

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

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## СТАТИСТИЧНІ ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

**Анотація.** Програми технічного обслуговування повітряних суден розробляються на основі рекомендацій виробника та виконання директив регулятора з льотної придатності. Однак експлуатанти мають адаптувати свою програму технічного обслуговування у відповідності до конфігурації повітряного судна та індивідуальних вимог свого парку. Результати аналізу надійності дозволяють скоригувати програму технічного обслуговування й тим самим скоротити надмірно дорогі дороговартісні дії з технічного обслуговування та час простою. Ця стаття присвячена використанню теорії ймовірності та статистичної обробки для оптимізації процесів технічного обслуговування повітряних суден. У роботі отримана статистична імітаційна модель відмов систем та конструкцій літаків та вертольотів методом Монте-Карло. В якості початкових даних для моделювання були використані параметри надійності систем і конструкцій повітряних суден. Запропонована модель може бути використана для вдосконалення структур систем та конструкцій повітряних суден на етапі проектування та виробництва.

**Ключові слова:** оптимізація, надійність, технічне обслуговування, прогностичне обслуговування, експлуатація, модель відмов авіаційних систем.

### Вступ

Прогнозується, що світовий ринок комерційних вертольотів матиме річний темп зростання 2% у продовж 2020–2025 років [1]. Зростання ринку є очевидним у нафтовидобувних регіонах Близького Сходу та Африки, де сектор комерційних вертольотів робить внесок в економіку, виконуючи пошуково-рятувальні послуги та транспортування до морської нафтогазової промисловості [2]. Незважаючи на прибуток від комерційних польотів повітряних суден (ПС) для цих країн, їх середня експлуатаційна вартість може перевищувати початкову ціну придбання в 10 разів; технічне обслуговування, ремонт і капітальний ремонт оцінюються приблизно в 10-15% від експлуатаційних витрат [3]. Досить висока вартість обслуговування обумовлює необхідність

проведення оптимізації для підвищення надійності та безпеки польотів.

### Мотивація та постановка проблеми

Життєвий цикл будь-якої систем або конструкції повітряних суден складається з чотирьох основних етапів. *Першим етапом* є проектування та розроблення, що складається з планування та концептуального проектування, попереднього проектування і системної інтеграції, а також детального проектування. *Другим етапом* є стадія виробництва та/або виготовлення. *Третій етап* – це експлуатація, та завершальний, четвертий – утилізація.

Як видно з рис. 1, найбільшими витрати є на стадії експлуатації; на технічне обслуговування, ремонт і капітальний ремонт припадає 10-15 % цих витрат.

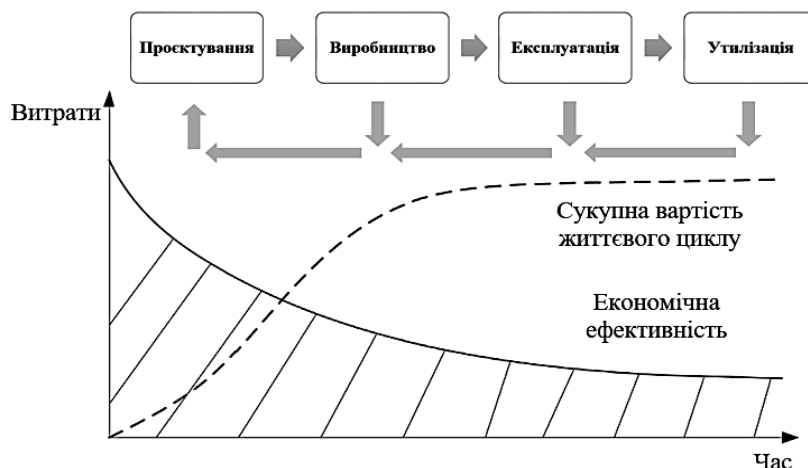


Рис. 1. Життєвий цикл авіаційних систем та його вплив на витрати [4]

Технічне обслуговування ПС можна визначити як сукупність усіх технічних і адміністративних дій, які підтримують або відновлюють компоненти ПС, підсистеми, системи та структури в стані, в якому вони можуть виконувати свої заздалегідь визначені функції.

