

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

ЗАЛІСЬКИЙ МАКСИМ ЮРІЙОВИЧ

УДК 629.7.08: 681.5.03 (043.3)

**МЕТОДОЛОГІЯ ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
НАЗЕМНИХ ЗАСОБІВ АЕРОНАВІГАЦІЇ**

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
СОЛОМЕНЦЕВ Олександр Васильович,
Національний авіаційний університет, м. Київ,
професор кафедри телекомунікаційних та
радіоелектронних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ПЕТРАШЕВСЬКИЙ Олег Львович,
Національний транспортний університет, м. Київ,
професор кафедри «Аеропорти»,

доктор технічних наук, професор
ПАВЛЕНКО Максим Анатолійович,
Харківський національний університет Повітряних
Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків,
начальник кафедри математичного та програмного
забезпечення АСУ,

доктор технічних наук, доцент
САГІН Сергій Вікторович,
Національний університет «Одеська морська
академія», м. Одеса,
завідувач кафедри суднових енергетичних установок.

Захист відбудеться « 11 » лютого 2021 р. о 16⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради – Д 26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, корп. 1, ауд. 1.001.

Із дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розіслано «16» грудня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Н.С. Кузьменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Наземні засоби аеронавігації (НЗА), до яких належать наземні засоби радіотехнічного забезпечення польотів, відіграють важливу роль у процесі убезпечення польотів, ефективності функціонування підприємств цивільної авіації (ЦА).

Ефективність функціонування наземних засобів аеронавігації у ЦА значною мірою підтримує система їх експлуатації. Складовими системи експлуатації (СЕ) є, власне, обладнання, нормативна документація, персонал, засоби експлуатації, до яких належать споруди, технологічне обладнання, основні та допоміжні технологічні процеси та операції тощо.

Аналіз функціонування СЕ в підприємствах та органах державного регулювання з аеронавігації показує, що сьогодні:

1) затримується розробка Державної програми розвитку «Державна система використання повітряного простору (ДСВПП) України»;

2) система науково-методичного супроводження ДСВПП України на різних ієрархічних рівнях не актуалізована відповідно до чинних тенденцій розвитку науки та техніки;

3) недостатньо впроваджуються інформаційні технології для оброблення даних у СЕ провайдерів аеронавігаційних послуг;

4) відсутні методики обґрунтування характеристик нових та модернізованих СЕ;

5) немає методик формування оптимальних організаційних структур СЕ;

6) недостатньо приділяється увага обґрунтуванню кількісного складу персоналу СЕ.

Таким чином, СЕ НЗА та ДСВПП України має деякі явні та приховані невідповідності, що негативно впливають на ефективність СЕ та ДСВПП і призводять до зайвих витрат матеріальних ресурсів.

Аналіз науково-технічної літератури в галузі теорії розроблення та модернізації СЕ показує, що перспективним напрямом вдосконалення СЕ може бути застосування підсистеми підтримки ефективності СЕ з використанням принципів та положень нормативних документів ІКАО та Євроконтролю, міжнародних стандартів у сфері якості. До завдань комплексу підтримки ефективності належать оцінювання відповідності параметрів СЕ встановленим вимогам за допомогою застосування підсистем збору, оброблення, прийняття рішень, формування керуючих впливів та їх реалізації на основі інформації щодо стану окремих елементів СЕ, зокрема щодо поточного стану НЗА.

Загалом, цей комплекс буде сприяти вирішенню зазначених проблем та має бути створений на основі широкого застосування інформаційних технологій оброблення експлуатаційних даних, принципів адаптації, системного підходу, елементів штучного інтелекту для автоматизації процедур прийняття управлінських рішень у СЕ наземних засобів аеронавігації.

У дисертаційній роботі основну увагу приділено наземним засобам аеронавігації, оскільки ці засоби є головним елементом СЕ.

Інформаційні сигнали щодо стану наземних засобів аеронавігації пов'язані з оцінками середнього напрацювання на відмову, середнього часу відновлення, коефіцієнта готовності, коефіцієнта технічного використання, коефіцієнта оперативної готовності, які загалом мають випадковий характер.

У процесі використання за призначенням НЗА їх технічний стан може погіршуватися внаслідок відмов, неправильних дій обслуговуючого персоналу, затримки під час прийняття рішень щодо коригувальних та запобіжних дій тощо. Погіршення технічного стану обладнання належить до класу завдань аналізування розладнання. Такі завдання можуть бути двох типів: виявлення розладнання та оцінювання параметрів у трендах змін технічного стану. Завдання аналізування розладнання є важливими з точки зору визначення «залишкового часу життя» наземних засобів аеронавігації, прийняття своєчасних та правильних коригувальних та запобіжних дій.

Аналіз теоретичних та науково-практичних робіт у галузі експлуатації показав, що завданням аналізування погіршення технічного стану (розладнання) приділено недостатньо уваги. Це своєю чергою також призводить до зниження ефективності СЕ наземних засобів аеронавігації щодо збільшення витрат матеріальних ресурсів та зменшення оперативної готовності до виконання завдань у системі аеронавігаційного обслуговування польотів. Крім того, клас завдань щодо синтезу та аналізу методів оброблення нестационарних випадкових процесів з метою виявлення розладнання та оцінювання його параметрів є новим і недостатньо дослідженим напрямом теорії експлуатації та надійності наземних засобів аеронавігації.

Отже, виникає суперечність між завданням забезпечення необхідного рівня ефективності функціонування СЕ наземних засобів аеронавігації (зменшення експлуатаційних витрат, прийняття своєчасних та правильних запобіжних та коригувальних дій, підвищення рівня надійності обладнання тощо) та фактичними можливостями існуючих інформаційних технологій, що можуть бути використані та доопрацьовані для синтезу нових методів оброблення статистичних даних під час аналізування нестационарних випадкових процесів, які притаманні випадкам погіршення технічного стану обладнання.

Таким чином, розроблення методології оброблення даних у системах експлуатації НЗА є важливою науково-технічною проблемою, спрямованою на зменшення невизначеності в СЕ та підвищення ефективності як функціонування наземних засобів аеронавігації, так і СЕ загалом.

Вищезгадана проблема, яка вирішувалась у цій дисертаційній роботі, зумовлює її актуальність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з Національною транспортною стратегією України на період до 2030 р., схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р. Тема роботи безпосередньо пов'язана з науковими дослідженнями, які проводяться на кафедрі телекомунікаційних та радіоелектронних систем факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету та спрямовуються на підвищення ефективності функціонування систем експлуатації наземних засобів аеронавігації.

Основні наукові результати отримано в рамках таких науково-дослідних робіт:

1. Формування систем управління якістю вищих навчальних закладів. Шифр 400 – ДБ 07 (номер державної реєстрації № 0106U002741).

2. Комп'ютеризована система моніторингу якості функціонування вищого навчального закладу. Шифр 601 – ДБ 09 (номер державної реєстрації № 01069U000679).

3. Інформаційні технології радіоелектронних пристроїв, систем та комплексів. Номер 13/08.01.03.

4. Інформаційні технології в системах радіотехнічного забезпечення польотів. Номер 75/22.01.03.

5. Інформаційні технології в автоматизованих комплексах зв'язку, навігації, спостереження, авіаційної безпеки та системах їх експлуатації. Номер 43/22.01.03.

6. Інформаційні технології оброблення сигналів і даних у радіоелектронних пристроях, системах та комплексах. Номер 48/22.01.03 (номер державної реєстрації 0118U100176).

7. Робастні завадостійкі та завадозахищені методи і алгоритми обробки інформаційних процесів в умовах неповної апріорної інформації. Шифр 245 – ДБ 19 (номер державної реєстрації № 01190100556).

8. Методи побудови захищених систем зв'язку п'ятого покоління в Україні. Шифр 305 – ДБ 20 (номер державної реєстрації № 0120U101401).

Роль автора в зазначених науково-дослідних роботах, у яких дисертант був безпосереднім виконавцем, полягає у вирішенні завдань синтезу та аналізу процедур оброблення нестационарних випадкових процесів у трендах визначальних параметрів та показників надійності НЗА.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності систем експлуатації наземних засобів аеронавігації України.

Для досягнення поставленої мети в рамках даної роботи розглянуті такі завдання:

- аналіз сучасного стану систем експлуатації наземних засобів аеронавігації;
- розроблення методичного підходу до проєктування СЕ;
- обґрунтування показника ефективності СЕ НЗА;
- синтез та аналіз процедур виявлення погіршення технічного стану під час аналізування показників надійності на основі критерію Неймана-Пірсона;
- оцінювання параметрів погіршення технічного стану НЗА;
- синтез та аналіз евристичних процедур виявлення погіршення технічного стану під час аналізування показників надійності;
- синтез та аналіз послідовної процедури виявлення погіршення технічного стану під час аналізування показників надійності;
- синтез та аналіз процедур оброблення визначальних параметрів НЗА з однократним та багаторівневим прийняттями рішень, синтез та аналіз адаптивних процедур оброблення визначальних параметрів НЗА;
- аналіз моделей даних у випадку наявності гетероскедастичності, синтез методу виявлення гетероскедастичності та її урахування під час побудови математичних моделей показників надійності;
- побудова моделей надійності та моделей визначального параметра на підставі статистичних даних щодо експлуатації обладнання з використанням апарату полісегментного регресійного аналізу;
- аналіз ефекту від упровадження технологій оброблення статистичних даних у СЕ НЗА.

У процесі вирішення наведених завдань використані результати робіт у сфері статистичного оброблення даних, теорії та практики експлуатації технічних комплексів багатьох вітчизняних і закордонних учених, передусім А. Вальда, М. Де Гроота, М. М. Фішмана, Ю. Г. Сосуліна, А. Н. Ширяєва, І. В. Нікіфорова, А. Тартаковського, Г. Дейвіда, Ш. Закса, І. А. Ібрагімова, Р. З. Хасьмінського, В. А. Каштанова, Є. Ю. Барзіловіча, Б. Р. Левіна, Ю. К. Беляєва, В. П. Харченка, С. О. Дмитрієва, В. С. Дем'янчука, Г. Ф. Конаховича, І. О. Мачаліна, В. В. Коніна, В. О. Ігнатова, В. С. Новікова, О. Л. Петрашевського, О. І. Запорожця, В. В. Уланського, О. Г. Байбуза, В. Г. Мелкумяна та інших.

Об'єкт дослідження – процес експлуатації наземних засобів аеронавігації.

Предмет дослідження – методологія оброблення статистичних даних щодо стану елементів системи експлуатації, які спрямовані на зменшення апріорної невизначеності в СЕ під час прийняття рішень стосовно формування та виконання коригувальних та запобіжних дій.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії випадкових процесів, послідовного аналізу А. Вальда, теорії експлуатації та ремонту технічних систем, методів математичного моделювання, теорії оптимізації, теорії виявлення та урахування гетероскедастичності, регресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

1. Уперше розроблено методологію оброблення статистичних даних у системах експлуатації наземних засобів аеронавігації, яка охоплює методи виявлення погіршення технічного стану НЗА та складових елементів СЕ, методи оцінювання показників надійності після розладнання, методи формування стратегій технічного обслуговування НЗА за станом із превентивними порогами, які були обґрунтовані відповідними теоремами у рамках використання нового показника ефективності СЕ, що загалом надає можливість підвищувати ефективність функціонування НЗА та їх СЕ шляхом формування та реалізації своєчасних та правильних запобіжних та коригувальних дій.

2. Уперше сформульовано та доведено теорему щодо доцільності статистичного оброблення даних у системах експлуатації наземних засобів аеронавігації, яка базується на використанні моделі зміни технічного стану обладнання на основі міри інформації за Шенноном.

3. Уперше виконано синтез та аналіз процедури виявлення розладнання у тренді зміни інтенсивності відмов для випадків стрибкоподібної та лінійної моделей на основі використання критерію Неймана-Пірсона.

4. Уперше виконано синтез та аналіз послідовного методу виявлення розладнання у тренді зміни інтенсивності відмов, що на відміну від класичного методу з фіксованим обсягом вибірки має вигреш у середній тривалості прийняття рішення за однакових рівнів показників ефективності.

5. Уперше отримано аналітичні співвідношення для розрахунку оптимального значення порогу для прийняття рішення щодо превентивного технічного обслуговування на основі оброблення визначальних параметрів НЗА. Ці співвідношення дозволяють мінімізувати значення питомих

експлуатаційних витрат та удосконалювати стратегії технічного обслуговування за станом з контролем визначальних параметрів.

6. Уперше розроблено метод виявлення гетероскедастичності та її урахування під час побудови математичних моделей показників надійності та визначальних параметрів НЗА, що дає змогу оцінити кількісний вміст гетероскедастичності на основі запропонованого відповідного показника та, на відміну від існуючих, не потребує багатократних вимірювань для кожного фіксованого моменту часу.

7. Одержало подальший розвиток обґрунтування показника ефективності, що на відміну від існуючих використовує подійно-імовірнісну модель, яка враховує можливі події у СЕ, їх імовірності та витрати, пов'язані з ними. Цей показник був використаний для формування двох теорем щодо доцільності статистичного оброблення даних та може бути складовою методологічного базису під час проєктування та модернізації СЕ.

8. Одержав подальший розвиток метод оцінювання показників надійності у випадку погіршення технічного стану НЗА для стрибкоподібної, лінійної та квадратичної моделей змін інтенсивності відмов, що базується на використанні методу максимальної правдоподібності. На відміну від існуючих цей метод полягає у отриманні аналітичного співвідношення для щільності розподілу ймовірностей оцінок, що дозволяє більш адекватно визначати технічний стан НЗА.

9. Одержало подальший розвиток удосконалення стратегії технічного обслуговування за станом, яка на відміну від існуючої використовує декілька попереджувальних порогів, а також адаптивний поріг, що дає можливість найбільш ефективно запобігати виникненню поступових відмов НЗА.

