

DOI: 10.18372/2310-5461.70.21201
УДК 621.396.6.004.15

А. О. Плуговий, аспірант
Національний університет «Київський Авіаційний Інститут»
<https://orcid.org/0009-0002-9830-9331>
E-mail: 1819713@stud.kai.edu.ua

МЕТОДИ МОНИТОРИНГУ СТАНУ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Вступ

Сучасні повітряні судна характеризуються високим рівнем насиченості електронними системами, які забезпечують навігацію, зв'язок, індикацію, автоматизоване керування, електропостачання, контроль параметрів силової установки, реєстрацію польотної інформації та взаємодію екіпажу з бортовими комплексами. Надійність цих систем безпосередньо впливає на безпеку польотів, регулярність експлуатації та витрати на технічне обслуговування. Ускладнення архітектури авіоніки зумовлює необхідність не лише періодичної перевірки її працездатності, а й постійного спостереження за зміною параметрів у процесі експлуатації.

Перспективним напрямом розвитку моніторингу електронних систем повітряних суден є використання технологій Інтернету речей. У загальному вигляді IoT-підхід передбачає об'єднання датчиків, вбудованих засобів діагностування, каналів передавання даних, бортових і наземних інформаційних систем та аналітичних платформ у єдине середовище обробки технічної інформації. Це дає змогу перейти від розрізненого аналізу окремих повідомлень про несправності до комплексного аналізу динаміки параметрів електронних систем [1, 2].

Водночас використання Інтернету речей (IoT) в авіаційній галузі має суттєві особливості. Йдеться не про відкрите підключення бортових систем до зовнішніх мереж, а про контрольовану архітектуру обміну даними, у якій забезпечуються цілісність, захищеність, достовірність і простежуваність інформації. Особливо важливим є недопущення впливу зовнішніх інформаційних каналів на критичні функції повітряного судна. Тому IoT-моніторинг електронних систем має розглядатися як допоміжний інструмент технічної експлуатації, орієнтований на збір діагностичних даних, їх післяпольотний аналіз і підтримку прийняття рішень інженерно-технічним персоналом [3, 4].

Постановка проблеми

У процесі експлуатації повітряних суден електронні системи формують значний обсяг діагностичної інформації, однак її використання в системі технічного обслуговування не завжди є достатньо повним і системним. Бортові повідомлення про несправності, результати самодіагностики, журнали подій і параметричні дані часто аналізуються окремо, без урахування динаміки їх зміни, повторюваності подій, якості даних та зв'язку з попередніми технічними діями.

Особливо актуальною ця проблема є для старіючого парку повітряних суден. Електронні системи однакового типу можуть мати різну історію експлуатації, різну кількість ремонтних втручань, різні умови роботи та різну інтенсивність появи діагностичних подій. У таких умовах використання лише регламентних перевірок і разових повідомлень про несправність не завжди дозволяє своєчасно виявити приховану деградацію або обґрунтовано визначити пріоритет технічного реагування.

Проблема полягає в необхідності переходу від фрагментарного контролю окремих електронних блоків до системного IoT-моніторингу, який поєднує бортові джерела даних, захищене передавання інформації, наземну аналітичну обробку, оцінювання якості даних і підтримку прийняття рішень у системі технічного обслуговування. При цьому важливо враховувати стохастичний і нестаціонарний характер діагностичних параметрів, можливість виникнення ефекту «розладнання» та необхідність індивідуалізації технічного обслуговування конкретного повітряного судна.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання використання IoT-технологій у технічних системах розглядається в роботах, присвячених архітектурі Інтернету речей, обміну даними та побудові розподілених інформаційних платформ [1, 2]. Для авіаційної галузі особливого значення набувають вимоги до підтримання льотної

придатності, безпеки програмного й апаратного забезпечення, захищеності інформаційного обміну та недопущення впливу на критичні функції повітряного судна [3–8].

Сучасні дослідження з діагностування, прогнозування технічного стану та condition-based maintenance підкреслюють важливість аналізу експлуатаційних даних, повторюваності подій, трендів параметрів і прогнозування майбутнього стану технічних систем [9, 10]. Разом з тим для електронних систем повітряних суден актуальною залишається проблема інтерпретації неповних або суперечливих даних, а також обробки нестационарних процесів із урахуванням ефекту «розладнання» [11–14]. Це зумовлює необхідність адаптації методів IoT-моніторингу до умов експлуатації авіаційної техніки, особливо старіючого парку повітряних суден.

Мета дослідження – проаналізувати методи IoT-моніторингу стану електронних систем повітряних суден з урахуванням особливостей експлуатації старіючого парку, стохастичного характеру зміни діагностичних параметрів, нестационарності їх трендів та необхідності використання алгоритмів обробки експлуатаційних даних для підтримки технічного обслуговування за фактичним станом.

