

МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Plugoviy A.O. Methods for monitoring the technical condition of aircraft electronic systems. The article considers methods for monitoring the technical condition of aircraft electronic systems, taking into account modern requirements for maintaining airworthiness, the development of information technologies, and the specific features of operating an aging aircraft fleet. It is shown that monitoring the technical condition of electronic systems cannot be limited to a single check of individual units, since under long-term operation a significant part of failures may have a hidden, intermittent, or gradual nature. The necessity of combining functional, parameter-based, built-in, and predictive monitoring with the processing of operational data received from onboard maintenance systems, BITE/BIT tools, sensors, and ground-based information platforms is substantiated. Special attention is paid to the role of the Internet of Things and other information technologies in expanding monitoring capabilities not only for electronic systems, but also for the wider aircraft technical operation system. The problem of non-stationarity of diagnostic parameters and the occurrence of the change-point effect, in which the statistical properties of the observed process change, is considered. It is proposed to take this effect into account when processing data in a moving window, detecting a change in the operating mode, refining parameter trends, and forming maintenance decisions. The practical significance of the work lies in the possibility of using the obtained results to improve diagnostic reliability, reduce unjustified replacement of electronic units, decrease operating costs, and maintain aircraft airworthiness, especially under conditions of operating an aging aircraft fleet.

Keywords: aircraft electronic systems, avionics, technical condition monitoring, Internet of Things, aging aircraft fleet, change point, diagnostic data, predictive maintenance, airworthiness

Плуговий А.О. Методи контролю технічного стану електронних систем повітряних суден.

У статті розглянуто методи контролю технічного стану електронних систем повітряних суден з урахуванням сучасних вимог до підтримання льотної придатності, розвитку інформаційних технологій та особливостей експлуатації старіючого парку повітряних суден. Показано, що контроль технічного стану електронних систем не може обмежуватися разовою перевіркою працездатності окремих блоків, оскільки в умовах тривалої експлуатації значна частина несправностей має прихований, періодичний або поступовий характер. Обґрунтовано необхідність поєднання функціонального, параметричного, вбудованого та прогнозного контролю з обробкою експлуатаційних даних, що надходять від бортових систем технічного обслуговування, засобів BITE/BIT, датчиків і наземних інформаційних платформ. Особливу увагу приділено ролі Інтернету речей та інших інформаційних технологій у розширенні можливостей контролю не лише електронних систем, а й ширшої системи технічної експлуатації повітряних суден. Розглянуто проблему нестаціонарності діагностичних параметрів і появи ефекту “розладнання”, за якого змінюються статистичні властивості процесу спостереження. Запропоновано враховувати цей ефект під час обробки даних у ковзному вікні, виявлення зміни режиму, уточнення тренду параметрів і формування рішень щодо технічного обслуговування. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для підвищення достовірності діагностування, зменшення необґрунтованих заміन електронних блоків, скорочення експлуатаційних витрат і підтримання льотної придатності повітряних суден, зокрема в умовах експлуатації старіючого парку.

Ключові слова: електронні системи повітряних суден, авіоніка, контроль технічного стану, Інтернет речей, старіючий парк повітряних суден, розладнання, діагностичні дані, прогнозне технічне обслуговування, льотна придатність

Вступ

Контроль технічного стану є однією з основних технологічних операцій у системі експлуатації авіаційної техніки. У загальному розумінні він полягає у встановленні відповідності між фактичним станом об'єкта та допустимими варіантами його працездатності, які визначаються технічною документацією, нормативними вимогами, результатами вимірювання параметрів і досвідом експлуатації. У процесі контролю здійснюється сприйняття сукупності діагностичних ознак, їх можлива обробка, формування

рішення про технічний стан об'єкта та передавання результатів до баз даних або керуючих структур системи технічної експлуатації.

Електронні системи повітряного судна відіграють важливу роль у забезпеченні навігації, зв'язку, індикації, автоматизованого керування, контролю параметрів силової установки, електропостачання та реєстрації польотної інформації. Порушення їх працездатності може впливати не лише на окрему функцію, а й на взаємодію між суміжними бортовими системами. Тому контроль технічного стану електронних систем має бути спрямований не тільки на фіксацію факту несправності, а й на виявлення прихованих дефектів, повторюваних відхилень, причинно-наслідкових зв'язків між подіями та передумов переходу системи до передвідмовного стану.

Особливої актуальності ця проблема набуває для старіючого парку повітряних суден. Такі повітряні судна можуть мати обмежені можливості штатної цифрової діагностики порівняно з новішими типами авіаційної техніки, а процеси старіння електронних блоків, кабельних з'єднань, контактних груп і елементної бази підвищують імовірність нестійких та прихованих несправностей. Крім того, витрати на експлуатацію повітряного судна протягом основного етапу його життєвого циклу можуть суттєво перевищувати початкову вартість авіаційної техніки, що посилює вимоги до раціонального використання ресурсів, скорочення простоїв і зменшення необґрунтованих замін справного обладнання.