10. Одержав подальший розвиток метод побудови математичних моделей показників надійності та визначальних параметрів, що на відміну від існуючих використовує апарат багатосегментного регресійного аналізу та дає можливість отримати більш точні аналітичні співвідношення за рахунок додаткової оптимізації точок з'єднання окремих сегментів.

Вищенаведені **наукові результати** дають можливість вирішити проблему підвищення ефективності функціонування наземних засобів аеронавігації та систем їх експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів. Сформована методологія оброблення статистичних даних у системах експлуатації наземних засобів аеронавігації може бути базисом: для проведення комплексу науково-дослідних робіт з метою удосконалення структур, методів, методик оброблення даних для перспективних НЗА та систем їх експлуатації, а також інших засобів транспорту України; для використання в органах державного регулювання та експлуатаційних підрозділах цивільної авіації; для впровадження в навчальний процес під час підготовки авіаційних фахівців.

Запропонована методологія дає змогу:

- розраховувати ефективність системи експлуатації на стадії проєктування;
- виявляти розладнання у тренді зміни інтенсивності відмов НЗА та засобів транспорту в процесі їх експлуатації;
- оцінювати показники надійності у випадку погіршення технічного стану НЗА та засобів транспорту;

- розраховувати значення превентивного порогу під час розроблення регламентів технічного обслуговування НЗА;
- удосконалювати стратегії технічного обслуговування НЗА;
- виявляти та оцінювати гетероскедастичність у трендах визначальних параметрів та показників надійності НЗА та засобів транспорту;
- будувати математичні моделі опису статистичних даних з використання багатосегментного регресійного аналізу.

Загалом, результати дисертаційного дослідження є підґрунтям для формування та реалізації своєчасних та вірних запобіжних та коригувальних дій персоналом експлуатаційних підрозділів НЗА та органами державного регулювання у сфері транспорту.

Результати досліджень упроваджені в Державному підприємстві «Антонов», Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут «Квант», Комунальному підприємстві «Міжнародний аеропорт «Київ» (Жуляни), навчальному та науковому процесах Національного авіаційного університету, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи отримано здобувачем самостійно й опубліковано в 53 наукових працях.

Роботи [13–15] виконані самостійно. З робіт, що опубліковані у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належать: у роботі [1] – отримані аналітичні вирази для щільності розподілу коефіцієнта готовності під час оброблення даних щодо показників надійності наземних радіотехнічних засобів; у роботі [2] – виконано синтез процедури оброблення даних щодо показників надійності електронного обладнання вітрогенератора; у роботі [3] – проведений теоретичний аналіз алгоритму виявлення розладнання у тренді показника надійності для стрибкоподібної моделі змін інтенсивності відмов; у роботі [4] – виконано моделювання послідовної процедури виявлення розладнання з використанням методу динамічного програмування Белмана; у роботі [5] – виконані розрахунки ефективності програм діагностування наземних засобів аеронавігації; у роботі [6] – розглянуті шляхи вдосконалення структур оброблення даних у системах експлуатації наземних засобів аеронавігації; у роботі [7] – виконано синтез та аналіз послідовної процедури оцінювання показника надійності наземних засобів аеронавігації; у роботах [8; 11] – виконано аналіз процесів оброблення даних у системах генерації електроенергії; у роботі [9] – проведено побудову математичної моделі для опису статистичних даних щодо напрацювань на відмову; у роботі [10] – виконано синтез процедури статистичного оброблення даних щодо виявлення розладнання; у роботі [12] – виконано аналіз контенту сучасних систем експлуатації радіоелектронних засобів; у роботі [16] – проведено аналіз процедури статистичного оброблення даних щодо напрацювань на відмову щодо тестування даних на лінійність; у роботі [17] – обґрунтовано можливості використання багатосегментних регресій під час оброблення даних щодо надійності; у роботі [18] – проведений аналіз процедури оброблення даних щодо визначального параметра в разі погіршення технічного стану НЗА; у роботі [19] – вирішено завдання оптимізації ефективності стратегії

технічного обслуговування за станом; у роботі [20] – проведений порівняльний аналіз різних методів апроксимації статистичних даних; у роботі [21] – теоретично проаналізовано процедуру оброблення даних щодо показника надійності в разі погіршення технічного стану НЗА; у роботі [22] – вирішено завдання синтезу процедури виявлення розладнання нестационарного випадкового процесу, коли початковими даними про стан є напрацювання на відмову НЗА для експоненціальної моделі даних; у роботі [23] – проаналізовано ефективність нового методу виявлення гетероскедастичності в статистичних даних; у роботі [24] – побудовані математичні моделі під час оброблення експлуатаційних даних вітрогенератора; у роботі [25] – проаналізовано статистичні моделі надійності у випадку корельованих відмов; у роботі [26] – синтезовано підхід щодо підвищення точності апроксимації емпіричних даних; у роботі [27] – виконано моделювання для підтвердження ефективності нового методу виявлення гетероскедастичності в статистичних даних; у роботі [28] – вирішено завдання синтезу та теоретичного аналізу послідовної процедури виявлення розладнання; у роботі [29] – вирішена задача порівняльного аналізу використання полісегментних регресій під час оброблення статистичних даних; у роботі [30] – виконано моделювання для підтвердження ефективності способу послідовного визначення середнього напрацювання на відмову технічних засобів; у роботі [31] – проаналізовані моделі коефіцієнта готовності для різних розподілів напрацювань до відмови та тривалості відновлення; у роботі [32] – проаналізовано структуру системи експлуатації радіоелектронного обладнання; у роботі [33] – проаналізовано структуру процедур оброблення даних у системах експлуатації безпілотних літальних апаратів; у роботі [34] – виконано синтез послідовної процедури оброблення даних щодо показників надійності; у роботі [35] – виконано моделювання тривимірної математичної моделі у випадку гетероскедастичності оброблюваних даних; у роботі [36] – проведено синтез та аналіз евристичної процедури оцінювання показників надійності у випадку стрибкоподібної зміни інтенсивності відмов; у роботі [37] – запропоновані компоненти методологічного базису під час проектування та вдосконалення СЕ; у роботі [38] – проведено синтез процедури виявлення погіршення технічного стану радіолокаційної станції; у роботі [39] – проаналізовані процедури оброблення даних під час експлуатації навігаційного обладнання; у роботі [40] – виконано аналіз на основі моделювання процедури оцінювання показників надійності радіоелектронних засобів у випадку розладнання; у роботі [41] – виконано аналіз стратегії технічного обслуговування за станом з використанням превентивного порогу; у роботі [42] – побудовано математичну модель для статистичних даних, отриманих під час експлуатації радіолокаційної станції; у роботі [43] – розроблено процедуру оброблення статистичних даних під час аналізу корельованих відмов навігаційного обладнання; у роботі [44] – виконано синтез процедури виявлення розладнання у тренді показника надійності; у роботі [45] – виконано аналіз процедури виявлення кібератак під час моніторингу трафіку; у роботі [46] – побудовано математичну модель для статистичних даних щодо визначальних параметрів, отриманих під час експлуатації вітрогенераторної установки; у роботі [47] – виконано моделювання нової процедури оцінювання

моди під час оброблення статистичних даних; у роботі [48] – побудовано математичну модель для статистичних даних щодо визначальних параметрів, отриманих під час експлуатації вітрогенераторної установки; у роботі [49] – виконано теоретичний аналіз послідовної процедури виявлення розладнання з розставленням порогів на підставі методу динамічного програмування Белмана; у роботі [50] – проаналізовано структуру процедур оброблення даних у СЕ безпілотних літальних апаратів та виконано порівняльний аналіз ефективності декількох варіантів оброблення даних; у роботах [51; 52] – виконано моделювання процедур аналізу ефективності процесів діагностування антенних систем та радіоелектронного обладнання відповідно; у роботі [53] – виконано аналіз сучасного стану систем експлуатації, розглянуті підходи щодо застосування в них принципів штучного інтелекту.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати, отримані автором, доповідались на V міжнародному конгресі «Aviation in the XXI-st Century» (Київ, 2012 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2012 р.), Науково-методичній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, 2012 р.), XI Міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2013» (Київ, 2013 р.), Науково-практичній конференції «Захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах» (Київ, 2013 р.), Міжнародному симпозиумі «Signal Processing Symposium 2013» (Яхранка, Польща, 2013 р.), Міжнародній науковій конференції «Статистичні методи обробки сигналів та даних» (Київ, 2013 р.), Другій міжнародній IEEE конференції «Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments» (Київ, 2013 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2014 р.), Третій міжнародній IEEE конференції «Methods and Systems of Navigation and Motion Control» (Київ, 2014 р.), Науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, 2014 р.), Міжнародному симпозиумі «Signal Processing Symposium 2015» (Дебе, Польща, 2015 р.), Третій міжнародній IEEE конференції «Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments» (Київ, 2015 р.), Міжнародній IEEE конференції «Electronics and Information Technology» (Одеса, 2016 р.), Першій міжнародній IEEE конференції «Data Stream Mining & Processing» (Львів, 2016 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2016 р.), Четвертій міжнародній IEEE конференції «Methods and Systems of Navigation and Motion Control» (Київ, 2016 р.), Науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, 2016 р.), Міжнародному симпозиумі «Signal Processing Symposium 2017» (Яхранка, Польща, 2017 р.), Четвертій міжнародній IEEE конференції «Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments» (Київ, 2017 р.), Чотирнадцятій міжнародній IEEE конференції «Advanced Trends in

Radioelectronics, Telecommunication and Computer Engineering» (Львів-Славське, 2018 р.), Міжнародній конференції «Advanced Computer Information Technologies» (Чеське Будйовице, Чехія, 2018 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2018 р.), П'ятій міжнародній IEEE конференції «Methods and Systems of Navigation and Motion Control» (Київ, 2018 р.), Міжнародній IEEE конференції «Advances in Wireless and Optical Communications» (Рига, Латвія, 2018 р.), Науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, 2018 р.), Першому міжнародному воркшопі «Informatics & Data-Driven Medicine» (Львів, 2018 р.), П'ятнадцятій міжнародній IEEE конференції «The Experience of Designing and Application of CAD Systems» (Свалява-Поляна, 2019 р.), Дев'ятій міжнародній конференції «Advanced Computer Information Technologies» (Чеське Будйовице, Чехія, 2019 р.), Міжнародному симпозиумі «Signal Processing Symposium 2019» (Краків, Польща, 2019 р.), Міжнародному IEEE воркшопі «Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications» (Рига, Латвія, 2019 р.), Першому Міжнародному воркшопі «Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks» (Київ, 2019 р.), П'ятнадцятій міжнародній IEEE конференції «Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunication and Computer Engineering» (Львів-Славське, 2020 р.), Десятій міжнародній конференції «Advanced Computer Information Technologies» (Деггендорф, Німеччина, 2020 р.), Міжнародному IEEE воркшопі «Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications» (Рига, Латвія, 2020 р.), на наукових семінарах факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету.

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 53 друкованих роботах: із них 25 у фахових періодичних наукових виданнях, 4 у фахових періодичних виданнях, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science, 2 розділи закордонних монографій, 1 патент та 21 матеріалів міжнародних наукових конференцій (всі 21 індексуються наукометричною базою Scopus).

Сторінка автора в наукометричній базі Scopus (authorId=55960146000) містить 32 наукові праці (Цитування: 161; Індекс Хірша: 10). Сторінка автора у реферативній базі Google Scholar (user=Q6CdVegAAAAJ&hl) містить 96 наукових праць (Цитування: 308; Індекс Хірша: 11; Індекс i10: 12). Унікальний ідентифікатор науковця (Open Researcher and Contributor ID – ORCID): 0000-0002-1535-4384.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційну роботу викладено на 354 сторінках друкованого тексту; складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та трьох додатків. Обсяг основного тексту дисертації становить 326 сторінок друкованого тексту. Роботу ілюстровано 22 таблицями та 122 рисунками. Список використаних джерел містить 281 найменування, з них 116 кирилицею та 165 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність наукового завдання, викладено зв'язок з науковими темами, сформульовано мету та завдання дослідження, показано наукову новизну і практичне значення, подано загальну характеристику роботи та визначено особистий внесок автора дисертації в одержаних наукових результатах.

У першому розділі наведено характеристику систем експлуатації НЗА.

У розділі розглянуто структуру авіаційно-транспортної системи України. Аналіз показав, що не зважаючи на те, що авіаційний транспорт є однією з провідних галузей економіки України, його організаційна структура все ще потребує вдосконалення щодо використання передових світових досягнень у сфері застосування нових структурних елементів, пов'язаних з реалізацією інформаційних технологій оброблення експлуатаційних даних, спрямованих як на забезпечення високого рівня безпеки та регулярності польотів, так і зниження витратних ресурсів авіапідприємств. Окрім того, відповідно до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 р., схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р, одним із основних завдань є «удосконалення системи збору, аналізу та використання статистичних даних».

Згідно з процесним та системним підходами визначено, що діяльність авіаційно-транспортної системи, у складі якої взаємодіють система льотної діяльності повітряних суден, система аеронавігаційного обслуговування польотів та система експлуатації НЗА, спрямована на задоволення вимог споживачів послуг з авіаційних перевезень. Це досягається шляхом використання ресурсів підприємств цивільної авіації, науково-дослідних центрів та лабораторій, навчальних закладів, заводів-виробників НЗА за умови всебічного контролю Державною авіаційною службою України.

