

Національний авіаційний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ОКОРО ОНІЕДІКАЧІ ЧІОМА

УДК 629.735.083.02/.06:629.735.07(669.1)(043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ
ПІДТРИМАННЯ ЛЬОТНОЇ ПРИДАТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН В НІГЕРІЇ**

272 – Авіаційний транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Окоро О.Ч.

Науковий керівник: Дмитрієв Сергій Олексійович, д.т.н., професор

Київ–2023

АНОТАЦІЯ

Окоро О.Ч. Оптимізація процесів технічного обслуговування для підтримання льотної придатності повітряних суден в Нігерії. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 272 – Авіаційний транспорт – Національний авіаційний університет, Міністерства освіти і науки України, м. Київ, 2023р.

У цій дисертації розглядається найважливіша наукова проблема оптимізації процесів технічного обслуговування (ТО) повітряних суден (ПС) для економічної та ефективної експлуатації повітряних суден при забезпеченні заданого рівня безпеки польотів.

Це дослідження включає в себе аналіз існуючих досліджень, пов'язаних з оптимізацією процесів ТО ПС та їх потенціалу для мінімізації затрат на ТО, які нині складають 10-20% (до 30% в деяких регіонах) експлуатаційних витрат ПС. Аналіз виявив прогалини у моделях та алгоритмах, заснованих на теорії надійності, машинному навчанні, регресії, а також теоріях ймовірності та статистики для оптимізації ТО ПС на перших трьох етапах життєвого циклу ПС.

Ще одним напрямом цього дослідження є надання простої та розширеної основи для максимального використання даних про щоденні операції ПС, які часто зберігаються, але в основному ігноруються. Очікується, що цей підхід скоротить втрати, що виникають через раннє ТО, та витрати при відмові, пов'язані з пізнім ТО.

У вступі обґрунтовується актуальність дисертації, формулюються мета та основні завдання дослідження, дається інформація про зв'язок дослідження з науковими програмами та темами. Крім того, виділено наукову новизну та практичну

значущість дослідження, відзначено внесок претендента у спільних публікаціях, викладено апробацію результатів дисертаційної роботи, наведено структуру та обсяг дисертації.

У першому розділі дається огляд ТО ПС в Нігерії, поглиблений аналіз існуючих моделей оптимізації ТО ПС і простий чисельний аналіз надійності ПС, що експлуатуються в Нігерії.

У Нігерії експлуатуються різні типи ПС. Сектор комерційних гелікоптерів робить свій внесок в економіку, надаючи пошуково-рятувальні послуги та транспортування персоналу морської нафтогазової промисловості. NCAA є єдиним органом регулювання авіації в Нігерії. У частині 5 NigCARs представлені нормативні вимоги до підтримання льотної придатності ПС, які будуть експлуатувати в Нігерії відповідно до SARPs, що містяться в додатках 6 та 8 ІКАО. Частина М ІКАО є обов'язковою експлуатаційною ліцензією для експлуатантів ПС і містить мінімальні вимоги до ТО та льотної придатності. MRBR складає основу програми ТО, яка є частиною затвердженої системи ТО і повинна перевірятися кваліфікованими інженерами щодо її придатності не рідше ніж один раз на рік. Експлуатанти в Нігерії зазвичай дотримуються філософії ТО BC MSG-2 або MSG-3.

Для оптимізації ТО ПС багато дослідників запропонували та протестували ряд методів, заснованих на аспектах процесів ТО ПС, а саме: планування, складання графіків, розподіл завдань ТО, маршрутизація ТО ПС, запас запасних частин, управління персоналом і навичками, використання авіаційних прогностичних даних та даних управління технічні станом, а також моделі надійності. Однак, недостатньо уваги приділяється розробці моделей, що поєднують використання моделей теорії надійності, машинного навчання, прогнозу аналітики, регресійних моделей, теорій імовірнісних та статистичних для оптимізації ПС. Ці концепції можна вважати четвертою промисловою революцією. Вони є основою для прогнозного ТО ПС на

основі даних, які стануть основою для виконання завдань з ТО ПС у найближчому майбутньому.

Щоб розпочати розробку цих моделей, було проведено простий чисельний аналіз надійності з використанням даних про щоденні дані про експлуатацію ПС у Нігерії. Це виявило найменш надійні системи або конструкції ПС для кожного проаналізованого парку водночас з динамікою інтенсивності відмов кожного парку ПС.

Друга глава присвячена розробці моделей та алгоритмів оптимізації ТО ПС з використанням принципів теорії надійності, прогнозої аналітики, регресії, машинного навчання, теорії ймовірностей та статистики.

Моделі, розроблені для аналізу надійності компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС, визначають характеристику надійності систем ПС для оптимізації ТО ПС. Їх можна застосовувати для поліпшення існуючих систем ТО, орієнтованих на надійність, незалежно від обсягу набору даних. До того ж, були розроблені моделі сегментованої регресії для прогнозування виникнення несправностей/відмов.

Оскільки компоненти та системи ПС зношуються, вкрай важливо проводити ТО, що у свою чергу збільшує експлуатаційні витрати. Отже, необхідний оптимальний інтервал, який врівноважує частоту виконання завдань ТО ПС та інтенсивність відмов. У цьому розділі були розроблені моделі для визначення оптимального інтервалу завдань ТО ПС. До того ж, ця модель дає кількісну оцінку витрат та економії на ТО для отримання оптимального балансу між обома параметрами.

Прогнозування попиту на запасні частини може бути складним завданням, оскільки попит є стохастичним. Однак, володіючи знаннями про розвиток тенденцій та розподіл відмов, можна забезпечити прийняття оптимального рішення. У цьому дослідженні розроблено моделі, які можуть створити ефективне управління запасами запасних частин для надання ефективних послуг з ТО. Пропоновані моделі фокусуються на взаємодії між інтенсивністю відмов та наявністю запасних частин.

У *третьому розділі* перевірено моделі, розроблені у *другому розділі*, з використанням даних щоденної експлуатації ПС у Нігерії. Критерій згоди χ^2 було застосовано до математичних моделей для аналізу надійності (для набору даних > 35), щоб перевірити, чи він підпорядковується експоненційному розподілу. Обчислене значення χ^2 менше порогового значення χ_{th}^2 ; звідси приймається гіпотеза про експоненційний закон розподілу напрацювання на відмову систем та конструкцій літака з рівнем значущості, що дорівнює 0,05. Для запропонованої моделі аналізу надійності з урахуванням невеликого набору даних проводиться візуальний тест на відповідність, що підтверджує її достовірність.

Щоб визначити, яка із запропонованих моделей сегментованої регресії забезпечує найбільшу точність прогнозу, всі моделі були протестовані з використанням реальних експлуатаційних даних ПС. Модель з найменшим значенням стандартного відхилення σ вважається найбільш точною для прогнозування відмови компонента, підсистеми, системи або конструкції ПС. Крім того, для порівняння всіх отриманих графіків запропонованих регресійних моделей було застосовано графічне пояснення (уявлення, розуміння) достатньої, надмірної та недостатньої відповідності в регресії. Всі моделі було розглянуто щодо достатньої (успішної) відповідності.

Імітаційний аналіз було проведено з використанням методу Монте-Карло, щоб довести застосування моделей, розроблених для визначення оптимального інтервалу завдань технічного обслуговування з використанням середніх експлуатаційних витрат як міри ефективності. Результати доводять, що для експоненційної моделі напрацювання на відмову немає оптимального інтервалу завдань ТО, який відповідає точці локального мінімуму на графіку середніх експлуатаційних витрат за одиницю часу в залежності від інтервалу виконання завдань обслуговування T_M , тобто $T_{Mopt} \rightarrow \infty$. Для моделі Ерланга результати моделювання доводять існування «мінімуму», що відповідає оптимальному інтервалу ТО. Ці результати збігаються з аналітичними

результатами у розділі 2 та ще раз доводять, що оптимізація інтервалу завдань ТО авіаційних систем з використанням моделі Ерланга можлива.

Для моделей прогнозу запасних частин компоненти ПС вважаються неремонтопридатними та мають експоненційний розподіл часу до відмови. Кількість запасних частин розраховується з використанням необхідної ймовірності безвідмовної роботи та оцінного значення інтенсивності відмов, отриманого під час аналізу реальних статистичних даних. Для аналізу точності запропонованої моделі було виконано моделювання на основі методу Монте-Карло, результати якого сприятливо збіглися з необхідною та розрахованою ймовірністю безвідмовної роботи.

У четвертому розділі представлена проста і розширювана чотириетапна методологія, що поєднує підходи до аналізу надійності систем і конструкцій ПС, прогнозування несправностей/відмов систем ПС, оптимізації інтервалу завдань ТО ПС з використанням середньої експлуатаційної вартості, як міри ефективності та прогнозу запасу запасних частин з метою оптимізації процесів ТО ПС.

Дану методологію розроблено, оскільки розрізнені автономні втручання можуть збільшити загальний час простою. Запропонована методологія закладає основу подальших розробок з погляду її майбутнього розширення, перевірки та впровадження. Її унікальність полягає в тому, що хоча більшість досліджень зосереджена на окремих компонентах або системах, запропонована методологія розглядає всі компоненти і системи ПС в єдиній структурі. Цей підхід, засновано на даних, що є більш економічною альтернативою моделюванню на основі фізичних процесів і може використовуватися для розробки системи прогнозування ПС. Крім того, даний підхід може бути корисним під час вирішення проблеми оптимізації ТО на етапі проєктування життєвого циклу ПС.

У висновках представлено основні результати дисертаційного дослідження, що відображають методологічні засади моделей та алгоритмів оптимізації процесів ТО ПС.

Наукова новизна первинних результатів, отриманих у ході дослідження, полягає у наступному:

1. Вперше було розроблено моделі статистичного моделювання для аналізу надійності, які можна застосовувати як до великих, так і для малих наборів даних про ПС. Отримані показники надійності можуть покращити структуру ТО, орієнтовану на надійність та технічний стан.

2. Вперше було розроблено сегментовані регресійні моделі для прогнозування льотної години, коли компонент, підсистема або система ПС вийде з ладу. Це важливо тому, що невірні прогнози ТО та стратегії конфігурації можуть призвести до несвоєчасної підтримки, затримок рейсів або перебування ПС на землі.

3. Вперше визначено оптимальний інтервал виконання завдань по ТО ПС з використанням середніх експлуатаційних витрат, як міри ефективності. Модель розроблена на основі щільності ймовірності надійності та вартості превентивного і коригуючого ТО ПС. Існуючі оптимальні моделі завдань ТО використовують рівень витрат на ТО у якості критерію оптимізації, але не зважають на показники надійності. Зниження рівня витрат за ТО системи означає, що показники надійності системи оптимізуються з точки зору витрат, особливо щодо багатокomпонентних систем. Мінімальні витрати на ТО іноді пов'язані із зниженням показників надійності системи. Це один із результатів наявності в системі різних компонентів, які можуть мати різну вартість ТО та різну важливість для системи. Це стало основою розробки даної моделі.

4. Отримала подальший розвиток розроблена модель, яка враховує історичну тенденцію відмов компонентів та параметри надійності для прогнозування запасів запасних частин. Це особливо важливо для експлуатації в таких країнах, як Нігерія, оскільки перелік виробників оригінального обладнання та складів запасних частин обмежена. Окрім того, характеристики запасних частин згодом погіршуються у гарячому, теплому та навіть холодному резерві. Вони також можуть раптово вийти з

ладу через зовнішні чинники та деградацію, в результаті недосконалого зберігання (відмова зберігання).

5. Отримала подальший розвиток розроблена методологія, яка поєднує параметри надійності, прогнозування відмов, вартість і прогноз запасів запасних частин, з метою оптимізації процесів ТО ПС для підтримання льотної придатності. Це особливо важливо для реалізації стратегій, запропонованих у цьому дослідженні, у якості єдиної основи замість існуючих автономних моделей, що тягнуть за собою тривале планування та зайві витрати. Крім того, цей підхід, що базується на аналізі статистичних даних, є більш ефективною альтернативою моделюванню на основі фізичних процесів. Отримані статистичні дані доцільно використовувати під час розробки методів прогнозування технічного стану повітряних суден.

Практична цінність результатів, отриманих у дисертації, полягає у наступному:

1. Метод аналізу надійності, заснований на експоненційному розподілі для набору даних > 35 ; дозволяє експлуатантам ПС аналізувати дані про компоненти, підсистеми, системи та конструкції. Оператор може порівняти надійність всього парку, щоб зрозуміти вартість перерви в розкладі, проаналізувати рішення та розставити пріоритети сервісних бюлетенів залежно від впливу на парк.

2. Метод аналізу надійності для набору даних < 35 важливий, тому що невеликі набори даних дають великі довірчі інтервали при великому загальному нальоті, що має більш низьку статистичну надійність. Ключовим недоліком використання невеликого набору даних є відсутність статистичної стабільності. Запропонована методика заснована на рівнянні Казакавічуса: інтенсивність відмов визначається за допомогою ймовірності безвідмовної роботи.

3. Метод прогнозування льотної години, коли саме відбудеться відмова компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС. Це важливо, тому що неправильні прогнози ТО та стратегії конфігурації можуть призвести до несвоєчасної техпідтримки, затримок рейсів або знаходження ПС на землі.

4. Метод визначення оптимального інтервалу ТО ПС з використанням середніх експлуатаційних витрат як міри ефективності. Пропонована модель базується на щільності ймовірності Ерланга залежно від часу між відмовами та враховує вартість ТО та надійність. Він також дозволяє кількісно оцінити витрати на коригувальне та превентивне ТО одночасно.

5. Методика прогнозування запасів авіаційних запчастин для неремонтопридатних виробів та експоненційно розподіленого часу між відмовами. Кількість запасних частин розраховується з використанням необхідної ймовірності безвідмовної роботи та прогнозованого значення інтенсивності відмов, отриманого під час аналізу реальних статистичних даних. Це важливо, тому що надлишкові запаси запасних частин призводять до значних витрат на утримання та перешкоджають руху коштів. Навпаки, брак запасних частин може призвести до високовартісних затримок або скасування рейсів, що негативно впливає на роботу авіакомпаній.

6. Коротка, проста і розширювана чотириступінчаста методологія, що поєднує всі запропоновані методи оптимізації процесів ПС. Ця методологія вважається новою теоретичною основою для ТО ПС, орієнтованого на характеристики, які враховують експлуатаційні показники та стан компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС.

Результати цього дослідження можуть бути використані при формулюванні задач оптимізації ТО та задля розроблення підходу до ТО з прогнозуванням на основі даних на етапі проектування життєвого циклу ПС.

Ключові слова: повітряних суден, технічне обслуговування повітряних суден, оптимізація, оптимізація технічного обслуговування, надійність, аналіз надійності, регресія, сегментована регресія, ймовірність, статистика, прогнозна аналітика, машинне навчання, обробка даних, ефективність, експертна система, статистичне моделювання, Монте-Карло, авіаційні системи, авіаційні компоненти, конструкції повітряних суден, підсистеми повітряних суден, інтенсивність відмов, напрацювання

на відмову, час між відмовами, щільність ймовірності, технічний стан, діагностика, прийняття рішень, запасні частини, превентивне технічне обслуговування, прогностичне технічне обслуговування, коригуюче технічне обслуговування, рішення з урахуванням даних, набір даних.

ABSTRACT

Okoro O.C. Optimization of aircraft maintenance processes for continuing airworthiness in Nigeria. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Philosophy for the specialty 272 – Aviation transport – National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine Kyiv, 2023.

This dissertation addresses the critical scientific problem of optimization of aircraft maintenance processes for cost-effective and efficient aircraft operations without compromising safety.

This research includes the analysis of existing studies related to the optimization of aircraft maintenance processes and their potential for minimizing maintenance cost, which currently covers 10-20% (up to 30% in some regions) of aircraft operational costs. The analysis highlighted the gap in models and algorithms based on reliability theory, machine learning, regression, and probability and statistics theories for optimizing aircraft maintenance in the first three phases of the aircraft lifecycle.

Another focus of this research is the provision of a simple and expandable framework for maximizing the utilization of daily aircraft operations data, which is often stored but primarily disregarded. Its' approach is expected to reduce waste that arises because of early maintenance and failure costs connected with late maintenance actions.

The *introduction* justifies the relevance of the dissertation, formulates the purpose and main objectives of the study, and provides information on the research's relationship with scientific programs and topics. In addition, the scientific novelty and practical significance of the study are highlighted, the applicant's contribution in joint publications is noted,

approbation of the results of the dissertation work are outlined, structure and volume of the dissertation are given.

The *first chapter* gives an overview of aircraft maintenance in Nigeria, an in-depth analysis of existing aircraft maintenance optimization models, and a simple numerical reliability analysis of aircraft operating in Nigeria.

Various aircraft types are in operation in Nigeria, and the commercial helicopter sector contributes to the economy by providing search and rescue services, and transportation to the offshore oil and gas industry. The NCAA is the only aviation regulatory authority in Nigeria; Part 5 of the NigCARs presents regulatory requirements for the continuing airworthiness of aircraft expected to operate in Nigeria in line with the SARPs in ICAO Annexes 6 and 8. ICAO Part M represents a compulsory operating license for aircraft operators and contains the minimum requirements for maintenance and airworthiness. The MRBR forms the basis for the maintenance program, which is part of the approved maintenance system and must be monitored by qualified engineers for suitability at least annually. Operators in Nigeria typically follow either the MSG-2 or MSG-3 philosophy of aircraft maintenance.

To optimize aircraft maintenance, many researchers have suggested and tested a range of techniques based on aspects of aircraft maintenance processes such as planning, scheduling, maintenance task allocation, aircraft maintenance routing, spare parts inventory, personnel, and skill management, use of aircraft prognostics and health management data, and reliability models. However, insufficient attention is being paid to the development of models which consolidate the use of reliability theory models, machine learning, predictive analytics, regression models, and probability and statistics theories for optimizing aircraft maintenance. These industry 4.0 concepts form a framework for data-driven predictive aircraft maintenance, which will be the basis for carrying out aircraft maintenance tasks in the near future.

To begin the development of these models, a simple numerical reliability analysis using daily aircraft operations data was carried out. This highlighted the least reliable aircraft systems or structures for each fleet analyzed alongside the dynamics of the failure rate of each aircraft fleet.

The *second chapter* is devoted to developing aircraft maintenance optimization models and algorithms using principles of reliability theory, predictive analytics, regression, machine learning, probability, and statistics theory.

The models developed for reliability analysis of aircraft components, subsystems, systems, and structures determine the characteristic reliability of aircraft systems for optimizing aircraft maintenance. They can be applied to improve existing reliability-centered maintenance frameworks irrespective of the dataset's size. Furthermore, segmented regression models were developed to predict the occurrence of faults/failures.

As aircraft components and systems deteriorate, it is crucial to carry out maintenance actions, which increases operational costs. Therefore, there is a need for an optimal interval that balances the frequency of aircraft maintenance tasks and the failure rate. In this section, models were developed to determine an optimal aircraft maintenance task interval. In addition, this model quantifies the cost and benefits of maintenance to obtain an optimum balance between both.

Forecasting spare parts demand can be a challenging exercise because demand is stochastic. However, a good knowledge of the failure trend and distribution can provide optimal solutions. In this study, models which can create efficient spare parts inventory management to provide effective services for maintenance needs were developed. The proposed models focus on the interaction between failure rates and spare parts inventory.

In the *third chapter*, the models developed in the second chapter were validated using daily aircraft operations data from Nigeria. The χ^2 goodness-of-fit test was applied to mathematical models for reliability analysis (for dataset > 35) to verify if it obeys the

exponential distribution. The calculated χ^2 is less than the threshold value χ_{th}^2 ; hence the hypothesis for the exponential distribution law of mean time between failures of aircraft systems and structures is accepted with a significance level equal to 0.05. For the proposed model for reliability analysis given a small dataset, a visual goodness-of-fit test that proves its validity is carried out.

To determine which of the segmented regression models proposed gives the most prediction accuracy, all models were tested using real-life aircraft operational data. The model with the least value of standard deviation σ is considered the most precise for predicting the failure of an aircraft component, subsystem, system, or structure. Furthermore, a pictorial representation of good, over- and underfitting in regression was used to compare all the resulting graphs of the proposed regression models; all the models were in accordance with good fitting.

Simulation analysis was carried out using the Monte Carlo method to prove the applicability of the models developed for determining the optimal maintenance task interval using average operational cost as a measure of efficiency. Results prove that for the exponential model of time between failures, an optimal maintenance task interval that corresponds to a local minimum point on the graph of average operational cost per unit time vs maintenance task interval T_M does not exist; $T_{Mopt} \rightarrow \infty$. For the Erlang model, simulation results prove the existence of a “minimum” which corresponds to an optimal maintenance task interval. These results coincide with the analytical results in chapter 2 and further prove that optimizing the maintenance task interval of aircraft systems using the Erlang model is possible.

For the spare parts forecast models, the aircraft components are considered non-repairable items and have exponentially distributed times to failure. The quantity of spare parts is calculated using the required probability of failure-free operation and the estimated failure rate value obtained from real statistical data analysis. To analyse the accuracy of the

proposed model, a simulation based on the Monte Carlo method was performed, and results favourably coincided with the required and calculated probability of failure-free operation.

In the *fourth chapter*, a simple and expandable four-step methodology that consolidates approaches for reliability analysis of aircraft systems and structures, prediction of aircraft system faults/failures, optimization of aircraft maintenance task interval using average operational cost as a measure of efficiency and forecast of spare parts inventory for the optimization of aircraft maintenance processes is developed.

This methodology was developed because scattered standalone interventions may increase total downtime. The proposed methodology launches the basis for further developments in terms of its future expansion, validation, and implementation. Its uniqueness resides in the fact that while most studies focus on individual components or systems, the proposed methodology considers all aircraft components and systems in a single framework. In addition, this data-driven approach is a more cost-effective alternative to physics-based modelling and can be utilized for developing data-driven aircraft prognostics frameworks. Furthermore, insights from its usage can be beneficial in solving the maintenance optimization problem from the design phase of the aircraft life cycle.

The *conclusions* present the main results of the dissertation research, which reflect the methodological foundations of the models and algorithms for optimizing aircraft maintenance processes.

The scientific novelty of the primary results obtained during the research is as follows:

1. For the first time, statistical simulation models for reliability analysis that can be applied to both large and small aircraft datasets were developed. The reliability indices obtained can improve the reliability-centered and condition-based maintenance framework.
2. For the first time, segmented regression models were developed for the prediction of flight hour at which an aircraft component, subsystem, or system will fail. This is necessary

because wrong maintenance predictions and configuration strategies can lead to untimely support, flight delays, or aircraft on the ground.

3. For the first time, optimal aircraft maintenance task interval was determined using average operational cost as a measure of efficiency. The model was developed based on reliability probability density functions, cost of corrective aircraft maintenance, and cost of preventive aircraft maintenance. Existing optimal maintenance task models use the maintenance cost rate as an optimization criterion but overlook the reliability performance. Reducing the system maintenance cost rate does not imply that the system reliability performance is optimized in terms of cost, specifically for multicomponent systems. Minimal maintenance cost is sometimes associated with reduced system reliability measures; this is one of the outcomes of having different components in the system, which may have various maintenance costs and different importance to the system. This forms the basis for the development of this model.

4. For the first time, a model which considers the historical trend of component failures and reliability parameters for forecasting spare parts inventory was developed. This is especially important for operations in countries like Nigeria because there are limited original equipment manufacturers and spare parts storage facilities available. In addition, spare parts performance deteriorates over time in hot standby, warm standby, and even cold standby. They can also suddenly fail due to external shocks and degradations resulting from imperfect storage (storage failure).

5. For the first time, a concise methodology that integrates reliability parameters, failure prediction, cost, and spare part inventory forecast was developed to optimize aircraft maintenance processes for continuing airworthiness. This is particularly important for implementing the strategies proposed in this study as a single framework instead of existing standalone models that result in prolonged planning and waste. Furthermore, the models and algorithms proposed were validated using real operational aircraft data from airlines and helicopter operators in Nigeria. As a result, these models can be scaled to multiple systems without needing specific domain knowledge. In addition, this data-driven approach is a more

cost-effective alternative to physics-based modeling and can be utilized for developing data-driven aircraft prognostics frameworks.

The practical value of the results obtained in the dissertation are as follows:

7. A technique for reliability analysis based on exponential distribution given a dataset > 35 ; allows aircraft operators to analyze data components, subsystems, systems, and structures. An operator can compare the reliability of the entire fleet to understand the cost of schedule interruptions, analyze solutions, and prioritize service bulletins based on impact on the fleet.
8. A technique for reliability analysis given a dataset < 35 ; is significant because small datasets produce large confidence intervals at high total flight hours, implying lower statistical reliability; a key disadvantage of using a small dataset is the lack of statistical stability. The proposed technique is based on Kazakyavicius equation; the failure rate is determined using the probability of failure-free operations.
9. A technique for predicting the flight hour at which a failure will occur in aircraft's components, subsystems, systems, and structures. This is significant because wrong maintenance predictions and configuration strategies can lead to untimely support, flight delays, or aircraft on the ground.
10. A technique for determining optimal aircraft maintenance interval using average operational cost as a measure of efficiency. The proposed model is based on Erlang's probability density function of time between the failures and considers maintenance cost and reliability. It also quantifies the corrective and preventive maintenance costs alongside the maintenance benefits to obtain an optimum balance between both.
11. A technique for forecasting aircraft spare parts inventory for non-repairable items and exponentially distributed time between the failures. The quantity of spare parts is calculated using the required probability of failure-free operation and the estimated failure rate value obtained from real statistical data analysis. This is significant because excess spare parts inventory results in a high holding cost and impedes cash flows. In

contrast, a lack of spare parts can lead to costly flight delays or cancellations, negatively impacting airline performance.

12. A concise, simple, and expandable four-step methodology which integrates all the proposed techniques for the optimization of aircraft maintenance processes. This methodology is considered a novel theoretical framework for performance-centered aircraft maintenance, which considers the operational performance and the condition of aircraft components, subsystems, systems, and structures.

The results of this research may be used in formulating maintenance optimization problems and developing a data-driven predictive maintenance approach from the design phase of the aircraft life cycle.

Keywords: aircraft, aircraft maintenance, optimization, maintenance optimization, reliability, reliability analysis, regression, segmented regression, probability, statistics, predictive analytics, machine learning, data processing, efficiency, expert system, statistical simulation, Monte Carlo, aircraft systems, aircraft components, aircraft structures, aircraft subsystems, failure rate, mean time between failure, time between failures, probability density function, technical condition, diagnosis, decision-making, spare parts, preventive maintenance, predictive maintenance, corrective maintenance, data-driven, dataset.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних (Scopus)

1. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S., Solomentsev O., Sribna O. Optimization of Maintenance Task Interval of Aircraft Systems. *International Journal of Computer Network & Information Security*. 2022. Volume 14. No 2. P. 77–89.

Особистий внесок автора: розробка та імітаційне моделювання стохастичних математичних моделей з використанням діагностичних змінних та параметрів

надійності для визначення оптимального інтервалу виконання завдань технічного обслуговування систем та конструкцій літальних апаратів.

2. Okoro O.C., Zaliskyi M., Serhii D., Abule I. An approach to reliability analysis of aircraft systems for a small dataset. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2023. Volume 118. P. 207–217.

Особистий внесок автора: розробка статистично значущого алгоритму та моделі аналізу надійності авіаційних систем при малому обсязі даних, характерному для маломасштабних операцій.

3. Zaliskyi M., Okoro O.C., Dmytriiev S., Fayoyiwa O.S.. Software Support for Simulation and Prediction of Failures and Faults During Aircraft Operations. Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Volume 736. P. 247–259.

Особистий внесок автора: розробка нового програмного забезпечення для моделювання та прогнозування відмов і несправностей компонентів, підсистем, систем і структур повітряних суден.

4. Zaliskyi M., Yashanov I., Okoro O.C., Shcherbyna O. Analysis of Learning Efficiency of Expert System for Decision-Making Support in Aviation. Advanced Computer Information Technologies (ACIT): Proceedings of IEEE 12th International Conference, Ruzomberok (Slovakia). 26-28 September 2022. P. 172–175.

Особистий внесок автора: аналіз різних методів навчання експертної системи на основі ймовірнісного підходу для комп'ютерних систем з використанням штучного інтелекту для імітації прийняття рішень людиною та експертом задля реалізації стратегій керованого та превентивного технічного обслуговування повітряних суден.

5. Okoro O.C., Chukwu C.N., Zaliskyi M., Holubnychyi O. A Method for Planning Spare Parts Inventory During Aircraft Operation Advanced Computer Information Technologies (ACIT): Proceedings of IEEE 12th International Conference, Ruzomberok (Slovakia). 26-28 September 2022. P. 168–171.

Особистий внесок автора: розробка методики планування запасів запасних частин під час експлуатації літаків на основі статистичних даних про напрацювання на відмову компонентів літаків.

6. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S., Qudus S. Data-Driven Approach to Optimal Aircraft Maintenance. The International Council of the Aeronautical Sciences: Proceedings of 33rd Congress, Stockholm (Sweden). 4 – 9 September 2022. P. 7114–7124.

Особистий внесок автора: розробка та синтез алгоритмів і моделей статистичної обробки даних для підвищення ефективності технічного обслуговування літальних апаратів.

Публікації у наукових фахових виданнях України

7. Okoro O.C. Reliability Analysis of Aircraft Fleet in Nigeria. Proceedings of National Aviation University. 2020, Volume 83 (2). P.49–53.

Особистий внесок автора: аналіз показників надійності приписного парку літаків і вертольотів авіакомпанії Нігерії, а також їх функціональних систем в процесі експлуатації.

8. Okoro O. Ч., Дмитрієв С. О., Заліський М. Ю., Осіпчук А. О. Моделі для аналізу надійності авіаційних компонентів, систем та конструкцій повітряних суден. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2022. Том 4 (№ 70). С. 16–21.

Особистий внесок автора: розробка статистично модельованої моделі надійності які можна реалізувати на етапі проєктування та розробки компонентів, систем та конструкцій вертольотів.

9. Okoro O.Ч., Дмитрієв С. О., Заліський М. Ю., Осіпчук А. О. Статистичні імітаційні моделі оптимізації технічного обслуговування повітряних суден. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2022. Том 3 (№ 69). С. 8–12.

Особистий внесок автора: розробка статистичної імітаційної моделі відмов систем та конструкцій літаків та методом Монте-Карло.

Публікації у збірниках матеріалів конференцій

10. Okoro O.C. Optimization of Aircraft Maintenance Processes Using Regression Analysis. Current Security Problems in Transport, Energy and Infrastructure: Proceedings of Conference, Kherson. 2021. P. 244.

Особистий внесок автора: розробка моделі лінійної регресії для аналізу несправностей/відмов систем парку літаків у Нігерії.

11. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S. Statistical simulation regression models for efficient aircraft operations. Aviation in the XXI-st century - Safety in aviation and space technology: Proceedings of The Tenth World Congress, Kyiv. 28 – 30 September 2022. P. 1–5.

Особистий внесок автора: розробка сегментованих регресійних моделей для підвищення точності прогнозування відмов компонентів, систем та конструкцій літальних апаратів з використанням даних про повсякденну експлуатацію літальних апаратів.

12. Zaliskyi M., Okoro O.C., Dmytriiev S. Statistical Simulation of Failures of the Systems and Structures of S-76 C++ Helicopters in Nigeria. Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks: Proceedings of 2nd International Conference, Kyiv-Lviv. 30 November 2020. P. 1–10.

Особистий внесок автора: представлена імітаційна програма для статистичного моделювання відмов компонента літака.

13. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S. Statistical Simulation Models for the Optimization of Aircraft Maintenance Processes. Problems of Transportation Organization and Air Transport Management: Proceedings of International Scientific-Practical Conference, Kyiv, NAU, 20 October 2021. P-3.

Особистий внесок автора: розробка підходу до розрахунку оптимального інтервалу часу виконання технічного обслуговування літальних апаратів.

14. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S. Models for Optimizing Aircraft Maintenance Processes. Condition-based Maintenance in Aerospace: Proceedings of 1st International Conference, Delft (Netherlands). 24 – 25 May 2022. P. 1–10.

Особистий внесок автора: представлені розрахункові чисельні приклади для отримання оцінок оптимального інтервалу часу для проведення профілактичного та прогнозного технічного обслуговування літальних апаратів у разі експоненціальних функцій щільності ймовірності міжвідмовних напрацювань.

15. Okoro O.C., Zaliskyi M. Models and Algorithms for Optimizing Aircraft Maintenance Processes. Air Transport Research Society: Proceedings of 25th World Conference, Antwerp (Belgium). 24 – 27 August 2022. P. 1 – 5.

Особистий внесок автора: проведено розрахунок числових прикладів для отримання оцінок оптимального інтервалу часу для проведення превентивне та прогнозного технічного обслуговування літальних апаратів у випадку функції щільності ймовірності Ерланга міжвідмовних напрацювань.

16. Okoro O.C., Zaliskyi M. Optimizing Aircraft Maintenance Processes – An Operations Data-Driven Methodology. Ontario Aircraft Maintenance Conference; The Future of Aircraft Maintenance – Performance, Professionalism and Pride: Proceedings of Conference, Toronto, (Canada). 2-3 November 2022. P.1-18.

Особистий внесок автора: здійснено аналіз різних типів стратегій прогнозного технічного обслуговування повітряних суден.

17. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S. An Approach to Optimizing Aircraft Maintenance. In: Karakoc, T.H., Atipan, S., Dalkiran, A., Ercan, A.H., Kongsamutr, N., Sripawadkul, V. (eds). Research Developments in Sustainable Aviation. ISSA SARES 2021 (Proceedings of International Symposium on Sustainable Aviation, Bangkok, Thailand). Sustainable Aviation. 2023, Springer, Cham, pp. 263–269.

Особистий внесок автора: розроблено комп'ютерну програму для проведення статистичного моделювання з метою визначення оптимального інтервалу часу для проведення прогностного технічного обслуговування літальних апаратів.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ	28
ВСТУП	30
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН У НІГЕРІЇ І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН У СВІТІ	37
1.1. Огляд технічного обслуговування повітряних суден у Нігерії	37
1.1.1. Процеси технічного обслуговування повітряних суден у Нігерії	39
1.1.2. Існуючі принципи технічного обслуговування	43
1.2. Сучасні моделі оптимізації технічного обслуговування повітряних суден	44
1.2.1. Моделі планування технічного обслуговування повітряних суден	44
1.2.2. Сучасні моделі для планування графіку технічного обслуговування повітряних суден	49
1.2.3. Моделі розподілу завдань з технічного обслуговування повітряних суден	53
1.2.4. Моделі маршрутів технічного обслуговування повітряних суден	55
1.2.5. Моделі планування запасних частин для технічного обслуговування повітряних суден	59
1.2.6. Моделі для управління навичками та планування персоналу з технічного обслуговування повітряних суден	62
1.2.7. Моделі технічного обслуговування повітряних суден на основі даних прогнозування та управління технічні станом	63
1.2.8. Моделі технічного обслуговування повітряних суден, орієнтовані на надійність	64
1.2.9. Мотивація для цього дослідження	66
1.3. Чисельний аналіз надійності повітряних суден у Нігерії	67
1.3.1. Огляд надійності повітряних суден	67
1.3.2. Чисельний аналіз надійності повітряних суден у Нігерії	68
1.3.3. Аналіз одержаних результатів чисельних показників надійності з використанням кривої у формі «ванни»	79
Висновки до розділу 1	82

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ І СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИЙ СУДЕН	85
2.1. Використання щоденних даних про польоти повітряних суден для алгоритмів статистичної обробки даних	85
2.2. Алгоритми та моделі аналізу надійності елементів, підсистем, систем та конструкцій повітряних суден	90
2.2.1. Статистичні імітаційні моделі для аналізу надійності повітряних суден.....	91
2.2.2. Статистична імітаційна модель для аналізу надійності з урахуванням невеликого набору даних	96
2.3. Математичні моделі для оптимізації інтервалів завдань технічного обслуговування повітряних суден	100
2.3.1. Методика оптимізації інтервалу технічного обслуговування повітряних суден	101
2.3.2. Математичне моделювання експоненційної моделі часу між відмовами для визначення оптимального інтервалу завдань технічного обслуговування повітряних суден	102
2.3.3. Математичне моделювання Ерлангівської моделі часу між відмовами для визначення оптимального інтервалу завдань технічного обслуговування повітряних суден.....	103
2.3.4. Методика визначення оптимального інтервалу виконання робіт із технічного обслуговування повітряних суден	105
2.4. Регресійна математична модель для прогнозування виникнення відмов компонентів, підсистем чи систем повітряних суден.....	106
2.4.1. Моделі регресійного аналізу для оптимізації технічного обслуговування повітряних суден	108
2.4.2. Модель квадратично-лінійної сегментованої регресії.....	109
2.4.3. Лінійно-лінійна шматково-регресійна модель	110
2.4.4. Квадратично-квадратична шматково-регресійна модель	110
2.5. Математичні моделі для прогнозування запасних частин до повітряних суден.	111
2.5.1. Моделі керування запасними частинами, орієнтовані на надійність	113
Висновки до розділу 2	117

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ ЛЬОТНОЇ ПРИДАТНОСТІ.....	119
3.1. Прогностичне технічне обслуговування повітряних суден.....	119
3.2. Аналіз надійності компонентів, підсистем, систем та конструкцій повітряних суден на великому наборі даних	121
3.3. Аналіз надійності компонентів, підсистем, систем та конструкцій повітряних суден на невеликому наборі даних	128
3.4. Оптимальна регресійна модель для прогнозування моментів часу відмови системи або компонента повітряних суден.....	132
3.5. Підхід до оптимізації інтервалу технічного обслуговування компонентів, підсистем, систем або конструкцій повітряних суден.....	136
3.6. Підхід до планування запасів запасних частин під час експлуатації повітряних суден.....	139
Висновки до розділу 3	144
РОЗДІЛ 4. МЕТОДОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПРИПИСНОГО ПАРКУ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН НІГЕРІЇ ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ ЇХ ЛЬОТНОЇ ПРИДАТНОСТІ	147
4.1. Обґрунтування запропонованої методики оптимізації процесів технічного обслуговування повітряних суден для підтримки льотної придатності.....	147
4.2. Методика оптимізації процесів технічного обслуговування повітряних суден для підтримки льотної придатності.....	150
4.2.1. Крок 1: Статистичне моделювання визначення параметрів надійності	151
4.2.2. Крок 2: Статистичне моделювання для прогнозування льотної години, протягом якої відбудеться відмова компонента, підсистеми, системи або конструкції повітряних суден	152
4.2.3. Крок 3: Оцінка оптимального інтервалу завдань технічного обслуговування, використовуючи середні експлуатаційні витрати як міри ефективності	152
4.2.4. Крок 4: Прогноз запасів запасних частин для експлуатації повітряних суден	153
4.3. Методика розрахунку показників надійності систем та агрегатів повітряних суден.....	154
4.4. Метод прогнозування льотної години, у якому відбудеться відмова компонента чи системи повітряних суден	156

4.5. Оцінка оптимального інтервалу виконання робіт з технічного обслуговування повітряного судна	157
4.6 Оптимізований підхід до прогнозування запасів запасних частин під час експлуатації повітряних суден	159
4.7 Переваги запропонованої чотирьохетапної методики оптимізації процесів технічного обслуговування повітряних суден для підтримання льотної придатності	160
Висновки до розділу 4	162
ВИСНОВКИ	164
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	168
ДОДАТОК 1	187
ДОДАТОК 2	191

СКОРОЧЕННЯ

АТА	Асоціація повітряного транспорту
АІВ	Бюро з розслідування авіаційних подій
ЧМВ	Час між відмовами
ПС	Повітряних суден
ПСЗ	ПС на землі
ДПТО	Документ планування ТО
ЖЦ	Життєвого циклу
ЗМЕТОПС	Завдання маршрутизації експлуатаційного ТО ПС
ЗМЕТОПСЗР	Завдання маршрутизації експлуатаційного ТО ПС на основі затримки рейсу
ЗМТОПС	Завдання маршрутизації ТО ПС
ЗУКЗР	Завдання упаковки контейнерів змінного розміру
ШІ	Штучний інтелект
ІВ	Інтенсивність відмов
ІКАО	Міжнародна організація цивільної авіації
IATA	Міжнародна асоціація повітряного транспорту
КПСКПС	Компоненти, підсистеми, системи і конструкції ПС
КТО	Коригуюче ТО
КПЕ	Ключові показники ефективності
ЛП	Льотної придатності
ЛПо	Лінії польоту
МОЕОТОПС	Модель оцінки ефективності операцій ТО ПС
МН	Машинне навчання
MEL	Список мінімального обладнання
MCS	Метод Моделювання Монте-Карло
MRBR	Звіт Ради з перевірки технічного обслуговування
MSG	Керівна група з технічного обслуговування
НВ	Напрацювання на відмову
НДРБ	Надійність, доступність, ремонт придатність та безпека
НВ	Несправностей не виявлено
NAMA	Нігерійське агентство з управління повітряним простором
NCAA	Управління цивільної авіації Нігерії
NigCARS	Правила цивільної авіації Нігерії
ОЕМ	Виробник оригінального устаткування
ОС	Операційна система
ЗТКВ	Залишковий термін корисного використання
ОЧЗУКЗР	Обмежене по часу завдання упаковки контейнерів змінного розміру
ПТОПС	Планування ТО ПС
NigCARs	Правила цивільної авіації Нігерії
ПрТО	Прогностичне ТО

ПУТС	Прогностика та управління технічні станом
ПТО	Превентивне ТО
ППР	Підтримки прийняття рішень
ПТОПА	План ТО парку авіакомпаній
ПРЗ	Проблема розподілу завдань
ПКН	Програми контролю надійності
ЩЙ	Щільність ймовірності
СОЕЗК	Список обмежень експлуатації та зберігання компонентів
СВ	Стисненого відпалення
SARPS	Стандарти та рекомендована практика
ТОРКР	ТО, ремонт та капітальний ремонт
ТО	Технічного обслуговування
ТОС	ТО за станом
ТООН	ТО орієнтоване на надійність
ФРЙ	Функція розподілу ймовірностей
ЗНВ	Зменшення найгіршої відповідності
FAAN	Федеральне управління аеропортів Нігерії

ВСТУП

Актуальність теми дисертації. Етап експлуатації життєвого циклу літака є найбільш дороговартісним. Це коштує у 10-20 разів більше, ніж етап проєктування та виробництва. Наприклад, у Нігерії, незважаючи на те, що внутрішні та міжнародні пасажирські перевезення значно зросли, щорічні темпи зростання після пандемії COVID-19 склали 43,41% та 57,61% відповідно [1], витрати на технічне обслуговування літаків, як і раніше, значно вищі, ніж у середньому по світу. Експлуатанти ПС витрачають 75% від прогнозованих щорічних витрат у один мільярд доларів у Західній Африці [2]. Це виправдовує необхідність відійти від традиційних дій з технічного обслуговування, які мають коригуючий чи превентивний характер.

Завдання коригуючого ТО (КТО) пов'язані зі стратегіями ТО повністю, тоді як роботи з Превентивного ТО (ПТО) виконуються як частина фіксованого інтервалу заміни, ремонту або відновлення. Вони передбачають роботи, що виконуються відповідно до стратегії відновлення/ремонту з фіксованим інтервалом і проводяться на основі графіка часу або машинного режиму, який виявляє, запобігає або пом'якшує деградацію [3]. На жаль, цим традиційним стратегіям ТО ПС не вистачає прогнозуючої здатності, і тому часто ТО виконується занадто рано, тобто до закінчення терміну служби машини, або занадто пізно, тобто після дороговартісної відмови [4]. Тому авіаційна промисловість має потребу у реалістичності математичних моделей та формулюванні завдань оптимізації. Надійність системи, процеси ТО та вартість необхідно враховувати на етапі проєктування життєвого циклу ПС [5].

Недавні дослідження показують, що алгоритми статистичної обробки даних можуть бути використані для підвищення ефективності польотів ПС з урахуванням діагностичних змінних та параметрів надійності у якості вихідних даних [6-11]. Ці алгоритми можуть бути розроблені з використанням статистичних даних, отриманих на етапі експлуатації життєвого циклу ПС, які генерують безліч даних у реальному часі, що збираються, передаються та обробляються за допомогою 70 міль дротів та

понад 18 мільйонів рядків коду [12-13]. Отримані алгоритми можуть оцінювати час можливої відмови з метою його прогнозування на основі правильних та своєчасних оперативних дій. До того ж, підхід прогностичного ТО (ПрТО) на основі даних, заснованих на методах Четвертої промислової революції, призведе до зниження витрат на ТО, дозволить уникнути непотрібних дій з управління проєктами та зменшить кількість непередбачених збоїв. Комбінація ПТО та ПрТО призводить до скорочення незапланованих простоїв на 18,5% і зменшення кількості дефектів на 87,3%, що дозволяє більше покладатися на прогностичне ТО ніж на превентивне [3].

Мета та завдання дослідження. Основною метою цього дослідження є економічність та підвищення ефективності експлуатації ПС з точки зору ТО з використанням досвіду у Нігерії, як доказу концепції.

Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання:

- дослідити існуючу стратегію ТО ПС, використовуючи приклад Нігерії;
- розробити математичні моделі, які можна впровадити для покращення стратегій ТО орієнтованого на надійність (ТООН) та ТО за технічним станом (ТОС);
- розробити математичні моделі для визначення оптимальної години польоту для ПС;
- розробити математичні моделі для визначення оптимального інтервалу виконання завдань ТО ПС;
- розробка математичних моделей для точного прогнозу номенклатури та кількості запасних частин;
- підвищити коефіцієнт готовності компонентів та систем ПС, скоротити час простою ПС та підвищити рівень цільового ТО;
- розробити структуру технічної експлуатації, яка може стати основою для оптимізації ТО, починаючи з етапу проєктування життєвого циклу ПС.

Об'єкт дослідження: процеси, системи та компоненти ТО ПС.

Предмет дослідження: дані для оптимізації процесів ТО ПС.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовуються методи математичної теорії надійності, теорії ймовірностей та статистики, машинного навчання, прогнозу аналітики, чисельного аналізу та статистичного імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше розроблено моделі статистичного моделювання для аналізу надійності, які можна застосовувати як для великих, так для малих наборів даних про ПС. Отримані показники надійності можуть покращити структуру ТООН та ТОС.

2. Вперше розроблено сегментовані регресійні моделі для прогнозування льотної години, коли компонент, підсистема або система ПС відмовить. Це необхідно, оскільки неправильні прогнози ТО та стратегії конфігурації можуть призвести до несвоєчасної підтримки, затримок рейсів або перебування ПС на землі (ПСЗ).

3. Вперше визначено оптимальний інтервал виконання завдань по ТО ПС з використанням середніх експлуатаційних витрат як міри ефективності. Модель була розроблена на основі щільності ймовірності (ЩЙ), вартості КТО ПС та вартості ПрТО ПС. Існуючі оптимальні моделі завдань ТО використовують рівень витрат на ТО як критерій оптимізації, але можуть ігнорувати показники надійності. Зниження рівня витрат на ТО системи не означає, що показники надійності системи оптимізуються з огляду витрат, особливо багатокomпонентних систем. Мінімальні витрати на ТО іноді пов'язані із зниженням показників надійності системи. Це один із результатів наявності різних компонентів у системі, які можуть мати різну вартість ТО та різну важливість для системи. Це стало основою розробки даної моделі.

4. Отримала подальший розвиток розроблена модель, яка враховує історичну тенденцію відмов компонентів та параметри надійності для прогнозування запасів запасних частин. Це особливо важливо для операцій у таких країнах, як Нігерія, оскільки кількість виробників оригінального обладнання (ОЕМ) та складів запасних частин обмежена, крім того, характеристики запасних частин з часом погіршуються в

режимах «гарячого», «теплого» і навіть «холодного» резерву. Вони також можуть раптово вийти з ладу через зовнішні чинники та деградацію в результаті недосконалого зберігання (збій сховища).

5. Отримала подальший розвиток розроблена методологія, яка поєднує параметри надійності, прогнозування відмов, вартість і прогноз запасів запасних частин, щоб оптимізувати процеси ТО ПС для підтримки льотної придатності. Це особливо важливо для реалізації стратегій, запропонованих у цьому дослідженні, як єдиної основи замість існуючих автономних моделей, які призводять до тривалого планування та втрат, крім того, запропоновані моделі та алгоритми були перевірені з використанням експлуатаційних даних ПС і можуть бути масштабовані для кількох систем без необхідності спеціальних знань в предметній галузі. Цей підхід, що базується на аналізі статистичних даних, є більш ефективною альтернативою моделюванню на основі фізичних процесів. Отримані статистичні дані доцільно використовувати під час розробки методів прогнозування технічного стану ПС.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів дослідження підтвержені достатнім та належним застосуванням математичного апарату теорії надійності, теорії ймовірностей та статистики, машинного навчання та передиктивної аналітики. Окрім того, отримано узгодженість теоретичних результатів із даними експлуатації ПС у Нігерії, а також результатами статистичного імітаційного моделювання.

Практична значимість одержаних результатів. Дана дисертація забезпечує науково-технічну основу для подальшої оптимізації процесів ТО ПС та підвищення ефективності експлуатації ПС. Досягнуто наступних практичних результатів дослідження:

- Метод аналізу надійності, що ґрунтується на експоненційному розподілі для набору даних > 35 , дозволяє експлуатантам ПС аналізувати компоненти даних, підсистеми, системи та структури. Оператор може порівняти надійність всього парку,

щоб зрозуміти вартість перерв у розкладі, проаналізувати рішення та розставити пріоритети сервісних бюлетенів залежно від впливу на парк.