У сучасних умовах перспективним напрямом підвищення ефективності контролю є впровадження нових інформаційних технологій, зокрема Інтернету речей, аналітичної обробки експлуатаційних даних, методів машинного навчання та елементів штучного інтелекту. Інтернет речей дає змогу розглядати контроль технічного стану не як ізольовану перевірку окремого електронного блока, а як частину ширшого інформаційного середовища, яке охоплює бортові системи, датчики, засоби ВІТЕ/ВІТ, наземні інформаційні платформи, персонал, документацію та процеси технічного обслуговування [13]. Такий підхід створює умови для накопичення експлуатаційної інформації та її використання під час прийняття рішень на різних ієрархічних рівнях системи експлуатації.

Разом з тим діагностичні параметри електронних систем повітряних суден не завжди можуть розглядатися як стаціонарні процеси. У реальних умовах експлуатації їх зміна залежить від режимів польоту, температурних навантажень, вібрації, електромагнітної сумісності, якості електроживлення, помилок персоналу, деградаційних процесів і зовнішніх завад. Через це тренди визначальних параметрів можуть змінювати свої статистичні властивості, що відповідає появі ефекту “розладнання”, або *change point* [15]. Ігнорування такого ефекту може призводити до помилкових оцінок технічного стану та зниження точності прогнозування.

У таких умовах доцільним є застосування адаптивної обробки даних, зокрема аналізу у ковзному вікні, виявлення моменту “розладнання”, формування нової сукупності спостережень на етапі квазістаціонарності та подальше уточнення тренду визначального параметра. Це дозволяє не лише фіксувати факт виходу параметра за допустимі межі, а й оцінювати зміну характеру процесу, що передуює погіршенню технічного стану або виникненню відмови.

Аналіз останніх досліджень. У наукових і нормативно-технічних джерелах питання контролю технічного стану електронних систем повітряних суден розглядається у кількох взаємопов'язаних напрямках. Перший напрям пов'язаний із забезпеченням підтримання льотної придатності та виконанням вимог до технічного обслуговування авіаційної техніки. У документах EASA щодо підтримання льотної придатності регламентуються вимоги до організацій, процедур і процесів технічного обслуговування, що створює нормативну основу для організації контролю технічного стану повітряних суден [1].

Другий напрям стосується практичних методів інспекції, перевірки та ремонту авіаційного обладнання. У цьому контексті важливе значення мають рекомендації FAA AC 43.13-1B, де наведено прийнятні методи, техніки та практики інспекції і ремонту цивільних повітряних суден у випадках, коли відсутні спеціальні інструкції виробника [2]. Для

електронних систем ці положення мають допоміжне значення, оскільки фактичне діагностування авіоніки здебільшого виконується згідно з документацією виробника, процедурами Aircraft Maintenance Manual, Fault Isolation Manual, експлуатаційними бюлетенями та даними бортових систем технічного обслуговування.

Третій напрям пов'язаний із сертифікацією програмного забезпечення та бортового електронного апаратного забезпечення. Стандарт RTCA DO-178C застосовується для процесів, пов'язаних із програмним забезпеченням бортових систем, а DO-254 — для розроблення та підтвердження відповідності бортового електронного апаратного забезпечення [3–6]. Хоча ці документи безпосередньо не є інструкціями з технічного обслуговування, вони визначають загальну логіку надійності, простежуваності, верифікації та безпечної роботи електронних систем, що має значення і для подальшого контролю їхнього стану в експлуатації.

Четвертий напрям охоплює розвиток методів вбудованого контролю, технічного діагностування, прогнозного технічного обслуговування та систем підтримки прийняття рішень. Для сучасних повітряних суден характерним є використання засобів Built-In Test Equipment або Built-In Test, які дають змогу автоматично виконувати самоперевірку, фіксувати коди несправностей, формувати повідомлення для екіпажу та технічного персоналу, а також накопичувати інформацію для подальшого аналізу [9–12]. Разом з тим ефективність таких засобів залежить від глибини діагностичного покриття, точності локалізації несправності, якості даних і можливості інтеграції бортової інформації з наземними аналітичними платформами.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділяють застосуванню нових інформаційних технологій у технічній експлуатації авіаційної техніки. Інтернет речей, аналітика експлуатаційних даних, машинне навчання та елементи штучного інтелекту дають змогу перейти від ізольованої перевірки окремого блока до комплексного аналізу поведінки системи в часі. У межах машинного навчання для таких задач можуть застосовуватися регресійний аналіз, класифікація, кластеризація та пошук асоціативних зв'язків між діагностичними подіями. Для складніших задач можуть використовуватися методи глибинного навчання, однак в авіаційній галузі їх результати мають бути пояснюваними та перевірюваними інженерно-технічним персоналом.