Аналіз науково-технічної літератури та досвід експлуатації показали, що СЕ НЗА включає в себе: наземні засоби аеронавігації, процеси, персонал, документи, витратні ресурси, процедури прийняття рішень, алгоритми оброблення даних тощо. Основним елементом СЕ є НЗА. Тому всі процеси експлуатації пов'язані безпосередньо з ними. Головний процес – це використання НЗА за призначенням. Інші процеси – це технічне обслуговування, ремонт, продовження ресурсу, наземні і льотні перевірки тощо – є допоміжними та спрямовані на забезпечення ефективності реалізації основного процесу. Розглядаючи структуру системи експлуатації НЗА, встановлено, що більшу увагу слід приділяти процесам збору та оброблення статистичних даних, у результаті чого можуть бути сформовані та реалізовані своєчасні та більш достовірні запобіжні та коригувальні дії. Використання статистичного оброблення даних є запорукою еволюції стратегій технічного обслуговування до впровадження принципів штучного інтелекту в СЕ НЗА.

Стан використання алгоритмів оброблення даних у світовій промисловості зображено на рис. 1. Як видно, тільки 30 % СЕ використовують алгоритми статистичного оброблення даних, проте лише після настання відмови. При цьому приблизно 13 % СЕ використовує процедури оброблення даних для запобігання відмовам, пошкодженням та невідповідностям.

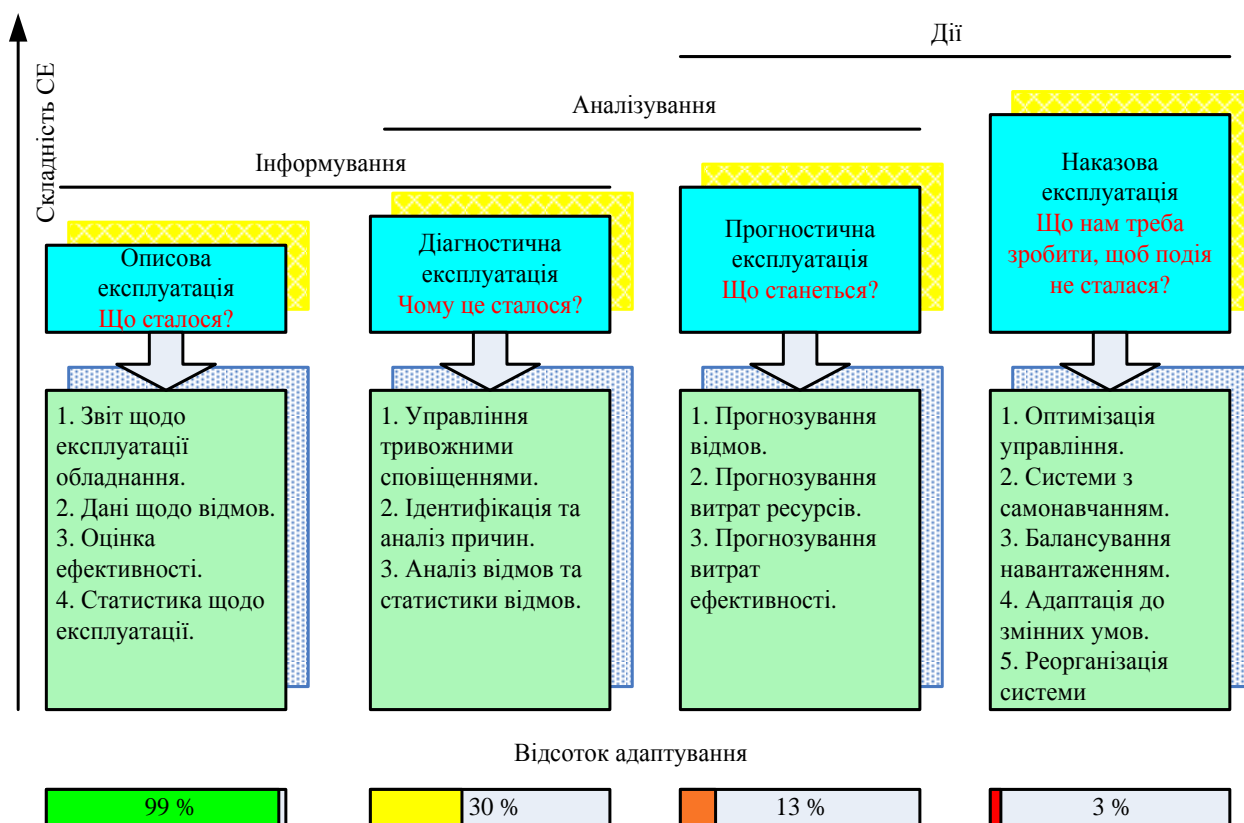


Рис. 1. Стан використання алгоритмів оброблення даних у світовій промисловості

У США та країнах Європейського Союзу процес експлуатації повітряних суден, зокрема засобів аеронавігації, регламентується стандартами та документами серії MSG. Загалом еволюція стратегій MSG може бути зображена на рис. 2. Зараз використовується третє покоління цих стандартів. Одним із пріоритетних завдань, наведених у MSG-3, є «створення репозитарію експлуатаційних даних», які будуть включати базу відмов та пошкоджень обладнання, управлінські рішення щодо усунення відмов та невідповідностей, причини відмов, їх наслідки тощо. Аналізування цих даних покращить ефективність технічного обслуговування.

Проведений аналіз дозволив визначити завдання дисертаційної роботи, що пов'язані з вирішенням чотирьох груп задач:

1. Задачі, що доводять необхідність статистичного оброблення даних у СЕ НЗА.
2. Задачі оброблення даних у випадку погіршення технічного стану НЗА.
3. Задачі аналізування гетероскедастичності в експлуатаційних даних.
4. Задачі побудови моделей надійності з використанням регресійного аналізу.

Для першої групи задач пропонується використовувати подійно-імовірнісно-моделювальний метод. Відповідно до цього методу спочатку виконується графоаналітичний розрахунок, а потім його результати підтверджуються результатами статистичного моделювання. Для задач другої групи пропонується використовувати апарат теорії ймовірностей та математичної статистики в частині синтезу та аналізу процедур перевірки гіпотез та оцінювання параметрів з фіксованим та наперед невідомим обсягами вибірки.



Рис. 2. Еволюція стратегій MSG

Для третьої групи задач використовується класичний апарат аналізування гетероскедастичності та новий розроблений метод. Задачі четвертої групи розв'язуються за допомогою методів побудови регресійних залежностей.

Для наведених груп задач виконано математичне формулювання.

Загалом, всі наведені задачі спрямовані на вирішення актуальної науково-технічної проблеми – підвищення ефективності СЕ НЗА шляхом використання процедур прийняття рішень щодо коригувальних та запобіжних дій на основі статистичного оброблення експлуатаційних даних.

Другий розділ присвячено формуванню методологічного базису щодо оброблення експлуатаційних даних під час розроблення та вдосконалення СЕ НЗА.

Аналіз літератури показує, що єдиної методології проектування СЕ щодо оброблення експлуатаційних даних не існує. Ця відсутність призводить до додаткових витрат ресурсів, зниження ефективності використання об'єктів експлуатації за призначенням.

Вважаємо, що методологія оброблення даних у СЕ НЗА включає в себе сукупність принципів, підходів, теорем, тверджень, методів, моделей, алгоритмів, процедур та інших складових базису для вирішення конкретного науково-технічного завдання.

Під час проектування СЕ пропонується застосовувати п'ять основних принципів: адаптивності, системності, агрегативності, процесності, ієрархічності.

У розділі розглянуто завдання обґрунтування доцільності процедур статистичного оброблення даних шляхом порівняння двох стратегій S_1 і S_2 технічного обслуговування (ТО) та ремонту НЗА. Для кожної стратегії розраховано показник ефективності у вигляді середніх експлуатаційних витрат.

Перша стратегія C_1 передбачає періодичний контроль технічного стану НЗА. У процесі контролю значення визначального параметра порівнюється з експлуатаційними допусками. У випадку перевищення допусків виникають відмови і проводяться ремонтні роботи. У стратегії C_1 аналіз тренда зміни визначального параметра не проводиться. Тому відмови сприймаються як раптові. Друга стратегія C_2 заснована на статистичному обробленні експлуатаційних даних. Цими даними є тренди зміни визначальних параметрів. Дана стратегія дозволяє оцінити можливість відмови і виконати запобіжні та коригувальні дії. У разі виникнення відмови виконуються ремонтні роботи. Вважаємо, що стратегії C_1 та C_2 розглядаються на єдиному інтервалі спостереження. Для порівняльного аналізу C_1 та C_2 використовується подійно-імовірнісна модель. Складовими цієї моделі є можливі події, їх імовірності та середні витрати, пов'язані з ними.

У табл. 1 та 2 наведені компоненти двох подійно-імовірнісних моделей для стратегій C_1 та C_2 .

Таблиця 1

Компоненти подійно-імовірнісної моделі для стратегії C_1 .

Події	Імовірнісні оцінки подій	Середні витрати
Працездатний стан протягом інтервалу Δt	P_S	$C_{ТО}$
Відмова та поточний ремонт	P_F	C_P

Таблиця 2

Компоненти подійно-імовірнісної моделі для стратегії C_2

Події	Імовірнісні оцінки подій	Рішення щодо технічного стану НЗА	Імовірність рішення	Середні витрати
Працездатний стан протягом інтервалу Δt	P_S	НЗА працездатне	$1-\alpha$	$C_{обр}$
		НЗА не працездатне	α	$C_{обр} + C_{ТО}$
Непрацездатний стан протягом інтервалу Δt	P_F	НЗА працездатне	β	$C_{обр} + C_P$
		НЗА не працездатне (превентивне ТО)	$1-\beta$	$C_{обр} + C_{пто}$

У табл. 1 та 2 зроблені такі позначення: P_S – імовірність безвідмовної роботи; P_F – імовірність відмови; $C_{ТО}$ – витрати на планове технічне обслуговування; C_P – витрати на ремонт; $C_{обр}$ – витрати на оброблення даних; $C_{пто}$ – витрати на превентивне технічне обслуговування; α та β – імовірності прийняття помилкових рішень першого та другого роду. На основі табл. 1 запишемо вираз для математичного сподівання середніх витрат:

$$m_1(\Pi_{эф} / C_1) = m_1(C_{\Sigma} / C_1) = m_1(P_S)C_{ТО} + m_1(P_F)C_P, \quad (1)$$

де $m_1(P_S)$ та $m_1(P_F)$ – математичні сподівання ймовірності подій безвідмовної роботи НЗА та відмови на інтервалі Δt відповідно; C_{Σ} – сумарні витрати на експлуатацію НЗА.

На основі табл. 2 показник ефективності стратегії C_2

$$m_1(\Pi_{\text{еф}}/C_2) = m_1(C_{\Sigma}/C_2) = m_1(P_S)((1-\alpha)C_{\text{обр}} + \alpha(C_{\text{обр}} + C_{\text{ТО}})) + m_1(P_F)(\beta(C_{\text{обр}} + C_P) + (1-\beta)(C_{\text{обр}} + C_{\text{ПТО}})). \quad (2)$$

Виконаємо порівняння ефективності стратегій C_1 і C_2 , розраховуючи безрозмірний коефіцієнт γ у такому вигляді

$$\gamma = \frac{m_1(\Pi_{\text{еф}}/C_1)}{m_1(\Pi_{\text{еф}}/C_2)} = \frac{C_P + m_1(P_S)(C_{\text{ТО}} - C_P)}{C_{\text{обр}} + C_F + m_1(P_S)(\alpha C_{\text{ТО}} - C_F)}, \quad (3)$$

де $C_F = C_{\text{ПТО}} + \beta C_P - \beta C_{\text{ПТО}}$.

Аналіз показує, що виграш від статистичного оброблення даних існує у випадку виконання нерівності вигляду (у разі відсутності помилкових рішень $\alpha = \beta = 0$):

$$C_{\text{обр}} < \frac{C_{\text{ПТО}}}{\frac{C_P}{C_{\text{ТО}}} - 1}. \quad (4)$$

Більш повну інформацію щодо експлуатаційних витрат можна отримати, якщо враховувати сумарний інтервал спостереження T_{Σ} . Тоді показником ефективності можна вважати питомі за інтервал спостереження витрати:

$$m_1(\Pi_{\text{еф}}) = \frac{m_1(C_{\Sigma})}{T_{\Sigma}}. \quad (5)$$

Відповідно до методології оброблення даних доведено три теореми, що підтверджують доцільність застосування процедур оброблення експлуатаційних даних у СЕ НЗА.

Теорема 1 (щодо збільшення експлуатаційної інформативності).

Процедури статистичного оброблення даних у СЕ щодо вимірювання та оцінювання невідомих параметрів $\vec{\zeta}$, пов'язаних з основним процесом експлуатації, збільшують кількісну міру інформації, зменшуючи водночас рівень невизначеності.

Доведення.

Нехай ζ_1 – невідомий параметр, що характеризує стан елемента СЕ, відносно якого виконуються процедури статистичного оброблення даних. При цьому загалом випадку випадкові величини ζ_1 та t є залежними.