Для досягнення поставленої мети необхідно визначити особливості застосування IoT-підходу в авіаційній техніці; розглянути джерела моніторингових даних і схему їх руху від повітряного судна до наземної системи технічної експлуатації; охарактеризувати методи обробки моніторингових даних; обґрунтувати роль показників якості даних, пріоритету реагування та критичності системи у формуванні рішень щодо технічного обслуговування; показати можливість використання IoT-моніторингу для індивідуалізації технічного обслуговування електронних систем старіючого парку повітряних суден.

Особливості IoT-моніторингу електронних систем повітряних суден

Моніторинг стану електронних систем повітряного судна з використанням Інтернету речей доцільно розглядати як процес систематичного отримання, передавання, накопичення та аналітичної обробки технічної інформації, що формується в умовах реальної експлуатації. На відміну від разового контролю, який переважно завершується висновком про справність або несправність системи, IoT-моніторинг орієнтований на відстеження динаміки параметрів у часі. При цьому тренди діагностичних параметрів мають стохастичний характер: вони формуються під впливом режимів польоту, температурних навантажень, вібрації,

якості електроживлення, деградації компонентів, ремонтних дій і випадкових експлуатаційних факторів. Тому в системі IoT-моніторингу важливо враховувати не лише поточне значення параметра, а й характер його зміни, можливу нестационарність та появу моментів «розладнання» [11–14].

Джерелами моніторингової інформації є електронні блоки, датчики, засоби ВІТЕ/ВІТ, бортові системи технічного обслуговування, реєстратори параметрів і журнали подій. Частина даних формується безпосередньо під час польоту, частина – під час наземної перевірки або післяпольотного вивантаження інформації. Для подальшого аналізу важливо фіксувати не лише значення параметра, а й джерело його отримання, момент часу та ознаку якості або достовірності даних. У загальному вигляді одиницю моніторингових даних, отриману від електронної системи в момент часу t_k , можна подати так:

$$M(t_k) = \{ID_s, t_k, p_1(t_k), p_2(t_k), \dots, p_n(t_k), q(t_k)\}, \quad (1)$$

де $M(t_k)$ – набір моніторингових даних у момент часу t_k ; ID_s – ідентифікатор електронної системи або блока; $p_1(t_k), p_2(t_k), \dots, p_n(t_k)$ – параметри, що реєструються засобами моніторингу; $q(t_k)$ – ознака якості або достовірності отриманих даних.

Така форма подання дозволяє враховувати не лише значення параметрів, а й контекст їх отримання. Це важливо для авіаційної техніки, оскільки діагностичний висновок має базуватися не на одиначному повідомленні, а на послідовності даних, що відображають поведінку системи в процесі експлуатації. Для старіючого парку повітряних суден це має додаткове значення, оскільки однакові за типом електронні системи можуть мати різну історію експлуатації, різні умови роботи, різну кількість ремонтних втручань і різну інтенсивність появи діагностичних подій.

У структурі IoT-моніторингу важливо розглядати не лише склад технічних засобів, а й маршрут проходження діагностичної інформації від борту повітряного судна до наземних підрозділів технічної експлуатації. На борту дані можуть передаватися через інформаційні шини, захищені інтерфейси обміну, післяпольотне вивантаження або спеціалізовані канали технічної інформації. Після отримання з борту вони надходять до авіаційно-технічної бази, ангару технічного обслуговування, інженерного центру, служби надійності, бази даних експлуатації та аналітичної платформи експлуатаційної організації.

На наземному рівні виконується перевірка повноти й достовірності даних, їх синхронізація, накопичення, зіставлення з історією експлуатації, аналіз повторюваності подій і формування рекомендацій щодо подальших технічних дій. Такий підхід дає змогу не просто накопичувати параметри, а формувати індивідуальний інформаційний

профіль конкретного повітряного судна. Саме це створює передумови для індивідуалізації технічного обслуговування старіючого парку, коли рішення приймаються з урахуванням фактичного

стану конкретного борту, а не лише за усередненими регламентними інтервалами.

Узагальнену схему руху моніторингових даних від повітряного судна до наземної системи технічної експлуатації наведено на рис. 1.



Рис. 1. Узагальнена схема руху даних IoT-моніторингу від повітряного судна до системи технічної експлуатації

Схема на рис. 1 показує, що IoT-моніторинг не обмежується збиранням параметрів на борту повітряного судна. Його зміст полягає у створенні інформаційного ланцюга, який поєднує бортові джерела даних, захищене передавання інформації, наземну інфраструктуру технічного обслуговування, інженерний аналіз і прийняття рішень щодо подальшої експлуатації. За такого підходу моніторингові дані стають основою не тільки для виявлення несправностей, а й для оцінювання тенденцій, підготовки запасних частин, планування робіт, уточнення програм технічного обслуговування та підтримання льотної придатності.