– Метод аналізу надійності для набору даних < 35 – це важливо, бо невеликі набори даних дають великі довірчі інтервали при великому загальному нальоті, що передбачає нижчу статистичну надійність. Ключовим недоліком використання невеликого набору даних є відсутність статистичної стабільності. Запропонована методика заснована на рівнянні Казакавічуса: інтенсивність відмов (ІВ) визначається з використанням ймовірності безвідмовної роботи.

– Метод прогнозування льотної години, при якому відбудеться відмова компонента, підсистеми, системи та конструкції ПС. Це важливо, тому що неправильні прогнози ТО та стратегії конфігурації можуть призвести до несвоєчасної підтримки, затримок рейсів або простоїв.

– Метод визначення оптимального інтервалу ТО ПС з використанням середніх експлуатаційних витрат у якості міри ефективності. Пропонована модель заснована на моделі Ерланга і враховує вартість ТО та надійність. Це дає змогу визначити кількісну оцінку витрат на КТО та ПТО разом з перевагами ТО, щоб отримати оптимальний баланс між ними.

– Метод прогнозування запасів авіаційних запчастин для неремонтопридатних виробів та експоненційно розподіленого ЧМВ. Кількість запасних частин розраховується відповідно з використанням необхідної ймовірності безвідмовної роботи та оцінного значення інтенсивності відмов, отриманого при аналізі реальних статистичних даних. Це важливо, тому що надлишкові запаси запасних частин призводять до високих витрат на утримання та перешкоджають руху коштів. Навпаки, брак запасних частин може призвести до дороговартісних затримок або скасування рейсів, що негативно впливає на продуктивність авіакомпанії.

– Коротка, проста і розширювана чотириступінчаста методологія, що поєднує всі запропоновані методи складних процесів технічного обслуговування повітряних суден. Ця методологія розглядає теоретичну основу для технічного

обслуговування літаків, орієнтуючись на продуктивність, за якої враховуються експлуатаційні характеристики та стан компоненти, підсистеми, системи та конструкції ПС.

Особистий внесок кандидата: Основні результати дисертаційного дослідження було отримано автором самостійно. Як видно зі списку авторських публікацій в анотації, дослідження [7] проводилися автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автор дисертації вніс такий особистий внесок: [1] — розробка та імітаційне моделювання стохастичних математичних моделей з використанням діагностичних змінних та параметрів надійності для визначення оптимального інтервалу виконання завдань технічного обслуговування систем та конструкцій літальних апаратів; [8, 9] — розробка статистично модельованої експоненційної моделі для аналізу надійності компонентів, систем та конструкцій літальних апаратів з використанням даних про повсякденну експлуатацію літальних апаратів; [4] — аналіз різних методів навчання експертної системи на основі ймовірнісного підходу для комп'ютерних систем з використанням штучного інтелекту для імітації прийняття рішень людиною та екпертом задля реалізації стратегій керованого та превентивного технічного обслуговування повітряних суден; [5] — розробка методики планування запасів запасних частин під час експлуатації ЛА на основі статистичних даних про напрацювання на відмову компонентів ЛА; [6] — розробка та синтез алгоритмів і моделей статистичної обробки даних для підвищення ефективності технічного обслуговування літальних апаратів; [2] — розробка статистично значущого алгоритму та моделі аналізу надійності авіаційних систем при малому наборі даних, характерному для маломасштабних операцій; [3] — розробка нової основи підтримки програмного забезпечення для моделювання та прогнозування відмов і несправностей компонентів, підсистем, систем і структур повітряних суден.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Результати досліджень обговорювалися на 12-ти міжнародних конгресах, симпозіумах та конференціях: 1) 2nd International Conference on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information

Networks (Kyiv-Lviv, Ukraine, 2020); 2) 2021 International Symposium on Network Security and Communications (Kyiv, Ukraine); 3) Current Security Problems in Transport, Energy and Infrastructure Conference (Kherson, Ukraine, 2021); 4) 2021 International Scientific-Practical Conference on Problems of Transportation Organization and Air Transport Management (Kyiv, Ukraine); 5) International Symposium on Sustainable Aviation (Bangkok, Thailand, 2021); 6) 1st International Conference for Condition-based Maintenance in Aerospace (Delft, Netherlands, 2022); 7) 25th Air Transport Research Society World Conference (Antwerp, Belgium, 2022); 8) 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Stockholm, Sweden, 2022); 9) 10th World Congress "Aviation in XXI-st Century - Safety in aviation and space technology" (Kyiv, Ukraine, 2022); 10) IEEE 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (Ruzomberok, Slovakia, 2022); 11) Ontario Aircraft Maintenance Conference; The Future of Aircraft Maintenance – Performance, Professionalism and Pride (Toronto, Canada, 2022). 12) International Workshop on Advances in Civil Aviation System Development (Kyiv, Ukraine, 2023).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано у 17-ти виданнях, у тому числі у матеріалах 8-ми міжнародних конгресів, симпозіумів та конференцій. Усі публікації індексуються у міжнародних наукометричних базах даних, зокрема, 6 у базі даних Scopus.

Структура та зміст дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 197 сторінок, з них 51 рисунки, 18 таблиць, 2 додатки, список літературних джерел налічує 174 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН У НІГЕРІЇ І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН У СВІТІ

1.1. Огляд технічного обслуговування повітряних суден у Нігерії

У Нігерії, незважаючи на те, що кількість внутрішніх та міжнародних пасажирських перевезень значно зросла, щорічні темпи зростання після пандемії COVID-19 склали 43,41% та 57,61% відповідно [1]; витрати на ТО ПС як і раніше значно вищі, ніж у середньому по світу, при цьому оператори ПС витрачають 75% від прогнозованих щорічних витрат в один мільярд доларів у Західній Африці [2]. Для забезпечення безпеки та надійності польотів ТО ПС регулюється авіаційною владою. Управління цивільної авіації Нігерії (NSAA) являється єдиним органом регулювання авіації у Нігерії [14]. Іншими органами в авіаційному секторі є: Федеральне управління аеропортів Нігерії (FAAN), Бюро з розслідування авіаційних подій (AIB) та Нігерійське агентство з управління повітряним простором (NAMA). Вони були створені відповідно до правил безпеки Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО).

У частині 5 Правил цивільної авіації Нігерії (NigCARs) представлені нормативні вимоги для підтримання льотної придатності (ЛП) ПС, що, як передбачається, виконуватимуть польоти в Нігерії, відповідно до Стандартів та рекомендованої практики (SARPS) в ІКАО: додаток 6 (експлуатація ПС) та 8 (ЛП ПС) [15]. ПС вважається придатним до польотів, якщо воно відповідає своїй конструкції і перебуває у стані безпечного польоту. Відповідність типової конструкції визначає початкову ЛП, а стан безпечного польоту визначає підтримку ЛП. Початкова ЛП визначає придатність ПС або нової деталі, що придатна для введення в експлуатацію [16]. Додаток 8 ІКАО визначає ЛП як сукупність процесів, за допомогою яких ПС, двигун, повітряний гвинт або складова частина відповідають застосовним вимогам ЛП і

залишаються у стані безпечної експлуатації протягом усього терміну служби [16, 17]. Згідно з Частиною М ІКАО, яка містить серед іншого, мінімальні вимоги до ТО та ЛП, підтримку ЛП можна визначити як усі процеси, які гарантують, що у будь-який момент терміну служби ПС воно відповідає вимогам ЛП та перебуває у стані безпечному для здійснення польотів. Частина М є обов'язковою експлуатаційною ліцензією для експлуатантів ПС. Вона охоплює мінімальні вимоги для:

- ТО на основі офіційно затвердженої програми ТО. Програма ТО - це документ, в якому описуються заплановані завдання ТО, їх частота та пов'язані з ними процедури;
- усунення будь-яких пошкоджень, які можуть вплинути на безпеку польоту, на доповнення до заміни та ремонту відповідно до затверджених документів та стандартів ТО;
- оцінку ефективності програми ТО (моніторинг надійності);
- відповідність Директивам з ЛП та іншим офіційно виданим заходам [18];
- Експлуатант несе відповідальність за підтримку ЛП ПС та гарантує, що політ не виконуватиметься, якщо:
- ПС підтримується в ЛП;
- будь-які робочі системи аварійного обладнання правильно встановлені та справні або чітко позначені як непридатні до експлуатації.
- сертифікат перевірки ЛП залишається чинним;
- все ТО ПС виконується відповідно до затвердженої програми ТО [18].

ТО ПС є ключовим аспектом ЛП. Програма підтримки ЛП складається з огляду ПС, позапланового та планового ТО, програми перевірки конструкції або капітального ремонту планера, ремонту та капітального ремонту гвинта та допоміжної силової установки [19]. ТО ПС включає дії та аналіз, які виконуються для підвищення або підтримки надійності і ЛП систем, підсистем і компонентів ПС протягом усього життєвого циклу ПС. Дії, які можуть бути виконані у зв'язку з ТО ПС, включають розробку програм ТО ПС на основі рекомендацій виробника, моніторинг та виконання

директив з ЛГП, виданих NCAA. NCAA видає сертифікат ЛП (C of A) на підставі того, що ПС відповідає конструктивним аспектам відповідних вимог ЛП. Сертифікат ЛП стає недійсним, якщо ПС не підтримується у льотному стані [14-18].

1.1.1. Процеси технічного обслуговування повітряних суден у Нігерії

У Нігерії експлуатуються різні типи ПС, а саме: B777-200/300, B737-200/300/400/500/700/800, B747-400, A340, ERJ 135/145/190-400, ATR 42/72 та ін. Гелікоптерний сектор робить свій внесок в економіку, надаючи пошуково-рятувальні послуги та транспортування для морської нафтогазової промисловості. Моделі гелікоптерів, що використовуються в Нігерії, включають, не зважаючи на все інше, S76C/D, S92, AW139 та ін. ТО цих ПС надзвичайно важливе для авіаційних перевезень, оскільки воно впливає на надійність авіаційної техніки та безпеку пасажирів та вантажів.

Відповідно до стандартів Європейського комітету зі стандартизації EN 13306, технічне обслуговування може бути визначене як поєднання технічних, управлінських та адміністративних дій протягом життєвого циклу об'єкта з метою його збереження або відновлення до стану, в якому він може виконувати необхідні функції [20]. Технічне обслуговування повітряних суден — це загальний термін для перевірок ПС, які оцінюють ПС та стан їх складових частин та систем. Це включає короткі передпольотні перевірки або детальні перевірки компонентів і систем ПС. Ефективне ТО ПС спрямоване на забезпечення необхідних рівнів безпеки та надійності в бою, а у разі відмови ТО відновлює рівні безпеки та надійності до необхідних стандартів [21-24]. Дії по ТО компонентів і систем ПС поділяються на: коригуюче ТО (КТО), превентивне ТО (ПТО) і прогностичне ТО (ПрТО). До традиційних методів ТО ПС належать КТО і ПТО, в той час, як ПрТО є сучасним підходом, заснованим на принципах машинного навчання та прогностичного моніторингу стану (рис. 1.1). КТО охоплює всі дії щодо ремонту незапланованих несправностей та відмов. Дії ПТО

зменшують кількість незапланованих ремонтів. Воно складається з періодичних дій щодо ТО, щоб уникнути відмов та виходу з ладу компонентів та систем. ПрТО використовує деякі параметри, щоб припустити, коли можуть статися відмови, тим самим зменшуючи кількість незапланованих поломок, надаючи персоналу надійні варіанти планування ПТО [25-27].



Рис. 1.1. Категорії технічного обслуговування повітряних суден

В авіації дії з ПТО відносяться до планового ТО і можуть бути згруповані в дії за заздалегідь визначеним ТО та ТО за станом (ТОС). Зумовлені дії додатково поділяються на дії, засновані на часі (календарний час, льотні години) та дії, що ґрунтуються на використанні ПС (цикл зльоту та посадки). ТОС - це стратегія ТО, згідно якій ТО виконується на основі фактичного стану і тенденції компонента без шкоди для стандартів регулюючого органу. Мета ТОС – запобігти відмові і зберегти

стан системи за допомогою інтелектуальної технології, яка постійно відстежує стан компонентів. Елементами дій з ПТО є перевірка, обслуговування, калібрування, випробування, регулювання та встановлення. Дії з КТО називають позаплановим ТО. Вони поділяються на негайне та відстрочене КТО. Його елементами є безаварійний, аварійно-рятувальний, відновлювальний, поточний та капітальний ремонт [19, 26, 28-29].

Згідно частини 9 NigCARs експлуатанти зобов'язані надавати програму ТО для кожного свого ПС [30]. Програма ТО включає планові завдання ТО та періодичність, яку вимагає звіт Ради з перевірки технічного обслуговування (MRBR) та інші обов'язкові вимоги, доповнені завданнями ТО, що розглядаються з точки зору їх економічної ефективності, підвищення надійності, а також комфорту пасажирів та зовнішнього вигляду ПС. MRBR – це інструкція, що визначає мінімальні вимоги до ПС. Це загально визнана відправна точка для створення програми ТО та повсюдно визнана авіаційною владою як ключовий базовий документ щодо ТО ПС. Звіт приведено у відповідність зі світовим парком ПС, але в той же час розглядає різні конфігурації ПС, а також індивідуальні вимоги та масштаби використання [31-33]. Рамки програми ТО ПС, зазвичай, заздалегідь визначаються виробником, але експлуатанти повинні адаптувати свою програму до відповідної конфігурації ПС та індивідуальних вимог свого парку ПС. З цієї причини програма ТО різних типів ПС на практиці різняться, але навіть з однаковими типами ПС деталі програми ТО можуть змінюватись в залежності від авіакомпанії, від галузі експлуатації та використання або від індивідуального досвіду експлуатації. Крім цього, програма ТО також відображає філософію ТО операторів (наприклад, технічне обслуговування, пов'язане з блокуванням або фазою з акцентом на запобігання чи максимальне використання допустимих меж) [17-18, 31-32].

Метою програми ТО є надання обслуговуючому персоналу інструкцій з виконання правил, процедур, та/або обмежень, що стосуються безпечного виконання обов'язків та відповідальності згідно галузі та умов, де проводиться ТО ПС, та

відображати потреби в ТО ПС яких необхідно дотримуватися, щоб забезпечити безперервну безпечну роботу.

TASK REFERENCE (Source Document)	ZONE	DESCRIPTION	THRESHOLD INTERVAL SAMPLE	JOB PROCEDURE	M	M.H	EFFECTIVITY
335000-CHK-10000-1 (MRBR : 335000-03)	200	EMERGENCY LIGHTING VISUAL CHECK OF EMERGENCY EXIT SIGNS AND ESCAPE PATH MARKING FOR CORRECT LUMINESCENCE	I: 2 C	JIC: 335000-CHK-10000 MP: A-33-5X-XX-00ZZZ-360Z-A	1	0,50	ALL
335000-OPT-10000-1 (MRBR : 335000-01)	210	EMERGENCY LIGHTING OPERATIONAL TEST OF EMERGENCY LIGHTS IN AUTOMATIC AND MANUAL MODE	I: 2 A	JIC: 335000-OPT-10000 MP: A-33-5X-XX-00ZZZ-320Z-A	1	0,10	ALL
335121-RAI-10000-1 (MRBR : 335000-02)	200	EMERGENCY LIGHTING REMOVAL OF EMERGENCY LIGHTING BATTERIES FOR CAPACITY CHECK (CFR) Acc :256HW. ***END***	I: C	CFR: CFR CMM: 1. 335122 CMM: 2. 335006 CMM: 3. 335007 CMM: 4. 335126 JIC: 335121-RAI-10010 MP: A-33-51-20-A0ZZZ-520Z-A MP: A-33-51-20-A0ZZZ-720Z-A	1 a	0,50 0,06	ALL

SYSTEMS AND COMPONENTS PROGRAM : EMERGENCY LIGHTING

ISSUE: 5, REV.0,JAN 10, 2021

SECTION : 5-33/5

PAGE : 120

Рис. 1.2. Приклад програми ТО експлуатантів ПС у Нігерії [31]

Програма ТО є частиною затвердженої системи технічного обслуговування. Іншими частинами системи ТО є: список обмежень з експлуатації та зберігання компонентів (СОЕЗК); додаткове обслуговування шляхом виконання вимог сервісних бюлетенів та вимог повноважного органу щодо льотної придатності. Програма ТО повинна контролюватись кваліфікованими інженерами щодо відповідності не рідше одного разу на рік. [17-18, 31-32]. Приклад програми ТО авіакомпанії Нігерії представлено на рис. 1.2.

Перші випуски, а також перегляди програми ТО повинні бути схвалені NCAA і засновані на відповідній технічній документації (включаючи MRBR): документ планування ТО (ДПТО), рекомендації власника сертифікату типу ПС, посібник з ТО

двигуна та посібник з ТО компонентів. Виконання вимог, викладених у цих документах, є обов'язковим. Включно з директивами з льотної придатності та інших вимог з NSAA, бюлетенів з ТО, досвіду експлуатації та галузевих рекомендацій, аналізу надійності на основі інженерних висновків, звітів пілотів та змін у процедурах компанії, що впливають на програму ТО [31-32].

1.1.2. Існуючі принципи технічного обслуговування

На ранніх етапах історії авіації технічне обслуговування літаків виконувалося з урахуванням досвіду механіків. Початок ери реактивних двигунів і створення органів виявлення безпеки польотів започаткували шляхи до зміни парадигми, в результаті чого інженери розробили структуроване ТО. ТО ПС ґрунтувалося на принципах превентивної, але дорогої заміни або відновлення деталей та систем [19]. Заходи з обслуговування ґрунтувалися на ідеї, що вони тим ефективніші, чим більше їх проводять «багато допомагає багатьом». У 60-х роках стало очевидним, що цього принципу недостатньо, оскільки в графіках ТО не враховувався практичний досвід. Таким чином, уперше в контексті розробки B747 стандартом стала систематично запланована програма ТО, яка враховувала стан ПС або його складових частин. Ця документація була підготовлена Керівною групою з ТО (MSG) Міжнародної асоціації повітряного транспорту (ATA) та називалася MSG [19, 34-35].

MSG зосередилась на проведенні логічного процесу прийняття рішень для рентабельних та ефективних процедур, прийнятних для виробників, операторів та регулюючих органів. Програма MSG передбачає виникнення дефектів і покладається на аналіз інформації про такі дефекти для визначення необхідних дій. MSG перетворилася на MSG-2, яка була розроблена в документі, випущеному ATA у 70-х роках. У програмах MSG і MSG-2 використовується висхідний підхід, у той час як MSG-3 слідує низхідному підходу і була побудована на основі MSG-2. При низхідному підході основна увага приділяється наслідкам відмови компонентів та впливу на

роботу ПС. Застосування техобслуговування, орієнтованого на надійність (RCM), також відомого як MSG-2, було введено в авіаційну промисловість у 1974 році United Airlines і Міністерством оборони США. Воно було успішно реалізовано в морській нафтовій промисловості та ядерній енергетиці. Експлуатанти ПС у Нігерії зазвичай слідуєть філософії ТО MSG-2 або MSG-3. Докладніше це буде розглянуто в інших розділах [34-35].

1.2. Сучасні моделі оптимізації технічного обслуговування повітряних суден

За даними Міжнародної асоціації повітряного транспорту, глобальні витрати на ТО, ремонт та капітальний ремонт ПС у 2018 році склали 69 мільярдів доларів США з річним темпом зростання 4,1%, тому експлуатанти ПС постійно шукають способи скоротити ці витрати без шкоди для безпеки польотів та рівня надійності [36]. Оптимізація ТО ПС зазвичай є багатоцільовим рішенням, спрямованим на максимізацію доходів за рахунок підтримки високої доступності при одночасній мінімізації витрат [37]. Щоб оптимізувати ТО ПС багато дослідників запропонували і протестували ряд методів, заснованих на аспектах процесів ТО ПС, таких як планування, складання графіків, розподіл завдань ТО, маршрут ТО ПС, інвентар запасних частин, персонал і управління навичками. В інших методах використовуються дані прогнозування ПС та управління його технічним станом, а також моделі надійності. У наступних підрозділах пояснюються ці аспекти ТО ПС, методи оптимізації, запропоновані дослідниками, а також переваги та обмеження їх досліджень.

1.2.1. Моделі планування технічного обслуговування повітряних суден

Належне, надійне та гнучке планування може безпосередньо сприяти ефективності ТО [38]. Однак на практиці, під час експлуатації ПС, управляється

вручну і на щоденній основі, що призводить до реактивного підходу до розподілу льотних годин ПС, при якому можуть легко виникнути проблеми, пов'язані з доступністю, стійкістю та зручністю обслуговування. [39]. З іншого боку, існуючі методи Планування ТО ПС (ПТОПС) ефективно описують роботи з ТО щодо того, де у ПС є впевненість, що вони виконуватимуться, коли очікується втручання під час ТО чи які технічні навички необхідні [40]. В основному це пов'язано з різними обмеженнями, такими як ресурси для ТО, експлуатаційний попит, розташування, обладнання тощо. [39].

Планові завдання з ТО ПС виконуються через задані проміжки часу, а тому робота зазвичай є детермінованою. З іншого боку, незаплановані завдання виникають в результаті виконання запланованих дій і залежать від імовірнісного характеру відмов. Тому класифікуються як стохастичні за своєю суттю та характеризуються лише після закінчення огляду літака. Це призводить до невизначеності щодо робіт з ТО та проблем з пропускнуою спроможністю, при яких запланованих ресурсів недостатньо або іншим чином надмірно для виконання робіт з ТО [40]. Інструмент підтримки прийняття рішень (рис. 1.3) може обробляти стохастичний характер виконання завдання ТО та створюється з використанням комбінації аналізу надійності, аналізу витрат, генерації альтернативних рішень та ранжування. Залежно від налаштувань параметрів ця структура може допомогти у плануванні оперативного ТО та потенційно знизити витрати на ТО на 45–90%. Однак цей інструмент не враховує доступність робочої сили та відстрочення виконання завдань, включаючи можливість розширення горизонту планування після наступної перевірки ТО. Аналізуючи дані про хід робіт у режимі реального часу, цю структуру підтримки прийняття рішень можна використовувати для моніторингу ходу планового ТО ПС, тим самим вивчаючи оптимальне планування завдань у разі затримок або випередження ТО [38].

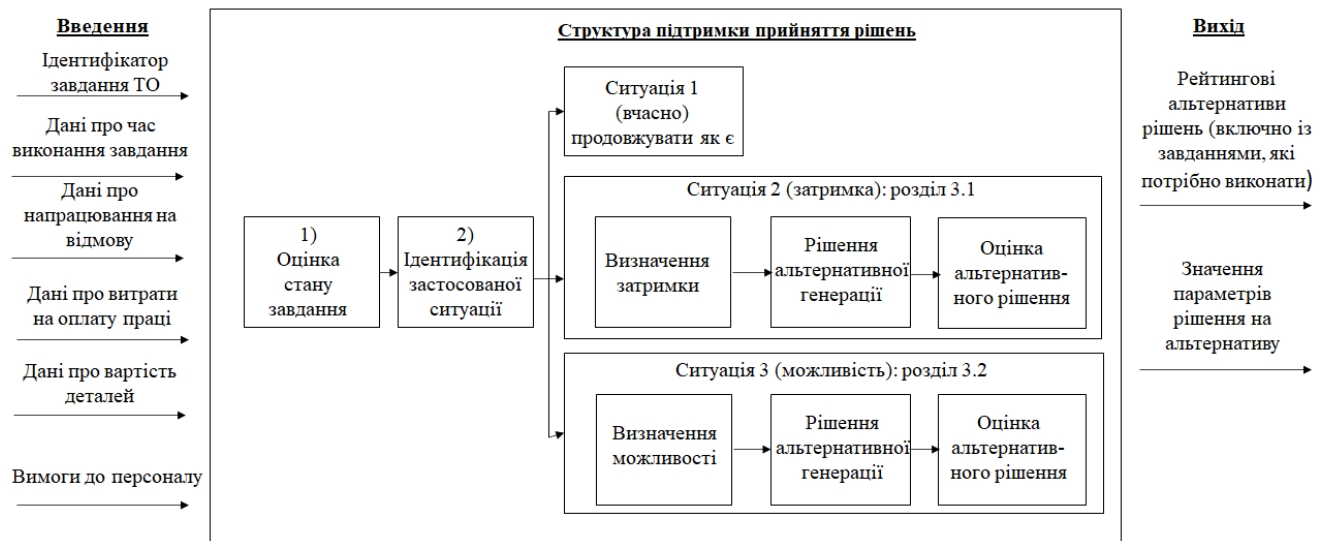


Рис. 1.3. Структура підтримки прийняття рішень щодо планування ТО [38]

Традиційно оператори виконують ТО в ангарах для власного парку, але із швидким зростанням попиту на повітряні перевезення оператори все частіше передають ТО на аутсорсинг сервісним компаніям. Цим компаніям при отриманні замовлення необхідно визначити графіки ТО, траєкторію руху ПС, розподіл стоянкових місць та розподіл персоналу, що може бути інтегровано у змішано-цілочисленну модель лінійного програмування. Ця модель формулює геометричні обмеження, а обмеження щодо призначення робочої сили пропонуються для інтеграції та характеристики взаємозалежних відносин прийняття рішень. Однак вона не враховує схеми прибуття літаків, задля уникнення перенавантаження запитів на ТО [41].

Враховуючи, що значна частина робіт з ТО носить стохастичний характер, метод аналізу даних, названий тривимірним аналізом даних з технічного обслуговування, дозволяє загалом охарактеризувати очікувані роботи з технічного обслуговування на основі просторово-часової системи координат (рис. 1.4). В ній показники визначаються

за історичними даними. У контексті цієї методології простір (j) належить до робочої зони літака, де виконується ТО, час (k) належить до фази проектних робіт, коли виконується ТО, а навичка (i) належить до типу технічних фахівців, необхідних для технічного обслуговування, що здійснюється [40].

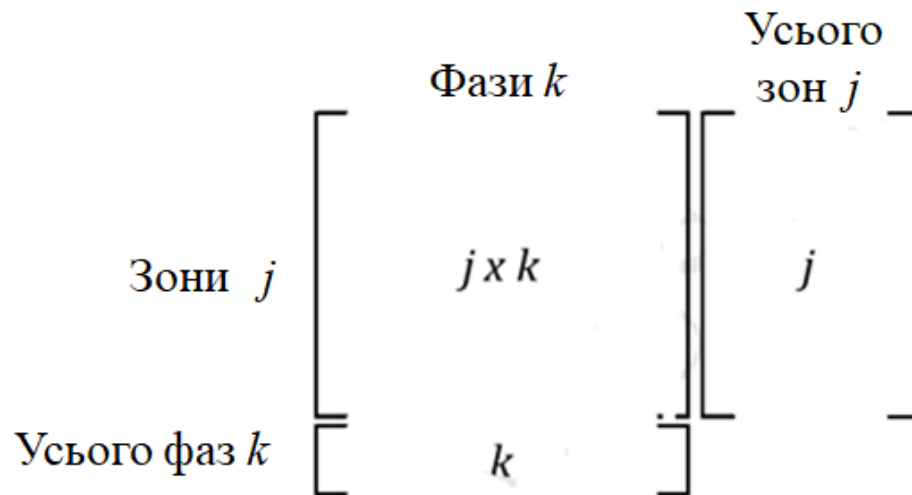


Рис 1.4. Матриця для характеристики кваліфікації і роботи з ТО [40]

Повітряне судно вважається доступним, якщо воно не знаходиться на ТО та має достатню кількість льотних годин для призначення на завдання. Доступність ПС також можна розглядати з точки зору кількості льотного годин, що залишається до обов'язкового ТО [42]. В [43] авторами проаналізовано процес ПТО ПС і розроблено оптимізаційну модель ТО ПС, засновану на цільовій функції мінімізації витрат. Запропонована ними модель, яку було вирішено за допомогою генетичного алгоритму, не враховувала особливих обмежень старого літака та часу закриття станцій ТО, але вони припускали, що план польоту відомий і будь-яке ПС може експлуатуватися в аеропорту.

Для довгострокового планування ТО та польотів автори в [42] створили сценарії, натхненні парком повітряних сил Франції, і сформулювали точну модель змішаного цілісного програмування для вирішення проблеми в цих сценаріях. Хоча дослідження показало, що продуктивність математичної моделі стійка з точки зору збільшення розміру парку, розміру горизонту планування та польотних завдань, додаткове споживання поза польотним завданням виявилось складним. З іншого боку, виграш у часі вирішення було отримано за рахунок розробки евристики побудови, яка забезпечувала початкові рішення для випадків, коли модель не могла легко отримати ціле рішення.

В [44] система підтримки прийняття рішень (ППР) автоматизує процес ПТОПС і в одному рішенні забезпечує оптимізацію планування перевірок ТО, оптимальний розподіл завдань та планування змін. Порівняно з існуючою практикою авіакомпаній у Європі, ППР може покращити використання ПС та мінімізувати витрати на ТО. Час, необхідний ПТОПС, скорочується з годин або днів до 20-30 хвилин.

Моделі оперативного планування технічного обслуговування повітряних суден

Позапланове ТО може призвести до дорогих затримок та скасування, якщо проблема не буде усунена вчасно. Кожна авіакомпанія-експлуатант вважає, що працездатність ПС є основною умовою. Це стосується здатності літака відповідати експлуатаційним вимогам з боку експлуатаційної надійності, експлуатаційного ризику та витрат [39, 45]. Техніка короткострокового планування робіт з оперативного ТО також підтримує прийняття рішень про відстрочку дій щодо ТО, які впливають на відправку ПС [45].

На експлуатаційну готовність впливає час простою ПС. Вона характеризується трьома основними компонентами: готовністю, зручністю ТО та стійкістю [39, 45]. Структура оптимізації планування польотів і ТО, яка не охоплює весь обсяг оперативної готовності, одночасно торкається трьох основних компонентів оперативної готовності, що призводить до випереджувального, ефективного та більш

надійного планування, тобто графіків, які можуть мати справу з затримками, пов'язаними із стохастичним часом прибуття рейсів [39].

Модель оцінки ефективності операцій з технічного обслуговування повітряних суден (МОЕОТОПС) може оцінювати відмінності у продуктивності між двома різними сценаріями операцій з ТО ПС та може фіксувати ці відмінності як у формі диференціальної (ΔV), так і у формі фінансової вартості (чистої приведеної вартості). Ця модель застосовувалася для тестування недоступності матеріалів тільки в «KLM Інжиніринг та технічне обслуговування», і розуміння того як модель реагує у різних середовищах, не вивчалось. Вхідними змінними для МОЕОТОПС є ключові показники ефективності (КПЕ), що були визначені як фактори вартості, які можуть відображати експлуатаційні та фінансові показники процедур ТО ПС. До КПЕ відносяться витрати, виручка, пунктуальність перевірки ТО, технічні затримки та скасування, кількість ПС у наземних замовленнях та невиконані відкладені дефекти [46].

1.2.2. Сучасні моделі для планування графіку технічного обслуговування повітряних суден

На рівень витрат з ТО зазвичай впливають такі фактори, як наявність кількох типів ПС у парку, що збільшує витрати на ТО ПС через погане управління матеріалами ПС і поганих графіків обслуговування. Планування та зміна графіка ТО є ключовим елементом у досягненні стандартів надійності, доступності, ремонтпридатності та безпеки польотів ПС [47]. Оптимальний графік ТО відповідає наступним умовам: наявний парк задовольняє вимоги оператора; компоненти ПС можуть знайти широке застосування; ресурси обслуговування розподіляються поступово [37]. Планування технічного огляду для великого різномірного парку зазвичай є складною та відповідальною проблемою. Графіки ТО ПС зазвичай складаються на основі досвіду операторів ТО. Традиційний підхід забирає багато часу, може призвести до хибних рішень, зменшити використання ПС та збільшити вартість ТО ПС [48].

Евристичний підхід, який розглядає пари пунктів відправлення та призначення, а не ділянки польоту, забезпечує гарне рішення для планування ТО з прийнятним часом обчислень та може використовуватись авіакомпаніями середнього розміру [49]. Інноваційна методологія планування ТО на основі стану, яка поєднує складну обробку даних, прогностичний алгоритм, виділення функцій та оптимізацію планування ТО, може забезпечити більш передбачувані та ефективні можливості планування ТО. Незважаючи на те, що доступність парку ПС та оптимальні графіки ТО змінюються в залежності від різних рівнів потужності ТО, структура планування ТО на основі прогнозів, яка може бути вирішена за допомогою IBM CPLEX Optimizer, що забезпечує аналіз компромісів з точки зору ключових показників продуктивності, таких як вартість та розширення ємності [47]. Метод оптимізації, який інтегрує формування та планування завдань ТО ПС у життєвий цикл ПС, моделює концепцію ТО на основі прогнозів. Цей підхід заснований на алгоритмі гілок і кордонів для планування ТО та дискретно-подійному моделюванні експлуатації ПС, але не враховує застосування для різних бізнес-моделей авіакомпаній, наприклад, бюджетного перевізника або мережі [50].

Керівництво має ухвалити рішення про терміни проведення ТО між прибуттям та вильотом ПС [51]. Рішення про інтервал огляду традиційно ґрунтується на детермінованому аналізі розповсюдження тріщини, який може вимагати занадто частого або нечастого огляду та іноді призводить до більш швидкого поширення тріщини, ніж очікувалося [52]. Надійність парку ПС підвищується зі збільшенням частоти чи якості перевірок. Однак це супроводжується збільшенням вартості огляду та ТО, що призводить до потенційного компромісу між надійністю парку та вартістю огляду та ТО [53]. Метод стохастичного аналізу зростання тріщин, що ґрунтується на алгоритмі еквівалентного початкового розподілу дефектів за розмірами, після якого визначався ризик руйнування, компенсує недоліки детермінованого аналізу, що застосовується при традиційних інтервалах контролю [52]. Метод оптимізації

періодичного огляду та ТО ПС на основі аналізу даних безвідмовності вирішує проблему надлишкового обслуговування та скорочує час простою літаків.

Щоб упоратися з невизначеностями, пов'язаними з ТО, експлуатанти ПС працюють із резервами безпеки, які визначаються терміном виконання кожної роботи. Ідеальний розмір цих буферів можна визначити за допомогою методів, які залежать від невизначеності операції та бажаного рівня ТО. Таким чином, мета проблеми ТО може бути перевизначена як планування робіт якомога ближче до їх термінів виконання. Це означає, що відхилення від «ідеального» графіка, який визначається термінами виконання, зводиться до мінімуму [36]. Модель планування ТО ПС, вирішена за допомогою алгоритму «штучної бджолиної сім'ї», може встановити оптимальну дату ТО для кожного типу ПС. У цій моделі у якості обмеження розглядаються матеріали ПС та інші фактори, а втрати ПС на землі (ПСЗ) задаються як цільова функція. Цільова функція пов'язана зі втратою ПСЗ у всьому циклі ТО, а обмеження гарантують, що кожний час ТО покривається тимчасовим «вікном». Набір обмежень гарантує, що перевірка ТО не вплине на комерційну експлуатацію парку, враховуючи наявні матеріальні ресурси, людино-години та можливості перевірки. Метою цієї моделі є мінімізація ПСЗ та максимізація ефективності, але вона не враховує обмеження експлуатації різнорідного парку [54].

Модель прийняття рішень щодо ТО парку (рис. 1.6), заснована на технічному обслуговуванні за станом ПС у поєднанні із Спільною Оптимізацією (СО), не тільки мінімізує витрати на ТО парку та максимально збільшує доступність, але також враховує різні стани конструкцій ПС. Ефективність цього алгоритму планування ТО парку продемонстровано на прикладі парку з десяти літаків і результати показали, що додаткові витрати на ТО скоротилися на 70,65%. Витрати на ТО парку скорочуються у паралельних підсистемах за допомогою алгоритму спільної оптимізації з урахуванням обмежень продуктивності обслуговування на системному рівні. З іншого боку, системний рівень фокусується на максимальній доступності парку та балансуванні плану ТО парку з ресурсами обслуговування протягом горизонту планування [55].

Використовуючи практичну методологію, засновану на динамічному програмуванні для оптимізації довгострокового графіка ТО, кількість перевірок ТО для парку різнорідних літаків може бути скорочено приблизно на 7% протягом чотирьох років. При цьому час обчислень становить менше ніж 15 хвилин. З метою скорочення інтервалу втраченого льотного часу між перевірками ця методологія поєднує різні типи перевірок (перевірки А, В, С і D) в єдиний графік, але не враховує невизначеність, пов'язану як з часом закінчення ТО, так і з використанням ПС, які не тільки впливають на надійність розкладу, а й на час обчислень, необхідний для розрахунку оптимальних розкладів [48]

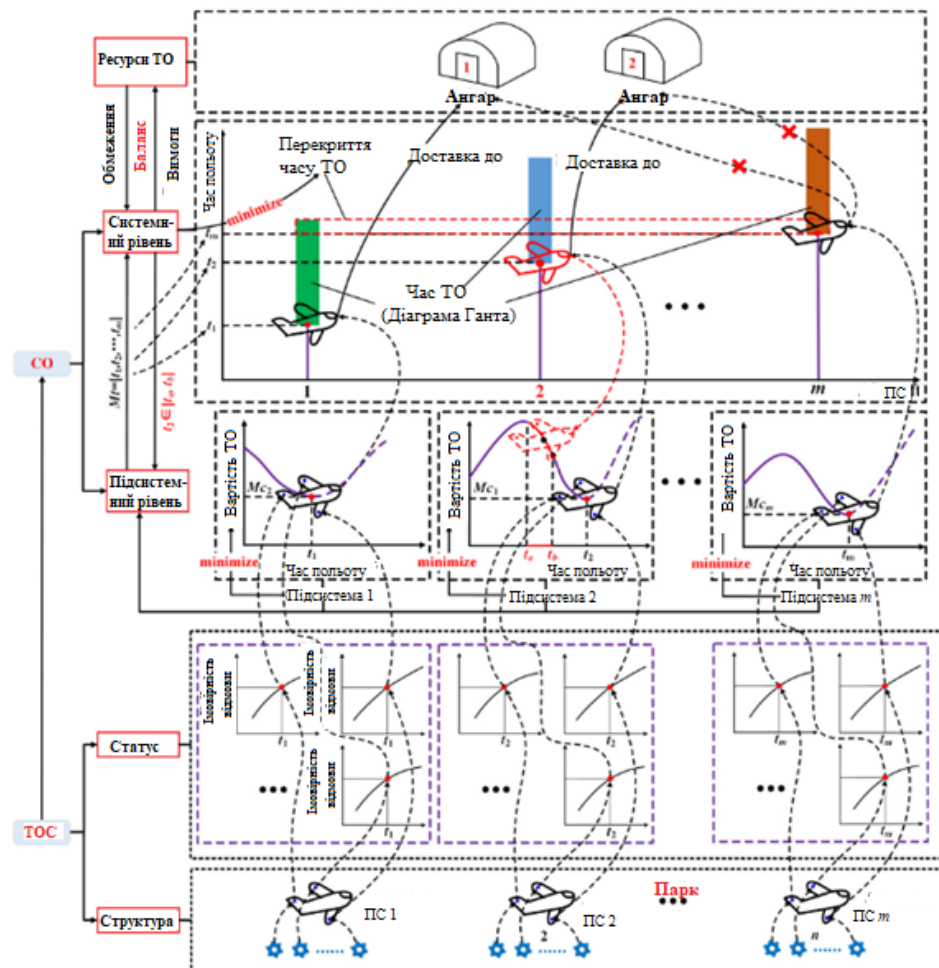


Рис 1.6. Структура моделі прийняття рішень щодо ТО парку, заснована на ТО за станом [55]

Структура, запропонована в [56], не враховує складностей, які можуть виникнути через деякі типи довгострокового ТО, але може становити майже оптимальний графік обслуговування літака за лічені хвилини. Ця структура складається з двох багатоцільових формул змішано-цілочисельного лінійного програмування та ітеративний алгоритм для розробки графіків ТО, а також комерційно обґрунтованого та здійсненого польоту.

1.2.3. Моделі розподілу завдань з технічного обслуговування повітряних суден

Фахівці з планування ТО щодня стикаються з проблемою оптимального розподілу завдань по ТО ПС з урахуванням найкращих можливостей ТО. Типовий підхід, що зазвичай застосовується, полягає у групуванні завдань у перевірки ТО (наприклад, А-, В-, С- та D-перевірка). При цьому встановлюється логічна програма обслуговування, в якій всі завдання виконуються у термінах, пов'язаних з ними. Об'єднання завдань з ТО ПС у робочі пакети є не лише основним у створенні робіт з ТО, а й критично важливим з огляду на мінімізацію витрат на ТО. Для визначення оптимальних дат початку завдань зазвичай використовується послідовний процес. Хоча деякі завдання можна включати в перераховані форми ТО, значна кількість інших завдань (більше 70% для літака Airbus A320) виводяться з інтервалів цих перевірок. Це означає, що вони можуть бути призначені для більш важких форм ТО або вручну операторами обслуговування, що дозволяє своєчасно виконувати необхідних видів завдань. На практиці обидва підходи застосовуються на основі досвіду планувальників ТО, що призводить до неефективності [44, 57-58].

Проблема розподілу завдань (ПРЗ) в ТО літаків відноситься до процесу оптимального розподілу завдань при заздалегідь визначених перевірках ТО. Вона визначає оптимальні дати початку завдань з ТО ПС, щоб усі ПТО завдання здійснювались якомога ближче до термінів їх виконання. Через свій комбінаторний

характер завдання ПРЗ складне і має вирішуватися одночасно для всього парку. У реальних умовах) кілька перевірок літаків можуть бути заплановані паралельно. Завдання, що призначені для цих перевірок, мають спільно використовувати ресурси обслуговування [58]. Комбінаторна модель ТО, заснована на рівні витрат на ТО і розв'язується за допомогою адаптивного генетичного алгоритму на основі кластерного пошуку, поєднує різні завдання в оптимальний пакет робіт на етапі прийняття рішень щодо ТО ПС. Однак щоб дійти до точного рішення у підсумку потрібно багато часу [59].

Автори в [58] визначили ПРЗ як обмежене по часу завдання упаковки контейнерів змінного розміру (ОЧЗУКЗР), розширивши відоме завдання упаковки контейнерів змінного розміру (ЗУКЗР), включивши в нього інтервали, крайні терміни (рис. 1.7).

Algorithm 1 Task Allocation Algorithm.

```

1:  $N \leftarrow$  set of task items from all aircraft,  $N = \cup N_k$ 
2:  $\overline{GR}_t^j \leftarrow$  available labor hours from skill  $j$  in bin  $t$ 
3:  $GR_{i,k}^j \leftarrow$  amount of labor hours of skill  $j$  prescribed to perform
   task item  $i$  of aircraft  $k$ 
4:  $\sigma_{j,m} \leftarrow$  "non-routine rate" from skill  $m$  from every hour of skill  $j$ 
5: procedure SORT TASK ITEMS LIST
6:   Sort and reindex  $N$  so that  $p(i_1) \geq p(i_2) \geq \dots \geq p(i_n)$   $\triangleright$ 
   Prioritization of task items
7: end procedure
8: procedure TASK ITEMS LOOP
9:   while  $N \neq \emptyset$  do
10:     Select  $i$  from  $N$   $\triangleright$  Select the first task in the list
11:      $R_i \leftarrow R_{i,k} \cup t_0$   $\triangleright$  Add  $t_0$  as a fictitious opportunity
12:     Sort and reindex  $R_i$  so that  $\sum_{j \in J} \overline{GR}_{t_1}^j \geq \sum_{j \in J} \overline{GR}_{t_2}^j \geq \dots \geq$ 
        $\sum_{j \in J} \overline{GR}_{t_n}^j$ 
13:     procedure ALLOCATE TO BIN
14:        $n \leftarrow 0$ 
15:       while  $n < |R_i|$  do
16:          $n \leftarrow n + 1$ 
17:         if  $\overline{GR}_{t_1}^j \geq \sum_{j \in J} GR_{i,k}^j \times \sigma_{j,m} \quad \forall m \in J$  then
18:           Allocate  $i$  to  $t_{1,n}$ 
19:           Set  $\overline{GR}_{t_{1,n}}^j = \overline{GR}_{t_1}^j - \sum_{j \in J} GR_{i,k}^j \times \sigma_{j,m} \quad \forall m \in J$ 
20:           Compute next due-date for task item  $i$ 
21:           if Next due-date not within time horizon then
22:              $N \leftarrow N \setminus \{i\}$   $\triangleright$  Remove the maintenance task
23:           else
24:             Sort Task Items List
25:           end if
26:           break
27:         end if
28:         if  $n = |R_i|$  then  $\triangleright$  In case of no allocation possible
29:           Allocate  $i$  to  $t_0$ 
30:           Report Alert
31:         end if
32:       end while
33:     end procedure
34:   end while
35: end procedure

```

Рис 1.7. Алгоритм розподілу завдань [58]

Горизонт планування розбивається на інтервали змінного розміру, для яких розподіляються багатовимірні завдання в залежності від доступної робочої сили і термінів виконання завдань. Вони запропонували конструктивну евристику, засновану на алгоритмі зменшення найгіршої відповідності (ЗНВ) для ОЧЗУКЗР. Цей підхід не враховує стохастичність, пов'язану з проблемою ПРЗ, але здатен ефективно вирішувати багаторічне завдання розподілу завдань для парку повітряних суден за кілька хвилин і приблизно на 30% швидше для всіх розглянутих тестових випадків авіакомпаній.

Оперативне ТО може переривати звичайну експлуатацію ПС через його частоту, крім того, часте відкривання та закривання панелей призводить до значного зносу, що знижує властиву літаку надійність. Імітаційна модель, яка прогнозує вимоги до ТО ПС в авіакомпанії, що працює у відомих умовах, може використовуватися для групування завдань ТО в керовані пакети, які можуть виконуватися зі збільшеними інтервалами ТО та протягом певних періодів, тим самим підвищуючи доступність ПС. Ця модель також може бути використана для зміни та адаптації пакетів оперативного ТО у разі, якщо ПС перебуває в ангарі для позапланового обслуговування [60].

1.2.4. Моделі маршрутів технічного обслуговування повітряних суден

Призначення маршруту ПС з урахуванням його вимог до ТО називається Завданням маршрутизації ТО ПС (ЗМТОПС) [61]. ЗМТОПС визначає маршрут окремого літака (бортовий номер) у масиві ділянок комерційного польоту таким чином, щоб кожен маршрут мав адекватні можливості виконання необхідних завдань ТО [62]. Швидкі та прості алгоритми з поліноміальним часом можуть бути використані для пошуку маршрутів літаків у графі, чії маршрути протягом дня фіксовано. Алгоритм із поліноміальним часом може знайти обхід Ейлера, який являє собою

маршрут у графі лінії польоту (ЛПо). Алгоритм вбудовано у триетапну систему маршрутизації, що створює ЛПо з дотриманням всіх необхідних умов існування маршруту обслуговування [63]. Враховуючи набір ділянок польоту для конкретного типу літака із зазначеними місцями обслуговування і відомими годинами польоту, що залишилися, комбінація пошуку в ширину і алгоритму Дейкстри генерує найбільш оптимально можливі маршрути обслуговування. Витрати на ТО значно знижуються при врахуванні таких вимог до ТО, як доступність слотів, наявність людино-годин та час обороту літака [61].

Гібридний підхід до оптимізації та моделювання, що базується на новій моделі нелінійного програмування зі змішаними цілими числами, може використовуватися для надійного завдання маршрутизації щотижневого обслуговування літаків. Цей підхід поєднує змішане ціле програмування з методом моделювання Монте-Карло для отримання надійних розкладів літаків, тим самим підвищуючи своєчасну продуктивність та одночасно задовольняючи обмеження на ТО і стохастичним затримкам. Порівняно з традиційним підходом авіакомпаній, ця модель покращила показники часу на 9,8–16,0% і скоротила затримки на 25,4–33,1% [64].

В [62] пропонується інтерактивний механізм між маршрутизацією ПС і рішеннями щодо планування ТО для зміни періодичності технічного обслуговування. Формулювання ЗМТОПС, у якому вимоги до ТО розроблено як узагальнені обмеження пропускної спроможності, що забезпечують задовільні можливості ТО на запланованих маршрутах задоволення потреб на ТО окремих ПС. Для створення тижневих маршрутів для окремих літаків ЗМТОПС спочатку формулюється як нова модель цілісного програмування. Стратегія, що базується на плануванні пропускної спроможності, застосовується для створення узагальнених обмежень на ТО, відповідно до яких у рамках запланованих маршрутів мають бути доступні достатні можливості обслуговування (або потужності), щоб задовольнити прогнозоване робоче навантаження з ТО. Однак обмеження цього механізму полягає в тому, що він не

враховує невизначеність через потребу в незапланованому ТО при непередбаченій посадкою ПС.

У [65] було розроблено модель багатоцілового лінійного програмування (модель I) для ЗМТОПС з метою мінімізації кількості літаків і загального часу польоту, що залишився. Потім модель I була розширена до моделі II і моделі III. У моделі II автори розглянули стійкість на основі ймовірності затримки ПС, а потім додали модель робастні обмеження з метою зниження загальних витрат на затримку ПС. Для моделі III автори розглянули тип парку літаків, метою якого є зниження загальної вартості польоту. Що стосується методу рішення, вони покращили евристику алгоритму пошуку змінних меж для розв'язання моделей I та II, які можуть швидко генерувати субоптимальне рішення за розумний час. Результати експериментів показали, що модель I може ефективно вирішити ЗМТОПС, організувавши необхідне регламентне обслуговування літаків для забезпечення безпеки польотів. Виходячи з цього, польотне завдання може бути виконане з мінімальною кількістю літаків і найменшим загальним нальотом літаків, що залишився, а це збільшує коефіцієнт використання літаків. Спираючись на ймовірність затримки рейсу, модель II може створити надійний план планування рейсів авіакомпанії з можливістю протистояти перешкодам, збільшуючи додатковий резервний час.