Цілі технічного обслуговування повітряних суден можна коротко сформулювати як:

- 1) забезпечення готовності повітряних суден;
- 2) забезпечення надійності систем повітряних суден;
- 3) забезпечення безпеки польотів.

Прямі витрати на технічне обслуговування включають матеріали, обладнання, устаткування, постачання запасних частин, персонал та інше, в той час як непрямі витрати на технічне обслуговування пов'язані з адміністративним та управлінським персоналом, накладними витратами та втратою доходу через простій ПС. Технічне обслуговування ПС – це загальний термін для перевірок ПС з метою їх оцінки та оцінки стану складових частин і систем. Технічне обслуговування включає короткі передпольотні або детальні перевірки.

Дії з технічного обслуговування систем і конструкцій повітряних суден класифікуються як: коригуюче обслуговування, запобіжне обслуговування та прогностичне обслуговування. Коригуюче обслуговування охоплює всі дії з ремонту непередбачуваних несправностей і відмов. Дії з профілактичного обслуговування зменшують кількість незапланованих ремонтів. Вони складаються з періодичних заходів щодо технічного обслуговування, яке проводиться для уникнення відмов та виходу з ладу компонентів і систем [5]. Прогностичне обслуговування використовує ряд параметрів для припущення, коли станеться відмова, з метою зменшення кількості непередбачуваних збоїв та забезпечення персоналу надійними варіантами планування профілактичного обслуговування.

Витрати на технічне обслуговування значною мірою залежать від надійності систем ПС. Максимальна готовність ПС та мінімізація витрат найкраще досягаються на етапі його проектування із забезпеченням високих показників надійності та ремонт придатності. Таким чином, вимоги до надійності загалом визначаються на етапі проектування та розробки життєвого циклу авіаційної системи та застосовуються на інших трьох етапах життєвого циклу.

Для практичних задач надійність визначається як здатність компонента, підсистеми або системи працювати за призначенням без будь-яких збоїв та у визначених межах ефективності протягом визначеного інтервалу часу. З кількісної точки зору, надійність зазвичай оцінюється як ймовірність того, що пристрій буде виконувати свою функцію протягом необхідного періоду часу в очікуваних умовах експлуатації та навколишнього середовища [6]. Для аналізу надійності оцінюють ймовірність відмови складових частин, підсистем або систем за наявних випадкових подій. Математично це здійснюється за допомогою випадкових величин, що використовуються для моделювання різноманітних джерел несправностей у виробках та процесах. Аналіз надійності є основою для технічного обслуговування за станом, який згідно стандарту Міжнародного Електротехнічного Комітету (International Electrotechnical Commission IEC) № 60300–3–11 визначається як «метод ідентифікації та вибору політики керування відмовами для досягнення необхідного рівня безпеки, доступності та економічності експлуатації результативно та ефективно» [7]. Це здійснюється на основі а) статистичних розрахунків і розрахунків надійності роботи системи та б) основних компонентів профілактичного обслуговування, ремонту та

заходів утилізації. Технічне обслуговування за станом планується для майбутнього обслуговування на основі поточного технічного стану системи. Воно надає інформацію для планування превентивних заходів з профілактичного та прогностичного обслуговування.

Огляд літератури показує, що значна увага приділяється дослідженням розвитку стратегій технічного обслуговування з контролем надійності, однак існують прогалини в розробці математичних моделей для визначення характеристик надійності авіаційних систем з точки зору оптимізації технічного обслуговування ПС. В роботі [8] було розроблено модель надійності електронних компонентів вітрогенераторів. Протягом експлуатації вітрогенераторів були зібрані дані, на основі яких була побудована гістограма, що показана на рис. 2. Робота [8] підкреслила доцільність розробки моделей надійності для інших складних систем, а її результати застосовуються до авіаційних систем і конструкцій.