Міра інформації щодо $f(t)$ може бути визначена як

$$H(f(t)) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \log_2 f(t) dt. \quad (6)$$

Унаслідок визначення (статистичного оброблення даних) ζ_1 міра інформації $H(f(t))$ змінюється. Через зміну невизначеності $f(t)$ безумовна міра інформації $H(f(t))$ замінюється умовною $H_{\zeta_1}(f(t))$. Тому за міру кількості інформації щодо $f(t)$, яка може бути отримана внаслідок оброблення значень ζ_1 , можна обрати різницю між безумовною та умовною ентропією

$$\Delta H(f(t)) = H(f(t)) - H_{\zeta_1}(f(t)).$$

Запишемо вирази для безумовної (6) та умовної ентропій через математичні сподівання:

$$H(f(t)) = -m_1(\log_2 f(t)), \quad H_{\zeta_1}(f(t)) = -m_1(\log_2 f(t/\zeta_1)),$$

де $f(t/\zeta_1)$ – умовна щільність розподілу ймовірностей (ЩРІ) напрацювань між відмовами. Звідси отримуємо

$$\Delta H(f(t)) = -m_1(\log_2 f(t)) + m_1(\log_2 f(t/\zeta_1)) = m_1 \left(\log_2 \frac{f(t/\zeta_1)}{f(t)} \right).$$

Умовну ЩРІ можна подати у вигляді

$$f(t/\zeta_1) = \frac{f(t, \zeta_1)}{f(\zeta_1)},$$

де $f(t, \zeta_1)$ – двовимірна ЩРІ напрацювань між відмовами та невідомим параметром ζ_1 . Тоді

$$\Delta H(f(t)) = m_1 \left(\log_2 \frac{f(t, \zeta_1)}{f(t)f(\zeta_1)} \right).$$

Переходячи до інтегрального вигляду, отримуємо:

$$\Delta H(f(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t, \zeta_1) \log_2 \frac{f(t, \zeta_1)}{f(t)f(\zeta_1)} dt d\zeta_1.$$

Перейшовши до натурального логарифму, отримуємо:

$$\Delta H(f(t)) = \frac{1}{\ln 2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t, \zeta_1) \ln \frac{f(t, \zeta_1)}{f(t)f(\zeta_1)} dt d\zeta_1.$$

Використаємо нерівність $\ln x \geq 1 - \frac{1}{x}$ для $\forall x \geq 0$. Звідси

$$\begin{aligned} \Delta H(f(t)) &\geq \frac{1}{\ln 2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t, \zeta_1) \left(1 - \frac{f(t)f(\zeta_1)}{f(t, \zeta_1)} \right) dt d\zeta_1 = \\ &= \frac{1}{\ln 2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (f(t, \zeta_1) - f(t)f(\zeta_1)) dt d\zeta_1 = \frac{1}{\ln 2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t, \zeta_1) dt d\zeta_1 - \\ &\quad - \frac{1}{\ln 2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(\zeta_1) dt d\zeta_1 = \frac{1}{\ln 2} - \frac{1}{\ln 2} = 0. \end{aligned}$$

Отже, $\Delta H(f(t)) \geq 0$, тобто кількість інформації щодо $f(t)$, отримана внаслідок статистичного оброблення невідомого параметра ζ_1 , пов'язаного з напрацюваннями між відмовами, не може бути від'ємною. Теорему доведено.

Наслідок. Якщо процес виникнення відмов не пов'язаний з невідомим параметром ζ_1 (випадкові величини ζ_1 та t є незалежними), то $\Delta H(f(t)) = 0$.

Теорема 2.

У разі експоненціальної ЩРІ напрацювань між відмовами задача мінімізації показника ефективності у вигляді питомих експлуатаційних витрат (5) не має змісту, а превентивне ТО виконувати не потрібно з погляду економії витратних ресурсів.

Теорема 3.

У разі нормальної, вейбулівської, релєєвської та логарифмічно-нормальної ЩРІ напрацювань між відмовами існує така періодичність проведення превентивного ТО, яка забезпечує мінімальне значення показника ефективності (5).

На відміну від існуючих теореми 2 та 3 доведені для випадку показника ефективності, що враховує весь період експлуатації НЗА та стратегію з превентивним технічним обслуговуванням.

Наслідок. Під час застосування стратегії технічного обслуговування за станом з контролем визначальних параметрів існує оптимальне значення превентивного порогу, що мінімізує функцію питомих експлуатаційних витрат.

Доведення теорем 2 та 3 наведені в розділі 2.3 та Додатку А дисертаційної роботи відповідно.

Твердження.

З ускладненням ієрархічної структури експлуатованого обладнання виконання процесів експлуатації повинно бути пов'язане з більш високими ієрархічними рівнями.

Доведені три теореми щодо зменшення невизначеності та доцільності проведення технічного обслуговування НЗА, а також твердження показують, що статистичне оброблення даних у СЕ є запорукою одержання додаткової інформації щодо елементів СЕ для можливості прийняття більш достовірних, своєчасних та правильних управлінських рішень щодо виконання превентивних, запобіжних та корегувальних дій.

У розділі також запропоновано операторну схему статистичного оброблення даних для контролю визначальних параметрів та показників надійності НЗА, що може бути використана під час проєктування та вдосконалення СЕ. Визначено перелік операторів оброблення даних, який містить оператори вимірювання, збирання, статистичного оброблення, прийняття рішень щодо коригувальних та запобіжних дій, а також оцінювання ефективності СЕ. Загалом оператори мають складну структуру та містять сукупність алгоритмів.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено синтезу та аналізу методів та процедур виявлення погіршення технічного стану на основі статистичного оброблення даних щодо показників надійності.

Надійність функціонування НЗА є одним із визначальних чинників забезпечення безпеки та регулярності польотів у цивільній та військовій авіації. У процесі експлуатації НЗА його надійність неминуче погіршується з плином часу. Аналіз показує, що зазвичай тренди погіршення описуються нестационарними випадковими процесами. Оброблення даних для таких процесів є класом задач аналізування розладнання.

У цьому розділі проаналізовані моделі зміни показників надійності у випадку погіршення технічного стану обладнання на прикладі інтенсивності

відмов. Можна виділити стрибкоподібну, лінійну, квадратичну та лінійно-стрибкоподібну моделі погіршення технічного стану. Аналітичний вигляд таких моделей такий:

1. Для випадку стрибкоподібної моделі:

$$\lambda(t) = \lambda_0 h(t) + d_0 h(t - t_{sw}), \quad (7)$$

де λ_0 – початкове значення інтенсивності відмов; t_{sw} – момент часу, що характеризує початок виникнення погіршення технічного стану; d_0 – параметр стрибкоподібного погіршення технічного стану; $h(t)$ – функція Хевісайда.

2. Для випадку лінійної моделі:

$$\lambda(t) = \lambda_0 h(t) + d_1 (t - t_{sw}) h(t - t_{sw}), \quad (8)$$

де d_1 – параметр лінійної моделі погіршення технічного стану.

3. Для випадку квадратичної моделі:

$$\lambda(t) = \lambda_0 h(t) + d_2 (t - t_{sw})^2 h(t - t_{sw}), \quad (9)$$

де d_2 – параметр квадратичної моделі погіршення технічного стану.

4. Для випадку лінійно-стрибкоподібної моделі:

$$\lambda(t) = \lambda_0 h(t) + d_1 (t - t_{sw}) h(t - t_{sw}) - d_1 (t - t_{sat}) h(t - t_{sat}), \quad (10)$$

де t_{sat} – момент часу, що характеризує процес переходу від лінійного тренду зміни інтенсивності відмов до усталеного режиму під час погіршення технічного стану.

Виконано синтез та аналіз процедури виявлення розладнання на основі критерію Неймана-Пірсона. У роботі використовується проста гіпотеза H_0 (відсутність погіршення технічного стану НЗА) проти простої альтернативи H_1 (наявність погіршення технічного стану НЗА). Ця процедура може бути узагальнена до таких операцій:

1. Отримання аналітичного виразу для відношення правдоподібності.

2. Отримання аналітичного виразу для вирішальної статистики.

3. Розрахунок порогу прийняття рішення. Водночас необхідно задати значення параметра погіршення технічного стану НЗА, яке необхідно виявити з заданою імовірністю D_0 .

4. Розрахунок характеристики виявлення.

Для випадку стрибкоподібної моделі відношення правдоподібності можна подати у вигляді:

$$\Lambda(\vec{t}_n, k, a_0) = a_0^{n-k} e^{\lambda_0 (1-a_0) \sum_{i=k}^n t_i}, \quad (11)$$

де $a_0 = \frac{d_0 + \lambda_0}{\lambda_0}$, k – випадковий момент виникнення розладнання; n –

фіксований обсяг вибірки; t_i – статистичні дані щодо напрацювань між відмовами.

Після логарифмування вирішальна статистика набуде вигляду:

$$\theta(a_0^{(0)}, \vec{t}_n, \lambda_0) = (n - k + 1) \ln a_0^{(0)} + \lambda_0 (1 - a_0^{(0)}) \sum_{i=k}^n t_i, \quad (12)$$

де $a_0^{(0)}$ характеризує те значення коефіцієнта погіршення технічного стану, яке необхідно виявити з наперед заданою ймовірністю D_0 .

Аналіз аналітичного виразу для ЦПІ значень вирішальної статистики $\theta(a_0^{(0)}, \vec{t}_n, \lambda_0)$ показав, що вона має доволі складний характер, тому зроблено припущення щодо її апроксимації нормальною ЦПІ. Це припущення було підтверджено шляхом статистичного моделювання. Тоді поріг прийняття рішення визначається за формулою:

$$V = m_1(\theta / H_1) + \sigma(\theta / H_1) \Phi^{-1}(\beta), \quad (13)$$

де $\Phi^{-1}(\beta)$ – обернена функція до інтеграла ймовірностей Лапласа; $m_1(\theta / H_1)$ та $\sigma(\theta / H_1)$ – математичне сподівання та дисперсія вирішальної статистики; β – ймовірність помилки другого роду.

Ймовірність правильного виявлення розраховується за формулою:

$$D = 1 - \int_{-\infty}^V N(\theta / H_1) d\theta, \quad (14)$$

де $N(\theta / H_1)$ – нормальна ЦПІ вирішальної статистики для альтернативи H_1 .

На рис. 3 наведені характеристики виявлення розладнання, отримані в результаті аналітичних розрахунків та на основі статистичного моделювання (початкові дані: $\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ годин⁻¹, $a_0^{(0)} = 2$, $a_0 = 2$, $n = 50$, $k_0 = 25$, $\beta = 0.1$, поріг прийняття рішення $V = 1.756$, ймовірність помилки першого роду $\alpha = 0.028$).

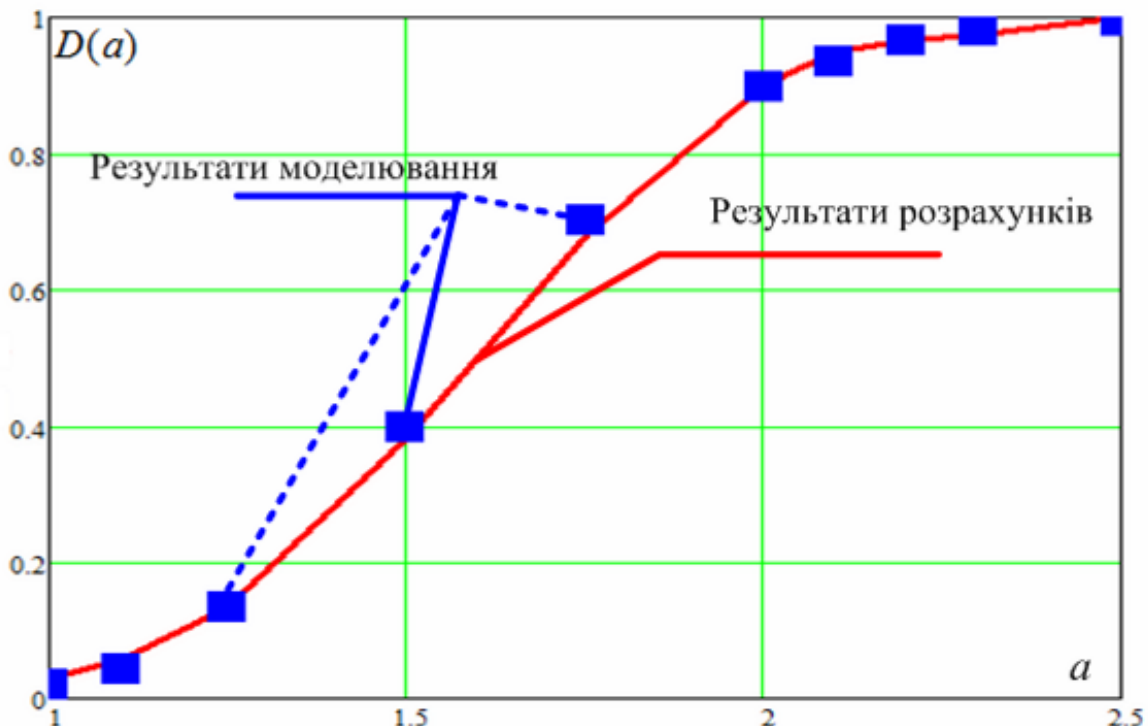


Рис. 3. Характеристики виявлення розладнання

Порівняння графіків на рис. 3 свідчить про правильність зроблених розрахунків.

У розділі також проаналізовано ефективність процедури виявлення розладнання шляхом побудови сімейства характеристик виявлення для різних значень необхідного рівня виявлення параметра погіршення технічного стану та різних моментів виникнення розладнання.

Ідентичні операції щодо синтезу та аналізу процедури виявлення розладнання виконані для лінійної моделі погіршення технічного стану НЗА.

Наступним етапом після прийняття рішення щодо наявності або відсутності погіршення технічного стану НЗА є визначення числових значень оцінок параметрів моделі. Цю задачу було розв'язано шляхом використання методу максимуму правдоподібності з фіксованим обсягом вибірки.

Задачу оцінювання було розв'язано для моделей (7) – (10).

Під час розв'язання задач синтезу процедур оцінювання виконувались такі операції:

1. Знаходження функції правдоподібності, яка, наприклад, для випадку стрибкоподібної моделі погіршення технічного стану НЗА має вигляд:

$$\Lambda(\lambda_0, a_0, k) = \lambda_0^n a_0^{n-k+1} e^{-\lambda_0 \left(\sum_{i=1}^{k-1} t_i + a_0 \sum_{i=k}^n t_i \right)}. \quad (15)$$

Задача оцінювання може бути розділена на два класи задач, коли невідомий лише один параметр λ_0 або a_0 та коли невідомі обидва параметри λ_0 та a_0 . При цьому зроблено припущення, що невизначеність значення параметра k усувається на етапі виявлення розладнання під час аналізування вирішальної статистики та знаходження аргументу, за якого досягається її максимальне значення.

