

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ОКОРО ОНІЕДІКАЧІ ЧІОМА

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

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

272 – Авіаційний транспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття
наукового ступеня доктора філософії

Київ – 2023

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Етап експлуатації життєвого циклу літака є найбільш дороговартісним. Це коштує у 10-20 разів більше, ніж етап проектування 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, 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. 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. 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. Тому авіаційна промисловість має потребу у реалістичності математичних моделей та формулюванні завдань оптимізації. Надійність системи, процеси ТО та вартість необхідно враховувати на етапі проектування життєвого циклу ПС.

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. 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. 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з стратегією Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО) на період до 2025 р., від 25 липня 2022 р. Тема роботи безпосередньо пов'язана з науковими дослідженнями, які проводяться кафедра підтримання льотної придатності повітряних суден Національного авіаційного університету.

Мета і 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:

1. дослідити існуючу стратегію ТО ПС, використовуючи приклад Нігерії;
2. розробити математичні моделі, які можна впровадити для покращення стратегій ТО орієнтованого на надійність (ТООН) та ТО за технічним станом (ТОС);
3. розробити математичні моделі для визначення оптимальної години польоту для ПС;
4. розробити математичні моделі для визначення оптимального інтервалу виконання завдань ТО ПС;
5. розробка математичних моделей для точного прогнозу номенклатури та кількості запасних частин;
6. підвищити коефіцієнт готовності компонентів та систем ПС, скоротити час простою ПС та підвищити рівень цільового ТО;

7. розробити структуру технічної експлуатації, яка може стати основою для оптимізації ТО, починаючи з етапу проектування життєвого циклу ПС.

Для досягнення цієї мети вирішуються такі завдання:

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, прогнозної аналітики, чисельного аналізу та статистичного імітаційного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

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.

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

1. 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.
2. 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 Казакявічуса: інтенсивність відмов (ІВ) визначається з використанням ймовірності безвідмовної роботи.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. 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 здобувача. 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 експертом 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 дисертації. Результати досліджень обговорювалися на 12-ти міжнародних конгресах, симпозиумах 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, симпозиумів та конференцій. Усі публікації індексуються у міжнародних наукометричних базах даних, зокрема, в базі даних Scopus..

Обсяг і структура 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..

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі 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. NSAA 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 ВС 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, прогностичної аналітики, регресійних моделей, теорій імовірнісних та статистичних для оптимізації ПС. Ці концепції можна вважати четвертою промисловою революцією. Вони є основою для прогностичного 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. 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 .

Другий розділ присвячена розробці моделей та алгоритмів оптимізації ТО ПС з використанням принципів теорії надійності, прогновної 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. Блок-схему статистичного моделювання при мінімального розміру вибірки 35 представлено на рис. 1. Для пропонується модель аналізу надійності авіаційних систем з урахуванням невеликого набору даних розраховує інтенсивність відмов з урахуванням ймовірності безвідмовної роботи. Блок-схему статистичного моделювання представлено на рис. 2. 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.

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. 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. Він поділяє дані різних областей і для кожного з них підбирається функція регресії. Сегментовані регресійні моделі є

альтернативним варіантом апроксимації емпіричних кривих. Їх використання в експлуатації ПС дозволяє підвищити коректність розрахунку граничних значень ймовірності виникнення відмов компоненти, підсистеми, системи і конструкції ПС. 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.