Методи обробки моніторингових даних електронних систем

Ефективність IoT-моніторингу електронних систем повітряного судна значною мірою залежить не лише від кількості зібраних даних, а й від методів їх обробки. Надмірне накопичення параметрів без попередньої фільтрації, статистичного оцінювання та інженерної інтерпретації не забезпечує підвищення якості технічного обслуговування. Тому дані, що надходять від електронних систем, мають перетворюватися на діагностичну інформацію, придатну для прийняття обґрунтованого технічного рішення.

У загальному випадку для обробки моніторингових даних можуть використовуватися пороговий аналіз, аналіз тенденцій, подієвий аналіз, статистичне оцінювання, регресійний аналіз, статистична класифікація, виявлення аномалій, прогнозування технічного стану та обробка даних за наявності ефекту «розладнання» [9–14]. Кожен із

цих методів має власну сферу застосування і не повинен розглядатися ізольовано від інших методів, оскільки реальний технічний стан електронної системи формується під впливом багатьох взаємопов'язаних факторів.

Пороговий аналіз є найпростішим методом і полягає у порівнянні поточного значення параметра з установленими допустимими межами. Його перевагою є простота реалізації та можливість швидкого виявлення явних відхилень. Для оцінювання відхилення параметра від номінального значення може використовуватися нормований показник:

$$E_i(t_k) = \frac{|p_i(t_k) - p_{i,nom}|}{p_{i,nom}}, \quad (2)$$

де $E_i(t_k)$ – нормоване відхилення i -го параметра у момент часу t_k ; $p_i(t_k)$ – поточне значення параметра; $p_{i,nom}$ – номінальне значення параметра, визначене технічною документацією або статистикою справної роботи системи.

Якщо значення $E_i(t_k)$ перевищує встановлений поріг, параметр потребує додаткового аналізу. Такий підхід ефективний для виявлення явних відхилень, однак він не завжди дозволяє своєчасно виявити ранні ознаки деградації, коли параметр ще перебуває в допустимому діапазоні.

Аналіз тенденцій дає змогу оцінити напрям і темп зміни контрольованих параметрів у часі. Для IoT-моніторингу важливим є не лише факт перевищення допустимого порогу, а й поступове наближення параметра до граничного рівня. Наприклад, температура електронного блока може залишатися в межах норми, але її стійке зростання в однакових режимах експлуатації може свідчити

про погіршення тепловідведення, перевантаження електронного модуля або старіння компонентів. Аналогічно збільшення кількості помилок цифрового обміну може вказувати на нестабільність інтерфейсу, порушення контактів або деградацію кабельної мережі.

Статистичне оцінювання використовується для визначення характеристик випадкового процесу, який описує зміну діагностичного параметра. Оскільки параметри електронних систем у реальних умовах експлуатації мають стохастичний характер, доцільно оцінювати не лише їх поточні значення, а й середнє значення, дисперсію, середньоквадратичне відхилення, варіацію та стабільність цих характеристик у часі. Зміна статистичних характеристик може бути ранньою ознакою переходу системи до іншого режиму функціонування, навіть якщо параметр формально не вийшов за встановлені межі.

Регресійний аналіз доцільно застосовувати для опису тренду контрольованого параметра та оцінювання його подальшої поведінки. У найпростішому випадку тренд може описуватися лінійною або нелінійною залежністю, яка показує напрям зміни параметра в часі. Для електронних систем такий підхід може бути корисним під час аналізу температури блока, рівня живлення, кількості помилок цифрового обміну, частоти перезапусків або інших показників, що змінюються поступово. Разом з тим регресійна модель має періодично уточнюватися, оскільки для старіючого парку повітряних суден характерною є нестаціонарність процесів і зміна умов експлуатації.

Подієвий аналіз ґрунтується на вивченні повідомлень, що формуються бортовими системами технічного обслуговування, ВІТЕ/ВІТ, реєстраторами параметрів і журналами подій. У межах цього методу враховується не лише факт появи діагностичного повідомлення, а й частота його повторення, умови виникнення, зв'язок з іншими подіями та результатами попередніх перевірок. Для оцінювання повторюваності події може використовуватися коефіцієнт:

$$K_e = \frac{N_e}{N_\Sigma}, \quad (3)$$

де K_e – коефіцієнт повторюваності діагностичної події; N_e – кількість повторень події одного типу за обраний період; N_Σ – загальна кількість зареєстрованих діагностичних подій за той самий період.

Чим більше значення K_e , тим вища ймовірність того, що повідомлення пов'язане не з випадковим збоєм, а з реальною технічною проблемою. У практиці технічної експлуатації це особливо важливо, оскільки повторювані повідомлення часто вказують на приховані дефекти електронних блоків, кабельних з'єднань або програмно-апаратної взаємодії між системами.