Водночас у реальних умовах експлуатації діагностичні параметри та показники безвідмовності не завжди мають стаціонарний характер. Їх зміна може бути зумовлена деградацією елементів, нестабільними умовами експлуатації, електромагнітними завадами, помилками персоналу або зміною режимів роботи. У таких умовах важливим є врахування ефекту “розладнання”, коли статистичні властивості процесу спостереження змінюються, а подальше прогнозування має виконуватися вже для нового етапу квазістаціонарності. Це зумовлює потребу в структурній схемі обробки даних, яка поєднує вимірювання параметрів, формування ковзного вікна, виявлення моменту “розладнання”, уточнення тренду та класифікацію майбутнього стану об'єкта контролю.

Метою статті є аналіз і систематизація методів контролю технічного стану електронних систем повітряних суден з урахуванням особливостей експлуатації старіючого парку, розвитку нових інформаційних технологій, можливостей Інтернету речей та необхідності обробки діагностичних даних за наявності ефекту “розладнання”.

Для досягнення поставленої мети необхідно уточнити зміст контролю технічного стану як технологічної операції в системі експлуатації авіаційної техніки; визначити основні групи методів контролю електронних систем повітряних суден; розглянути роль бортових і наземних джерел діагностичної інформації; показати можливості Інтернету речей, машинного навчання та інших інформаційних технологій у підвищенні достовірності контролю; обґрунтувати доцільність урахування ефекту “розладнання” під час обробки нестаціонарних діагностичних параметрів; запропонувати узагальнену структурну схему обробки даних із виявленням моменту “розладнання” та подальшим прогнозуванням технічного стану.

У межах статті основна увага приділяється саме електронним системам повітряних суден, однак запропонований підхід може бути поширений і на інші системи та агрегати повітряного судна, а також на процеси технічної експлуатації в цілому. Це важливо для старіючого парку повітряних суден, де достовірність контролю, своєчасність виявлення деградаційних процесів і раціональне використання експлуатаційних ресурсів мають безпосередній вплив на підтримання льотної придатності та економічну ефективність експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження

Методи контролю технічного стану електронних систем повітряних суден доцільно класифікувати за способом отримання діагностичної інформації, глибиною контролю, рівнем автоматизації та можливістю використання результатів у системі технічної експлуатації. Для старіючого парку повітряних суден особливого значення набуває поєднання традиційних методів контролю з обробкою експлуатаційних даних, що можуть надходити від бортових систем, датчиків, засобів ВІТЕ/ВІТ і наземних інформаційних платформ. Узагальнену класифікацію таких методів наведено на рис. 1.



Рис. 1. Класифікація методів контролю технічного стану електронних систем повітряних суден

Наведена класифікація показує, що контроль технічного стану електронних систем не повинен обмежуватися одноразовою перевіркою справності. Для підвищення достовірності діагностування необхідно поєднувати функціональний контроль, параметричний аналіз, вбудовану самодіагностику, обробку експлуатаційних даних і прогнозу оцінку розвитку несправностей. У разі використання сучасних інформаційних технологій, зокрема Інтернету речей, результати цих методів можуть інтегруватися в єдине інформаційне середовище технічної експлуатації, що особливо важливо для підтримання льотної придатності старіючого парку повітряних суден.

Функціональний контроль є базовим методом оцінювання технічного стану електронних систем повітряних суден. Його сутність полягає у перевірці здатності системи виконувати встановлені функції у заданих режимах роботи. Такий контроль застосовується під час передпольотної підготовки, регламентного технічного обслуговування, після заміни блока, після усунення несправності або під час виконання спеціальних тестових процедур. Для

електронних систем він має особливе значення, оскільки дозволяє перевірити не лише працездатність окремого пристрою, а й правильність його взаємодії з іншими бортовими системами.

Разом з тим для складних електронних систем двійкова оцінка типу “працездатна/непрацездатна” є недостатньою. Система може формально виконувати свою функцію, але мати нестійкі параметри, затримку реакції, періодичні помилки обміну даними або ознаки деградації окремих елементів. Тому функціональний контроль доцільно поєднувати з параметричним контролем, який дає змогу кількісно оцінити роботу системи за такими ознаками, як напруга живлення, струм споживання, температура блока, рівень сигналу, частота помилок передачі даних, час реакції, кількість перезапусків і стабільність цифрового каналу.

