

ІННОВАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ГАЛУЗЯХ АВІАЦІЇ, АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ, РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, РАДІОТЕХНІКИ, ЗАСОБІВ ЗВ'ЯЗКУ ТА АСУ, А ТАКОЖ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

DOI 10.33099/2786-7714-2024-2-7-106-113

УДК 519.233.2: 621.391.83

Мельник Вікторія Вікторівна

<https://orcid.org/0000-0002-8240-1232>

Гончаренко Євген Володимирович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0001-7654-6083>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Надійність функціонування обладнання є запорукою його ефективного використання за призначенням. Нещодавній розвиток інформаційних технологій щодо обробки даних та підвищення обчислювальних можливостей сучасного обладнання знову привернули фокус уваги дослідників щодо синтезу та аналізу нових методів оцінки показників надійності. Для цивільної авіації задачі оцінки надійності особливо важливі для визначення технічного стану обладнання, оскільки його погіршення значно впливає на рівень безпеки польотів. Причини погіршення технічного стану радіоелектронного обладнання зазвичай включають старіння компонентної бази, рівень навантаження з урахуванням умов експлуатації, рівень підготовки авіаційного персоналу тощо. Тому задачі своєчасного виявлення погіршення технічного стану обладнання та оцінки параметрів, що характеризують прийняті або встановлені моделі надійності на основі результатів спостережень, є актуальними. Аналіз літератури щодо методів оцінки надійності було проведено у трьох напрямках: аналіз нормативної та регуляторної документації щодо технічної експлуатації авіаційного радіоелектронного обладнання; аналіз наукових досліджень вітчизняних вчених та аналіз світового досвіду у вирішенні проблеми оцінки надійності. При цьому аналіз показав, що більшість досліджень оцінюють такі показники надійності, як імовірність безвідмовної роботи, середній час роботи між відмовами та коефіцієнт готовності. Метою роботи є аналіз публікацій у галузі застосування передових методів розрахунку та оцінки надійності для різних технічних систем, включаючи радіоелектронне обладнання літаків та розрахунок показників надійності радіо-електронних систем, що експлуатуються під час польотів літаків Ан-74(72). Вихідною інформацією для аналізу є статистичний звіт, що містить дані про спостережувані напрацювання між відмовами. Проведене дослідження дозволило визначити сучасні тенденції у розвитку досліджень у галузі надійності та може бути також розглянутий як основа для синтезу нових методів оцінки та прогнозування надійності радіоелектронного обладнання літаків.

Ключові слова: надійність, показники надійності, радіоелектронні системи, модель відмов, прогнозування відмов, авіація.

Вступ

Бортові радіоелектронні системи є структурними частинами авіаційного обладнання, що складаються з пристроїв зв'язку, навігації та спостереження (РЕО) [1]. Ці пристрої дають можливість організувати канал зв'язку між повітряним судном та авіадиспетчерами, а також надають інформацію про місцезнаходження, повітряний рух, метеорологічну обстановку тощо [2].

Нормативні документи цивільної авіації встановлюють жорсткі вимоги до надійності РЕО через великий вплив на рівень ризиків авіаційних подій. Існують різні підходи до забезпечення надійності. Ці підходи можуть бути реалізовані на всіх етапах життєвого циклу обладнання [3].

На етапі експлуатації забезпечення надійності здебільшого пов'язане з розробкою системи підтримки рішень на основі даних для покращення процесу технічного обслуговування [4]. Така система може виконувати функції моніторингу

стану, профілактичного обслуговування, управління ресурсами та інші [5, 6].

У загальному випадку методи забезпечення високого рівня надійності можуть суттєво підвищити ефективність використання обладнання за функціональним призначенням [7].

Слід зазначити, що РЕО має певний часовий ресурс для експлуатації. Граничне значення часового ресурсу для експлуатації визначається умовами експлуатації, навантаженням, фізичними процесами, що відбуваються в компонентній базі радіоелектронних систем, діями оперативного персоналу, своєчасним виконанням технічного обслуговування та ремонту тощо. Крім того, ми можемо спостерігати випадки, коли навіть після вичерпання встановленого під час проектування часового ресурсу, рівень надійності обладнання залишається на прийнятному рівні. Зазначений фактор мотивує до розробки нових технологій оцінки та прогнозування надійності РЕО з метою визначення можливості продовження експлуатації

обладнання.

Основний внесок цього дослідження пов'язаний з удосконаленням теорії технічного обслуговування бортових радіоелектронних систем в частині синтезу нових методів прогнозування надійності. Основна увага приділяється випадку експлуатації обладнання при перевищенні меж встановленого ресурсу.

Під час експлуатації повітряних суден завдання підтримки необхідного рівня надійності РЕО є складовою частиною інженерно-авіаційного забезпечення (ІАЗ). Іншими завданнями ІАЗ є: здійснення основних процесів експлуатації авіаційної техніки, включаючи використання повітряних суден за їх функціональним призначенням; технічне обслуговування та ремонт; навчання та підготовка авіаційного персоналу; контроль та інспекцію технічного стану авіаційної техніки тощо. При цьому слід враховувати, що надійність радіоелектронних систем нерозривно пов'язана з характеристиками основних експлуатаційних процесів [8, 9].