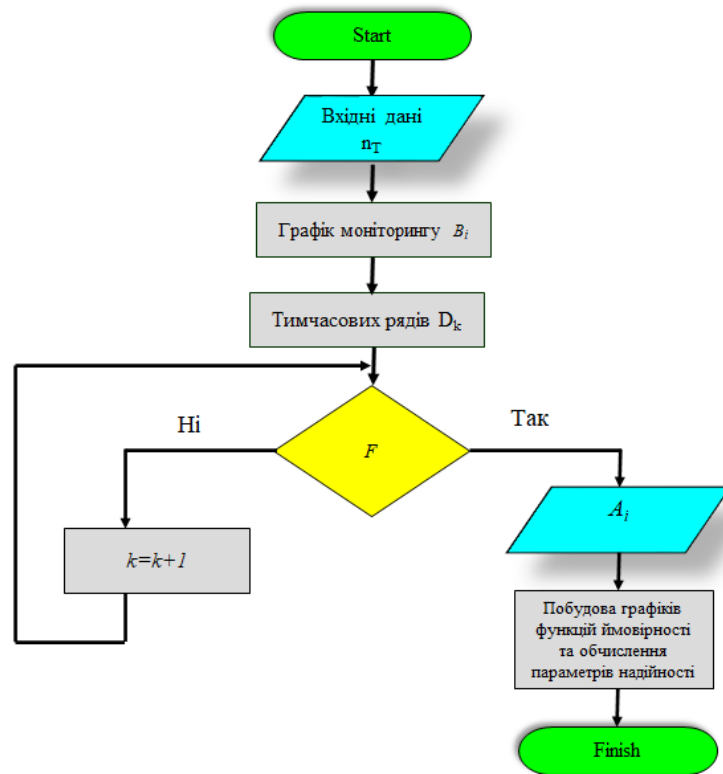


Рис. 1. Блок-схема пропонованого статистичного імітаційного моделювання для аналізу надійності при мінімального розміру вибірки 35

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. 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). Алгоритм визначення оптимального інтервалу технічного обслуговування повітряних суден представлено на рис. 3.



Рис. 2. Методологія аналізу надійності авіаційних систем для невеликого набору даних

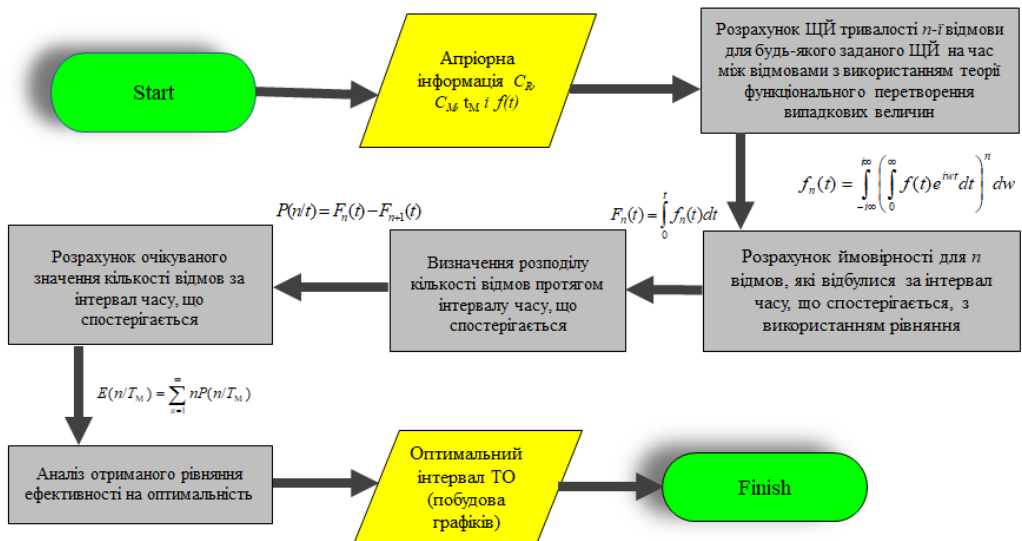


Рис 3. Алгоритм визначення оптимального інтервалу технічного обслуговування повітряних суден

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. 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.

У **третьому розділі** перевірено моделі, розроблені у другому розділі, з використанням даних щоденної експлуатації ПС у Нігерії. На етапі експлуатації життєвого циклу ПС формуються статистичні дані, які можна використовувати для визначення надійності компонентів та систем ПС. Методологія модель, заснована на експоненційному розподілі, була наведена на рис. 1. Для перевірки моделі були отримані статистичні дані зі звітів пілотів та ТО трьох літаків MD-83 за період експлуатації чотирьох років. Моделювання виконується для 10000 ітерацій і щільність ймовірності будується на основі вихідних даних. Для цього дослідження будуть проаналізовані найбільш відмовляючі глави АТА – один з них показаний на рис. 4. Із отриманих щільностей розподілення ймовірностей (ЩЙ) аналізуються параметри надійності – λ_i , $MTBF_i$ та K_{1000} . $MTBF_{calc}$ – напрацювання на відмову, λ_{calc} – інтенсивність відмов, $K_{1000 calc}$ – кількість відмов за 1000 годин. 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_{α}^2 ; звідси приймається гіпотеза

про експоненційний закон розподілу напрацювання на відмову систем та конструкцій літака з рівнем значущості, що дорівнює 0,05.