Параметричний контроль ґрунтується на порівнянні контрольованих параметрів із допустимими межами та на аналізі характеру їх зміни в часі. На практиці важливим є не лише сам факт виходу параметра за межі допуску, а й поступове наближення до граничного значення. Така тенденція може свідчити про деградацію елемента, погіршення контактного з'єднання, старіння електронних компонентів, порушення теплового режиму або зниження стабільності живлення. Тому відхилення параметра від номінального значення доцільно розглядати не як ізольований результат вимірювання, а як ознаку можливої зміни технічного стану.

Особливе місце серед методів контролю займає вбудований контроль ВІТЕ/ВІТ. Його перевага полягає в тому, що діагностування виконується безпосередньо засобами самої електронної системи або бортового комплексу технічного обслуговування. Вбудований контроль може здійснюватися автоматично під час увімкнення системи, у процесі її роботи або за командою технічного персоналу. Результатом такого контролю є повідомлення про справність або несправність, код відмови, вказівка на можливий несправний блок, а також додаткова інформація про умови виникнення дефекту.

Якщо вбудована система контролю має достатню глибину діагностичного покриття, вона скорочує час пошуку несправності та зменшує ймовірність необґрунтованої заміни справного обладнання. Водночас ВІТЕ/ВІТ не завжди дозволяє точно встановити першопричину несправності, особливо якщо дефект має періодичний характер, пов'язаний із нестійкими режимами роботи, порушенням живлення, кабельною мережею або взаємодією кількох бортових систем.

Для узагальненого порівняння розглянутих методів доцільно навести таблицю 1, у якій показано їх призначення, переваги та обмеження.

Порівняння методів показує, що кожен із них має власну сферу ефективного застосування. Функціональний контроль підтверджує виконання заданих функцій, параметричний контроль дозволяє кількісно оцінити зміну технічного стану, вбудований контроль ВІТЕ/ВІТ забезпечує оперативне формування діагностичних повідомлень, а аналіз експлуатаційних даних і прогностичний контроль створюють основу для прийняття рішень за фактичним станом. У системі технічної експлуатації старіючого парку повітряних суден найбільше значення має не ізольоване використання окремого методу, а їх поєднання з інформаційними технологіями, які забезпечують накопичення, зіставлення та обробку діагностичних даних.

Для підвищення достовірності контролю технічного стану електронних систем повітряних суден доцільно використовувати не окремий параметр, а сукупність діагностичних ознак. Це пояснюється тим, що одна й та сама несправність може проявлятися через декілька параметрів одночасно, а один параметр, у свою чергу, може змінюватися під впливом різних причин. Наприклад, підвищення температури електронного блока може бути наслідком погіршення охолодження, збільшення навантаження, старіння елементної бази або порушення електроживлення. Тому ізольований аналіз такого параметра не завжди дозволяє достовірно визначити технічний стан системи.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів контролю технічного стану електронних систем повітряних суден

Метод контролю	Основне призначення	Переваги	Обмеження
Функціональний контроль	Перевірка виконання системою заданих функцій	Простота застосування, можливість підтвердження працездатності після обслуговування	Не завжди виявляє приховану деградацію параметрів
Параметричний контроль	Вимірювання та аналіз кількісних параметрів системи	Дозволяє виявляти поступові зміни технічного стану	Потребує встановлення достовірних допустимих меж
Вбудований контроль ВІТЕ/ВІТ	Автоматична самодіагностика системи	Скорочує час пошуку несправності, формує коди відмов	Може мати обмежену глибину локалізації дефекту
Діагностування за експлуатаційними даними	Аналіз журналів відмов, повідомлень і повторюваності дефектів	Дозволяє виявляти типові та повторні несправності	Якість результату залежить від повноти даних
Прогнозний контроль	Визначення тенденцій деградації та ймовірності відмови	Підтримує перехід до обслуговування за станом	Потребує накопичення статистики та аналітичних моделей

Більш обґрунтованим є підхід, за якого контрольована електронна система розглядається як об'єкт діагностування, стан якого визначається сукупністю параметрів. У такому випадку загальна оцінка може формуватися на основі узагальненого діагностичного показника:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i \delta_i(t), \quad (1)$$

де $D(t)$ – узагальнений діагностичний показник технічного стану електронної системи; ω_i – ваговий коефіцієнт i -го параметра; $\delta_i(t)$ – відносне відхилення i -го параметра від номінального значення; n – кількість контрольованих параметрів.

Вагові коефіцієнти враховують різну значущість параметрів для оцінювання технічного стану. Наприклад, для блока авіоніки відхилення напруги живлення або збільшення кількості помилок обміну даними може мати більшу діагностичну вагу, ніж незначна зміна температури в допустимих межах. У реальних умовах експлуатації такі коефіцієнти мають визначатися з урахуванням технічної документації виробника, статистики відмов, критичності функцій системи та впливу конкретного параметра на безпеку польоту [7, 8].