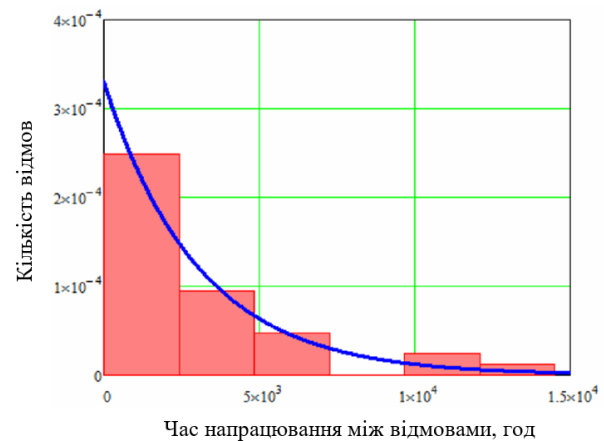


Рис. 2. Функція щільності розподілу ймовірності часу напрацювання між відмовами вітрогенераторів

### Статистичне моделювання

Для виконання різних типів технічного обслуговування та досліджень надійності використовуються різні математичні моделі розподілів ймовірностей. Найбільш використовуваним розподілом ймовірності на етапі експлуатації є експоненційний розподіл, оскільки його можна застосовувати в різних типах аналізу інтенсивності відмов компонентів, підсистем і систем протягом їхнього терміну служби. Щільність розподілу ймовірності для експоненційного розподілу визначається як

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

де  $t$  – час,  $f(t)$  – щільність розподілу ймовірності,  $\lambda$  – параметр розподілу, який в теорії надійності є інтенсивністю відмов, що зберігає постійне значення на етапі нормального експлуатації [9].

Метод моделювання Монте-Карло передбачає використання випадкових чисел та може бути застосований для вирішення таких стохастичних задач як моделювання випадкових відмов, тому й був обраний для даного дослідження. Реальні дані були отримані з польотних і технічних журналів за чоти-

рірничний період експлуатації флоту ПС [10]. Спостережуваний час  $t$ , який є сумою льотних годин кожного ПС флоту за вказаний інтервал часу, був взятий зі звіту про використання, а дані про несправності систем ПС були отримані з технічного журналу ПС. Системи ПС були класифіковані за допомогою системи нумерації АТА, яка є всесвітнім стандартом для визначення та структурування всіх секцій сучасних пасажирських літаків.

Інформація про несправності авіаційних систем і конструкцій ПС наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Дані про відмову систем і конструкцій ПС

АТА №	Назва розділу АТА	$n_i$	$n_F$
21	Система кондиціонування повітря	11	3
22	Система автоматичного управління польотом	104	49
23	Система зв'язку	39	12
24	Система електроживлення	57	20
25	Побутове та аварійно-рятувальне обладнання	27	2
26	Система протипожежного захисту	15	
28	Паливна система	9	3
29	Гідрравлічна система	46	3
30	Система захисту від льоду та дощу	14	4
31	Прилади індикації/запису	31	18
32	Шасі	211	16
33	Освітлення та світлова індикація	76	16
34	Пілотажно-навігаційне обладнання	173	91
39	Електричні - електронні панелі та багатоцільові компоненти	9	2
45	Бортова система обслуговування	17	1
51	Конструкція планера	70	3
52	Двері, люки	53	7
53	Фюзеляж	165	21
55	Стабілізатори	13	
56	Вікна	4	
65	Приводи хвостового гвинта	192	8
66	Складані лопаті	37	4
67	Система управління роторами	76	12
71	Силова установка	24	2
72	Двигун	20	6
73	Паливна система двигунів	48	16
74	Система запалювання	1	
75	Система відбору повітря	54	18
76	Система керування двигуном	5	1
77	Прилади контролю двигуна	8	6
78	Система вихлопу двигуна	4	
79	Масляна система	48	1
80	Система запуску	15	3
<b>Сукупна кількість спостережуваних відмов за вказаний інтервал</b>		<b>1676</b>	<b>348</b>

В табл. 1  $n_F$  характеризує відмови під час польоту, тоді як  $n_i$  визначає загальну кількість відмов, помічених як пілотами, так і персоналом технічного

обслуговування протягом спостережуваного інтервалу часу за чотири роки.