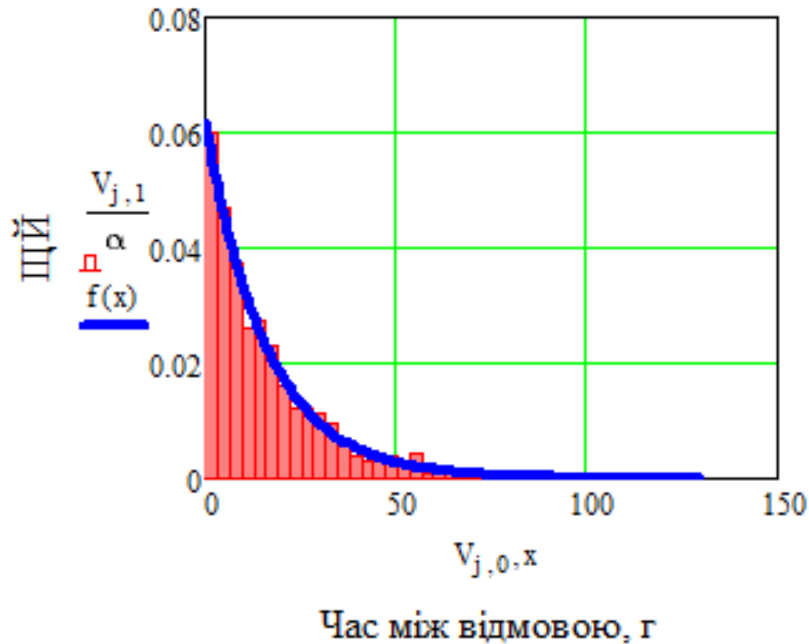


Рис. 4 – ЩІЙ часу, що спостерігається, між відмовами у шасі

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

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

де $P(\bar{j})$ – ймовірність відмови i і R_{cs} – надійність. Пропонована методологія аналізу надійності для невеликого набору даних заснована на основі першого знаходження ймовірності відмови, як показано на рис. 2. 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 1. Графік на рис. 5 показує квантілі нормального розподілу за рівнянням Казакявічюса. Додатковий графік (рис. 6), що називається графіком ймовірності відмови, будується відповідно до формули:

$$p(x) = -e^{\left[\left(\frac{x}{2.0637} \right)^{0.4274} + 0.16 \right]} + 1 \quad (2)$$

де $p(x)$ – ймовірність відмови.

