

О. Ч. Огоро, С. О. Дмитрієв, М. Ю. Заліський, А. О. Осіпчук

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

МОДЕЛІ ДЛЯ АНАЛІЗУ НАДІЙНОСТІ АВІАЦІЙНИХ КОМПОНЕНТІВ, СИСТЕМ ТА КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Анотація. Основою для розробки програм технічного обслуговування повітряних суден є рекомендації виробника та директиви регулятора з льотної придатності. Регулятор зобов'язує експлуатантів повітряних судів слідувати керівним принципам, які в деяких випадках не відповідають фактичному використанню повітряних суден. Це приводить до більшої кількості робіт по технічному обслуговуванню, що є високовартісними. В цій статті, яка направлена на ефективне та економічне технічне обслуговування повітряних суден, представлена статистична модель аналізу надійності функціональних систем літака. Вихідними даними для моделювання використовувалися звіти пілотів та персоналу по технічному обслуговуванню. Розроблена модель була перевірена на адекватність з метою підтвердження її точності.

Ключові слова: технічне обслуговування, повітряне судно, аналіз надійності, функціональна система, інтенсивність відмов, модель відмов авіаційних систем.

Вступ

Життєвий цикл повітряних суден (ПС) складається з чотирьох фаз: 1) етап проектування та розробки, що включає планування та концептуальний дизайн, попередній дизайн та системну інтеграцію; 2) етап виробництва та/або виготовлення; 3) етап експлуатації; 4) утилізація (списання). На етапі експлуатації компоненти та підсистеми зношуються, що зрештою призводить до відмови системи [1]. Технічне обслуговування (ТО) ПС проводиться для

зменшення або запобігання несприятливим наслідкам відмов та забезпечення максимальної готовності системи [2]. Ефективне ТО ПС спрямоване на забезпечення справного технічного стану (ТС) та забезпечення необхідних рівнів безпеки та надійності в експлуатації, а у разі відмови, ТО відновлює рівні показників безпеки та надійності до необхідних стандартів [3].

Дії по ТО (рис. 1) для компонентів і систем ПС поділяються на: коригуюче ТО, превентивне ТО та прогностичне ТО.

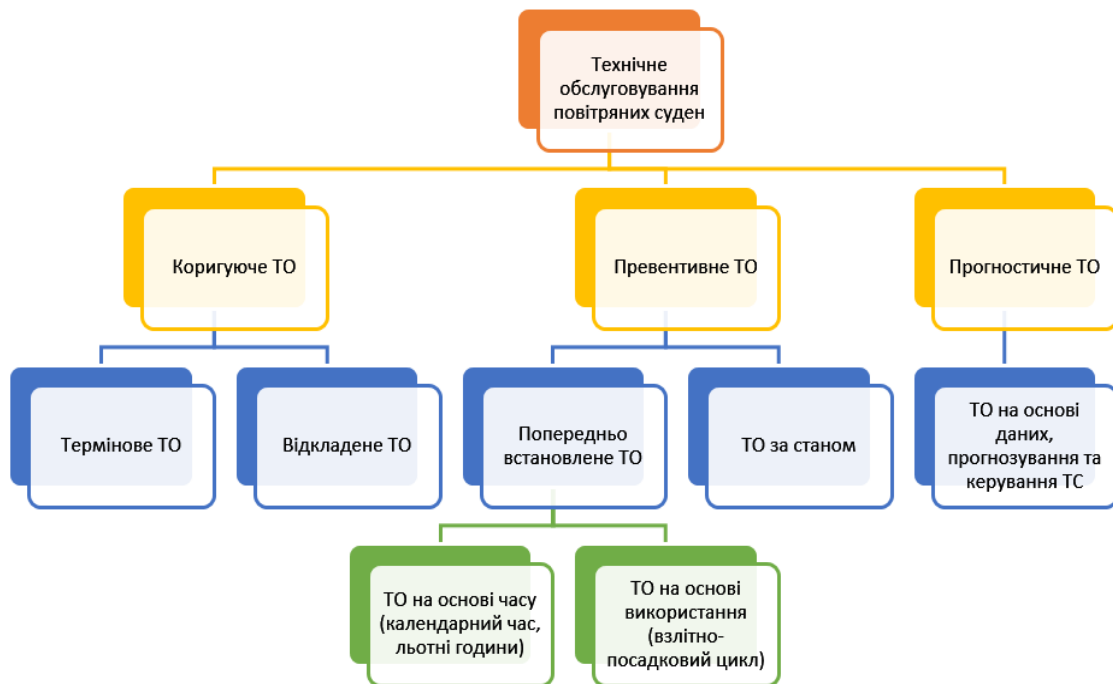


Рис. 1. Категорії технічного обслуговування повітряних суден

Коригувальне ТО охоплює всі дії щодо ремонту незапланованих несправностей та відмов. Превентивні дії щодо ТО зменшують кількість незапланованих ремонтів. Вони складаються з періодичних дій щодо ТО, щоб уникнути відмов та вихід з ладу компонентів та систем.