Авіаційне обладнання, включаючи бортові пристрої РЕО, має можливість експлуатуватися до досягнення граничного стану. Своєчасне виявлення факту настання граничного стану здійснюється на основі аналізу надійності певного пристрою РЕО [10, 11].

Визначення граничного стану обладнання зазвичай пов'язане з певними показниками надійності. Виділяють такі основні показники надійності РЕО: ймовірність безвідмовної роботи, середній час напрацювання на відмову та інші [12].

Аналіз надійності може проводитися з використанням якісних та кількісних методів. Якісний аналіз проводиться до кількісного аналізу та може включати використання діагностичних дерев відмов або схем надійності, реалізацію лямбда методу та інші. Під час кількісного аналізу значення основних показників надійності розраховуються або оцінюються за заданим правилом [13, 14]. Для розрахунку показників надійності за результатами статистичних спостережень необхідно визначити модель відмов. Для опису характеру виникнення раптових відмов використовують такі розподіли: експоненціальний, DN-розподіл, DM-розподіл, логарифмічно нормальний розподіл, розподіл Вейбулла та інші.

У сучасних наукових публікаціях приділяється достатньо уваги синтезу та аналізу методів оцінки надійності.

У роботі [15] запропоновано узагальнений підхід до оцінювання показників надійності наземних радіоелектронних засобів при погіршенні їх технічного стану, що пов'язано з можливим вичерпанням встановленого ресурсу за часом. Автори зробили висновок, що з точки зору статистики, проблеми, пов'язані з погіршенням технічного стану з точки зору показників надійності, можна розділити на дві групи: виявлення факту погіршення та оцінювання тенденції зміни показників надійності після виявлення. Для виявлення факту зміни технічного стану на етапі експлуатації понад призначений термін служби в роботі пропонується використовувати методи статистичного виявлення, зокрема, засновані на критерії Неймана-Пірсона. Ці технології оцінювання можуть бути

вдосконалені шляхом застосування інших методів статистичної оцінки та інших моделей для опису процесів деградації бортових пристроїв РЕО.

У публікації [16] проведено аналіз можливих процесів деградації під час експлуатації технічних систем та оцінку їх надійності. Представивши класифікацію відмов обладнання як раптових та поступових, автори визначають процес деградації як стан, коли визначальний параметр або певний показник надійності досягає встановленого експлуатаційного порогу, після перетину якого подальша експлуатація обладнання, як правило, неможлива. При цьому визначено різні підходи до аналізу процесу зміни технічного стану, а саме: 1) підхід з використанням моделі (фізично обґрунтованої або статистичної); 2) підхід з використанням досвіду (використання експертних систем або систем з нечіткою логікою); 3) підхід з використанням даних (використання методів штучного інтелекту). Аналіз також дозволив авторам виділити два типи моделей погіршення технічного стану: 1) модель нормальної деградації (з можливістю врахування зовнішніх факторів); 2) прискорена модель. Автори надають математичний апарат для опису різних моделей та пропонують шляхи їх використання для вирішення завдань оцінювання показників надійності.

У публікації [17] здійснено аналіз нового Баєсівського методу оцінки надійності на прикладі визначення інтенсивності відмов для статистичних даних з однією відмовою та що характеризуються експоненціальною щільністю розподілу ймовірностей. Автор розглядає математичну кореляцію з урахуванням того факту, що експоненціальний розподіл можна отримати з гамма-розподілу. У роботі наведено доведення для п'яти теорем, що дають змогу зробити висновок про високу точність оцінки та водночас низьку складність обчислень. Крім того, дослідження містить числовий приклад для пояснення запропонованої методології оцінки показника надійності.

На відміну від попереднього дослідження, стаття [18] зосереджена на дослідженні непараметричного підходу до оцінки ймовірності безвідмовної роботи, який використовується для розрахунку навантаження потоків трафіку. Непараметричні методи оцінювання не вимагають від дослідника знання закону розподілу досліджуваної статистики. Такими методами є, зокрема, знакові та рангові технології. У цьому дослідженні задача вирішується на основі побудови гістограми за даними спостережень.

Стаття [19] присвячена аналізу моделі надійності Вейбулла. Для оцінки показників надійності (ймовірності безвідмовної роботи, інтенсивності відмов та середнього напрацювання до відмови) автором розроблено схему блокового цензурування. В якості математичного апарату оцінювання обрано метод максимальної правдоподібності та Баєсівський метод.

Процеси зміни технічного стану техніки на етапі експлуатації за межами призначеного строку експлуатації розглянуто в роботі [20]. Основним математичним апаратом є теорія статистичного висновку для опису Вінерівських процесів. На цій основі автори для оцінки ймовірності безвідмовної роботи використовують модель зворотного

Гауссівського розподілу. Крім того, оцінювання значення параметрів моделі проводиться ітераційною ЕМ-процедурою, що базується на використанні функції правдоподібності. Подібний підхід використовується в публікації [21]; однак, основна увага приділяється аналізу наборів даних з невеликим розміром спостереження.