Таблиця 1

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

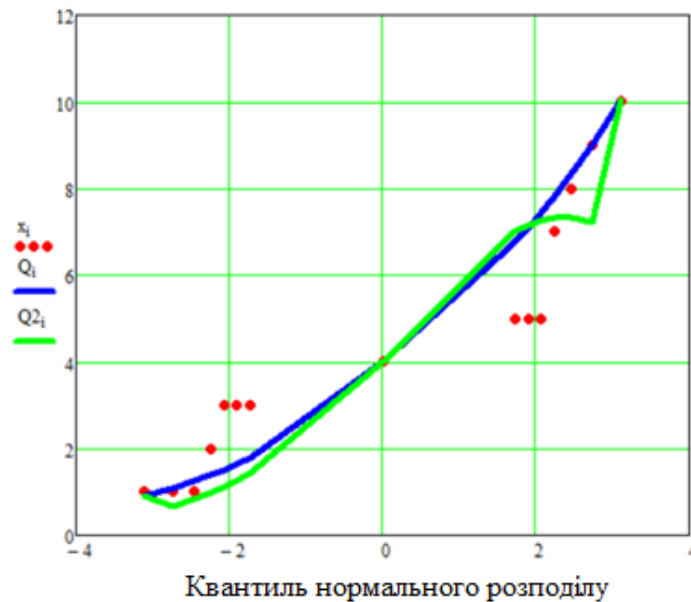


Рис. 5 Квантиль нормального закону розподілу

Для визначення надійності компонента, підсистеми або системи ПС за заданий період, першим кроком є визначення квантилі, після якого визначається ймовірність відмови за допомогою рис. 5. Наприклад, прогноз 5 відмов за рис. 6 знаходиться у квантилі 0,7, що відповідає ймовірності відмови - 0,25 (25%) та надійності - 0,75 (75%). 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

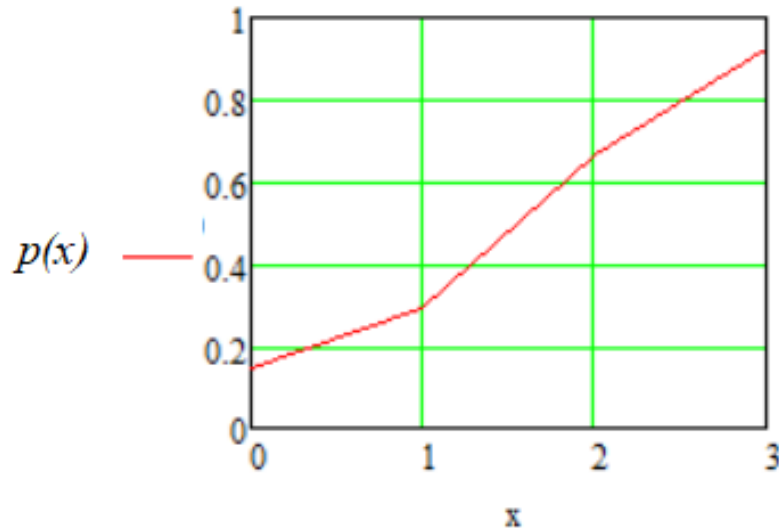


Рис. 6. Графік ймовірності відмови

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. Перетворені статистичні дані 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. 7-9). Матриця невідомих коефіцієнтів кожної моделі обчислюється звичайним методом найменших квадратів. 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 2 – $Y1$, $Y2$ і $Y3$ відповідно відносяться до квадратично-лінійної сегментованої моделі, лінійно-лінійної сегментованої моделі та квадратично-квадратичної сегментованої. Згідно табл. 2 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 остаточною формулою для прогнозу дається таким чином:

$$Y_3(X) = 523.85 - 8.307X + 4.201X^2 - 119.969(X - 16)\phi(X - 16) - 4.107(X - 16)^2\phi(X - 16) \quad (3)$$