Прогностичне ТО використовує деякі параметри та технології оброблення даних, щоб визначити, коли може статися відмова, зменшуючи кількість незапланованих поломок та надаючи персоналу надійні варіанти планування превентивного ТО [4, 5].

Вимоги до ТО ПС встановлюються виробниками (ОЕМ), регулюючими органами та експлуатантами ПС у процесі, відомому як контрольна рада з технічного обслуговування (Maintenance Review Board MRB). Ці вимоги є основою розробки програм ТО ПС.

Структура програми ТО ПС зазвичай заздалегідь визначається виробником, але експлуатанти повинні адаптувати свою програму до відповідної конфігурації ПС і індивідуальним вимогам свого парку. З цієї причини програма ТО різних типів ПС на практиці різняться, але навіть з ідентичними типами ПС деталі програми ТО можуть відрізнятися в залежності від району експлуатації та використання або від індивідуального досвіду експлуатації [6].

Мета ТО полягає в тому, щоб надати обслуговуючому персоналу рекомендації щодо правил, процедур та обмежень щодо безпечного виконання обов'язків та відповідальності в областях та умовах, де проводиться ТО ПС, та відобразити потреби в ТО ПС, яких повинні дотримуватися для забезпечення безперервної безпечної роботи. Програма є частиною затвердженої системи технічного обслуговування. Програма ТО повинна перевірятись кваліфікованими інженерами на придатність не рідше одного разу на рік [7].

Аналіз надійності дозволяє експлуатантам ПС аналізувати дані про ПС та їх складові частини. Результати аналізу надійності можуть допомогти інженерам по ТО ПС скоригувати програму ТО у відповідності з фактичними вимогами, тим самим скоротивши надмірно дорогі дії по ТО і час простою. Експлуатант ПС також може порівняти надійність всього парку, щоб зрозуміти вартість порушення графіку, проаналізувати рішення і розставити пріоритети сервісних бюлетенів в залежності від впливу на парк [8].

Аналіз надійності повітряних суден. Для практичних цілей надійність визначається як здатність складової частини підсистеми або системи працювати відповідно до призначення без будь-яких відмов і в межах заздалегідь встановленого інтервалу часу в умовах усього життєвого циклу. З кількісної точки зору надійність зазвичай оцінюють як ймовірність того, що пристрій буде виконувати свою функцію протягом необхідного періоду часу в очікуваних умовах експлуатації та навколишнього середовища [9].

Аналіз надійності оцінює ймовірність відмови складових частин, підсистеми або системи при наявності випадкових подій. Інженерні проблеми зазвичай пов'язані з невизначеністю. Таким чином, статистичні методи надійності забезпечують потужні інструменти для обробки цих невизначеностей на основі функцій продуктивності або функцій граничного стану [10].

Існуючі моделі технічного обслуговування повітряних суден, що орієнтовані на надійність. Моделі ТО орієнтовані на аналіз надійності (RCM) дозволяють розраховувати показники надійності системи з урахуванням різних видів перевірок ТО та їх інтервалів, тим самим надаючи інформацію для

оптимізації експлуатаційних витрат, безпеки та надійності. Типова структура RCM включає збирання даних, включаючи середній час напрацювання на відмову та функцію частоти відмов, аналіз виду відмови та її наслідків, а також оптимізацію інтервалів превентивного ТО [11].

У роботі [12] запропоновано практичний підхід до аналізу надійності авіаційних систем на основі аналітичної моделі. Ця модель може використовуватися для визначення інтервалів ТО, оптимізації резервування системи та списку мінімального обладнання ПС.

