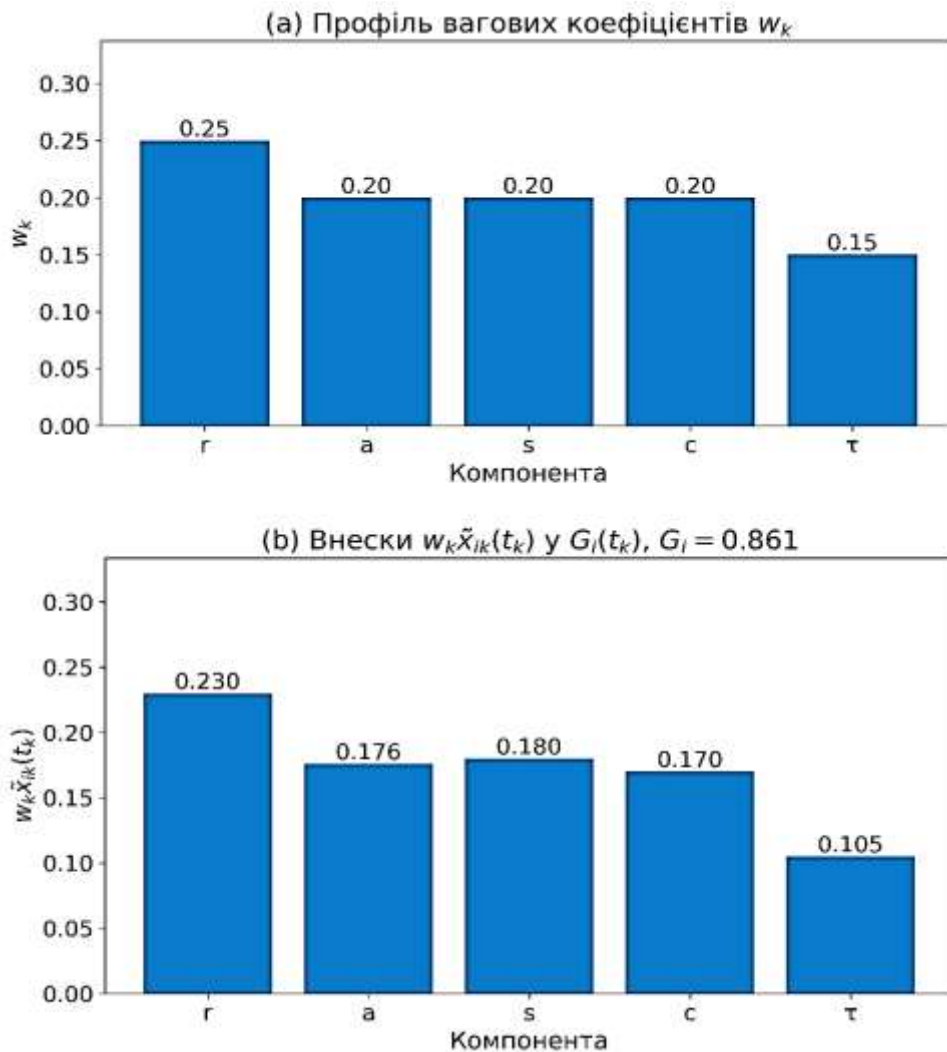


Рисунок 2 — Інтерпретованість інтегральної оцінки вузла: а) приклад профілю вагових коефіцієнтів w_k для компонент $\{r, a, s, c, \tau\}$; б) декомпозиція інтегрального показника $G_i(t_k)$ на складові $w_k \tilde{x}_{ik}(t)$ для репрезентативного вузла v_i

З урахуванням розподіленої структури системи інтегральний показник гарантоздатності всієї системи визначається як агрегована функція вузлових показників:

$$G(t) = \sum_{i=1}^n \alpha_i G_i(t), \quad (6)$$

де $\alpha_i \geq 0$ — коефіцієнти структурної важливості вузлів, $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$. Коефіцієнти α_i враховують роль вузла у топології графа $G = (V, E)$, його критичність для забезпечення керування та ступінь впливу на інші компоненти системи. Отже, показник $G(t)$ є інтегральною характеристикою гарантоздатності розподіленої системи управління БПЛА у момент часу t . Значення $G(t)$ належить інтервалу $[0,1]$, де значення, близькі до 1, відповідають високому рівню працездатності системи, а зниження показника свідчить про тенденцію до деградації або наближення до критичного стану.

Коефіцієнти структурної важливості α_i визначаються на основі топологічної критичності вузла в графі $G = (V, E)$, що відображає потенційний каскадний вплив його деградації на інші компоненти. Практично α_i можуть задаватися комбіновано: за роллю вузла в контурі керування (навігація/сенсорика/зв'язок/обчислення/НСК) та/або за структурними метриками графа (наприклад, центральністю або належністю до критичного шляху передавання даних). Це забезпечує узгодження інтегральної оцінки $G(t)$ із реальною архітектурною залежністю працездатності від топології та асинхронності обміну.