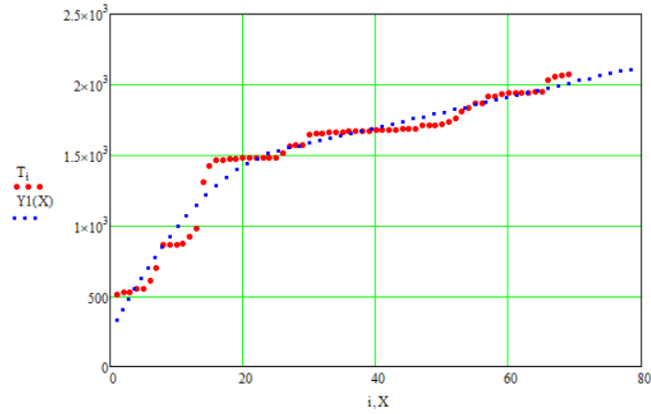


Рис 7. Модель квадратично-лінійної сегментованої регресії

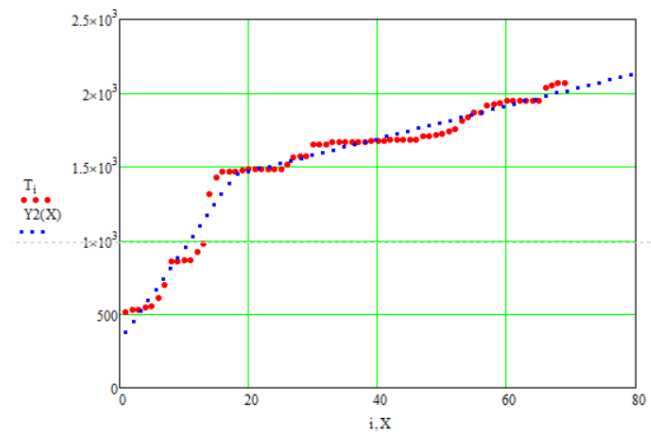


Рис 8. Модель лінійно-лінійної сегментованої регресії

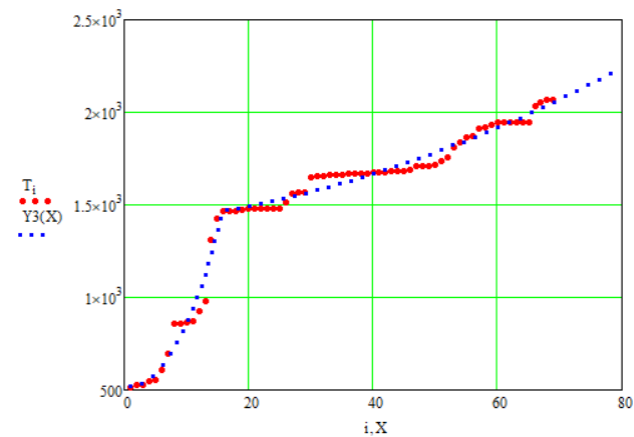


Рис 9. Модель квадратично-квадратичної сегментованої регресії

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

m	σ			m	σ		
	$Y1$	$Y2$	$Y3$		$Y1$	$Y2$	$Y3$
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

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 розділі 2. 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 $N=10000$. Результати моделювання показані на рис. 10 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. 11, доводять існування «мінімуму», який відповідає оптимальному інтервалу завдань ТО.

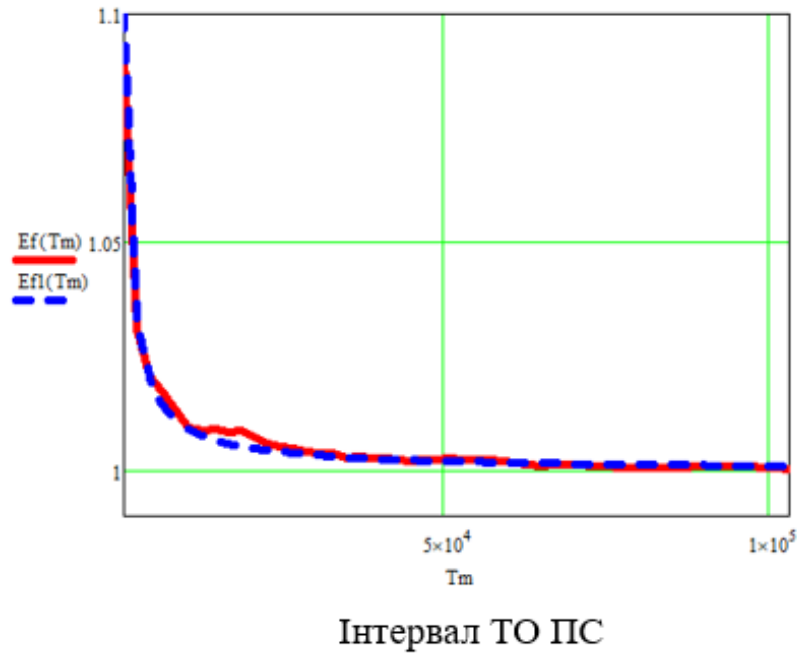


Рис. 10. Залежність ефективності від інтервалу ТО, отримана на основі аналітичного рівняння (синя лінія) та статистичного моделювання (червона лінія) для експоненційного часу між відмовами