Для оптимізації ТО авіадвигуна [13] запропоновано методологію, яка оцінює надійність авіаційного двигуна або його модуля з урахуванням параметрів моніторингу стану, звітів пілотів або статистичних даних експлуатантів. Середній час напрацювання на відмову розраховується з урахуванням цих результатів, а завдання обслуговування плануються з урахуванням часу виконання замовлення. Ці дії підвищують можливість впровадження принципів ощадливого виробництва та шести сигм при обслуговуванні ПС або авіаційних двигунів за допомогою RCM.

У роботі [1] була проведена оптимізація інтервалу превентивного ТО для індикаторів ПС за рахунок зниження очікуваної довгострокової вартості операцій на основі інформації про показники надійності ПС. Автори визначили основні види відмов від двох постачальників, використовуючи інформацію зі звітів аналізу режимів та наслідків відмов. Окрім того, було визначено показники середнього часу напрацювання на відмову (MTTF) та середнього часу між незапланованими замінами (MTBUR). У роботі [14] проведено порівняльний аналіз визначення показників надійності літальних апаратів вітчизняних та зарубіжних дослідників.

Постановка задачі

Огляд літератури показує, що у дослідженнях, присвячених розробці стратегій RCM, існує прогалина в адекватних математичних моделях визначення характеристичної надійності авіаційних систем. Необхідність вирішення цієї проблеми обумовлена тим, що системи та компоненти ПС можуть мати характерні відмови, а їх надійність може змінюватись в залежності від попередніх планових перевірок та ремонтів.

Таким чином, види відмов системи є основою для оцінки впливу відмови на безпеку польоту та визначаються видами відмов компонентів та їх послідовністю виникнення.

Крім того, ПС зазвичай складається з мільйонів компонентів, які генерують великі мультимодальні дані на етапі експлуатації. Ця множина даних у режимі реального часу може бути використана як вхідні дані для алгоритмів статистичної обробки даних для аналізу надійності.

Моделі та алгоритми визначення показників надійності [15] можуть суттєво підвищити ефективність використання повітряних суден, а також інших складних систем.

Методологія

Різноманітні розподіли ймовірностей використовуються для виконання різних видів ТО та досліджень надійності. На етапі експлуатації будь-якої системи, підсистеми або компонента найбільш поширеним розподілом ймовірностей є експоненційний розподіл, оскільки він легко застосовується у різних типах аналізу інтенсивності відмов компонентів, підсистем та систем протягом терміну їхньої служби. Імовірність безвідмовної роботи та готовності для цього розподілу визначається таким чином:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (2)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}, \quad (3)$$

$$MTTR = \frac{1}{\mu}, \quad (4)$$

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt, \quad (5)$$

де R – імовірність безвідмовної роботи, що залежить від часу t ; λ – інтенсивність відмов; A – коефіцієнт готовності; μ – інтенсивність проведення ремонту; $MTBF$ – середнє напрацювання на відмову; $MTTR$ – середній час ремонту.

Щільність розподілу ймовірності експоненційного розподілу визначається виразом

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \text{ для } t \geq 0, \lambda > 0, \quad (6)$$

де t – час, $f(t)$ – щільність розподілу ймовірності (PDF) та λ – параметр розподілу, що в дослідженнях надійності відноситься до постійної частоти відмов [16]. Кумулятивна функція розподілу виражається як:

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(y) dy. \quad (7)$$

Підставляючи рівняння (6) (7), отримуємо вираз для експоненціального розподілу кумулятивної функції розподілу

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda y} dy = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (8)$$

Моделі для аналізу надійності авіаційних систем

У цьому дослідженні пропонується експоненційний розподіл несправностей/відмов авіаційних систем та конструкцій для розрахунку показників надійності. Для запропонованої моделі системи та конструкції НД були класифіковані відповідно до системи нумерації Асоціації повітряного транспорту (АТА). Вхідні дані n_T вилучаються зі звіту пілотів та персоналу ПС.

Номенклатура параметрів показана на рис. 2.

Перелік параметрів та змінних, що використовуються в моделюванні

- A: матриця n_T ;
- a: додаткова змінна для розрахунку;
- i: індекс початкової матриці;
- j: додатковий індекс матриці;
- k: індекс матриці, отриманий при моделюванні;
- p: індекс кінцевої матриці;
- m: кількість спостережуваних компонент АТА;
- s: додаткова змінна для розрахунку;
- x: значення випадкової величини;
- V_i : накопичена кількість спостережуваних несправностей/відмов у часі;
- C: випадкові числа експоненційного розподілу з параметром λ ;
- D_k : часовий ряд спостережуваних несправностей/відмов;
- E_k : випадкове число з рівномірним розподілом в діапазоні 0...1;
- $F_{i,k}$: момент часу i -ої несправності/відмови системи;
- M: загальна кількість спостережуваних несправностей/відмов по всіх розділах АТА;
- N: кількість ітерацій;
- T: загальний час льотних годин на інтервалі спостереження;
- λ : частота несправностей/відмов.