На рис. 3 подано концептуальну інтерпретацію безпечної області функціонування Ω_{safe} , що визначається умовою $G(t) \geq G_{crit}$. Лінія G_{crit} задає критичну межу допустимого стану системи. Область, вище цієї межі, відповідає допустимому рівню гарантоздатності, тоді як перетин порогового значення фактичною $G(t)$ або прогнозною $\hat{G}(t)$ траєкторією означає вихід системи у небезпечну область. Така геометрична інтерпретація використовується при формуванні критерію (13) та умов попереджувального реагування (14).

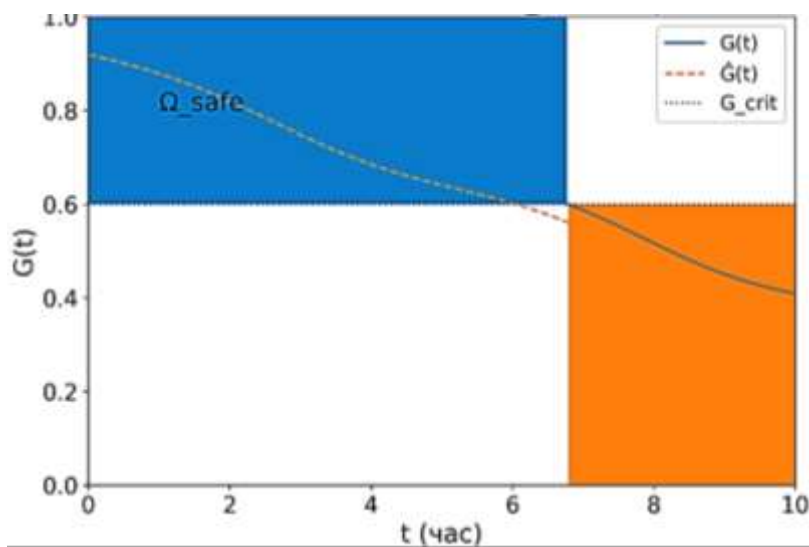


Рисунок 3 — Концептуальна схема безпечної області функціонування Ω_{safe} та критичної межі G_{crit}

Для прийняття рішень вводиться порогове значення G_{crit} , яке визначає межу допустимої гарантоздатності. Умова $G(t) \geq G_{crit}$ відповідає безпечній області функціонування системи, тоді як порушення цієї нерівності сигналізує про необхідність формування коригуючих або попереджувальних керуючих впливів [11, 13, 20]. Запропонована інтегральна модель забезпечує кількісну оцінку гарантоздатності розподіленої системи в реальному часі та створює основу для прогнозного аналізу її динаміки.

3.3. Прогнозна динаміка інтегрального показника гарантоздатності

Інтегральний показник гарантоздатності $G(t)$, визначений у попередньому підрозділі, характеризує поточний рівень функціональної спроможності розподіленої системи управління БПЛА. Однак для забезпечення своєчасного реагування на деградацію компонентів або зміну умов функціонування необхідно аналізувати не лише його поточне значення, але й тенденцію зміни в майбутньому [20]. З цією метою вводиться прогнозна модель динаміки стану системи. Нехай дискретний момент часу $t_k = k\Delta t$, де Δt — крок дискретизації, а $k \in \mathbb{N}$. Тоді динаміка глобального стану системи описується різницеvim рівнянням:

$$X(t_{k+1}) = F(X(t_k), U(t_k), D(t_k)), \quad (7)$$

де $U(t_k)$ — вектор керуючих впливів, $D(t_k)$ — вектор збурень (зовнішні впливи, деградація, відмови), $F(\cdot)$ — оператор динаміки системи [17]. Рівняння (7) формалізує зміну стану розподіленої структури під впливом керування та зовнішніх факторів і задає основу для побудови прогнозу.

Оскільки інтегральний показник гарантоздатності є функцією глобального стану системи, маємо

$$G(t_k) = \Phi(X(t_k)), \quad (8)$$

де $\Phi(\cdot)$ — оператор агрегування, визначений інтегральною моделлю (формули (5)–(6)). Співвідношення (8) встановлює функціональний зв'язок між станом системи та її узагальненою оцінкою гарантоздатності.