Сучасним трендом в області обробки сигналів та даних, теорії прийняття рішень на основі даних є застосування технологій на основі штучного інтелекту. Ця тенденція не оминула і теорію надійності. Наприклад, у роботі [22] розглянуто особливості застосування нейронної мережі зворотного поширення помилки для вирішення завдань оцінки надійності. Ця нейронна мережа складається з вхідного, прихованого та вихідного шарів. Навчання нейронної мережі проводиться в програмі Matlab з урахуванням припущення про дво-параметричний розподіл Вейбулла для напрацювання до відмови. Після застосування методу медіанних рангів автори отримали точні оцінки ймовірності безвідмовної роботи та середнього часу напрацювання на відмову для досліджуваних наборів даних. Інший тип нейронної мережі для прогнозування надійності був досліджений у [23]. Така мережа є комплексно-значною нейронною мережею, що дозволяє якісно вирішувати задачі середньострокового та довгострокового прогнозування, тому її застосування для визначення технічного стану обладнання є виправданим.

Проведений аналіз наукових досліджень у галузі розробки та застосування методів оцінки надійності показав, що сучасні інформаційні технології здатні реалізовувати складні математичні розрахунки, завдяки чому можна отримати кращу ефективність оцінки та кращі прогностичні властивості. Серед перспективних методів оцінки надійності залишаються: Баєсівські процедури, метод максимальної правдоподібності та методи, що базуються на використанні нейронних мереж.

Метою даного дослідження є аналіз надійності радіоелектронних систем, що експлуатуються під час польотів літаків Ан, з використанням існуючої методології та синтез нових методик оцінки надійності у випадку експлуатації техніки після встановленого під час проектування ресурсу.

Матеріали та методи

В роботі проводиться аналіз надійності радіоелектронних систем літаків, що експлуатуються в Україні. Об'єктом розгляду є парк із п'яти літаків Ан.

Отримано статистичні звіти щодо надійності роботи РЕО повітряних суден протягом 2018-2022 років для зазначеного парку повітряних суден.

Аналіз показав, що основним джерелом відмов є два типи обладнання:

- обладнання радіолокації;
- радіонавігаційне обладнання;

Статистичні звіти з моніторингу надійності включають:

- реєстрацію дня відмови;
- тривалість роботи обладнання з початку експлуатації (ЗПЕ);
- тривалість роботи обладнання після останнього ремонту (ПОР);
- тривалість роботи обладнання після останніх регламентних робіт (ПОРР);
- причина відмови та її наслідки;
- особливості відмови та коригувальні заходи, спрямовані на запобігання спостережуваній відмові.

Приклад статистичних даних щодо напрацювань між відмовами обладнання наведено в таблиці 1, де на момент виявлення відмови зафіксовані наступні часові показники:

ЗПЕ – час напрацювання з початку експлуатації;

ПОР – час напрацювання після останнього ремонту;

ПОРР – час напрацювання після останніх регламентних робіт.

Таблиця 1

Статистичні дані щодо напрацювань між відмовами

Номер відмови	Обладнання	Напрацювання (години)		
		ЗПЕ	ПОР	ПОРР
1	“Буран-72”	211	64	46
2	“Буран-72”	219	73	52
3	“Буран-72”	2507	39	39
4	“Буран-72”	230	102	62
5	“Курс МП-70”	1340	563	8
6	“Буран-72”	240	10	173
7	“Курс МП-70”	2579	369	123
8	“Буран-72”	251	11	184
9	“Буран-72”	251	30	184
10	“Буран-74”	2591	88	7
11	“Курс МП-70”	1389	205	6
12	“Курс МП-70”	909	112	181
13	“Буран-74”	2600	9	16
14	“Буран-72”	918	918	190
15	“Буран-74”	2605	101	21
16	“Буран-74”	2638	54	54
17	“Курс МП-70”	946	37	218
18	“Буран-72”	953	170	225
19	“Буран-72”	358	358	191
20	“Курс МП-70”	2710	135	13
21	“Буран-72”	1057	140	93

Результати

За результатами аналізу статистичних звітів визначено, що протягом використання зазначеного парку повітряних суден за призначенням за 2018 – 2022 роки трапилося 21 відмова комплексу “Буран-72 (74)” та системи “Курс МП-70”. При цьому 15 відмов стосувалися радіолокаційного комплексу “Буран-72 (74)”. Окрім того, слід зазначити, що відмова бортової радіолокаційної станції значно підвищує ризики виникнення авіаційних подій, наслідки яких можуть бути катастрофічними.

Причинами відмов були:

низька надійність деяких блоків обладнання;
довготривала експлуатація обладнання (у тому числі поза межами встановленого терміну служби).

Відмови проявлялися у відсутності або некоректності індикації, несправному стані передавача, несправному стані резервного комплекту, у вигляді перегорання запобіжників, відсутності управління обладнанням, проблемами з обертання антенних систем тощо.

Для візуального та більш детального аналізу наведених статистичних даних побудуємо відповідні графіки. При цьому зробимо такі позначення: напрацювання з початку експлуатації ЗПЕ – $t_{ЗПЕ}$, напрацювання після останнього ремонту ПОР – $t_{ПОР}$, напрацювання ПОРР – $t_{ПОРР}$, кумулятивна функція розподілу – $F(t_{ПОР})$.

Графіки залежності напрацювання ЗПЕ від напрацювання ПОР, напрацювання ЗПЕ від напрацювання ПОРР та напрацювання ПОР від напрацювання ПОРР наведені на рис. 1 – 3.