Рис. 2. Перелік параметрів та змінних

Вхідні дані n_T – це $m \times 1$ матриця A. Функція V призначена для прийняття рішення про несправність/ відмову, у відповідності з класифікацією АТА.

Значення $V_{i+1} - V_i$ відповідає ймовірності відмови i -го компонента.

Функція V_i , що відображає графік даних моніторингу (рис. 3), використовується для візуального аналізу того, як відбуваються відмови.

$$V_i = \sum_{j=0}^i A_j / M; M = \sum_{i=0}^m A_i; i = \{0 \dots m\}. \quad (9)$$

Час між несправностями/відмовами описується експоненційним розподілом з параметром λ і передбачається, що одночасно може статися лише одна відмова.

Щоб визначити, який компонент АТА несправний/відмовив, виконується розрахунок конкретної кількості відмов кожного компонента.

Моделювання методом Монте-Карло використовується для створення випадкових чисел з розміром вибірки $N=10000$; ці числа мають рівномірний розподіл у діапазоні $[0; 1]$.

Наступним кроком є обчислення часових рядів несправностей/ відмов D_k , що спостерігаються,

$$D_k = \sum_{j=0}^k C_j, \quad (10)$$

де C_j – експоненційний розподіл з параметром λ .

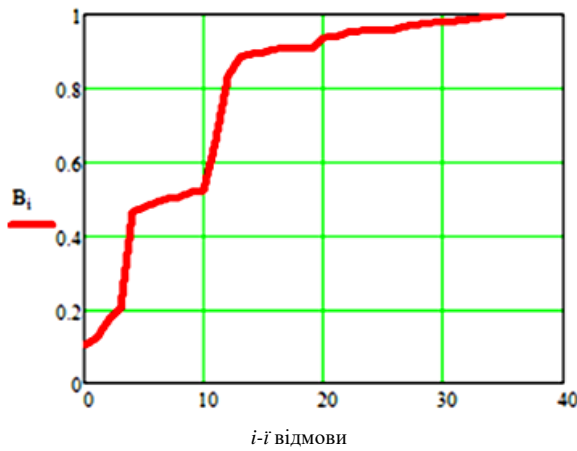


Рис 3. Графік даних моніторингу

Момент часу F , в який відбувається i -а несправність/відмова, визначається таким чином:

$$F_{0,k} = \begin{cases} D_k, & \text{if } E_k \leq 0, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (11)$$

$$F_{i,k} = \begin{cases} D_k, & \text{if } B_{i-1} < E_k < B_i, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Отриманий масив F є двовимірним та безпосередньо не може бути використаним для побудови графіків PDF, які необхідні для розрахунку параметрів надійності. Тому формується A_i

$$A_i = \begin{cases} s \leftarrow 0 & \text{for } k \in 0..N-1, \\ \text{if } F_{i-1,k} \neq 0, a_s \leftarrow F_{i-1,k}, \\ s \leftarrow s+1. \end{cases} \quad (12)$$

Отримані PDF наносяться на графік та далі аналізуються параметри надійності – λ_i , MTBF_i та K_{1000} .

Далі для перевірки точності застосовується критерій узгодження. Блок-схема статистичного моделювання представлена на рис. 4.

Аналіз та результати

Для аналізу запропонованих моделей початкові дані для статистичного моделювання було вилучено зі звіту пілотів та персоналу ТО ПС у Нігерії, країні, розташованій у західноафриканському регіоні. Базова вибірка статистичних даних була отримана за трьома літаками MD-83 за чотирирічний період експлуатації [17]. Як показано в табл. 1, інформація про несправність/відмову кожної системи та конструкції ПС була згрупована відповідно до системи нумерації АТА.

У таблиці n_F відноситься до несправностей/відмов у польоті, а n_T відноситься до загальної кількості несправностей/відмов, що спостерігаються пілотами і обслуговуючим персоналом за інтервал часу.