Час спостереження  $T_{obs} = 29116$  годин польоту та загальна інтенсивність відмов для будь-якого довільного компонента ПС  $\lambda = 0.058 \text{ год}^{-1}$ . Це означає, що відмови в середньому відбуваються після 17 годин польоту.

Для моделі проведено аналіз  $M = 1000$  відмов систем. Час між відмовами визначається експоненціальним розподілом із параметром  $\lambda$  і вважається, що лише одна відмова може виникнути в один елементарний інтервал спостереження. Щоб визначити, яка система ПС вийшла з ладу, було обчислено певну кількість відмов на всю систему. В загальному, це значення визнає умовну ймовірність відмови даної системи, якщо певна система вийшла з ладу, та розраховується за формулою

$$p_i = \frac{n_i}{N},$$

де  $N$  – загальна кількість спостережуваних відмов,  $i \in [1, 32]$ .

Було згенеровано випадкові числа з рівномірним розподілом в діапазоні  $[0; 1]$  та розміром вибірки 10000.

Кожне згенероване число далі порівнюється з системою порогових значень. Тридцять три одиничні порогові значення були визначені до початку моделювання за допомогою наведеної нижче формули ( $p_0 = 0$ ):

$$V_j = \sum_{i=0}^j p_i.$$

Алгоритм прийняття рішення про збій системи наступний. Якщо значення згенерованого числа  $x_k$  потрапляє в інтервал  $[V_j; V_{j+1}]$ , то вважаємо, що  $j+1$  система ПС вийшла з ладу.

В результаті 10000 повторень алгоритму прийняття рішень формуються вектори відмов  $\bar{T}_i$  для кожної системи. Для кожної системи оцінюються характеристики випадкових величин та будується й аналізується функція щільності розподілу ймовірності.

Алгоритм статистичного моделювання, виконаного за допомогою програмного забезпечення Mathcad, показано на рис. 3.

### Аналіз результатів моделювання

Отримана щільність розподілу ймовірності часу напрацювання між відмовами для систем кондиціонування повітря, автоматичного управління польотом, зв'язку та електроживлення ПС наведена відповідно на рис. 4 – 7.

Для одного із варіантів результатів моделювання для різних систем, що показані на рис. 4 – 7, подальший аналіз проводився за допомогою функцій Mathcad і Microsoft Excel. Були отримані результуючі ймовірності відмов і середній час між відмовами.