Моделі маршрутів оперативного обслуговування повітряних суден

Авіакомпанії періодично переглядають маршрути ПС за допомогою Завдань маршрутизації експлуатаційного ТО ПС (ЗМЕТОПС). ЗМЕТОПС визначає маршрут для кожного окремого ПС, інтегруючи міркування експлуатаційного обслуговування. Ця проблема короткострокового планування вимагає побудови маршрутів ПС, які задовольняють вимогам ТО [66, 67]. Для вирішення цієї проблеми можна використовувати алгоритм розгалуження та ціни через обмеженість ресурсів, що потребує модифікації правила розгалуження послідовного розгалуження, яке зазвичай використовується для вирішення подібних завдань [68]. Щоб максимізувати використання загального часу польоту парку ПС, модель цілочисленного лінійного

програмування, яка не враховує планування екіпажу, була сформульована шляхом зміни розуміння про мережі з'єднання і вирішується з використанням гілок і меж при різних налаштуваннях пріоритету для змінних при розгалуженні. На основі стисненого відпалення (СВ) до ЗМЕТОПС застосовується евристичний метод. Порівняння точного та евристичного методів показує, що СВ ефективно для швидкого пошуку високоякісних рішень. СВ повертає можливі рішення протягом перших двох хвилин і знижує кількість втрачених можливостей польоту до прийнятних значень наприкінці першої години, що є ключовим моментом для забезпечення реагування, необхідного для авіаційної галузі. Процедура, заснована на ковзному горизонті, оновлює існуючі маршрути, де деякі рішення щодо ТО вже зафіксовано [69].

Точна модель змішано-цілочисельного програмування, що складається з поліноміального числа змінних та обмежень, може вирішити задачу ЗМЕТОПС, хоча в цій моделі також не враховується об'єднання екіпажів у пари. Дані показують, що вона забезпечує оптимальні рішення, наприклад, при застосуванні до 354-х рейсів та 8-ми літаків і що евристичний підхід зазвичай забезпечує більш високоякісні рішення. Процедура редукції графа та вірні нерівності, що покращують розв'язність моделі описана у [67].

У [66] ЗМЕТОПС вивчався задля двох цілей. По-перше, автори сформулювали змішану модель цілого лінійного програмування, яка враховує всі вимоги до ТО. Пропонована модель вирішується за допомогою комерційного програмного забезпечення для невеликих задач. По-друге, вони розробляють алгоритм рішення, який швидко та ефективно вирішує модель під час вирішення завдань середнього та великого масштабу. Працездатність запропонованого алгоритму рішення перевірена на реальних даних авіакомпанії, результати показують високу якість рішення та значну економію обчислювального часу. Результати цього дослідження показують, що продуктивність запропонованого алгоритму перевищує продуктивність існуючих методів, таких як СВ, та враховує можливості обслуговуючого персоналу. Однак, оскільки ЗМЕТОПС вважався детермінованим, ця модель точно не була б корисною в

реальному житті тому, що експлуатанти літаків зазвичай стикаються зі збоями та непередбаченими обставинами.

ЗМЕТОПС на основі затримки рейсу (ЗМЕТОПСЗР) з обмеженим обсягом у чотири дні було запропонований в [70]. Спільна оптимізаційна модель для узгодженої конфігурації ЗМЕТОПСЗР на основі сценаріїв та проблема з ТО персоналом із використанням гри Штакельберга. У цій грі сценарій, заснований на ЗМЭТОВСЗР, обробляється авіакомпанією та відіграє роль лідера у зниженні вартості поширення затримки. Для представлення гри використовують дворівневу модель оптимізації, що вирішується за допомогою дворівневого алгоритму оптимізації вкладеної мурашиної колонії. Проблема з ТО персоналом, яким займається обслуговуюча компанія, виконує роль відомого, що логічно реагує на рішення керівника щодо часу вильоту літака авіакомпанії від обслуговуючої компанії.

1.2.5. Моделі планування запасних частин для технічного обслуговування повітряних суден

Запасні частини гарантують безпечну та економічну експлуатацію ПС та сприяють плануванню ТО ПС, проте непотрібне постачання запасних частин є наслідком неправильного вибору стратегії ТО. Надлишок запасів запасних частин призводить до високих затрат при зберіганні та перешкоджає рентабельному обороту грошових потоків, у той час як брак запасних частин може призвести до дорогих затримок або скасування рейсів, що негативно позначається на роботі авіакомпаній [71-73]. Час очікування на обслуговування літака можна скоротити на 10,34%, а загальний бюджет запасів зменшити на 12,55%, використовуючи модель, яка розглядає загальну вартість запасних частин як обмеження для оптимізації середнього часу очікування літака. Потім евристичний алгоритм вирішує модель, що базується на аналізі граничної корисності питомої вартості запасних частин [74].

Рішення щодо ТО і забезпечення запасними частинами можуть прийматися одночасно для частин літака, що зношуються [75]. Метод планування, що ґрунтується на теорії масового обслуговування та варіометричній моделі, також може бути використаний для планування авіаційних запасних частин та обладнання для наземного обслуговування, тим самим вирішуючи проблему багатоступеневого розподілу запасів з кінцевою ремонтною потужністю для цивільної авіації [76].

Стратегія обслуговування, заснована на навчанні із підкріпленням (рис. 1.8), призначена для обробки майбутніх потреб польоту літака, зберігання запасних компонентів, витрат на ремонт та продуктивності літака. Обмеження цього підходу полягають у тому, що його розробка ґрунтувалася лише на прикладі одного літака, а сценарії для кількох типів літаків не розглядалися. До того ж, літак для цього дослідження розглядався як однорядна змінна одиниця, що ремонтується як нова, але це не логічний сценарій обслуговування [37].

Структура оптимізації багатокритеріального моделювання, яка поєднує багатокритеріальний еволюційний алгоритм з багатокритеріальним методом розподілу бюджету обчислень, може використовуватися для вирішення проблеми розподілу запасних частин літака, щоб надати набір рішень, що не є домінуючими за принципом Парето для осіб, які приймають рішення.

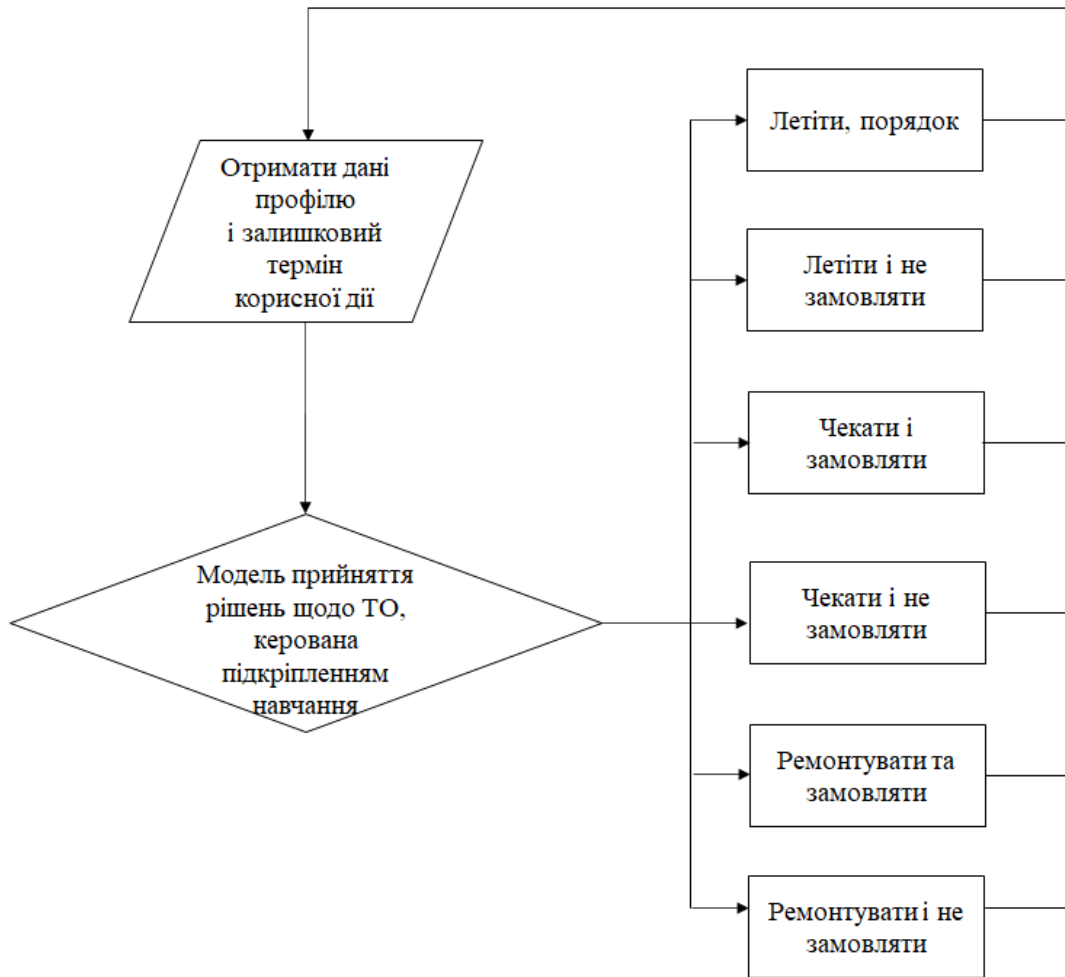


Рис 1.8. Технічне обслуговування, засноване на навчанні із підкріпленням [37]

Ця структура рішення також обробляє невизначеність, пов'язану з показниками ефективності планування ТО літаків шляхом ефективного пошуку невідомованих проєктів у просторі рішень [77].

Дві моделі нелінійного програмування прогнозують майбутні потреби з урахуванням розподілу відмов встановлених деталей. Оптимальний час та кількість замовлення можна знайти шляхом мінімізації загальної вартості [72].

1.2.6. Моделі для управління навичками та планування персоналу з технічного обслуговування повітряних суден

Ресурси обслуговування авіаційної техніки складаються з обладнання, матеріалів та набору робочих годин різної кваліфікації [58]. Праця зазвичай становить значний відсоток витрат, тому важливим є ефективне планування робочої сили [78]. Хороший штатний графік гарантує, що всі польоти можуть бути виконані з наявними робітниками та їх відповідними навичками [78-79]. Тим не менш, рішення керівництва про терміни проведення ТО між прибуттям та вильотом літака, обмеження профспілковими угодами та стохастичні затримки прибуття, що призводять до недостатнього потенціалу обслуговуючого персоналу, є проблемами, пов'язаними з розкладом персоналу по ТО ПС. Евристика удосконалення моделі, яка оптимізує змішану модель цілого чисельного лінійного програмування зі стохастичним обмеженням рівня обслуговування, може використовуватися для створення надійних списків персоналу з ТО ПС, що забезпечить оптимальний рівень обслуговування при одночасному зниженні загальних трудовитрат [51]. Теорема Холла про шлюб може допомогти особам, що приймають рішення, керувати навичками для операцій з ТО та урахуванням складних обмежень [80].

Шляхом спілкування та міркувань між агентами можна використовувати багатоагентний метод конфігурації персоналу з ТО парку ПС для вирішення проблеми конфігурації персоналу з ТО парку ПС, що у результаті призводить до оптимальної стратегії ТО. У процесі конфігурації обслуговуючого персоналу модель систематично враховує взаємодію між людськими помилками, співробітництвом між персоналом та одночасним обслуговуванням [81].

Триетапний змішаний підхід до цілісного програмування забезпечує оптимізацію набору навичок та графіка навчання. На першому і другому етапі досягається компроміс між витратами на навчання і більш дешевим розкладом робочої сили, що виходить в результаті, в той час як на третьому етапі оптимальний і можливий для

виконання графік навчання забезпечує бажане поєднання навичок з мінімальними витратами. Результати, що базуються на даних від постачальника послуг з ТО та капітального ремонту, розташованого в Європі, показують, що модель може знаходити хороші рішення за розумний час обчислень. Модель забезпечує відмінний компроміс між графіком чергувань, для забезпечення якого потрібні кваліфікованіші працівники, та витратами на їх навчання. Недоліком цього підходу є припущення, що під час навчання працівники недоступні для роботи, але на практиці це застосовується лише у тому випадку, якщо необхідне навчання може бути проведене без створення загрози для поточних операцій з ТО ПС [78].

1.2.7. Моделі технічного обслуговування повітряних суден на основі даних прогнозування та управління технічні станом

Технологія прогностики та управління технічні станом (ПУТС) оцінює залишковий термін корисного використання (ЗТКВ) та стан працездатності систем і компонентів. ПУТС складається з набору методів, які використовують аналіз вимірювань для оцінки технічні станом та прогнозування неминучого виходу з ладу контрольованого обладнання. Досягнення в технології ПУТС в авіаційній галузі були корисні виробникам літаків, експлуатантам літаків, OEM та постачальникам послуг з ТО, ремонту та капітального ремонту для досягнення важливих конкурентних переваг, таких як мінімізація експлуатаційних витрат та підвищення надійності парку [82-83]. Поєднання інформації про архітектуру системи та оцінки ЗТКВ для всіх компонентів системи дозволяє виконати загальну оцінку ЗТКВ на рівні системи. Інформація ЗТКВ на рівні системи може використовуватися для підтримки рішень з ТО щодо заміни декількох компонентів [82-83]. Тенденції зносу та майбутні значення зносу авіаційних систем оцінюються з урахуванням реалізації підходу за кількома моделями розширеного методу фільтра Калмана [84].

1.2.8. Моделі технічного обслуговування повітряних суден, орієнтовані на надійність

Моделі технічного обслуговування орієнтованого на надійність (ТООН), дозволяють розраховувати надійність системи з урахуванням різних видів перевірок ТО та їх інтервалів, тим самим надаючи інформацію для оптимізації експлуатаційних витрат, безпеки та надійності. Типова структура ТООН включає збір даних, включаючи напрацювання на відмову та функцію інтенсивності відмов, аналіз виду відмови та її наслідків, а також оптимізацію інтервалів ПТО [85-86].

У [85] запропоновано практичний підхід до аналізу авіаційних систем. Ця аналітична модель може використовуватися для визначення інтервалів технічного обслуговування, оптимізації надмірності та списку мінімального ТО літака. Автори припустили, що марковський однорідний процес можна використовувати як математичну модель для визначення надійності авіаційних систем, якщо можна встановити кореляцію між станом авіаційних систем, ймовірностями їх відмов, інтенсивністю відмов елемента. З іншого боку, необхідно розглянути марковський процес, процеси транзитних швидкостей та ймовірностей станів. Модель марковського однорідного процесу показує, що ймовірність станів системи літака можна представити у вигляді добутку двох множників. Перший з них, який залежить від тривалості польоту та інтенсивності відмов компонента, може бути визначений з використанням марковських процесів та булевої логіки. Другий залежить від періодичності перевірки та ремонту вузлів та станів системи, а також обмежень по фазах польоту. Ймовірність відмови системи в будь-якому польоті визначалася за (1.1)

$$Q_z(0, t_{fl}) = (1/M) \sum_{j=1}^M \{Q_z(0, jt_{fl}) - Q_z(0, (j-1)t_{fl})\} \quad (1, 1)$$

$$Q_z^0(0, t_{fl}) = \lambda_\alpha \lambda_\beta \dots \lambda_\rho \lambda_\sigma t_{fl} / r! \quad (1, 2)$$

$$K_z = (r! / t_{fl}) (1/M) \sum_{j=1}^M \{Ir(j t_{fl}) - Ir((j-1) t_{fl})\} \quad (1, 3)$$

де Q_z – вірогідність, $t_{f\ l}$ – тривалість польоту, M – кількість польотів між повним відновленням системи при j -ого ТО, $\lambda_\alpha, \lambda_\beta, \lambda_\rho, \lambda_\sigma$ – інтенсивність відмов елементів, r – кількість відмов, які перевели систему з працездатного стану в заданий стан, K_z – коефіцієнти впливу стратегії ТО системи на ймовірність відмов системи.

Перший фактор (1.2) визначає ймовірність відмови системи в польоті N_z , що виникає за умови відновлення працездатності всіх елементів, які відмовили перед зльотом. Другий множник (1.3) не залежить від надійності елемента λ_μ і показує, наскільки зростає ймовірність Q_z із фактичними значеннями інтервалів перевірки відповідних станів системи. Проведено оптимізацію міжсервісних інтервалів на основних етапах: 1) визначення функцій ненадійності та вартості; 2) оптимізація інтервалів окремих завдань ТО з використанням методу Лагранжа для опуклих функцій; 3) оцінка логічних інтервалів завдань ТО шляхом інтеграції задач з оптимальними значеннями відповідних планових перевірок обслуговування з відомими базовими інтервалами та використанням рангових значень.

Для оптимізації ТО авіадвигуна [87] запропоновано методологію, яка оцінює надійність авіаційного двигуна чи його модуля з урахуванням параметрів моніторингу стану, звітів пілотів чи інших експлуатаційних даних. Напрацювання на відмову розраховується з урахуванням цих результатів, а завдання обслуговування плануються з урахуванням часу виконання замовлення. Ці дії підвищують ймовірність запровадження принципів ощадливого виробництва та шести сигм при ТО літаків чи авіаційних двигунів за допомогою ТООН. Запропонована методологія складається із 5-ти етапів: аналіз даних; оцінка надійності; оцінка параметрів; впровадження інструментів ощадливого виробництва та шести сигм для оптимізації витрат; контрольна діаграма для порівняння інтенсивності відмов. Для аналізу даних рандомізований блоковий дизайн використовується для моделювання (1.4), щоб спостерігати значну різницю між двигуном та його проточної частини. Оцінка надійності виконується з використанням розподілу Вейбула, нового розподілу Вейбула

та експоненціального зворотного розподілу Вейбула, після чого виконується оцінка параметрів.

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \text{ для } i=1, 2, \dots \text{ та } j=1, 2, \dots, b \quad (1,4)$$

де Y_{ij} – спостереження, пов'язане з i -ого звернення та j -ого блоку.

У роботі [86] запропоновано оптимізацію інтервалу ПТО для індикаторів літака за рахунок зниження очікуваної довгострокової вартості експлуатації на основі інформації про надійність індикаторів літака. Автори визначили основні види відмов двох індикаторних додатків від двох постачальників, використовуючи інформацію зі звітів аналізу видів та наслідків відмов. Були визначені показники середнього часу напрацювання на відмову та середнього часу між незапланованими замінами, що використовувалися як вхідні дані для моделі оптимізації інтервалів ПТО. Середній час безвідмовної роботи при ПТО оцінювали (1.5). Оптимальний графік ПТО отримано шляхом мінімізації середньої норми витрат (1,6)

$$MTBUR = \sum_{n=0}^{\infty} R(T_0)^n \int_0^{T_0} R(t) dt \quad (1,5)$$

де $\sum_{n=0}^{\infty} R(T_0)^n$ - нескінченний геометричний ряд, $R(T_0)$ знаходиться між 0 та 1.

$$\text{Average rate cost} = \frac{\min C_0 R(T_0)^2 + C_{loss} (R(T_0) - R(T_0)^2)}{(1 - R(T_0)) \int_0^{T_0} R(t) dt} \quad (1.6)$$

1.2.9. Мотивація для цього дослідження

Схеми прийняття рішень та моделі, засновані на плануванні, складанні графіків, розподілі завдань обслуговування, маршрутизації обслуговування, запасних частин, персоналі та управлінні навичками були запропоновані дослідниками для оптимізації процесів ТО ПС. Однак мало уваги приділялося моделям теорії надійності, машинному навчанню, регресійним моделям та теоріям ймовірності та статистики для оптимізації

ТО ПС на перших трьох етапах життєвого циклу ПС. Системи та компоненти ПС можуть мати характерні несправності, а їх надійність може змінюватись в залежності від попередніх планових перевірок та ремонтів. Таким чином, чітке розуміння взаємодії між рівнями надійності та історичними тенденціями несправностей та відмов значно покращить проектування, виробництво та експлуатацію ПС. Крім того, в авіаційній галузі необхідна вірогідність у математичних моделях та у постановці завдання оптимізації. Надійність системи, процеси ТО та вартість необхідно враховувати на етапі проектування життєвого циклу ПС. У цьому дослідженні дані парку ПС Нігерії будуть використовуватися для перевірки математичних моделей, розроблених для оптимізації процесів ТО ПС з підтримки льотної придатності.

1.3. Чисельний аналіз надійності повітряних суден у Нігерії

1.3.1. Огляд надійності повітряних суден

Повітряні судна є дорогівартісними промисловими системами, до яких водночас пред'являються найвищі вимоги щодо надійності та безпеки [88]. Максимальна доступність ПС та мінімізація витрат найкраще досягаються шляхом проектування літака таким чином, щоб він був надійним та ремонтпридатним. Отже, вимоги до надійності зазвичай визначаються на етапі досліджень та розробок життєвого циклу (ЖЦ) ПС та застосовуються до інших трьох етапів ЖЦ ВС: виробництва, експлуатації, підтримки, а також утилізації. На етапі експлуатації та підтримки надійність ПС та його компонентів має першорядне значення для безпеки та доступності польотів. Процес надійності дозволяє експлуатантам ПС аналізувати дані про ПС та його компоненти. Оператор може порівняти надійність свого парку повітряних суден з надійністю усього реєстрового парку даного типу, щоб зрозуміти вартість перерви у розкладі, проаналізувати рішення та розставити пріоритети сервісних бюлетенів

залежно від впливу на парк [89]. Для практичних цілей надійність визначається як здатність складової частини, підсистеми або системи працювати, як передбачалося, без будь-яких відмов і в заздалегідь визначених межах продуктивності протягом певного інтервалу часу в умовах її ЖЦ [90]. З кількісної точки зору надійність зазвичай оцінюють як ймовірність того, що пристрій виконуватиме свою функцію протягом необхідного періоду часу в певних умовах навколишнього середовища та експлуатації [91].

Повітряне судно є складною комбінацією підсистем, систем і складових частин, які ніколи не бувають надійними на 100%, тому що іноді вони відмовляють. Ці відмови зазвичай можуть бути виправними або катастрофічними. Таким чином, мета експлуатанта ПС полягає в тому, щоб зберегти або відновити рівень надійності ПС з мінімальними витратами за допомогою Програми контролю надійності (ПКН). ПКН будь-якого ПС фокусується на підтримці інтенсивності відмов нижче заданого значення [92]. Теорія та методологія надійності розвивалися в кілька етапів і в процесі цього розвитку виникли три основні області: 1) проектування надійності, що складається з аналізу надійності системи, аналізу проєкту та пов'язаних із цим завдань; 2) аналіз роботи, що складається з дослідження відмов та коригувальних дій; 3) математика надійності, що складається зі статистики та пов'язаних з нею математичних знань [19].

У цій дисертації буде вивчено всі три області теорії та методології надійності, в яких вивчається оптимізація процесів технічного обслуговування для забезпечення постійної льотної придатності літаків у Нігерії.

1.3.2. Чисельний аналіз надійності повітряних суден у Нігерії

Аналіз надійності оцінює можливість відмови складових частин, підсистем чи систем за наявності випадковості. У математичній структурі вона формулюється з використанням випадкових величин для моделювання джерел мінливості у розробці

продуктів та процесів [93]. Враховуючи, що оптимізація ТО потребує моделей надійності для пошуку стратегії ТО, за якої витрати на ремонт, огляд та інші наслідки мінімальні, у дисертації буде розроблено математичні моделі, що використовують параметри надійності. Щоб отримати короткий огляд рівнів надійності компонентів і систем ПС в Нігерії, у цьому розділі проводиться чисельний аналіз надійності визначення числових параметрів надійності систем ПС. Системи ПС були класифіковані з використанням системи нумерації АТА, яка є світовим стандартом для визначення та групування всіх секцій сучасних пасажирських ПС.

Аналіз проводився з використанням даних, що надані авіакомпаніями-експлуатантами гелікоптерів та NCAA. Використано дані з гелікоптерів: семи S-76c++ та чотирьох S-92 і літаках: двох ERJ-135, двох ATR 42–300, одному ATR–72 за період 2014–2018 р.р. У контексті цієї дисертації термін «відмова» відноситься до несправностей та відмов компонентів, підсистем, систем або конструкції ПС. Параметри надійності визначаються наступним чином:

1. Час t , як сума льотних годин кожного парку ПС за вказаний інтервал часу, витягнута з льотних записів.
2. Напрацювання на відмову T_{Σ} , яке розраховується як відношення часу t до сумарної кількості відмов n , що сталися за вказаний проміжок часу. Дані про відмови систем ПС отримані з бортового технічного журналу.
3. Інтенсивність відмов λ_{Σ} відноситься до частоти, з якою у системі або компоненті виникає несправність або відбувається відмова. Воно розраховується як зворотне відношення напрацювання на відмову.
4. Кількість відмов на 1000 льотних годин K_{1000} , яке розраховується як λ_{Σ} помножене на 1000.
5. Сума відмов, що спостерігалися у польоті та при ТО для відповідного розділу АТА за вказаний інтервал, позначається n_T .
6. Відмови в польоті для відповідного розділу АТА за вказаний інтервал позначаються n_F .

Таблиця 1.1

Формула для чисельного розрахунку параметрів надійності

Параметр	Формуляр
Напрацювання на відмову T_{Σ}	t/n
Інтенсивність відмов λ_{Σ}	$1/T_{\Sigma}$
Кількість відмов на 1000 льотних годин K_{1000}	$1000 n/t$

Таблиця 1.2

Інформація про відмову гелікоптерів S-76

Код	Назва системи	n_T	n_F
21	Система кондиціонування повітря	11	3
22	Устаткування автоматичного керування польотом	104	49
23	Устаткування зв'язку	39	12
24	Система електропостачання	57	20
25	Побутове та аварійно-рятувальне обладнання	27	2
26	Пожежне обладнання	15	
28	Паливна система	9	3
29	Гідравлічна система	46	3
30	Протиобліднювальна система	14	4
31	Приладове обладнання	31	18
32	Шасі	211	16
33	Освітлення та світлова сигналізація	76	16
34	Пілотажно-навігаційне обладнання	173	91
39	Електричні панелі, електроніка та універсальний компонент	9	2
45	Бортова система технічного обслуговування	17	1
51	Конструкція планера	70	3
52	Двері, люки, стулки	53	7
53	Фюзеляж	165	21
55	Оперення	13	
56	Ліхтар вікна	4	
65	Гвинти гелікоптерів	192	8
66	Складні лопаті гелікоптера	37	4
67	Система керування гвинтом	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	4	

Продовження таблиці 1.2

79	Масляна система	48	1
80	Система запуску	15	3
Всього		1676	348

Таблиця 1.3

Інформація про відмови гелікоптерів S-92

Код	Назва системи	<i>n_T</i>	<i>n_F</i>
21	Система кондиціонування повітря	35	13
22	Устаткування автоматичного керування польотом	25	10
23	Устаткування зв'язку	22	8
24	Система електропостачання	25	4
25	Побутове та аварійно-рятувальне обладнання	19	
26	Пожежне обладнання	12	4
28	Паливна система	5	
29	Гідравлічна система	19	2
30	Протиобліднювальна система	9	3
31	Приладове обладнання	21	1
32	Шасі	59	4
33	Освітлення та світлова сигналізація	23	5
34	Пілотажно-навігаційне обладнання	37	11
44	Система кабіни	2	1
49	Бортова допоміжна силова установка	11	1
50	Вантажний та допоміжний відсіки	2	
51	Конструкція планера	2	1
52	Двері, люки, стулки	48	11
53	Фюзеляж	39	3
54	Гондоли двигунів, пілони	6	
55	Оперення	2	
56	Ліхтар вікна	1	
62	Несучий гвинт	76	2
63	Привід обертання несучого гвинта	33	4
64	Рульовий гвинт	83	2
65	Привід обертання рульового гвинта	7	1
67	Система керування гвинтом	28	2
71	Силовa установка	13	1
72	Двигун	4	1
73	Паливна система двигунів	2	
74	Система запалювання	15	2
75	Система відбору повітря	4	
75	Система відбору повітря	4	
76	Система керування двигуном	4	1
78	Система вихлопу	9	

Продовження таблиці 1.3

79	Масляна система	4	
52	Двері, люки, стулки	48	11
53	Фюзеляж	39	3
54	Гондоли двигунів, пілони	6	
55	Оперення	2	
80	Система запуску	5	
Всього		712	98

Таблиця 1.4

Інформація про відмови літаків ERJ-135

Код	Назва системи	<i>n_T</i>	<i>n_F</i>
21	Система кондиціонування повітря	25	6
22	Устаткування автоматичного керування польотом	5	1
23	Устаткування зв'язку	45	15
24	Система електропостачання	27	5
25	Побутове та аварійно-рятувальне обладнання	56	17
26	Пожежне обладнання	9	2
27	Система керування літаком	40	21
28	Паливна система	7	2
29	Гідравлічна система	7	2
30	Протиобліднювальна система	20	13
31	Приладове обладнання	36	20
32	Шасі	149	38
33	Освітлення та світлова сигналізація	109	13
34	Пілотажно-навігаційне обладнання	50	14
35	Кисневе обладнання	11	
36	Пневматична система	25	15
38	Система водопостачання та видалення відходів	4	
45	Бортова система технічного обслуговування	1	
49	Бортова допоміжна силова установка	22	8
52	Двері, люки, стулки	10	2
53	Фюзеляж	7	1
55	Оперення	4	
56	Ліхтар вікна	6	
57	Крило	7	1
71	Силова установка	3	
72	Двигун	4	1
73	Паливна система двигунів	6	4
74	Система запалювання	2	
75	Система відбору повітря	3	3
76	Система керування двигуном	2	1
77	Прилади контролю двигуна	1	

Продовження таблиці 1.4

78	Система вихлопу	6	3
79	Масляна система	1	
80	Система запуску	5	2
Всього		716	210

Таблиця 1.5

Інформація про відмови літаків ATR 42-300

Код	Назва системи	<i>пТ</i>	<i>пФ</i>
21	Система кондиціонування повітря	24	8
23	Устаткування зв'язку	11	4
24	Система електропостачання	21	5
25	Побутове та аварійно-рятувальне обладнання	5	2
26	Пожежне обладнання	3	1
27	Система керування літаком	3	2
28	Паливна система	6	1
29	Гідравлічна система	2	1
30	Протиобліднювальна система	8	1
31	Приладове обладнання	4	1
32	Шасі	156	45
33	Освітлення та світлова сигналізація	48	14
34	Пілотажно-навігаційне обладнання	25	12
35	Кисневе обладнання	2	
36	Пневматична система	3	
38	Система водопостачання та видалення відходів	4	
42	Інтегрована модульна авіоніка	1	
51	Конструкція планера	1	
52	Двері, люки, стулки	5	2
53	Фюзеляж	1	
56	Ліхтар вікна	1	
57	Крило	2	
61	Повітряні гвинти	1	
72	Двигун	16	5
73	Паливна система двигунів	2	1
77	Прилади контролю двигуна	3	1
79	Масляна система	1	
Всього		359	106

Таблиця 1.6

Інформація про відмови літаків MD-83

Код	Назва системи	<i>n_T</i>	<i>n_F</i>
21	Система кондиціонування повітря	734	670
22	Устаткування автоматичного керування польотом	142	119
23	Устаткування зв'язку	321	272
24	Система електропостачання	250	152
25	Побутове та аварійно-рятувальне обладнання	1869	1752
26	Пожежне обладнання	85	38
27	Система керування літаком	104	87
28	Паливна система	62	30
29	Гідравлічна система	52	32
30	Протиобліднювальна система	77	67
31	Приладове обладнання	30	25
32	Шасі	965	209
33	Освітлення та світлова сигналізація	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 панелі, електроніка та універсальний компонент	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, ступки	113	104
53	Фюзеляж	8	1
56	Ліхтар 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	21	13
79	Масляна система	37	25
80	Система запуску	40	29
Всього		359	106

Інформація про відмови разом з даними про години нальоту використовувалася для визначення T_{Σ} , λ_{Σ} та K_{1000} для кожного ПС. Результати наведено у таблиці 1.7. Діаграми на рис. 1.9–1.13 наочно ілюструють дані АТА щодо відмов та несправностей у польоті всіх проаналізованих ПС.

Таблиця 1.7

Результати чисельного аналізу надійності парку повітряних суден у Нігерії

Повітряних суден		Час, що спостерігається	n _T	T _Σ ,	λ _Σ	K ₁₀₀₀
Гелікоптери	S-76	29116	1676	17.37	0,06	58
	S-92	12991	712	18.25	0,06	55
Літаки	MD-83	16006	7143	2,24	0,45	446
	ERJ-135	4492	716	6,27	0,16	159
	ATR 42-300	4755	359	18,79	0,08	76

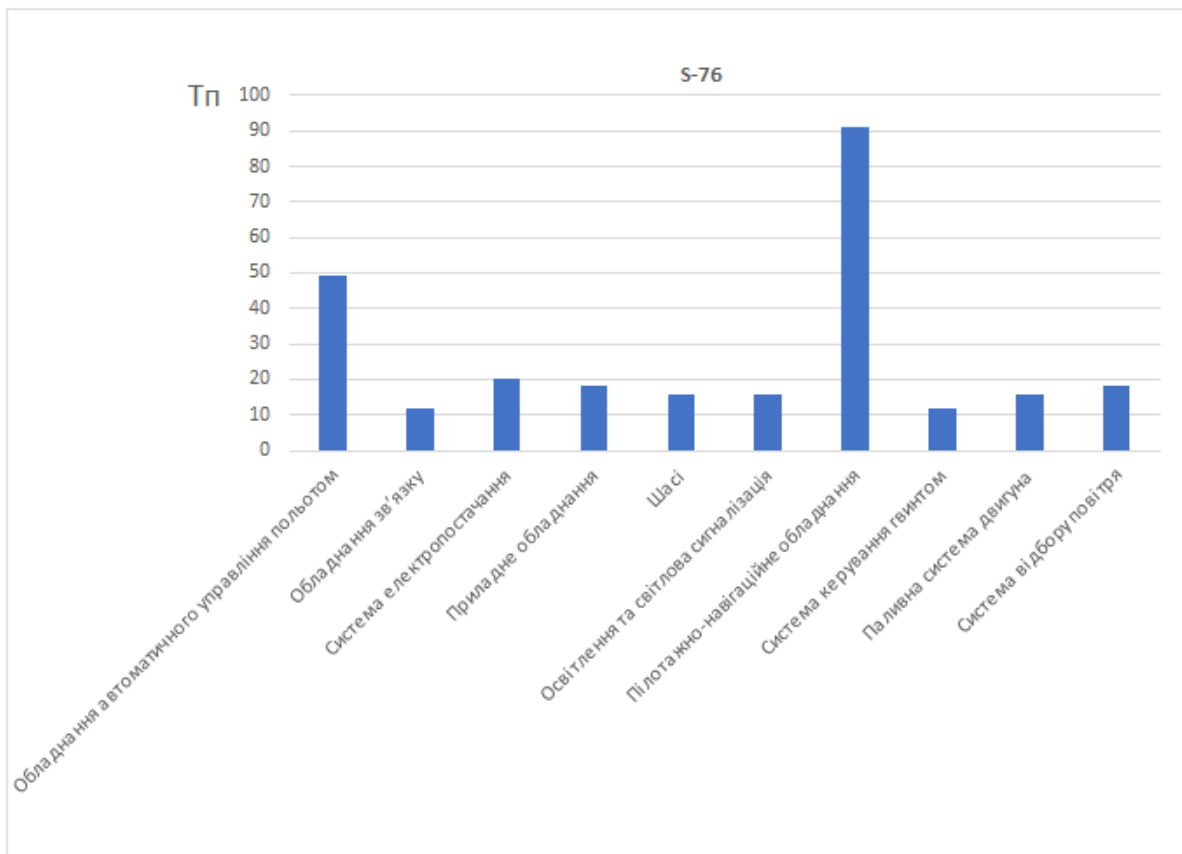


Рис. 1.9. Характерні несправності за даними АТА в польоті для S-76

Для гелікоптерів S-76 (рис. 1.9) системами та конструкціями з найменшим рівнем надійності є: обладнання автоматичного керування польотом, обладнання зв'язку, система електропостачання, приладове обладнання, шасі, освітлення та світлова сигналізація, пілотажно-навігаційне обладнання, система керування гвинтом, паливна система двигунів та система відбору повітря.

Для гелікоптерів S-92 (рис. 1.10) системами та конструкціями з найменшим рівнем надійності є: система кондиціонування повітря, обладнання автоматичного керування польотом, обладнання зв'язку, система електропостачання, пожежне обладнання, шасі, освітлення та світлова сигналізація, пілотажно-навігаційне обладнання, двері, люки, створки та привід обертання несучого гвинта.

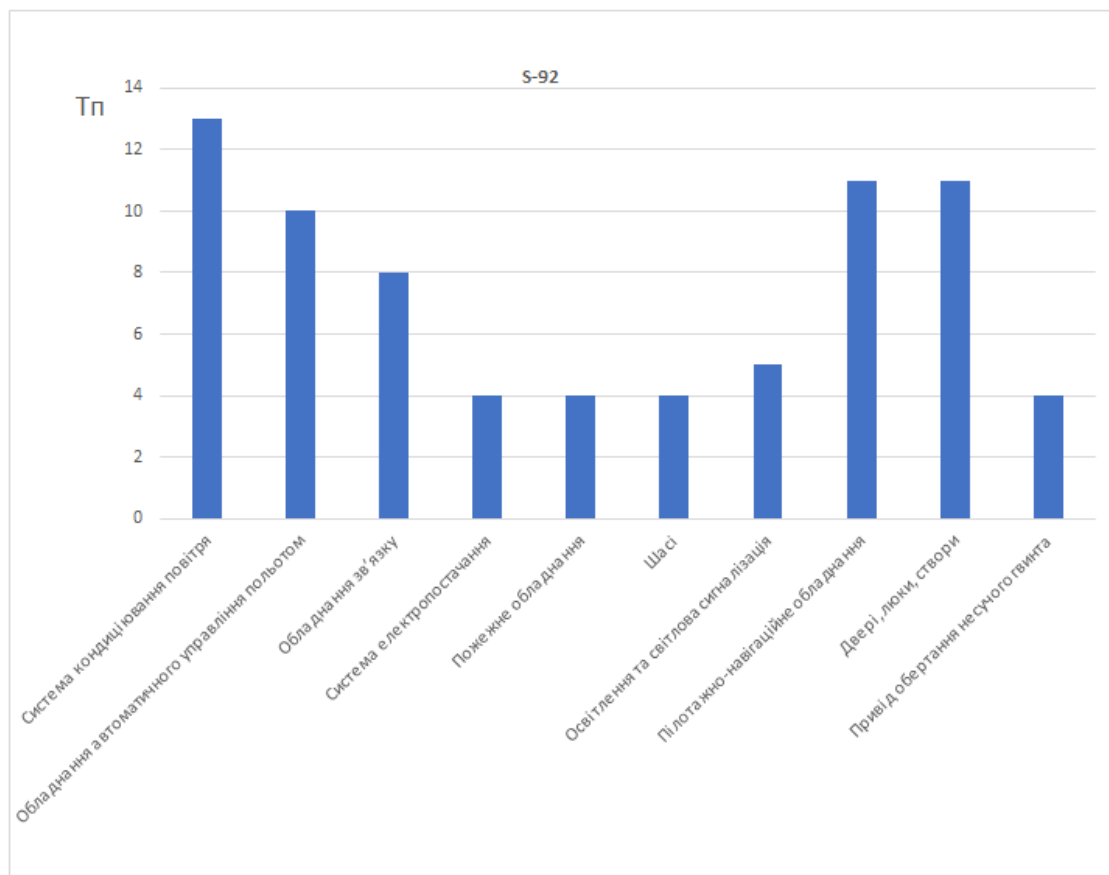


Рис. 1.10. Характерні несправності за даними АТА в польоті для S-92

Для літаків ERJ-135 (рис. 1.11) системами та конструкціями з найменшим рівнем надійності є: обладнання зв'язку, побутове та аварійно-рятувальне обладнання, система керування літаком, протиобліднювальна система, приладове обладнання, шасі, освітлення та світлова сигналізація, пілотажно-навігаційне обладнання, пневматична система та бортова допоміжна силова установка.

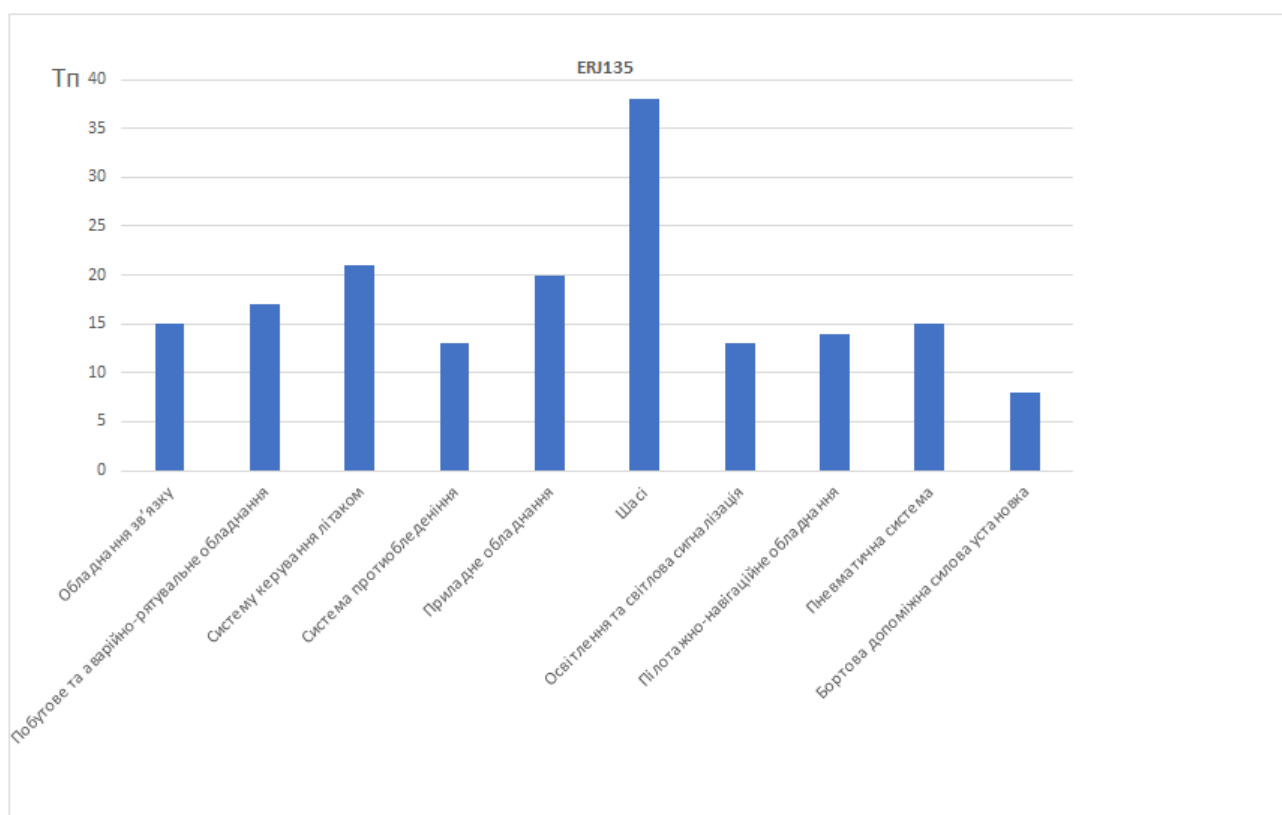


Рис. 1.11. Характерні несправності за даними АТА в польоті для ERJ-135

Для літаків ATR 42-300 (рис. 1.12) системами та конструкціями з найменшим рівнем надійності є: система кондиціювання повітря, обладнання зв'язку, система електропостачання, побутове та аварійно-рятувальне обладнання, система управління

літаком, шасі, освітлення та світлова сигналізація, пілотажно-навігаційне обладнання, двері, люки, ступки та двигун.

Для літаків MD-83 (рис. 1.13) системами та конструкціями з найменшим рівнем надійності є: система кондиціонування повітря, устаткування автоматичного управління польотом, обладнання зв'язку, система електропостачання, побутове та аварійно-рятувальне обладнання, шасі, освітлення та світлова сигналізація, пілотажно-навігаційне обладнання, двері, люки, ступки та бортова допоміжна силова установка.

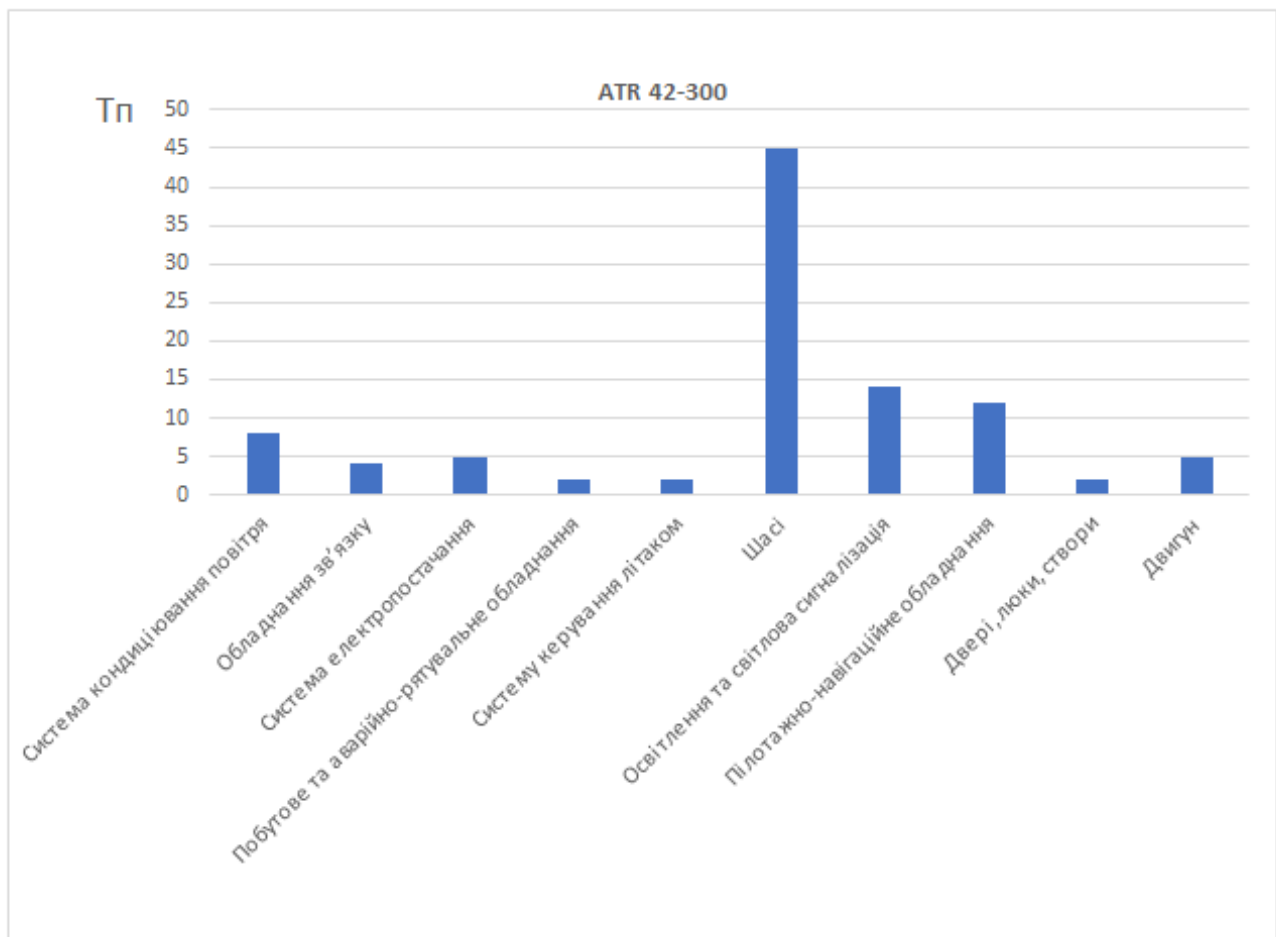


Рис. 1.12. Характерні несправності за даними АТА в польоті для ATR 42-300

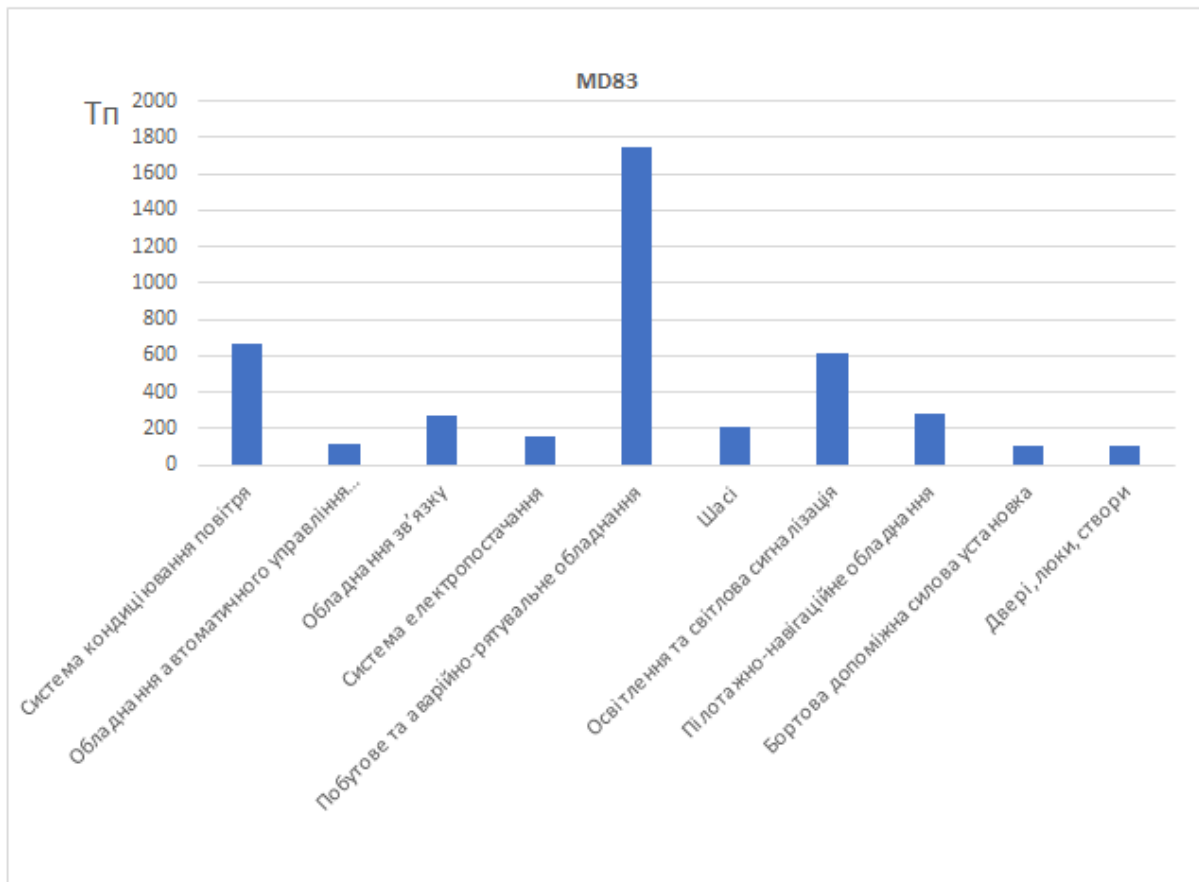


Рис. 1.13. Характерні несправності за даними АТА в польоті для MD-83

1.3.3. Аналіз одержаних результатів чисельних показників надійності з використанням кривої у формі «ванни»

Крива у формі «ванни» (рис. 1.14) — це добре відома концепція, що використовується для подання поведінки технічних виробів при відмові, оскільки інтенсивність відмов таких елементів є функцією часу (тобто вона змінюється з часом).