Разом з тим використання узагальненого показника не усуває проблему нестационарності діагностичних параметрів. У процесі тривалої експлуатації, особливо для старіючого парку повітряних суден, статистичні властивості параметрів можуть змінюватися під впливом деградаційних процесів, зміни режимів роботи, умов навколишнього середовища, електромагнітних завад або результатів попередніх ремонтних дій. У такій ситуації тренд параметра, який раніше характеризував нормальний стан системи, може змінити свою поведінку. Така зміна відповідає ефекту “розладнання”, або change point [15].

Ігнорування моменту “розладнання” може призвести до помилкового прогнозування технічного стану, оскільки модель, побудована на попередній ділянці спостережень, уже не повністю відповідає новим умовам функціонування системи. Тому під час аналізу експлуатаційних даних доцільно використовувати обробку в ковзному вікні. У цьому випадку оцінювання параметрів виконується не за всією історією спостережень, а за обмеженою вибіркою останніх значень, що дає змогу швидше виявити зміну режиму та уточнити подальший прогноз.

Процес обробки діагностичних даних за наявності ефекту “розладнання” може включати формування ковзного вікна спостережень, перевірку статистичних характеристик параметра, виявлення моменту зміни режиму, формування нової вибірки для етапу квазістаціонарності та подальше прогнозування поведінки визначального параметра. Такий підхід є особливо важливим для електронних систем, у яких несправності часто мають прихований або нестійкий характер і не завжди проявляються як миттєвий вихід параметра за допустимі межі.

Для старіючого парку повітряних суден особливо важливим є не лише накопичення експлуатаційних даних, а й правильна їх обробка з урахуванням можливої зміни режиму функціонування системи. У реальних умовах один і той самий параметр може тривалий час змінюватися в межах допустимих значень, однак після певного моменту його тренд або рівень випадкових коливань змінюється. Така ситуація може свідчити про початок деградаційного процесу, зміну умов експлуатації, погіршення електроживлення, появу нестійкого дефекту або вплив зовнішніх завад. Для виявлення таких змін доцільно використовувати обробку даних у ковзному вікні, за якої на кожному кроці аналізу формується вибіркова сукупність останніх значень контрольованого параметра та оцінюються його статистичні характеристики. Якщо вони суттєво відрізняються від характеристик попереднього інтервалу спостереження, може бути зафіксовано момент “розладнання”, після чого подальший аналіз виконується вже для нового етапу квазістаціонарності.

Узагальнена послідовність обробки діагностичних даних за наявності ефекту “розладнання” може бути подана у вигляді структурної схеми на рис. 2.



Рис. 2. Структурна схема обробки діагностичних даних електронних систем повітряних суден за наявності ефекту “розладнання”

Схема на рис. 2 відображає послідовність обробки діагностичних даних електронних систем повітряних суден за наявності ефекту “розладнання”. На першому етапі виконуються вимірювання параметрів електронних систем, інших систем і агрегатів повітряного судна. Далі формується ковзне вікно спостережень і оцінюються статистичні характеристики контрольованого параметра. Після цього перевіряється наявність “розладнання”. У разі його виявлення формується нова вибіркова сукупність даних для етапу квазістаціонарності, уточнюється тренд визначального параметра, виконується прогнозування його подальшої поведінки, класифікується майбутній стан об’єкта контролю та формуються завдання або керуючі впливи для системи технічної експлуатації.

Практичне значення такого підходу полягає в тому, що технічний персонал отримує можливість не лише реагувати на вже зафіксовану несправність, а й виявляти зміну характеру процесу на ранній стадії. Наприклад, якщо після тривалого періоду стабільної роботи частота помилок цифрового обміну починає зростати, але ще не перевищує допустимого рівня, традиційний контроль може не зафіксувати несправність. Натомість обробка з урахуванням “розладнання” дозволяє виявити зміну режиму та своєчасно запланувати додаткову перевірку.

Такий підхід може застосовуватися не лише для окремих електронних блоків, а й для ширшої системи експлуатації повітряного судна. Дані про відмови, повторюваність повідомлень, результати технічного обслуговування, витрати ресурсів і ефективність ремонтних дій також можуть мати нестационарний характер. Тому в умовах експлуатації старіючого парку повітряних суден виявлення “розладнання” є важливим інструментом підвищення достовірності контролю, раціонального використання ресурсів і підтримання льотної придатності.