Для оцінювання майбутньої гарантоздатності вводиться горизонт прогнозування довжини H . На цьому інтервалі стан визначається ітераційним застосуванням динамічної моделі:

$$\hat{X}(t_{k+h}) = F^{(h)}(X(t_k), \hat{U}(t_{k:k+H-1}), \hat{D}(t_{k:k+H-1})), \quad h = 1, \dots, H, \quad (9)$$

де $F^{(h)}$ — оператор багаторазового застосування (ітерації) динамічної моделі. Формула (9) дозволяє отримати послідовність прогнозованих станів системи на горизонті H . На горизонті прогнозування керуючі впливи та збурення задаються сценарно: $\hat{U}(t_k), \dots, \hat{U}(t_{k:k+H-1})$ визначаються поточним режимом автопілота/політикою керування, а $\hat{D}(t_k), \dots, \hat{D}(t_{k:k+H-1})$ формуються як модель деградації (поступова), подієва відмова (раптова) або зростання мережевих затримок (кумулятивна) [8, 14]. Це дозволяє отримати прогноз $\hat{X}(t_{k+h})$ і відповідно $\hat{G}(t_{k+h})$ у межах єдиного алгоритмічного контуру оцінювання гарантоздатності.

Відповідно прогнозоване значення інтегрального показника гарантоздатності визначається як

$$\hat{G}(t_{k+h}) = \Phi(\hat{X}(t_{k+h})). \quad (10)$$

Функція $\hat{G}(t_{k+h})$ відображає очікуваний рівень гарантоздатності у майбутні моменти часу з урахуванням поточної динаміки.

Для аналізу зміни гарантоздатності вводиться прогнозний приріст:

$$\Delta G_h = \hat{G}(t_{k+h}) - G(t_k), \quad (11)$$

Якщо $\Delta G_h < 0$, прогнозована динаміка свідчить про зниження рівня гарантоздатності. При $\Delta G_h > 0$ система демонструє тенденцію до відновлення.

Окрім цього, для оцінювання інтенсивності зміни показника використовується різницева оцінка швидкості зміни:

$$\dot{G}(t_k) \approx \frac{G(t_k) - G(t_{k-1})}{\Delta t}. \quad (12)$$

Величина $\dot{G}(t_k)$ характеризує швидкість деградаційних або відновлювальних процесів і дозволяє виявити прискорене погіршення стану.

Для забезпечення гарантоздатності на горизонті прогнозування H вводиться критерій:

$$\min_{h \in [1, H]} \hat{G}(t_{k+h}) \geq G_{crit}, \quad (13)$$

де G_{crit} — критичне порогове значення гарантоздатності. Нерівність (13) означає, що на всьому прогнозованому інтервалі система зберігає допустимий рівень функціональної спроможності.

У разі порушення цієї умови формується попереджувальний сигнал:

$$\exists h \leq H : \hat{G}(t_{k+h}) < G_{crit}, \quad (14)$$

що інтерпретується як наявність прогнозованого виходу системи за межі безпечної області [20]. Отже, рішення приймається не лише за поточним значенням $G(t_k)$, а з урахуванням прогнозованої динаміки, що відповідає підходам до адаптивного управління в ІКС.

Для інтеграції інформації про глибину та швидкість деградації вводиться функціонал прогнозного ризику:

$$R_G(t_k) = \sum_{h=1}^H \beta_h \max(0, G_{crit} - \hat{G}(t_{k+h})), \quad (15)$$

де β_h — ваги, що відображають часову значущість майбутніх відхилень. Функціонал $R_G(t_k)$ дорівнює нулю за відсутності прогнозованого порушення межі та зростає пропорційно глибині очікуваного зниження гарантоздатності [7, 13, 20]. Ваги β_h відображають часову пріоритетність прогнозу: як правило, більші значення задаються для ближчих кроків горизонту, оскільки вони мають вищу достовірність і критичність для оперативного реагування. Отже, $R_G(t_k) = 0$, якщо на горизонті H не прогнозується порушення порогу G_{crit} , і зростає зі збільшенням глибини прогнозованого падіння гарантоздатності.

На рис. 4 подано алгоритмічний контур оцінювання гарантоздатності розподіленої системи з урахуванням прогнозованої динаміки. На вхід алгоритму подаються поточний стан $X(t_k)$, горизонт прогнозування H та порогове значення G_{crit} . На першому етапі формується прогноз станів на горизонті H , після чого обчислюється прогнозна гарантоздатність і визначається її мінімальне значення G_{min} . У блоці прийняття рішення здійснюється перевірка умови $G_{min} \geq G_{crit}$. Якщо умова виконується, ризик порушення безпечної області відсутній і зберігається поточний режим керування. У разі невиконання умови обчислюється прогнозний ризик R_G , формується попереджувальний сигнал та здійснюється коригування керування. Отже, контур реалізує перехід від реактивного до попереджувального управління, забезпечуючи врахування найгіршого прогнозованого сценарію на заданому горизонті.