Статистична класифікація використовується тоді, коли за сукупністю параметрів необхідно віднести стан електронної системи до певного класу: нормальний режим, режим підвищеного контролю, передвідмовний стан або стан, що потребує технічного втручання. У такому випадку рішення формується не за одним параметром, а за сукупністю ознак: рівнем відхилення, швидкістю зміни, повторюваністю подій, якістю даних і критичністю системи. Для авіаційної техніки важливо, щоб результати класифікації були пояснюваними та могли бути перевірені інженерно-технічним персоналом.

Виявлення аномалій є більш складним методом, оскільки воно не обмежується порівнянням параметра з установленим порогом. Аномалією може вважатися така поведінка системи, яка відрізняється від типової для справного режиму роботи, навіть якщо окремі параметри формально залишаються в допустимих межах. Для цього можуть використовуватися статистичні методи, експертні правила або алгоритми машинного аналізу даних [9, 10]. У контексті авіаційної техніки такі методи повинні застосовуватися обережно, оскільки діагностичний висновок має бути не лише автоматично сформованим, а й технічно обґрунтованим.

Окреме значення має обробка моніторингових даних за наявності ефекту «розладнання» [11–14]. У процесі експлуатації електронної системи статистичні характеристики параметра можуть змінюватися під впливом деградації, ремонту, зміни режимів роботи, температурних навантажень або зовнішніх завад. У такому випадку дані, накопичені до моменту «розладнання», вже не повністю описують новий режим функціонування системи. Тому для коректного прогнозування необхідно виявити момент зміни режиму, сформулювати нову вибірку спостережень і уточнити модель тренду для нового етапу квазістаціонарності.

Прогнозування технічного стану є завершальним етапом аналітичної обробки моніторингових даних. Його мета полягає не тільки в оцінюванні ймовірності майбутньої відмови, а й у визначенні моменту, коли параметри системи можуть наблизитися до небезпечного або економічно небажаного рівня. Для старіючого парку повітряних суден прогнозування має особливе значення, оскільки дозволяє індивідуалізувати технічне обслуговування конкретного борту, враховуючи фактичну історію його експлуатації, повторюваність подій і результати попередніх технічних дій.

Узагальнене порівняння основних методів обробки моніторингових даних наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів обробки моніторингових даних електронних систем

Метод	Сутність	Переваги	Обмеження
Пороговий аналіз	Порівняння параметрів із допустимими межами	Простота реалізації, швидке виявлення явних відхилень	Не завжди виявляє ранню деградацію
Аналіз тенденцій	Оцінювання зміни параметрів у часі	Дозволяє виявляти поступове погіршення стану	Потребує накопичення історичних даних
Статистичне оцінювання	Визначення середнього, дисперсії, варіації та стабільності параметрів	Дозволяє враховувати стохастичний характер параметрів	Потребує достатньої кількості коректних даних
Регресійний аналіз	Побудова тренду зміни параметра	Дає змогу оцінювати напрям розвитку процесу	Модель потребує уточнення при зміні режиму
Подієвий аналіз	Аналіз кодів несправностей, журналів подій і повторюваності повідомлень	Корисний для періодичних і прихованих несправностей	Залежить від повноти та якості реєстрації подій
Статистична класифікація	Віднесення стану системи до певного класу за сукупністю ознак	Підтримує ранжування станів і рішень щодо ТО	Потребує пояснюваних правил класифікації
Виявлення аномалій	Пошук нетипової поведінки системи	Дозволяє виявляти складні приховані відхилення	Потребує перевірки достовірності висновків
Обробка з «розладнанням»	Виявлення зміни статистичних властивостей процесу	Дозволяє уточнювати модель для нового режиму	Потребує коректного визначення моменту зміни
Прогнозування	Оцінювання майбутнього стану системи	Підтримує планування технічного обслуговування	Потребує статистики та коректної моделі деградації

Наведені методи не слід розглядати як взаємозамінні, оскільки кожен із них виконує власну діагностичну функцію. У реальній системі IoT-моніторингу їх доцільно застосовувати комплексно, щоб поєднати поточні параметри, історію подій, статистичні характеристики та прогнозу оцінку стану електронної системи.

Оцінювання якості та достовірності моніторингових даних

Однією з умов ефективного IoT-моніторингу електронних систем повітряних суден є забезпечення якості даних, що надходять до аналітичної платформи. Навіть за наявності значної кількості датчиків, бортових діагностичних повідомлень і журналів подій результат моніторингу може бути недостатньо достовірним, якщо дані є неповними, несинхронізованими, спотвореними або отриманими з порушенням часової послідовності.

Для авіаційної техніки ця проблема має особливе значення, оскільки помилковий діагностичний висновок може призвести або до необґрунтованої заміни справного блока, або до пропуску ознак реальної несправності [7, 8]. Тому якість моніторингових даних доцільно розглядати як один із елементів системи підтримки рішень щодо технічного обслуговування.