Подальший розвиток методів контролю технічного стану електронних систем повітряних суден пов’язаний із переходом від фіксації вже наявної несправності до раннього виявлення ознак зміни режиму функціонування системи. Для старіючого парку повітряних суден це має особливе значення, оскільки деградаційні процеси не завжди проявляються як миттєвий вихід параметра за допустимі межі. Часто спочатку змінюється характер поведінки параметра: зростає середній рівень, збільшується дисперсія, змінюється тренд або частіше виникають короточасні відхилення.

У таких умовах традиційне порівняння параметра з верхньою або нижньою допустимою межею є недостатнім. Параметр може ще залишатися в експлуатаційному діапазоні, але його статистичні характеристики вже свідчать про початок деградації. Саме тому під час контролю доцільно враховувати момент “розладнання”, після якого попередня модель поведінки параметра втрачає достатню точність, а подальше прогнозування має виконуватися з урахуванням нового режиму спостереження.

Графічно таку ситуацію можна подати у вигляді зміни визначального діагностичного параметра в часі. До моменту “розладнання” параметр коливається навколо відносно стабільного рівня і не виходить за допустимі межі. Після появи “розладнання” змінюється середній рівень параметра, збільшується амплітуда випадкових коливань або формується новий тренд, який може наближати систему до граничного стану. Такий процес наведено на рис. 3.

На рис. 3 показано, що до моменту “розладнання” контрольований параметр перебуває в межах експлуатаційного допуску та має відносно стабільний характер зміни. Після моменту “розладнання” спостерігається зміна поведінки параметра: його середній рівень зростає, випадкові коливання стають більш вираженими, а тренд наближається до верхньої допустимої межі. Така ситуація ще не обов’язково означає відмову системи, але вона є підставою для посиленого контролю, уточнення прогнозу та планування додаткової діагностики.

Для інженерно-технічного персоналу така інтерпретація графіка є важливою, оскільки вона зміщує увагу з факту порушення допустимих меж на більш ранню ознаку - зміну статистичної поведінки параметра. Це особливо актуально для електронних систем, у яких

несправності можуть мати нестійкий або прихований характер. Якщо момент “розладнання” виявлено завчасно, можна виконати додаткову перевірку, уточнити причину зміни параметра, оцінити її зв’язок із попередніми ремонтними діями та запобігти переходу системи до відмовного стану.

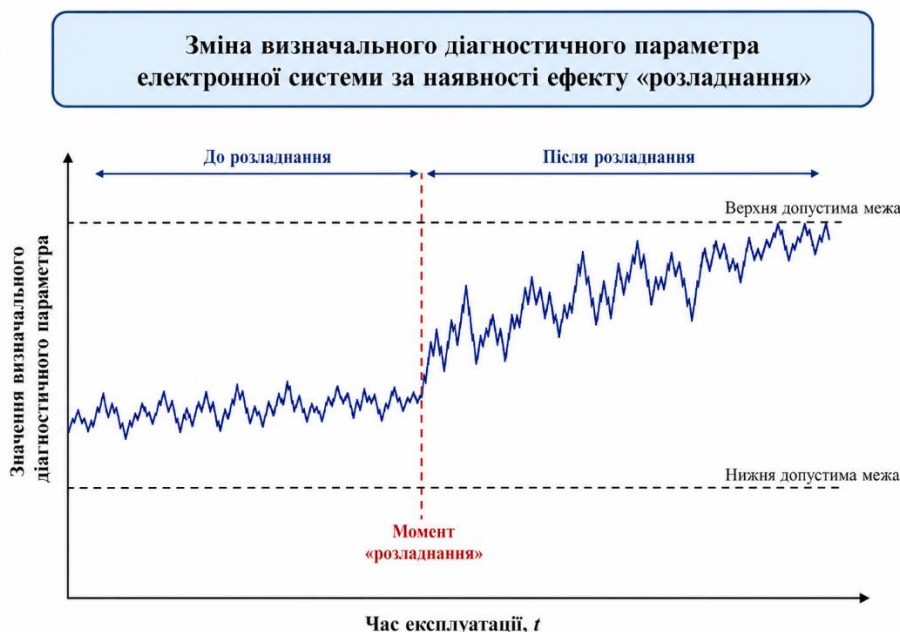


Рис. 3. Зміна визначального діагностичного параметра електронної системи за наявності ефекту “розладнання”

Застосування обробки з урахуванням “розладнання” також розширює можливості Інтернету речей у системі технічної експлуатації. Дані, що надходять від електронних систем, датчиків, засобів ВІТЕ/ВІТ і наземних інформаційних платформ, можуть використовуватися не лише для накопичення історії відмов, а й для виявлення зміни режиму роботи об’єкта контролю. Це створює основу для більш гнучкого прогнозування технічного стану, підвищення достовірності діагностування та раціонального планування технічного обслуговування.