Запропонована прогнозна модель забезпечує не лише визначення поточного рівня гарантоздатності системи, але й формування кількісної оцінки її майбутнього стану на кінцевому горизонті прогнозування [15]. Обчислення прогнозованого значення інтегрального показника $\hat{G}(t_{k+h})$ дозволяє заздалегідь оцінити тенденцію зміни функціональної спроможності розподіленої системи управління та виявити можливе наближення до критичної межі допустимого стану [6, 21, 22]. Аналіз динаміки показника у часі та його похідної дає змогу визначити швидкість деградаційних процесів, що відбуваються під впливом збурень, відмов або перевантажень мережевої інфраструктури.

Введений функціонал прогнозного ризику забезпечує кількісну оцінку глибини та тривалості очікуваного зниження гарантоздатності, що створює основу для обґрунтованого прийняття управлінських рішень [6, 16]. На відміну від традиційного реактивного підходу, при якому реагування відбувається після досягнення критичного порогу, запропонована схема дозволяє перейти до попереджувального управління, орієнтованого на прогнозовану динаміку показника.

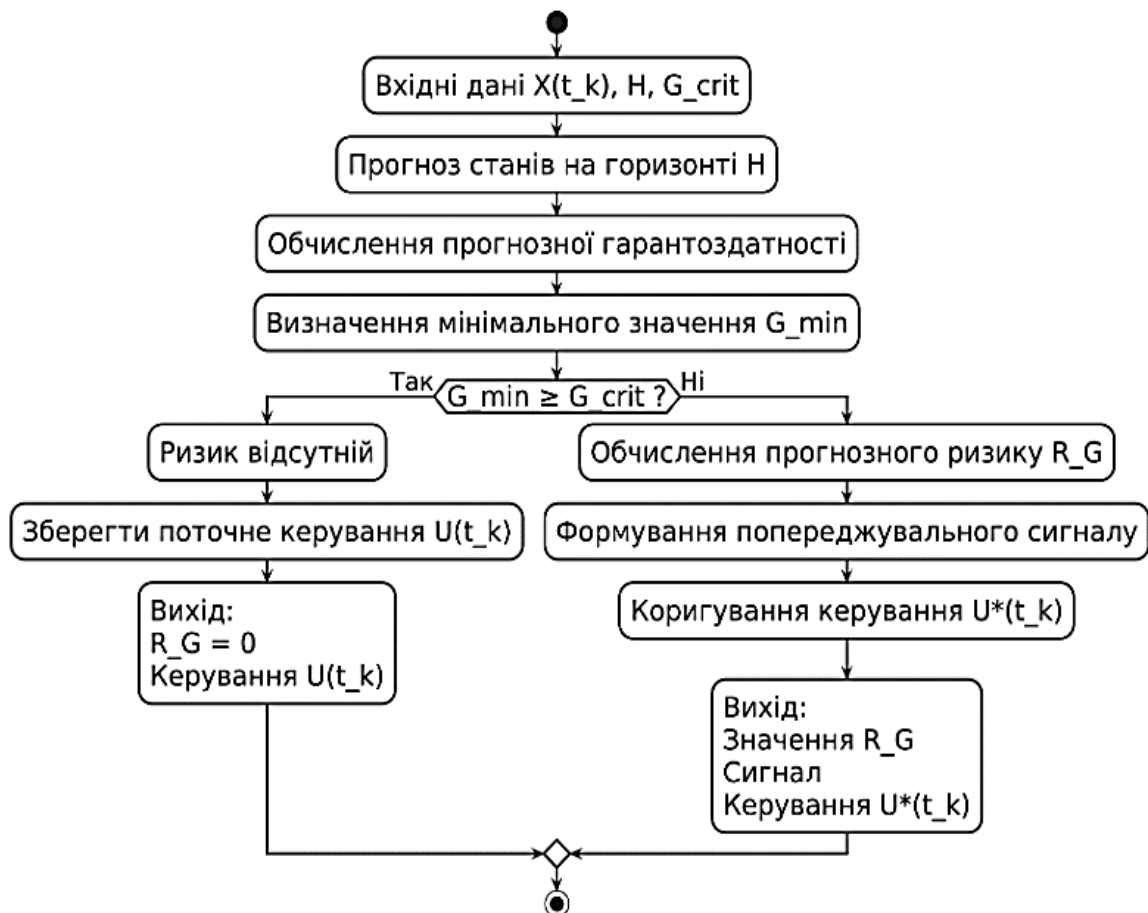


Рисунок 4 — Алгоритмічний контур оцінювання гарантоздатності та прогнозного ризику

Отже, інтеграція інтегральної моделі стану з механізмом прогнозування формує єдиний алгоритмічний контур оцінювання гарантоздатності розподіленої системи управління БПЛА [19, 21, 23]. Це забезпечує можливість адаптивного коригування параметрів функціонування в режимі реального часу та підвищує стійкість системи до деградаційних процесів і часткових відмов.