Крива, показана на малюнку, розділена на три області. Область I відома як область вигорання, область налагодження, область смертності дитини або область обкатки. Протягом цього періоду інтенсивність відмов, що залежить від часу, зменшується через відмови, що виникають з таких причин, як неправильні методи виробництва, неякісні матеріали та якість виготовлення, поганий контроль якості,

погані процеси, погане налагодження та людський фактор. Область II називається «періодом корисного використання», протягом якого інтенсивність відмов залишається постійною.

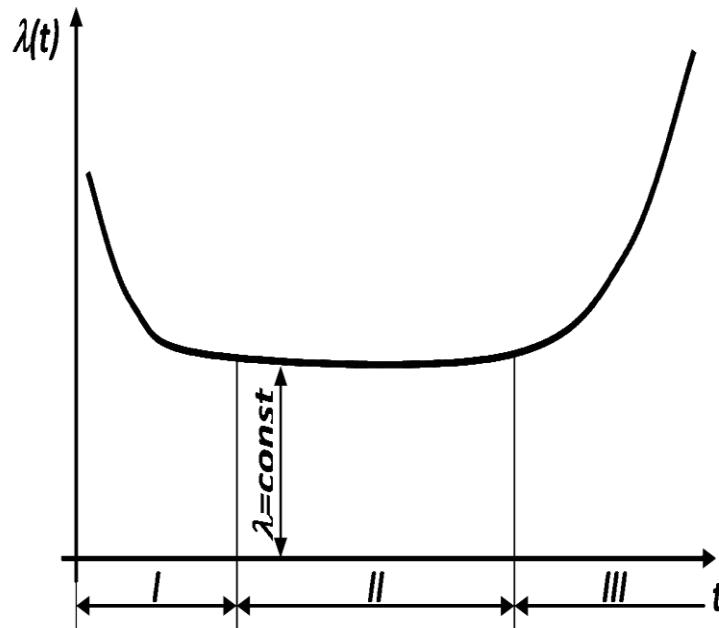


Рис 1.14. Крива у формі «ванни» для показу відмов інженерних виробів [94]

Деякими з причин виникнення відмов у цій галузі є невиявлені дефекти, людські помилки, вищі випадкові навантаження, ніж очікувалося, та природні відмови. Область III відома як «період зносу», протягом якого інтенсивність відмов збільшується з таких причин, як знос, викликаний тертям та старінням, неправильні методи капітального ремонту, погане ТО, корозія та повзучість [19, 29, 95].

Динаміка інтенсивності відмов систем та конструкцій гелікоптерів у польоті представлена на рис. 1.15. Чітко простежується перехідний період від етапу нормальної експлуатації (2014-2015 р.р.) до третього етапу експлуатації – етапу підвищеного зносу деталей гелікоптерів, де збільшується інтенсивність відмов (2016-2018 р.р.)

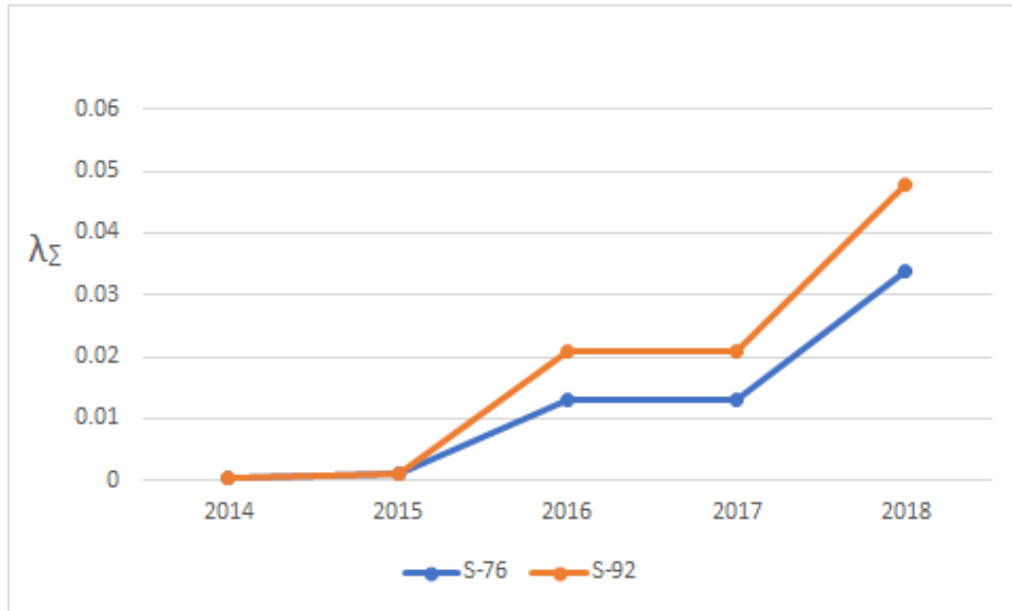


Рис. 1.15. Динаміка λ_S для гелікоптерів

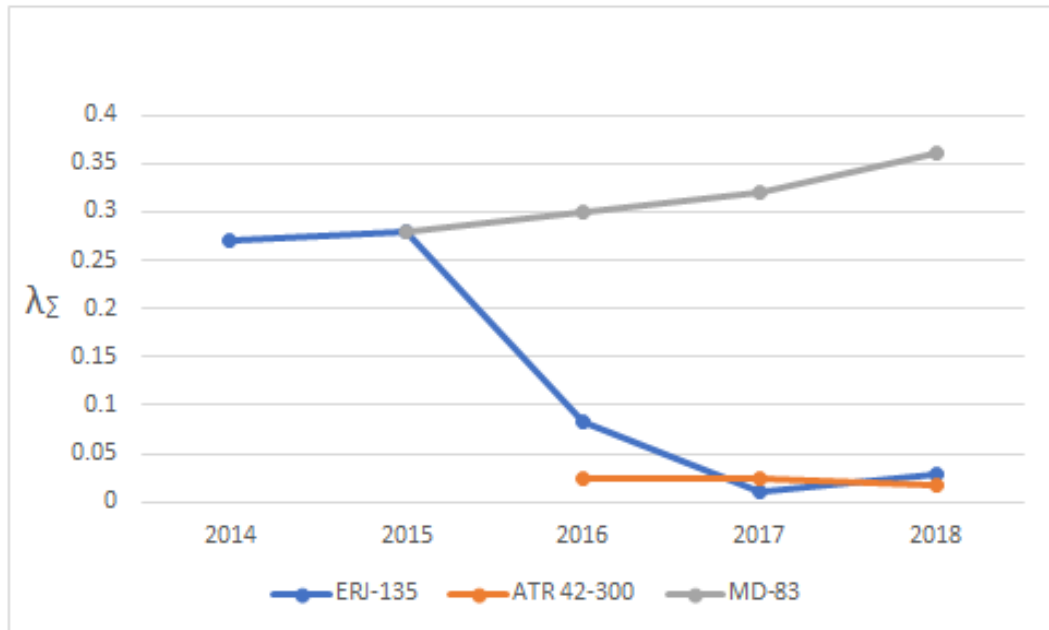


Рис. 1.16. Динаміка λ_S для літаків

Динаміка інтенсивності відмов систем та конструкцій літаків у польоті представлена на рис. 1.16. Літаки ATR 42-300 знаходяться у кривому терміні служби «ванни». Для парку ERJ-135, випущеного у 1999 р., початкове зниження (2015-2017 р.р.) інтенсивності відмов може бути пов'язане з капітальним ремонтом, проведеним перед його першим польотом у 2015 р. нинішнім експлуатантом. MD-83 на третій стадії кривої «ванни» характеризуються підвищеним зносом, тому вони вважаються «старіючим» парком.

Висновки до розділу 1

1. Огляд ТО ПС в Нігерії:

- У Нігерії експлуатуються різні типи літаків, а сектор комерційних гелікоптерів робить свій внесок в економіку, надаючи пошуково-рятувальні послуги та транспортування для морської нафтогазової промисловості;
- NCAA являється єдиним органом регулювання авіації в Нігерії. У частині 5 NigCARS представлені нормативні вимоги для підтримання льотної придатності повітряних суден, що, як очікується, виконуватимуть польоти в Нігерії відповідно до SARPS та містяться у додатках 6 та 8 ІКАО;
- Частина М ІКАО є обов'язковою експлуатаційною ліцензією для експлуатантів ПС і містить мінімальні вимоги до технічного обслуговування та льотної придатності;
- MRBR складає основу програми ТО, яка є частиною затвердженої системи ТО і повинна перевірятися кваліфікованими інженерами щодо її придатності не рідше одного разу на рік;
- Експлуатанти в Нігерії зазвичай слідуєть філософії ТО ПС MSG-2 або MSG-3.

2. Оптимізація ТО ПС — це багатоцільове рішення, спрямоване на максимізацію доходів за рахунок підтримки високої доступності за одночасного зниження витрат. Багато дослідників запропонували і протестували низку методів, заснованих на аспектах процесів ТО ПС, таких як планування, складання графіків, розподіл завдань ТО, маршрутизація ТО ПС, запасні частини, управління персоналом і навичками, використання даних прогнозування ПС і управління станом та моделі надійності. Аналіз цих моделей дозволяє зробити такі висновки:

- Недостатня увага приділяється використанню моделей теорії надійності, машинного навчання, передбачуваної аналітики, регресійних моделей та теорій ймовірності і статистики для оптимізації ТО ПС. Ця концепція Четвертої промислової революції формують основу для прогнозного ТО ПС на основі даних, яка в найближчому майбутньому стане основою для виконання завдань з ТО ПС.
- Недостатня увага приділяється розумінню взаємодії між рівнями надійності та історичними тенденціями несправностей та відмов. Це особливо важливо, оскільки системи та компоненти можуть мати характерну відмову, а їх надійність може змінюватись в залежності від попередніх планових перевірок та ремонтів. Крім того, глибоке розуміння цієї взаємодії значно покращить проєктування, виробництво та експлуатацію ПС.
- Практично не проводяться наукові дослідження для пошуку вирішення проблеми значно більших витрат на ТО ПС у Нігерії та регіоні Західної Африки для підтримання льотної придатності.

3. Слушна нагода для початку цього дослідження, присвяченого оптимізації процесів ТО ПС для підтримання льотної придатності ПС в Нігерії, для проведення простого числового аналізу надійності з використанням даних про щоденні операції повітряних суден. Цей аналіз виявив такі проблеми:

- найменш надійні авіаційні системи чи конструкції для кожного типу парку ПС, що аналізується;
- динаміка інтенсивності відмов кожного типу ПС та його положення на кривій «ванни».

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ І СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИЙ СУДЕН

Як показано у розділі 1, технічне обслуговування складає 10-20% вартості експлуатації повітряних суден. Цей показник значно вищий у західноафриканському регіоні, причому є найвищим показником у Нігерії, отже, є необхідність моделей оптимізації ПС. Окрім того, огляд літератури, пов'язаної з оптимізацією ТО ПС, показує відсутність моделей, заснованих на теорії надійності, прогнозної аналітики, регресії, машинному навчанні, ймовірності та теорії статистики. У цьому розділі досліджується розробка моделей та алгоритмів оптимізації ТО ПС на основі принципів цих теорій та їх достовірності. Як зазначено у розділі 1, термін «відмова» відноситься до несправностей та відмов компонентів, підсистем, систем або конструкцій літака.

2.1. Використання щоденних даних про польоти повітряних суден для алгоритмів статистичної обробки даних

Повітряне судно складається з мільйонів деталей, які збираються по всьому світу та збираються у надзвичайно складному процесі. Його ЖЦ складається із чотирьох етапів. Перший етап призначений для проектування та розробки, що складається з планування та концептуального проектування, попереднього проектування та системної інтеграції, детального проектування. Другий етап – це етап виробництва та/або виготовлення ПС. Третій етап – експлуатація, а завершальний етап – утилізація ПС. Найтриваліша фаза — це етап експлуатації, де генерується більшість статистичних даних у ЖЦ ПС. Тільки на етапі експлуатації авіоніки та систем управління польотом літак генерує безліч даних у режимі реального часу, які збираються, передаються та обробляються з використанням 70-ти мільйонів рядків коду та 18-ти мільйонів рядків коду [12-13].

Останні дослідження показують, що алгоритми статистичної обробки даних можуть бути пов'язані з інтелектуальними інформаційними технологіями, які можуть бути реалізовані для підвищення ефективності [6-10]. Алгоритми статистичної обробки даних можуть бути використані для підвищення ефективності експлуатації ПС за наявності, в якості вихідних, даних діагностичних змінних та параметрів надійності [11]. У загальному випадку тренди цих змінних і параметрів є нестационарними випадковими процесами [97]. Тренди містять квазістационарні інтервали часу нормальної експлуатації елементів та систем ПС. На етапі зносу авіаційних систем відбуваються зміни статистичних характеристик тенденцій, що спостерігаються. Такі зміни можуть відбуватися з різних причин: помилки персоналу, старіння вузлів, систем та ін. [98-100]. Алгоритми статистичної обробки даних, що ґрунтуються на принципах штучного інтелекту, оцінюють час можливої відмови з метою його запобігання на основі правильних та своєчасних оперативних дій [101]. Задля реалізації цих принципів можна використовувати операційну систему (ОС). Структурна схема операційної системи літального апарату з використанням принципів штучного інтелекту представлена на рис. 2.1.

Згідно рис. 2.1 ОС ПС являє собою організацію систем, що включає обладнання, засоби, організаційну структуру, процеси, персонал, документацію, ресурси, інформаційні технології і та ін. Блок 1 і 2 - міжнародні і національні регулятори, блок 3 - для пасажирів і вантажів . Блок 4 є ключовим компонентом безпеки польотів, блоки 5–9 визначають та підтримують рівні надійності та ефективності бортових систем. Блок 10 забезпечує адаптивне керування роботою в умовах апріорної невизначеності [102-104]. ОС ВС містить підсистеми, що оцінюють якість ТО та експлуатації. Результати цієї оцінки використовуються для розробки та реалізації ПрТО та ПТО. Крім того, ОС базується на принципах штучного інтелекту, що дозволяє обробляти великі потоки даних. Це створює організаційну структуру, яка забезпечує необхідні рівні безпеки польотів, надійності та готовності ПС.

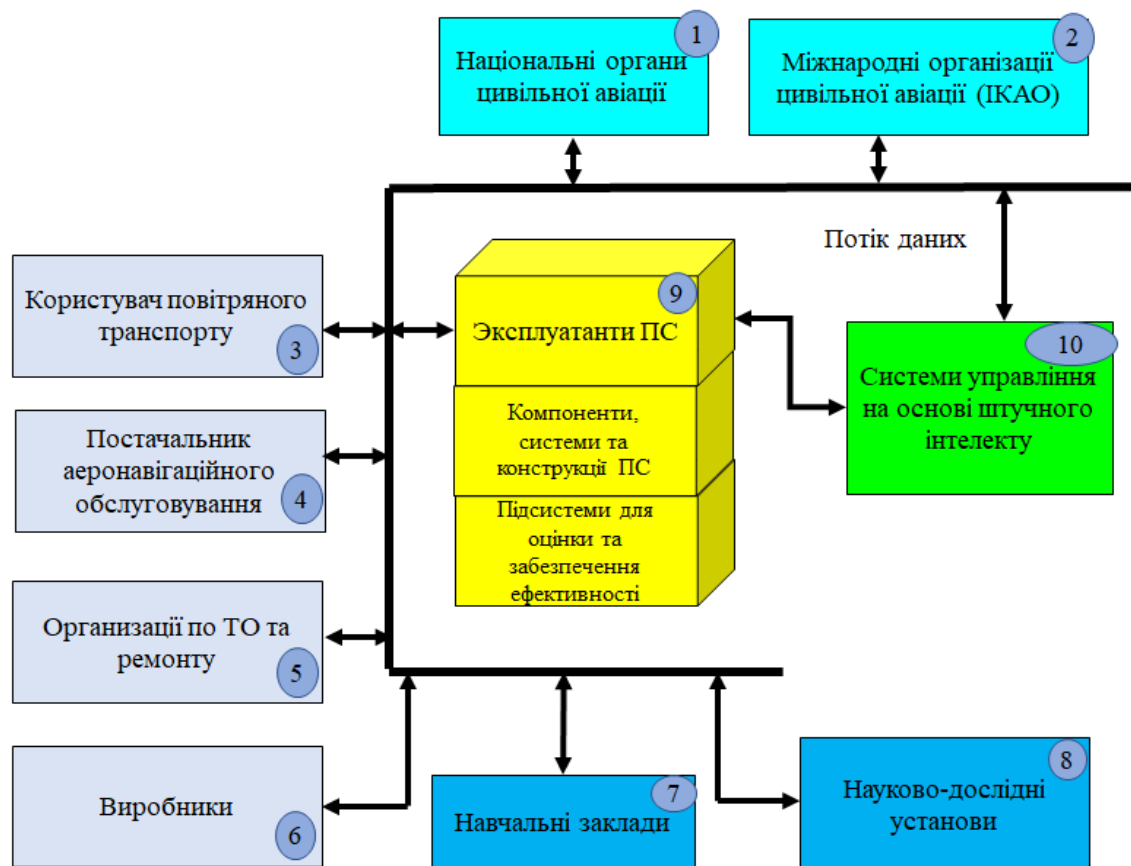


Рис 2.1. Структурна схема операційної системи повітряних суден

Дані, що отримані на етапі експлуатації життєвого циклу літака, можуть використовуватися для розробки наступних алгоритмів обробки даних:

- Алгоритми розробки математичних моделей.
- Алгоритми оптимізації інтервалів завдань ТО ПС.
- Регресійний аналіз.
- Алгоритми виявлення.
- Алгоритми оцінки.
- Діагностика.
- Адаптивний моніторинг.
- Аналіз гетероскедастичності.
- Кореляційний аналіз.

- Евристичні алгоритми.
- Прогностика [105].

Це доводить, що великі масиви даних – реальність сучасної аерокосмічної техніки [12]. Таким чином, дане дослідження зосереджено лише на перших трьох алгоритмах обробки даних з використанням вхідних даних зі звітів персоналу ТО та пілотів для різних парків ПС у Нігерії, показаних у першому розділі.

Огляд моделей

Початковим кроком у вивченні інформаційної системи літального апарату є формулювання моделі, на основі якої можна робити прогнози щодо поведінки системи [105]. Побудова моделі включає формулювання цільової функції, яка є математичною функцією змінного рішення [106]. Згідно з [107] та [108], існують три типи моделей:

- іконічні моделі, що візуально представляють деякі аспекти системи;
- аналогові моделі, які використовують один набір властивостей для представлення іншого набору властивостей, якими володіє система, що вивчається;
- абстрактні моделі, які вимагають математичних чи логічних операцій та формулюють вирішення проблеми.

У контексті даної дисертації моделі означають абстракцію компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС (КПСКПС), яка може забезпечити основу для оптимізації процесів ТО ПС.

У цьому дослідженні пропонуються моделі, що базуються на аналітичних, чисельних методах моделювання, які управляються даними та можуть бути масштабовані для інших систем. Точніше, використання стохастичного комп'ютерного моделювання, що часто називається методом моделювання Монте-Карло (MCS), використовується протягом усього дослідження. Комп'ютерне моделювання є важливим інструментом оптимізації робіт з ТО. Останні досягнення в методології моделювання та стохастичної оптимізації у поєднанні зробили моделювання одним із

широко поширених інструментів системного аналізу та дослідження операцій [105]. MCS є одним із трьох методів прогнозування надійності, що широко використовуються в авіаційній галузі. Двома іншими є: а) метод моделювання ланцюгів Маркова; б) комбіновані методи класичного аналізу «дерева відмов» та блок-схеми надійності. MCS - це математичний метод моделювання явищ зі значною невизначеністю. Він виконується на основі випадкових вибірок інтенсивності відмови. Введення випадковості до системи може допомогти вирішити проблеми оптимізації. У кількісному аналізі та прийнятті рішень MCS надає ефективні засоби для обліку ризику за допомогою моделей вибірки діапазону значень із ймовірнісних розподілів [19].

Оптимізація – це математичний процес. Ризики, пов'язані з ТО, можуть бути оцінені за допомогою методів імовірнісного аналізу, оскільки на додаток до проектних змінних, експлуатаційні умови та характеристики ушкоджень мають імовірнісний характер. Невизначеності існують на всіх етапах ЖЦ ПС — імовірнісний аналіз практично враховує всі випадки несправності, а не розглядає їх у найгірших сценаріях. Отже, при достатньому проектуванні та наявних даних, плани ТО можуть бути оптимізовані, що призведе до зниження витрат за умови збереження прийнятного рівня ризику [109]. Для оцінки загальних характеристик надійності авіаційних систем у цьому дослідженні пропонуються методи, що ґрунтуються на методі Монте-Карло, для оцінки характеристик системи з використанням імовірнісного розподілу критеріїв надійності. Пропоновані математичні моделі засновані на теорії ймовірності та статистики, теорії надійності, прогнозній аналітиці, машинному навчанні та регресійних моделях для оптимізації процесів ТО ПС для підтримання ЛП ПС у Нігерії. У цьому розділі представлені статистичні, імовірнісні та регресійні підходи, які виходять за рамки досвіду MSG-2 та MSG-3. Ці підходи засновані на статистичних даних для визначення оптимальних інтервалів ТО ПС.

2.2. Алгоритми та моделі аналізу надійності елементів, підсистем, систем та конструкцій повітряних суден

При технічному обслуговуванні, орієнтованому на забезпечення заданого рівня надійності (ТООН), майбутні ТО плануються з урахуванням поточного технічного стану системи. ТООН визначається як «методи визначення та вибору стратегії управління відмовами для ефективного та дієвого досягнення необхідної безпеки, доступності та економічності експлуатації» [28]. Це здійснюється на основі: а) статистичних розрахунків та розрахунків надійності роботи системи; б) основних компонентів дій з ПТО та демонтажу. ТООН надає інформацію для планування дій щодо ПТО та ПрТО, тим самим знижуючи експлуатаційні витрати.

Аналіз надійності включає оцінку рівня безпеки системи. Враховуючи ймовірнісну модель (n -мірний випадковий вектор X із щільності ймовірності f_X) та модель продуктивності (функція g), він використовує математичні методи для оцінки рівня безпеки системи у вигляді ймовірності відмови [111]. Метод моделювання Монте-Карло використовує чисельне моделювання функції якості за допомогою моделі ймовірності. Відмова зазвичай визначається як подія $F = \{g(X) \leq 0\}$, а ймовірність відмови визначається як:

$$p_f \equiv \mathbb{P}(\{g(X) \leq 0\}) = \int_{D_f = \{x \in \mathbb{R}^n: g(x) \leq 0\}} f_X(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (2.1)$$

Інженерні проблеми зазвичай пов'язані з невизначеністю. Таким чином, методи надійності надають потужні інструменти для обробки цих невизначеностей на основі функції продуктивності або граничного стану [112].

Огляд літератури показує значні дослідження у сфері розробки стратегій ТО орієнтованих надійність, але є прогалини у створенні математичних моделей визначення характеристичної надійності авіаційних систем з урахуванням оптимізації ТО ПС. Автори [97] розробили модель надійності, яка потенційно може підвищити

ефективність електронних компонентів вітрогенераторів у Чорноморському регіоні. Дані були зібрані під час роботи вітроустановки. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності вітрогенераторів. Їхня робота виявила можливість розробки моделей надійності для інших складних систем і отримана інформація застосовується щодо підходу до моделювання, представленого в цьому дослідженні.

2.2.1. Статистичні імітаційні моделі для аналізу надійності повітряних суден

Численні математичні визначення та розподіл ймовірностей використовуються для виконання різних видів ТО та досліджень надійності. Розподіл Вейбула зазвичай використовується для моделювання втоми чи зношування. Однак на етапі експлуатації будь-якої системи, підсистеми або компонента найбільш поширеним розподілом ймовірностей є експоненційний розподіл, оскільки він легко застосовується в різних типах аналізу інтенсивності відмов компонентів, підсистем та систем протягом терміну їхньої служби. Ймовірність безвідмовної роботи і готовності до режиму, що встановився, для цього розподілу розраховується наступним чином [29]:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2.2)$$

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (2.3)$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}, \quad (2.4)$$

$$MTTR = \frac{1}{\mu}, \quad (2.5)$$

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt. \quad (2.6)$$

де R – надійність у часі t ; λ – інтенсивність відмов; A – доступність у стійкому стані; μ – швидкість ремонту; $MTBF$ – напрацювання на відмову; $MTTR$ – середній час ремонту.

Щільність ймовірності (ЩЙ) експоненційного розподілу визначається виразом

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \text{ якщо } t \geq 0; \lambda > 0, \quad (2.7)$$

де t час, $f(t)$ ЩЙ і λ параметр розподілу, що у дослідженнях надійності відноситься до постійної інтенсивності відмов [29]. Функція розподілу ймовірностей (ФРЙ) виражається як

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(y) dy \quad (2.8)$$

Підставляючи рівняння (2.7) у (2.8), отримуємо вираз для експоненційного розподілу ФРЙ

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda y} dy = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

Враховуючи, що розподілом ймовірностей напрацювання на відмову, що найчастіше використовується, є експоненційний розподіл, тому в даному дослідженні пропонується експоненційний розподіл відмов авіаційних систем і конструкцій для розрахунку показників надійності. Для запропонованої моделі КПСКПС були класифіковані відповідно до системи нумерації АТА. Вхідні дані n_t беруть зі звітів пілота та персоналу ТО парку ПС в Нігерії, що показані у розділі 1. Наступні показники надійності визначаються для кожного розділу АТА з використанням ЩЙ:

- Інтенсивність відмов λ
- Напрацювання на відмову ($MTBF$)
- Кількість відмов на 1000 льотних годин (K_{1000})

Номенклатура параметров представлена на рис. 2.2.

Вхідні дані n_t це $m \times 1$ матриця A . Функція B призначена для ухвалення рішення про відмову, відповідно до класифікації АТА. Значення $B_{i+1}-B_i$ відповідає ймовірності відмови i -го компонента. Функція B_i , названа графіком даних моніторингу (рис. 2.3), використовується для візуального аналізу того, як відбуваються відмови:

$$B_i = \frac{\sum_{j=0}^i A_j}{M}; \quad M = \sum_{i=0}^m A_i \quad i = \{0 \dots m\}. \quad (2.10)$$

Номенклатура параметров и переменных, используемых в моделировании

A: матриця n_T
a: додаткова змінна для розрахунку
i: індекс вихідної матриці
j: додатковий індекс матриці
k: індекс матриці, отриманий під час моделювання
r: індекс кінцевої матриці
m: кількість спостережуваних глав АТА
s: додаткова змінна для розрахунку
x: значення випадкової величини
V_i: сукупна кількість спостережуваних відмов у часі
C: випадкові числа експоненційного розподілу N і λ
D_k: тимчасовий ряд спостережуваних відмов
E_k: випадкове число з рівномірним розподілом у діапазоні 0...1
F_{i,k}: момент часу i -ї відмови системи
M: загальна кількість відмов, що спостерігаються по всіх главах АТА
N: кількість ітерацій
T: сукупний наліт за спостережуваний інтервал
 λ : інтенсивність відмов

Рис. 2.2. Номенклатура параметрів та змінних

Час між відмовами описується експоненційним розподілом із параметром λ і передбачається, що одночасно може відбутися лише одна відмова. Щоб визначити, який компонент АТА 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 $[0; 1]$.

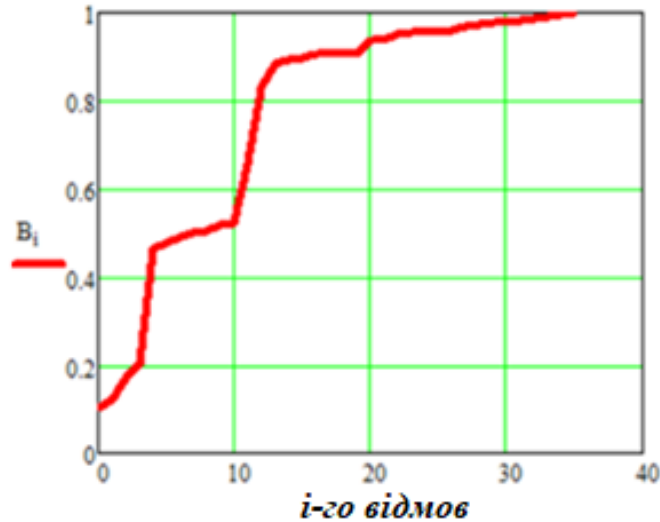


Рис 2.3. Графік даних моніторингу

Наступним кроком є обчислення тимчасових рядів спостережуваних відмов D_k

$$D_k = \sum_{j=0}^k C_j \quad (2.11)$$

де C_j - експоненційний розподіл N та λ .

Момент часу F , коли відбувається i -а відмова, визначається так:

$$F_{0,k} = \begin{cases} D_k & \text{if } E_k \leq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} ; \quad F_{i,k} = \begin{cases} D_k & \text{if } B_{i-1} < E_k \leq B_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} . \quad (2.12)$$

Вихід F є двовимірним масивом, який не можна використовувати для побудови графіків ЩЙ, необхідних для розрахунку параметрів надійності. Таким чином, A_i має вигляд:

$$A_i = \begin{cases} s \leftarrow 0 \text{ for } k \in 0..N-1 \\ \text{if } F_{i-1,k} \neq 0, a_s \leftarrow F_{i-1,k} \\ s \leftarrow s + 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

Із отриманих щільностей розподілення ймовірностей (ЩЙ) аналізуються параметри надійності – λ_i , $MTBF_i$ та K_{1000} . Блок-схему статистичного моделювання представлено на рис. 2.4.

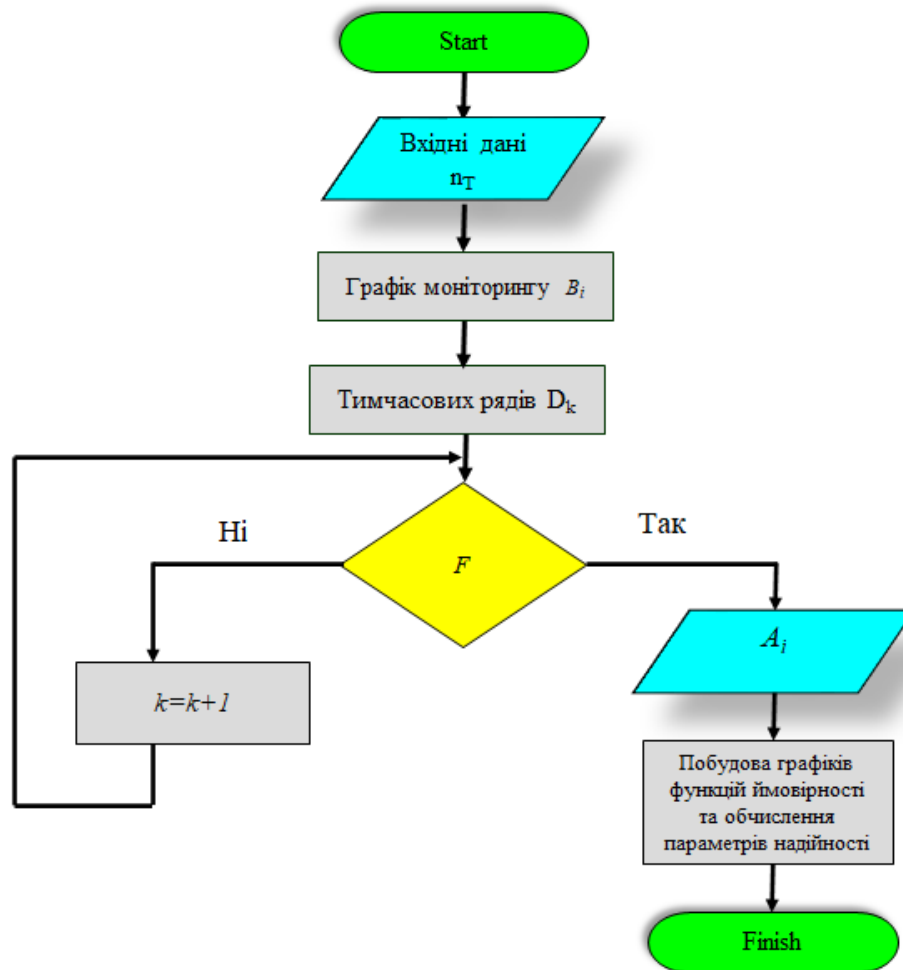


Рис. 2. 4. Блок-схема пропонованого статистичного імітаційного моделювання для аналізу надійності

Адекватність моделі

Пропонована модель ґрунтується на припущенні і для перевірки точності до математичної моделі застосовується критерій згоди, щоб перевірити чи підпорядковується вона експоненційному розподілу. Критерій χ^2 був обраний для перевірки з використанням одного з отриманих ЩЙ, крім того, теоретичний експоненційний розподіл задається як:

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

де λ_{calc} - інтенсивність відмов, розрахована на основі отриманої ЩЙ для кожного розділу АТА; $\phi(t)$ - функція Хевісайда.

Обмеження запропонованої моделі полягає в тому, що вона підходить тільки для мінімального розміру вибірки – 35. Тому в наступному розділі пропонується модель для експлуатації ПС, яка генерує невеликий набір статистичних даних.

2.2.2. Статистична імітаційна модель для аналізу надійності з урахуванням невеликого набору даних

Невеликий набір даних знижує статистичну значущість і накладає обмеження [113], що ускладнює отримання загальних висновків [114]. Невеликий набір даних призводить до низької продуктивності оцінки розробленої моделі. Коли є багато незалежних змінних, модель ускладнюється, а невеликий набір даних робить метод оцінки недійсним. При великому загальному нальоті невеликі набори даних дають великі довірчі інтервали, що передбачає меншу статистичну надійність. Ключовим недоліком використання невеликого набору даних є відсутність статистичної стабільності [115-116]. У конкретних випадках тестування прогностичних моделей невеликих наборів даних є складнішими, оскільки вони не компенсуються великими розмірами ефекту та підривають точні тести з прогностичними моделями [117].

Для невеликого набору даних модель, обрана за інформаційним критерієм Акаїке, виявляється антиконсервативною навіть щодо максимальної частоти помилок типу I максимальної моделі [118]. Можливим розв'язанням проблеми невеликого набору даних є використання попередньо навчених мереж, які також називають трансферним навчанням. Це досягається за рахунок ініціалізації нейронної мережі з вагами, навченими у суміжних галузях, та точного налаштування моделі в даній галузі. Цей підхід прискорює навчання та набув популярності в різних галузях завдяки роботі з нестачею значних вибірок у наборі даних [119], крім того, точний непараметричний тест можна використовувати для подолання проблем, пов'язаних із невеликими

наборами даних під час перевірки гіпотез. Значення p у непараметричних тестах обчислюють точну ймовірність отримання спостережуваних або екстремальних результатів при нульовій гіпотезі [120]. Глибокі згорткові нейронні мережі можна використовувати для порівняння невеликих наборів даних з простою та правильною модифікацією без необхідності перепроєктовувати конкретну невелику мережу [121]. Пропорційний розподіл викидів та невеликий набір даних звужують різницю у продуктивності між моделями у тестовому наборі, тому що переваги та недоліки моделі повністю не розкриті [122]. У разі невеликого набору даних з існуючими викидами запропоновано використовувати узагальнений метод K -найближчого сусіда на основі середньої відстані шляхом введення мультиузагальнених середніх відстаней і вкладеної узагальненої середньої відстані, заснованої на характеристиці узагальненої середньої відстані [123].

Порівняно зі звичайним аналізом Баєсівський підхід до висновку має перевагу в обробці невизначеностей для невеликого набору даних у прогностиці всього парку ПС [124]. Підхід Монте-Карло з баєсовим ланцюгом Маркова дозволяє проводити точну оцінку надійності з використанням методу чисельного моделювання та урахуванням неінформативної апріорної інформації, але працює лише з розміром вибірки не менше десяти [125]. Поєднання змінної важливості в методі проєкційного аналізу та регресійних моделях може бути використане для вирішення проблеми дослідження невеликих наборів даних щодо оцінки вартості літаків авіації загального призначення [126]. Продуктивність декодування показує наскільки результати класифікації відрізняються від результатів, отриманих при суто випадковій класифікації. У задачі класифікації з 2-ма або 4-ма класами рівні ймовірних можливостей становлять 50% або 25% відповідно, але ці порогові значення не виконуються для невеликого набору даних [127].

Пропонована модель аналізу надійності авіаційних систем з урахуванням невеликого набору даних розраховує інтенсивність відмов з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи. Вхідні дані є безперервними статистичними даними x_i з обсягом

вибірки n . Вони також беруться зі звітів пілота та персоналу ТО про відмови спостережуваного інтервалу. Методика знаходження ймовірності безвідмовної роботи полягає у наступному:

Крок 1 Визначити кількість спостережень для апроксимації хвостів $j=1.5\sqrt[3]{x}$. Для апроксимації використовується критерій Шовене із перетворенням такого виду:

$$Q_i = Med. F^{K_i V} \quad (2.14)$$

де Q_i – апроксимована змінна, Med – середнє значення вибірки, F – базисна функція, K_i – квантиль нормального розподілу з нульовим математичним очікуванням та стандартним відхиленням 1, V – коефіцієнт варіації $V = \frac{stdev(x)}{mean(x)}$

Крок 2 Щоб отримати значення нижніх ($y_{i\ lower}$) та верхніх ($y_{i\ upper}$) хвостів, перетворену вибірку (порядок) отримаємо так:

$$y_i = \ln \frac{x_i^{(order)}}{Med}$$

де $x_i^{(order)}$ статистика порядок для вхідних даних x_i .

Крок 3 Обчислення суми першого (δ_1) та останнього (δ_2) випадкові величини з використанням перетвореної статистики порядку задаються як:

$$\delta_1 = \sum_{i=1}^j y_i; \quad \delta_2 = \sum_{i=n-j}^n y_i,$$

де j залежить від розміру вибірки.

Крок 4 Відповідні квантилі стандартного нормального розподілу після перетворення розраховуються за рівнянням Казакавічюса:

$$K_i = 2.0637 \left(\ln \left(\frac{1}{1-p_i} \right) - 0.16 \right)^{0.4274}, \quad (2.15)$$

де p_i – емпіричні ймовірності кожного спостереження порядкової статистики $p_i = \frac{i}{n}$, $i = 0 \dots n$.

Крок 5 Добуток коефіцієнта варіації та суми відповідних квантилів розраховується таким чином:

$$\delta_{K \min} = V \sum_{i=1}^j K_i; \quad \delta_{K \max} = V \sum_{i=n-j}^n K_i$$

Крок 6 Базис перетворення мінімуму (β_1) та максимуму (β_2) визначається за допомогою:

$$\beta_1 = e^{\frac{\delta_1}{\delta_{K \min}}}; \quad \beta_2 = e^{\frac{\delta_2}{\delta_{K \max}}}$$

Крок 7 Розрахунок базисної функції F за такими формулами:

$$F_1(K_i) = \frac{\beta_1 e^{-K_i} + \beta_2 e^{K_i}}{e^{-K_i} + e^{K_i}}, \quad (2.16)$$

$$F_2(K_i) = \beta_1 + b(K_i + K_{sw})_+ - b(K_i - K_{sw})_+, \quad (2.17)$$

$$(K_i - K_{sw})_+ = \begin{cases} 0, & \text{if } K_i < K_{sw} \\ K_i - K_{sw} & \text{if } K_i \geq K_{sw} \end{cases}$$

де K_{sw} значення квантилі, відповідне точці перемикання, b – коефіцієнт, що визначається за формулою.

Крок 8 Обчислення значень змінних Q_1 , Q_2 , Q_3 та побудова графіків:

$$Q_1 = \text{Med. } F_1^{K_i V}$$

$$Q_2 = \text{Med. } F_2^{K_i V}$$

$$Q_3 = \text{mean}(x) \cdot K_i \cdot \text{stdev}(x)$$

Q_1 , Q_2 визначають відмови, використовуючи методологію для невеликої вибірки. Q_3 відповідає моделі експоненційного розподілу, запропонованій у частині 2.2.1.

Крок 9 Графіки використовуються для візуальної перевірки згоди на запроповану модель.

Застосування моделі

Отриманий графік можна використовувати для визначення ймовірності того, що протягом спостережуваного інтервалу, відбудеться *i-та* кількість відмов.

2.3. Математичні моделі для оптимізації інтервалів завдань технічного обслуговування повітряних суден

Оптимізація ТО ПС відноситься до розробки та аналізу математичних моделей для поліпшення стратегії ТО. Протягом останніх років значні дослідження було зосереджено для розробки різних стратегій оптимізації ТО. Однак, огляд відповідної літератури показує, що в жодному дослідженні не пропонувалися моделі надійності, засновані на напрацюванні на відмову за період часу та вартості ТО для підвищення ефективності експлуатації ПС. Це становить основу розробки математичних моделей для оптимізації інтервалів завдань ТО ПС. Ці моделі визначають вартість та вигоди ТО з метою отримання оптимального балансу між ними. Однак обмеження цього дослідження полягає в тому, що були розглянуті лише дві моделі відмов (експоненційна модель та модель Ерланга).

Оптимальний інтервал виконання робіт з ТО ПС важливий, тому що:

- У міру зношування компонентів і систем ПС важливо проводити ТО, що призводить до збільшення експлуатаційних витрат. Отже, необхідний оптимальний інтервал, який врівноважує частоту виконання завдань з ТО ПС і інтенсивність відмов.
- Рішення щодо ТО приймаються на основі результатів аналізу експлуатаційних даних ПС.
- Алгоритм, запропонований у цьому розділі, можна використовувати для оптимізації авіаційних операцій.
- Запропонований алгоритм можна розглядати як частину ОС ПС штучного інтелекту.

2.3.1. Методика оптимізації інтервалу технічного обслуговування повітряних суден

Статистичне моделювання дозволяє досліджувати процеси ТО з урахуванням різних умов експлуатації. Кроки з оптимізації інтервалів ТО авіаційних систем описані як:

1. Аналіз завдань ТО авіаційних систем для визначення параметрів моделей.
2. Розробка базових моделей відмов та аналіз експлуатаційних даних ПС.
3. Параметризація моделей, встановлення допустимих значень параметрів.
4. Визначення показників ефективності ТО систем ПС.
5. Визначення одного чи кількох критеріїв для вимірювання ефективності оптимізованого інтервалу завдань ТО систем ПС.
6. Визначення рівнянь чи алгоритмів з метою оцінки ефективності оптимізованих інтервалів завдань ТО.
7. Обчислення рівнянь для оптимізації інтервалів завдань ТО ПС, що означає розробку алгоритмів знаходження оптимальних значень [128-131].

Ключовою метою цього дослідження є оптимізація інтервалів завдань ПС. Розглянуто завдання з ТО ПС:

- Моніторинг та контроль технічного стану систем ПС.
- Налагодження та ремонт компонентів, підсистем та систем відповідно до нормативних вимог.

Показники ефективності компонентів та систем ПС визначаються як:

- Витрати, які несуть авіакомпанії через відмову компонентів, підсистем та систем ПС.
- Доступність у стійкому стані систем ПС.
- Загальні експлуатаційні витрати.
- Можливість безвідмовної роботи систем ПС [132].

Вибір ЩЙ напрацювання на відмову є початковим етапом математичного моделювання. За підсумками ЩЙ розраховується ефективність процесів ТО. За показник ефективності обрано середні експлуатаційні витрати в одиницю часу, які розраховуються за рівнянням:

$$E(C/T_M) = \frac{E(n/T_M)C_R + C_M}{T_M}, \quad (2.18)$$

де $E(n/T_M)$ очікуване значення кількості відмов, C_R вартість КТО, C_M вартість ПТО, T_M інтервал ТО, який базується на льотних годинах/циклах. Далі розглядаються експоненційна та Ерлангівська математичні моделі напрацювання на відмову.

2.3.2. Математичне моделювання експоненційної моделі часу між відмовами для визначення оптимального інтервалу завдань технічного обслуговування повітряних суден

Щільність ймовірності (ЩЙ) для цієї моделі визначається:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad \lambda > 0, \quad t > 0.$$

Для ЩЙ експоненційної моделі кількість відмов визначається за допомогою розподілу Пуассона:

$$P(n/t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}.$$

Очікувана кількість відмов за інтервал спостережуваного часу систем ПС визначається формулою:

$$E(n/T_M) = \lambda T_M.$$

Рівняння (2.18) можна подати у вигляді:

$$E(C/T_M) = \lambda C_R + \frac{C_M}{T_M}. \quad (2.19)$$

Залежність рівняння (2.19) не містить мінімальних значень, тому що

$$\frac{\partial E(C/T_M)}{\partial T_M} = -\frac{C_M}{T_M^2} \neq 0.$$

Таким чином, для експоненційної моделі напрацювання на відмову оптимальний інтервал виконання завдань ТО неможливий, тому що цей інтервал прагне нескінченності.

