

О. Б. Аніпко¹
В. Ю. Тюріна¹
О. М. Панкул¹

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ДІАГНОСТИКИ ТА ПРОФІЛАКТИКИ ПРИХОВАНИХ ВІДМОВ, СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

¹Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків.

У статті розглянуто проблему діагностики та профілактики прихованих відмов у складних технічних системах (СТС) транспортних засобів, зокрема повітряних суден, які мають емерджентну природу та виникають не на рівні окремих елементів, а як нова властивість системи в цілому [7], [8], [10]. Показано, що приховані відмови проявляються у хибному відгуку при зовнішній працездатності, що створює небезпеку для експлуатації та ускладнює процес їхнього виявлення [3], [12], [13]. Вперше доведено, що неможливість діагностування прихованої відмови призводить до втрати керованості об'єкта у логістичній структурі технічної експлуатації, де час виступає найціннішим і незворотним ресурсом [1], [2], [5]. Розроблено обмеження щодо втрати ресурсів на діагностування відмови, які визначають доцільність подальшої експлуатації транспортного засобу [4], [20].

Особливу увагу приділено аналізу логістичної системи відмов, яка визначає ефективність використання матеріально-технічних засобів, персоналу та діагностичних ресурсів [6], [15], [16]. Показано, що ймовірність виявлення причини прихованої відмови має нелінійний характер: спочатку вона зростає, але після певного порогу різко знижується, що потребує переходу на нові рівні діагностики або заміни об'єкта [17], [18]. Такий процес формує обмеження щодо витрат часу та ресурсів, які повинні бути враховані при прийнятті рішень про подальшу експлуатацію [5], [12].

Запропоновано підхід до профілактики прихованих відмов, який включає конструктивний, діагностичний, організаційний та аналітичний рівні [13], [15]. Показано, що метод дерева відмов (FTA) є ефективним інструментом для структурованого аналізу та виявлення емерджентних ефектів, коли комбінація факторів породжує нову системну властивість – приховану відмову [10], [16]. Практичні приклади з сенсорних систем та теплообмінників демонструють, що приховані відмови мають як технічну, так і економічну природу, впливаючи на точність вимірювань, енергоємність продукту та витрати на експлуатацію транспортних засобів [3], [17].

У статті також розглянуто концепцію аутопойезису як умову підтримання життєздатності складних технічних систем [9], [11], [14], [19]. Здатність до самоконтролю, самокорекції та узгодження внутрішньої моделі з фактичним станом визначається як ключовий механізм запобігання трансформації прихованої відмови у явну чи катастрофічну [21]. Таким чином, профілактика прихованих відмов розглядається не лише як технічне завдання, а й як функція логістичної системи, що забезпечує оптимізацію ресурсів, управління ризиками та підтримання надійності транспортних засобів протягом усього життєвого циклу [6], [15], [16].

Ключові слова: авіаційний транспорт, повітряне судно, надійність, діагностика, життєвий цикл, технічний стан, експлуатація, обмеження ресурсів, прогнозування, функція надійності, прихована відмова, профілактичні роботи, складна технічна система (СТС), дерево відмов (FTA), гідравлічний опір, забруднення, емерджентність, логістична система, ергатичні властивості, аутопойезис, самокорекція, економічні показники, економічні витрати, залишкова вартість, вартість експлуатації, амортизація.

Вступ

Забезпечення надійності складних технічних систем (СТС), які є ключовими складовими авіаційного транспорту (енергетичних установок, бортового обладнання), є проблемним завданням, що має неперехідне значення [1], [2]. Вимоги до надійності такого роду об'єктів формуються на концептуальному етапі розробки з подальшим інженерним, технологічним, технічним забезпеченням досягнення заданого рівня надійності [1], [2]. Як відомо, проектування здійснюється для заданих умов, однак передбачити дійсні умови експлуатації перспективного зразка, а особливо прогнозувати його властивості та вплив навіть парних (не кажучи про більш складні) поєднань різних факторів досить проблематично, а часто неможливо [3], [4].

Тому дійсні властивості спроектованого об'єкта визначають експериментальним шляхом під час випробувань.