До основних характеристик якості моніторингових даних належать повнота, своєчасність, точність, часова узгодженість, логічна несуперечливість і достовірність джерела. Повнота показує, чи отримано необхідний набір параметрів; своєчасність – чи зберігають дані діагностичну цінність; часова узгодженість – чи можна коректно порівнювати інформацію з різних джерел; логічна несуперечливість – чи не суперечать одні дані іншим пов'язаним параметрам.

Загальна достовірність моніторингової інформації може бути подана як функція декількох показників:

$$Q = f(K_p, \Delta t, K_u, K_d), \quad (4)$$

де Q – узагальнена оцінка якості моніторингових даних; K_p – коефіцієнт повноти даних; Δt – затримка отримання даних; K_u – показник узгодженості даних; K_d – показник достовірності джерела інформації.

Формула (4) не задає конкретного способу розрахунку, однак показує, що якість моніторингових даних є багатофакторною характеристикою. Якщо дані є неповними або суперечливими, аналітична система повинна не формувати остаточний висновок, а ініціювати додаткову перевірку,

повторне зчитування інформації або залучення інженерного центру.

Оцінювання якості даних має бути безпосередньо пов'язане з алгоритмом прийняття рішень у системі технічного обслуговування. Якщо дані повні, синхронізовані та логічно узгоджені, аналітична система може формувати рекомендацію з високим рівнем довіри. Якщо ж дані неповні або суперечливі, система повинна не робити остаточний висновок, а формувати запит на додаткову перевірку, повторне зчитування інформації, уточнення параметрів або залучення інженерного центру. Такий підхід особливо важливий для старіючого парку повітряних суден, де помилкове рішення може призвести як до зайвих витрат, так і до пропуску прихованого деградаційного процесу.

Наявність показників повноти, часової затримки, узгодженості та достовірності дозволяє підвищити обґрунтованість діагностичних висновків і зменшити ризик помилкових рішень щодо технічного обслуговування. У подальшому ці показники можуть використовуватися не лише для оцінювання якості моніторингу, а й як вхідні параметри для системи управління технічним обслуговуванням повітряного судна.

Використання IoT-моніторингу для підтримки технічного обслуговування

Головним практичним результатом впровадження IoT-моніторингу електронних систем повітряного судна є підвищення обґрунтованості рішень щодо технічного обслуговування. Якщо традиційний підхід значною мірою спирається на регламентні перевірки, повідомлення про несправності та результати окремих тестів, то IoT-моніторинг дозволяє враховувати динаміку зміни параметрів, повторюваність подій, якість отриманих даних, критичність системи та ознаки зміни режиму функціонування. Завдяки цьому технічне рішення може прийматися не лише за фактом появи відмови, а й на основі ранніх ознак погіршення стану системи [9, 10].

У системі підтримки технічного обслуговування результати IoT-моніторингу доцільно використовувати не як автоматичний висновок про справність або несправність електронної системи, а як основу для ранжування технічних ситуацій за рівнем уваги з боку інженерно-технічного персоналу. Такий підхід дозволяє відокремити випадки нормальної експлуатації від ситуацій, які потребують уточнення, посиленого спостереження, додаткової діагностики або планування технічного втручання.

Для цього інформація від електронних систем повинна оцінюватися за сукупністю ознак: рівнем

відхилення параметрів, повторюваністю діагностичних подій, якістю отриманих даних, критичністю функцій відповідної системи та результатами попередніх технічних дій. У такому вигляді IoT-моніторинг виконує роль інструменту пріоритизації, тобто допомагає визначити, які повідомлення, параметри або електронні блоки потребують першочергової уваги, а які можуть залишатися в режимі накопичення статистики.

Для узагальнення інформації, отриманої з різних джерел, може використовуватися інтегральний показник моніторингу:

$$I_m = \alpha E + \beta K_e + \gamma(1 - Q), \quad (5)$$

де I_m - інтегральний показник моніторингу стану електронної системи;

E - узагальнене відхилення контрольованих параметрів;

K_e - коефіцієнт повторюваності діагностичних подій;

Q - нормована оцінка якості моніторингових даних у межах від 0 до 1;

α, β, γ - вагові коефіцієнти, що визначають значущість відповідних складових.

Вагові коефіцієнти α, β, γ доцільно задавати невід'ємними та нормувати так, щоб їх сума дорівнювала одиниці. Їх значення можуть визначатися експертно або на основі статистики експлуатації з урахуванням критичності системи, типу електронного обладнання та досвіду попереднього технічного обслуговування.

Зміст формули (5) полягає в тому, що рішення щодо технічного обслуговування має враховувати не один параметр, а сукупність ознак. Якщо параметри електронної системи незначно відхиляються від номінальних значень, події не повторюються, а якість даних є високою, інтегральний показник буде низьким. Якщо ж одночасно зростають відхилення параметрів, повторюваність повідомлень і виникають сумніви щодо якості даних, система потребує додаткової уваги з боку технічного персоналу.