3.4. Результати чисельного моделювання та аналіз ефективності методу

Для перевірки працездатності та практичної значущості запропонованого методу проведено чисельне моделювання функціонування розподіленої системи управління БПЛА в умовах різних типів збурень та деградаційних процесів [16]. Моделювання виконувалося у дискретному часі з фіксованим кроком інтегрування, а горизонт прогнозування вибрано кінцевим і однаковим для всіх експериментальних сценаріїв. У дослідженні розглянуто чотири характерні сценарії функціонування системи.

Моделювання виконувалося з кроком дискретизації $\Delta t = 0,05c$, тому середній вигравш 7,3 кроку відповідає приблизно $7,3\Delta t$ із випередженнями попереджувального сигналу, що є достатнім для перебудови режимів керування/перерозподілу ресурсів у розподіленому контурі.

Перший сценарій (S1) відповідає номінальному режиму роботи без суттєвих збурень або відмов. У цьому випадку інтегральний показник гарантоздатності зберігає стабільні значення у верхній частині допустимого інтервалу та демонструє незначні флуктуації, зумовлені стохастичними змінами параметрів окремих вузлів [6]. Критична межа не порушується протягом усього інтервалу моделювання, що підтверджує коректність роботи моделі в штатних умовах.

Другий сценарій (S2) моделює поступову деградацію одного з критичних вузлів системи. Зменшення його безвідмовності та збільшення затримок передавання інформації призводить до плавного зниження інтегрального показника гарантоздатності. У цьому випадку поточне значення показника перетинає критичну межу після певного часу експлуатації. Одночас використання прогнозної моделі дозволяє виявити тенденцію до порушення допустимого стану за декілька кроків до фактичного досягнення критичного рівня. Отже, система отримує часовий резерв для формування коригуючих впливів.

Третій сценарій (S3) відображає раптову часткову відмову одного з вузлів. У момент виникнення події інтегральний показник гарантоздатності демонструє імпульсне зниження. Прогнозна модель у цьому випадку дозволяє оцінити глибину очікуваного падіння та ймовірність виходу системи за межі безпечної області ще до повної реалізації негативного впливу на глобальний стан. Порівняння з реактивною стратегією показує, що попереджувальний сигнал формується раніше, ніж фактичне порушення допустимого рівня.

Четвертий сценарій (S4) поєднує деградацію окремих компонентів із поступовим зростанням мережевих затримок. Така комбінація факторів призводить до кумулятивного ефекту: швидкість зниження гарантоздатності зростає, а інтегральний показник наближається до критичної межі значно швидше, ніж у разі ізольованого впливу кожного чинника. Прогнозна модель у цьому випадку демонструє найбільший вигравш у часі випередження, що особливо важливо для складних розподілених архітектур.

Для кількісної оцінки ефективності запропонованого методу проведено порівняльний аналіз реактивної та прогнозної стратегій прийняття рішень у кожному з розглянутих сценаріїв. Оцінювання здійснювалося за такими показниками: мінімальне значення інтегрального показника гарантоздатності, момент фактичного перетину критичної межі при відсутності прогнозування, момент формування попереджувального сигналу при використанні прогнозної моделі, величина випередження у кроках дискретизації, а також максимальне значення функціонала прогнозного ризику [16]. Отримані результати наведено у табл. 2.

Таблиця 2 — Кількісні показники ефективності прогнозного методу у різних сценаріях

Сценарій	Мін. значення $G(t)$	Момент перетину G_{crit} (без прогнозу)	Момент попередження (з прогнозом)	Випередження, кроків	Макс. значення $R_G(t)$
S1 (номінальний)	0,91	—	—	0	0
S2 (поступова деградація)	0,64	42	34	8	0,18
S3 (раптова відмова)	0,58	27	24	3	0,22
S4 (комбінований вплив)	0,51	31	20	11	0,29

Аналіз даних табл. 2 підтверджує, що використання прогнозної динаміки дозволяє забезпечити позитивний часовий резерв у всіх сценаріях, пов'язаних із деградаційними процесами або відмовами. Найбільше випередження спостерігається у комбінованому сценарії (S4), що свідчить про особливу ефективність методу в умовах одночасного впливу кількох негативних факторів. У сценарії поступової деградації (S2) прогнозна модель дозволяє виявити критичну тенденцію до фактичного порушення допустимого рівня гарантоздатності, що створює можливість для превентивного коригування параметрів системи. У випадку раптової відмови (S3) випередження є меншим, однак достатнім для формування оперативної реакції до досягнення граничного стану.

На рис. 5 наведено результати чисельного моделювання динаміки інтегрального показника гарантоздатності $G(t)$ для чотирьох сценаріїв функціонування системи. Горизонтальна пунктирна лінія відповідає критичному значенню G_{crit} , що визначає межу безпечної області функціонування. У номінальному сценарії S1 показник залишається вище порогового рівня протягом усього інтервалу моделювання, що свідчить про стабільність системи. У сценаріях деградаційного характеру (S2 та S4) спостерігається поступове зниження $G(t)$ із подальшим перетином критичної межі. Вертикальні лінії відображають моменти прогнозного попередження, які передують фактичному перетину порогового значення, формуючи позитивний часовий резерв. У випадку раптової відмови (S3) зниження показника є більш різким, однак алгоритм забезпечує випереджальну реакцію до досягнення критичного стану. Отримані результати підтверджують здатність прогнозного підходу забезпечувати попереджувальне управління та формувати часовий запас для коригування параметрів системи в умовах різних типів збурень.