Очевидно, що такого роду випробування проводяться в обмежений проміжок часу, що не дозволяє врахувати всі можливі фактори та їхні комбінації. Тому вже на етапі серійного виробництва здійснюється доопрацювання окремих елементів. На всіх цих етапах може спостерігатися стан, коли за зовнішніми ознаками система функціонує, однак її відгук на входні дії є хибним. У моделі «чорної скриньки» [1], це проявляється як правильна робота елементів, але неправильний вихідний сигнал. Саме такий стан елемента або системи, коли він функціонує, за зовнішніми ознаками справний, але працює неправильно – будемо називати прихованою відмовою [4], [5]. Він має емерджентний характер, оскільки виникає не в окремих деталях, а на рівні системи в цілому, коли взаємодія компонентів породжує небажану властивість, яку неможливо пояснити лише через аналіз елементів [7].

Латентна умова відмов полягає саме в їхній емерджентній природі: аналіз стану функціонуючої системи не дозволяє їх діагностувати без зовнішнього еталону [8]. Простим прикладом є механічний годинник, який «поспішає» або «відстає». Його механізм справний працює, стрілки рухаються, але емерджентна властивість системи – точність показу часу – порушена. Відмова проявляється лише у взаємодії з іншою системою (іншим годинником чи генератором частоти), що дозволяє виявити похибку. Таким чином, приховані відмови слід розглядати як емерджентні явища, які виникають на рівні цілого й потребують спеціальних методів діагностики та порівняння з незалежними еталонами для їхнього виявлення [7].

Таким чином можна зробити висновок, що приховані відмови мають різні форми прояву та походження. Вони можуть проявлятися:

- одразу після запуску системи;
- поступово з плином часу.

Причиною прихованих відмов може бути:

- один окремий фактор;
- сукупність взаємодіючих факторів.

За своїм походженням приховані відмови можуть бути:

- властивістю окремого елемента чи всієї системи;
- наслідком ергатичних властивостей СТС, коли взаємодія людини, техніки та середовища породжує емерджентні ефекти, які не можна пояснити лише через аналіз окремих компонентів [9].

Слід констатувати, що прихована відмова не може бути виявлена лише із застосуванням зовнішніх засобів діагностики. Профілактика відмови передбачає насамперед ідентифікацію елементів, які потенційно можуть працювати неправильно, навіть якщо система зовні функціонує. Це означає, що ключовим завданням є виявлення тих компонентів, у яких приховані дефекти здатні породити – хибний відгук системи, що не зводиться до стану окремої деталі, а виникає на рівні цілого [10], [12].

Показовим прикладом є вимірювання температури термопарою (аналогічні сенсорні системи широко використовуються для контролю критичних параметрів в СТС повітряного судна. Якщо один із провідників пошкоджений, сигнал відсутній, і ми маємо справу з явною, відмовою пристрою. У випадку неякісної пайки виникає додатковий опір, і прилад (вольтметр чи амперметр) продовжує показувати значення, які за тарувальним графіком відповідають певній температурі. Зовні система функціонує, але показники є невірними. Це і є прихованою відмовою, яка проявляється не як дефект окремого елемента, а як нова системна властивість – хибна точність вимірювання, яка виникає лише у взаємодії елементів і не може бути діагностована без спеціальних методів контролю [5], [12].

Приховані відмови можуть мати різну природу та походження: вони можуть бути наслідком ергатичних властивостей СТС, коли взаємодія екіпажу, техніки та середовища породжує емерджентні ефекти [3], [9].

При аналізі СТС для виявлення прихованих відмов доцільно застосовувати метод «дерева відмов» (Fault Tree Analysis, FTA). Цей метод добре розроблений і систематично використовується у практиці досліджень надійності [6], [13].

Підкреслимо, що його перевага полягає не лише у можливості структурувати аналізовану систему, але й у здатності простежити різні сценарії функціонування її елементів. Саме завдяки цьому FTA дозволяє виявляти емерджентні ефекти, коли комбінація окремих факторів породжує нову системну властивість – прихована відмова, яка не може бути діагностована через аналіз окремих компонентів [4], [9].