2.3.3. Математичне моделювання Ерлангівської моделі часу між відмовами для визначення оптимального інтервалу завдань технічного обслуговування повітряних суден

Щільність ймовірності для цієї моделі визначається:

$$f(t) = \lambda^2 t e^{-\lambda t}, \quad \lambda > 0, \quad t > 0.$$

ЩЙ за час n -ї кількості відмов:

$$f_n(t) = \int_{-\infty}^{i\infty} \left(\int_0^{\infty} \lambda^2 t e^{-\lambda t} e^{iwt} dt \right)^n dw. \quad (2.20)$$

Математичне перетворення рівняння (2.20) дає наступне:

$$f_n(t) = \frac{t^{2n-1}}{(2n-1)!} \lambda^{2n} e^{-\lambda t}.$$

Ймовірність появи n відмов протягом інтервалу часу, що спостерігається, визначає функція розподілу ймовірностей:

$$F_n(t) = \int_0^t f_n(t) dt. \quad (2.21)$$

Розподіл кількості відмов можна розрахувати як

$$P(n/t) = F_n(t) - F_{n+1}(t) = \int_0^t f_n(t) dt - \int_0^t f_{n+1}(t) dt = \frac{(\lambda t)^{2n+1}}{(2n+1)!} e^{-\lambda t} + \frac{(\lambda t)^{2n}}{(2n)!} e^{-\lambda t}.$$

Таким чином, очікувана кількість відмов протягом інтервалу часу, що спостерігається, виражається як

$$E(n/T_M) = \sum_{n=1}^{\infty} nP(n/T_M) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(n \frac{(\lambda T_M)^{2n+1}}{(2n+1)!} + \frac{(\lambda T_M)^{2n}}{(2n)!} \right) e^{-\lambda T_M} = \frac{\lambda T_M}{2} + \frac{e^{-2\lambda T_M}}{4} - \frac{1}{4}.$$

Ефективність (2.18) можна подати у вигляді:

$$E(C/T_M) = \frac{(2\lambda T_M + e^{-2\lambda T_M} - 1)C_R + 4C_M}{4T_M}. \quad (2.22)$$

Рівняння (2.22) аналізується для визначення мінімального значення. Для цього обчислюється похідна.

$$\frac{dE(n/T_M)}{dt} = \frac{-2\lambda C_R T_M e^{-2\lambda T_M} - C_R e^{-2\lambda T_M} + C_R - 4C_M}{T_M^2}.$$

Оптимальний інтервал виконання завдань ТО ПС можна знайти за рівнянням:

$$-2\lambda C_R T_M e^{-2\lambda T_M} - C_R e^{-2\lambda T_M} + C_R - 4C_M = 0. \quad (2.23)$$

У цьому випадку можна використовувати наближене рівняння:

$$e^{-2\lambda T_M} \approx 1 - 2\lambda T_M,$$

де

$$-2\lambda C_R T_M + 4\lambda^2 C_R T_M^2 - C_R + 2\lambda C_R T_M + C_R - 4C_M = 0.$$

тому

$$\lambda^2 C_R T_M^2 - C_M = 0.$$

Оптимальний інтервал завдань ТО визначається:

$$T_{\text{Мopt}} = \sqrt{\frac{C_{\text{М}}}{\lambda^2 C_{\text{R}}}}. \quad (2.24)$$

Рівняння (2.24) є приблизним значенням. Точне рівняння для оптимального інтервалу ТО можна отримати, розв'язавши рівняння (30) на основі функції Ламберта $W(x)$

$$T_{\text{Мopt}} = \frac{-1 - W\left(\frac{4C_{\text{М}} - 1}{C_{\text{R}}}\right)}{2\lambda}. \quad (2.25)$$

2.3.4. Методика визначення оптимального інтервалу виконання робіт із технічного обслуговування повітряних суден

Алгоритм визначення оптимального інтервалу технічного обслуговування повітряних суден представлено на рис. 2.5. Відповідно до математичного аналізу експоненційної та Ерлангівської моделі часу між відмовами, покрокова процедура оптимізації інтервалу завдань технічного обслуговування виглядає наступним чином:

1. Розрахунок ЩЙ тривалості n -ї відмови для будь-якого заданого ЩЙ $f(t)$ на час між відмови з використанням теорії функціонального перетворення випадкових величин

$$f_n(t) = \int_{-i\infty}^{i\infty} \left(\int_0^{\infty} f(t) e^{iwt} dt \right)^n dw ;$$

2. Розрахунок ймовірності $F_n(t)$ для n відмов, які відбулися за інтервал часу, що спостерігається, з використанням рівняння (2.21);
3. Визначення розподілу кількості відмов протягом інтервалу часу, що спостерігається

$$P(n/t) = F_n(t) - F_{n+1}(t);$$

4. Розрахунок очікуваного значення кількості відмов за інтервал часу, що спостерігається T_M

$$E(n/T_M) = \sum_{n=1}^{\infty} nP(n/T_M) ;$$

Аналіз отриманого рівняння ефективності (2.18) дозволяє знаходити значення оптимального інтервалу виконання завдань ТО

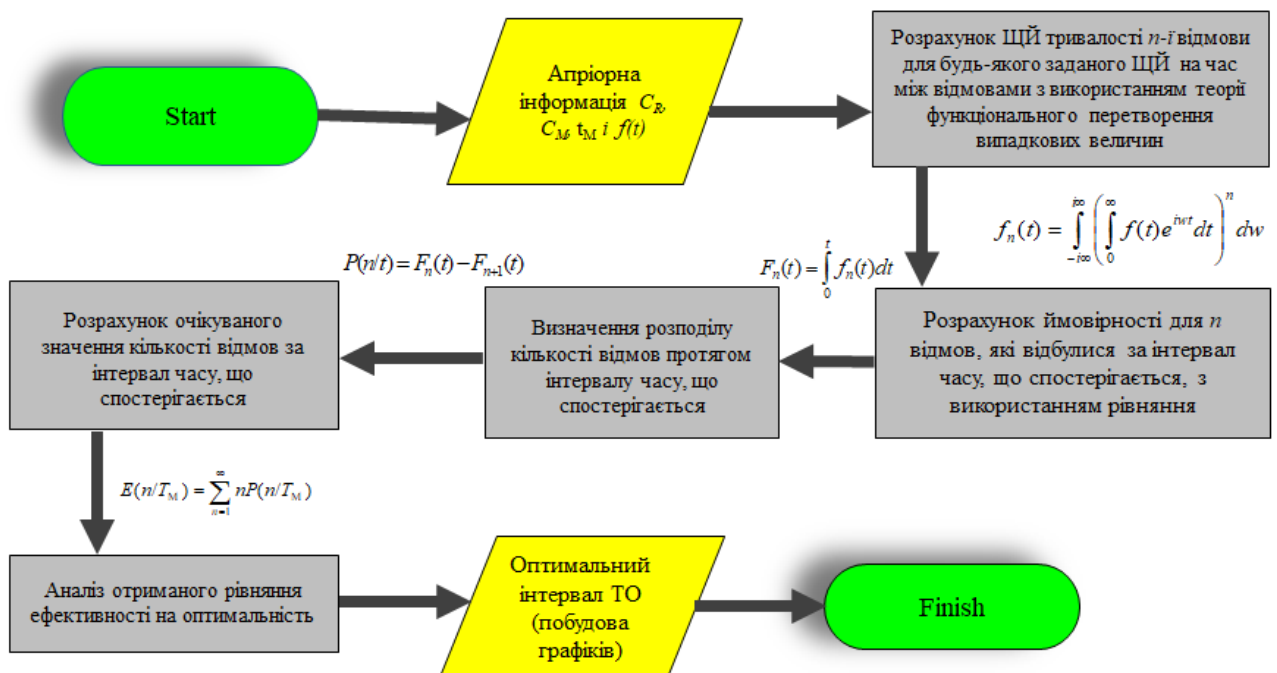


Рис 2.5. Алгоритм визначення оптимального інтервалу технічного обслуговування повітряних суден

2.4. Регресійна математична модель для прогнозування виникнення відмов компонентів, підсистем чи систем повітряних суден

Регресійний аналіз – це простий прогностичний інструмент, який досліджує взаємозв'язок між незалежними та залежними змінними [133]. Регресійні моделі – це

статистичні моделі, у яких ми робимо регресійне припущення [134]. Їх можна інтегрувати для підвищення точності прогнозування відмов авіаційних систем і конструкцій, цим надаючи цінну інформацію для планування ТО. У рамках цього дослідження регресійні моделі використовуються для прогнозування виникнення відмов під час експлуатації ПС з урахуванням визначення оптимального інтервалу ТО систем ПС.

Регресійний аналіз можна також розглядати як набір методів аналізу даних, що допомагають зрозуміти взаємозв'язок між змінними. Зв'язок виражається у формі моделі або рівняння, яке пов'язує залежну змінну або змінну відгуку з однією або декількома пояснювальними або предикторними змінними [135]. Залежна змінна або змінна відгук позначається буквою y і становить особливий інтерес. Незалежні, пояснювальні чи регресорні змінні використовуються для передбачення поведінки Y та позначаються X_1, X_2, \dots, X_k [136]. Зв'язок між y та x_i може бути виражений через функцію f

$$Y \approx f(X_1, X_2, \dots, X_k)$$

Зв'язок між змінною відгуку Y та предикторної змінної X представлено у вигляді лінійної моделі:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2.26)$$

де β_0 і називаються невідомими коефіцієнтами модельної регресії, ε випадкова перешкода чи помилка. Рівняння (2.26) дає прийнятне наближення справжнього співвідношення між Y та X , тобто Y є наближеною лінійною функцією X , а ε вимірює різницю у цьому наближенні. Згідно з вибіркою, що спостерігається, рівняння (2.26) можна записати у вигляді:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad i = \{1, 2, \dots, n\} \quad (2.27)$$

де y_i являє собою i -е значення змінної Y , x_i являє i -е значення змінної-предиктора X , і ε_i є помилкою апроксимації y_i .

2.4.1. Моделі регресійного аналізу для оптимізації технічного обслуговування повітряних суден

Заздалегідь заданих коефіцієнтів для регресійного аналізу немає, оскільки ці розрахунки засновано на експлуатаційних даних ПС. Номенклатура параметрів, що використовуються в регресійному аналізі, представлена таким чином:

a: матриця n

n: розмір зразка

t: точка перемикання

f: ступінчаста функція Хевісайда, що дорівнює 0 до точки перемикання та 1 після точки перемикання

T_i: момент часу відмови

Y: прогнозоване значення, тобто оптимальний льотний час до ТО

X: *i*-та кількість відмов, *i*

Після визначення параметрів наступним кроком є визначення того, яка регресійна модель є оптимальною для прогнозування моменту часу наступної відмови. Для цього тестуються три сегментовані (шматкові) регресійні моделі. Сегментовані регресійні моделі - це моделі, в яких дві або більше ліній з'єднуються в невідомих точках, що називаються точками перемикання та становлять поріг між областями станів [137]. Він поділяє дані різних областей і для кожного з них підбирається функція регресії [135]. Сегментовані регресійні моделі є альтернативним варіантом апроксимації емпіричних кривих. Їх використання в експлуатації ПС дозволяє підвищити коректність розрахунку граничних значень ймовірності виникнення відмов КПСКПС. Розглянуто моделі сегментованої регресії:

- модель квадратично-лінійної сегментованої регресії;
- модель лінійно-лінійної сегментованої регресії;
- модель квадратично-квадратичної сегментованої регресії.

Матриця невідомих коефіцієнтів у моделях сегментованої регресії оцінювалася методом найменших квадратів. Вертикальні відстані являють собою помилки у відповіді, а метод найменших квадратів дає лінію, яка мінімізує суму квадратів

вертикальних відстаней від кожної точки до лінії. Ці помилки можна отримати, записавши рівняння (2.27) у вигляді:

$$\varepsilon_i = y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i, \quad i=1, 2, \dots, n.$$

Сума квадратів цих відстаней може бути записана як

$$S(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2.$$

Значення $\widehat{\beta}_0$ і $\widehat{\beta}_1$, що мінімізують $S(\beta_0, \beta_1)$ визначаються виразом:

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

та

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{y} - \widehat{\beta}_1 \bar{x}$$

$\widehat{\beta}_0$ і $\widehat{\beta}_1$ називаються звичайними оцінками, β_0 і β_1 методом найменших квадратів, оскільки є рішенням звичайного методу найменших квадратів [135].

2.4.2. Модель квадратично-лінійної сегментованої регресії

Модель квадратично-лінійної сегментованої регресії для прогнозування моменту часу чергової відмови КПСКПС має такий вигляд:

$$Y_1(X) = \beta_{0,1} + \beta_{1,1}X + \beta_{2,1}X^2 - \beta_{2,1}(X - m)^2\phi(X - m). \quad (2.28)$$

У цій моделі використовуються два сегменти, з'єднані разом у точці перемикання m , і три невідомі коефіцієнти $\beta_{0,1}$, $\beta_{1,1}$ та $\beta_{2,1}$. Використовуючи звичайний метод найменших квадратів, невідомі коефіцієнти розраховуються так:

$$\begin{bmatrix} \beta_{0,1} \\ \beta_{1,1} \\ \beta_{2,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n i & \sum_{i=1}^n i^2 - \sum_{i=m}^n (i-m)^2 \\ \sum_{i=1}^n i & \sum_{i=1}^n i^2 & \sum_{i=1}^n i^3 - \sum_{i=m}^n [(i-m)^2 i] \\ \sum_{i=1}^n i^2 - \sum_{i=m}^n (i-m)^2 & \sum_{i=1}^n i^3 - \sum_{i=m}^n [(i-m)^2 i] & \sum_{i=1}^n i^4 - 2 \sum_{i=m}^n [(i-m)^2 i^2] + \sum_{i=m}^n (i-m)^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n T_i \\ \sum_{i=1}^n T_i i \\ \sum_{i=1}^n (i^2 T_i) - \sum_{i=m}^n [(i-m)^2 T_i] \end{bmatrix}$$

2.4.3. Лінійно-лінійна шматково-регресійна модель

Функціональна залежність (2.29) для моделі лінійно-лінійної сегментованої регресії також використовує два сегменти, що з'єднані між собою у точці перемикання m .

$$Y_2(X) = \beta_{0,2} + \beta_{1,2}(X) + \beta_{2,2}(X - m)\phi(X - m) \quad (2.29)$$

Невідомі коефіцієнти $\beta_{0,2}$, $\beta_{1,2}$ та $\beta_{2,2}$ розраховуються так:

$$\begin{bmatrix} \beta_{0,2} \\ \beta_{1,2} \\ \beta_{2,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n i & \sum_{i=m}^n (i-m) \\ \sum_{i=1}^n i & \sum_{i=1}^n i^2 & \sum_{i=m}^n [i(i-m)] \\ \sum_{i=m}^n (i-m) & \sum_{i=m}^n [i(i-m)] & \sum_{i=m}^n (i-m)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n T_i \\ \sum_{i=1}^n (T_i i) \\ \sum_{i=m}^n [T_i (i-m)] \end{bmatrix}$$

2.4.4. Квадратично-квадратична шматково-регресійна модель

Модель квадратично-квадратичної сегментованої регресії для прогнозування моменту часу чергової відмови системи літака має такий вигляд:

$$Y_3(X) = \beta_{0,3} + \beta_{1,3}X + \beta_{2,3}X^2 + \beta_{3,3}(X - m)\phi(X - m) + \beta_{4,3}(X - m)^2\phi(X - m). \quad (2.30)$$

П'ять невідомих коефіцієнтів $\beta_{0,3}$, $\beta_{1,3}$, $\beta_{2,3}$, $\beta_{3,3}$ та $\beta_{4,3}$ розраховуються так:

$$\begin{bmatrix} \beta_{0,3} \\ \beta_{1,3} \\ \beta_{2,3} \\ \beta_{3,3} \\ \beta_{4,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n i & \sum_{i=1}^n i^2 & \sum_{i=m}^n (i-m) & \sum_{i=m}^n (i-m)^2 \\ \sum_{i=1}^n i & \sum_{i=1}^n i^2 & \sum_{i=1}^n i^3 & \sum_{i=m}^n [i(i-m)] & \sum_{i=m}^n [i(i-m)^2] \\ \sum_{i=1}^n i^2 & \sum_{i=1}^n i^3 & \sum_{i=1}^n i^4 & \sum_{i=m}^n [i^2(i-m)] & \sum_{i=m}^n [i^2(i-m)^2] \\ \sum_{i=m}^n (i-m) & \sum_{i=m}^n [i(i-m)] & \sum_{i=m}^n [i^2(i-m)] & \sum_{i=m}^n (i-m)^2 & \sum_{i=m}^n (i-m)^3 \\ \sum_{i=m}^n (i-m)^2 & \sum_{i=m}^n [i(i-m)^2] & \sum_{i=m}^n [i^2(i-m)^2] & \sum_{i=m}^n (i-m)^3 & \sum_{i=m}^n (i-m)^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n T_i \\ \sum_{i=1}^n (T_i i) \\ \sum_{i=1}^n (T_i i^2) \\ \sum_{i=m}^n [(i-m)T_i] \\ \sum_{i=m}^n [(i-m)^2 T_i] \end{bmatrix}$$

На третьому етапі регресійного аналізу значення оптимальної точки перемикання m вибирається для кожної моделі на основі відповідного найменшого значення стандартного відхилення σ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-l} \sum_{i=1}^n (T_i - \hat{Y})^2},$$

де l - ступінь свободи для кожної з вибраних моделей, \hat{Y} відповідає змінній відгуку для кожної з моделей шматкової регресії, тобто $Y_1(X)$, $Y_2(X)$ та $Y_3(X)$.

За спостереженнями m та σ розраховуються оптимальні значення точки перемикання трьох моделей шматкової регресії. Модель сегментованої регресії, яка має найменше значення m , вважається оптимальною моделлю для прогнозування льотної години, при якому в системі, що спостерігається, може відбутися відмова. Для кожної моделі також будується парабола (m, σ) , що підтверджує вибір оптимальних значень m та відповідної моделі сегментованої регресії.

2.5. Математичні моделі для прогнозування запасних частин до повітряних суден

Мільярди доларів нині витрачаються на високотехнологічні ПС з урахуванням стійкої авіації. Системи ПС дуже складні та витончені через велику кількість функцій та компонентів. Поведінка авіаційних систем при відмові та ремонті може бути прямо чи опосередковано пов'язана з тисячами різних наслідків для безпеки польотів та/або очікуваної надійності. Таким чином, діяльність з планування, проектування, управління, контролю та оптимізації питань ТО є дуже важливою темою в експлуатації ПС.

Запасні частини і ТО тісно пов'язані між собою, оскільки дії з ТО створюють потребу в запасних частинах – запаси запасних частин служать для планування ТО. Запасні частини становлять 60-80% витрат на ТО [138], а 80% простоїв викликано

недостатнім устаткуванням [139]. Надмірна кількість запасних частин призводить до високих витрат на утримання та перешкоджає грошовим оборотам, у той час як неякісні запасні частини можуть призвести до дороговартісного скасування або затримки рейсів. Це вкрай негативно позначиться на роботі авіакомпанії. Індустрія запасних частин для ПС унікальна через поєднання ринкових характеристик, таких як: непередбачуваність попиту; висока вартість простоїв, пов'язаних із запчастинами; відстежуваність деталей з міркувань безпеки та глобальна потреба в запчастинах [72]. Складність управління запасними частинами збільшила частку витрат на закупівлю та зберігання в експлуатації ПС. Згідно статистики TeamSAI, світова індустрія цивільної авіації нині зберігає запасні частини на суму близько 50-ти мільярдів доларів, що становить приблизно 75% товарно-матеріальних запасів авіакомпаній та 25% оборотного капіталу. Однак, оборотність та коефіцієнт використання більшості запасних частин для цивільної авіації невисокі, використовується лише 25%, та навіть більше, існує проблема їх надмірного запасу [71]. Запасні частини для ПС поділяються на три категорії: 1) запасні частини, які можуть використовуватися в будь-яких типах ПС та класифікуються як запасні частини, що обертаються; 2) запасні частини з характеристиками, аналогічними оборотним запасним частинам, але з нижчою ціною та названі ремонтпридатними запасними частинами; 3) запасні частини, які можна використовувати лише один раз, що класифікуються як неремонтпридатні або витратні запасні частини [140].

Компоненти та деталі ПС мають власну надійність та інтенсивність відмов. На додаток до цього застосовуються різні стратегії підвищення надійності авіаційних систем. Ці стратегії включають, окрім іншого, резервування системи та використання списку мінімального обладнання (MEL). MEL – це список, який не дозволяє виконувати польоти ПС за певних умов, коли конкретне обладнання, система або компонент не працює. У ньому вказується перелік обладнання, систем чи компонентів, які мають бути у робочому стані, щоб ПС вважалось придатним до польотів [141]. У Нігерії більшість операторів планують резервні запаси на основі MEL – предмети, що

не відповідають MEL, зберігаються в запасах, але з урахуванням логістичних факторів та стохастичного характеру збоїв, простоїв та затримок через відсутність запасних частин. Тому важливо мати модель, яка враховує інтенсивність збоїв/відмов різних компонентів та систем. Це покращить програму технічного обслуговування та зведе до мінімуму експлуатаційні витрати.

У цій дисертації пропонуються моделі та формули для оптимального планування запасних частин. Розроблено алгоритм оптимального прогнозу попиту (достатності) запасних частин із використанням комбінації аналітичних підходів. Моделі прив'язані до частоти збоїв/відмов та ймовірності безвідмовної роботи, розрахованої на основі реальних даних. Інтенсивність відмов дає надійну інформацію для точного прогнозування потреби у запасних частинах. Моделі можна комбінувати задля досягнення оптимального результату.

2.5.1. Моделі керування запасними частинами, орієнтовані на надійність

Прогнозування попиту на запасні частини може бути складним завданням, оскільки попит носить стохастичний характер. Однак гарне знання тенденцій та розподілу відмов може забезпечити оптимальні рішення. Прогноз запасних частин може бути значно покращений, якщо він ґрунтується на тенденціях та історії відмов. Моделі, описані в цьому розділі, забезпечують ефективне керування запасами запасних частин для надання ефективних послуг з ТО ПС. У контексті розроблених моделей передбачається, що елементи є неремонтопридатними та не вказані у MEL. Моделі орієнтовано на взаємозв'язок між інтенсивністю відмов ПС та наявністю запасних частин.

Метод Пуассона заснований на розподілі Пуассона і передбачає можливість рідкісної події. При використанні прогнозування запасних частин він забезпечує оцінку ймовірності споживання при фіксованій вартості запасних частин [142]. Попит на запасні частини, що виникає через дії ТО, описується розподілом Пуассона за

умови, що кількість подій, які відбуваються в одному інтервалі, не залежить від подій, що відбуваються в будь-якому іншому інтервалі [143].

З урахуванням параметрів надійності авіаційних систем та складових частин розподіл Пуассона може бути виражений таким чином:

$$f(x; \lambda, t) = \frac{(\lambda t)^x e^{-\lambda t}}{x!}, \quad (2.31)$$

де λ — інтенсивність відмов, t — інтервал часу, що спостерігається, а x — кількість відмов, тобто кількість необхідних запасних частин. Сукупна ймовірність максимального споживання запасних частин x визначається виразом:

$$F(x; \lambda, t) = \sum_{k=0}^x \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}. \quad (2.32)$$

Для запропонованих моделей зроблено такі припущення:

- комплектуючі вироби вважаються неремонтопридатними;
- надійність компонента, що підлягає резервуванню, виражається як інтенсивність відмов λ або обернена величина МТBF;
- кількість комплектуючих виробів, встановлених на ПС $N = 1..19$. Значення N має за основу інформацію про планування ТО Boeing 737-300/400/500 [144] – максимальне значення кількості компонентів дорівнює 19;
- ймовірна швидкість заповнення, тобто ймовірність наявності запасної частини в запасах при необхідності $P = 0,90..0,95$;
- кількість ПС, що обслуговуються запасом запчастин $A = 1..50$;
- підтримуваний період експлуатації у календарному часі (місяці) $T = 1..12$;
- Середнє використання ПС U у льотних годинах за місяць.

Модель №1

Кроки для моделі прогнозування запасних частин:

1. Виберіть авіаційну систему для подальшого аналізу її компонентів щодо параметрів надійності. Передбачається, що авіаційна система складається з k одночасно працюючих неремонтопридатних компонентів, розташованих у паралельній мережі, як показано на рис. 2.6 нижче.

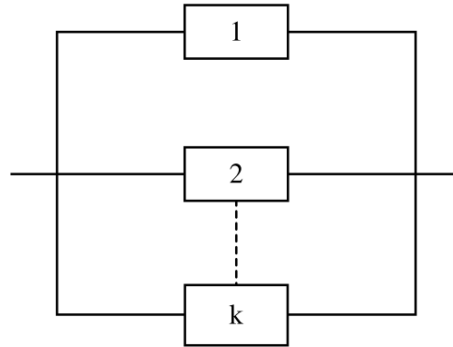


Рис. 2.6 – Блок-схема паралельної системи k -компонентів

2. Вхідні дані $m \times 1$ матриці λ .
3. Вхідні дані $m \times 1$ матриці x – для неремонтопридатної деталі ПС x дорівнює кількості відмов за інтервал, що спостерігається.
4. Ймовірність необхідної мінімальної кількості k запчастин у разі відмов i -го компонента виражається як:

$$P_{k,i} = \sum_{x=0}^k \frac{(\lambda_i t)^x e^{-\lambda_i t}}{x!}. \quad (2.33)$$

5. Результатом P являється таблиця, яка дозволяє обчислити кількість необхідних складових частин, які повинні зберігатися у запасах для відповідної ймовірності заповнення.

Модель №2

У другій моделі прогнозування попиту на запасні частини ймовірність того, що за проміжок часу t та інтенсивності відмов λ_i , кількість відмов x_i (що дорівнює n_i запасних частин) виражається формулою Пуассона:

$$Pn_i(t) = \frac{(\lambda_i t)^{n_i}}{n_i!} e^{(-\lambda_i t)}, \quad (2.34)$$

де $n_i = \{1, 2, 3, \dots\}$. Формула (2.34) відповідає експоненційному закону та виражається у вигляді:

$$P_{n_i=0} = e^{(-\lambda t)}.$$

Ймовірність того, що наявних запасних частин буде достатньо для експлуатації ПС, визначається як

$$P_i(t) = \sum_{n_i=0}^{n_i} \frac{e^{(-x_i)} x_i^{n_i}}{n_i!}. \quad (2.35)$$

Функція $P_i(n_i, x_i)$ для розрахунку необхідної кількості запасних частин n_i будується у вигляді номограми за λ_i кожного елемента аналізованої системи ПС.

Адекватність моделі

Для обох моделей проводиться аналітична перевірка згоди з використанням методу Монте-Карло для вихідних даних P (рівняння 2.33) та номограми (рівняння 2.35). Для кожної i -ї компоненти знайти перше значення, для якого ймовірність $P = 0,90$ (або будь-яку цифру $0,80 \dots 0,95$), вибрати відповідну k кількість запасних і позначити це як $m = k + 1$. Для моделювання $M = 10000$ ітерацій процес моделювання виглядає таким чином:

Крок 1 $B_j = \sum_{i=0}^{m-1} A_{i,j}$ де $A_{i,j}$ є експоненціальним розподілом $[1, \lambda_i]$

Крок 2 $C_j = \begin{cases} 1 & \text{if } B_j > t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$

Крок 3 $P = \frac{\sum_{j=0}^{M-1} C_j}{M}$

Значення P_i відповідає значенню у вихідній таблиці P та номограмі. Це доводить, що обидві моделі є точними і можуть використовуватися для прогнозування попиту на

запасні частини для компонентів ПС, крім того, результати обох моделей для кожної інтенсивності відмов λ_i повинні бути однаковими.

Висновки до розділу 2

1. На етапі експлуатації ПС генерується більшість статистичних даних у ЖЦ ПС, які можна використовувати для створення алгоритмів обробки статистичних даних підвищення ефективності експлуатації ПС. Це становить основу даного розділу для розробки математичних моделей та алгоритмів оптимізації процесів ТО ПС для підтримання ЛП.
2. У підрозділі 2.2.1 була розроблена статистична імітаційна модель, заснована на експоненційному розподілі, для аналізу надійності компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС з набором даних > 35 .
3. У підрозділі 2.2.2 розроблена статистична імітаційна модель для аналізу надійності компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС з набором даних < 35 . Пропонована модель розраховує інтенсивність відмов на основі ймовірності безвідмовної роботи, яка визначається за допомогою рівняння Казакявічюса.
4. Огляд відповідної літератури показує, що в жодному дослідженні не пропонувалися моделі надійності, засновані на часі між відмовами і вартості ТО для підвищення ефективності експлуатації ПС. Це формує основу розробки математичної моделі для оптимізації інтервалів завдань ТО ПС. У підрозділі 2.3 розглянуто експоненційну та ерлангівську моделі. Для експоненційної моделі напрацювання на відмову аналітичні розрахунки показали, що можливості оптимізації інтервалу виконання завдань не існує. З іншого боку, для моделі Ерланга є мінімум, який відповідає оптимальним інтервалам завдань ТО. Ці моделі дозволяють кількісно оцінити вартість та вигоди ТО з метою отримання оптимального балансу між обома параметрами.

5. Застосування моделей сегментованої регресії в експлуатації ПС дозволяє підвищити коректність розрахунку граничних значень ймовірності виникнення відмов у компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС. У підрозділі 2.4 було розроблено три моделі сегментованої регресії: модель квадратично-лінійної сегментованої регресії, модель лінійно-лінійної сегментованої регресії та модель квадратично-квадратичної сегментованої регресії.
6. Запасні частини та ТО ПС тісно пов'язані між собою, оскільки діяльність з ТО створює потребу в запасних частинах та запас запасних частин служить плануванню ТО. Запасні частини становлять 60-80% витрат на ТО, а 80% простоїв викликано недостатністю обладнання. У підрозділі 2.5 розроблено алгоритм оптимального прогнозу достатності авіаційних запчастин із використанням комбінації аналітичних підходів. Запропонована модель заснована на параметрах надійності та розподілі Пуассона.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ ЛЬОТНОЇ ПРИДАТНОСТІ

У розділі 2 були розроблені різні моделі, які можуть стати основою для оптимізованого процесу технічного обслуговування повітряних суден, що базується на прогнозах та керованого даними, крім того, цивільна авіація потребує реалістичності математичних моделей та формулювань завдання оптимізації. Надійність системи, процеси технічного обслуговування та вартість повинні враховуватися на етапах проектування та виробництва життєвого циклу літака. Запропоновані моделі можуть бути основою цього. Достовірність запропонованих моделей перевіряється у цьому розділі з використанням даних про щоденні операції повітряних суден у Нігерії. Для обґрунтування цього підходу дається огляд прогнозного обслуговування повітряних суден на основі даних. Як зазначалося в попередніх розділах, термін «відмова» відноситься до несправностей та відмов компонентів, підсистем, систем або конструкцій повітряних суден. Моделювання оптимізації процесів ТО ПС здійснювалося за програмним продуктом Mathcad - скрипт (додаток 1).

3.1. Прогностичне технічне обслуговування повітряних суден

Найбільш широко застосовуваними стратегіями технічного обслуговування повітряних суден є коригувальні та превентивні дії щодо ТО. Завдання коригуючого ТО пов'язані зі стратегіями обслуговування повністю, тоді як роботи з превентивного ТО виконуються в рамках фіксованого інтервалу заміни, ремонту або відновлення. Воно включає роботи, що виконуються відповідно до стратегії відновлення/ремонту з фіксованим інтервалом і проводяться на основі графіка часу або розкладу на основі машинного запуску, який виявляє, запобігає або пом'якшує деградацію [3]. Цим

традиційним стратегіям ТО ПС не вистачає прогностичної здатності і часто це призводить до того, що ТО виконується занадто рано, тобто до закінчення терміну служби машини або занадто пізно, тобто після дороговартісної відмови [4]. Таким чином, підхід до прогностичного ТО ПС на основі даних та технічного стану призведе до зниження витрат на ТО, уникнення непотрібних превентивних дій ТО та зменшення кількості непередбачених відмов. Поєднання превентивного та прогностичного ТО призводить до скорочення незапланованих простоїв на 18,5% та зменшення кількості дефектів на 87,3%, якщо більше покладатися на прогнозне обслуговування, ніж на превентивне [145].

Прогностичне ТО є одним з основних «стовпів» Четвертої промислової революції (Промисловість 4.0) і в порівнянні з коригуючим і превентивним ТО забезпечує більше економічних вигод. Це виконується як частина стратегії, заснованої на стані, який включає вимірювання стану обладнання та оцінку того, чи не вийде воно з ладу протягом деякого майбутнього періоду. Ранні підходи до превентивного ТО були зосереджені на створених вручну фізичних моделях та евристичних, а останнім часом набирають популярність методи, засновані на даних, оскільки їх можна масштабувати на кілька систем без необхідності спеціальних знань у предметній галузі [146-147]. Хмарні обчислення, ширша доступність даних та моделей, а також інші розробки галузі Промисловість 4.0 змінюють парадигму планування та виконання робіт з ТО. У найближчому майбутньому ТО ПС буде розпочато після виявлення потенційної відмови і, таким чином, завершено до виникнення функціональної відмови. Завдання превентивного ТО визначаються рекомендаціями оригінального виробника обладнання (ОЕМ) та деревами прийняття рішень щодо розробки стратегії, яким є ТО, орієнтоване на надійність, яке враховує характер відмов та їх наслідки [3].

Прогностичне технічне обслуговування повітряних суден на основі статистичних даних

Методи ТО на основі даних виходять зі статистики та методів машинного навчання. Для цілеспрямованого використання методів, керованих даними, структурне

розуміння модельованої поведінки не потрібно, але повинні бути доступні дані про роботу повністю для кожного режиму відмови системи [148]. У праці [4] автори досліджували, як історичні відмови машин і записи про ТО можуть бути використані для визначення майбутніх оцінок відмов машин та приписи щодо покращення планового превентивного ТО. Автори змоделивали проблему, використовуючи марковський процес прийняття рішень з кінцевим горизонтом і ланцюгом Маркова змінного порядку, в якому довжина ланцюга змінюється в залежності від часу, що пройшов з останнього моменту превентивного ТО. Модель припису оптимізації фіксує залежність відмов машини від обох недавніх відмов на додаток до дій щодо превентивного ТО. Щоб покращити прогнозування поведінки машини при відмові, автори об'єднали набори даних за різними класами машин, використовуючи узагальнену лінійну модель Пуассона [4].

У цьому розділі моделі, розроблені в попередньому розділі, будуть застосовані до даних про реальні операції повітряних суден для перевірки запропонованих моделей та підтвердження їх застосування. Для цього дослідження використовується історичний набір даних про відмови ПС, що працюють у Нігерії. Статистичні дані були попередньо оброблені, як показано в розділі 1, але для їх подальшого використання для запропонованих моделей було проведено подальше перетворення для більш зручних форм вхідної інформації. Результати аналізу, описаного в цьому розділі, можуть дати уявлення про майбутні відмови КПСКПС, а тому вони можуть доповнити існуючу стратегію ТО ПС. Це призводить до зменшення відходів, що виникають через раннє обслуговування, та витрат на відмову, пов'язаних з пізнім обслуговуванням [4].

3.2. Аналіз надійності компонентів, підсистем, систем та конструкцій повітряних суден на великому наборі даних

На етапі експлуатації життєвого циклу ПС формуються статистичні дані, які можна використовувати для визначення надійності компонентів та систем ПС. Модель,

заснована на експоненційному розподілі, була описана в попередньому розділі, а методологія наведена на рис. 3.1. Для перевірки моделі були отримані статистичні дані зі звітів пілотів та ТО трьох літаків MD-83 за період експлуатації чотирьох років [149]. Як показано на рис. 3.1, інформація про відмови кожної системи та конструкції літака була згрупована відповідно до системи нумерації АТА – n_T відноситься до загальної кількості відмов, що спостерігаються як пілотами, так і обслуговуючим персоналом за інтервал часу.

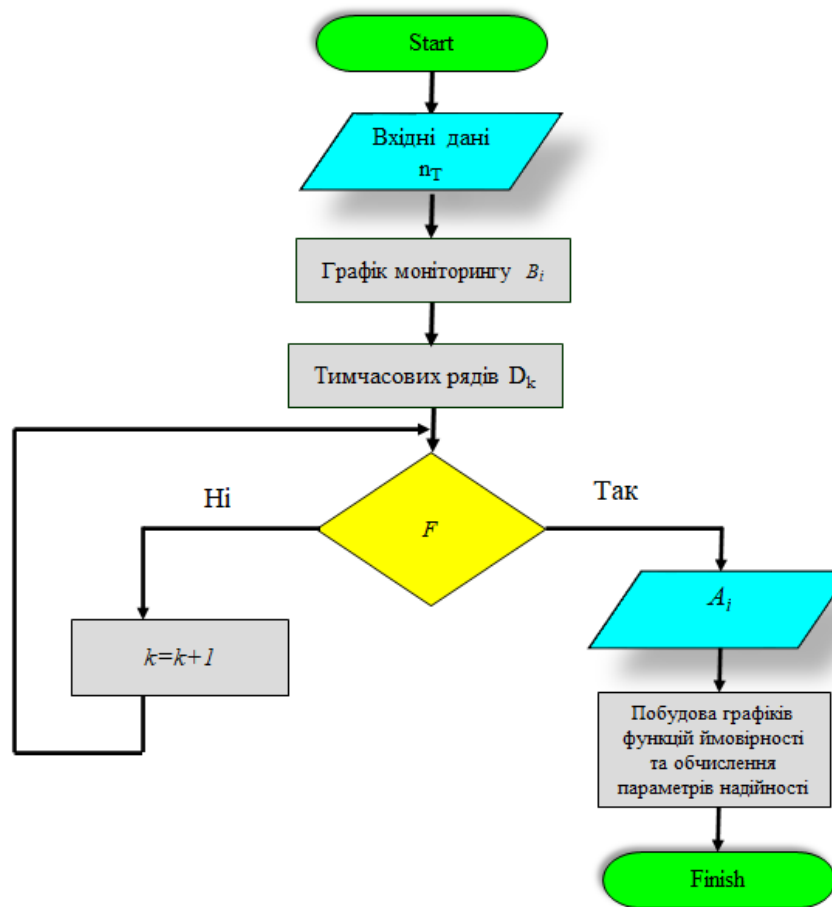


Рис. 3.1. Блок-схема аналізу надійності на основі експоненційного розподілу

Вхідні дані є матрицею n_T , а $B_{i+1}-B_i$ – ймовірність відмови i -го компонента. Значення B_i показано у таблиці 3.2, а графік (рис. 3.2) використовується для візуального аналізу виникнення відмов. Моделювання виконується для 10000 ітерацій і щільність ймовірності будується на основі вихідних даних. Для цього дослідження будуть проаналізовані найбільш відмовляючі глави АТА, тобто глави: 21, 22, 23, 24, 25, 32, 33, 34, 49 і 52.

Таблиця 3.1

Інформація про відмови систем та конструкцій літаків

АТА №	n_T	АТА №	n_T	АТА №	n_T	АТА №	n_T
21	734	30	77	45	1	72	46
22	142	31	30	46	2	73	52
23	321	32	965	49	199	74	12
24	250	33	1239	51	6	75	22
25	1869	34	378	52	113	76	18
26	85	35	73	53	8	77	29
27	104	36	30	56	26	78	21
28	62	38	68	57	3	79	37
29	52	39	1	71	28	80	40

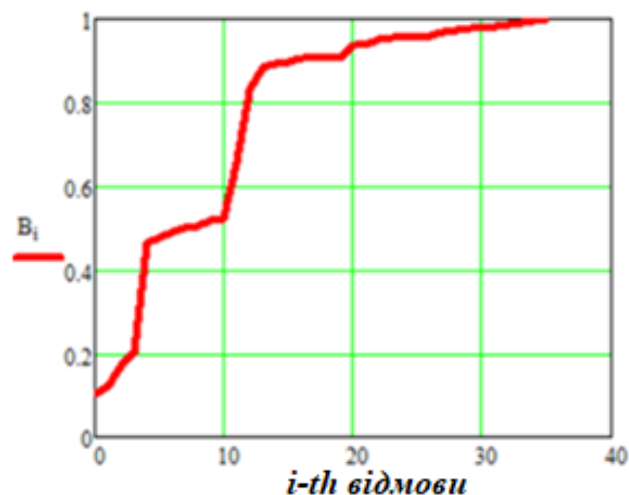


Рис. 3.2. Графік даних моніторингу

Таблиця 3.2

Сукупна кількість спостережуваних відмов у часі B_i

B_i		B_i		B_i		B_i	
B_1	0.103	B_{10}	0.517	B_{19}	0.907	B_{28}	0.968
B_2	0.123	B_{11}	0.522	B_{20}	0.908	B_{29}	0.975
B_3	0.168	B_{12}	0.657	B_{21}	0.935	B_{30}	0.977
B_4	0.203	B_{13}	0.830	B_{22}	0.936	B_{31}	0.980
B_5	0.464	B_{14}	0.883	B_{23}	0.952	B_{32}	0.982
B_6	0.476	B_{15}	0.893	B_{24}	0.953	B_{33}	0.986
B_7	0.491	B_{16}	0.898	B_{25}	0.957	B_{34}	0.989
B_8	0.499	B_{17}	0.907	B_{26}	0.957	B_{35}	0.994
B_9	0.507	B_{18}	0.907	B_{27}	0.961	B_{36}	1.000

Щільність ймовірності (ЩЙ) найбільш відмовляючих глав АТА показана на рис. 3.3-3.12. Показники надійності кожної системи або конструкції ПС розраховуються додатково та показані в таблиці 3.3.

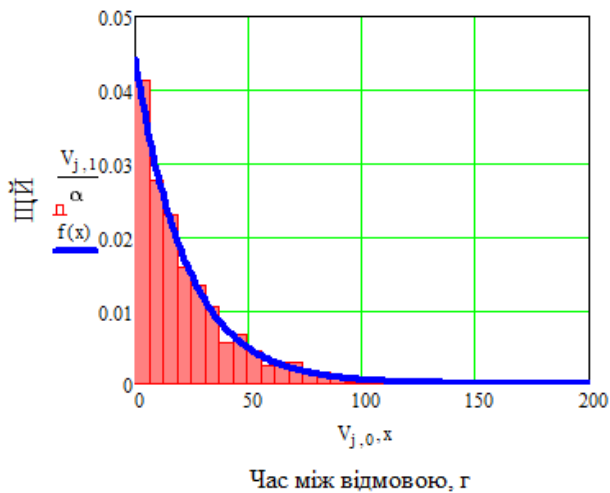


Рис. 3. 3 – ЩЙ часу, що спостерігається, між відмовами в системі кондиціонування повітря

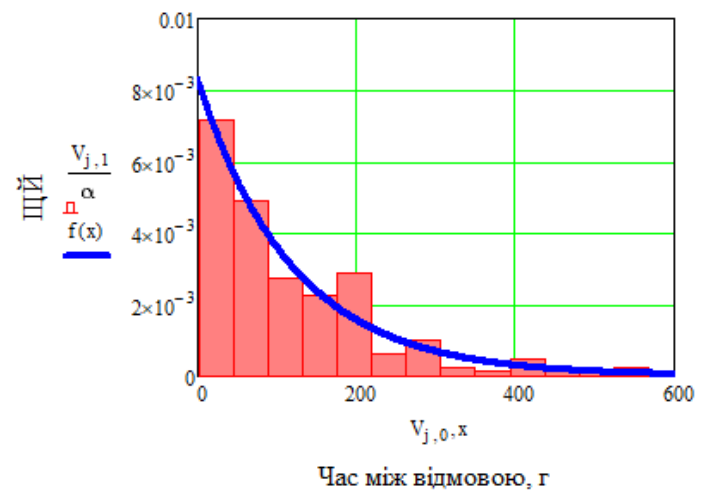


Рис. 3. 4 – ЩЙ часу, що спостерігається, між відмовами в системі автокерування польотом

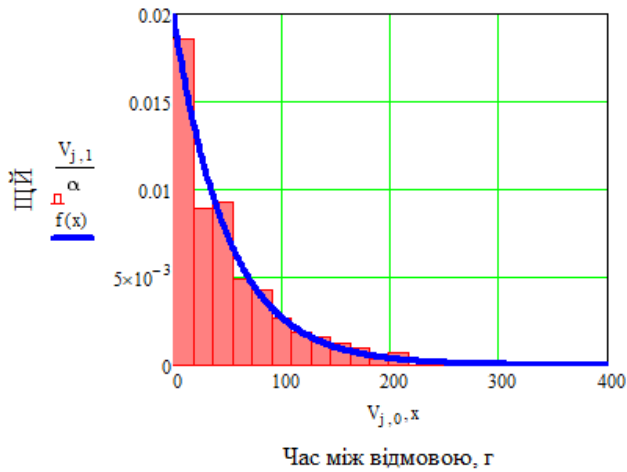


Рис. 3. 5 – ЩЙ часу, що спостерігається, між відмовами в обладнанні зв'язку

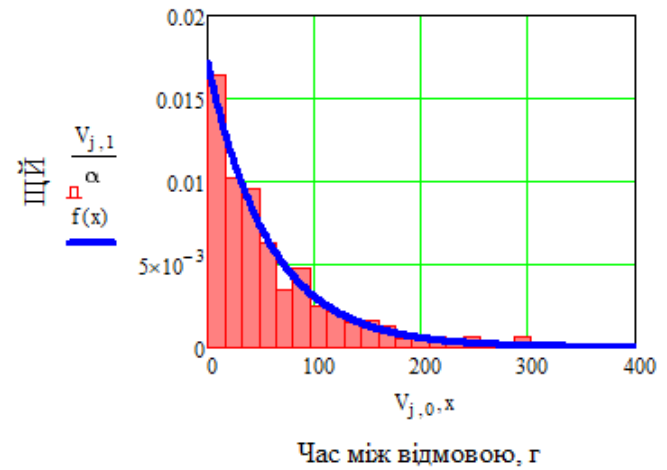


Рис. 3. 6 – ЩЙ часу, що спостерігається, між відмовами в системі електропостачання

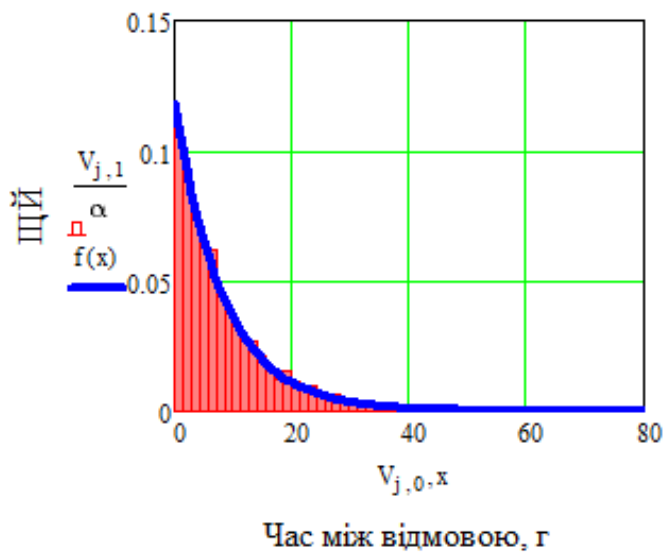


Рис. 3. 7 – ЩЙ часу, що спостерігається, між відмовами у побутовому та аварійно-рятувальному обладнанні

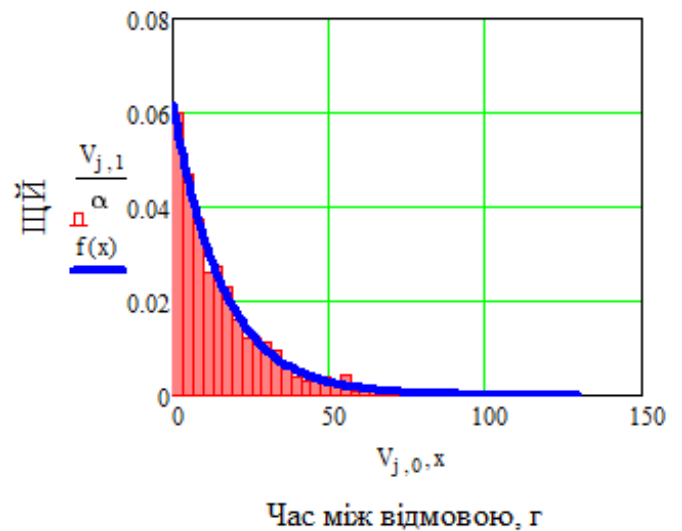


Рис. 3. 8 – ЩЙ часу, що спостерігається, між відмовами у шасі

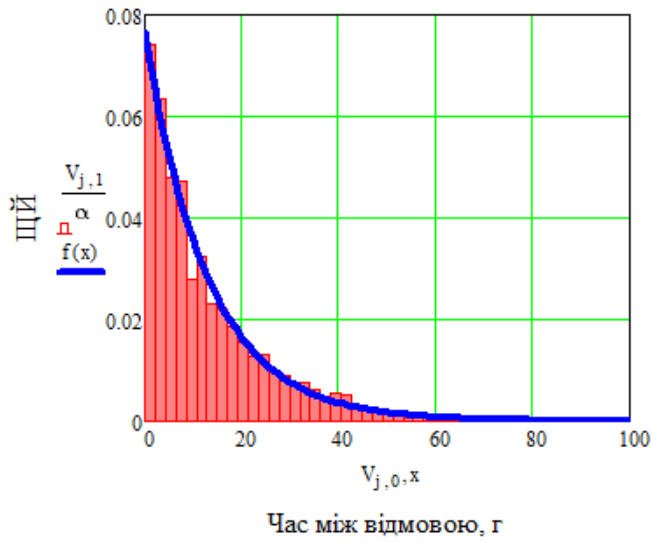


Рис. 3. 9 – ЩЙ часу, що спостерігається, між відмовами освітлення та світлової сигналізації

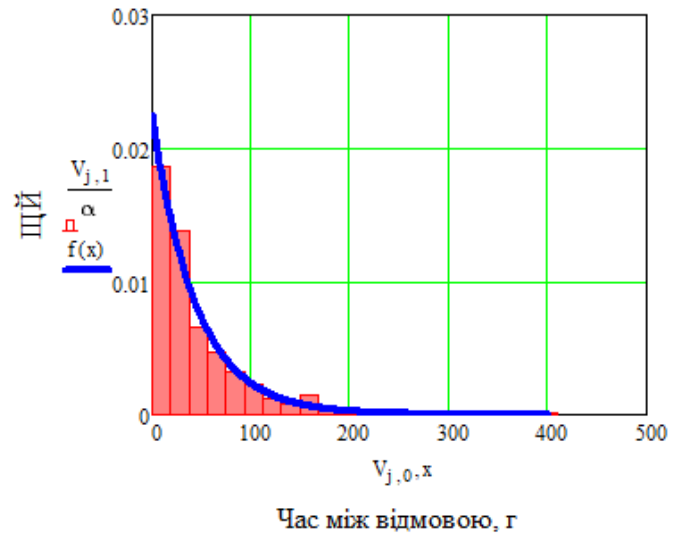


Рис. 3. 10 – ЩЙ часу, що спостерігається, між відмовами пілотажно-навігаційного обладнання

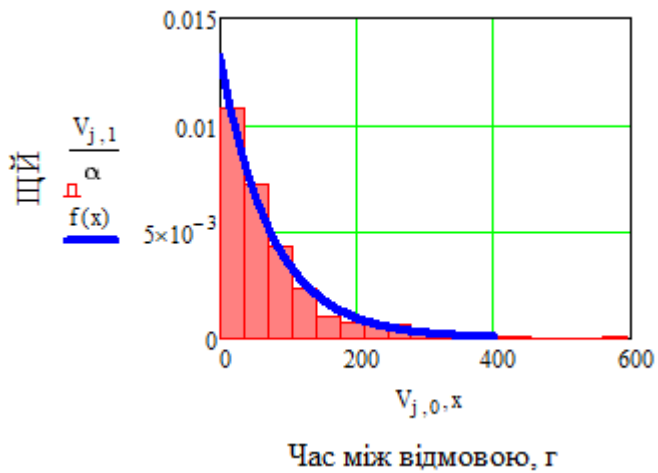


Рис. 3. 11 – ЩЙ часу, що спостерігається, між відмовами у бортовій допоміжній силоній установці

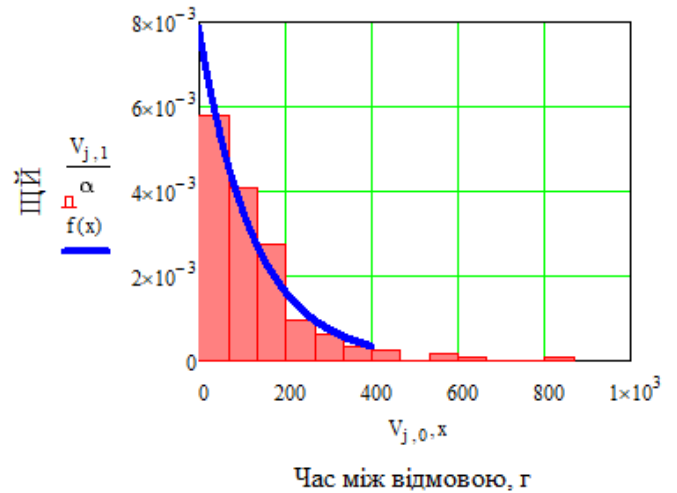


Рис. 3. 12 – ЩЙ часу, що спостерігається, між відмовами у дверей, люків та стулок

Таблиця 3.3

Показники надійності на основі ЩЙ

АТА №	Назва системи	MTBF _{calc}	λ_{calc}	K _{1000 calc}
21	Система кондиціонування повітря	22.601	0.044	44
22	Система автокерування польотом	120.289	0.008	8
23	Обладнання зв'язку	50.271	0.020	20
24	Система електропостачання	58.204	0.017	17
25	Побутове та аварійно-рятувальне обладнання	8.475	0.118	118
32	Шасі	16.214	0.062	62
33	Освітлення та світлова сигналізація	13.076	0.076	76
34	Пілотажно-навігаційне обладнання	44.419	0.023	23
49	Бортова допоміжна силова установка	75.507	0.013	13
52	Двері, люки, стулки	126.959	0.008	8

де $MTBF_{calc}$ – напрацювання на відмову, λ_{calc} – інтенсивність відмов, $K_{1000 calc}$ – кількість відмов за 1000 годин.