2. Для розв'язання задачі першого типу (якщо невідомий тільки один параметр) необхідно знайти часткову похідну відносно відповідного параметра функції правдоподібності, прирівняти її до нуля і розрахувати отримане рівняння щодо невідомого параметра (тобто знайти аргумент, для якого функція правдоподібності є максимальною). Для моделей (7) – (10) отримані такі оцінки:

$$\lambda_0^* = \frac{k-1}{\sum_{i=1}^{k-1} t_i}, \quad (16)$$

$$a_0^* = \frac{n-k+1}{\lambda_0 \sum_{i=k}^n t_i}, \quad d_1^* = \frac{2(n-k+1)}{\sum_{i=k}^n t_i^2}, \quad d_2^* = \frac{3(n-k+1)}{\sum_{i=k}^n t_i^3}. \quad (17)$$

У випадку невідомих двох параметрів a_0 та λ_0 необхідно розв'язати системи із двох рівнянь, попередньо знайшовши частинні похідні від функції правдоподібності та прирівнявши їх нулю. В результаті для моделей (7)–(9) можна показати, що оцінка параметра λ_0 збігається з виразом (16), а оцінка параметра a_0 набуде вигляду:

$$a_0^* = \frac{n-k+1}{k-1} \frac{\sum_{i=1}^{k-1} t_i}{\sum_{i=k}^n t_i}, \quad d_1^* = \frac{n \sum_{i=1}^{k-1} t_i - (k-1) \sum_{i=1}^n t_i}{0.5 \sum_{i=k}^n t_i^2 \sum_{i=1}^{k-1} t_i}, \quad d_2^* = \frac{n \sum_{i=1}^{k-1} t_i - (k-1) \sum_{i=1}^n t_i}{\frac{1}{3} \sum_{i=k}^n t_i^3 \sum_{i=1}^{k-1} t_i}. \quad (18)$$

Для моделі (10) погіршення технічного стану оцінка формується відповідно до формули:

$$d_1^* = \frac{0.5 \left(n \sum_{i=1}^{k-1} t_i - (k-1) \sum_{i=1}^n t_i \right)}{\sum_{i=1}^{k-1} t_i \sum_{i=k}^{k'-1} t_i^2 - 2(k'-1) \sum_{i=1}^{k-1} t_i \sum_{i=k'}^n t_i}, \quad (19)$$

де k' – номер відмови, що відповідає моменту закінчення стрибка в розладнанні.

Під час розв'язання задач аналізу процедур оцінювання виконувалось знаходження ЩРІ оцінок, а також математичних сподівань та дисперсій оцінок. Так, наприклад, для випадку стрибкоподібної моделі ЩРІ оцінки параметра погіршення технічного стану має вигляд:

$$f(x) = \frac{(n-k+1)^{n-k+1} a_0^{n-k+1}}{x^{n-k+2} (n-k)!} e^{-\frac{a_0(n-k+1)}{x}}. \quad (20)$$

Для перевірки отриманих результатів проведено статистичне моделювання процедури оцінювання невідомого параметра a_0 . Для побудови функції ЩРІ процедура оцінювання параметрів повторювалася $N=1000$. На рис. 4 зображено графіки ЩРІ на підставі результатів моделювання та ЩРІ, отриманої за аналітичним виразом (20). Моделювання проводилося для таких параметрів: $n=40$, $k=20$, $a_0=2$, $\lambda=0.01$ годин⁻¹.

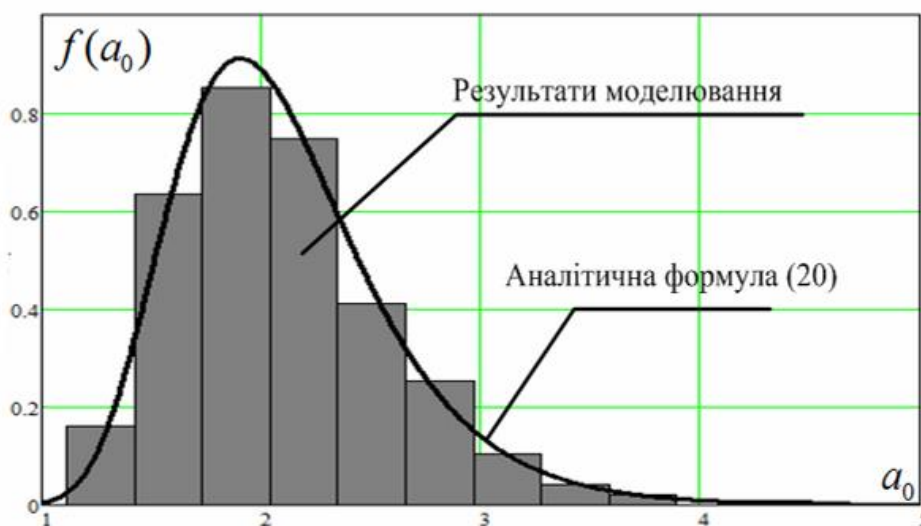


Рис. 4. Теоретична ЩРІ оцінки та відповідна гистограма

Проведено тестування результатів моделювання та узгодженості теоретичних розрахунків за критерієм згоди χ^2 Пірсона. Розраховане значення 6.2, а пороговий рівень – 26.2 (для рівня значущості 0.01), а це вказує на те, що отримані результати моделювання збігаються з теоретичною ЩРІ.

Номограми ЩРІ невідомого параметра a_0 для різних значень параметрів генеральної сукупності показані на рис. 5 та 6.

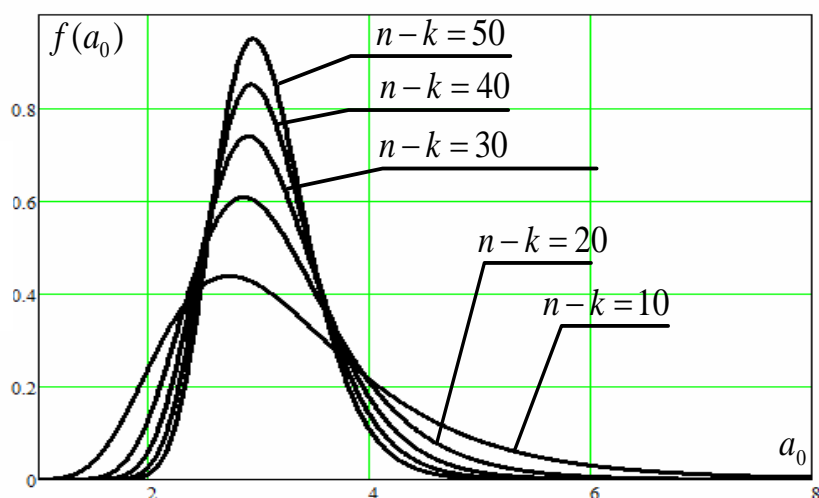


Рис. 5. Номограма ЩРІ оцінки для різних обсягів вибірки

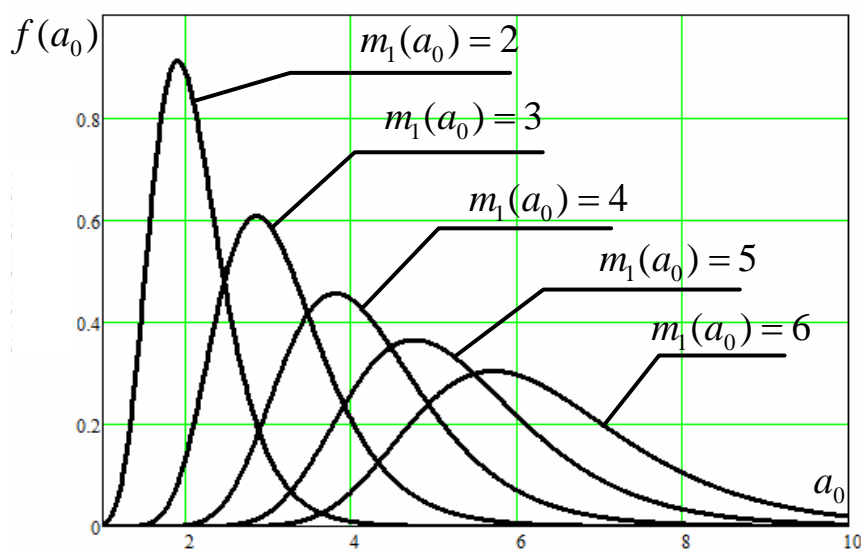


Рис. 6. Номограма ЩРІ оцінки для різних математичних сподівань оцінки

Для наведеного прикладу математичне сподівання та дисперсія оцінки визначаються за формулами:

$$m_1(a_0^*) = a_0 \frac{n-k+1}{n-k}. \quad (21)$$

$$\mu_2(a_0^*) = \frac{a_0^2 (n-k+1)^2}{(n-k)^2 (n-k-1)}. \quad (22)$$

Виконано синтез та аналіз двох евристичних процедур виявлення погіршення технічного стану на підставі оцінювання параметрів моделі змін показників надійності, а також на основі апроксимації емпіричних даних. Аналіз отриманих результатів показав, що процедура на базі апроксимації статистичних даних є більш чутливою до процесів погіршення технічного стану, проте трохи гіршою за процедуру на основі критерію Неймана-Пірсона.

У розділі також виконано синтез та аналіз двох процедур виявлення розладнання на основі послідовного аналізу А. Вальда: перша процедура – класична, а друга – на підставі багатократного прийняття рішення щодо відсутності розладнання.

У випадку першої процедури гіпотеза H_0 відповідає відсутності погіршення технічного стану (при цьому $\lambda = \lambda_0$). Альтернатива H_1 полягає у наявності погіршення технічного стану (при цьому $\lambda = a_0 \lambda_0$). Вважаємо, що задані ймовірності прийняття помилкових рішень α_0 (імовірність прийняти H_1 , якщо H_0 істинна) та β_0 (імовірність прийняти H_0 , якщо H_1 істинна).

Під час аналізування відношення правдоподібності Вальда приймаються рішення:

– продовження спостережень, якщо

$$\ln \frac{\beta_0}{1 - \alpha_0} \leq n \ln a_0 + \lambda_0 (1 - a_0) \sum_{i=1}^n t_i \leq \ln \frac{1 - \beta_0}{\alpha_0};$$

– прийняти гіпотезу H_0 , якщо

$$n \ln a_0 + \lambda_0 (1 - a_0) \sum_{i=1}^n t_i < \ln \frac{\beta_0}{1 - \alpha_0};$$

– прийняти альтернативу H_1 , якщо

$$n \ln a_0 + \lambda_0 (1 - a_0) \sum_{i=1}^n t_i > \ln \frac{1 - \beta_0}{\alpha_0}.$$

Математичні сподівання тривалості прийняття гіпотези та альтернативи визначаються за формулами:

$$m_1(n/H_0) = \frac{\alpha_0 \ln \frac{1 - \beta_0}{\alpha_0} + (1 - \alpha_0) \ln \frac{\beta_0}{1 - \alpha_0}}{1 - a_0 + \ln a_0}; \quad (23)$$

$$m_1(n/H_1) = \frac{\beta_0 \ln \frac{\beta_0}{1 - \alpha_0} + (1 - \beta_0) \ln \frac{1 - \beta_0}{\alpha_0}}{\frac{1}{a_0} - 1 + \ln a_0}. \quad (24)$$

Оперативна характеристика для досліджуваного варіанта послідовної процедури виявлення розладнання:

$$L(a) = \frac{\left(\frac{1 - \beta_0}{\alpha_0} \right)^{\frac{a}{a_0 - 1} \frac{1}{\ln a_0} \text{LambertW} \left(\frac{a \ln a_0}{a_0 - 1} \frac{a}{a_0 - 1} \right)} - 1}{\left(\frac{1 - \beta_0}{\alpha_0} \right)^{\frac{a}{a_0 - 1} \frac{1}{\ln a_0} \text{LambertW} \left(\frac{a \ln a_0}{a_0 - 1} \frac{a}{a_0 - 1} \right)} - \left(\frac{\beta_0}{1 - \alpha_0} \right)^{\frac{a}{a_0 - 1} \frac{1}{\ln a_0} \text{LambertW} \left(\frac{a \ln a_0}{a_0 - 1} \frac{a}{a_0 - 1} \right)}}$$

де $\text{LambertW}(x)$ – функція Ламберта, яка визначається як обернена до функції типу $W(x) = xe^x$.

Для покращення ефективності виявлення необхідно модифікувати процедуру прийняття рішень. Одним із таких варіантів є використання послідовної процедури з багатократним прийняттям рішення. Нехай для спостереження доступні відліки t_i . Процедура є незрізаною. З початку спостереження реалізується послідовний метод перевірки гіпотез щодо наявності розладнання. У разі, якщо приймається гіпотеза H_0 на кроці s , то всі відліки, що використовувалися у вирішальній статистиці від першого до s -го, відкидаються. Далі, починаючи з відліку $s+1$, реалізується нова послідовна процедура. Нові послідовні процедури продовжуються доти, доки не буде прийнята альтернатива H_1 . Графічно процес прийняття рішення може бути пояснено на рис. 7.