Особливо актуальним є застосування цього методу для об'єктів теплоенергетики, зокрема агрегатів-рекуперативних теплообмінників [8]. З точки зору надійності саме теплообмінний апарат є найбільш проблемним елементом системи.

Так, розрахунок теплообмінної поверхні за відомої (заданої) температури на вході та на виході здійснюється за відомим рівнянням [12]:

$$F_{\tau 0} = \frac{Q}{k; \Delta t}; \quad (1)$$

де

$$k = \frac{1}{\frac{1}{d_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{d_2}} \quad (2)$$

Таким чином розрахунок ведеться для чистої поверхні. Як було показано в низці публікацій, у процесі експлуатації коефіцієнт теплопередачі також працюючого теплообмінника зменшується через забруднення які утворюють відкладення на теплопередавальній поверхні, тоді (2) має вигляд:

$$\bar{k}(\bar{\tau}) = \frac{1}{\frac{1}{d_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{d_2} + \frac{\delta_3^{(\bar{\tau})}}{\lambda_3}} = \frac{1}{\frac{1}{d_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{d_2} + R_3^{(\bar{\tau})}} \quad (3)$$

де

$$R_3^{(\bar{\tau})} = \frac{\delta_3^{(\bar{\tau})}}{\lambda_3} \quad - \text{термічний опір теплопередачі шару забруднень, що має теплопровідність } \lambda_3,$$

$\bar{\tau}$ – час роботи теплообмінника.

Практично це призводить до недогріву теплоносія, тобто його температура на виході нижча за розрахункове значення. Крім цього, зменшення прохідного перерізу каналу вимагає підвищеної потужності на прокачування теплоносія з тією ж (заданою) швидкістю. Якщо потужність залишається тією ж, то швидкість потоку знижується, що призводить до зменшення коефіцієнта тепловіддачі α , а отже, і коефіцієнта теплопередачі k [13], [14].

В іншому випадку, якщо зростає потужність і швидкість підтримуються на необхідному рівні, то ситуацію не можна вважати задовільною, оскільки зростає енергоємність кінцевого продукту. Отже, під надійною роботою рекуперативного теплообмінника слід розуміти таке його функціонування, коли він забезпечує задані температури на виході з нього при встановленому рівні витрат енергії для прокачування теплоносія [15].

Формально це можна записати як:

$$t_1'' = t_1^{зад} \pm \Delta_1 \quad (4)$$

$$t_2'' = t_2^{зад} \pm \Delta_2 \quad (5)$$

$$N_1 = G_1 \Delta P_1 \leq N_1^{зад} \quad (6)$$

$$N_2 = G_2 \Delta P_2 \leq N_2^{зад} \quad (7)$$

де показники «зад.» – означає для заданих значень відповідно, G – витрата теплоносія, ΔP_i – гідравлічний опір, N_i – потужність.

Таким чином, можна зробити висновок, що проблема прихованих відмов має системний і комплексний характер. Вирішення цієї проблеми пов'язане насамперед із визначенням ознак прихованої відмови, які для елементів технічних систем різного роду суттєво відрізняються.

Методи діагностики та профілактики прихованих відмов можуть і повинні розроблятися вже на ранніх етапах проектування. Тут доцільно застосування методу ФТА.

Загалом цей напрямок знаходить своє місце в техніці на початковому етапі і вимагає подальших систематичних досліджень з урахуванням безперервно зростаючих вимог як до надійності загалом, так і до безпеки складних технічних систем зокрема.

При аналізі стану технічної системи у режимі прихованої «відмови» особливу увагу слід приділити особливостям функціонування логістичної системи на етапі технічної експлуатації життєвого циклу.

Відомо [12], що функцію надійності об'єкта у загальному випадку можна подати як суму двох складових:

$$G(t) = P(t) + R(t) \quad (8)$$

де $P(t)$ – випадкова стаціонарна функція надійності; $R(t)$ – випадкова нестаціонарна функція надійності.

Зрозуміло, що $P(t)$ є малочутливою до впливу зовнішніх факторів. З певним ступенем припущення можна стверджувати, що ця функція описує надійність у розрахунковому та наближених до нього режимах експлуатації.