Критерій згоди застосовується до математичної моделі щоб перевірити, чи вона підкоряється експоненційному розподілу. Критерій χ^2 був обраний для перевірки згоди з використанням одного з отриманих ЩЙ і в результаті було отримано наступне значення:

$$\chi_{calc}^2 = 13.531.$$

Обчислене значення χ^2 менше порогового значення $\chi_{th}^2 = 19.675$. Тому приймається гіпотеза про експоненційний закон розподілу напрацювання на відмову систем і конструкцій ПС з рівнем значущості, що дорівнює 0,05. Крім того, теоретичний експоненційний розподіл задається як:

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

де λ_{calc} це інтенсивність відмов, розрахована на основі результуючого ЩЙ для кожного розділу АТА, $\phi(t)$ – функція Гевісайда. Синя лінія у всіх ЩЙ доводить (рис. 3.3 – 3.12), що результати моделювання збігаються з теоретичним розподілом. Обмеженням цього

дослідження є те, що воно вимагає мінімального розміру вибірки 35 і може не підходити для експлуатації ПС, які генерують невеликий набір даних [19, 26, 29, 95, 97, 106, 150]. Тому в попередньому розділі була розроблена інша методологія аналізу надійності для невеликого набору даних, а в наступному розділі для доказу її застосування буде використовуватися набір реальних експлуатаційних даних.

3.3. Аналіз надійності компонентів, підсистем, систем та конструкцій повітряних суден на невеликому наборі даних

Зв'язок між надійністю та ймовірністю відмови компонента ПС або системи j визначається виразом:

$$P(\bar{j}) = 1 - R_{cs} \quad (3.1)$$

де $P(\bar{j})$ – ймовірність відмови і R_{cs} – надійність. Пропонована методологія аналізу надійності для невеликого набору даних заснована на основі першого знаходження ймовірності відмови, як показано на рис. 3.13 [151-156].

Для цього дослідження використовується набір реальних історичних даних звітів пілотів та звітів про відмови ПС, що працюють в Нігерії. Для подальшого зменшення розміру вибірки з базової вибірки статистичних даних була обрана одна система і набір даних був перетворений на більш зручну форму для використання в якості вхідних даних для запропонованого алгоритму. Кількість відмов n_{TS} наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Інформація про відмови авіаційних систем

x_i	n_{TS}	x_i	n_{TS}	x_i	n_{TS}	x_i	n_{TS}	x_i	n_{TS}
x_0	3	x_3	1	x_6	3	x_9	5	x_{12}	4
x_1	1	x_4	8	x_7	3	x_{10}	7	x_{13}	5
x_2	1	x_5	2	x_8	5	x_{11}	10	x_{14}	9

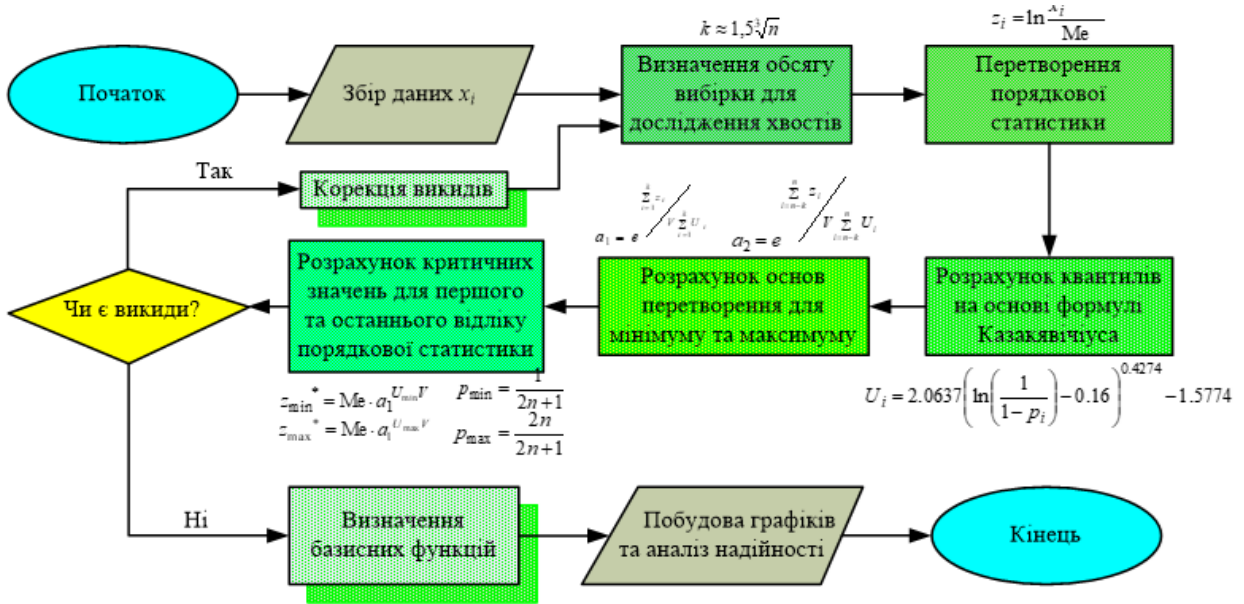


Рис. 3.13. Методологія аналізу надійності авіаційних систем для невеликого набору даних

Викидів немає, тому критерій Шовене не застосовується:

$$j = 3.615 ; \delta_1 = -2.273; \delta_2 = 1.727.$$

Відповідні квантілі стандартного нормального розподілу показані в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Квантілі стандартного нормального розподілу

K_i	K_i	K_i	K_i	K_i					
K_0	-3.111	K_3	-2.252	K_6	-1.735	K_9	1.897	K_{12}	2.464
K_1	-2.727	K_4	-2.066	K_7	0	K_{10}	2.066	K_{13}	2.727
K_2	-2.464	K_5	-1.897	K_8	1.735	K_{11}	2.252	K_{14}	3.111

$$\delta_{k \min} = -3.693; \delta_{k \max} = 3.693; \beta_1 = 2.119; \beta_2 = 1.596$$

Значення базисної функції наведено у таблицях 3.6 та 3.7.

Таблиця 3.6

Значення базисної функції $F_1(K_i)$

$F_1(K_i)$		$F_1(K_i)$		$F_1(K_i)$		$F_1(K_i)$		$F_1(K_i)$	
$F_1(K_0)$	2.118	$F_1(K_3)$	2.113	$F_1(K_6)$	2.103	$F_1(K_9)$	1.608	$F_1(K_{12})$	1.600
$F_1(K_1)$	2.117	$F_1(K_4)$	2.111	$F_1(K_7)$	1.858	$F_1(K_{10})$	1.605	$F_1(K_{13})$	1.599
$F_1(K_2)$	2.115	$F_1(K_5)$	2.107	$F_1(K_8)$	1.612	$F_1(K_{11})$	1.602	$F_1(K_{14})$	1.597

Таблиця 3.7

Значення базисної функції $F_2(K_i)$

$F_2(K_i)$		$F_2(K_i)$		$F_2(K_i)$		$F_2(K_i)$		$F_2(K_i)$	
$F_2(K_0)$	2.119	$F_2(K_3)$	2.707	$F_2(K_6)$	2.572	$F_2(K_9)$	1.623	$F_2(K_{12})$	1.475
$F_2(K_1)$	2.831	$F_2(K_4)$	2.659	$F_2(K_7)$	2.119	$F_2(K_{10})$	1.579	$F_2(K_{13})$	1.407
$F_2(K_2)$	2.762	$F_2(K_5)$	2.614	$F_2(K_8)$	1.666	$F_2(K_{11})$	1.531	$F_2(K_{14})$	1.596

Прогностичні змінні Q_1 та Q_2 розраховуються з урахуванням запропонованої методології аналізу надійності з урахуванням невеликого набору даних. Графік на рис. 3.14 показує квантілі нормального розподілу за рівнянням Казакявічюса. Додатковий графік (рис. 3.15), що називається графіком ймовірності відмови, будується відповідно до формули:

$$p(x) = -e^{\left[\left(\frac{x}{2.0637} \right)^{0.4274} + 0.16 \right]} + 1 \quad (3.2)$$

де $p(x)$ – ймовірність відмови.

Для визначення надійності компонента, підсистеми або системи ПС за заданий період, першим кроком є визначення квантілі, після якого визначається ймовірність відмови за допомогою рис. 3.14. Наприклад, прогноз 5 відмов за рис. 3.15 знаходиться у квантілі 0,7, що відповідає ймовірності відмови - 0,25 (25%) та надійності - 0,75 (75%).

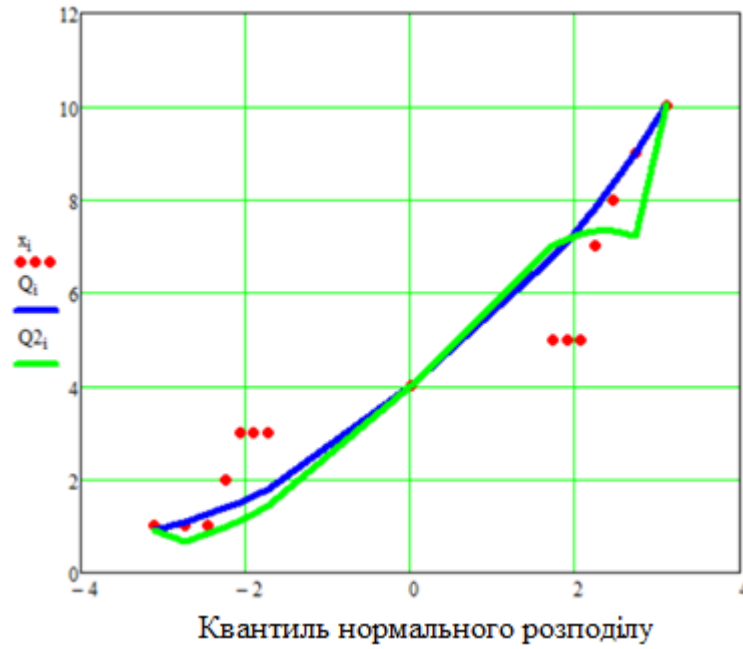


Рис. 3.14. Квантиль нормального закону розподілу

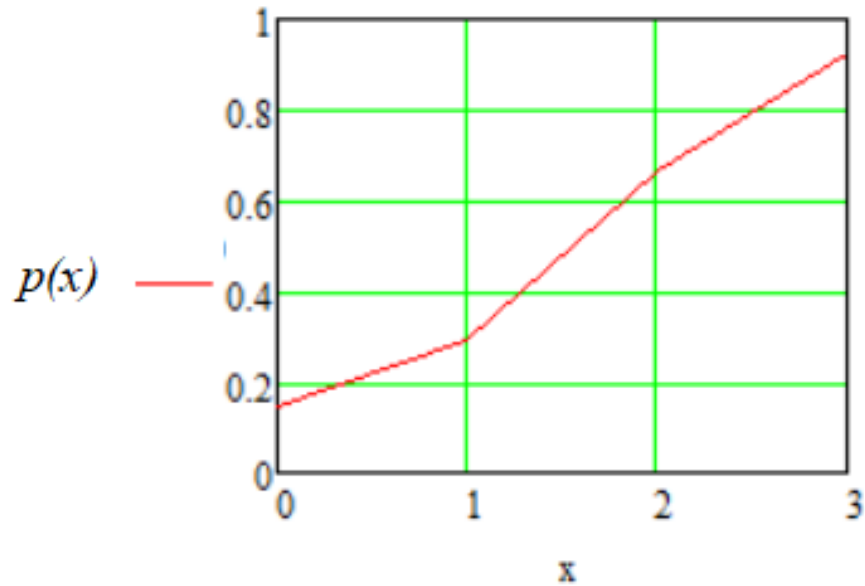


Рис. 3.15. Графік ймовірності відмови

Адекватність моделі проводиться візуально за рис. 3.14. Прогностичні змінні Q_1 і Q_2 відповідають запропонованій моделі, а x_i визначається на експоненційним

розподілом. Точки, які не з'єднуються для x_i , візуально доводять, що модель, яка заснована на експоненційному розподілі, не підходить для невеликого набору даних.

3.4. Оптимальна регресійна модель для прогнозування моментів часу відмови системи або компонента повітряних суден

Для прогнозування моменту часу, в який відбудеться відмова компонента або системи літака, у цій дисертації раніше було розроблено три сегментовані моделі. Щоб визначити, яка з моделей сегментованої регресії забезпечує найбільшу точність прогнозу, всі моделі будуть протестовані з використанням реальних експлуатаційних даних одного з ПС, проаналізованих у розділі 1. Вибрана система ПС додатково перетворюється на аналіз (таблиця 3.8).

Таблиця 3.8

Статистичні дані, отримані з експлуатації ПС

Відмова i	Час між відмовами	Відмова i	Час між відмовами	Відмова i	Час між відмовами	Відмова i	Час між відмовами
1	0	19	1.5000	37	2.5000	55	24.9501
2	510.9672	20	3.3333	38	0.1000	56	32.6334
3	17.0833	21	6.3833	39	2.5000	57	2.4500
4	0.0833	22	0.4000	40	2.5000	58	44.7332
5	20.2667	23	0.4000	41	4.3000	59	5.0333
6	4.336	24	0.4000	42	1.8333	60	10.3833
7	54.6334	25	0.0833	43	1.8333	61	13.3600
8	90.8332	26	0.0833	44	1.8333	62	0.1333
9	161.7500	27	33.2168	45	1.8333	63	0.1333
10	0.5000	28	48.7167	46	1.8333	64	0.6167
11	4.1667	29	5.6667	47	1.8333	65	0.3334
12	4.1667	30	2.4833	48	20.9167	66	2.6667
13	56.0999	31	78.2099	49	2.4167	67	83.8634
14	56.0999	32	4.3333	50	1.5667	68	22.4334
15	330.5002	33	1.5000	51	8.2334	69	11.3999
16	111.7334	34	8.8166	52	18.9332	70	3.0666
17	42.7768	35	0.1000	53	18.9332		
18	1.5000	36	0.1000	54	53.1834		

Перетворені статистичні дані (таблиця 3.8) являють собою матрицю A та є вхідними даними для моделювання. Кожна із запропонованих сегментованих моделей тестується з використанням вхідних даних та побудованих графіків для перевірки відповідності (рис. 3.16 - 3.18). Матриця невідомих коефіцієнтів кожної моделі обчислюється звичайним методом найменших квадратів.

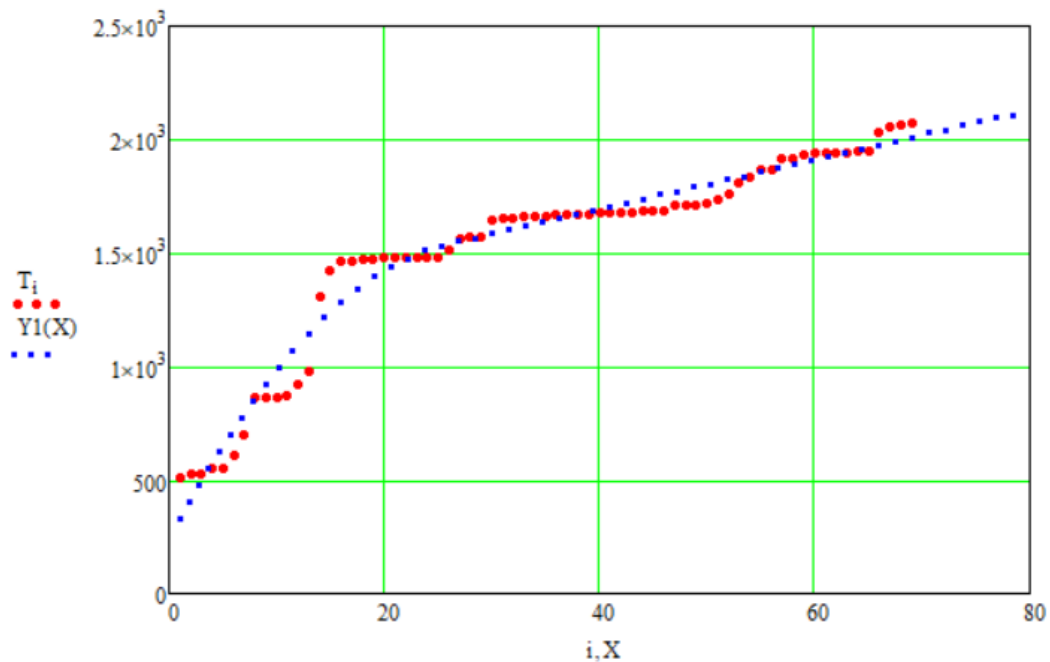


Рис 3.16. Модель квадратично-лінійної сегментованої регресії

Розробка точної прогностичної моделі включає її підгонку до набору навчальних даних, а потім налаштування її параметрів таким чином, щоб ця модель могла робити надійні прогнози на нових ненавчених даних. Перенавчання або недонавчання є загальною проблемою при розробці прогностичної моделі і при доборі регресійної моделі можна створити складну структуру, що призводить до зниження продуктивності [133]. Рис. 3.19 ілюструє цю проблему, і якщо порівняти її з рис. 3.16-3.18 щоб підтвердити, що три запропоновані регресійні моделі у розділі 2 можуть використовуватися для прогнозування моментів часу відмов компонента, підсистеми або системи ПС.

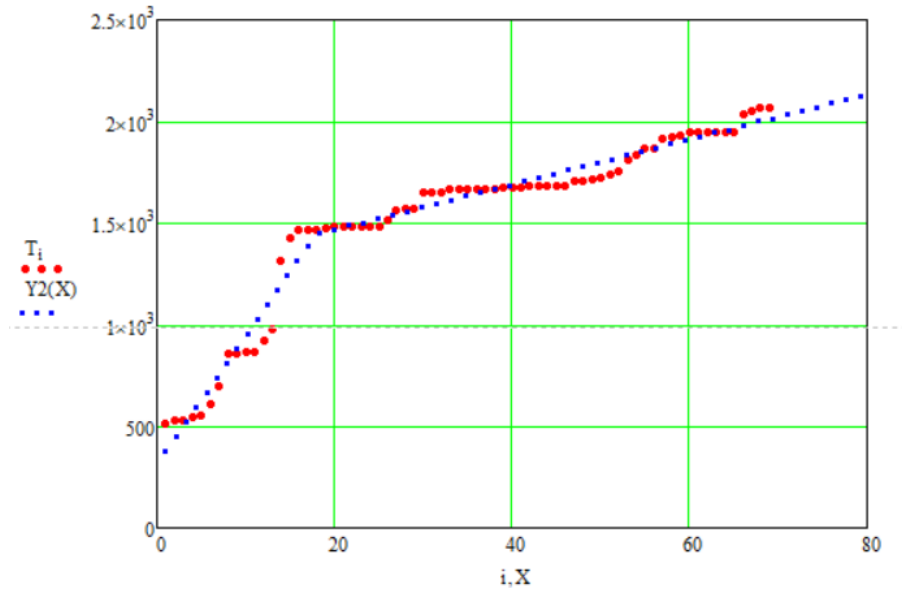


Рис 3.17. Модель лінійно-лінійної сегментованої регресії

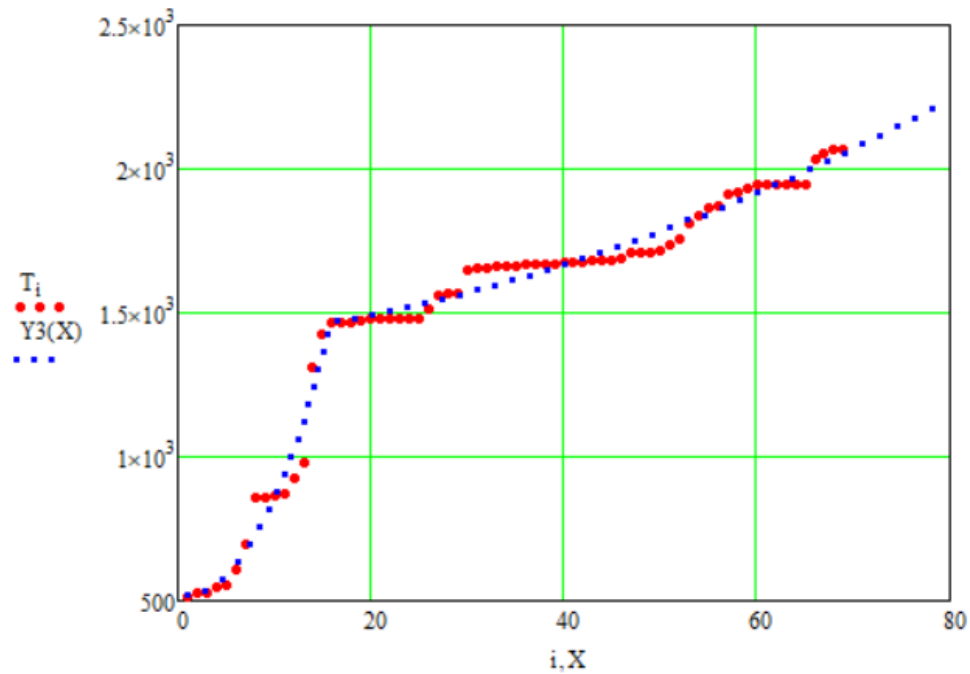


Рис 3.18. Модель квадратично-квадратичної сегментованої регресії

Щоб визначити, яка з трьох моделей дає найбільш точний прогноз і за якої оптимальної точки перемикання m , проводиться аналіз значень стандартного відхилення σ для кожного значення $m=15-30$. Результати наведено в таблиці 3.9 – $Y1$,

Y_2 і Y_3 відповідно відносяться до квадратично-лінійної сегментованої моделі, лінійно-лінійної сегментованої моделі та квадратично-квадратичної сегментованої моделі [137, 157-166]

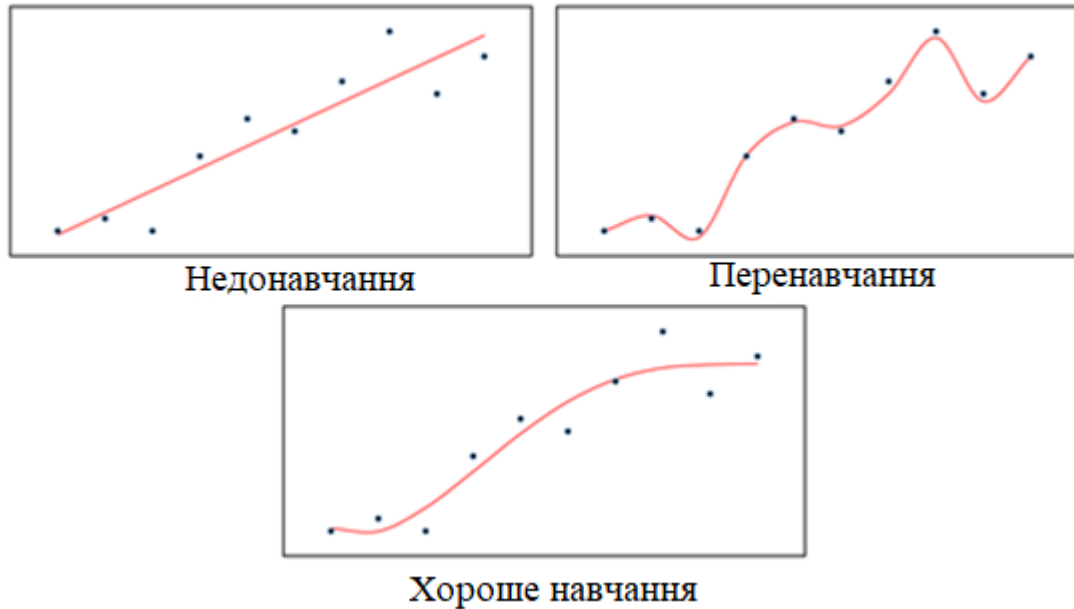


Рис. 3.19. Графічне подання перенавчання та недонавчання у регресії [133]

Таблиця 3.9

Значення стандартного відхилення σ для кожного значення $m=15-30$

m	σ			m	σ		
	Y_1	Y_2	Y_3		Y_1	Y_2	Y_3
15	115.084	74.426	51.332	23	80.537	84.681	72.787
16	108.777	67.825	47.939	24	79.201	89.517	73.757
17	102.827	64.736	50.674	25	78.425	94.120	74.199
18	97.404	64.643	55.727	26	78.127	98.415	74.243
19	92.615	66.781	60.859	27	78.232	102.525	74.104
20	88.523	70.386	65.227	28	78.683	106.613	73.949
21	85.154	74.862	68.655	29	79.434	110.618	73.780
22	82.503	79.730	71.137	30	80.435	114.485	73.599

Згідно табл. 3.9 найменше значення стандартного відхилення σ спостерігається для квадратично-квадратичної сегментованої моделі при $m=16$. Таким чином, ця модель вважається найбільш точною із трьох запропонованих регресійних моделей для

прогнозування відмови компонента, підсистеми або системи ПС. На основі отриманої матриці коефіцієнтів моделі квадратично-квадратичної сегментованої регресії остаточна формула для прогнозу дається таким чином:

$$Y_3(X) = 523.85 - 8.307X + 4.201X^2 - 119.969(X-16)\phi(X-16) - 4.107(X-16)^2\phi(X-16) . \quad (3.3)$$

3.5. Підхід до оптимізації інтервалу технічного обслуговування компонентів, підсистем, систем або конструкцій повітряних суден

Значний відсоток у витратах на ТО складають відмови компонентів і систем ПС. Ці відмови носять випадковий характер і є базою даних, яку можна додатково проаналізувати, щоб допомогти у прийнятті рішень щодо оптимізації ТО. Завдання оптимізації ТО авіаційних систем можуть вирішуватися на основі аналітичних, чисельних чи імітаційних підходів (рис. 3.20). Аналітичний підхід ґрунтується на визначенні точного рівняння. Чисельний підхід заснований на методах спуску, еволюційних методах та методах пошуку образів. Імітаційний підхід до моделювання ґрунтується на методах Монте-Карло [167-168].

Для визначення оптимального інтервалу ТО авіаційних систем математичні моделі, які розглядають середні експлуатаційні витрати в одиницю часу як міру ефективності, були проаналізовані на предмет оптимальності у попередньому розділі з використанням методології, представленої на рис. 3.21.

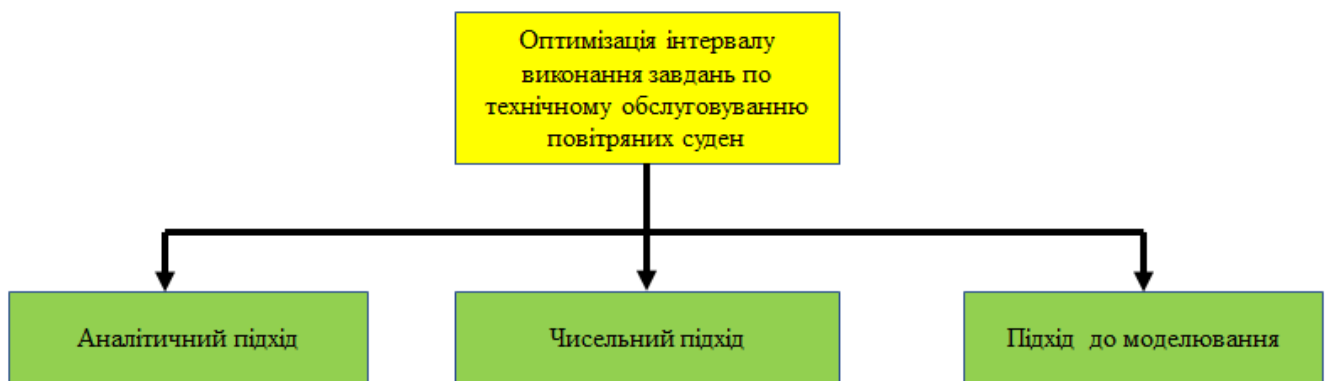


Рис. 3.20. Підходи до оптимізації інтервалу завдань ТО ПС

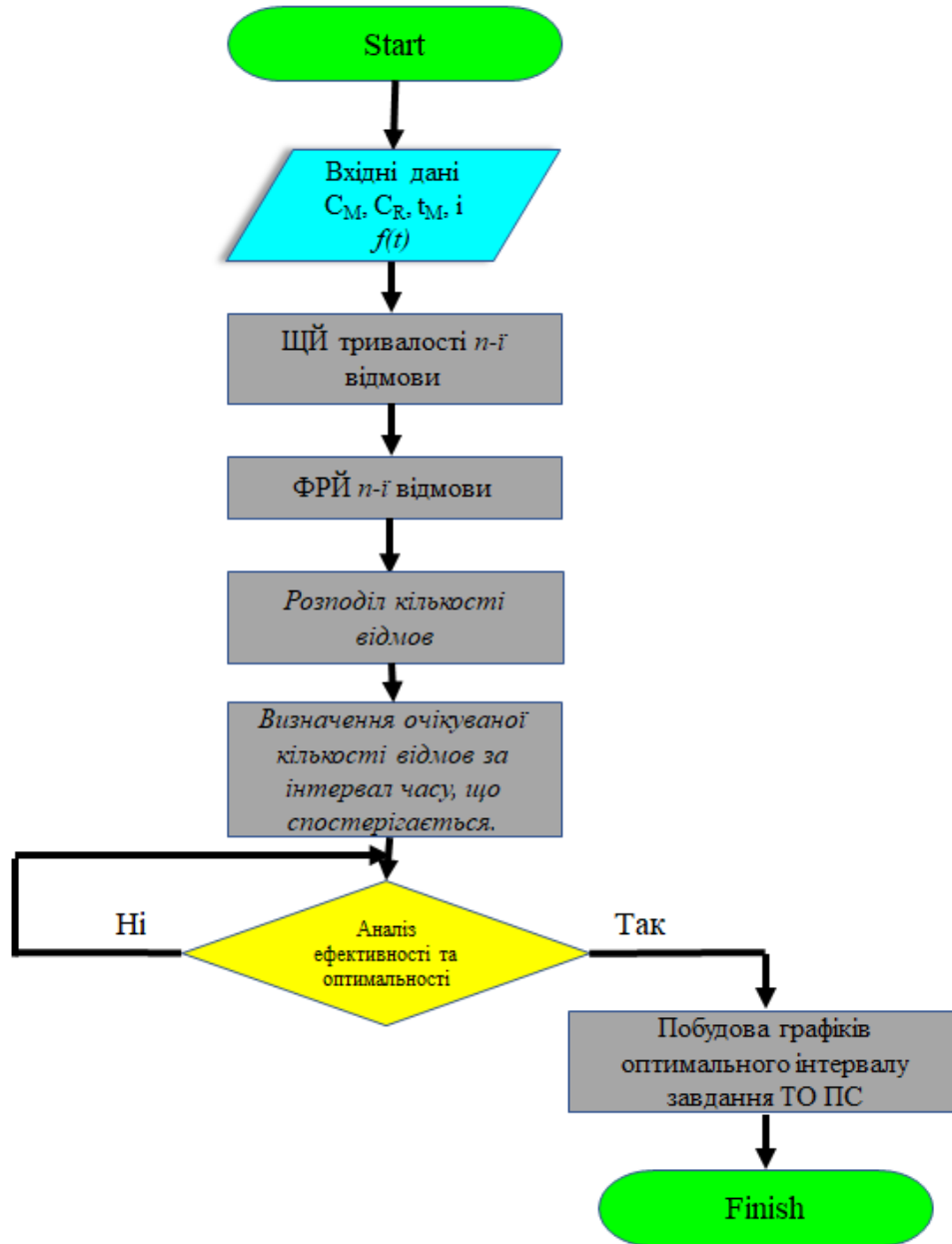


Рис. 3.21. Методика визначення оптимального інтервалу ТО авіаційних систем

Для підтвердження застосування моделі було проведено імітаційний аналіз. Вихідними даними є діагностичні змінні та параметри надійності, на підставі яких здійснюється вибір ЩЙ часу між відмовою за експоненційною моделлю та моделлю Ерланга. На основі ЩЙ було розраховано ефективність процесів ТО з використанням середніх експлуатаційних витрат за одиницю часу. Для експоненційної моделі вихідні

дані (час між відмовами) експоненційно розподіляються залежно від інтенсивності відмов $\lambda = 0.001$ та розміру вибірки $n = 1000$, вартості превентивного ТО $c_M = 100$ та вартості коригуючого ТО $c_R = 1000$, кількості повторень $N = 10000$ [169].

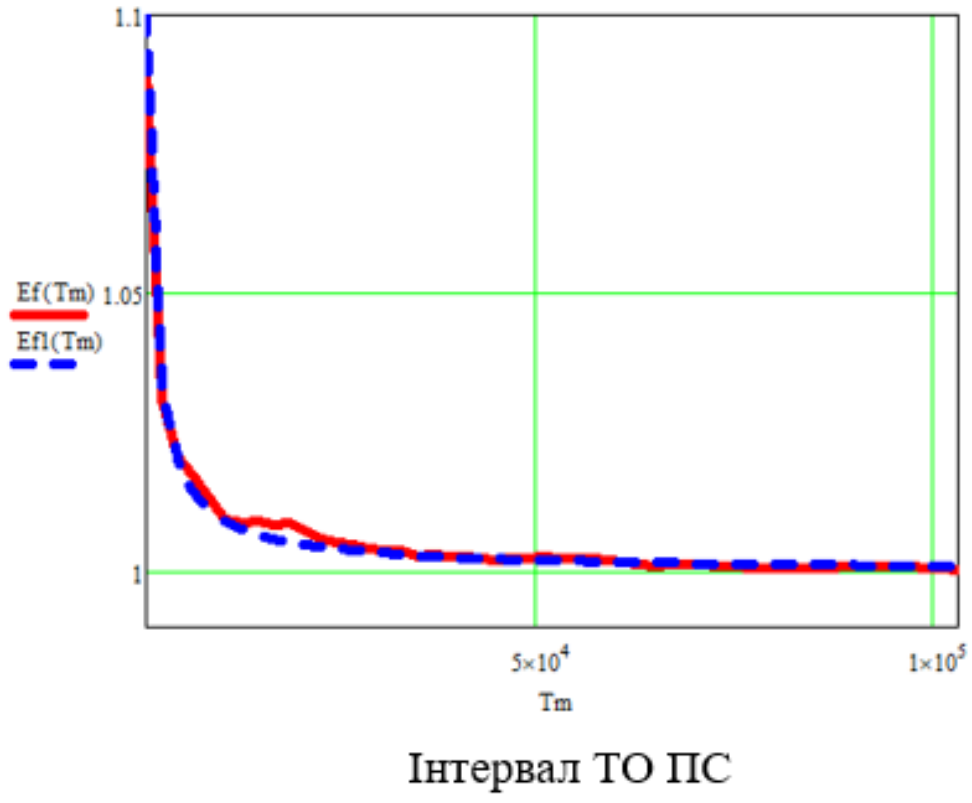


Рис. 3.22. Залежність ефективності від інтервалу ТО, отримана на основі аналітичного рівняння (синя лінія) та статистичного моделювання (червона лінія) для експоненційного часу між відмовами

Результати моделювання показані на рис. 3.22 доводять, що для експоненційної моделі часу напрацювання на відмову оптимальний інтервал завдань ТО, який відповідає точці локального мінімуму на графіку, середніх експлуатаційних витрат в одиницю часу від інтервалу завдань ТО T_M , не існує. Тобто $T_{Mopt} \rightarrow \infty$. Для моделі Ерланга вихідними даними є $\lambda = 0.0005$, розмір вибірки $n = 1000$, вартість превентивного ТО $c_M = 200$ і вартість коригуючого ТО $c_R = 1000$, $N = 10000$ кількості повторень. Результати

моделювання, показані на рис. 3.23, доводять існування «мінімуму», який відповідає оптимальному інтервалу завдань ТО.

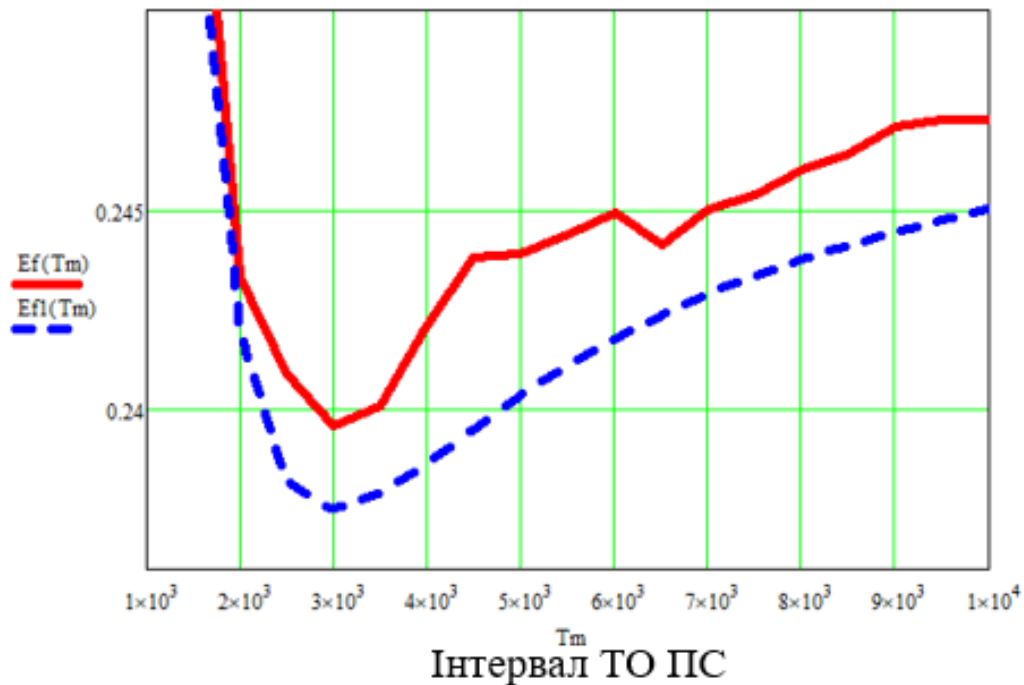


Рис. 3. 23. Залежність ефективності від інтервалу ТО, отримана на основі аналітичного рівняння (синя лінія) і статистичного моделювання (червона лінія) для Ерлангівського розподілу часу між відмовами

Результати моделювання в цьому розділі збігаються з аналітичними (див. розділ 2) і додатково доводять, що можна оптимізувати інтервал між завданнями авіаційних систем ТО, використовуючи модель Ерланга [169].

3.6. Підхід до планування запасів запасних частин під час експлуатації повітряних суден

Запасні частини є звичайними товарно-матеріальними запасами, які існують задля задоволення потреб у ТО. Недоступність запасних частин може продовжити час простою ПС і спричинити непотрібні витрати. Забезпечення потреб у запасних

частинах та планове ТО являються пов'язаними логістичними операціями і повинні розглядатися разом [170]. У підрозділі 2.5 даної дисертації розроблено алгоритм прогнозування попиту на запасні частини з використанням комбінації аналітичних підходів. Моделі, прив'язані до ймовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов (підрозділ 3.1), розраховуються з урахуванням реальних статистичних даних, отриманих під час експлуатації ПС. Процес керування запчастинами, показаний на рис. 3.24, доводить, що за результатами контролю стану може бути виявлена відмова будь-якого компонента ПС. Ця система замінюється відповідною запасною частиною, що знаходиться в справному стані з ймовірністю, що дорівнює одиниці. Для аналізу застосування моделі, запропонованої у підрозділі 2.5, генеруються експлуатаційні дані зі звітів пілота і ТО ПС, що працюють в Нігерії [149]. Відмови компонентів у найбільш відмовляючій системі ПС аналізуються далі, в результаті чого виходить п'ятнадцять компонентів ПС ($n=15$) за спостерений інтервал часу, тобто виконується аналіз надійності компонента (таблиця 3.10.) з використанням моделей, описаних у підрозділах 2.2 та 3.1 цієї дисертації $p(T_{\Sigma}) = 0.95$.

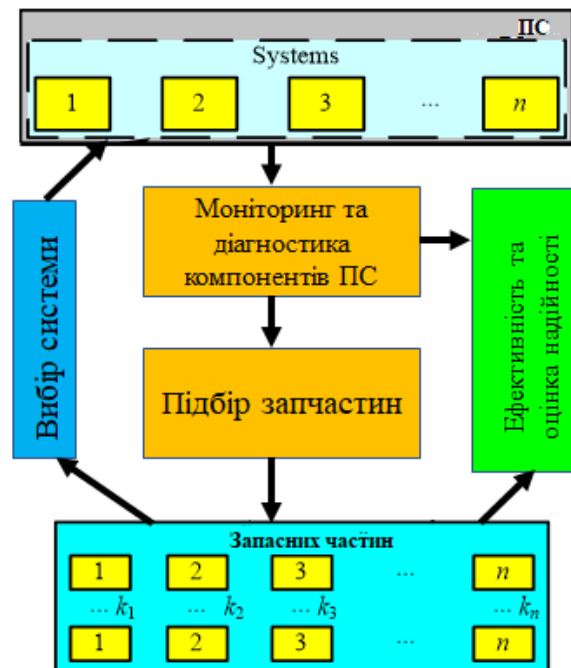


Рис. 3.24. Процес керування запчастинами

Таблиця 3.10

Інтенсивність відмов компонентів навігаційної системи

№	Компоненти	λ	№	Компоненти	λ
1	Запасний авіагоризонт	0.0003185	9	Блок управління навігацією	0.0006370
2	Навігаційний приймач	0.0006370	10	Антенa TCAS	0.0006370
3	Транспондер	0.0009555	11	Кодер TCAS	0.0003185
4	РМД	0.0003185	12	ГПС	0.0006370
5	Метеорологічний радар	0.0050962	13	EFIS	0.0006370
6	Автоматичний радіопеленгатор	0.0003185	14	Дисплей EFIS	0.0003185
7	Радіовисотомір	0.0127406	15	Контроллер дисплею EFIS	0.0003185
8	Висотне керування	0.0012740			

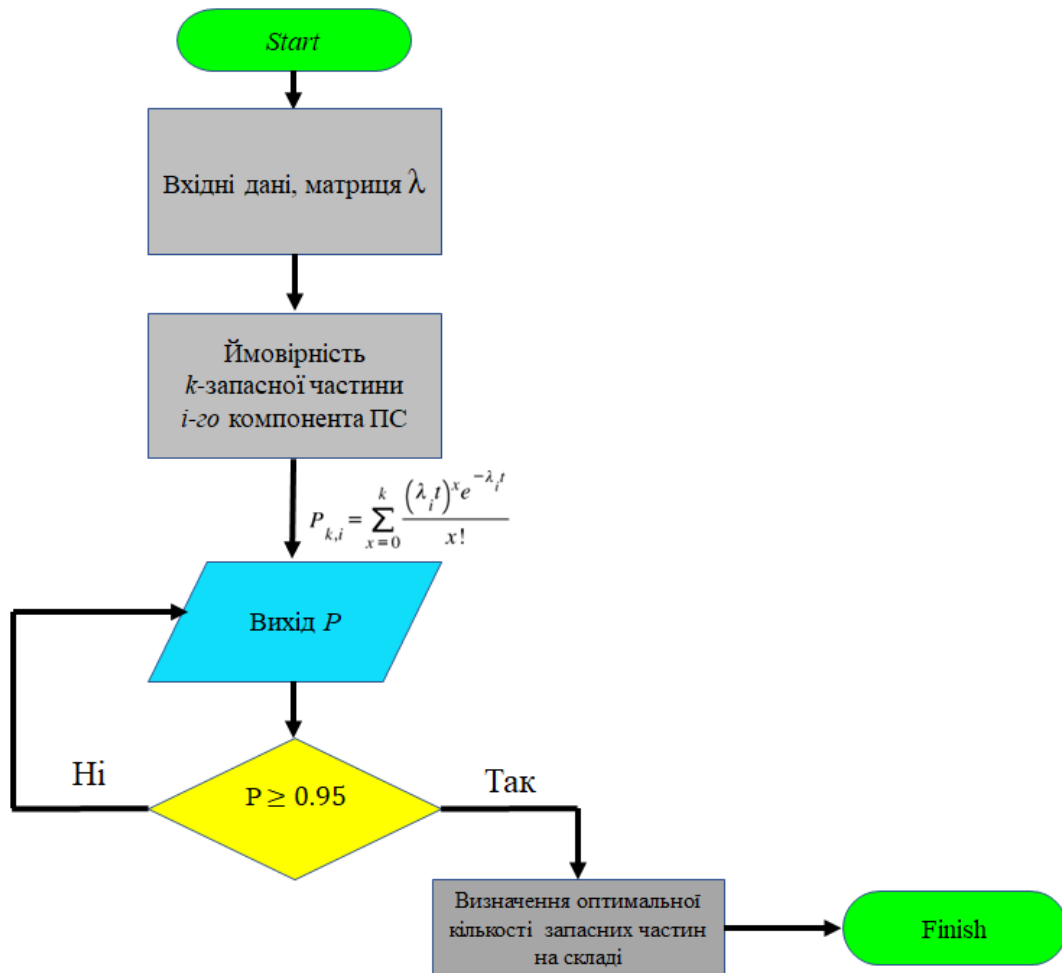


Рис. 3.25. Блок-схема визначення оптимальних запасних частин авіакомплектуючих для запасів

Інтенсивність відмов компонентів ПС у таблиці 3.10 є вихідними даними для моделювання, а оптимальна вартість запасних частин, які повинні зберігатися на складі, визначається з використанням моделі, описаної в підрозділі 2.5, та блок-схеми, показаної на рис. 3.25. Для визначення гарантованої ймовірності безвідмовної роботи елементів і всіх систем ПС враховуються основні теореми теорії ймовірностей – добуток інтенсивності відмов та інтервалу спостереження дорівнює середній кількості відмов для компонентів, що аналізуються. Результати моделювання показано на рис. 3.26 та рис. 3.27. На рис. 3.26 представлено залежність гарантованої ймовірності кількості можливих відмов кожної деталі ПС, а на рис. 3.27 – залежність для всієї системи ПС.

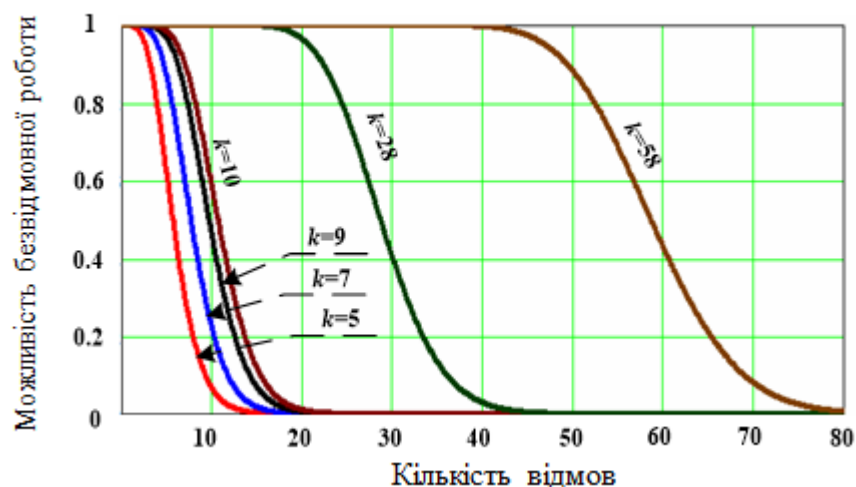


Рис. 3.26. Залежність гарантованої ймовірності безвідмовної роботи від кількості можливих відмов для кожної деталі ПС

Відповідно до графіків на рис. 3.26 залежність ймовірності безвідмовної роботи від числа можливих відмов для кожної деталі ПС має тенденцію прискореного зниження зі збільшенням оптимальної вартості запасних частин. Із залежності на рис. 3.27 можна дійти невтішного висновку, що отримана потреба у запасних частинах практично дорівнює одиниці для безвідмовної роботи всієї системи літака навіть при

120-ти відмовах у різних системах. Значення оптимальної кількості запасних частин кожного компонента для інвентарю наведено у таблиці 3.11.