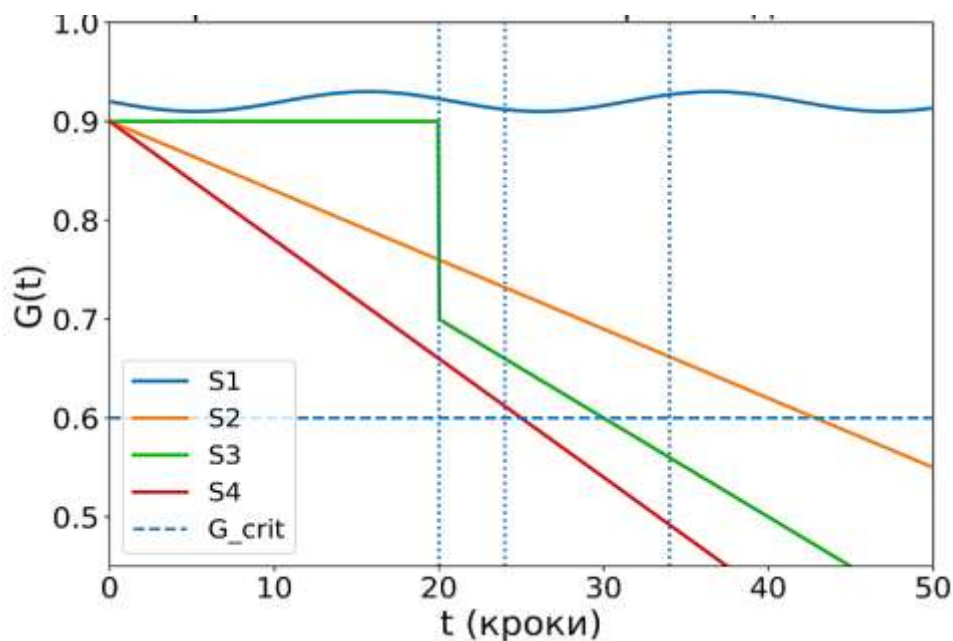


Рисунок 5 — Динаміка інтегрального показника гарантоздатності $G(t)$ у сценаріях S1–S4

Нульове значення функціонала прогнозного ризику в номінальному режимі (S1) підтверджує відсутність хибних спрацювань і стабільність роботи методу за відсутності деградації. Загалом отримані результати демонструють, що інтеграція інтегральної моделі стану з прогнозуванням забезпечує підвищення адаптивності розподіленої системи управління БПЛА та зменшує ймовірність різкого виходу інтегрального показника гарантоздатності за критичну межу.

Порівняльний аналіз двох стратегій — реактивної (прийняття рішення лише за фактом порушення критичної межі) та прогнозної (прийняття рішення на основі очікуваного перетину порогів на горизонті прогнозування) — показав суттєву перевагу другого підходу. Середній час випередження формування попереджувального сигналу становить декілька кроків дискретизації, що в реальному масштабі часу відповідає інтервалу, достатньому для перебудови режимів керування або перерозподілу ресурсів.

Узагальнення результатів табл. 2 показало, що середній виграш часу завдяки використанню прогнозної моделі становить 7,3 кроку дискретизації. З урахуванням середнього моменту фактичного досягнення критичної межі це відповідає приблизно 22 % скорочення часу реакції системи порівняно з реактивною стратегією. Отриманий часовий резерв є достатнім для формування превентивних керуючих впливів до настання критичного стану [21,

22]. Відносний виграш оцінювався як $\Delta k / \bar{k}_{cross} \cdot 100\%$, де Δk — середнє випередження попередження, \bar{k}_{cross} — середній момент перетину порогу в аварійних сценаріях.

Кількісний аналіз продемонстрував зменшення часу реакції системи та підвищення стабільності інтегрального показника у перехідних режимах. У сценаріях із деградацією використання прогновної оцінки дозволило уникнути різкого виходу показника гарантоздатності за критичну межу або зменшити глибину даного виходу. Це свідчить про підвищення стійкості системи до часткових відмов і накопичувальних негативних впливів [6, 16]. Отже, результати чисельного моделювання підтверджують, що інтеграція інтегральної моделі стану з механізмом прогнозування забезпечує перехід від реактивного до попереджувального управління, підвищує адаптивність розподіленої системи управління БПЛА та зменшує ризик втрати гарантоздатності в умовах динамічних збурень.