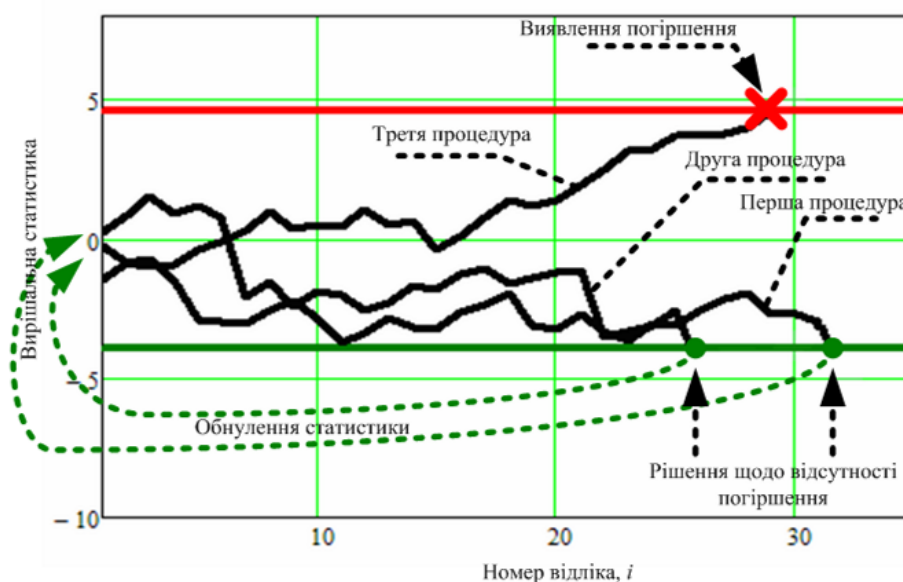


Рис. 7. Графічне пояснення реалізації послідовної процедури з багатократним прийняттям рішення

Щодо використання послідовної процедури з багатократним прийняттям рішення, слід зауважити, що вона є більш раціональною, оскільки під час прийняття рішення про наявність розладнання не враховується зайва інформація з етапу квазістаціонарності, де розладнання було відсутнє.

Четвертий розділ присвячено методам виявлення погіршення технічного стану НЗА на основі аналізу визначальних параметрів.

Під час використання стратегії технічного обслуговування за станом намагаються запобігти відмовам з метою зменшення експлуатаційних витрат. Одним зі шляхів реалізації цієї мети є формування та здійснення своєчасних та правильних запобіжних та коригувальних дій. Основою для їх формування є результати статистичного оброблення даних щодо змін у трендах визначальних параметрів радіоелектронного обладнання.

У цьому розділі розглянуті моделі зміни визначальних параметрів НЗА у випадку лінійного та квадратичного розладнань:

$$y(t) = x(t) + Z_0 h(t) + v(t - t_{sw})h(t - t_{sw}) + \mathfrak{G}(t) + \sum_{i=1}^n a_i h(t - t_{fi}); \quad (25)$$

$$y(t) = x(t) + Z_0 h(t) + v(t - t_{sw})^2 h(t - t_{sw}) + \mathfrak{G}(t) + \sum_{i=1}^n a_i h(t - t_{fi}), \quad (26)$$

де Z_0 – номінальне значення визначального параметра; t_{sw} – момент виникнення розладнання; v – швидкість зміни визначального параметра для випадку розладнання; $x(t)$ – сигнальна випадкова складова визначального параметра, яка враховує неточність його опису; $\mathfrak{G}(t)$ – завадова складова, зумовлена помилками контрольно-вимірювальної апаратури; t_{fi} і a_i – випадкові моменти виникнення раптових відмов, збоїв і пошкоджень, а також дрейф у зміні визначального параметра, пов'язаний з ними.

Другий та третій доданки у формулах (25) та (26) є сигнальною детермінованою складовою визначального параметра, яка відображає тенденцію його зміни (непостережуваний процес). Останній доданок описує можливість появи раптових відмов.

Для вдосконалення стратегії ТО за станом були знайдені аналітичні співвідношення для ЩРІ напрацювань на відмову у випадку моніторингу визначальних параметрів під час погіршення технічного стану НЗА.

Позначивши експлуатаційний допуск як V_E , отримаємо, що в момент відмови t_i абсолютне значення визначального параметра буде перевищувати поріг V_E , тобто $|y(t_i)| \geq V_E$. Для випадку лінійної моделі (25) отримані ЩРІ моментів виникнення поступових відмов для таких варіантів, коли:

1) величина v є детермінованою, а t_{sw} та \mathfrak{G}_i – випадковими:

$$f_{\Pi}(t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t_{sw}) \Big|_{t_{sw}=t_i - \frac{V_E - Z_0 + \mathfrak{G}_i}{v}} f(\mathfrak{G}_i) d\mathfrak{G}_i, \quad (27)$$

де $f(t_{sw})$ – ЩРІ моменту виникнення розладнання; $f(\mathfrak{G}_i)$ – ЩРІ похибок контрольно-вимірювальної апаратури;

2) величини v та t_{sw} є випадковими, а $\mathfrak{G}_i \approx 0$ (похибкою контрольно-вимірювальної апаратури можна знехтувати через її високий клас точності):

$$f_{\Pi}(t_i) = \int_0^{\infty} \frac{V_E - Z_0}{(t_i - t_{sw})^2} f(t_{sw}) f(v) \Big|_{v(t_i, t_{sw}) = \frac{V_E - Z_0}{t_i - t_{sw}}} dt_{sw}; \quad (28)$$

3) величини v , t_{sw} та \mathfrak{G}_i є випадковими:

$$f_{\Pi}(t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t_{sw}) \Big|_{t_{sw}=t_i - \frac{V_E - Z_0 + \mathfrak{G}_i}{v}} f(\mathfrak{G}_i) d\mathfrak{G}_i dv. \quad (29)$$

У випадку квадратичної моделі погіршення технічного стану ЩРІ виникнення поступових відмов набудуть вигляду:

$$f_{\Pi}(t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t_{sw}) \Big|_{t_{sw}=t_i - \sqrt{\frac{V_E - Z_0 - \mathfrak{G}_i}{v}}} f(\mathfrak{G}_i) d\mathfrak{G}_i; \quad (30)$$

$$f_{\Pi}(t_i) = \int_0^{\infty} \frac{2V_E - 2Z_0}{(t_i - t_{sw})^3} f(t_{sw}) f(v) \Big|_{v(t_i, t_{sw}) = \frac{V_E - Z_0}{(t_i - t_{sw})^2}} dt_{sw} ; \quad (31)$$

$$f_{\Pi}(t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(t_{sw}) \Big|_{t_{sw} = t_i - \frac{\sqrt{V_E - Z_0 - \vartheta_i}}{v}} f(\vartheta_i) d\vartheta_i dv . \quad (32)$$

У розділі було удосконалено стратегію ТО з превентивним порогом. Така стратегія дозволяє запобігти можливим відмовам і, отже, зменшити витрати на експлуатацію. Аналіз ефективності стратегії ТО з превентивним порогом проводився шляхом аналітичних розрахунків та моделюванням на основі методу Монте-Карло. Дослідження показали, що функціональна залежність питомих витрат на експлуатацію НЗА від значення превентивного порогу завжди має мінімум.

Водночас зроблено припущення, що технічний стан характеризується одним визначальним параметром $y(t)$, а нормативна документація встановлює допуски на можливі зміни цього параметра у вигляді нижнього та верхнього експлуатаційних порогів V_{E-} та V_{E+} . Попереджувальні допуски позначимо як $V_{\text{ПТО-}}$ та $V_{\text{ПТО+}}$.

Значення визначального параметра можуть перебувати в одній із трьох областей:

1) область нормальної експлуатації

$$V_{E-} \leq y(t) \leq V_{E+} ;$$

2) область планування і виконання превентивного технічного обслуговування (ПТО)

$$V_{\text{ПТО+}} \leq y(t) \leq V_{E+} \text{ або } V_{E-} \leq y(t) \leq V_{\text{ПТО-}} ;$$

3) область непрацездатного стану

$$y(t) > V_{E+} \text{ або } y(t) < V_{E-} .$$

В області нормальної експлуатації здійснюється періодичний контроль за допомогою комп'ютерних технологій. В області порушення працездатності виконується поточний ремонт. Після його виконання НЗА стає працездатним з погляду досліджуваного визначального параметра.

Середні питомі витрати на експлуатацію запропоновано розраховувати за формулами:

$$m_1(C/T_{\Sigma}) = m_1(C_P/T_{\Sigma}) + m_1(C_{\text{ТО}}/T_{\Sigma}) ; \quad (33)$$

$$m_1(C_P/T_{\Sigma}) = \frac{k_P}{k_{\Sigma} T_{\Sigma}} C_P, \quad m_1(C_{\text{ТО}}/T_{\Sigma}) = \frac{k_{\text{ТО}}}{k_{\Sigma} T_{\Sigma}} C_{\text{ТО}},$$

де C_P і $C_{\text{ТО}}$ – витрати на один ремонт і технічне обслуговування; k_P та $k_{\text{ТО}}$ – кількість процедур проведення ремонтних робіт і технічного обслуговування відповідно; k_{Σ} – сумарна кількість процедур проведення ремонтних робіт і технічного обслуговування; T_{Σ} – час спостереження.

Для лінійної моделі (25) були розглянуті такі варіанти:

1. Випадковий момент виникнення розладнання.

На рис. 8 та 9 наведені результати статистичного моделювання за методом Монте-Карло для початкових даних генеральної сукупності $Z_0 = 0$ у.о., $\nu = 1$ у.о./годин, $V_{E+} = 500$ у.о., $V_{E-} = -500$ у.о., $C_P = 100$ у.о., $C_{TO} = 50$ у.о., тривалість технічного обслуговування $t_{TO} = 100$ годин, ϑ є рівномірно розподіленою випадковою величиною в інтервалі $[-40; 40]$, t_{sw} є нормально розподіленою випадковою величиною з параметрами $m_1(t_{sw}) = 200$ годин та $\sigma(t_{sw}) = 60$ годин, тривалість поточного ремонту ξ є експоненціальною випадковою величиною з інтенсивністю $\lambda = 0.005$ годин⁻¹.

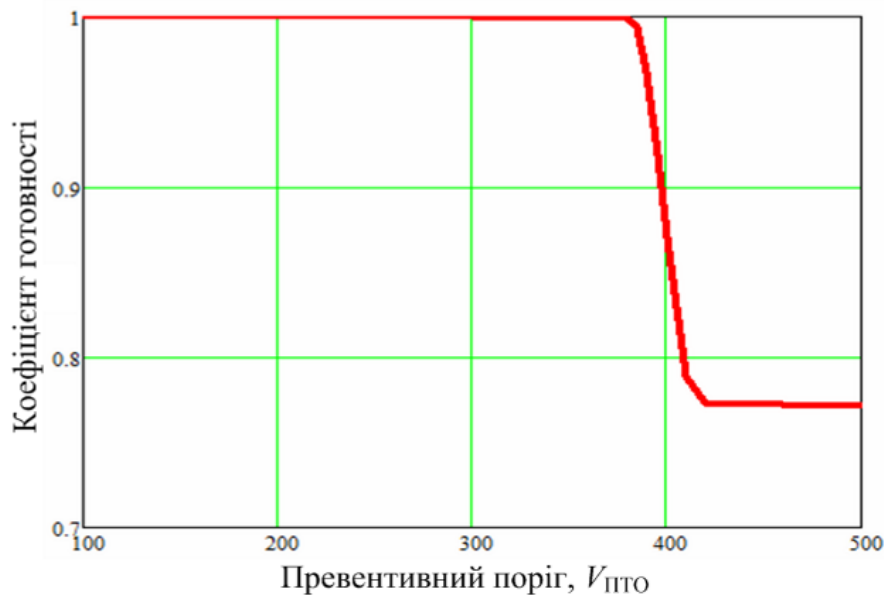


Рис. 8. Оцінки коефіцієнта готовності для різних значень превентивного порогу

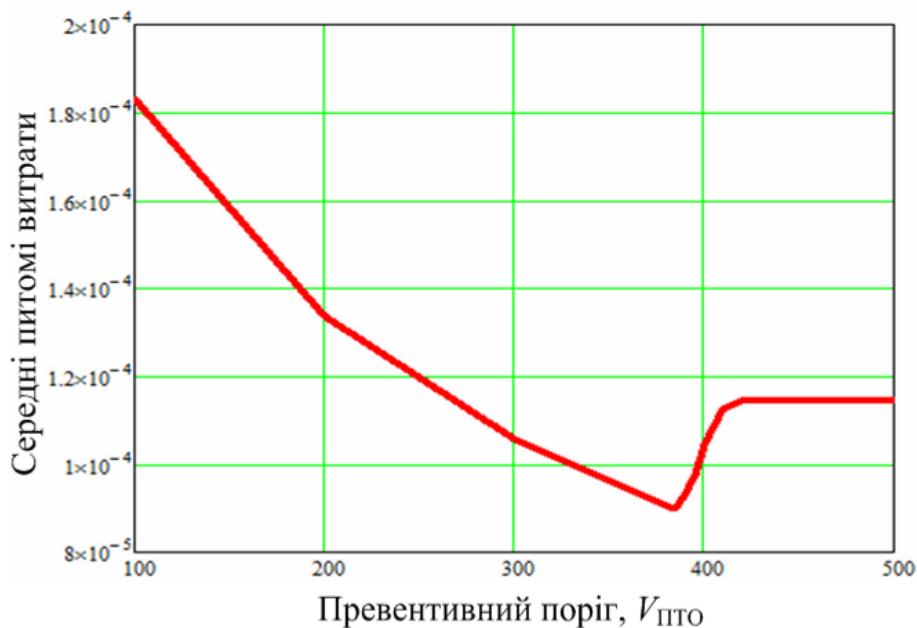


Рис. 9. Оцінки середніх питомих витрат для різних значень превентивного порогу

Відповідно до рис. 8 та 9 можна зробити такі висновки. Використання алгоритму оброблення даних, який реалізує стратегію технічного

обслуговування за станом з контролем визначальних параметрів, призводить до збільшення середнього часу між відмовами у випадку зниження значення превентивного порогу. Аналіз залежності середніх витрат від превентивного порогу показує, що існує мінімум функцій $m_1(C/T_\Sigma)$ для заданих початкових параметрів стратегії ТО за станом. Характер цього мінімуму можна пояснити наявністю балансу між витратами на ремонт і технічне обслуговування.