Ймовірнісні показники безвідмовної роботи можуть використовуватися для загального оцінювання надійності електронних систем, однак у реальних умовах експлуатації вони не повинні розглядатися ізольовано від фактичних діагностичних даних. Для електронних систем повітряних суден характерними є вплив температурних режимів, вібрації, циклів увімкнення-вимкнення, якості електроживлення, вологості, старіння компонентів і програмно-апаратних взаємодій. Тому оцінювання надійності доцільно поєднувати з аналізом трендів контрольованих параметрів, повторюваності діагностичних повідомлень і виявленням моментів “розладнання” [17-20].

Якщо система має стабільні параметри, низький рівень повторюваності несправностей і відсутність ознак зміни режиму функціонування, вона може експлуатуватися у звичайному режимі. Якщо ж спостерігається зростання діагностичного показника, збільшення кількості повторних повідомлень або поява “розладнання” у тренді визначального параметра, доцільно перейти до режиму підвищеного контролю, уточнити прогноз і запланувати додаткову діагностику.

З урахуванням наведеного контроль технічного стану електронних систем повітряних суден доцільно розглядати як багаторівневий інформаційний процес. На нижньому рівні здійснюється вимірювання параметрів і вбудована самодіагностика окремих електронних блоків. На наступному рівні виконується обробка діагностичних повідомлень, журналів подій і результатів технічного обслуговування. На вищому рівні дані можуть інтегруватися

в інформаційне середовище експлуатаційної організації, де застосовуються методи аналізу трендів, виявлення “розладнання”, класифікації майбутнього стану та формування рекомендацій для інженерно-технічного персоналу.

Для старіючого парку повітряних суден такий підхід має особливе значення, оскільки дозволяє компенсувати обмежені можливості штатної діагностичної бази за рахунок накопичення й аналітичної обробки експлуатаційних даних. Інтернет речей у цьому контексті може виступати технологічною основою для об’єднання бортових джерел інформації, наземних систем технічного обслуговування, баз даних, персоналу та процесів експлуатації в єдину інформаційну систему [13, 14]. Це дає змогу не лише контролювати стан окремих електронних блоків, а й оцінювати ефективність технічних дій, витрати ресурсів, повторюваність відмов і результативність прийнятих рішень.

Поєднання традиційних методів контролю з новими інформаційними технологіями створює передумови для переходу від реактивної моделі технічного обслуговування до більш гнучкої моделі підтримання льотної придатності. У такій моделі технічні рішення приймаються не тільки за фактом появи відмови, а й на основі аналізу тенденцій, виявлення зміни режиму роботи системи та оцінювання ризику подальшого погіршення стану. Це дозволяє підвищити достовірність діагностування, зменшити кількість необґрунтованих заміन справних блоків і раціональніше використовувати експлуатаційні ресурси.

Висновки

У статті розглянуто методи контролю технічного стану електронних систем повітряних суден з урахуванням сучасних вимог до підтримання льотної придатності, розвитку інформаційних технологій та особливостей експлуатації старіючого парку повітряних суден. Показано, що контроль технічного стану є однією з основних технологічних операцій у системі експлуатації авіаційної техніки, оскільки саме його результати створюють основу для прийняття рішень щодо подальшої експлуатації, додаткової діагностики, ремонту, заміни блока або виконання запобіжних дій.

Встановлено, що для електронних систем повітряних суден недостатньо використовувати лише разову перевірку працездатності або фіксацію факту появи несправності. Значна частина відмов авіоніки має прихований, нестійкий або поступовий характер і може проявлятися через зміну параметрів живлення, температурного режиму, частоти помилок обміну даними, повторюваність діагностичних повідомлень або порушення взаємодії між суміжними бортовими системами. Тому найбільш доцільним є комплексне поєднання функціонального контролю, параметричного аналізу, вбудованого контролю VITE/VIT, обробки експлуатаційних даних і прогнозного контролю.

Обґрунтовано, що в умовах експлуатації старіючого парку повітряних суден особливого значення набуває використання нових інформаційних технологій, зокрема Інтернету речей. Їх застосування дозволяє розглядати контроль технічного стану не як ізольовану перевірку окремого електронного блока, а як частину ширшого інформаційного середовища, яке охоплює бортові системи, датчики, засоби самодіагностики, наземні інформаційні платформи, бази даних, персонал і процеси технічного обслуговування. Такий підхід створює передумови для підвищення достовірності діагностування, скорочення часу пошуку несправностей і раціональнішого використання експлуатаційних ресурсів.

Показано, що діагностичні параметри електронних систем у реальних умовах експлуатації не завжди є стаціонарними. Їх статистичні властивості можуть змінюватися під впливом деградаційних процесів, температурних навантажень, вібрації, електромагнітних завад, якості електроживлення, попередніх ремонтних дій або зміни режимів роботи повітряного судна. У зв’язку з цим доцільно враховувати ефект “розладнання”, за якого попередня модель поведінки параметра втрачає достатню точність, а подальше прогнозування має виконуватися з урахуванням нового етапу квазістаціонарності.