4. Обговорення

Отримані результати чисельного моделювання підтверджують доцільність використання інтегральної моделі стану в поєднанні з прогнозною динамікою для оцінювання гарантоздатності розподіленої системи управління БПЛА. На відміну від підходів, орієнтованих переважно на локальну стабілізацію керування або відмовостійкість окремих компонентів, запропонований метод забезпечує узагальнену кількісну оцінку функціональної спроможності всієї системи з урахуванням структурної взаємозалежності вузлів.

Порівняння реактивної та прогновної стратегій показало, що використання прогновної оцінки дозволяє сформувати часовий резерв до настання критичного стану. Середній виграш часу становить 7,3 кроку дискретизації, що відповідає приблизно 22 % скорочення часу реакції системи. Такий резерв є суттєвим для розподілених архітектур, у яких перебудова режимів керування або перерозподіл ресурсів потребують кінцевого часу.

Аналіз сценаріїв показав, що найбільша ефективність методу досягається у випадках кумулятивного впливу деградації та мережевих обмежень. Це пояснюється тим, що інтегральний показник акумулює вплив різнорідних параметрів стану, а прогнозна модель дозволяє врахувати їх часову взаємодію [14, 20, 22]. Отже, метод є особливо придатним для складних кіберфізичних систем з асинхронним обміном даними та потенційними частковими відмовами.

Водночас запропонований підхід має певні обмеження. Точність прогнозування залежить від адекватності динамічної моделі стану та вибору горизонту прогнозування. Збільшення горизонту підвищує випередження, однак може зменшувати точність оцінки за умов нелінійної або стохастичної поведінки системи. Крім того, визначення вагових коефіцієнтів у інтегральній моделі потребує попереднього аналізу критичності вузлів та їх ролі у структурі керування.

Незважаючи на зазначені обмеження, результати дослідження демонструють, що інтеграція агрегованої оцінки стану з прогнозною динамікою формує універсальний механізм попереджувального контролю гарантоздатності у розподілених системах управління БПЛА.

5. Висновки

У роботі розроблено метод оцінювання гарантоздатності розподіленої системи управління БПЛА на основі інтегральної моделі стану та прогновної динаміки показника. Запропоновано формалізоване подання розподіленої системи управління у вигляді орієнтованого графа з локальними векторами стану вузлів, які враховують безвідмовність, доступність, функціональну коректність керування, кіберстійкість та часові характеристики. На цій основі побудовано інтегральну модель гарантоздатності, що забезпечує багатокритеріальне

агрегування різнорідних параметрів у єдиний узагальнений показник у нормованому діапазоні $[0,1]$ та дозволяє кількісно оцінювати поточний рівень функціональної спроможності системи.

Подальший розвиток методу реалізовано шляхом формування прогновної моделі динаміки інтегрального показника на кінцевому горизонті часу, що забезпечує оцінювання тенденції зміни гарантоздатності та ризику виходу системи за критичну межу допустимого стану. Чисельне моделювання в умовах поступової деградації, раптових відмов і комбінованих збурень підтвердило ефективність запропонованого підходу. Середній вигравш часу завдяки використанню прогнозування становить 7,3 кроку дискретизації, що відповідає приблизно 22 % скорочення часу реакції системи порівняно з реактивною стратегією прийняття рішень.