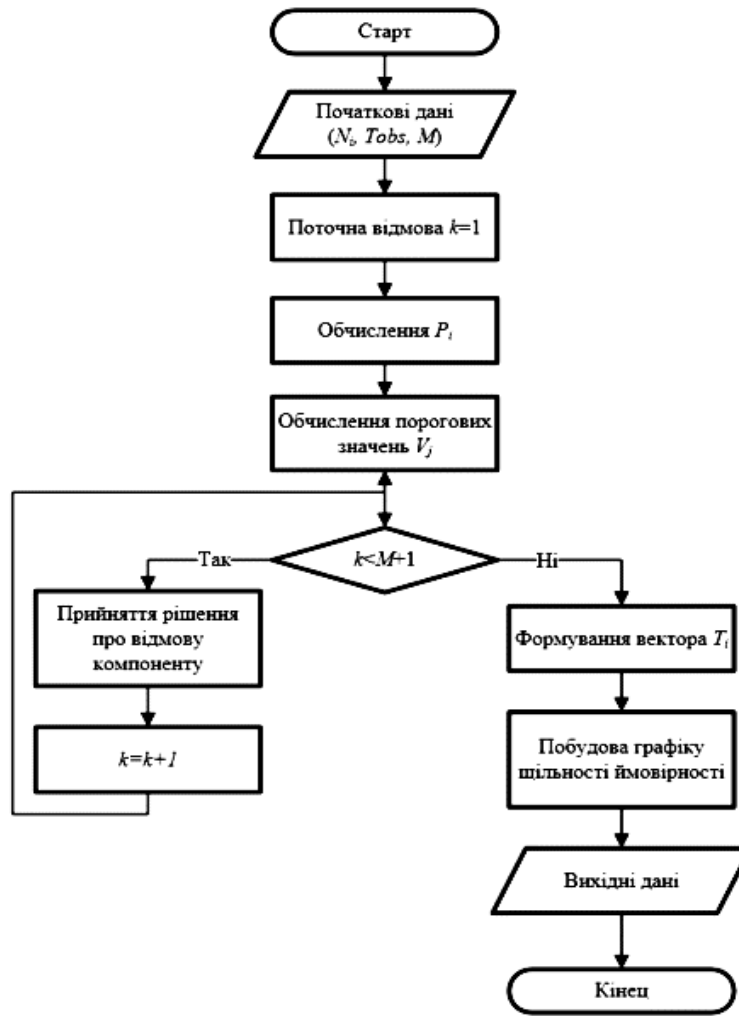


Рис. 3. Блок-схема алгоритму моделювання



Рис. 4. Функція щільності розподілу ймовірності часу напрацювання між відмовами системи кондиціонування повітря

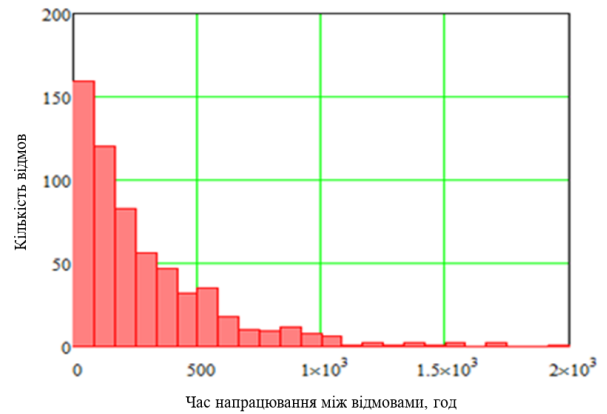


Рис. 5. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами системи автоматичного управління польоту

На кожні 10 000 годин польоту спостерігалось 64 відмови в системі кондиціонування повітря, 607 – в системі автоматичного управління польотом, 236 – в системі зв'язку і 362 – в системі електроживлення. Середній час між відмовами та стандартні відхилення наведені в табл. 2.

На основі цих результатів можна розрахувати статистику відмов інших систем і конструкцій ПС після побудови функції щільності ймовірності системи або конструкцій.

Таблиця 2 – Середній час напрацювання на відмову систем ПС

Система	Середній час напрацювання на відмову
Кондиціонування повітря	2,705
Автоматичний політ	285
Зв'язок	732
Електроживлення	475

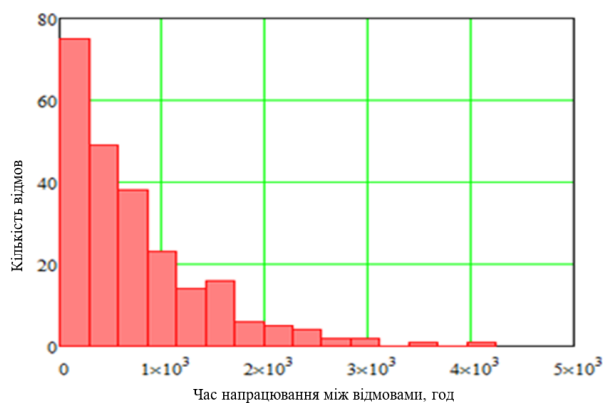


Рис. 6. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами системи зв'язку

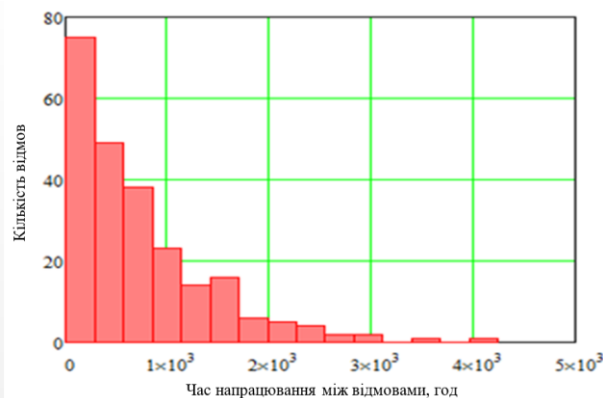


Рис. 7. Функція щільності розподілу часу напрацювання між відмовами системи електроживлення