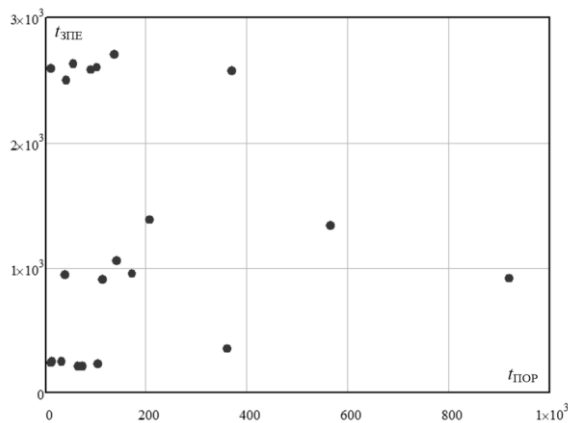


Рисунок 1. Графік залежності напрацювання ЗПЕ від напрацювання ПОР

За точковими даними на рис. 1 та 2 можна відстежити загальну кількість експлуатованих засобів радіолокації та радіонавігації, під час експлуатації яких виникали раптові відмови. На цих графіках залежності можна відстежити 11 зростаючих груп кластерів, які відповідають 11 зразкам експлуатованого РЕО.

Дані на рис. 3 є більш важливими з точки зору вдосконалення процесів експлуатації РЕО ПС. На рис. 3 проведена додаткова пряма $y(t) = t$, яка необхідна для співвідношення ремонтних та регламентних робіт. Як видно, 9 точкових

спостережень розміщені нижче прямої лінії. Така ситуація відповідає випадку, коли $t_{ПОР} < t_{ПОРР}$. Фізично це означає, у випадку відсутності проведення регламентних робіт після відмови 42,9 % зразків РЕО знов відмовить протягом наступних 200 годин експлуатації. Точки, що знаходяться над прямою лінією, умовно розділити на два кластери: 1) кучний кластер біля початку системи координат та 2) кластер широкого радіусу, що містить 4 точки зі значеннями напрацювань $t_{ПОР} > 350$ годин.

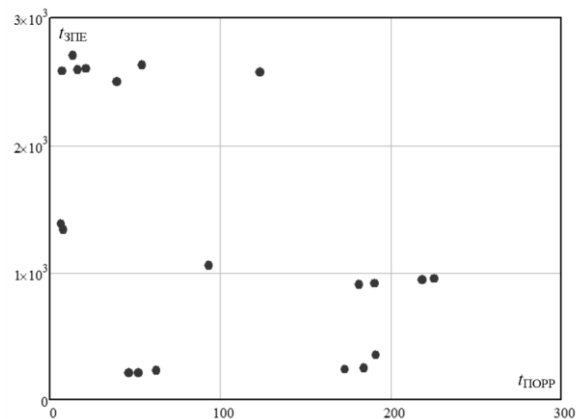


Рисунок 2. Графік залежності напрацювання ЗПЕ від напрацювання ПОРР

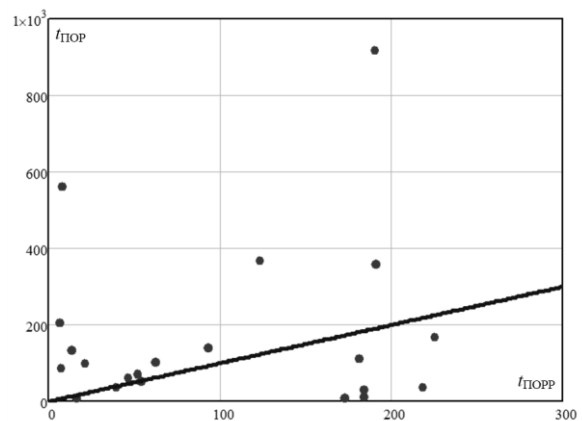


Рисунок 3. Графік залежності напрацювання ПОР від напрацювання ПОРР

Перший кластер свідчить про неефективність виконання планових регламентних робіт після відновлення працездатності РЕО. Другий кластер відповідає випадку ефективного технічного обслуговування. Однак за результатами наведених статистичних спостережень планові регламентні роботи були виконані ефективно лише у 33 % спостережень. Наведений результат спонукає до модернізації як змісту планових регламентних робіт, так і їхньої тривалості.

Для дослідження статистичної природи спостережених даних побудуємо кумулятивну функцію розподілу напрацювань ПОР. Побудова цієї функції здійснювалася у три етапи:

ранжування спостережених напрацювань ПОР у порядку зростання від найменшого до найбільшого;

визначення значень кумулятивної функції

розподілу з наступних міркувань. Ця функція є східчастою кривою, значення якої дорівнює ймовірності того, що $t_{\text{ПОР}}$ буде меншою за наперед заданого значення. Оскільки обсяг спостережень дорівнює 21, то кумулятивна функція розподілу буде містити 21 сходинку з амплітудою $1/21$, кожна з яких спостерігається в момент виникнення відмови;

побудова кумулятивної функції розподілу за формулою 1:

$$F(t_{\text{ПОР}}) = \frac{1}{21} \sum_{i=1}^{21} \varphi(t - t_{\text{ПОР}i}), \quad (1)$$

де $\varphi(t - t_{\text{ПОР}i})$ – функція Хевісайда, яка дорівнює нулю, якщо $t < t_{\text{ПОР}i}$, та одиниці – у протилежному випадку.