Запропоновано узагальнену структурну схему обробки діагностичних даних за наявності ефекту “розладнання”. Вона передбачає вимірювання параметрів електронних систем та

інших агрегатів повітряного судна, формування ковзного вікна спостережень, оцінювання статистичних характеристик, виявлення моменту “розладнання”, формування нової вибіркової сукупності, уточнення тренду визначального параметра, прогнозування його поведінки, класифікацію майбутнього стану об’єкта контролю та формування завдань для системи технічної експлуатації.

Практичне значення запропонованого підходу полягає в тому, що технічний персонал отримує можливість реагувати не лише на факт виходу параметра за допустимі межі, а й на зміну характеру його поведінки. Це дозволяє раніше виявляти ознаки деградації, своєчасно планувати додаткову діагностику, зменшувати кількість необґрунтованих заміन справних електронних блоків і підвищувати ефективність технічного обслуговування. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення моделей інтеграції бортових діагностичних даних із наземними аналітичними платформами, а також на уточнення методів виявлення “розладнання” для різних типів електронних систем, інших систем і агрегатів повітряних суден.

Список використаної літератури:

1. European Union Aviation Safety Agency. Easy Access Rules for Continuing Airworthiness (Regulation (EU) No 1321/2014). Revision from September 2025. EASA, 2025.
2. Federal Aviation Administration. AC 43.13-1B: Acceptable Methods, Techniques, and Practices — Aircraft Inspection and Repair. Washington, DC: FAA, 1998. Change 1, 2001.
3. Federal Aviation Administration. AC 20-115D: Airborne Software Development Assurance Using EUROCAE ED-12() and RTCA DO-178(). Washington, DC: FAA, 2017.
4. Federal Aviation Administration. AC 20-152A: Development Assurance for Airborne Electronic Hardware. Washington, DC: FAA, 2022.
5. RTCA. DO-178C: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification. Washington, DC: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2011.
6. RTCA. DO-254: Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware. Washington, DC: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2000.
7. SAE International. ARP4754B: Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. Warrendale, PA: SAE International, 2010.
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. DOI: 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. DOI: 10.1016/j.ymsp.2005.09.012.
11. Lee J., Wu F., Zhao W., Ghaffari M., Liao L., Siegel D. Prognostics and health management design for rotary machinery systems — Reviews, methodology and applications. Mechanical Systems and Signal Processing. 2014. Vol. 42, No. 1–2. P. 314–334. DOI: 10.1016/j.ymsp.2013.06.004.
12. Mobley R. K. An Introduction to Predictive Maintenance. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2002.
13. ISO/IEC 30141:2024. Internet of Things (IoT) — Reference Architecture. Geneva: International Organization for Standardization, 2024.
14. OASIS. MQTT Version 5.0. OASIS Standard. 2019.
15. Basseville M., Nikiforov I. V. Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1993.
16. O. V. Solomentsev, M. Yu. 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>. (–).

17. O. 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).
18. O. Sushchenko, Y. Bezkorovainyi, O. Solomentsev, M. Zaliskyi, O. Holubnychyi, I. Ostroumov, Y. Averyanova, V. Ivannikova, B. Kuznetsov, I. Bovdui, T. Nikitina, R. Voliansky, K. Cherednichenko, and O. Sokolova, "Algorithm of Determining Errors of Gimballed Inertial Navigation System," in Lecture Notes in Computer Science, vol. 14816, 2024, pp. 206-218, https://doi.org/10.1007/978-3-031-65223-3_14. (Q2).
19. V. Ivannikova, M. Zaliskyi, O. Solomentsev, I. Ostroumov, N. Kuzmenko, "Statistical Data Processing Technologies for Sustainable Aviation: A Case Study of Ukraine", in Sustainability, 2025, vol. 17, no. 13: 5781. <https://doi.org/10.3390/su17135781>. (Q1)
20. M. Zaliskyi, V. Ivannikova, O. Solomentsev, I. Ostroumov, N. Kuzmenko, "The approach to optimization of the structure of the repair process of aviation radio equipment", In Transport, 2025, Vol. 40(1), pp. 50–63. <https://doi.org/10.3846/transport.2025.24012>. (Q2).

Автор статті

Плуговий Антон – студент, Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

Author of the article

Plugoviy Anton – student, Kyiv Aviation Institute National University, Kyiv, Ukraine.

Надійшла до редакції: 03.05.2026

Прийнята до друку: 06.05.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Плуговий А.О.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>