Однак для авіаційної техніки важливо враховувати не лише сам факт погіршення моніторингових показників, а й критичність електронної системи. Однакове за величиною відхилення може мати різне експлуатаційне значення залежно від того, у якій системі воно виникло [7, 8]. Наприклад, нестабільність параметрів у системі, що виконує критичні функції, повинна мати вищий пріоритет для аналізу, ніж аналогічне відхилення у допоміжній системі. Тому на основі інтегрального показника доцільно визначити не лише зага-

льний рівень технічного стану, а й пріоритет технічного реагування:

$$P_{\text{ТО}} = I_m \cdot C_{\text{кр}}, \quad (6)$$

де $P_{\text{ТО}}$ – показник пріоритету технічного обслуговування електронної системи; I_m – інтегральний показник моніторингу стану електронної системи; $C_{\text{кр}}$ – коефіцієнт критичності функцій електронної системи для безпеки польоту та експлуатаційної готовності повітряного судна.

Показник пріоритету технічного обслуговування дає змогу визначити рівень реагування на виявлене відхилення. За низького значення показника інформація може накопичуватися для подальшого аналізу, за середнього – доцільно виконати додаткову діагностику або посилити моніторинг, а за високого – розглянути необхідність поглибленої перевірки, ремонту або заміни електронного блока.

У системі технічного обслуговування старіючого парку повітряних суден ранжування має особливе значення. Воно дозволяє не розглядати всі діагностичні події як однаково важливі, а визначати черговість реагування з урахуванням фактичного стану конкретного борту, критичності системи, повторюваності несправностей і доступності запасних частин. Такий підхід може бути використаний під час планування робіт в ангарі, підготовки запасних блоків, розподілу ресурсів технічного персоналу та визначення обсягу додаткової діагностики.

IoT-моніторинг дозволяє перейти від простого реагування на повідомлення про несправність до більш обґрунтованого аналізу потоку діагностичних даних. Його перевага полягає в тому, що параметричні дані, журнали подій, показники якості інформації, ознаки «розладнання» та критичність функцій системи можуть бути поєднані в єдиному процесі підтримки технічних рішень. Це створює передумови для зниження кількості необґрунтованих заміन справних блоків, своєчасного виявлення прихованих дефектів і поступового переходу до обслуговування електронних систем повітряних суден за фактичним технічним станом.

Вимоги до впровадження та замкнений цикл IoT-моніторингу в системі технічної експлуатації

Впровадження IoT-моніторингу електронних систем повітряних суден не може здійснюватися за аналогією з промисловими або побутовими IoT-системами. Авіаційна техніка є складним сертифікованим об'єктом, тому будь-який інформаційний обмін, пов'язаний із бортовими системами, має відповідати вимогам безпеки польотів, захищеності даних, надійності, простежуваності

та недопущення впливу на критичні функції повітряного судна [5–8].

Першою важливою вимогою є розділення контурів керування та моніторингу. Дані, які використовуються для аналізу технічного стану, не повинні створювати ризику втручання в роботу систем керування, навігації, зв'язку або індикації. Тому IoT-моніторинг має працювати як інформаційна система підтримки технічного рішення, а не як система автоматичного впливу на бортові функції.

Другою вимогою є забезпечення цілісності, достовірності та кіберзахисту даних. У процесі передавання інформації від борту до наземної аналітичної платформи можливі втрати, дублювання, затримки, помилки синхронізації або несанкціоноване втручання. Тому перед аналітичною обробкою необхідно перевіряти повноту, часову узгодженість, джерело походження та логічну несуперечливість даних. Доступ до моніторингової інформації має бути обмеженим, а всі операції з даними – простежуваними [4].

Окреме значення має сумісність IoT-моніторингу з чинними процедурами технічного обслуговування. В експлуатаційних організаціях уже використовуються бортові системи технічного обслуговування, повідомлення VITE/VIT, журнали відмов, документація виробника, інструкції з пошуку несправностей і записи про виконані роботи. Тому IoT-моніторинг не повинен дублювати ці процеси або створювати паралельну систему прийняття рішень. Його завдання полягає у доповненні чинної системи ТО більш повною картою зміни параметрів у часі.

Для старіючого парку повітряних суден важливо не змішувати дані різних бортів в одну усереднену статистику. Моніторинг має зберігати прив'язку параметрів, подій, замін блоків і результатів перевірок до конкретного повітряного судна, оскільки однакові за типом електронні системи можуть мати різну історію експлуатації та різні умови виникнення відхилень.

Не всі параметри електронних систем мають однаково діагностичну цінність. Тому попередній вибір параметрів для IoT-моніторингу доцільно здійснювати з урахуванням їх критичності, частоти появи відхилень і аналітичної придатності для виявлення тенденцій, моментів «розладнання» або прогнозування технічного стану. Це дозволяє не перевантажувати систему другорядними даними і зосередити увагу на параметрах, які реально впливають на якість технічних рішень.