Таким чином, складова $R(t)$ є результатом впливу зовнішніх факторів. Формально можна записати:

$$G(t) = P(t) \quad (9)$$

де $R(t)=0$ – розрахунковий режим.

У реальних умовах експлуатації:

$$G(t) = P(t) + R(t) \quad (10)$$

де $P(t)+R(t)$ – дійсна функція надійності з урахуванням зовнішніх факторів.

Розрахунковий режим експлуатації зазвичай описується функцією:

$$P(t) = f(\lambda, t) \quad (11)$$

де $f(\lambda, t)$ – функція розподілу, що описує залежність надійності від часу експлуатації t та інтенсивності відмов λ ; λ – інтенсивність відмов, визначена на підставі випробувань і статистики експлуатації.

На основі достатньо добре вивчених даних, випробувань та практичної експлуатації визначають також споживання ресурсу, необхідного для забезпечення потрібного рівня надійності. Таким чином, функція витрат на підтримання заданого рівня надійності в розрахунковому режимі має наступний вигляд:

$$S_{pp}(t) = \varphi(P(t)) = \varphi(f(\lambda, t)) \quad (12)$$

де $\varphi(P(t))$ – оператор перетворення, що відображає залежність витрат від параметрів надійності.

Натомість формалізувати складову $R(t)$ у разі прихованих відмов досить складно. Що ж відбувається з логістичною системою у разі наявності об'єкта у стані «прихованих відмов» [16].

У цьому випадку об'єкт або не функціонує, або функціонує неправильно, тобто не може бути використаний за призначенням. Далі розпочинається процес діагностики «прихованих відмов» і пошуку причини такого стану. Практичний досвід свідчить: якщо протягом певного часу причина не виявлена, то з використанням наявних ресурсів вона не може бути встановлена. Формально ймовірність виявлення причини спочатку зростає, а потім – через вичерпання певного тимчасового ресурсу – різко знижується та прямує до нуля [17]. Схематично цей процес подано на рисунку 1.

При цьому час певної величини $\leq t_{\max}^{\text{виявл}}$ вже витрачено, були залучені людські та технічні ресурси, але результату не отримано. Тоді необхідно перейти на наступний, більш високий рівень діагностики (рис. 1). Однак, і на цьому рівні результат може бути відсутній. У такому разі знову потрібен перехід на новий рівень і так далі – доки причина не буде встановлена або об'єкт не буде визнаний непридатним до експлуатації.

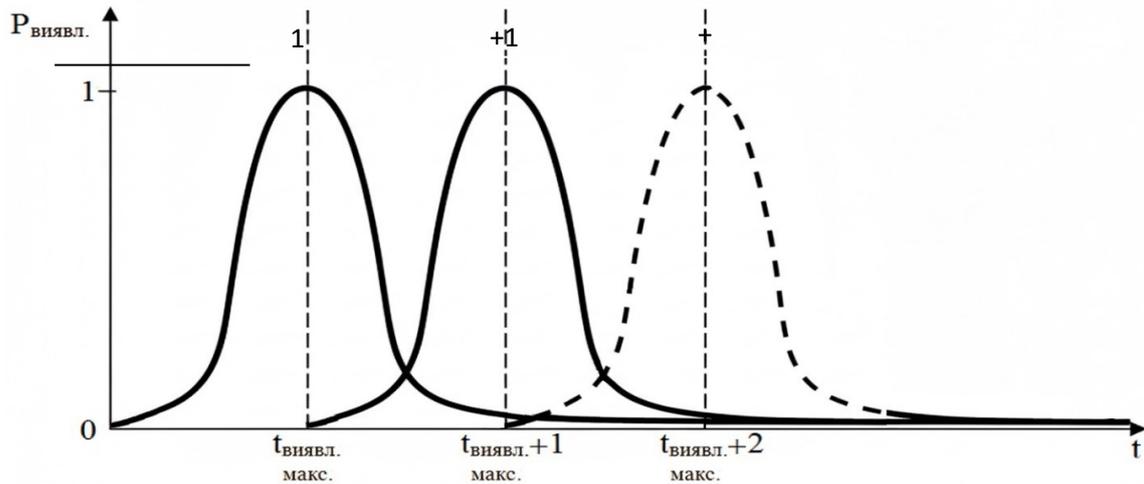


Рис. 1. Ймовірність виявлення причини "прихованої відмови".