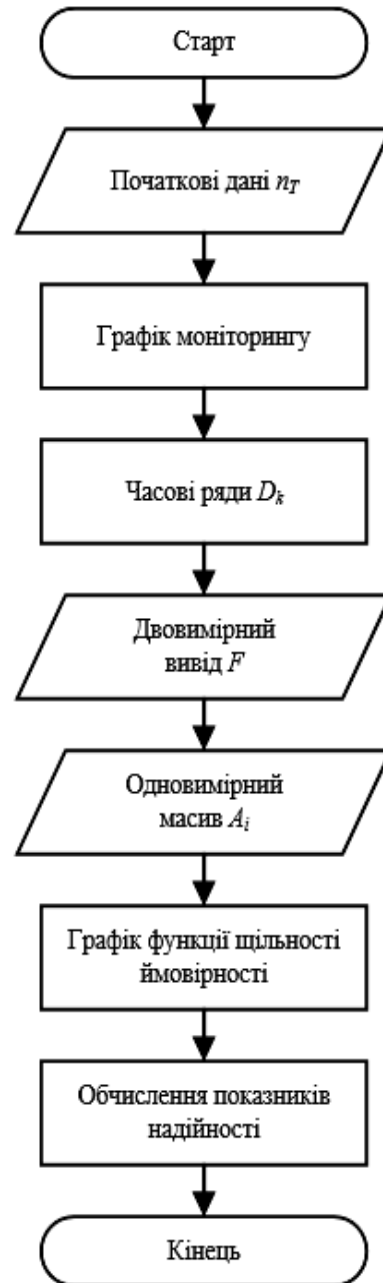


Рис. 4. Блок-схема алгоритму моделювання

Згідно з таблицею 1, системи кондиціонування повітря (АТА 21), зв'язку (АТА 23), шасі (АТА 32) та навігації (АТА 34) є найбільш стійкими до відмови. Отримані PDF показано на рис. 5-8.

Критерій згоди застосовується до математичної моделі, щоб перевірити, чи вона підкоряється експоненційному розподілу.

Критерій χ^2 був обраний для перевірки узгодження з використанням одного з отриманих PDF і в результаті було отримано таке значення:

$$\chi^2 = 13,531 .$$

Отримане значення χ^2 та менше порогового значення

$$\chi_{th}^2 = 19,675 .$$

Таблиця 1 – Інформація про несправності/відмови систем ПС

АТА №	Назва розділу АТА	<i>n_T</i>	<i>n_F</i>
21	Система кондиціонування повітря	734	670
22	Система автоматичного управління польотом	142	119
23	Система зв'язку	321	272
24	Система електроживлення	250	152
25	Побутове та аварійно-рятувальне обладнання	1869	1752
26	Система протипожежного захисту	85	38
27	Система управління літака	104	87
28	Паливна система	62	30
29	Гідравлічна система	52	32
30	Система захисту від льоду та дощу	77	67
31	Прилади індикації/запису	30	25
32	Шасі	965	209
33	Освітлення та світлова індикація	1239	613
34	Пілотажно-навігаційне обладнання	378	285
35	Кисневе обладнання	73	28
36	Пневматична система	30	27
38	Система водопостачання та видалення відходів	68	60
39	Електричні - електронні панелі та багатоцільові компоненти	1	1
45	Бортова система технічного обслуговування	1	1
46	Інформаційні системи	2	2
49	Бортова допоміжна силова установка	199	107
51	Конструкція планера	6	2
52	Двері, люки	113	104
53	Фюзеляж	8	1
56	Ліхтарі, вікна	26	22
57	Крило	3	2
71	Силова установка	28	22
72	Двигун	46	38
73	Паливна система двигунів	52	34
74	Система запалювання	12	5
75	Система відбору повітря	22	10
76	Система керування двигуном	18	13
77	Прилади контролю двигуна	29	24
78	Система вихлопу двигуна	21	13
79	Масляна система	37	25
80	Система запуску	40	29
Всього		1676	348

Тому гіпотеза про експоненційний закон розподілу середнього напрацювання на несправності/відмову систем та конструкцій літака приймається з рівнем значущості, що дорівнює 0,05.

Крім того, теоретичний експоненційний розподіл визначається як:

$$f(t) = \lambda_{calc} e^{-\lambda_{calc} t} \phi(t),$$

де λ_{calc} – частота несправностей/відмов, що розрахована на основі отриманого PDF для кожного розділу АТА, $\phi(t)$ – функція Хевісайда.