Використання IoT-моніторингу доцільно розглядати як частину замкненого циклу технічної експлуатації. У такому циклі моніторингові дані надходять від електронних блоків, датчиків, засобів VITE/VIT, журналів подій і бортових систем технічного обслуговування. Далі вони проходять

перевірку якості, аналітичну обробку, оцінювання пріоритету реагування та використовуються для прийняття технічного рішення. Результати виконаних робіт повертаються до інформаційної бази й уточнюють подальші діагностичні висновки.

Узагальнений замкнений цикл використання IoT-моніторингу в технічному обслуговуванні електронних систем повітряного судна подано на рис. 2.



Рис. 2. Замкнений цикл використання IoT-моніторингу в технічному обслуговуванні електронних систем повітряного судна

Схема на рис. 2 показує, що результати моніторингу не повинні залишатися ізольованими записами. Якщо після заміни блока дефект не повторюється, це підтверджує правильність технічного рішення. Якщо ж повідомлення або відхилення з'являється знову, аналітична система повинна врахувати цей факт і змінити пріоритети подальшого пошуку несправності. Такий підхід особливо важливий для періодичних або прихованих дефектів, які складно підтвердити під час одноразової наземної перевірки.

Практична інтеграція IoT-моніторингу має забезпечувати зв'язок між повітряним судном, авіаційно-технічною базою, ангаром технічного обслуговування, інженерним центром, службою надійності, складом запасних частин і підрозділами планування робіт. Авіаційно-технічна база та ангар виконують практичні роботи, інженерний центр аналізує тенденції, повторюваність подій і ефективність попередніх рішень, а служба надійності використовує накопичені дані для уточнення програм технічного обслуговування. У такому вигляді IoT-моніторинг стає не окремою інформаційною надбудовою, а складовою системи технічної експлуатації повітряного судна.

Висновки

У роботі розглянуто методи IoT-моніторингу стану електронних систем повітряних суден та визначено їх роль у системі технічної експлуатації. Показано, що такий моніторинг доцільно розглядати як інформаційний процес, який поєднує бортові джерела діагностичних даних, захищене передавання інформації, наземну аналітичну обробку та підтримку прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

Встановлено, що для електронних систем повітряних суден важливим є комплексне використання порогового аналізу, аналізу тенденцій, подієвого аналізу, статистичного оцінювання, класифікації, прогнозування та обробки даних за наявності ефекту «розладнання». Такий підхід дозволяє враховувати не лише факт появи відхилення, а й характер зміни параметрів, якість моніторингових даних, повторюваність подій і критичність відповідної системи.

Запропонований підхід може бути використаний для підвищення достовірності діагностування, скорочення часу пошуку несправностей,

зменшення кількості необґрунтованих заміन електронних блоків та підтримки переходу до технічного обслуговування за фактичним станом. Для старіючого парку повітряних суден особливе значення має збереження прив'язки моніторингових даних до конкретного борту, що дозволяє точніше враховувати історію експлуатації та планувати подальші технічні дії.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] ISO/IEC 30141:2024. Internet of Things (IoT) – Reference Architecture. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.
- [2] OASIS. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. 2019.
- [3] European Union Aviation Safety Agency. Easy Access Rules for Continuing Airworthiness (Regulation (EU) No 1321/2014). Revision from September 2025. Cologne: EASA, 2025.
- [4] RTCA. DO-326A: Airworthiness Security Process Specification. Washington, DC: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2014.
- [5] Federal Aviation Administration. AC 20-115D: Airborne Software Development Assurance Using EUROCAE ED-12() and RTCA DO-178(). Washington, DC: FAA, 2017.
- [6] Federal Aviation Administration. AC 20-152A: Development Assurance for Airborne Electronic Hardware. Washington, DC: FAA, 2022.
- [7] SAE International. ARP4754B: Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. Warrendale, PA: SAE International, 2023.
- [8] SAE International. ARP4761A: Guidelines for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Aircraft, Systems, and Equipment. Warrendale, PA: SAE International, 2023.
- [9] Kwakye A. D., Jennions I. K., Ezhilarasu C. M. Platform health management for aircraft maintenance – a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2024. Vol. 238, No. 3. P. 267–283. <https://doi.org/10.1177/09544100231219736>
- [10] Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
- [11] O.Solomentsev, M. Zaliskyi, B. Chumachenko, V. Yehunko, Methodological Approach to the Design of Radio Equipment Operation System, in Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1008, 2024, pp. 599–610, https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_51. (Q4)
- [12] Zaliskyi, O. A. Shcherbyna, M. M. Asanov, Optimization of Preventive Threshold for Condition-based Maintenance of Radio Electronic Equipment. in Radio Electronics, Computer Science, Control, Vol. 1, No. 2 (57), 2021, pp. 19–27, <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-2-2>
- [13] C. Okoro, M. Zaliskyi, S. Dmytriiev, O. Solomentsev, and O. Sribna, "Optimization of Maintenance Task Interval of Aircraft Systems", in International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS), Vol.14, No.2, 2022, pp. 77–89, <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2022.02.07> (Q3).
- [14] V. Ostroumov, V. Ivannikova, M. Zaliskyi, and N.S. Kuzmenko, "Impact analysis of Russian-Ukrainian war on airspace," in Journal of Air Transport Management, vol. 124, 2025, pp. 1–14, <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2025.102742> (Q1).