При цьому витрати на першому рівні часу $\leq t_{\max}^{\text{виявл}}$ та їх вартість подамо у вигляді:

$$\left| C_{\text{МТЗ}} + 3_{\text{ТП}} + C_{\text{діагн}} \right|, \quad (13)$$

де $C_{\text{МТЗ}}$ – витрати на матеріально-технічне забезпечення робіт; $3_{\text{ТП}}$ – заробітна плата технічного персоналу; $C_{\text{діагн}}$ – витрати, пов'язані із засобом діагностики.

На другому та наступних рівнях діагностики структура витрат залишається такою ж. Таким чином, для всього процесу:

$$t_{\Sigma}^{\text{виявл}} \leq \sum_{i=1}^n \left(t_{\max}^{\text{виявл}} \right)_i,$$

$$C_{\Sigma}^{\text{виявл}} = \sum_{i=1}^n \left(C_{\text{МТЗ}} + 3_{\text{ТП}} + C_{\text{діагн}} + \Delta \right)_i, \quad (14)$$

де Δ – інші витрати.

З урахуванням обмеженості ресурсів необхідно виконувати умови:

$$t_{\Sigma}^{\text{виявл}} \leq \left| t_{\text{принуст}}^{\text{виявл}} \right|$$

$$C_{\Sigma}^{\text{виявл}} < \left| C_{\text{принуст}}^{\text{виявл}} \right| \quad (15)$$

У разі невиконання умов (15) подальша експлуатація об'єкта повинна бути визнана недоцільною на відповідному рівні логістичної системи.

З іншого боку, під час проведення діагностики невідомо, коли саме буде отримано результат, і принципово невідомо, чи буде він отриманий взагалі.

Такий стан об'єкта слід розглядати як втрату управління його функціонуванням у логістичній структурі. Важливо, що час виступає найціннішим ресурсом, оскільки він має незворотний характер і не може бути відновлений чи компенсований іншими засобами. З огляду на це, обмеження допустимого часу реагування повинні розглядатися як пріоритетні та достатньо жорсткі. Їхня мета полягає у забезпеченні своєчасної заміни некерованого об'єкта працездатними елементами, що уможливорює підтримання безперервного функціонування системи в цілому [16].

Методи запобігання прихованим відмовам доцільно розробляти вже на ранніх етапах проектування складних технічних систем (СТС). У випадку СТС, що інтегрують елементи штучного та природного інтелекту, профілактика набуває особливого значення й безпосередньо пов'язується з концепцією аутопойєзису – здатності системи до самоорганізації та самовідтворення [18], [19], [20], [21].

У практичному аналізі прихованих відмов СТС (наприклад, авіаційна система, де відмови можуть бути латентними) ми можемо сказати, що аутопойєзис вимагає від системи виявлення та підтримки цих властивостей, щоб вона залишалася життєздатною. Інакше приховані відмови руйнують її самовідтворюваність.

Аутопойєзис передбачає від СТС наявність двох ключових властивостей:

- формування внутрішньої моделі яка забезпечує узгодженість між зовнішніми впливами та внутрішнім станом [18], [21];
- рефлексія та самореференція гарантують здатність системи взаємодіяти із середовищем, зберігаючи власну ідентичність [19], [20].

Прихована відмова у цьому контексті постає як невідповідність між внутрішньою моделлю системи та її фактичним станом. Відтак профілактика має ґрунтуватися на вдосконаленні механізмів самоконтролю та самокорекції, що дозволяють системі самостійно виявляти й усувати такі відхилення. Це, у свою чергу, запобігає трансформації прихованої відмови у явний чи катастрофічний [10], [12], [15].

Таким чином, профілактика прихованих відмов – це не лише технічна задача, а й умова підтримання аутопойєтичної здатності системи. Вона гарантує, що система не втратить свою життєздатність через невидимі розриви між внутрішньою моделлю та реальністю.