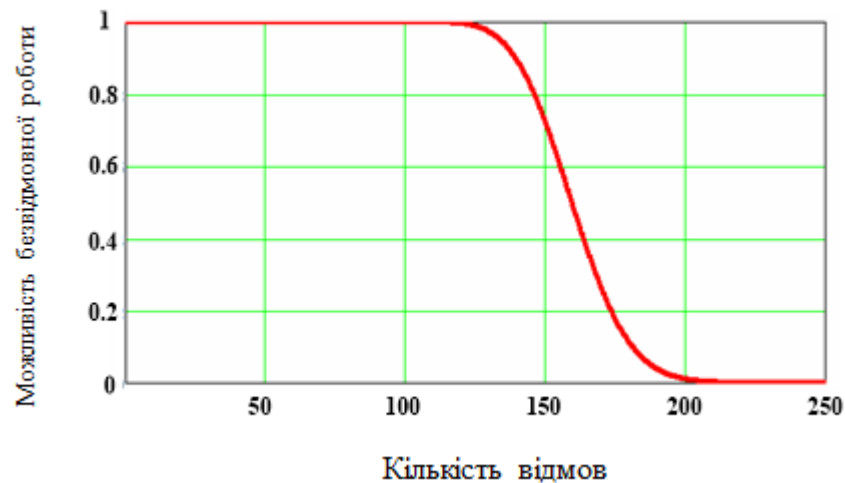


Рис. 3.27. Залежність гарантованої ймовірності безвідмовної роботи від кількості можливих відмов для системи ПС

Таблиця 3.11

Результати моделювання для оптимального планування запасних частин

№	Компоненти	λ	Оптимальна кількість запасних частин
1	Запасний авіагоризонт	0.0003185	5
2	Навігаційний приймач	0.0006370	7
3	Транспондер	0.0009555	9
4	РМД	0.0003185	5
5	Метеорологічний радар	0.0050962	28
6	Автоматичний радіопеленгатор	0.0003185	5
7	Радіовисотомір	0.0127406	58
8	Висотне керування	0.0012740	10
9	Блок управління навігацією	0.0006370	7
10	Антенa TCAS	0.0006370	7
11	Кодер TCAS	0.0003185	5
12	ГПС	0.0006370	7
13	EFIS	0.0006370	7
14	Дисплей EFIS	0.0003185	5
15	Контроллер дисплею EFIS	0.0003185	5

Аналіз результатів моделювання в таблиці 3.11 показує, що існують різні потреби в запасних частинах для компонентів в діапазоні від 5-ти (для найбільш надійного компонента) до 58-ми (для радіовисотоміра).

Для аналізу точності запропонованого методу було виконано моделювання з урахуванням методу Монте-Карло [106]. Процедура моделювання складається з наступних кроків: а) генерація двовимірного масиву з експоненційно розподіленими випадковими числами (напрацюваннями до відмови) з інтенсивністю відмов для кожного i -го елемента ПС (перший вимір відповідає розміру вибірки і дорівнює оптимальній вартості запасних частин k_i , а другий вимір відповідає кількості повторень); б) розрахунок сукупного часу останньої відмови; в) розрахунок ймовірності безвідмовної роботи кожного компонента ПС як відношення кількості разів, коли сумарний час останньої з відмов перевищував інтервал спостереження, до числа повторень. Результати моделювання сприятливо збіглися з необхідною та розрахованою ймовірністю безвідмовної роботи.

Висновки до розділу 3

1. Моделі, запропоновані у розділі 2, можуть стати основою для оптимізованого процесу технічного обслуговування повітряних суден, що базується на прогнозуванні та управлінні даними. У цьому розділі для аналізу та перевірки цих моделей застосовувалися щоденні дані експлуатації ПС. У підрозділі 3.1 наведено короткий огляд ТО ПС на основі даних, який виправдовує застосування моделей.

2. Аналіз запропонованої моделі для перевірки надійності компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС з урахуванням великого набору даних був проведений у підрозділі 3.2.1 з використанням даних про реальні експлуатації ПС. У математичній моделі був застосований критерій згоди χ^2 , щоб перевірити, чи підпорядковується вона експоненційному розподілу. Розрахункове χ^2 менше

порогового значення χ_{th}^2 , тому приймається гіпотеза про експоненційний закон розподілу середнього напруження на відмову систем і конструкцій літака з рівнем значущості, що дорівнює 0,05.

3. У підрозділі 3.2.2 проведено аналіз запропонованої моделі аналізу надійності компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС на невеликому наборі даних. Параметр надійності визначається на основі графіка ймовірності відмови, що визначається за рівнянням Казакавічуса. За отриманими графіками проводиться візуальна перевірка згоди; прогностичні змінні Q_1 і Q_2 відповідають запропонованій моделі, а x_i визначаються експоненційним розподілом. Точки, які не з'єднуються для x_i , візуально доводять, що модель, яка заснована на експоненційному розподілі, не підходить для невеликого набору даних.

4. Щоб визначити, яка з моделей сегментованої регресії, запропонованих у розділі 2, забезпечує найбільшу точність прогнозу, всі моделі були протестовані з використанням реальних експлуатаційних даних одного з ПС, проаналізованих у розділі 1. Матриця невідомих коефіцієнтів кожної моделі обчислюється звичайним методом найменших квадратів. Для визначення того, яка з трьох моделей дає найбільш точний прогноз і за якої оптимальної точки перемикання m проводиться аналіз значень стандартного відхилення σ для кожного значення $m=15-30$. Найменше значення стандартного відхилення σ спостерігається у квадратично-квадратичній сегментованій моделі при $m=16$, отже, ця модель вважається найбільш точною із трьох запропонованих регресійних моделей для прогнозування відмови компонента, підсистеми, системи або конструкції ПС. Для порівняння всіх отриманих графіків запропонованих регресійних моделей використовувалося графічне уявлення хорошої, надмірної та недостатньої відповідності в регресії та всі моделі відповідали гарній посадці.

5. Аналіз моделювання було проведено з використанням методу Монте-Карло щоб довести застосування моделей, розроблених у розділі 2, для визначення оптимального інтервалу завдань ТО з використанням середніх експлуатаційних витрат

як міри ефективності. Результати доводять, що для експоненційної моделі часу між відмовами, оптимальний інтервал виконання завдань ТО, який відповідає точці локального мінімуму на графіку залежності середніх експлуатаційних витрат в одиницю часу від інтервалу виконання завдань ТО T_M не існує. Тому, $T_{\text{Мopt}} \rightarrow \infty$. Для моделі Ерланга результати моделювання доводять існування «мінімуму», що відповідає оптимальному інтервалу ТО. Ці результати узгоджуються з аналітичними результатами у розділі 2 і додатково доводять, що за допомогою моделі Ерланга можна оптимізувати інтервал між завданнями ТО компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС.

6. У розділі 2 розроблено модель визначення запасу запасних частин компонентів ПС для неремонтопридатних елементів та експоненційно розподілених напрацювань на відмову. Кількість запасних частин розраховується з використанням необхідної ймовірності безвідмовної роботи та оцінного значення інтенсивності відмов, отриманого під час аналізу реальних статистичних даних. Для аналізу точності запропонованої моделі було виконано моделювання на основі методу Монте-Карло і результати позитивно збіглися з необхідною та розрахованою ймовірністю безвідмовної роботи.

РОЗДІЛ 4. МЕТОДОЛОГІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПРИПИСНОГО ПАРКУ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН НІГЕРІЇ ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ ЇХ ЛЬОТНОЇ ПРИДАТНОСТІ

Експлуатаційна фаза життєвого циклу повітряних суден є найтривалішою та, незважаючи на дохід, який ПС приносять економіці, середні експлуатаційні витрати можуть перевищувати початкову ціну купівлі в 10-20 разів. Технічне обслуговування, ремонт та капітальний ремонт (ТОРКР) оцінюються приблизно у 10-20% експлуатаційних витрат [36, 44]. Крім того, за даними IATA очікується, що глобальні витрати на ТОРКР збільшуватимуться з річним темпом зростання 4,1%. Тому авіакомпанії постійно шукають шляхи зниження цих витрат без шкоди для льотної придатності [36]. Це виправдовує необхідність реалістичності математичних моделей і те, як завдання оптимізації формулюється на етапі проектування ЖЦ ПС. Також необхідно враховувати надійність системи, процеси ТО та вартість. У цьому розділі пояснюється коротка методологія оптимізації процесів ТО ПС.

4.1. Обґрунтування запропонованої методики оптимізації процесів технічного обслуговування повітряних суден для підтримки льотної придатності

У регіонах Західної Африки експлуатаційні витрати, як і раніше, значно вищі, ніж у середньому по світу, при цьому експлуатанти ПС витрачають понад один мільярд доларів на рік, з яких на нігерійські операції припадає 75% цієї суми [2]. Ця висока вартість обумовлена відсутністю підприємств з ТОРКР, які виконують перевірки ТО ПС. Нові підприємства з ТОРКР в Нігерії проводять перевірки дуже невеликої кількості ПС, щодо доступних форм ТО. Однак їх небагато і обсяг робіт

припадає в основному на гелікоптери та невеликі літаки з нерухомим крилом. Тому, більшість операторів несуть додаткові витрати на направлення цих літаків за кордон для проходження ТО. Оскільки значний відсоток вартості експлуатації ПС припадає на ТО ПС, глобальна авіаційна промисловість, особливо в Західній Африці, може перейти до сучасного підходу, запровадивши рішення Четвертої промислової революції для оптимізації процесів ТО ПС без шкоди для безпеки та надійності.

Традиційні дії щодо ТО, включаючи КТО та ПТО, більше не можуть вирішувати проблеми підвищеної складності систем, тому для забезпечення безпеки та надійності може бути реалізований перехід до комплексних підходів до ТО. Незаплановане ТО призводить до дорогих затримок та незручностей для пасажирів. Значне скорочення кількості позапланових робіт з ТО змінить авіаційну галузь. Це може бути забезпечено за допомогою інтелектуальної бортової системи, яка ідентифікує та повідомляє про аномалії компонентів/систем, а також самостійно діагностує несправності, відмови, зношування, програмні збої, низький рівень рідини та ін. Епоха великих даних відображає революцію в галузі наукових обчислень 1960-х років, що призвели до трансформаційних інженерних парадигм і дозволили точно моделювати складні інженерні системи. Це дозволило створювати прототипи конструкції ПС з використанням емуляторів на основі фізичних процесів, що призвело до значної економії засобів виробників аерокосмічної техніки. Також алгоритми машинного навчання (МН) та штучного інтелекту (ШІ) вітають великі технологічні розробки нашого покоління та використовують ці досягнення в авіаційній галузі [12].

Незважаючи на наявність численних комп'ютерних рішень, планування ТО ПС є складним завданням через відсутність підходів до оптимізації для планування перевірок та завдань ТО, а також відсутності реалізму в математичних моделях та того, як проблема оптимізації ТО формулюється на етапі проектування. Існуючі дослідження з оптимізації ТО зосереджені на методах моделювання процесу деградації системи, порогу ремонту, вартості ТО та розробках евристичних алгоритмів для пошуку оптимальних рішень у межах обмежень. Ці методи не є найкращими

рішеннями для оптимізації ТО ПС: а) вартість ремонту, замовлення на запасні частини змінюються з часом; б) вхідні дані цих методів (інтенсивність відмов, середній робочий час, вимоги до готовності ПС та ін.) не повністю охоплюють інші фактори ТО ПС, такі як вартість ремонту, інформація ПУТС, наявність запасних компонентів, а їх слід розглядати спільно; в) вплив довгострокової продуктивності рідко розглядається у поточних дослідженнях з оптимізації ТО [37].

Таким чином, основним внеском цієї дисертації є проста та розширювана чотириетапна методологія (рис. 4.1), яка поєднує підходи до аналізу надійності систем та конструкцій ПС, прогнозування несправності/відмов КПСКПС, оптимізації інтервалу завдань КПСКПС з використанням середньої експлуатаційної вартості як показника ефективності та прогнозу запасу запасних частин для оптимізації процесів ТО ПС. Одна з потреб в оптимізації ТО виникає через необхідність звести до мінімуму роботи з оперативного ТО, які переривають звичайні операції повітряних суден через їхню частоту, крім того, часте відкривання та закривання панелей призводить до значного зносу, тим самим знижуючи властиву ПС надійність [60].

Пропонована чотириступінчаста методологія використовує переваги новітніх методів прогнозування ТО на основі даних, заснованих на машинному навчанні, теорії надійності, ймовірності та статистики, і дозволяє оптимізувати процеси ТО ПС зі скороченням витрат на ТО та часу простою без шкоди для безпеки. Результати запропонованої методології призведуть до більш передбачуваних та ефективних можливостей планування ТО ПС і можуть бути реалізовані на перших трьох етапах ЖЦ ПС.

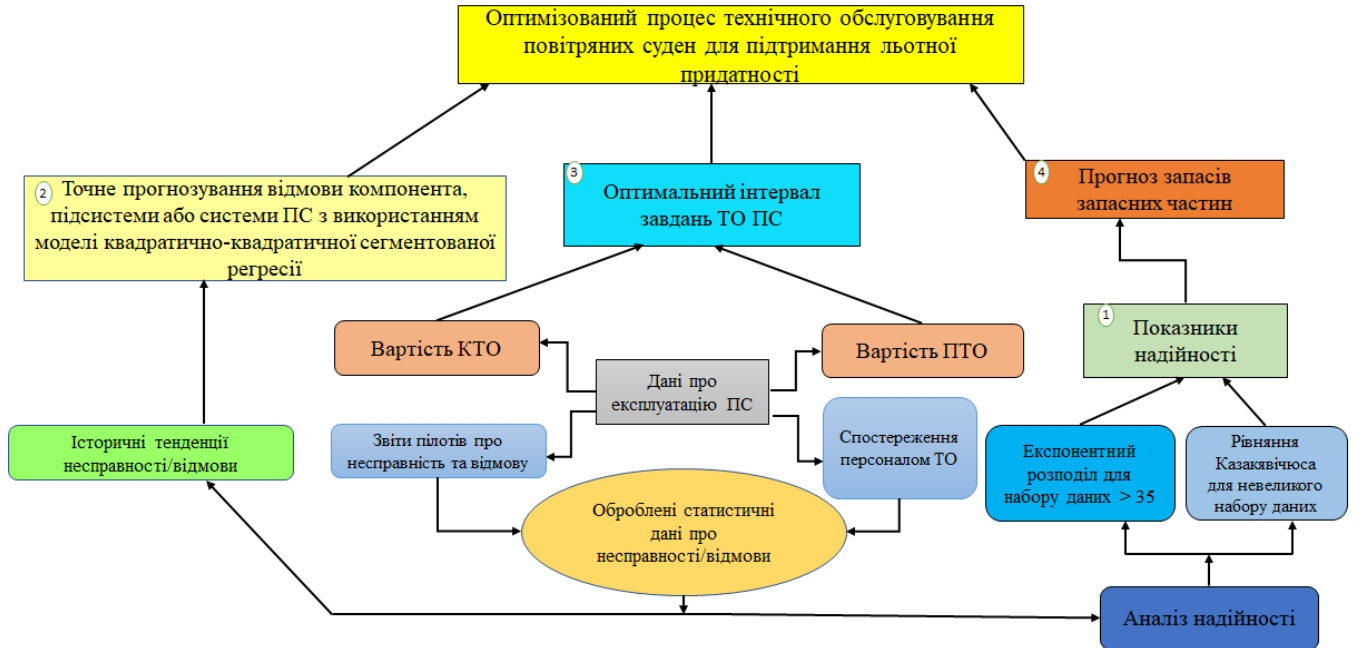


Рис. 4.1. Методологія оптимізації процесів технічного обслуговування повітряних суден для підтримки льотної придатності повітряних суден

Як зазначалося в попередніх розділах, термін «відмова» відноситься до несправностей та відмов компонентів, підсистем, систем або конструкцій ПС.

4.2. Методика оптимізації процесів технічного обслуговування повітряних суден для підтримки льотної придатності

В авіаційній галузі все більшого поширення набувають технології моніторингу технічного стану літальних апаратів. Останнім часом з'явилися різні методи прогнозування технічного стану ПС, засновані на даних та моделях, для оцінки залишкового терміну служби, спрямовані на покращення ПТО різних типів компонентів. Однак, можливості точного визначення часу повністю недостатньо для поліпшення ефективності експлуатації, оскільки розрізнені окремі втручання можуть

збільшити загальний час простою [171]. Тому в цій дисертації було запропоновано чотирьохступінчасту методологію (рис. 4.1). Методологія включає теоретичні моделі, засновані на: методах ПТО, даних щоденної експлуатації ПС, машинному навчанні, теорії надійності, ймовірності та статистики.

Методологія закладає основу для подальших розробок з погляду її майбутнього розширення, перевірки та впровадження. Її унікальність полягає в тому, що хоча більшість досліджень зосереджена на окремих компонентах або системах, запропонована методологія розглядає всі компоненти і системи ПС в єдиній структурі. Запропоновані моделі та алгоритми були перевірені з використанням експлуатаційних даних ПС та можуть бути масштабовані для кількох систем без необхідності спеціальних знань в предметній галузі. Крім того, цей підхід, що базується на статистичних даних, є більш економічною альтернативою моделювання на основі фізичних процесів і може використовуватися для прогнозування технічного стану ПС. Огляд етапів методології описаний у наступних підрозділах.

4.2.1. Крок 1: Статистичне моделювання визначення параметрів надійності

Оцінка параметрів надійності компонентів, підсистем, систем та конструкцій ПС здійснюється з використанням записів звітів пілотів та спостережень за відмовами при ТО. Розраховують напрацювання на відмову ($MTBF_i$), інтенсивність відмов (λ_i) та кількість відмов на 1000 льотних годин (K_{1000}). Для цього кроку в попередніх розділах було розроблено та протестовано дві моделі залежно від розміру набору даних. Коли набір даних < 35 , для визначення ймовірності відмови використовується рівняння Казакавичюса, але якщо набір даних > 35 , використовується модель, заснована на експоненційному розподілі.

4.2.2. Крок 2: Статистичне моделювання для прогнозування льотної години, протягом якої відбудеться відмова компонента, підсистеми, системи або конструкції повітряних суден

Неправильні прогнози ТО та стратегії конфігурації можуть призвести до несвоєчасної підтримки, затримок рейсів або простоїв, тому цей крок демонструє кореляцію між відмовою системи чи компонента та часом польоту, в якому він станеться. Як показано у розділі 3, модель квадратично-квадратичної сегментованої регресії - це модель з найменшим стандартним відхиленням для прогнозування виникнення відмов з використанням даних про щоденні операції ПС. Цей крок забезпечує високоточні прогнози майбутніх безпрецедентних дій щодо ТО з використанням операційних даних, які генеруються та зберігаються, але часто ігноруються.

4.2.3. Крок 3: Оцінка оптимального інтервалу завдань технічного обслуговування, використовуючи середні експлуатаційні витрати як міри ефективності

У більшій частині літератури з оптимального моделювання завдань ТО використовують рівень витрат на ТО у якості критерію оптимізації, але ігнорують продуктивність надійності. Зниження рівня витрат на ТО системи не означає, що показники надійності системи оптимізуються з погляду витрат, особливо для багатокомпонентних систем. Мінімальні витрати на ТО іноді пов'язані із зниженням показників надійності системи, – це один із результатів наявності в системі різних компонентів, які можуть мати різну вартість ТО та різну важливість для системи. Враховуючи, що ПС складається з різних систем та компонентів, оптимальний інтервал завдань ТО завжди повинен враховувати як вартість ТО, так і надійність [8]. Це є мотивацією для запровадження заходів з поправкою на вартість для визначення

оптимального інтервалу завдань ТО. Отже, на цьому етапі виконується оцінка оптимального інтервалу завдань ТО компонента або системи ПС з використанням середніх експлуатаційних витрат як міри ефективності. У розділі 2 дві моделі надійності, – експоненційна та ерлангівська моделі часу між відмовами, були проаналізовані на оптимальність з використанням середніх експлуатаційних витрат в одиницю часу як показника ефективності. Аналітичні рівняння та статистичне моделювання ЩЙ для експоненційної моделі часу між відмовами показують, що оптимального інтервалу завдань ТО ПС не існує, оскільки жоден з мінімальних та оптимальних інтервалів виконання завдань технічного обслуговування не прагне нескінченності. Для ЩЙ моделі Ерланга для часу між відмовами існує мінімум середніх експлуатаційних витрат в одиницю часу. Оптимальні значення інтервалу виконання завдань ТО, отримані за аналітичними рівняннями, чисельною оптимізацією та результатами моделювання, – приблизно збігаються. Таким чином, модель Ерланга може оцінити оптимальні інтервали виконання завдань щодо ТО систем та компонентів ПС.

4.2.4. Крок 4: Прогноз запасів запасних частин для експлуатації повітряних суден

Система резервування широко використовується для підвищення надійності і збільшення часу роботи систем. У цьому методі деякі запасні частини передбачені для робочого компонента, тобто якщо робочий компонент виходить з ладу, запасна частина включається для заміни. Метод резервування включає «гарячий» резерв, «теплий» резерв та «холодний» резерв. Однак загальновідомо, що характеристики запасних частин згодом погіршуються в режимах «гарячого», «теплого» і навіть «холодного» резерву. Запасні частини також можуть раптово вийти з ладу через зовнішні чинники. Погіршення експлуатаційних характеристик запасних частин, що зазвичай призводить до відмови при зберіганні, відбувається через знос, який

відбувається з часом через внутрішній механізм і недосконале зберігання. Надлишок запасних частин може призвести до значних непотрібних витрат на запаси та збоїв у зберіганні, що також призведе до втрат. З іншого боку, брак запасних частин може призвести до простою та втрати доходів [9]. Запаси запасних частин є складовою планування ТО. Надлишок запасних частин призводить до високої вартості зберігання та перешкоджає грошовим потокам, у той час як брак запасних частин може призвести до дороговартісних затримок або скасування рейсів, що негативно позначається на роботі авіакомпаній [72]. В даний час світова індустрія цивільної авіації витрачає близько 50 мільярдів доларів на запасні частини, що становить 75% складських фондів. Тим не менш, коефіцієнти використання та обороту низькі, – і використовується лише 25%, тому існує проблема їх надмірного запасу. З іншого боку, неправильний прогноз запасних частин може призвести до затримок рейсів та простоїв [71]. Таким чином, точний або майже точний прогноз запасів запасних частин може значно оптимізувати процеси технічного обслуговування повітряних суден – це останній крок запропонованої методології, який виконується з використанням статистичної моделі, описаної в розділах 2 та 3.

4.3. Методика розрахунку показників надійності систем та агрегатів повітряних суден

Коли набір даних > 35 , етапи статистичного моделювання для аналізу надійності наступні:

1. Введіть матрицю оброблених статистичних даних.
2. Розрахунок тимчасових рядів відмов, що спостерігаються D_k .

$$i. D_k = \sum_{j=0}^k C_j$$

3. Визначення моменту часу F , коли відбудеться i -та відмова, визначається так:

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

4. Формулювання одновимірного масиву A_i

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

5. Побудова ЩЙ.

6. Аналіз ЩЙ для визначення λ_i , $MTBF_i$ та K_{1000} .

Якщо створюється невеликий набір даних, тобто < 35 , то аналіз надійності виконується у такий спосіб:

1. Матриця оброблених статистичних даних відмов x_i .
2. Визначити кількість спостережень для апроксимації хвостів $j = 1.5\sqrt[3]{x}$.
3. Обчислити значення нижнього ($y_{i \text{ нижня}}$) та верхнього хвостів ($y_{i \text{ верхня}}$):

$$1. y_i = \ln \frac{x_i^{(order)}}{Med}$$

4. Обчислити суми першої (δ_1) і останньої (δ_2) випадкових величин:

$$a. \delta_1 = \sum_{i=1}^j y_i; \quad \delta_2 = \sum_{i=n-j}^n y_i$$

5. Розрахунок відповідних квантилів стандартного нормального розподілу після перетворення за рівнянням Казакавічуса:

$$a. K_i = 2.0637 \left(\ln \left(\frac{1}{1-p_i} \right) - 0.16 \right)^{0.4274}$$

6. Оцінка добутків коефіцієнта варіації та суми відповідних квантилів:

$$a. \delta_{K \min} = V \sum_{i=1}^j K_i; \quad \delta_{K \max} = V \sum_{i=n-j}^n K_i$$

7. Визначення основи перетворення мінімуму (β_1) і максимуму (β_2):

$$a. \beta_1 = e^{\frac{\delta_1}{\delta_{K_{min}}}}; \quad \beta_2 = e^{\frac{\delta_2}{\delta_{K_{max}}}}$$

8. Розрахунок базисної функції $F_1(K_i)$ та $F_2(K_i)$:

$$a. F_1(K_i) = \frac{\beta_1 e^{-K_i} + \beta_2 e^{K_i}}{e^{-K_i} + e^{K_i}},$$

$$b. F_2(K_i) = \beta_1 + b(K_i + K_{sw})_+ - b(K_i - K_{sw})_+$$

9. Розрахунок прогностичних змінних Q_1 і Q_2 :

$$i. Q_1 = Med. F_1^{K_i V}$$

$$ii. Q_2 = Med. F_2^{K_i V}$$

10. Побудова графіків з використанням значень x_i , Q_1 і Q_2 .

11. Побудова графіка ймовірності відмови:

$$a. p(x) = -e^{\left[\left(\frac{x}{2.0637} \right)^{0.4274} + 0.16 \right]} + 1$$

12. Визначити за допомогою графіків значення ймовірності відмови та надійності.

4.4 Метод прогнозування льотної години, у якому відбудеться відмова компонента чи системи повітряних суден

1. Введіть матрицю оброблених статистичних даних відмов i .
2. Прогнозувати момент часу наступної відмови системи або компонента повітряних суден i :

$$Y_3(X) = \beta_{0,3} + \beta_{1,3} X + \beta_{2,3} X^2 + \beta_{3,3} (X - m) \phi(X - m) + \beta_{4,3} (X - m)^2 \phi(X - m)$$

3. Визначити коефіцієнти моделі:

$$\begin{bmatrix} \beta_{0,3} \\ \beta_{1,3} \\ \beta_{2,3} \\ \beta_{3,3} \\ \beta_{4,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n i & \sum_{i=1}^n i^2 & \sum_{i=m}^n (i-m) & \sum_{i=m}^n (i-m)^2 \\ \sum_{i=1}^n i & \sum_{i=1}^n i^2 & \sum_{i=1}^n i^3 & \sum_{i=m}^n [i(i-m)] & \sum_{i=m}^n [i(i-m)^2] \\ \sum_{i=1}^n i^2 & \sum_{i=1}^n i^3 & \sum_{i=1}^n i^4 & \sum_{i=m}^n [i^2(i-m)] & \sum_{i=m}^n [i^2(i-m)^2] \\ \sum_{i=m}^n (i-m) & \sum_{i=m}^n [i(i-m)] & \sum_{i=m}^n [i^2(i-m)] & \sum_{i=m}^n (i-m)^2 & \sum_{i=m}^n (i-m)^3 \\ \sum_{i=m}^n (i-m)^2 & \sum_{i=m}^n [i(i-m)^2] & \sum_{i=m}^n [i^2(i-m)^2] & \sum_{i=m}^n (i-m)^3 & \sum_{i=m}^n (i-m)^4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n T_i \\ \sum_{i=1}^n (T_i i) \\ \sum_{i=1}^n (T_i i^2) \\ \sum_{i=m}^n [(i-m)T_i] \\ \sum_{i=m}^n [(i-m)^2 T_i] \end{bmatrix}$$

4. Розрахувати значення оптимальної точки перемикавання m для відповідного найменшого значення стандартного відхилення σ :

$$5. \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-l} \sum_{i=1}^n (T_i - \hat{Y})^2}$$

6. За значеннями m та σ розраховується оптимальне значення точки перемикавання. Воно вводиться у модель разом із відповідними коефіцієнтами. Це вважається найбільш точною математичною моделлю для прогнозування льотної години, при якій у системі або компоненті літака, що спостерігається, може відбутися відмова.

4.5. Оцінка оптимального інтервалу виконання робіт з технічного обслуговування повітряного судна

Покрокова процедура визначення оптимального інтервалу виконання завдань технічного обслуговування літака виглядає так:

- 1) Визначити ЩЙ Ерланга як:

$$f(t) = \lambda^2 t e^{-\lambda t}, \lambda > 0, t > 0.$$

- 2) Розрахунок ЩЙ тривалості n -ої відмови для будь-якої заданої ЩЙ $f(t)$ для часу між відмовами з використанням теорії функціонального перетворення випадкових величин:

$$f_n(t) = \int_{-i\infty}^{i\infty} \left(\int_0^{\infty} f(t) e^{iwt} dt \right)^n dw$$

3) Визначити ймовірність появи n відмов протягом інтервалу часу, що спостерігається, за допомогою функція розподілу ймовірностей (ФРЙ):

$$F_n(t) = \int_0^t f_n(t) dt$$

4) Визначити розподіл кількості відмов протягом інтервалу часу, що спостерігається:

$$P(n/t) = F_n(t) - F_{n+1}(t) = \int_0^t f_n(t) dt - \int_0^t f_{n+1}(t) dt = \frac{(\lambda t)^{2n+1}}{(2n+1)!} e^{-\lambda t} + \frac{(\lambda t)^{2n}}{(2n)!} e^{-\lambda t}$$

Ефективність процесів ТО розраховується як:

$$E(C/T_M) = \frac{E(n/T_M)C_R + C_M}{T_M}$$

5) Оцінка очікуваної кількості несправностей/відмов протягом інтервалу часу, що спостерігається T_M :

$$E(n/T_M) = \sum_{n=1}^{\infty} nP(n/T_M) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(n \frac{(\lambda T_M)^{2n+1}}{(2n+1)!} + \frac{(\lambda T_M)^{2n}}{(2n)!} \right) e^{-\lambda T_M} = \frac{\lambda T_M}{2} + \frac{e^{-2\lambda T_M}}{4} - \frac{1}{4},$$

$$E(C/T_M) = \frac{(2\lambda T_M + e^{-2\lambda T_M} - 1)C_R + 4C_M}{4T_M}$$

б) Аналіз для оптимального значення:

$$\frac{dE(n/T_M)}{dt} = \frac{-2\lambda C_R T_M e^{-2\lambda T_M} - C_R e^{-2\lambda T_M} + C_R - 4C_M}{T_M^2},$$

$$-2\lambda C_R T_M e^{-2\lambda T_M} - C_R e^{-2\lambda T_M} + C_R - 4C_M = 0,$$

$$e^{-2\lambda T_M} \approx 1 - 2\lambda T_M,$$

$$-2\lambda C_R T_M + 4\lambda^2 C_R T_M^2 - C_R + 2\lambda C_R T_M + C_R - 4C_M = 0,$$

$$\lambda^2 C_R T_M^2 - C_M = 0$$

7) Визначити оптимальний інтервал ТО $T_{M opt}$:

$$T_{M opt} = \sqrt{\frac{C_M}{\lambda^2 C_R}}$$

C_R – вартість КТО, C_M – вартість ПТО, λ – інтенсивність відмов.

4.6 Оптимізований підхід до прогнозування запасів запасних частин під час експлуатації повітряних суден

1. Контролювати стан систем/конструкцій ПС з використанням методики аналізу надійності (див. підрозділ 4.3) та прогностичного моніторингу працездатності.

2. Розрахуйте ФРЙ максимальної витрати запасних частин x :

$$F(x) = \sum_{j=0}^x \frac{(\lambda T_{\Sigma})^j}{j!} e^{-\lambda T_{\Sigma}}$$

3. Значення $F(x)$ відповідає необхідній ймовірності безвідмовної роботи $p_i(T_{\Sigma})$ кожної системи або елемента ПС; $p(T_{\Sigma})$ оцінюється за допомогою теореми множення ймовірностей:

$$p(T_{\Sigma}) = \prod_{i=1}^n p_i(T_{\Sigma})$$

$$\sqrt[n]{p(T_{\Sigma})} = \sum_{j=0}^{k_i} \frac{(\lambda_i T_{\Sigma})^j}{j!} e^{-\lambda_i T_{\Sigma}} .$$

4. Визначити значення $p_i(T_{\Sigma})$ за допомогою графічного методу побудови сімейств графів для $F(x)$.

5. Оцінити оптимальну кількість запасних частин. Це значення є абсцисою точки перетину відповідного графіка розрахункової інтенсивності відмов та необхідного значення ймовірності безвідмовної роботи.

4.7 Переваги запропонованої чотирьохетапної методики оптимізації процесів технічного обслуговування повітряних суден для підтримання льотної придатності

Оптимізація ТО в практичних випадках фокусується на визначенні того, які дії є обов'язковими і коли їх застосовувати, тоді як математично проблема є проблемою послідовного прийняття рішень у невизначеному середовищі, і її рішення є складним завданням. Багато зусиль у галузі досліджень, особливо в галузі аналізу надійності, було спрямовано на пошук оптимальних стратегій технічного обслуговування. Формулювання проблеми та придатність різних підходів до вирішення можуть різнитися в залежності від розглянутого додатка. Вибір найбільш рентабельної стратегії рідко буває простим [174], отже, запропонована методологія є короткою покроковою і з простим у використанні підходом до оптимізації ТО ПС для підтримки льотної придатності. Очікується, що застосування цієї методології дасть значні переваги при виборі найбільш придатного втручання по ТО на основі об'єктивних критеріїв, при оцінці ймовірності позапланового ТО і при оцінці кількості запасних компонентів, необхідних як для планового, так і для позапланового ТО.

Стандарт вищої надійності, доступності, ремонтпридатності та безпеки (НДРБ) є метою експлуатації ПС. Оптимальне прогнозне планування ТО на основі даних та зміна графіка є ключовим елементом для актуалізації мети НДРБ. Запропонована методологія забезпечує основу для досягнення цієї мети. Її також можна впровадити на етапі проектування та виробництва ЖЦ ПС, оскільки вбудовані прогностичні можливості для планування ТО призводять до скорочення затримок на ТО, збільшення доступності ПС та вищого рівня експлуатаційної готовності. Крім того, для реалізації планування технічного обслуговування на основі прогнозів потрібні різні сучасні технології та методології, включаючи ефективну систему обробки даних та управління, передові методи інтелектуального аналізу даних та обчислень, складні прогностичні алгоритми, а також алгоритми оптимізації для вирішення проблеми

графіка технічного обслуговування складних та великомасштабних оптимізаційних формулювань [47]. Проста у використанні запропонована методологія може бути реалізована для оптимізації стратегії технічного обслуговування на основі прогнозів.

Пропонована методологія забезпечує основу для максимального використання даних щоденних операцій ПС, які часто зберігаються, але значною мірою ігноруються. Отримані дані можна використовувати для оцінки ймовірності відмови компонентів літака, розрахунку оптимального інтервалу завдань ТО та відповідного планування дій щодо ТО. Як показано на рис. 4.2 очікується, що цей підхід зменшить втрати, що виникають через раннє ТО, та витрати на відмову, пов'язані з пізнім ТО.

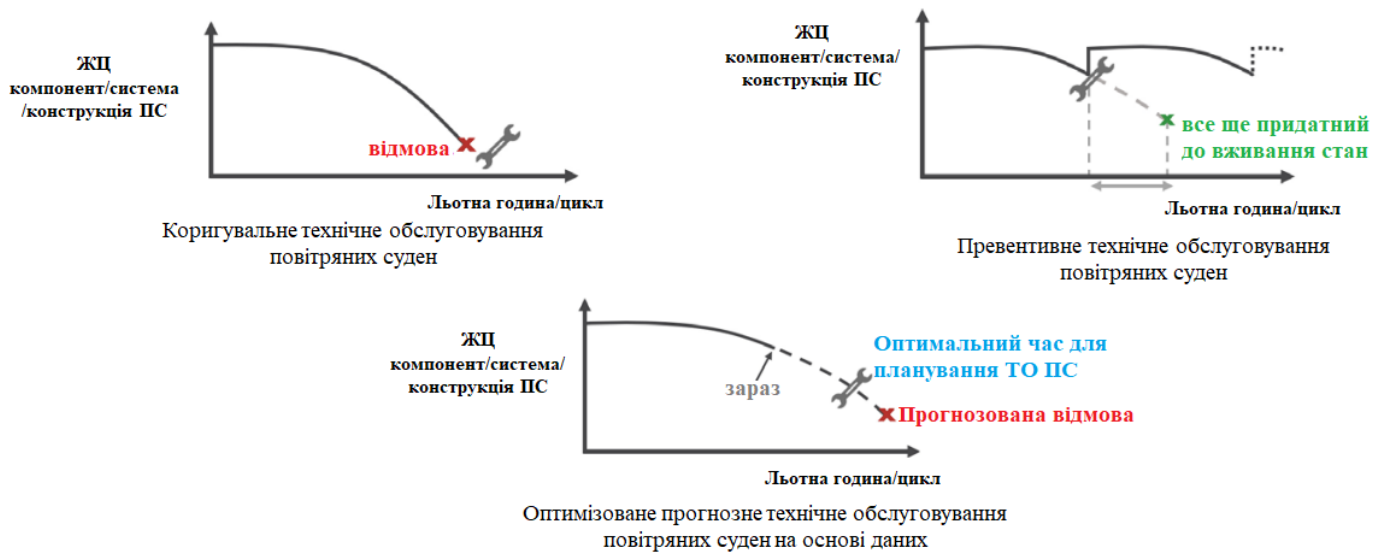


Рис. 4.2 – Ілюстрація переваг оптимізованого прогностичного технічного обслуговування повітряних суден на основі даних

Ефективність запропонованого методу доведена аналітичними та чисельними прикладами. Пропоновані моделі та алгоритм мають як хороший експериментальний ефект, так і теоретичну збіжність. Їх ефективність була продемонстрована за допомогою всебічного обчислювального експерименту з використанням реальних даних про літаки та гелікоптери, що працюють у Нігерії. Результати аналізу у розділі 3

показують, що запропоновані моделі та алгоритми ефективні для оптимізації технічного обслуговування повітряних суден на всіх трьох етапах ЖЦ ПС. Отже, його можна запровадити не лише в Нігерії, яка є країною західноафриканського регіону, а й у всьому світі з урахуванням стандартів безпеки та льотної придатності.

Оптимізований підхід до ТО ПС на основі даних з використанням запропонованої методології може призвести до скорочення часу простою ПС, більш цілеспрямованого ТО, підвищення доступності ПС у стійкому стані, зменшення кількості виявлених несправностей та більш ефективного управління запасами. Розуміння реалізації запропонованої методології дозволяє інженерам та технічним фахівцям застосовувати запобіжний підхід до планування ТО ПС, вирішуючи реальні проблеми до того, як вони створять складніші проблеми, тим самим максимально збільшуючи доступність та надійність ПС. До того ж, замовлення, закупівля запасних частин та прийняття рішень значно покращені за рахунок підвищення точності прогнозування та використання.

Висновки до розділу 4

1. Традиційні дії по ТО, тобто КТО і ПТО, більше не можуть вирішувати проблеми підвищеної складності систем. Тому можна реалізувати перехід до комплексних підходів до ТО, заснованих на рішеннях Четвертої промислової революції, для оптимізації процесів ТО ПС без порушення безпеки та надійності.

2. Існуючі моделі оптимізації ТО не є найкращими рішеннями для оптимізації ТО ПС через: а) вони вважаються статичними, оскільки оптимізація заснована на фіксованих відомих сценаріях ТО, які вимагають регулярної модифікації через фундаментальні фактори, такі як: стан працездатності компонентів, вартість ремонту, замовлення на запасні частини, – що змінюються з часом; б) вхідні дані цих моделей, такі як: інтенсивність відмов, середній робочий час, вимоги до готовності

повітряного судна та ін., не повністю охоплюють інші фактори ПС, а саме вартість ремонту, інформація ПУТС, наявність запасних компонентів, – їх необхідно розглядати спільно; в) ефект довгострокової продуктивності рідко розглядається.

3. Враховуючи недоліки існуючих моделей оптимізації ТО, основним внеском цього дослідження є проста і розширювана чотириетапна методологія, яка поєднує підходи до аналізу надійності систем та конструкцій ПС, прогнозування несправностей/відмов систем ПС, оптимізації інтервалів завдань ТО ПС з використанням середніх експлуатаційних витрат, як заходів задля ефективності та прогнозування запасів запасних частин, для оптимізації процесів ТО ВС. Пропонована чотириетапна методологія використовує переваги новітніх методів прогнозуючого обслуговування на основі даних, заснованих на МН, надійності, теорії ймовірності та статистики, і дозволяє оптимізувати процеси ТО ПС зі скороченням витрат на ТО та часу простою без порушення безпеки.

4. Запропонована методологія забезпечує основу для максимального використання даних про щоденні операції ПС, які часто зберігаються, але значною мірою ігноруються. Отримані дані можна використовувати для оцінки ймовірності відмови компонентів ПС, розрахунку оптимального інтервалу завдань ТО та відповідного планування дій по ТО, що призводить до більш передбачуваних та ефективних можливостей планування ТО ПС. Очікується, що її застосування дасть значні переваги при виборі найбільш придатного втручання по ТО на основі об'єктивних критеріїв, при оцінці ймовірності позапланового ТО і при оцінці кількості запасних компонентів, необхідних як для планового, так і для позапланового ТО. Крім того, інформація, отримана в результаті її використання, може бути корисною при вирішенні проблеми оптимізації ТО на етапі проектування життєвого циклу ПС.

ВИСНОВКИ

У цій дисертації на прикладі експлуатації ПС у Нігерії було виконано наукове завдання щодо розробки статистичних та математичних моделей для оптимізації процесів ТО ПС. Запропоновані моделі та алгоритми забезпечують основу для максимального використання даних про щоденні операції ПС, які часто зберігаються, але в основному ігноруються. Моделі поєднуються у чотириступінчасту методологію, яка, як очікується, скоротить втрати, що виникають через раннє ТО, і витрати на відмову, пов'язані з пізнім ТО. Були отримані такі основні результати дослідження:

1. Етапи експлуатації життєвого циклу ПС коштують у 10-20 разів дорожче, ніж етапи проектування та виробництва; це обґрунтовує необхідність реалістичності математичних моделей та формулювання оптимізаційної задачі; надійність системи, процеси ТО та вартість необхідно розглядати, починаючи з першої фази життєвого циклу ПС.

2. Поглиблений аналіз експлуатації ПС саме у Нігерії – країні Західної Африки, щоб зрозуміти причину значно вищої, ніж середня, вартості ТО ПС, незважаючи на щорічні темпи зростання після пандемії COVID-19 на 43,41% та 57,61% відповідно для внутрішніх та міжнародних пасажирських перевезень. Дослідження з персоналу, що працює з експлуатантами ПС та регулюючими органами в Нігерії, виявили безліч проблем. Це виправдовує необхідність того, щоб оператори в Нігерії та в усьому світі впровадили оптимізований процес прогностичного ТО на основі даних, заснований на принципах Четвертої промислової революції. Це дослідження було присвячене розробці цих моделей та алгоритмів з використанням даних про реальні щоденні операції ПС: ERJ 135, ATR 42-300, MD-83, S-76 та S-92, які експлуатуються у Нігерії.

3. ТООН спочатку було розроблено для використання в авіаційній промисловості. Він дозволяє розрахувати надійність системи з урахуванням різних видів ТО та їх інтервалів, тим самим надаючи інформацію для оптимізації

експлуатаційних витрат, безпеки та надійності. Аналіз літератури показує значні дослідження у галузі розробки моделей для стратегій ТООН. Однак існує прогалина в математичних моделях для визначення характеристичної надійності авіаційних систем для оптимізації ТО ПС. Потреба у таких моделях виправдовує розробку статистичних імітаційних моделей у цьому дослідженні, для забезпечення глибокого розуміння взаємодії між рівнями надійності та історичними тенденціями несправностей і відмов у експлуатації ПС. Залежно від розміру вибірки були розроблені дві моделі статистичного моделювання, які можуть значно покращити існуючу структуру ТООН в авіації.

4. Чтобы значительно уменьшить количество незапланированных задач по ТО ВС, необходимо точное или почти точное прогнозирование возникновения неисправностей/отказов. В этом исследовании была изучена и проверена первоначальная попытка прогнозирования отказов компонентов, подсистем, систем и конструкций ВС с использованием данных о ежедневной эксплуатации ВС. Модель для этого прогноза была разработана с использованием комбинации статистических методов и методов МО; вычислительная оценка демонстрирует ее применимость к эксплуатации ВС.

5. Роботи по оперативному ТО переривають звичайні польоти ПС через їх частоту, крім того, вони призводять до частого відкривання та закривання панелей, що призводить до значного зношування, тим самим знижуючи властиву ПС надійність. Це обґрунтовує необхідність оптимального інтервалу виконання завдань з ТО ПС, для чого і були проведені значні дослідження. Однак існуючі моделі використовують рівень витрат на ТО як критерій оптимізації, але не беруть до уваги характеристики надійності, що не ідеально для експлуатації ПС; слід враховувати вартість обслуговування та надійність. Це виправдовує розробку моделі у цьому дослідженні визначення оптимального інтервалу виконання завдань по ТО ПС з допомогою середніх експлуатаційних витрат за одиницю часу. Пропонована модель дає кількісну оцінку витрат і вигод на ТО для отримання оптимального балансу між факторами.

6. Вартість запасних частин становить 60-80% витрат на ТО, а 80% часу простою викликано 20% обладнання. Надмірна кількість запасних частин призводить до високих витрат на утримання та перешкоджає обороту грошових потоків. Навпаки, недостатність запасних частин може призвести до дорогого скасування або затримки рейсів, що негативно впливає на продуктивність авіакомпаній. Світова галузь цивільної авіації нині зберігає запасні частини на суму близько 50 мільярдів доларів, що становить приблизно 75% товарно-матеріальних запасів авіакомпаній та 25% оборотного капіталу. Однак оборотність та коефіцієнт використання більшості запасних частин для цивільних ПС невисокі – використовується лише 25%, і навіть більше, існує проблема надмірного відставання. Це доводить необхідність раціонального прогнозу потреби (достатності) в запасних частинах. Моделі, запропоновані у цій дисертації, були розроблені з використанням комбінації аналітичних підходів, які зосереджені на взаємодії між інтенсивністю відмов та запасами запасних частин. Моделі прив'язані до інтенсивності відмов, а ймовірність безвідмовної роботи визначається з використанням даних реального ПС. Інтенсивність відмов дає надійну інформацію для точного прогнозу потреби у запасних частинах.

7. Здатності точно визначати момент виникнення відмови недостатньо для поліпшення ремонтпридатності, оскільки розрізнені окремі втручання можуть збільшити загальний час простою. Таким чином, моделі для аналізу надійності, прогнозування відмов, визначення оптимального інтервалу ТО та прогнозування потреби в запасних частинах були об'єднані у чотириетапну методологію, яка створює основу для подальших розробок з огляду її майбутнього розширення, перевірки та впровадження. Її унікальність полягає в тому, що, хоча більшість досліджень зосереджена на окремих компонентах або системах, запропонована методологія розглядає всі компоненти та системи ПС як єдину структуру. До того ж, запропоновані моделі та алгоритми були перевірені з використанням експлуатаційних даних ПС і можуть бути масштабовані для кількох систем без необхідності спеціальних знань у предметній галузі.

8. MRBR будь-якого нового ПС розробляється без досвіду експлуатації, що призводить до тенденції бути консервативним у процесі прийняття рішень. У міру того, як ПС накопичує досвід експлуатації, інтервали між завданнями слід коригувати відповідно до результатів професійного аналізу фактичних даних у процесі експлуатації, оскільки інтервали втручання/заміни часто несуттєво залежать від фактичної надійності системи – це призводить до того, що витрати на ТО перевищують оптимальні. Пропонована чотириетапна методологія може застосовуватися на етапі проектування та виробництва життєвого циклу ПС, а також на етапі експлуатації в міру накопичення досвіду експлуатації ПС.

9. Нова чотириступінчаста методологія, запропонована у цьому дослідженні, визначає підхід, заснований на даних, який забезпечує загальну теоретичну основу для оптимізації процесів технічного обслуговування літаків для підтримання льотної придатності. Ці моделі та алгоритми можуть бути перетворені на рішення для забезпечення економічної та ефективної експлуатації ПС. Практичність і користь від застосування цього підходу включає: скорочення кількості НВ через дії по превентивному ТО, оптимальний інтервал завдань ТО і скорочення часу простою через брак запасних частин. На підставі сучасної літератури та галузевому прикладі, запропонована методологія вважається новою теоретичною основою для ТО ПС, орієнтованого на врахування експлуатаційних характеристик та стан компонентів або системи ПС. Основні концепції застосовуваних теорій було пояснено у дисертації.

10. Ґрунтуючись на вже наявних знаннях та досвіді ТО ПС, моделі та алгоритми в запропонованій методології оптимізації процесів ТО ПС для підтримання ЛП стануть однією з необхідних умов для застосування ТО ПС на основі даних. До того ж, ці концепції можуть бути реалізовані на етапах проектування та виробництва ЖЦ ПС для забезпечення вищих рівнів надійності та початкової ЛП.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. National Bureau of Statistics. Air Transportation Data (Full Year 2021). URL: <https://nigerianstat.gov.ng/elibrary/read/1241160>.
2. Lawani M. Airlines choking on high repair, fuel costs — REPORT. Vanguard News Nigeria. 2021. URL: <https://www.vanguardngr.com/2021/08/airlines-choking-on-high-repair-fuel-costs-report/>.
3. Hodkiewicz M., Lukens S., Brundage M. P., and Sexton, T. Rethinking maintenance terminology for an industry 4.0 future. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2021. Vol. 12 No. 1. doi.org/10.36001/ijphm.2021.v12i1.2932.
4. van Staden H. E., Depre L., and Boute R. N. A dynamic “predict, then optimize” preventive maintenance approach using operational intervention data. *European Journal of Operational Research*. 2022. Volume 302 (3), P. 1079-1096. doi.org/10.1016/j.ejor.2022.01.037.
5. Livne E. Reflections on Active Aeroelastic Control and the Multidisciplinary Design Optimization of Aircraft. *33rd Congress of The International Council of the Aeronautical Sciences Enoch Thulin Lecture for Innovation in Aeronautics*. 2022.
6. Sushchenko O.A., Golitsyn V.O. Data processing system for altitude navigation sensor. *Proceedings of IEEE 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control*, Ukraine. 2016. P. 84-87. doi.org/10.1109/MSNMC.2016.7783112.
7. Kharchenko V.P., Kuzmenko N.S., Ostroumov I.V. Identification of Unmanned Aerial Vehicle Flight Situation. *Proceedings of IEEE 4th International Conference on Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments*, Kyiv, Ukraine. 2017. P. 116-120. doi.org/10.1109/APUAVD.2017.8308789.
8. Prokopenko I. G., Migel S. V., Prokopenko K. I. Signal Modeling for the Efficient Target Detection Tasks. *Proceedings of International Radar Symposium*, Dresden, Germany. 2013, Vol. II. P. 976-982.
9. Shmelova T., Sikirda Yu., Kasatkin M. Applied Artificial Intelligence for Air Navigation Sociotechnical System Development. *Proceedings of ICT in Education, Research and*

Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer; Part V: Posters, Kherson, Ukraine. 2019. P. 470-475.