Крім того, розв'язано задачу визначення аналітичного співвідношення для значення превентивного порогу, за якого досягається мінімум питомих витрат на експлуатацію. Водночас зроблено припущення, що визначальний параметр має лише однобічну критичну область, тобто контролюється перетин лише одного порогу (наприклад, верхнього V_{E+}). Вираз для питомих витрат у такому випадку запишемо у вигляді:

$$m_1(C/T_\Sigma) = \frac{C_4 + C_5 V_{\text{ПТО}+}}{C_1 + C_2 V_{\text{ПТО}+} + C_3 V_{\text{ПТО}+}^2}, \quad (34)$$

де коефіцієнти визначаються за формулами

$$\begin{aligned} C_1 = m_1(t_{\text{sw}}) + \frac{V_{\text{ПТО}+} + V_{E+}}{2v_0} - \frac{Z_0}{v_0} + \frac{t_{\text{ТО}} + t_p}{2} - \frac{t_{\text{ТО}} v_0 \Delta T}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} + \frac{t_{\text{ТО}} V_{E+}}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} + \frac{\Delta T V_{E+}}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} - \\ - \frac{V_{E+}^2}{2v_0 \sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} + \frac{t_p v_0 \Delta T}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} - \frac{t_p V_{E+}}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}}; \\ C_2 = \frac{t_p}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} - \frac{t_{\text{ТО}}}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} + \frac{V_{E+}}{v_0 \sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} - \frac{\Delta T}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}}; \quad C_3 = -\frac{1}{2v_0 \sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}}; \\ C_4 = \frac{C_p v_0 \Delta T}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} - \frac{C_p V_{E+}}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} - \frac{C_{\text{ТО}} v_0 \Delta T}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}} + \frac{C_{\text{ТО}} V_{E+}}{2\sqrt{\pi\sigma(\vartheta)}}; \quad C_5 = \frac{C_p + C_{\text{ТО}}}{2}, \end{aligned}$$

де t_p – тривалість ремонтних робіт.

Тоді оптимальне значення превентивного порогу

$$V_{\text{ПТО}+\text{опт}} = \frac{C_2 C_5 + 2C_3 C_4 \pm \sqrt{(C_2 C_5 + 2C_3 C_4)^2 + 4C_3 C_5 (C_1 C_5 - C_2 C_4)}}{2(C_1 C_5 - C_2 C_4)}. \quad (35)$$

З-поміж отриманих коренів треба обрати той, що менше за значенням, ніж експлуатаційний поріг.

2. Випадкова швидкість розгортання процесу погіршення технічного стану.

Аналіз залежності питомих експлуатаційних витрат від превентивного порогу показує, що у цьому випадку також існує мінімум функцій $m_1(C/T_\Sigma)$. Розв'язання задачі визначення оптимального превентивного порогу, що забезпечує мінімум питомих витрат, здійснювалося шляхом моделювання. Аналітичні співвідношення для розрахунку превентивного порогу є частковим випадком більш загальної задачі з випадковими моментом виникнення розладнання та швидкості розгортання процесу погіршення технічного стану.

3. Випадкові момент виникнення розладнання та швидкість розгортання процесу погіршення технічного стану.

У цьому випадку задача розв'язується аналітично, виходячи з таких припущень:

а) швидкість зростання погіршення є тангенсом кута нахилу φ тренду визначального параметра; б) ЩРІ моменту виникнення розладнання та похибок вимірювальної апаратури є нормальними з параметрами $m_1(t_{sw})$, $\sigma(t_{sw})$ та $m_1(\vartheta) = 0$, $\sigma(\vartheta)$ відповідно; в) ЩРІ кута нахилу φ є рівномірною в інтервалі $[\varphi_1; \varphi_2]$.

Значення оптимального превентивного порогу є розв'язком рівняння:

$$\frac{(C_1 C_6 - C_3 C_5) \Delta T}{\Delta T^2 + (V_{E+} - V_{ПТО+})^2} - C_2 C_5 + \frac{(C_2 C_6 - C_4 C_5) \Delta T}{\Delta T^2 + (V_{E+} - V_{ПТО+})^2} V_{ПТО+} - \\ - (C_2 C_6 + C_4 C_5) \operatorname{arctg} \frac{\Delta T}{V_{E+} - V_{ПТО+}} - C_4 C_6 \operatorname{arctg}^2 \frac{\Delta T}{V_{E+} - V_{ПТО+}} = 0,$$

де коефіцієнти визначаються за формулами

$$C_1 = m_1(t_{sw}) - Z_0 m_1(v^{-1}) + \frac{\frac{\pi}{2}(t_{ТО} - t_P - m_1(v^{-1})V_{E+}) - \varphi_1 t_{ТО} + \varphi_2 t_P + m_1(v^{-1})V_{E+} \varphi_2}{\varphi_2 - \varphi_1};$$

$$C_2 = \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1\right) m_1(v^{-1})}{\varphi_2 - \varphi_1}; \quad C_3 = \frac{m_1(v^{-1})V_{E+} + t_P - t_{ТО}}{\varphi_2 - \varphi_1};$$

$$C_4 = \frac{m_1(v^{-1})}{\varphi_2 - \varphi_1}; \quad C_5 = \frac{C_P \left(\varphi_2 - \frac{\pi}{2}\right) + C_{ТО} \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_1\right)}{\varphi_2 - \varphi_1}; \quad C_6 = \frac{C_P - C_{ТО}}{\varphi_2 - \varphi_1};$$

$$m_1(v^{-1}) = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \ln \frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_1}.$$

На рис. 10 подано приклад одноразової процедури оцінювання показника ефективності для різних значень превентивного порогу для початкових даних: $Z_0 = 200$ у.о., $V_{ПТО+} = 250$ у.о., $V_{ПТО-} = 150$ у.о., $V_{E+} = 300$ у.о., $V_{E-} = 100$ у.о., $C_P = 1000$ у.о., $C_{ТО} = 100$ у.о., $t_{ТО} = 50$ годин, $t_P = 300$ годин, кут нахилу прямої погіршення є рівномірно розподіленою випадковою величиною в інтервалі $\left[-\frac{\pi}{2.5}; -\frac{\pi}{6}\right]$, t_{sw} є рівномірно розподіленою випадковою величиною в інтервалі $[50; 100]$, ϑ є нормально розподіленою випадковою величиною з параметрами $m_1(\vartheta) = 0$ у.о. та $\sigma(\vartheta) = 4$ у.о., кількість повторень процедур моделювання $M = 1000$. При цьому за віссю абсцис відкладені різниці між превентивним допуском та початковим значенням визначального параметра.

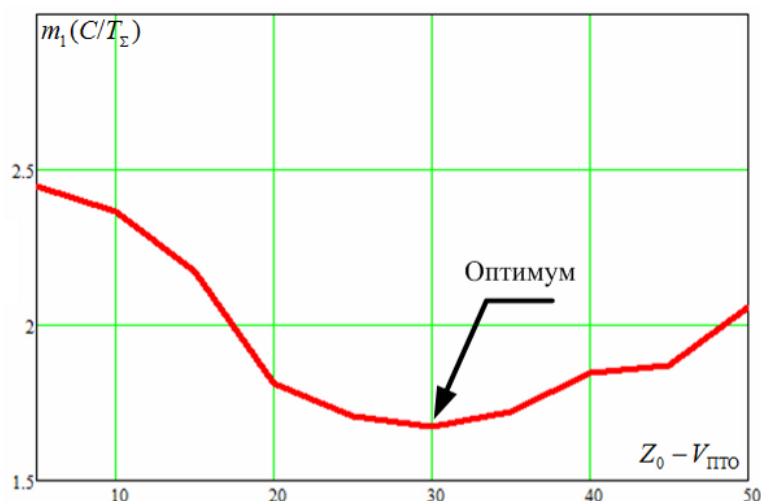


Рис. 10. Оцінки середніх питомих витрат для різних значень превентивного порогу

Слід зазначити, що в кожній процедурі моделювання оцінка мінімального значення є випадковою величиною. Тому доцільно розраховувати математичне сподівання оптимального значення. Для більш точної оцінки оптимального значення $V_{пто}$ у кожній процедурі моделювання використовується апроксимація методу найменших квадратів за допомогою полінома третього ступеня. Такі дії відповідають застосуванню імітаційно-аналітико-розрахунковому методу. У результаті отримано математичне сподівання оцінки оптимального превентивного порогу $m_1^*(V_{пто}) = 169.87$ у.о. Аналіз результатів моделювання показує, що залежність $m_1(C/T_z) = f(V_{пто})$ завжди має мінімум.

Для подальшого підвищення ефективності прийняття правильних рішень у стратегії технічного обслуговування за станом можуть використовуватися системи попереджувальних порогів. У розділі 4 також розглянуто приклад реалізації такої стратегії у випадку лінійного погіршення технічного стану НЗА та використання трьох попереджувальних порогів $V_{пто1}$, $V_{пто2}$ та $V_{пто3}$ відповідно. Схематично розставлення попереджувальних порогів зображено на рис. 11.

Як видно з рис. 11 відмова виникає в момент перетину експлуатаційного порогу. В області нормальної експлуатації рішення не приймаються, а йде спостереження за визначальним параметром. Під час перетину першого превентивного допуску система оброблення даних переходить у стан готовності до прийняття рішення. У випадку перетину другого превентивного порогу приймається перше рішення:

- 1) продовжити процес нормальної експлуатації або
- 2) виконати превентивне технічне обслуговування. Під час перетину третього превентивного порогу приймається однозначне друге рішення щодо виконання робіт з технічного обслуговування.

Як показали попередні дослідження, у функціональній залежності питомих витрат від значення превентивного порогу завжди існує мінімум. Тому раціональним є розрахунок третього превентивного порогу відповідно до методики, описаної вище. При цьому

$$V_{пто3} = \arg \min m_1(C/T_z, V_{пто}).$$

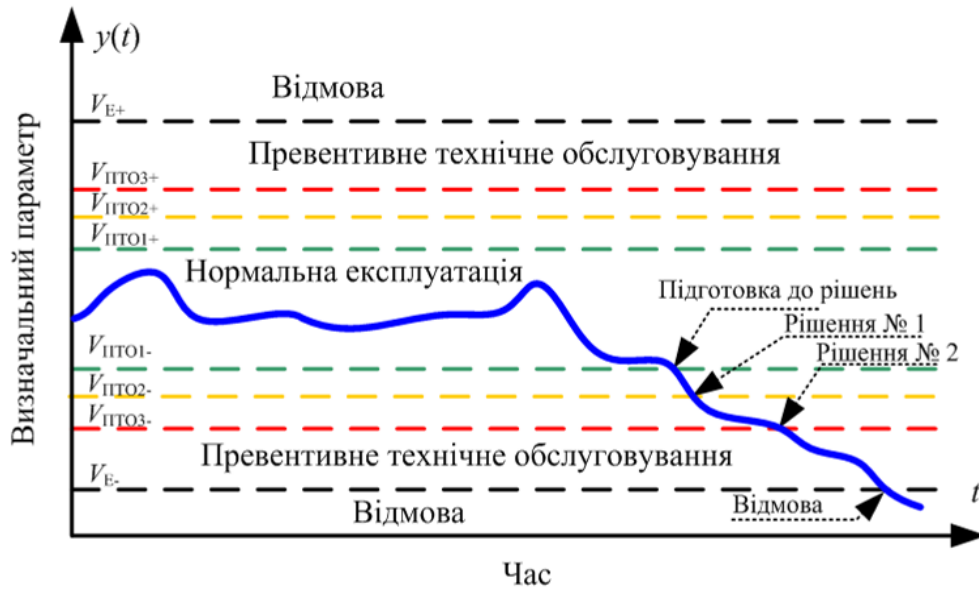


Рис. 11. Графічне пояснення обробки даних для стратегії ТО за станом з трьома попереджувальними порогами

Задача аналізу ефективності розв'язання шляхом статистичного моделювання.

Результати моделювання наведені на рис. 12. Ці результати отримані для початкових параметрів генеральної сукупності: $Z_0 = 200$ у.о., $V_{E+} = 300$ у.о., $V_{E-} = -300$ у.о., $C_p = 1000$ у.о., $C_{ТО} = 100$ у.о., $t_{ТО} = 50$ годин, $t_p = 300$ годин, кут нахилу прямої погіршення є рівномірно розподіленою випадковою величиною в інтервалі $\left[-\frac{\pi}{2.5}; -\frac{\pi}{9}\right]$, t_{sw} є рівномірно розподіленою випадковою величиною в інтервалі $[50; 100]$, ϑ є нормально розподіленою випадковою величиною з параметрами $m_1(\vartheta) = 0$ у.о. та $\sigma(\vartheta) = 10$ у.о., кількість повторень процедур моделювання $M = 1000$.

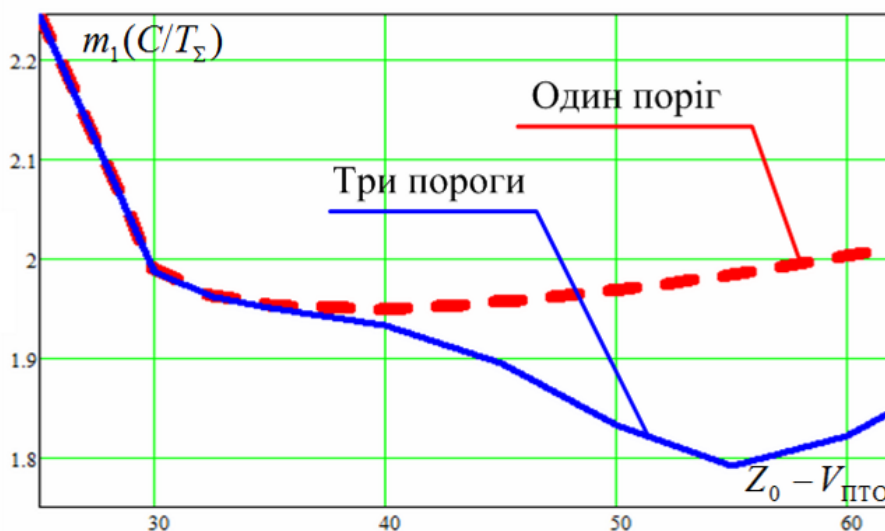


Рис. 12. Оцінки середніх питомих витрат для різних значень превентивного порогу для випадків одного та трьох порогів

Як видно з рис. 12, використання системи превентивних порогів зменшує значення питомих витрат. Як показує аналіз, для цього випадку залежність $m_1(C/T_\Sigma) = f(V_{\text{ПТО}})$ також має мінімум, проте цей мінімум не збігається з оптимальним значенням для однопорогової схеми прийняття рішень та є меншим за величиною. На рис. 12 маємо $V_{\text{ПТО1-опт}} = 155$ у.о., звідси $V_{\text{ПТО2-опт}} = 141.25$ у.о., $V_{\text{ПТО3-опт}} = 127.5$ у.о. Водночас у разі однопорогової схеми $V_{\text{ПТО1-опт}} = 161$ у.о.