Висновки

Головною проблемою забезпечення надійності сучасних СТС, особливо в авіації, є так звані системні, неявні відмови. Вони проявляються у хибній роботі чи невірних вихідних даних, тоді як усі окремі компоненти зовні виглядають справними. Це вимагає переходу від простого контролю елементів до оцінки валідності (правильності) функціонування системи в цілому.

Протидія прихованим відмовам базується на регламентованих логістичних критеріях, що вводять безумовні обмеження за часом і вартістю діагностики.

Ефективна профілактика цих відмов передбачає застосування структурованого аналізу ризиків на етапі проектування. В теоретичному плані надійність СТС пов'язується зі здатністю системи до самоконтролю та самокорекції (аутопойєзису), що є фундаментальною умовою підтримання її життєздатності та запобігання трансформації прихованих відмов у катастрофічні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРА

- [1]. О.Б. Аніпко, С.А. Калкаманов, А.В. Приймак. «Формули пріоритетів і хінсайд-аналіз при варіантних проробках на етапі концептуального проектування транспортного літака». *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. №2. С. 11–19. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2020.2.02>.
- [2]. O. Anipko, V. Loginov. «An “Integration index” for determining the degree of subsystem integration in passenger and transport aircraft designs». *Transactions on Aerospace Research*. 2024. Vol. 277, №4. P. 27–44. <https://doi.org/10.2478/tar-2024-0021>.
- [3]. О.Б. Аніпко., М.Ф. Білий. «Дистрибутивний підхід до аналізу готовності авіаційного парку з формалізацією прихованих відмов». *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2020. №2 – С. 79-83. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2020.2.09>.
- [4]. ДСТУ 2498-94. Основні норми взаємозамінності. Допуски форми та розташування поверхонь. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994.
- [5]. О.Б. Аніпко., А.В. Приймак. «Комплексування показників досконалості транспортних систем». *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. №4. С. 43–50.
- [6]. О.Д. Мороз. *«Нові інформаційні технології, моделювання та автоматизація: колективна монографія»*. Київ: Техніка, 2023. 320 с.
- [7]. М.М. Мітрахович. «Складні технічні системи. Системне математичне забезпечення проектних рішень». Київ. *Інститут проблем математичних машин і систем*. 1998.
- [8]. Bar-Yam Y. General features of complex systems. *Encyclopedia of life support systems*. Oxford, 2002. <https://www.eolss.net>.
- [9]. Z. Benedikt, M. Dzhimova, G Socher. «From intelligence to autopoiesis: rethinking artificial intelligence through systems theory». 2025. <https://doi.org/10.3389/fcomm.2025.1585321>.
- [10]. Я.І. Виклюк, Р.М. Камінський, В.В. Пасічник. «Моделювання складних систем: навчальний посібник». Львів: НУ «Львівська політехніка», 2024. 248 с.
- [11]. H.R. Maturana, F.J. Varela. «Autopoiesis and cognition: the realization of the living». Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1972.
- [12]. С.Г. Костогриз. «Надійність технічних систем». Хмельницький. Хмельницьким національним університетом. 2002. 324 с.
- [13]. Н.А. Максимов, С.А. Боборькин, А.И. Виноградов, В.П. Кузьмин. «Инженерно-авиационная служба и эксплуатация летательных аппаратов». Киев: КВИАВУ ВВС, 1969. 467 с.
- [14]. A. Bindayel, H. Elsayed, M. Khan. «AI and self reflection. Artificial intelligence in HCI». *Lecture notes in computer science*, 2024. Vol. 15819. P. 289–302.
- [15]. J. Lucero. «Systems engineering with a focus on failure prevention». *Proceedings of the MFPT conference*. NASA Glenn Research Center. 2023.

- [16]. Ivo Häring «*Technical safety, reliability and resilience*». Cham: springer international publishing. 2022. Vol. 308.
- [17]. V. Verma. «Aircraft predictive maintenance: An application of machine learning algorithms» [Interim Report]. Liverpool John Moores University. 2024 Jul. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16964.44165>.
- [18]. О. Аніпко, А. Приймак, Ю. Миргород. «Перечень показателей свойств и база данных ТТХ транспортного летательного аппарата как сложной технической системы». *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2013. №1. С. 123–125.
- [19]. L. UFloridi. «Info-autopoiesis and the limits of artificial general intelligence». 2023. Vol. 12(3). P. 45–60. <https://doi.org/10.3390/computers12030045>.
- [20]. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994.
- [21]. University of Freiburg. «Analyzing internal world models of humans, animals and AI». 2024. Vol. 112(5). P. 789–803. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2024.05.012>.