Слід зазначити, що відповідно основних теоретичних постулатів теорії надійності у зазначеному випадку кумулятивна функція розподілу буде співпадати з ймовірністю відмови РЕО $Q(t)$. За її значеннями можна знайти ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, а також щільність розподілу ймовірностей напрацювань між відмовами $f(t)$. При цьому слід зазначити, що для розрахунку щільності розподілу ймовірностей необхідно виконати графічно дискретне визначення похідної. За результатами спостережень також було визначено середнє напрацювання між відмовами, яке склало 171 годину.

Перевіримо гіпотезу щодо експоненціального закону розподілу спостережених статистичних даних про напрацювання між відмовами. При цьому теоретична кумулятивна функція розподілу визначатиметься відповідно до формули 2:

$$F^{(\text{ТЕОР})}(t_{\text{ПОР}}) = 1 - e^{-t_{\text{ПОР}}/21}, \quad (2)$$

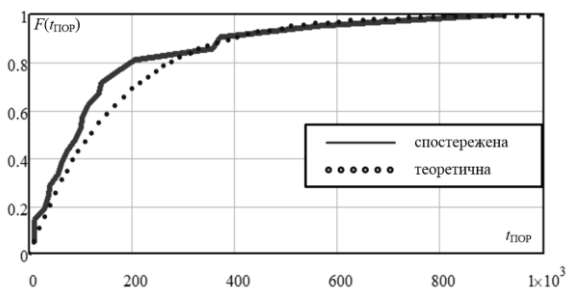


Рисунок 4. Теоретична та спостережена кумулятивні функції розподілу

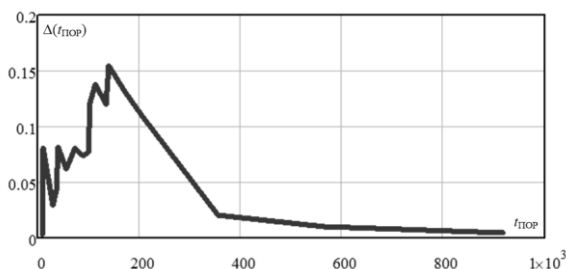


Рисунок 5. Відхилення між теоретичною та спостереженою кумулятивними функціями розподілу напрацювань ПОР

На рисунках 4 та 5 наведені результати порівняння теоретичної та спостереженої кумулятивних функцій розподілу.

На рис. 5 параметр $\Delta t_{\text{ПОР}}$ є різницею за модулем між теоретичною та спостереженою кумулятивними функціями розподілу напрацювань ПОР.

Для перевірки узгодженості між функціями розподілу було використано модифікований критерій Колмогорова для малих вибірок. Це пояснюється тим, що звичайний класичний критерій Колмогорова слід застосовувати у випадку, коли обсяг спостережень перевищує 50 значень. Критичне значення модифікованого критерію склало 0,747. А отже, можна зробити висновок, що з довірчою ймовірністю 0,64 спостережені значення напрацювань ПОР РЕО повітряних суден можуть бути описані експоненціальним законом розподілу.

Обговорення

Для більш глибокого з'ясування причин виникнення відмов РЕО ПС був проведений аналіз інших експлуатаційних звітів. Унаслідок такого аналізу, а також враховуючи теоретичні засади з особливостей експлуатації бортового РЕО, можна виділити такі причини виникнення відмов:

- старіння компонентної бази радіоелектронного обладнання;
- електромагнітна сумісність та електромагнітні впливи;
- несправність складових систем та допоміжних елементів;
- неефективне технічне обслуговування та ремонт;
- недостатня кваліфікація персоналу;
- обмеженість витратного фонду авіапідприємства та відсутність якісних запасних частин;
- неефективний контроль якості під час виробництва;
- складні умови експлуатації;
- порушення умов зберігання та транспортування;
- наявність прихованих невідповідностей у системах експлуатації РЕО.

Основною причиною збільшення кількості відмов є процес погіршення технічного стану РЕО. Зазвичай такий процес пов'язаний з аналізом параметра інтенсивності відмов та можливостями виникнення раптових відмов. Для цього випадку в випадковий момент часу інтенсивність відмов починає зростати. Практика експлуатації показує, що цей момент часу зазвичай знаходиться поблизу граничних значень призначеного ресурсу обладнання, визначеного на етапі проектування. Визначення моменту початку деградаційних процесів є актуальним завданням, оскільки до його виникнення обладнання зберігає свої основні функції і ще можлива його ефективна робота.

Для прийняття рішення про деградацію РЕО необхідно розробити процедури обробки даних про надійність. Зазвичай такі процедури передбачають складні математичні розрахунки,

але сучасний розвиток інформаційних технологій дозволяє досить швидко реалізувати ці розрахунки. Наприклад, якщо параметр інтенсивності відмов $\lambda(t)$ зростає відповідно до квадратичної функції, найпростішим математичним описом параметрів надійності (ймовірності безвідмовної роботи та функції щільності ймовірності для часу роботи між відмовами) буде

$$\lambda(t) = \lambda_0 \vartheta(t) + \omega(t - t_{\text{дег}})^2 \vartheta(t - t_{\text{дег}}),$$

$$P(t) = e^{-\lambda_0 t - \frac{1}{3} \omega (t - t_{\text{дег}})^3 \vartheta(t - t_{\text{дег}})},$$

$$f(t) = (\lambda_0 \vartheta(t) + \omega(t - t_{\text{дег}})^2 \vartheta(t - t_{\text{дег}})) e^{-\lambda_0 t - \frac{1}{3} \omega (t - t_{\text{дег}})^3 \vartheta(t - t_{\text{дег}})},$$

де λ_0 – інтенсивність відмови для нормальних умов експлуатації; ω – швидкість деградації; $t_{\text{дег}}$ – момент часу початку деградаційних процесів; $\vartheta(x)$ – одинична функція, яка може приймати значення:

$$\vartheta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

У практиці експлуатації обладнання також спостерігаються випадки деградації, які пов'язані з поступовими відмовами. Така ситуація викликає необхідність вимірювання певних визначальних параметрів. При цьому процедура обробки даних вимагає побудови достатньо точних математичних моделей, наведених в роботі [24].