Отримані результати засвідчують, що інтеграція інтегральної моделі стану з механізмом прогновної оцінки формує єдиний алгоритмічний контур попереджувального управління, який підвищує стійкість розподіленої системи управління БПЛА до деградаційних процесів і часткових відмов. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням моделі на стохастичні режими функціонування, адаптивним визначенням вагових коефіцієнтів інтегрального показника та практичною інтеграцією методу до систем підтримки прийняття рішень у реальних комплексах керування БПЛА.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Demirbaga U., Aujla G., Singh M.P., Singh A., Sun H., Camp J. An intelligent monitoring and warning framework in drone swarm digital twin systems. *Proc. of the IEEE International Conference on Communications (ICC 2024)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC51166.2024.10622736>.
2. Peng Y., Yan H., Rao K., Yang P., Lv Y. Distributed model predictive control for unmanned aerial vehicles and vehicle platoon systems: A review. *Intelligence & Robotics*. 2024. Vol. 4 (3). P. 293–317. DOI: <https://doi.org/10.20517/ir.2024.19>.
3. Lv X., Yang R., Zhang H., He W., Feng Z. Cooperative performance assessment of UAV formations under communication delay via belief rule base. *Journal of the Franklin Institute*. 2025. Vol. 362. P. 108103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2025.108103>.
4. Gräfe A., Eickhoff J., Zimmerling M. et al. DMPC-Swarm: Distributed model predictive control on nano UAV swarms. *Autonomous Robots*. 2025. Vol. 49. P. 28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10514-025-10211-w>.
5. Abdulhamid A., Kabir S., Ghafir I., Lei C. An overview of safety and security analysis frameworks for the Internet of Things. *Electronics*. 2023. Vol. 12 (14). P. 3086. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12143086>.
6. Zaitseva E., Levashenko V., Mysko V., Czapp S., Zhaxybayev D. Availability of UAV fleet evaluation based on multi-state system. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 15290–15307. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3358198>.
7. Wang L., Zhao X., Zhang Y., Wang X., Ma T., Gao X. Unmanned aerial vehicle swarm mission reliability modeling and evaluation method oriented to systematic and networked mission. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021. Vol. 34 (2). P. 466–478. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.02.026>.
8. Puchalski R., Giernacki W. UAV fault detection methods, state-of-the-art. *Drones*. 2022. Vol. 6 (11). P. 330. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones6110330>.
9. Sarkar S., Shafaei S., Jones T.S., Totaro M.W. Secure communication in drone networks: A comprehensive survey of lightweight encryption and key management techniques. *Drones*. 2025. Vol. 9 (8). P. 583. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9080583>.
10. Ma Z., Gong H., Wang X. Fault-tolerant event-triggered control for multiple UAVs with predefined tracking performance. *Drones*. 2024. Vol. 8 (1). P. 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8010025>.
11. Zou Z., Yang S., Zhao L. Dual-loop control and state prediction analysis of QUAV trajectory tracking based on biological swarm intelligent optimization algorithm. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. P. 19091. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69911-5>.

12. Yang R., Gong X., Feng Z., Hao Y. Distributed fault-tolerant for leader-following multi-unmanned aerial vehicle systems with faulty sensors based on belief rule base. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 157. P. 111388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111388>.
13. Al-Haddad L.A., Khalid W., Tariq S.Z., Mrah M.M., Flah A., Tazay A.F., Jaber A.A. Reliability-oriented framework for UAV-based inspection missions in modern power and energy systems. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 16 (1). P. 958. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30410-w>.
14. Костюк Ю., Бебешко Б., Крючкова Л., Литвинов В., Оксанич І., Складанний П., Хорольська К. Захист інформації та безпека обміну даними в безпроводових мобільних мережах з аутентифікацією і протоколами обміну ключами. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2024. № 1 (25). P. 229–252. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.229252>.
15. Zhao X., Zhao T., Wang F., Wu Y., Li M. SAC-based UAV mobile edge computing for energy minimization and secure data transmission. *Ad Hoc Networks*. 2024. Vol. 157. P. 103435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103435>.
16. Kostiuk Y., Skladannyi P., Sokolov V., Rzaieva S. Intelligent system for simulation modeling and research of information objects. *Proc. of the 1st Workshop on Software Engineering and Semantic Technologies (SEST 2025) (CEUR-WS)*. 2025. Vol. 4053. P. 237–251.
17. Fu M., Yu Z. Resilient tracking control of UAV with event-triggered communication against stochastic DoS attacks and faults. *Information Sciences*. 2026. Vol. 735. P. 123074. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2026.123074>.
18. Chen Y., Deng T. Leader-follower UAV formation flight control based on feature modelling. *Systems Science & Control Engineering*. 2023. Vol. 11. Article 2268153. DOI: <https://doi.org/10.1080/21642583.2023.2268153>.
19. Kostiuk Y., Skladannyi P., Samoilenko Y., Khorolska K., Bebeshko B., Sokolov V. A system for assessing the interdependencies of information system agents in information security risk management using cognitive maps. *Proc. of the Third International Conference on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks (CH&CMiGIN'24) (CEUR-WS)*. 2024. Vol. 3925. P. 249–264.
20. Rzaeva S., Skladannyi P., Kostiuk Y., Abramov V., Kravchenko V. Adaptive information security management in cloud-oriented intelligent transportation systems. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2025. Vol. 31 (1). P. 23–36. DOI: <https://doi.org/10.18372/2225-5036.31.20634>
21. Subramaniyan M., Venkatasamy T.K., Mathiyalagan N., Hossen A. Adaptive resource allocation and routing for integrated sensing and communications for wireless technologies. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2025. Article 2461. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13638-025-02461-0>.
22. Skladannyi P., Kostiuk Y., Sokolov V., Khorolska K. Network traffic analysis and management / A.L. Agbotiname et al. (eds.). *Handbook of cybersecurity challenges and solutions for emerging technologies*. 2026. P. 148–172. CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003640790-9>.
23. Kostiuk Y., Skladannyi P., Korshun N., Bebeshko B., Khorolska K. Integrated protection strategies and adaptive resource distribution for secure video streaming over a Bluetooth network. *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (CPITS-II 2024) (CEUR-WS)*. 2024. Vol. 3826. P. 129–138.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2026 / прийнята до друку 28.04.2026