### Висновок

У статті розглядається статистична імітаційна модель відмов систем і конструкцій ПС з огляду на оптимізацію технічного обслуговування ПС. Для моделювання відмов використовувався метод моделювання Монте-Карло.

Для визначення функцій щільності ймовірності чотирьох систем ПС – кондиціонування повітря, автоматичного польоту, зв'язку та електроживлення – було застосовано моделювання. За допомогою розглянутого в цій статті алгоритму може бути

розрахована статистика відмов інших систем і конструкцій ПС. Враховуючи, що запропоновану модель можна використовувати для визначення ймовірності відмови систем і конструкцій ПС, її потенційно можуть використовувати експлуатанти повітряних суден для планування профілактичних і прогностичних дій з технічного обслуговування.

Отримані результати також потенційно можуть бути використані під час проектування нових систем і для вдосконалення існуючих систем, оскільки вимоги до надійності визначаються на етапі проектування та розробки життєвого циклу системи.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Global Commercial Helicopters Market (2020 to 2025). Growth, Trends and Forecast – ResearchAndMarkets.com. URL <https://www.businesswire.com/news/home/20200909005517/en/Global-Commercial-Helicopters-Market-2020-to-2025---Growth-Trends-and-Forecast---ResearchAndMarkets.com>.
2. Global Helicopter Market Industry Analysis and Forecast (2019-2027) by Product type, by Application and by Region – Maximize Market Research PVT. Ltd. URL <https://www.maximizemarketresearch.com/marketreport/global-helicopter-market/15356>.
3. Sprong, J. P., Jiang, X., & Polinder, H. (2019). A Deployment of Prognostics to Optimize Aircraft Maintenance - A Literature Review: A Literature Review. *Annual Conf. of the PHM Society*, 11(1). <https://doi.org/10.36001/phmconf.2019.v11i1.776>.
4. 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).
5. Wu H., Liu Y., Ding Y., Liu J. Methods to reduce direct maintenance costs for commercial aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2004, Vol. 76 No. 1, pp. 15–18. <https://doi.org/10.1108/00022660410514964>.
6. Nakagawa T.. Maintenance Theory of Reliability. 2005, 269 p.
7. IEC 60300-3-11, Dependability Management – Part 3-11: Application Guide - Reliability centred maintenance, 1999.
8. 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>.
9. Dhillon B. S. Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers. New York, Taylor & Francis Group. 2006, 214 p. <https://doi.org/10.1201/9781420006780>.
10. Okoro O.C. Reliability Analysis of Aircraft Fleet in Nigeria. *Proceedings of National Aviation University*. 2020, Vol. 83 (2), pp.49–53.

Received (Надійшла) 24.06.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.08.2022

### Statistical simulation models for the optimization of aircraft maintenance

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

**Abstract.** Aircraft maintenance programs are developed based on manufacturer recommendations and compliance with airworthiness regulator directives. However, operators must adapt their maintenance program to the aircraft configuration and individual requirements of their fleet. The results of the reliability analysis make it possible to adjust the maintenance program and thus reduce excessively expensive maintenance work and downtime. The use of probability theory and statistics to optimize aircraft maintenance was considered. The article presents the developed statistical simulation model of failures of aircraft systems and structures based on the Monte Carlo method. Reliability parameters of aircraft systems and structures were used as initial data for the simulation. The obtained model can be used to improve of aircraft systems and structures at the design and production stage.

**Keywords:** optimization, reliability, maintenance, predictive maintenance, operation, failure model of aviation systems.