Для вдосконалення процедури превентивного обслуговування необхідна апіорна інформація про експлуатаційні допуски, а відповідне технічне обслуговування повинно проводитися в момент, коли визначальний параметр безпосередньо наближається до допуску. Такий підхід дозволяє збільшити тривалість використання обладнання за його функціональним призначенням і зменшити спостережувану кількість відмов.

Висновки

Стаття присвячена питанням аналізу надійності РЕО повітряних суден. Об'єктом дослідження став парк із п'яти літаків Ан-74(72), що експлуатуються в Україні.

У статті проаналізовано реальні статистичні дані напрацювання на відмову навігаційного та радіолокаційного обладнання. На підставі цих даних були отримані залежності напрацювання з початку експлуатації (ЗПЕ) від напрацювання після останнього ремонту (ПОР), напрацювання з початку експлуатації (ЗПЕ) від напрацювання після останніх регламентних робіт (ПОРР) та напрацювання після останнього ремонту (ПОР) від напрацювання після останніх регламентних робіт (ПОРР). Ці залежності дають можливість прийняти рішення щодо ефективності здійснення експлуатаційних процесів. Крім того, виконано розрахунок кумулятивної функції розподілу напрацювань ПОР, яку можна використовувати для визначення ймовірності безвідмовної роботи та щільності розподілу ймовірності для напрацювання ПОР. Запропонований експоненційний закон розподілу характеризується сталою інтенсивністю відмов. Такий розподіл не враховує старіння та зношування. Разом з тим запропонований розподіл надає суттєві методичні похибки під час оцінювання показників надійності.

Рекомендую врахувати під час подальшого проведення досліджень процесів старіння елементів та блоків авіаційної техніки.

Майбутні напрямки досліджень пов'язані з: обґрунтуванням статистичної моделі раптових відмов бортових радіоелектронних систем; аналізом процедур прогнозування для оцінки показників надійності;

впровадженням методів, заснованих на даних, для прогнозного технічного обслуговування бортових радіоелектронних систем;

удосконаленням процесу технічного обслуговування у разі погіршення стану обладнання.

Список використаних джерел

1. Ostroumov, I.V., Marais, K., Kuzmenko, N.S.: Aircraft positioning using multiple distance measurements and spline prediction. *Aviation* 26(1), 1–10 (2022). DOI: 10.3846/aviation.2022.16589.
2. Ostroumov, I.V., Kuzmenko, N.S.: Configuration analysis of European navigational aids network. In: *International Conference on Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference*, pp. 1–9. IEEE, Dulles, USA (2021). DOI: 10.1109/ICNS52807.2021.9441576.
3. Solomentsev, O. et al.: Data processing through the lifecycle of aviation radio equipment. In: *IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, pp. 146–151. IEEE, Lviv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/CSIT56902.2022.10000844.
4. Zaliskyi, M. et al.: Model building for diagnostic variables during aviation equipment maintenance. In: *IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, pp. 160–164. IEEE, Lviv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/CSIT56902.2022.10000556.
5. Jardine, A.K.S., Tsang, A.H.C.: *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications*. 2nd edition. CRC Press, Boca Raton (2017).
6. Ostroumov, I.V., Kuzmenko, N.S.: Statistical analysis and flight route extraction from automatic dependent surveillance-broadcast data. In: *International Conference on Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference*, pp. 1–9. IEEE, Dulles, USA (2022). DOI: 10.1109/ICNS54818.2022.9771515.
7. Galar, D., Sandbom, P., Kumar, U.: *Maintenance costs and life cycle cost analysis*. CRC Press, Boca Raton (2017).
8. Sushchenko, O. et al.: Airborne sensor for measuring components of terrestrial magnetic field. In: *41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, pp. 687–691. IEEE, Kyiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926760.
9. Ostroumov, I. et al.: Relative navigation for vehicle formation movement. In: *3rd KhPI Week on Advanced Technology*, pp. 1–4. IEEE, Kharkiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916414.
10. Kuzmenko, N. et al.: Airplane flight phase identification using maximum posterior probability method. In: *3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing*, pp. 1–5. IEEE, Kyiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/SAIC57818.2022.9922913.
11. Larin, V. et al.: Prediction of the final discharge of the UAV battery based on fuzzy logic estimation of information and influencing parameters. In: *3rd KhPI Week on Advanced Technology*, pp. 1–6. IEEE, Kharkiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916490.
12. Averyanova, Yu. et al.: Turbulence detection and classification algorithm using data from AWR. In: *IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, pp. 518–522. IEEE, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037172.
13. Solomentsev, O.V., Zaliskyi, M.Yu., Zuiiev O.V., Asanov, M.M.: Data processing in exploitation system of Unmanned Aerial Vehicles radioelectronic equipment. In: *2nd International*

Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments, pp. 77–80. IEEE, Kyiv, Ukraine (2013).