Стаття надійшла 15.10.2025

Аніпко Олег Борисович – д-р техн. наук, професор кафедри інженерно-авіаційного забезпечення, <https://orcid.org/0000-0003-3678-2529>, e-mail: o.m.pankul@gmail.com;

Тюріна Валерія Юрїївна – канд. техн. наук, кафедра інженерно-авіаційного забезпечення, <https://orcid.org/0000-0003-3444-143X>, e-mail: valery.kharkiv@gmail.com;

Панкул Олександр Миколайович – старший викладач кафедри інженерно-авіаційного забезпечення, <https://orcid.org/0000-0003-3005-0730>, e-mail: o.m.pankul@gmail.com.

O. B. Anipko¹
V. Yu. Tyurina¹
O. M. Pankul¹

THEORY AND PRACTICE OF DIAGNOSTICS AND PREVENTION OF HIDDEN FAILURES IN COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

¹Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv.

The article examines the problem of diagnostics and prevention of hidden failures in complex technical systems (CTS) of transport vehicles, particularly aircraft, which possess an emergent nature and arise not at the level of individual elements but as a new property of the system as a whole. It is shown that hidden failures manifest themselves in false responses under external operability, creating hazards for operation and complicating their detection. For the first time, it has been demonstrated that the impossibility of diagnosing a hidden failure leads to the loss of controllability of the object within the logistic structure of technical operation, where time acts as the most valuable and irreversible resource. Restrictions have been developed regarding the loss of resources during failure diagnostics, which determine the feasibility of further operation of the transport vehicle.

Special attention is paid to the analysis of the logistic system of failures, which defines the efficiency of using material and technical means, personnel, and diagnostic resources. It is shown that the probability of identifying the cause of a hidden failure has a nonlinear character: initially it increases, but after a certain threshold it sharply decreases, necessitating a transition to new levels of diagnostics or replacement of the object. This process establishes constraints on time and resource expenditures, which must be considered when making decisions about continued operation.

An approach to the prevention of hidden failures is proposed, encompassing constructive, diagnostic, organizational, and analytical levels. It is demonstrated that the fault tree analysis (FTA) method is an effective tool for structured system analysis and for identifying emergent effects, when combinations of factors generate a new system property - a hidden failure. Practical examples from sensor systems and heat exchangers illustrate that hidden failures have both technical and economic dimensions, affecting measurement accuracy, product energy intensity, and operating costs of transport vehicles.

The article also considers the concept of autopoiesis as a condition for maintaining the viability of complex technical systems. The ability for self-control, self-correction, and alignment of the internal model with the actual state is defined as a key mechanism for preventing the transformation of hidden failures into explicit or catastrophic ones. Thus, the prevention of hidden failures is regarded not only as a technical task but also as a function of the logistic system, ensuring resource optimization, risk management, and reliability of transport vehicles throughout their entire life cycle.

Keywords: aviation transport, aircraft, reliability, diagnostics, life cycle, technical condition, operation, resource constraints, forecasting, reliability function, hidden failure, preventive maintenance, complex technical system (CTS), fault tree analysis (FTA), hydraulic resistance, contamination, emergence, logistic system, ergatic properties, autopoiesis, self-correction, economic indicators, economic costs, residual value, operating cost, amortization.

Anipko Oleh Borysovych – doctor of technical sciences, professor of the department of aviation engineering support, <https://orcid.org/0000-0003-3678-2529>, e-mail: o.m.pankul@gmail.com;

Tiurina Valeriia Yuriivna – candidate of technical sciences, department of aviation engineering support, <https://orcid.org/0000-0003-3444-143X>, e-mail: valery.kharkiv@gmail.com;

Pankul Oleksandr Mykolaiovych – senior lecturer of the department of aviation engineering support, <https://orcid.org/0000-0003-3005-0730>, e-mail: o.m.pankul@gmail.com.