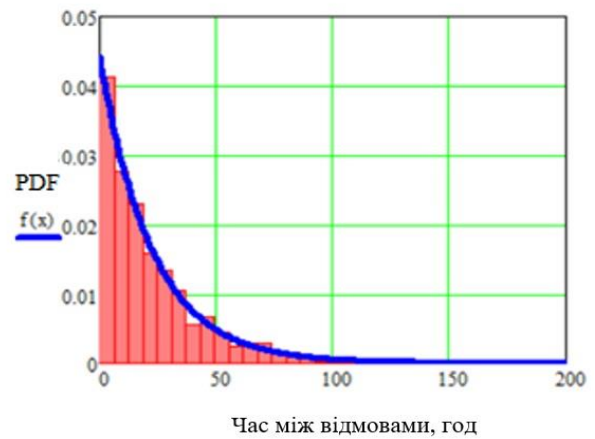


Рис. 5. Функція щільності розподілу ймовірності часу напрацювання між відмовами системи кондиціонування повітря

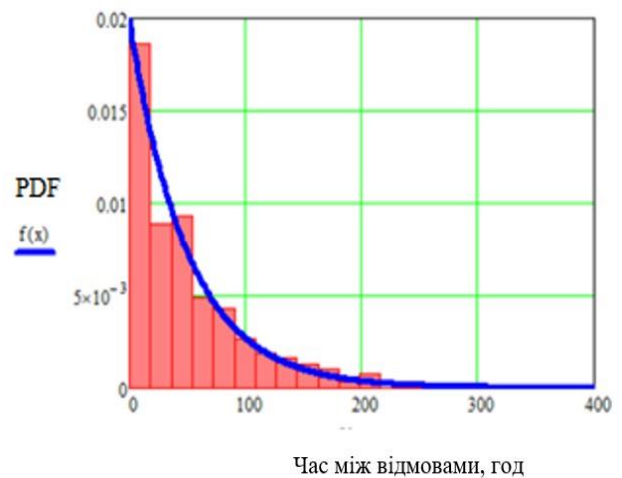


Рис. 6. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами системи зв'язку

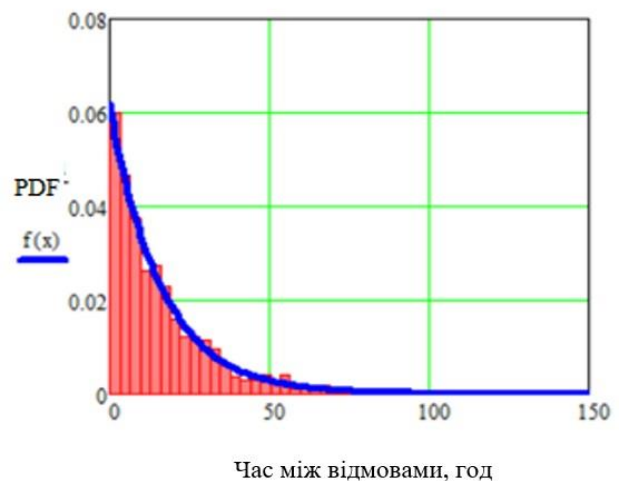


Рис. 7. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами системи шасі

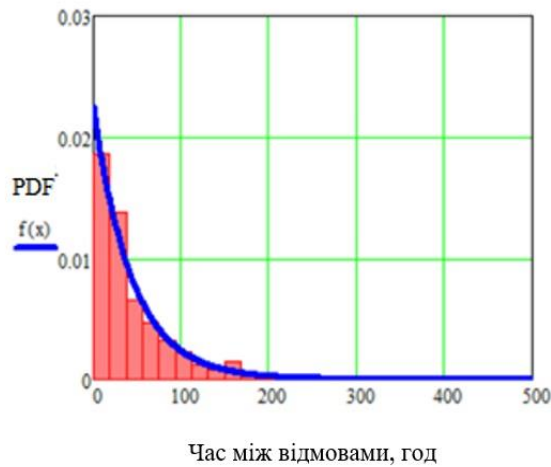


Рис. 8. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами навігаційної системи

Висновок

У цій статті пропонується статистична модель для аналізу надійності авіаційних систем ПС у Нігерії з урахуванням ефективного ТО.

Перевагою запропонованої моделі є простота, що полегшує її використання обслуговуючим персоналом для планування робіт з технічним обслуговуванням.