14. Sushchenko, O. et al.: Integration of MEMS inertial and magnetic field sensors for tracking power lines. In: XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), pp. 33–36. IEEE, Polyana (Zakarpattia), Ukraine (2022). DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002907.

15. Solomentsev, O., Zaliskyi, M., Herasymenko, T., Kozhokhina, O., Petrova, Y.: Data processing in case of radio equipment reliability parameters monitoring. In: 2018 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), pp. 219–222. IEEE, Riga, Latvia (2018). DOI: 10.1109/RTUWO.2018.8587882.

16. Gorjian, N., Ma, L., Mittinty, M., Yarlagadda, P., Sun, Y.: A review on degradation models in reliability analysis. In: Kiritsis, D., Emmanouilidis, C., Koronios, A., Mathew, J. (eds.): Engineering Asset Lifecycle Management, pp. 369–384. Springer, London (2010). DOI: 10.1007/978-0-85729-320-6_42.

17. Han, M.: Estimation of failure rate and its applications in reliability engineering. In: International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, pp. 924–928. IEEE, Chengdu, China (2012). DOI: 10.1109/ICQR2MSE.2012.6246376.

18. Hu, Y., Wei, G., Ke, Y.: Application of reliability non-parametric estimation methods based on computation of capacity. In: 9th International Conference on Reliability, Maintainability and

Safety, pp. 445–449. IEEE, Guiyang, China (2011). DOI: 10.1109/ICRMS.2011.5979311.

19. Zhu, T.: Reliability estimation for two-parameter Weibull distribution under block censoring. Reliability Engineering and System Safety 203, 1–27 (2020). DOI: 10.1016/j.res.2020.107071.

20. Pan, D., Wei, Y., Fang, H., Yang, W.: A reliability estimation approach via Wiener degradation model with measurement errors. Applied Mathematics and Computation 320, 131–141 (2018). DOI: 10.1016/j.amc.2017.09.020.

21. Liu, D., Wang, S.: A degradation modeling and reliability estimation method based on Wiener process and evidential variable. Reliability Engineering and System Safety 202, 1–28 (2020). DOI: 10.1016/j.res.2020.106957.

22. Su, C., Jiang, Y.: Forecasting model for degradation path and parameter estimation based on neural network. In: 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 1735–1738. IEEE, Beijing, China (2009). DOI: 10.1109/ICIEEM.2009.5344341.

23. Fink, O., Zio, E., Weidmann, U.: Predicting component reliability and level of degradation with complex-valued neural networks. Reliability Engineering and System Safety, 121, 198–206 (2014). DOI: 10.1016/j.res.2013.08.004.

24. Al-Azzeh, J., Mesleh, A., Zaliskyi, M., Odarchenko, R., Kuzmin, V.: A method of accuracy increment using segmented regression. Algorithms 15(10): 378, 1–24 (2022). DOI: 10.3390/a15100378.

Viktoriiia Melnyk

<https://orcid.org/0000-0002-8240-1232>

Yevhen Honcharenko (PhD)

<https://orcid.org/0000-0001-7654-6083>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE RELIABILITY ASSESSMENT METHODS FOR ONBOARD RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT

Reliability of equipment functioning is a guarantee of its effective intended use. Recently, researchers again began to pay attention to the synthesis and analysis of new reliability assessment methods, which is primarily related to the development of information technologies for data processing and computing capabilities of modern equipment. In civil aviation, reliability assessment tasks are particularly important for determining the technical condition of equipment, as its deterioration has a significant impact on the level of flight safety. The reasons for the deterioration of the technical condition of radio electronic equipment are usually the aging of the component base, the level of load considering operating conditions, the level of training of aviation personnel, etc. Therefore, the tasks of timely detection of the equipment technical condition deterioration and estimation of the parameters characterizing the adopted or established reliability models based on the results of observations are relevant. The literature analysis of reliability assessment methods was carried out in three directions: analysis of normative and regulatory documentation on the technical operation of aviation radio electronic equipment; analysis of scientific research by domestic scientists and analysis of world experience in solving the problem of reliability assessment. At the same time, the analysis showed that most studies evaluate such reliability indicators as the probability of failure-free operation, the mean operating time between failures, and the availability factor. The purpose of this work is to analyze publications in the field of application of advanced methods for calculating and assessing the reliability of various technical systems, including the reliability calculation of radio-electronic systems used during the flights of An-74(72) aircrafts. The source information for the analysis is a statistical report containing data on observed mean times between failures. The analysis conducted in the article allowed to identify current trends in the development of research in the field of reliability and can also be considered as a basis for the synthesis of new methods for evaluating and predicting the reliability of aircraft radio-electronic equipment.

Keywords: *reliability, reliability indicators, radio-electronic systems, failure model, failure prediction, aviation.*

References

1. Ostroumov, I.V., Marais, K., Kuzmenko, N.S.: Aircraft positioning using multiple distance measurements and spline prediction. Aviation 26(1), 1–10 (2022). DOI: 10.3846/aviation.2022.16589.