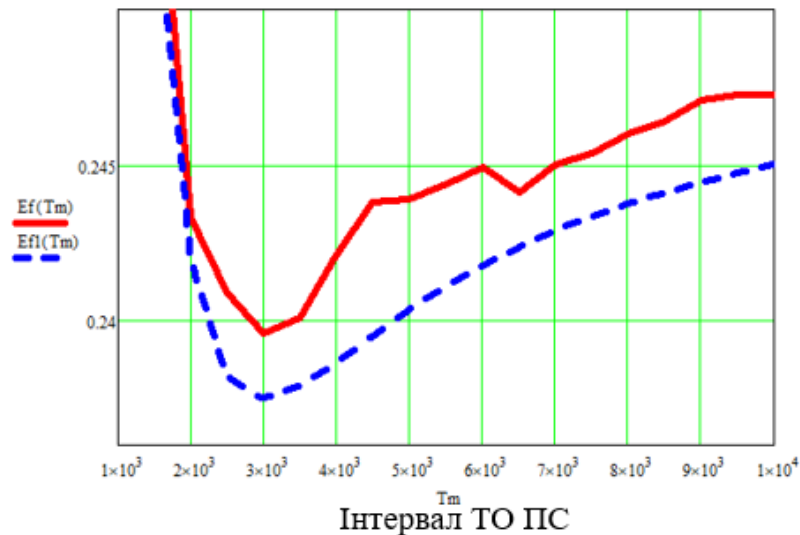


Рис. 11. Залежність ефективності від інтервалу ТО, отримана на основі аналітичного рівняння (синя лінія) і статистичного моделювання (червона лінія) для Ерлангівського розподілу часу між відмовами

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.

У розділі 2 розроблено алгоритм прогнозування попиту на запасні частини з використанням комбінації аналітичних підходів. Моделі, прив'язані до ймовірності безвідмовної роботи та інтенсивності відмов, розраховуються з урахуванням реальних статистичних даних, отриманих під час експлуатації ПС. Для аналізу застосування моделі, генеруються експлуатаційні дані зі звітів пілота і ТО ПС, що працюють в Нігерії. 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) з використанням моделей. 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 розділ 2. 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. 12 та рис. 13. На рис. 12 представлено залежність гарантованої ймовірності кількості можливих відмов кожної деталі ПС, а на рис. 13 – залежність для всієї системи ПС.

Таблиця 3

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			

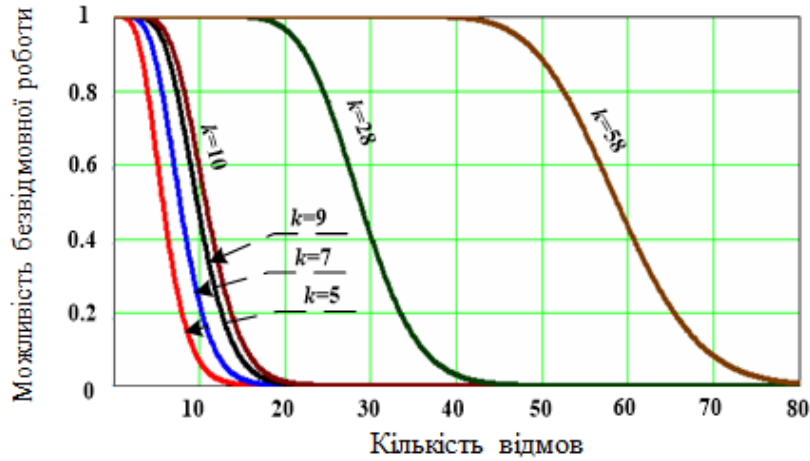


Рис. 12. Залежність гарантованої ймовірності безвідмовної роботи від кількості можливих відмов для кожної деталі ПС