Враховуючи, що вимоги до надійності визначаються на етапі проектування та розробки життєвого циклу ПС, запропонована модель може бути використана для вдосконалення нових та існуючих систем, підсистем та компонентів ПС.

Крім того, на основі інформації, наданої параметрами надійності, експлуатанти ПС можуть коригувати свої програми ТО ПС, щоб вони відображали фактичні вимоги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Guo J., Li Z., Wolf J. Reliability centered preventive maintenance optimization for aircraft indicators. *Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 2016, pp. 1-6.
- Dinisa D., Barbosa-Póvoa A., Palos Teixeira Â. A supporting framework for maintenance capacity planning and scheduling: Development and application in the aircraft MRO industry. *International Journal of Production Economics*, 2019, pp. 1-15.
- Hinsch M. *Industrial aviation management: A primer in European design, production and maintenance organizations*. Springer -Verlag GmbH Germany, 2019. 345 p.
- Celikmih K., Inan O., Uguz H. Failure Prediction of Aircraft Equipment Using Machine Learning with a Hybrid Data Preparation Method. *Scientific Programming Volume 2020*. Article ID 8616039. DOI: 10.1155/2020/8616039.
- Dhillon B. *Engineering maintenance: a modern approach*. CRC Press LLC, 2002, 222 p.
- Coutu A., Alblowi M.. ICAO Doc 9760 (Airworthiness Manual) 3rd Edition, 2014, 166 p.
- Bristow Nigeria S76C++ Maintenance Programme Issue 2. 2018.
- Ren H., Chen X., Chen Y. *Reliability Based Aircraft Maintenance Optimization and Applications*. Academic Press. 2017, pp. 1-3. DOI: [10.1016/B978-0-12-812668-4.00001-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812668-4.00001-0).
- Nakagawa T.. *Maintenance Theory of Reliability*. 2005, 269 p.
- Keshtegar B., Meng Z.. A hybrid relaxed first-order reliability method for efficient structural reliability analysis. *Structural Safety*, 2017, pp. 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.02.005>.
- Marwedel S., Reitmann J., Poupard M.. Platform for Aircraft Maintenance Services. United States Patent Application Publication No. US 2013/0073419 A, 2013. 15 p.
- Susova G. M., Petrov A.N., Gromov M.. *Markov Model-Based Reliability and Safety Evaluation for Aircraft Maintenance-System*, 1997.
- Shanmuganathan V.K., Haran A.P., Ragavendran S., Gayathri N. Aero-Engine Maintenance Cost Optimization by RCM. *Life Sci J* 2013, 10(1):2891-2896] (ISSN:1097-8135).
- Spinchenko I.V.. Comparative Analysis of Russian and Foreign Reliability Indexes for Aircraft. *Civil Aviation High Technologies*, Vol 9, 2014, pp. 50-53.
- Zaliskyi M., Petrova Y., Asanov M., Bekirov E. Statistical Data Processing During Wind Generators Operation. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, Vol. 8 (1), 2019, pp 33-38. <http://dx.doi.org/10.18178/ijeetc.8.1.33-38><http://dx.doi.org/10.18178/ijeetc.8.1.33-38>.
- Dhillon B. S. *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. New York, Taylor & Francis Group. 2006, 214 p. <https://doi.org/10.1201/9781420006780>.
- Okoro O.C. Reliability Analysis of Aircraft Fleet in Nigeria. *Proceedings of National Aviation University*. 2020, Vol. 83 (2), pp.49-53.

Received (Надійшла) 07.09.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.11.2022

Model for reliability analysis for aviation components, systems and structures of aircraft

Onyedikachi Chioma Okoro, Serhii Dmytriiev, Maksym Zaliskyi, Alina Osipchuk

Abstract. Manufacturer recommendations and compliance with airworthiness regulator directives are base for the development of aircraft maintenance programs. The regulator obliges aircraft operators to follow guidelines that, in some cases, are inconsistent with the actual use of the aircraft. This results in more or less frequent maintenance work, which is costly. Aimed at efficient and cost-effective aircraft maintenance, this article presents a statistical model for analyzing the reliability of aircraft functional systems. The input data for the simulations were reports from pilots and maintenance personnel. The model was tested for adequacy to confirm its accuracy.

Keywords: maintenance, aircraft, reliability analysis, functional system, failure rate, aircraft system failure model.