2. Ostroumov, I.V., Kuzmenko, N.S.: Configuration analysis of European navigational aids network. In: International Conference on Integrated Communications Navigation and Surveillance

Conference, pp. 1–9. IEEE, Dulles, USA (2021). DOI: 10.1109/ICNSS52807.2021.9441576.

3. Solomentsev, O. et al.: Data processing through the lifecycle of aviation radio equipment. In: IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), pp. 146–151. IEEE, Lviv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/CSIT56902.2022.10000844.

4. Zaliskyi, M. et al.: Model building for diagnostic variables

- during aviation equipment maintenance. In: IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), pp. 160–164. IEEE, Lviv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/CSIT56902.2022.10000556.
5. Jardine, A.K.S., Tsang, A.H.C.: Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications. 2nd edition. CRC Press, Boca Raton (2017).
6. Ostroumov, I.V., Kuzmenko, N.S.: Statistical analysis and flight route extraction from automatic dependent surveillance-broadcast data. In: International Conference on Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference, pp. 1–9. IEEE, Dulles, USA (2022). DOI: 10.1109/ICNS54818.2022.9771515.
7. Galar, D., Sandborn, P., Kumar, U.: Maintenance costs and life cycle cost analysis. CRC Press, Boca Raton (2017).
8. Sushchenko, O. et al.: Airborne sensor for measuring components of terrestrial magnetic field. In: 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 687–691. IEEE, Kyiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926760.
9. Ostroumov, I. et al.: Relative navigation for vehicle formation movement. In: 3rd KhPI Week on Advanced Technology, pp. 1–4. IEEE, Kharkiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916414.
10. Kuzmenko, N. et al.: Airplane flight phase identification using maximum posterior probability method. In: 3rd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing, pp. 1–5. IEEE, Kyiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/SAIC57818.2022.9922913.
11. Larin, V. et al.: Prediction of the final discharge of the UAV battery based on fuzzy logic estimation of information and influencing parameters. In: 3rd KhPI Week on Advanced Technology, pp. 1–6. IEEE, Kharkiv, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916490.
12. Averyanova, Yu. et al.: Turbulence detection and classification algorithm using data from AWR. In: IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), pp. 518–522. IEEE, Ukraine (2022). DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037172.
13. Solomentsev, O.V., Zaliskyi, M.Yu., Zuiiev O.V., Asanov, M.M.: Data processing in exploitation system of Unmanned Aerial Vehicles radioelectronic equipment. In: 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments, pp. 77–80. IEEE, Kyiv, Ukraine (2013).
14. Sushchenko, O. et al.: Integration of MEMS inertial and magnetic field sensors for tracking power lines. In: XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), pp. 33–36. IEEE, Polyana (Zakarpattia), Ukraine (2022). DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002907.
15. Solomentsev, O., Zaliskyi, M., Herasymenko, T., Kozhokhina, O., Petrova, Y.: Data processing in case of radio equipment reliability parameters monitoring. In: 2018 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), pp. 219–222. IEEE, Riga, Latvia (2018). DOI: 10.1109/RTUWO.2018.8587882.
16. Gorjian, N., Ma, L., Mittinty, M., Yarlagadda, P., Sun, Y.: A review on degradation models in reliability analysis. In: Kiritsis, D., Emmanouilidis, C., Koronios, A., Mathew, J. (eds.): Engineering Asset Lifecycle Management, pp. 369–384. Springer, London (2010). DOI: 10.1007/978-0-85729-320-6_42.
17. Han, M.: Estimation of failure rate and its applications in reliability engineering. In: International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, pp. 924–928. IEEE, Chengdu, China (2012). DOI: 10.1109/ICQR2MSE.2012.6246376.
18. Hu, Y., Wei, G., Ke, Y.: Application of reliability non-parametric estimation methods based on computation of capacity. In: 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, pp. 445–449. IEEE, Guiyang, China (2011). DOI: 10.1109/ICRMS.2011.5979311.
19. Zhu, T.: Reliability estimation for two-parameter Weibull distribution under block censoring. Reliability Engineering and System Safety 203, 1–27 (2020). DOI: 10.1016/j.res.2020.107071.
20. Pan, D., Wei, Y., Fang, H., Yang, W.: A reliability estimation approach via Wiener degradation model with measurement errors. Applied Mathematics and Computation 320, 131–141 (2018). DOI: 10.1016/j.amc.2017.09.020.
21. Liu, D., Wang, S.: A degradation modeling and reliability estimation method based on Wiener process and evidential variable. Reliability Engineering and System Safety 202, 1–28 (2020). DOI: 10.1016/j.res.2020.106957.
22. Su, C., Jiang, Y.: Forecasting model for degradation path and parameter estimation based on neural network. In: 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 1735–1738. IEEE, Beijing, China (2009). DOI: 10.1109/ICIEEM.2009.5344341.
23. Fink, O., Zio, E., Weidmann, U.: Predicting component reliability and level of degradation with complex-valued neural networks. Reliability Engineering and System Safety, 121, 198–206 (2014). DOI: 10.1016/j.res.2013.08.004.
24. Al-Azzeh, J., Mesleh, A., Zaliskyi, M., Odarchenko, R., Kuzmin, V.: A method of accuracy increment using segmented regression. Algorithms 15(10): 378, 1–24 (2022). DOI: 10.3390/a15100378.