Плугувий А. О.

МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

У статті розглядаються методи моніторингу стану електронних систем повітряних суден з використанням технологій Інтернету речей. Показано, що IoT-моніторинг дозволяє перейти від разової перевірки працездатності окремих електронних блоків до систематичного збирання, передавання, накопичення та аналітичної обробки діагностичних даних у процесі експлуатації. Особливу увагу приділено умовам експлуатації старіючого парку повітряних суден, для якого важливими є індивідуалізація технічного обслуговування, урахування фактичної історії конкретного борту та своєчасне виявлення прихованих деградаційних процесів. Обґрунтовано, що діагностичні параметри електронних систем мають стохастичний і нестационарний характер, а їх тренди можуть змінюватися під впливом режимів польоту, температурних навантажень, вібрації, якості електроживлення, ремонтних дій та інших експлуатаційних факторів. Розглянуто необхідність урахування ефекту «розладнання», за якого змінюються статистичні властивості процесу спостереження, а подальше прогнозування має виконуватися для нового етапу квазістационарності. Запропоновано узагальнену схему руху даних IoT-моніторингу від повітряного судна до наземної системи технічної експлуатації, що охоплює авіаційно-технічну базу, ангар технічного обслуговування, інженерний центр, службу надійності, базу даних експлуатації

та систему підтримки прийняття рішень. Розглянуто методи обробки моніторингових даних, зокрема пороговий аналіз, аналіз тенденцій, подієвий аналіз, статистичне оцінювання, регресійний аналіз, статистичну класифікацію, виявлення аномалій, прогнозування та обробку даних за наявності ефекту «розладнання». Обґрунтовано використання показників якості даних, інтегрального показника моніторингу, пріоритету технічного обслуговування та критеріїв відбору діагностично значущих параметрів. Практичне значення роботи полягає у можливості підвищення достовірності діагностування, скорочення часу пошуку несправностей, зменшення кількості необґрунтованих замін електронних блоків, покращення планування технічного обслуговування та підвищення економічної ефективності експлуатації повітряних суден.

Ключові слова: повітряне судно; електронні системи; авіоніка; Інтернет речей; IoT-моніторинг; старіючий парк повітряних суден; діагностичні дані; стохастичні параметри; нестационарність; розладнання; технічне обслуговування; льотна придатність; інженерний центр; прогнозування.

Plugoviy A.

METHODS FOR MONITORING THE CONDITION OF AIRCRAFT ELECTRONIC SYSTEMS USING THE INTERNET OF THINGS

The article considers methods for monitoring the condition of aircraft electronic systems using Internet of Things technologies. It is shown that IoT monitoring makes it possible to move from a single check of individual electronic units to the systematic collection, transmission, accumulation and analytical processing of diagnostic data during aircraft operation. Special attention is paid to the operation of an aging aircraft fleet, for which the individualization of maintenance, consideration of the actual operational history of a specific aircraft and timely detection of hidden degradation processes are of particular importance. It is substantiated that diagnostic parameters of electronic systems have a stochastic and non-stationary nature, while their trends may change under the influence of flight modes, temperature loads, vibration, power supply quality, maintenance actions and other operational factors. The need to take into account the change-point effect is considered, when the statistical properties of the observed process change and further forecasting should be performed for a new quasi-stationary stage. A generalized scheme of IoT monitoring data flow from the aircraft to the ground-based technical operation system is proposed. This scheme includes the aircraft maintenance base, maintenance hangar, engineering center, reliability service, operational database and decision support system. The article considers methods for processing monitoring data, including threshold analysis, trend analysis, event analysis, statistical estimation, regression analysis, statistical classification, anomaly detection, forecasting and data processing under the change-point effect. The use of data quality indicators, an integral monitoring indicator, a maintenance priority indicator and criteria for selecting diagnostically significant parameters is substantiated. The practical significance of the work lies in the possibility of improving diagnostic reliability, reducing troubleshooting time, decreasing the number of unjustified replacements of electronic units, improving maintenance planning and increasing the economic efficiency of aircraft operation.

Keywords: aircraft; electronic systems; avionics; Internet of Things; IoT monitoring; aging aircraft fleet; diagnostic data; stochastic parameters; non-stationarity; change point; maintenance; airworthiness; engineering center; forecasting.

Дата першого надходження: 08.05.2026 р.

Дата прийняття до друку: 15.05.2026 р.

Дата публікації: 28.05.2026 р.