10. Shmelova T., Sikirda Yu., Scarponi C., and Chialastri A. Deterministic and Stochastic Models of Decision Making in Air Navigation Socio-Technical System. *Proceedings of ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer; Part III: Theory of Reliability and Markov Modelling for Information Technologies (TheRMIT 2018)*, Kyiv, Ukraine. 2018, Vol. II. P. 649-656.
11. Solomentsev O., Zaliskyi M., Herasymenko T., Kozhokhina O., and Petrova Y. Efficiency of Operational Data Processing for Radio Electronic Equipment. *Aviation*. 2019, Vol. 23 (3). P. 71-77. doi.org/10.3846/aviation.2019.11849
12. Brunton S.L., Nathan Kutz J., Manohar K., Aravkin A.Y., Morgansen K., Klemisch J., Goebel N., Buttrick J., Poskin J., Blom-Schieber A.W. and Hogan T. Data-driven aerospace engineering: reframing the industry with machine learning. *AIAA Journal*, 2021, 59(8). P. 2820-2847.
13. Schmidt M., Ploetner K.O., Öttl G., Isikveren A.T. and Hornung M. Scenario-based life-cycle cost assessment of future air transport concepts. *International Journal of Aviation Management*. 2015, 2(3/4). P. 167-182.
14. Nigeria Civil Aviation Authority (NCAA). About NCAA. Extracted July 2020 URL: <https://ncaa.gov.ng/about/about-ncaa/>
15. Nigeria Civil Aviation Regulations (Nig.CARs) - Part 5. Extracted July 2020. URL: <https://ncaa.gov.ng/documents/regulations/nigeria-civil-aviation-regulations-nig-cars-part-5/>.
16. Gratton G. Initial airworthiness: Determining the acceptability of new airborne systems. *Springer International Publishing, Switzerland*. 2015. 319 p.
17. Coutu A., Alblowi M. ICAO Doc 9760 (Airworthiness Manual) 3rd Edition. 2014. 166 p.
18. Part M Continuing Airworthiness Managements Organization. International Civil Aviation Organization (ICAO) Documents. Extracted July 2020. URL:

www.icao.int/MID/Documents/2019/ACAO-ICAO%20Airworthiness/Session%207%20Part%20M%20CAMO%20final.pdf

19. Ren, H., Chen, X. and Chen, Y., 2017. Reliability based aircraft maintenance optimization and applications. *Shanghai Jiao Tong University Press, Published by Elsevier Inc.* 2017. 237 p.
20. European Committee for Standardization (CEN). EN 13306:2017 Maintenance Terminology. European Standard, Brussels.
21. Halm J., Hechtenberg K.V. and Kolander W. System and method for diagnosing aircraft components for maintenance purposes. *EADS Deutschland GmbH and Airbus Operations GmbH.* 2006, U.S. Patent 7,050,894.
22. Marwedel S., Reitmann J. and Poupard M. Platform for aircraft maintenance services. *Airbus Operations GmbH.* 2013, U.S. Patent Application 13/508,515.
23. Huet J.M., Besseau S., Maillard B. and Michaud F. Method and computer program for the maintenance aid of aircraft equipment. *Airbus Operations SAS and Airbus SAS.* 2017, U.S. Patent 9,767,413.
24. Hinsch M. Industrial aviation management: A primer in European design, production and maintenance organisations. *Springer-Verlag GmbH Germany.* 2019. 345 p.
25. Celikmih K., Inan O. and Uguz H. Failure prediction of aircraft equipment using machine learning with a hybrid data preparation method. *Scientific Programming.* 2020, Article ID 8616039. doi.org/10.1155/2020/8616039
26. Dhillon B.S. 2002. Engineering maintenance: a modern approach. CRC Press LLC. 2002. 222p.
27. Sharma A., Yadava G.S. and Deshmukh S.G. A literature review and future perspectives on maintenance optimization. *Journal of Quality in Maintenance Engineering.* 2011, Vol. 17 No. 1. P. 5-25.
28. Niu G., Yang B.S. and Pecht M. Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliability engineering & system safety.* 2010. 95(7). P. 786-796.

29. Dhillon B.S. Maintainability, maintenance, and reliability for engineers. Taylor & Francis Group, LLC. 2006. 221p.
30. Nigeria Civil Aviation Regulations (Nig.CARs) - Part 9. Extracted July 2020. URL: <https://ncaa.gov.ng/documents/regulations/nigeria-civil-aviation-regulations-nig-cars-part-9/>.
31. ATR 42-300/320 Series Maintenance Programme. 2021, Issue 5.
32. QID 927-S76C++ Maintenance Programme. 2018, Issue 2.
33. Maisonneuve P.L., Glade M., Ghelam S. and Lyonnet P. Method of organizing aircraft maintenance. *Eurocopter France SA*. 2013, U.S. Patent 8,478,477.
34. A'Hearn F.W. The MSG-2 Commercial Airline Concept: A Department of Defense Program for Reliability-Centered Maintenance. *Defense Systems Management College, Fort Belvoir, Virginia*. 1977. 73 p
35. ATA MSG-3 Operator/Manufacturer Scheduled Maintenance Development. *Air Transport Association of America, Inc*. 2002, Revision 2002.1. 92 p
36. Shaukat S., Katscher M., Wu C.L., Delgado F. and Larrain, H. Aircraft line maintenance scheduling and optimisation. *Journal of Air Transport Management*. 2020 (89). P. 101914.
37. Hu Y., Miao X., Zhang J., Liu J. and Pan E. Reinforcement learning-driven maintenance strategy: A novel solution for long-term aircraft maintenance decision optimization. *Computers & Industrial Engineering*. 2021(153). P. 107056.
38. Callewaert P., Verhagen W.J. and Curran R. Integrating maintenance work progress monitoring into aircraft maintenance planning decision support. *Transportation Research Procedia*. 2018(29). P. 58-69.
39. Verhoeff M., Verhagen W.J.C. and Curran R. 2015. Maximizing operational readiness in military aviation by optimizing flight and maintenance planning. *Transportation Research Procedia*. 2015(10). P. 941-950.

40. Dinis D., Barbosa-Póvoa A. and Teixeira Â.P. A supporting framework for maintenance capacity planning and scheduling: Development and application in the aircraft MRO industry. *International Journal of Production Economics*. 2019(218). P. 1-15.
41. Qin Y., Zhang J.H., Chan F.T., Chung S.H., Niu B. and Qu T. A two-stage optimization approach for aircraft hangar maintenance planning and staff assignment problems under MRO outsourcing mode. *Computers & Industrial Engineering*. 2020(146). P. 106607.
42. Peschiera F., Battaïa O., Haït A. and Dupin N. Long term planning of military aircraft flight and maintenance operations. *ISAE-SUPAERO, Universite de Toulouse, France*. 2020
43. Yang Z. and Yang, G. Optimization of aircraft maintenance plan based on genetic algorithm. *Physics Procedia*. 2012(33). P. 580-586.
44. Deng Q., Santos B.F. and Verhagen W.J. 2021. A novel decision support system for optimizing aircraft maintenance check schedule and task allocation. *Decision Support Systems*. 2021(146). P. 113545.
45. Papakostas N., Papachatzakis P., Xanthakis V., Mourtzis D. and Chryssolouris G. An approach to operational aircraft maintenance planning. *Decision support systems*. 2010, Vol. 48(4). P. 604-612.
46. Goossens H., Van Blokland W.B. and Curran R. The Development and Application and of a Value-Driven Aircraft Maintenance Operations Performance Assessment Model Combined with Real Options Analysis. *11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, including the AIAA Balloon Systems Conference and 19th AIAA Lighter-Than*. 2011. P. 6992
47. Li Z., Guo J. and Zhou R. 2016, January. Maintenance scheduling optimization based on reliability and prognostics information. *In IEEE 2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. P. 1-5
48. Deng Q., Santos B.F. and Curran R. A practical dynamic programming based methodology for aircraft maintenance check scheduling optimization. *European Journal of Operational Research*. 2020 Vol. 281(2). P. 256-273.

49. Sriram C. and Haghani A. An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2003, Vol. 37(1). P. 29-48.
50. Hölzel N.B., Schröder C., Schilling T. and Gollnick V. A maintenance packaging and scheduling optimization method for future aircraft. *In Air Transport and Operations*, IOS Press. P. 343-353
51. De Bruecker P., Van den Bergh J., Beliën J. and Demeulemeester E. A model enhancement heuristic for building robust aircraft maintenance personnel rosters with stochastic constraints. *European Journal of Operational Research*. 2015, Vol. 246(2). P. 661-673.
52. Lee Y., Park J. and Lee D. Inspection interval optimization of aircraft landing gear component based on risk assessment using equivalent initial flaw size distribution method. *Structural Health Monitoring*. 2022, Vol.21(4). P. 1396-1406.
53. Yang J.N. and Trapp W.J. Inspection frequency optimization for aircraft structures based on reliability analysis. *Journal of aircraft*. 1975, Vol.12(5). P. 494-496.
54. Jiang L.P. 2012. An optimization model for aircraft maintenance scheduling based on ABC algorithm. *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications Ltd. 2012, Vol. 490. P. 147-151.
55. Lin L., Wang F. and Luo B. An optimization algorithm inspired by propagation of yeast for fleet maintenance decision making problem involving fatigue structures. *Applied Soft Computing*. 2019, Vol. 85. P. 105755.
56. Sanchez D.T., Boyacı B. and Zografos K.G. An optimisation framework for airline fleet maintenance scheduling with tail assignment considerations. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2020. Vol. 133. P. 142-164.
57. Li H., Zuo H., Lei D., Liang K. and Lu T. Optimal combination of aircraft maintenance tasks by a novel simplex optimization method. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015.

58. Witteman M., Deng Q. and Santos B.F. A bin packing approach to solve the aircraft maintenance task allocation problem. *European Journal of Operational Research*. 2021, Vol 294. P. 365-376.
59. Li H., Zuo H., Liang K., Xu J., Cai J. and Liu J. Optimizing combination of aircraft maintenance tasks by adaptive genetic algorithm based on cluster search. *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 2016, Vol. 27(1). P. 140-156.
60. Muchiri A.K. and Smit K. Optimizing aircraft line maintenance through task re-clustering and interval de-escalation. *Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology*. 2017.
61. Ali B., Kamal K., Usman M., Mah-e-Zehra. Optimization of aircraft maintenance routing using uninformed and informed search algorithms. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2019. P. 141-145
62. Safaei N. and Jardine A.K. Aircraft routing with generalized maintenance constraints. *Omega (United Kingdom)*. 2018, Vol. 80. P. 111-122.
63. Gopalan R. and Talluri K.T. The aircraft maintenance routing problem. *Operations research*. 1998, 46(2). P. 260-271.
64. Ahmed M.B., Mansour F.Z. and Haouari M. A two-level optimization approach for robust aircraft routing and retiming. *Computers & Industrial Engineering*. 2017, Vol. 112. P. 586-594.
65. Cui R., Dong X. and Lin Y. Models for aircraft maintenance routing problem with consideration of remaining time and robustness. *Computers & Industrial Engineering*. 2019, Vol. 137. P. 106045.
66. Eltoukhy A.E., Chan F.T., Chung S.H. and Niu B. 2018. A model with a solution algorithm for the operational aircraft maintenance routing problem. *Computers & Industrial Engineering*. 2018, Vol. 120. P. 346-359.
67. Al-Thani N.A., Ahmed M.B. and Haouari M. A model and optimization-based heuristic for the operational aircraft maintenance routing problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2016, Vol. 72. P. 29-44.

68. Sarac A., Batta R. and Rump C.M. A branch-and-price approach for operational aircraft maintenance routing. *European Journal of Operational Research*. 2006, Vol. 175(3). P. 1850-1869.
69. Başdere M. and Bilge Ü. Operational aircraft maintenance routing problem with remaining time consideration. *European Journal of Operational Research*. 2014, Vol. 235(1). P. 315-328.
70. Eltoukhy A.E.E., Wang Z.X., Chan F.T.S., Chung S.H. Joint optimization using a leader-follower Stackelberg game for coordinated configuration of stochastic operational aircraft maintenance routing and maintenance staffing. *Computers & Industrial Engineering*. 2018. doi.org/10.1016/j.cie. 2018.08.012
71. Feng Y.W., Chen J.Y., Lu C. and Zhu S.P. Civil aircraft spare parts prediction and configuration management techniques: review and prospect. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021, Vol.13(6).
72. Gu J., Zhang G. and Li K.W. Efficient aircraft spare parts inventory management under demand uncertainty. *Journal of air transport management*. 2015, Vol. 42. P. 101-109.
73. Fritzsche R. and Lasch R. An integrated logistics model of spare parts maintenance planning within the aviation industry. *Proceedings of world academy of science, engineering and technology*. 2012, Vol. 68.
74. Ni X., Zuo H. and Liu, M. Research on optimization model of civil aircraft spare parts inventory allocation. *IEEE Chinese control and decision conference*. 2008. P. 1042-1045.
75. Cai J., Li X. and Chen X. Joint optimization of maintenance inspection and spare provisioning for aircraft deteriorating parts. *Journal of Systems Engineering and Electronics*. 2017, Vol. 28(6). P. 1133-1140.
76. Li Y., Feng Y., Xue X. and Lu C. A united allocation method of spare parts and ground maintenance equipment for civil aircraft. *MATEC Web of Conferences EDP Sciences*. 2017, Vol. 114. P. 03006.

77. Lee L.H., Chew E.P., Teng S. and Chen Y. Multi-objective simulation-based evolutionary algorithm for an aircraft spare parts allocation problem. *European Journal of Operational Research*. 2008, Vol. 189(2). P. 476-491.
78. De Bruecker P., Beliën J., Van den Bergh J. and Demeulemeester E. A three-stage mixed integer programming approach for optimizing the skill mix and training schedules for aircraft maintenance. *European Journal of Operational Research*. 2018, Vol. 267(2). P. 439-452.
79. De Bruecker P., Van den Bergh J., Belien J. and Demeulemeester E. A two-stage mixed integer programming approach for optimizing the skill mix and training schedules for aircraft maintenance. 2015. Available at SSRN 2697491.
80. Stadnicka D., Arkhipov D., Battaïa O. and Ratnayake R.C. Skills management in the optimization of aircraft maintenance processes. *IFAC-PapersOnLine*. 2017, Vol. 50(1). P. 6912-6917.
81. Feng Q., Li S. and Sun B. 2014. A multi-agent based intelligent configuration method for aircraft fleet maintenance personnel. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014, Vol. 27(2). P. 280-290.
82. Rodrigues L.R., Gomes J.P., Ferri F.A., Medeiros I.P., Galvao R.K. and Júnior C.L.N. Use of PHM information and system architecture for optimized aircraft maintenance planning. *IEEE Systems Journal*. 2014, Vol. 9(4). P. 1197-1207.
83. Ferri F.A.S., Rodrigues L.R., Gomes J.P.P., de Medeiros I.P., Galvão R.K.H. and Nascimento C.L. Combining PHM information and system architecture to support aircraft maintenance planning. *IEEE International Systems Conference (SysCon)*. 2013. P. 60-65.
84. Vianna W.O.L. and Yoneyama T. Predictive maintenance optimization for aircraft redundant systems subjected to multiple wear profiles. *IEEE Systems Journal*. 2017, Vol. 12(2). P. 1170-1181.
85. Susova G.M. and Petrov A.N. Markov model-based reliability and safety evaluation for aircraft maintenance-system optimization. *IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium*. 1997. P. 29-36.

86. Guo J., Li Z. and Wolf J. 2016, January. Reliability centered preventive maintenance optimization for aircraft indicators. *IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. 2016. P. 1-6.
87. Shanmuganathan V.K., Haran A.P., Ragavendran S. and Gayathri N. Aero-Engine Maintenance cost optimization by RCM. *Life Science Journal*. 2013, Vol.10(1). P. 2891-2896.
88. Dekker R. and Scarf P.A. On the impact of optimisation models in maintenance decision making: the state of the art. *Reliability Engineering & System Safety*. 1998, Vol.60(2). P. 111-119.
89. International Air Transport Association (IATA). Best Practices for Component Maintenance Cost Management. 2015.
90. Jiang Y., Zhang H., Song X., Jiao X., Hung W.N., Gu M. and Sun J. Bayesian-network-based reliability analysis of PLC systems. *IEEE transactions on industrial electronics*. 2012, Vol. 60(11). P. 5325-5336.
91. Pandian G.P., Diganta D.A.S., Chuan L.I., Enrico Z.I.O. and Pecht M. A critique of reliability prediction techniques for avionics applications. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2018, Vol. 31(1). P. 10-20.
92. Uganda Civil Aviation Authority (CAA Uganda). Maintenance Control by Reliability Methods, Advisory Circular CAA-AC-AWS010. 2013.
93. Hu C. and Youn B.D. Adaptive-sparse polynomial chaos expansion for reliability analysis and design of complex engineering systems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2011, Vol. 43(3). P. 419-442.
94. General information from the theory of reliability, Reliability of Aircraft lecture notes, Burlakov V.I, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, In Russian
95. Nakagawa T. Maintenance theory of reliability. *Springer Science & Business Media*. 2005.

96. Huang J., Song Y., Ren Y. and Gao Q. An optimization method of aircraft periodic inspection and maintenance based on the zero-failure data analysis. *IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*. 2014. P. 319-323.
97. Zaliskyi M., Petrova Y., Asanov M. and Bekirov E. Statistical data processing during wind generators operation. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*. 2019, Vol. 88(1). P. 33-38. doi.org/10.18178/ijeetc.8.1.33-38.
98. Zaliskyi M., Solomentsev O., Kozhokhina O. and Herasymenko T. Reliability parameters estimation for radioelectronic equipment in case of change-point. *IEEE Signal Processing Symposium (SPSymposium)*, Jachranka Village, Poland. 2017. P. 1-4. doi.org/10.1109/SPS.2017.8053676.
99. Solomentsev O., Zaliskyi M., Herasymenko T. and Petrova Y. Data processing method for deterioration detection during radio equipment operation. *IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*. 2019, Vol. 1. P. 1-4.
100. Solomentsev O., Zaliskyi M., Nemyrovets Y. and Asanov M. Signal processing in case of radio equipment technical state deterioration. *IEEE Signal Processing Symposium (SPSymposium)*, Debe, Poland. 2015. P. 1-5. doi.org/10.1109/SPS.2015.7168312.
101. Hryshchenko Y. Reliability Problem of Ergatic Control Systems in Aviation. *IEEE 4th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, Kyiv, Ukraine. 2016. P.126-129. doi.org/10.1109/MSNMC.2016.7783123.
102. Melkumyan V. Technological Systems of Service Type. Elements of Design Theory and Applied Problems of Operation, National Aviation University, Kyiv. 2003, P. 171. (in Ukrainian)
103. Solomentsev O.V., Melkumyan V.H., Zaliskyi M.Y. and Asanov M.M. UAV operation system designing. *IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*, Kyiv, Ukraine. 2015. P. 95-98. doi.org/10.1109/APUAVD.2015.7346570.
104. Taranenko A.G., Gabrousenko Ye.I., Holubnychy A.G. and Slipukhina, I.A. Estimation of Redundant Radionavigation System Reliability. Proceedings of IEEE 5th

International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, Kyiv, Ukraine. 2018. P. 28-31. doi.org/10.1109/MSNMC.2018.8576282.

105. Barlow R. E. and Proschan F. *Mathematical Theory of Reliability*. John Wiley and Sons, New York. 1965. 274 p.
106. Rubinstein R.Y. and Kroese D.P. *Simulation and the Monte Carlo Method*, Second Edition. John Wiley & Sons. 2008.
107. Churchman C.W., Ackoff R.L. and Arnoff E.L. *Introduction to Operations Research*, Wiley, New York. 1959.
108. Kiviat P. J. *Digital Computer Simulation: Modelling Concepts*, Report RM-5378-PR. *The Rand Corporation*, Santa Monica, California. 1967.
109. Papadopoulos V., Giovanis D.G., Lagaros N.D. and Papadrakakis M. Accelerated subset simulation with neural networks for reliability analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2012. P. 70-80.
110. Dubourg V. Adaptive surrogate models for reliability analysis and reliability-based design optimization. Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II. 2011.
111. Dubourg V., Sudret B. and Deheeger F. Metamodel-based importance sampling for structural reliability analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2013, Vol. 33. P. 47-57.
112. Keshtegar B. and Meng Z. A hybrid relaxed first-order reliability method for efficient structural reliability analysis. *Structural Safety*. 2017, Vol. 66. P. 84-93.
113. Sinha R.K., Shah S.A., Hume, E.L. and Tuan R.S. The effect of a 5-day space flight on the immature rat spine. *The Spine Journal*. 2002, Vol. 2(4). P. 239-243. doi.org/10.1016/S1529-9430(02)00197-3.
114. Yang J.H., Kennedy Q., Sullivan J. and Fricker R.D. Pilot performance: assessing how scan patterns & navigational assessments vary by flight expertise. *Aviation, space, and environmental medicine*. 2013, Vol. 84(2). P. 116-124. doi.org/10.3357/ASEM.3372.2013.

115. Knecht W.R. The “killing zone” revisited: Serial nonlinearities predict general aviation accident rates from pilot total flight hours. *Accident Analysis & Prevention*. 2013, Vol. 60. P. 50-56. doi.org/10.1016/j.aap.2013.08.012.
116. English J.M. and Kernan G.L. The prediction of air travel and aircraft technology to the year 2000 using the Delphi method. *Transportation research*. 1976, Vol.10(1). P. 1-8. doi.org/10.1016/0041-1647(76)90094-0.
117. Varoquaux G. Cross-validation failure: Small sample sizes lead to large error bars. *Neuroimage*. 2018, Vol.180. P. 68-77. doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.06.061.
118. Matuschek H., Kliegl R., Vasishth S., Baayen H. and Bates D. Balancing Type I error and power in linear mixed models. *Journal of memory and language*. 2017, Vol.94. P. 305-315. doi.org/10.1016/j.jml.2017.01.001.
119. D’souza R.N., Huang P.Y. and Yeh F.C. 2020. Structural analysis and optimization of convolutional neural networks with a small sample size. *Scientific reports*. 2020, Vol. 10(1). P. 1-13.
120. Dwivedi A.K., Mallawaarachchi I. and Alvarado L.A. Analysis of small sample size studies using nonparametric bootstrap test with pooled resampling method. *Statistics in medicine*. 2017, Vol. 36(14). P. 2187-2205. doi.org/10.1002/sim.7263.
121. Liu S. and Deng W. Very deep convolutional neural network based image classification using small training sample size. 3rd IAPR Asian conference on pattern recognition (ACPR), IEEE. 2015. P. 730-734. doi.org/10.1109/ACPR.2015.7486599.
122. Han L., Yang G., Dai H., Xu B., Yang H., Feng H., Li Z. and Yang X. Modeling maize above-ground biomass based on machine learning approaches using UAV remote-sensing data. *Plant methods*. 2019, Vol. 15(1). P. 1-19.
123. Gou J., Ma H., Ou W., Zeng S., Rao Y., Yang H. A generalized mean distance-based k-nearest neighbor classifier. *Expert Systems with Applications*. 2019, Vol. 115. P. 356-372. doi.org/10.1016/j.eswa.2018.08.021.

124. Zaidan M.A., Harrison R.F., Mills A.R. and Fleming P.J. Bayesian hierarchical models for aerospace gas turbine engine prognostics. *Expert Systems with Applications*. 2015, Vol. 42(1). P. 539-553. doi.org/10.1016/j.eswa.2014.08.007
125. Wang C., Guo J. and Shen A. Sensitivity analysis of censoring data from component failure analysis and reliability evaluation for the aviation internet of things. *Computer Communications*. 2020, Vol. 157. P. 28-37. doi.org/10.1016/j.comcom.2020.04.003
126. Chen X., Huang J. and Yi M. Cost estimation for general aviation aircrafts using regression models and variable importance in projection analysis. *Journal of cleaner production*. 2020, Vol. 256. P. 120648. doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120648.
127. Combrisson E. and Jerbi K. Exceeding chance level by chance: The caveat of theoretical chance levels in brain signal classification and statistical assessment of decoding accuracy. *Journal of neuroscience methods*. 2015, Vol.250. P. 126-136. doi.org/10.1016/j.jneumeth.2015.01.010.
128. ADS-79D-HDBK, Aeronautical Design Standard: Handbook for Condition-based Maintenance System for US Army Aircraft (Put onto operation 07.03.2013), Huntsville, USA. 2013. 284 p
129. Solomentsev O., Zaliskyi M., Shcherbyna O. and Kozhokhina O. Sequential procedure of changepoint analysis during operational data processing. *IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*. 2020, Vol. 1. P. 168-171. doi.org/10.1109/MTTW51045.2020.9245068.
130. Goncharenko A. V. Optimal UAV Maintenance Periodicity Obtained on the Multi-optional Basis. *Proceedings of IEEE 4th International Conference on Actual Problems of UAV Developments*. 2017. P. 65-68. doi.org/10.1109/APUAVD.2017.8308778.
131. Ulansky V. and Terentyeva I. Availability assessment of a telecommunications system with permanent and intermittent faults. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering 2017*. P. 908-911. doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100386.

132. Ulansky V. and Raza A. Determination of the optimal maintenance threshold and periodicity of condition monitoring. 1st World Congress on Condition Monitoring, London. 2017. P. 1343-1355. doi.org/10.3390/e21121193.
133. Gkioulekas I. and Papageorgiou L.G. Piecewise regression analysis through information criteria using mathematical programming. Expert Systems with Applications. 2019, Vol.121. P. 362-372.
134. Evans M.J. and Rosenthal J.S. Probability and Statistics, The Science of Uncertainty Second Edition. University of Toronto. 2009.
135. Chatterjee S., and Hadi A.S. Regression Analysis by Example, 5th Edition. Wiley Series in Probability and Statistics. 2013.
136. Seber G.A. and Lee A.J. Nonlinear Regression. Wiley series in probability and statistics. 2003. P.36-44.
137. Toms J.D. and Lesperance M.L. Piecewise regression: a tool for identifying ecological thresholds. Ecology. 2003, Vol. 84(8). P. 2034-2041.
138. Gopalakrishnan P. and Banerji A.K. Maintenance and spare parts management. PHI Private Limited Delhi. 2013. 400p.
139. Slater P. Smart inventory solutions: improving the management of engineering materials and spare parts. Industrial Press Inc. 2010. 275p.
140. Kontrec N.Z., Milovanović G.V., Panić S.R. and Milošević H. A reliability-based approach to nonrepairable spare part forecasting in aircraft maintenance system. Mathematical Problems in Engineering. 2015. doi.org/10.1155/2015/731437.
141. SKYBrary. Minimum Equipment List (MEL). URL: <https://skybrary.aero/articles/minimum-equipment-list-mel>.
142. Manzini R., Regattieri A., Pham H. and Ferrari E. Maintenance for industrial systems. Springer Series in Reliability Engineering. 2010. 479p.
143. S.R. Singh. Spare Parts. URL:<https://www.scribd.com/document/106343769/Spare-Parts>

144. Boeing 737-300/400/500 maintenance planning data. Section 8, Component Maintenance Information.
145. Thomas D.S. and Weiss B. Maintenance Costs and Advanced Maintenance Techniques: Survey and Analysis. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2021, Vol.12(1). doi.org/10.36001/ijphm.2021.v12i1.2883
146. Krokotsch T., Knaak M. and Gühmann C. Improving Semi-Supervised Learning for Remaining Useful Lifetime Estimation Through Self-Supervision. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2022, Vol. 13.
147. Oikonomou A., Eleftheroglou N., Freeman F., Loutas T., and Zarouchas D. Remaining Useful Life Prognosis of Aircraft Brakes. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2022. doi.org/10.36001/ijphm.2022.v13i1.3072.
148. Mauthe F., Hagemeyer S. and Zeiler P. Creation of Publicly Available Data Sets for Prognostics and Diagnostics Addressing Data Scenarios Relevant to Industrial Applications. *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2021, Vol.12(2). doi.org/10.36001/ijphm.2021.v12i2.3087
149. Okoro O.C. Reliability Analysis of Aircraft Fleet in Nigeria. *Proceedings of National Aviation University*. 2020, Vol. 83 (2). P.49–53.
150. Rubinstein, R.Y. *Simulation and the Monte Carlo Method*, Second Edition. John Wiley & Sons. 1981.
151. Florescu R. and Thirer N. Distribution Laws of Small Size Samples. Metrological Implementation. *Proceedings of IEEE 24th Convention of Electrical & Electronics Engineers in Israel*. 2006. P. 79-81. doi:10.1109/eeei.2006.321099.
152. Dai Z, Wang Z. and Jiao Y. Bayes Monte-Carlo assessment method of protection systems reliability based on small failure sample data. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014, Vol. 29(4). P. 1841-1848. doi:10.1109/tpwr.2014.2316915.
153. Zhang H., Yuan H. and Li P. Estimation method for extremely small sample accelerated degradation test data. *First IEEE International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE)*, China. 2015. P. 1-5. doi:10.1109/icrse.2015.7366417.

154. Hou Y. and Yang B. Probability-possibility transformation for small sample size data. IEEE Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Yantai, China. 2010, Vol. 4. P. 1720-1724. doi:10.1109/fskd.2010.5569396.
155. Qingnian Y. and Yuzhou S. The fitting method of parameter distributions in geotechnical engineering under small sample. Proceedings of IEEE 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), Dengleng, China. P. 7366-7369. 2011. doi:10.1109/aimsec.2011.6010605.
156. Kuzmin V.N. and P.I. Bidyuk. A New Approach to Detection and Correction of Outliers. Proceedings of 14th International Scientific Conference named after Academician M. Kravchuk. 2012. P. 13-15.
157. Kuzmin V.M., Zaliskyi M.Y., Odarchenko R.S. and Petrova Y.V. New approach to switching points optimization for segmented regression during mathematical model building. 4th Workshop for Young Scientists in Computer Science & Software Engineering. 2022.
158. Ostroumov I.V. and Kuzmenko N.S. Accuracy improvement of VOR/VOR navigation with angle extrapolation by linear regression. Telecommunications and Radio Engineering. 2019, Vol. 78(15). P. 1399–1412. doi: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i15.90.
159. Radonja P., Stankovic S., Matovic B. and Drazic D. Regional Models for Biological Processes Based on Linear Regression and Neural Networks. 8th IEEE Seminar on Neural Network Applications in Electrical Engineering. 2006. P. 189-193. doi: 10.1109/NEUREL.2006.341209.
160. Feng X., Zhou Y., Hua T., Zou Y. and Xiao J. Contact temperature prediction of high voltage switchgear based on multiple linear regression model. In IEEE 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), Hefei, China. 2017. P. 277-280. doi: 10.1109/YAC.2017.7967419.
161. Weisberg S. Applied Linear Regression. John Wiley and Sons, New York. 2005. 310 p.

162. Atkinson A.C., Riani M. Robust diagnostic regression analysis. Springer Series in Statistics. 2000, Vol. 2. 328 p. doi: 10.1007/978-1-4612-1160-0.
163. D. G. Kleinbaum, M. Klein. Logistic Regression. Springer-Verlag, New York. 2002. 598 p. doi: 10.1007/b97379.
164. Huet S., Bouvier A., Poursat M.A., Jolivet E. and Bouvier A.M. 2004. Statistical tools for nonlinear regression: a practical guide with S-PLUS and R examples. Springer, New York. 233 p.
165. Kaufman R.L. Heteroskedasticity in regression: Detection and correction. SAGE Publications. 2013. 112 p.
166. Zaliskyi M., Solomentsev O., Shcherbyna O., Ostroumov I., Sushchenko O., Averyanova Y., Kuzmenko N., Shmatko O., Ruzhentsev N., Popov A. and Zhyla S. 2021. Heteroskedasticity analysis during operational data processing of radio electronic systems. Data Science and Security, Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Singapore. 2021. P. 168-175. 10.1007/978-981-16-4486-3_18.
167. Ostroumov I., Kuzmenko N., Sushchenko O., Zaliskyi M., Solomentsev O., Averyanova Y., Zhyla S., Pavlikov V., Tserne E., Volosyuk V. and Dergachov K. A probability estimation of aircraft departures and arrivals delays. In International Conference on Computational Science and Its Applications. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham. 2021. P. 363-377 Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-86960-1_26.
168. Ostroumov I., Kuzmenko N., Sushchenko O., Pavlikov V., Zhyla S., Solomentsev O., Zaliskyi M., Averyanova Y., Tserne E., Popov A. and Volosyuk V. Modelling and simulation of DME navigation global service volume. Advances in Space Research. 2021, Vol. 68(8). P. 3495-3507. doi.org/10.1016/j.asr.2021.06.027.
169. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S., Solomentsev O. and Sribna O. Optimization of Maintenance Task Interval of Aircraft Systems. International Journal of Computer Network & Information Security. 2022, Vol. 14(2).

170. Wang W. A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the delay-time concept. *Reliability Engineering & System Safety*. 2011, Vol. 96(11). P. 1535-1541.
171. Figueiredo-Pinto D.G., Fan I.S. and Abrahão F.T.M. An Operational Availability Optimization Model Based on the Integration of Predictive and Scheduled Maintenance. In *PHM Society European Conference*. 2021, Vol. 6(1).
172. Bozoudis M., Lappas I. and Kottas A. Use of cost-adjusted importance measures for aircraft system maintenance optimization. *Aerospace*. 2018, Vol.5(3). P. 68.
173. Zhang J.X., Du D.B., Si X.S., Hu C.H. and Zhang H.W. Joint optimization of preventive maintenance and inventory management for standby systems with hybrid-deteriorating spare parts. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014, Vol. 214. P. 107686.
174. Fauriat W. and Zio E. Optimization of an aperiodic sequential inspection and condition-based maintenance policy driven by value of information. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020, Vol. 204. P. 107133.

ДОДАТОК 1

АЛГОРИТМ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ДЛЯ ПІДТРИМАННЯ ЛЬОТНОЇ ПРИДАТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН В НІГЕРІЇ.

Mathcad-скрипт

$A := []$

$V := \text{histogram}(n, t)$

$j := 0..(n-1)$

$\text{plot}(V_{j,1}, V_{j,0})$

$\text{plot}(i, B_i)$

$N := \text{iterations}$

$k := 0..N-1$

$C := \text{rexp}(N, \lambda)$

$D_k := \sum_{j=0}^k C_j$

$E_k := \text{md}(1)$

$F_{i,k} := 0$

$F_{n-1,k} := |D_k \text{ if } E_k \leq B_0 \text{ otherwise } 0|$

$i := 1..m$

$F_{n,k} := |D_k \text{ if } B_{i-1} < E_k \leq B_i \text{ otherwise } 0|$

$i := 0..m$

$A_n := |s \text{ evaluate } 0 \text{ for } k, \text{ for } k \in 0..N-1, \text{ if } F_{n-1,k} \neq 0| \text{ a}_s \text{ evaluate } F_{n-1,k}, s \text{ evaluate } s+1| \text{ a}|$

```

p := 1..length(An) - 1
Bn0 := An0
Bnp := Anp - Anp-1
ceil( $\sqrt{\text{length}(An)}$ ) - 1
V := histogram (ceil( $\sqrt{\text{length}(An)}$ ) - 1, Bn
j := 0.. (ceil( $\sqrt{\text{length}(An)}$ ) - 1
plot (Vj,1, Vj,0)

```

```

x = [x0, x1, x2, x3, x4, ..., xn]

```

```

x := sort(x)

```

```

mean(x) = []

```

```

stdev(x) = []

```

```

median(x) = []

```

```

 $\frac{\text{stdev}(x)}{\text{mean}(x)} = [cv]$ 

```

```

A := histogram (6, x)

```

```

i := 0..n-1

```

```

j := 0..m

```

```

plot (Aj,1, Aj,0)

```

```

 $\sqrt[3]{n} \cdot 1.5 = t$ 

```

```

k := 0..t

```

```

ymink :=  $\frac{x_k}{\text{median}(x)}$ 

```

```

ymaxk :=  $\frac{x_k + 46}{\text{median}(x)}$ 

```

```

ymin := ln(ymin)

```

$$y_{\max} := \ln(y_{\max})$$

$$up_1 := \frac{\text{stdev}(x)}{\text{mean}(x)} \cdot \sum_{k=1}^t up_k$$

$$up_2 := \left| \sum_{k=1}^t up_k \right| \cdot \frac{\text{stdev}(x)}{\text{mean}(x)}$$

$$\frac{y_1}{up_1} = []$$

$$\frac{y_2}{up_2} = []$$

$$a_1 := e^{\frac{y_1}{up_1}}$$

$$a_2 := e^{\frac{y_2}{up_2}}$$

$$x_n := \text{median}(x) \cdot a_1^{|up \cdot cv|}$$

$$BF_i = \frac{a_1 \cdot e^{-up_i} + a_2 \cdot e^{up_i}}{e^{-up_i} + e^{up_i}}$$

$$BF2_i = BF_i(up_i)$$

$$Q_i = \text{median}(x) \cdot (BF_i)^{up_i \cdot cv}$$

$$Q2_i = \text{median}(x) \cdot (BF2_i)^{up_i \cdot cv}$$

$$Q1_i = \text{mean}(x) \cdot up_i \cdot \text{stdev}(x)$$

$$\text{plot}(x_i, Q_i, Q2_i, Q1_i, up_i)$$

$$C := []$$

$$X := 1 \dots n$$

$$\text{plot}(C_i, Y(X), \quad i, X)$$

$$C_r := []$$

$$C_m := []$$

$$\lambda := []$$

$$T_m := 1000, 1500..50000$$

$$E_f(T_m) := \frac{C_r E_n(T_m) + C_m}{T_m}$$

$$E_{f_i}(T_m) := \frac{C_r \left(\frac{\lambda \cdot T_m}{2} + \frac{e^{-2\lambda \cdot T_m}}{4} - \frac{1}{4} \right)}{T_m} + C_m$$

$$\text{plot}(E_f(T_m), E_{f_i}(T_m), T_m)$$

$$\lambda := []$$

$$A := 1..n$$

$$P := 0.90..0.95$$

$$N := 1..X$$

$$M := t$$

$$P_{k,i} := \sum_{x=0}^k \frac{(\lambda_i \cdot t)^x e^{-\lambda_i \cdot t}}{x!}$$

$$\text{plot}(P_z(t, \lambda_0, z), P_z(t, \lambda_1, z), P_z(t, \lambda_2, z), \dots, P_z(t, \lambda_n, z), z)$$

ДОДАТОК 2

Список публікацій здобувача, відомості про апробацію та впровадження результатів дисертації

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних (Scopus)

1. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S., Solomentsev O., Sribna O. Optimization of Maintenance Task Interval of Aircraft Systems. International Journal of Computer Network & Information Security. 2022. Volume 14. No 2. P. 77–89.
Особистий внесок автора: розробка та імітаційне моделювання стохастичних математичних моделей з використанням діагностичних змінних та параметрів надійності для визначення оптимального інтервалу виконання завдань технічного обслуговування систем та конструкцій літальних апаратів.
2. Okoro O.C., Zaliskyi M., Serhii D., Abule I. An approach to reliability analysis of aircraft systems for a small dataset. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2023. Volume 118. P. 207–217.
Особистий внесок автора: розробка статистично значущого алгоритму та моделі аналізу надійності авіаційних систем при малому обсязі даних, характерному для маломасштабних операцій.
3. Zaliskyi M., Okoro O.C., Dmytriiev S., Fayoyiwa O.S.. Software Support for Simulation and Prediction of Failures and Faults During Aircraft Operations. Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Volume 736. P. 247–259.

Особистий внесок автора: розробка нового програмного забезпечення для моделювання та прогнозування відмов і несправностей компонентів, підсистем, систем і структур повітряних суден.

4. Zaliskyi M., Yashanov I., Okoro O.C., Shcherbyna O. Analysis of Learning Efficiency of Expert System for Decision-Making Support in Aviation. Advanced Computer Information Technologies (ACIT): Proceedings of IEEE 12th International Conference, Ruzomberok (Slovakia). 26-28 September 2022. P. 172–175.

Особистий внесок автора: аналіз різних методів навчання експертної системи на основі ймовірнісного підходу для комп'ютерних систем з використанням штучного інтелекту для імітації прийняття рішень людиною та експертом задля реалізації стратегій керованого та превентивного технічного обслуговування повітряних суден.

5. Okoro O.C., Chukwu C.N., Zaliskyi M., Holubnychyi O. A Method for Planning Spare Parts Inventory During Aircraft Operation Advanced Computer Information Technologies (ACIT): Proceedings of IEEE 12th International Conference, Ruzomberok (Slovakia). 26-28 September 2022. P. 168–171.

Особистий внесок автора: розробка методики планування запасів запасних частин під час експлуатації літаків на основі статистичних даних про напрацювання на відмову компонентів літаків.

6. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S., Qudus S. Data-Driven Approach to Optimal Aircraft Maintenance. The International Council of the Aeronautical Sciences: Proceedings of 33rd Congress, Stockholm (Sweden). 4 – 9 September 2022. P. 7114–7124.

Особистий внесок автора: розробка та синтез алгоритмів і моделей статистичної обробки даних для підвищення ефективності технічного обслуговування літальних апаратів.

Публікації у наукових фахових виданнях України

7. Okoro O.C. Reliability Analysis of Aircraft Fleet in Nigeria. Proceedings of National Aviation University. 2020, Volume 83 (2). P.49–53.

Особистий внесок автора: аналіз показників надійності приписного парку літаків і вертольотів авіакомпанії Нігерії, а також їх функціональних систем в процесі експлуатації.

8. Окооро О. Ч., Дмитрієв С. О., Заліський М. Ю., Осіпчук А. О. Моделі для аналізу надійності авіаційних компонентів, систем та конструкцій повітряних суден. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2022. Том 4 (№ 70). С. 16–21.

Особистий внесок автора: розробка статистично модельованої моделі надійності які можна реалізувати на етапі проектування та розробки компонентів, систем та конструкцій вертольотів.

9. Окооро О.Ч., Дмитрієв С. О., Заліський М. Ю., Осіпчук А. О. Статистичні імітаційні моделі оптимізації технічного обслуговування повітряних суден. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2022. Том 3 (№ 69). С. 8–12.

Особистий внесок автора: розробка статистичної імітаційної моделі відмов систем та конструкцій літаків та методом Монте-Карло.

Публікації у збірниках матеріалів конференцій

10. Okoro O.C. Optimization of Aircraft Maintenance Processes Using Regression Analysis. Current Security Problems in Transport, Energy and Infrastructure: Proceedings of Conference, Kherson. 2021. P. 244.

Особистий внесок автора: розробка моделі лінійної регресії для аналізу несправностей/відмов систем парку літаків у Нігерії.

11. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S. Statistical simulation regression models for efficient aircraft operations. Aviation in the XXI-st century - Safety in aviation and

space technology: Proceedings of The Tenth World Congress, Kyiv. 28 – 30 September 2022. P. 1–5.

Особистий внесок автора: розробка сегментованих регресійних моделей для підвищення точності прогнозування відмов компонентів, систем та конструкцій літальних апаратів з використанням даних про повсякденну експлуатацію літальних апаратів.

12. Zaliskyi M., Okoro O.C., Dmytriiev S. Statistical Simulation of Failures of the Systems and Structures of S-76 C++ Helicopters in Nigeria. Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks: Proceedings of 2nd International Conference, Kyiv-Lviv. 30 November 2020. P. 1–10.

Особистий внесок автора: представлена імітаційна програма для статистичного моделювання відмов компонента літака.

13. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S. Statistical Simulation Models for the Optimization of Aircraft Maintenance Processes. Problems of Transportation Organization and Air Transport Management: Proceedings of International Scientific-Practical Conference, Kyiv, NAU, 20 October 2021. P-3.

Особистий внесок автора: розробка підходу до розрахунку оптимального інтервалу часу виконання технічного обслуговування літальних апаратів.

14. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S. Models for Optimizing Aircraft Maintenance Processes. Condition-based Maintenance in Aerospace: Proceedings of 1st International Conference, Delft (Netherlands). 24 – 25 May 2022. P. 1–10.

Особистий внесок автора: представлені розрахункові чисельні приклади для отримання оцінок оптимального інтервалу часу для проведення профілактичного та прогнозного технічного обслуговування літальних апаратів у разі експоненціальних функцій щільності ймовірності міжвідмовних напрацювань.

15. Okoro O.C., Zaliskyi M. Models and Algorithms for Optimizing Aircraft Maintenance Processes. Air Transport Research Society: Proceedings of 25th World Conference, Antwerp (Belgium). 24 – 27 August 2022. P. 1 – 5.

Особистий внесок автора: проведено розрахунок числових прикладів для отримання оцінок оптимального інтервалу часу для проведення превентивне та прогнозного технічного обслуговування літальних апаратів у випадку функції щільності ймовірності Ерланга міжвідмовних напрацювань.

16. Okoro O.C., Zaliskyi M. Optimizing Aircraft Maintenance Processes – An Operations Data-Driven Methodology. Ontario Aircraft Maintenance Conference; The Future of Aircraft Maintenance – Performance, Professionalism and Pride: Proceedings of Conference, Toronto, (Canada). 2-3 November 2022. P.1-18.

Особистий внесок автора: здійснено аналіз різних типів стратегій прогнозного технічного обслуговування повітряних суден.

17. Okoro O.C., Zaliskyi M., Dmytriiev S. An Approach to Optimizing Aircraft Maintenance. In: Karakoc, T.H., Atipan, S., Dalkiran, A., Ercan, A.H., Kongsamutr, N., Sripawadkul, V. (eds). Research Developments in Sustainable Aviation. ISSA SARES 2021 (Proceedings of International Symposium on Sustainable Aviation, Bangkok, Thailand). Sustainable Aviation. 2023, Springer, Cham, pp. 263–269.

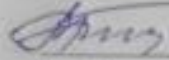
Особистий внесок автора: розроблено комп'ютерну програму для проведення статистичного моделювання з метою визначення оптимального інтервалу часу для проведення прогнозного технічного обслуговування літальних апаратів.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень обговорювалися на 12-ти міжнародних конгресах, симпозіумах та конференціях: 1) 2nd International Conference on Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks (Kyiv-Lviv, Ukraine, 2020); 2) 2021 International Symposium on Network Security and Communications (Kyiv, Ukraine); 3) Current Security Problems in Transport, Energy and Infrastructure Conference (Kherson, Ukraine, 2021); 4) 2021 International Scientific-

Practical Conference on Problems of Transportation Organization and Air Transport Management (Kyiv, Ukraine); 5) International Symposium on Sustainable Aviation (Bangkok, Thailand, 2021); 6) 1st International Conference for Condition-based Maintenance in Aerospace (Delft, Netherlands, 2022); 7) 25th Air Transport Research Society World Conference (Antwerp, Belgium, 2022); 8) 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (Stockholm, Sweden, 2022); 9) 10th World Congress "Aviation in XXI-st Century - Safety in aviation and space technology" (Kyiv, Ukraine, 2022); 10) IEEE 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (Ruzomberok, Slovakia, 2022); 11) Ontario Aircraft Maintenance Conference; The Future of Aircraft Maintenance – Performance, Professionalism and Pride (Toronto, Canada, 2022). 12) International Workshop on Advances in Civil Aviation System Development (Kyiv, Ukraine, 2023).

"ПОГОДЖЕНО"

Проректор з навчальної роботи


 Анатолій ПОЛУХІН
 «__» _____ 2023 р.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з навчальної роботи
та інноваційного розвитку

 Олександр ЦСУРАТОВ
 «__» _____ 2023 р.


АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи **Окоро Онїєдікачі Чіома** на тему:
 «Оптимізація процесів технічного обслуговування для підтримання льотної придатності
 повітряних суден в Нігерії»
 в навчальний процес
 Національного авіаційного університету

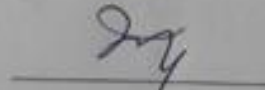
Комісія у складі:

Голова комісії	Кулик М.С.	д.т.н., проф., декан АКФ
Члени:	Сидоренко О.Ю.	к.т.н., доц. заступник декана АКФ
	Свирід М.М.	к.т.н., доц. заступник декана АКФ
	Квач Ю.М.	к.т.н., доц. заступник декана АКФ

встановила, що результати дисертаційної роботи **Окоро Онїєдікачі Чіома** за темою:
 «Оптимізація процесів технічного обслуговування для підтримання льотної придатності
 повітряних суден в Нігерії» впроваджені у навчальний процес кафедри підтримання льотної
 придатності повітряних суден АКФ:

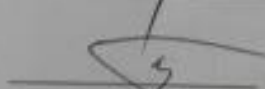
- шляхом використання у курсі лекцій з дисципліни «Основи технічної діагностики»;
- впроваджено методик у «Аналіз статистичних даних з надійності АТ» у кваліфікаційних роботах.

Голова комісії

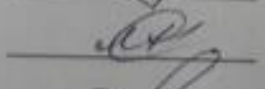


Микола КУЛИК

Члени комісії:



Олександр СИДОРЕНКО



Михайло СВИРИД



Юлія КВАЧ