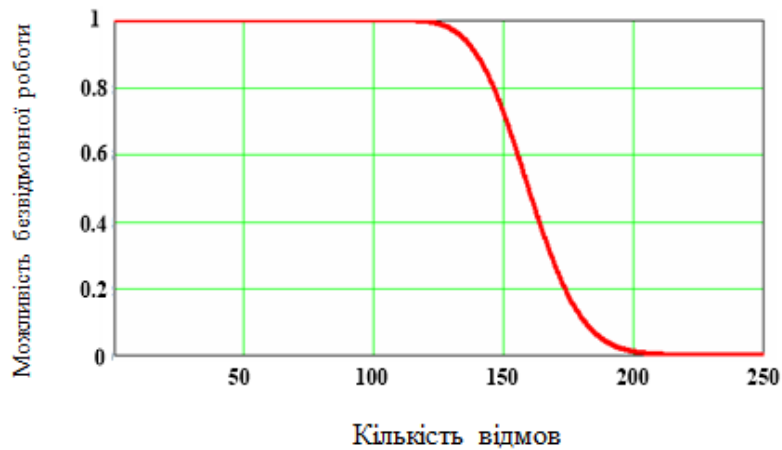


Рис. 13. Залежність гарантованої ймовірності безвідмовної роботи від кількості можливих відмов для системи ПС

Аналіз результатів моделювання в таблиці 4 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.

Таблиця 4

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

У *четвертому розділі* представлена проста і розширювана чотириетапна методологія (Рис. 4.1), 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 проектування життєвого циклу ПС.

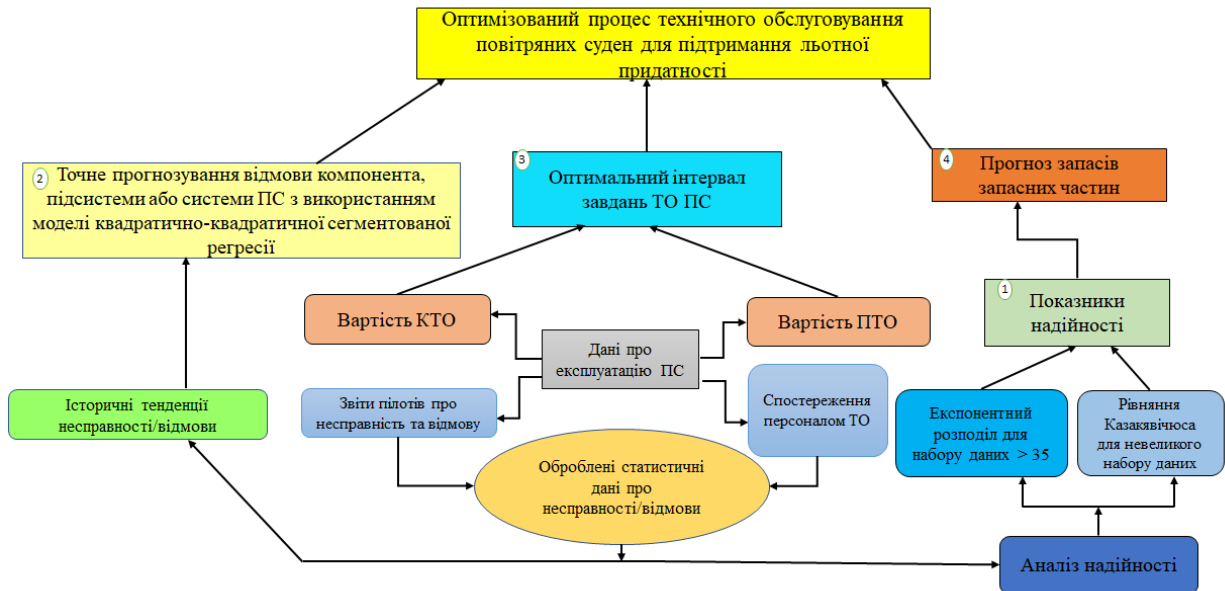


Рис. 4.1. Методологія оптимізації процесів технічного обслуговування повітряних суден для підтримки льотної придатності повітряних суден

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

У **Додатках** наведені доведення теорем, авторські свідоцтва та Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

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 ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ 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 прогнозного технічного обслуговування літальних апаратів.

АНОТАЦІЯ

Окоро О.Ч. Оптимізація процесів технічного обслуговування для підтримання льотної придатності повітряних суден в Нігерії – Рукопись.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 272 – Авіаційний транспорт, спеціалізація – Експлуатація та ремонт засобів транспорту – 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.

Ключевые 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 – As a manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Philosophy for the specialty 272 – Aviation transport, specialization – Operation and Maintenance of Aircraft – National Aviation University, 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.

Key words: 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.