Ще одним варіантом підвищення ефективності прийняття рішень у стратегії технічного обслуговування за станом є використання адаптивного превентивного порогу. Застосування підходу адаптивності є одним із принципів інтелектуальних систем. Поширення цього принципу на СЕ НЗА є однією з тенденцій сучасних наукових досліджень. Як відомо, можливі різні варіанти адаптації. У випадку адаптивного превентивного порогу розглядається адаптація системи до характеристик моделі визначального параметра. Графічні пояснення стратегії ТО з адаптивним порогом подані на рис. 13.

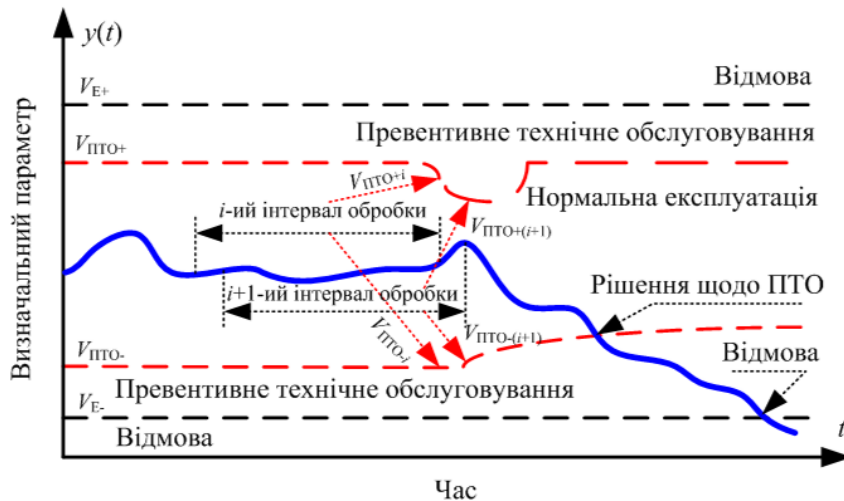


Рис. 13. Графічне пояснення процесу оброблення експлуатаційних даних під час реалізації стратегії ТО за станом з адаптивним порогом

Нехай для процесу технічного обслуговування відомі значення експлуатаційних порогів V_{E-} та V_{E+} , а також початкові значення превентивних порогів $V_{\text{ПТО-}}$ та $V_{\text{ПТО+}}$. Під час моніторингу визначального параметра виконується оброблення його значень у ковзному вікні завширшки s відліків. Позначимо алгоритм оброблення даних $A(s, y_i)$. У результаті оброблення визначаються поточні значення превентивних порогів $V_{\text{ПТО-i}}$ та $V_{\text{ПТО+i}}$. При цьому $V_{\text{ПТО+i}} = A_1(s, y_i)$, $V_{\text{ПТО-i}} = A_2(s, y_i)$. Запропонована така схема визначення порогу

$$V_{\text{ПТО+i}} = \begin{cases} A_1(s, y_i), & \text{якщо } A_1(s, y_i) < V_{\text{ПТО+}}, \\ V_{\text{ПТО+}}, & \text{у протилежно му випадку.} \end{cases}$$

$$V_{\text{ПТО-i}} = \begin{cases} A_2(s, y_i), & \text{якщо } A_2(s, y_i) > V_{\text{ПТО-}}, \\ V_{\text{ПТО-}}, & \text{у протилежно му випадку.} \end{cases}$$

Тобто поточне значення верхнього превентивного порогу не може перевищувати його початкове значення, а значення нижнього превентивного порогу не може бути меншим за відповідне початкове значення. Вважатимемо, що на проведення технічного обслуговування необхідний часовий ресурс ΔT . Оцінка поточного значення превентивного порогу буде залежати від співвідношення часового ресурсу ΔT та прогнозованого часу «життя» НЗА $\Delta\tau_{\text{пчж}}$.

Розглянемо схему оцінки прогнозованого часу «життя» $\Delta\tau_{\text{пчж}}$. Ця оцінка буде формуватися на основі апроксимації поточних значень визначального параметра за допомогою звичайного методу найменших квадратів з використанням лінійної регресії у випадку лінійної моделі погіршення технічного стану НЗА або квадратичної – у випадку квадратичного погіршення.

Аналіз показав, що у разі використання адаптивного порогу питомі витрати зменшуються, однак як показали результати моделювання, тенденція їх зміни залежить від класу точності контрольної-вимірної апаратури. Крім того, на графіку $m_1(C/T_\Sigma) = f(V_{\text{пто}})$ відсутній мінімум. Тому початкове значення превентивного порогу має бути як завгодно близьке до експлуатаційного порогу.

П'ятий розділ присвячено використанню методів виявлення та кількісного оцінювання гетероскедастичності під час аналізування трендів визначальних параметрів та показників надійності в разі розладнання.

При цьому запропоновано новий метод виявлення гетероскедастичності в статистичних даних. Цей метод включає такі етапи:

1. Під час розгляду певної фізичної величини y_i , що залежить від одного аргументу t_i загальним обсягом n відліків, виконується побудова декількох варіантів регресійних залежностей y_i від t_i за допомогою звичайного методу найменших квадратів.

2. Вибір найкращої регресійної моделі відповідно до критерію мінімуму середньоквадратичного відхилення початкових даних від апроксимованих. Ця модель береться як опорна (базова). У результаті отримаємо оцінки $\hat{y}(t_i)$. Для спрощення різноманіття можливих варіантів пропонується як базову використовувати одну з трьох залежностей: лінійну, кусково-лінійну або квадратичну. Наприклад, для лінійної моделі регресія описується рівнянням вигляду $\hat{y}(t_i) = c_0 + c_1 t_i$, де невідомі коефіцієнти визначаються як

$$c_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n t_i^2 - \sum_{i=1}^n t_i y_i \sum_{i=1}^n t_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}, \quad c_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n t_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}.$$

3. Розрахунок поправкових вагових коефіцієнтів гетероскедастичності відповідно до співвідношення

$$W_i = \left(\frac{m_1(y)}{\hat{y}(t_i)} \right)^h, \quad (36)$$

де h – показник гетероскедастичності.

Очевидно, що для випадку $h=0$ усі вагові коефіцієнти гетероскедастичності будуть дорівнювати одиницям, тобто $W_i=1$. Такий випадок відповідає ситуації відсутності гетероскедастичності в досліджуваних даних. Для знаходження значення показника гетероскедастичності розглядається одразу декілька варіантів апроксимації для випадків, коли h набуває щонайменше п'ять фіксованих значень, наприклад, $h = \{-2; -1.5; -1; -0.5; 0; 0.5; 1; 1.5; 2\}$. Тоді для базової моделі відбувається розрахунок уточнених коефіцієнтів з урахуванням гетероскедастичності, які для випадку лінійної моделі визначаються за формулами:

$$c_{0,j}' = \frac{\sum_{i=1}^n W_{i,j} y_i \sum_{i=1}^n W_{i,j} t_i^2 - \sum_{i=1}^n W_{i,j} t_i y_i \sum_{i=1}^n W_{i,j} t_i}{\sum_{i=1}^n W_{i,j} \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n W_{i,j} t_i \right)^2};$$

$$c_{1,j}' = \frac{\sum_{i=1}^n W_{i,j} \sum_{i=1}^n W_{i,j} t_i y_i - \sum_{i=1}^n W_{i,j} y_i \sum_{i=1}^n W_{i,j} t_i}{\sum_{i=1}^n W_{i,j} \sum_{i=1}^n W_{i,j} t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n W_{i,j} t_i \right)^2},$$

де j – номер можливого варіанту значення показника гетероскедастичності.

4. Визначення зважених сум квадратів відхилень для кожного варіанта апроксимації. Так, для випадку лінійної моделі використовується формула

$$\sigma(h_j) = \sum_{i=1}^n W_{i,j} y_i^2 - c_{0,j}' \sum_{i=1}^n W_{i,j} y_i - c_{1,j}' \sum_{i=1}^n W_{i,j} t_i y_i.$$

5. Апроксимація отриманої залежності $\sigma(h_j)$ за допомогою звичайного методу найменших квадратів та використання параболи другого ступеня як апроксимуючої функції.

6. Знаходження оцінки показника гетероскедастичності шляхом дослідження на екстремуми функціональної залежності $\sigma(h_j)$.

7. Знаходження оптимального апроксимаційного рівняння у випадку наявності гетероскедастичності. Для цього для знайденої оцінки показника гетероскедастичності \hat{h} розраховуються поправкові коефіцієнти гетероскедастичності відповідно до (36). Знайдені коефіцієнти W_i використовуються для побудови оптимальної регресійної залежності за тими самими співвідношеннями, що і в п. 3 цієї методики.

Особливістю нового методу урахування гетероскедастичності у порівнянні з існуючими є оцінка кількісного вмісту гетероскедастичності у досліджуваних даних та чітко визначений порядок розрахунку поправкові коефіцієнтів гетероскедастичності для побудови оптимальної регресійної моделі.

Наведений метод врахування гетероскедастичності у разі використання двосегментної кусково-лінійної регресії дозволяє оцінити момент виникнення розладнання. У розділі наведені приклади оброблення визначальних параметрів та показників надійності з використанням апарату гетероскедастичності.

Подані приклади оброблення даних щодо визначальних параметрів та показників надійності у випадку погіршення технічного стану НЗА та наявності гетероскедастичності засвідчили ефективність нового методу врахування гетероскедастичності за критерієм мінімуму зваженої суми квадратів залишків. Це дозволило побудувати більш коректні математичні моделі, що можуть бути використані у стратегіях технічного обслуговування за напрацюванням та за станом із системою превентивних порогів та з адаптивним порогом.

Шостий розділ присвячено побудові статистичних моделей надійності для експлуатаційних даних на основі багатосегментних регресій.

У розділі удосконалено метод тестування експлуатаційних даних на лінійність, що на відміну від існуючих є передумовою для обґрунтування можливості використання сегментної регресії для побудови математичних моделей надійності. Крім того, для цього методу було розраховано розширену таблицю критичних значень для можливості прийняття рішення щодо лінійності даних.

Побудова та аналіз моделей для показників надійності передбачає виконання послідовності таких операцій:

1. На основі вибіркового даних щодо напрацювань на відмову будують графік у системі координат, де абсцисою є квантілі нормального розподілу, а ординатою – логарифми ранжованих вибіркового даних у порядку їх зменшення.

2. За допомогою удосконаленого методу тестування даних на лінійність перевіряється можливість використання лінійної регресійної залежності для апроксимації статистичних даних у зазначеній системі координат. У разі лінійності даних, ця регресійна модель приймається як один із альтернативних варіантів моделі, у протилежному випадку лінійна регресійна модель відхиляється.

3. Дані апроксимуються кусково-лінійною двосегментною регресією з точкою перемикання, абсциса якої дорівнює нулю.

4. У разі прийняття рішення щодо лінійності даних, виконується вибір найкращої моделі на основі порівняння лінійної та кусково-лінійної регресійних моделей за критерієм мінімуму стандартного відхилення.

5. Розраховується залишковий ресурс обладнання.

У розділі побудовані моделі показників надійності на основі оброблення статистичних даних щодо напрацювань на відмову вторинного радіолокатора «Корінь-АС» з використанням багатосегментної регресії. Отримані аналітичні співвідношення можуть бути використані для прогнозування залишкового ресурсу цього НЗА. Крім того, побудовані моделі показників надійності та визначального параметра електронної частини вітрогенераторної установки на основі оброблення статистичних даних щодо напрацювань на відмову та тривалостей відновлень, а також виміряних значень сили струму.

Аналіз показав, що під час побудови математичних моделей визначальних параметрів та показників надійності електронного обладнання доцільно використовувати багатосегментні регресії з оптимізацією точок перемикання. Це дозволяє підвищити точність апроксимації експлуатаційних даних, за рахунок чого можуть бути отримані більш якісні оцінки прогнозованих екстремальних параметрів вибірки.

Сьомий розділ присвячено впровадженню та шляхам використання отриманих результатів дисертаційного дослідження.

Шляхи використання пов'язані з розробленням та впровадженням інформаційних центрів збирання та оброблення експлуатаційних даних у системах експлуатації НЗА. Центри охоплюють всі складові елементи предметної галузі в межах держави. Основна мета центрів – оцінювання відповідності складових СЕ вимогам, визначення невідповідностей та формування і реалізація коригувальних та запобіжних дій.

Узагальнена структура Центрів містить оператори оброблення даних, серед яких оператори збирання та накопичення даних, формування структурованих баз даних, оператори попереднього оброблення даних, оператори прийняття рішення щодо ступеня відповідності вимогам, оператори прийняття рішень щодо необхідності виконання коригувальних та запобіжних дій, оператори оцінювання ефективності СЕ, а також коригувальних та запобіжних дій.

Варіант підключення Центрів збирання та оброблення експлуатаційних даних до елементів предметної галузі показано на рис. 14.

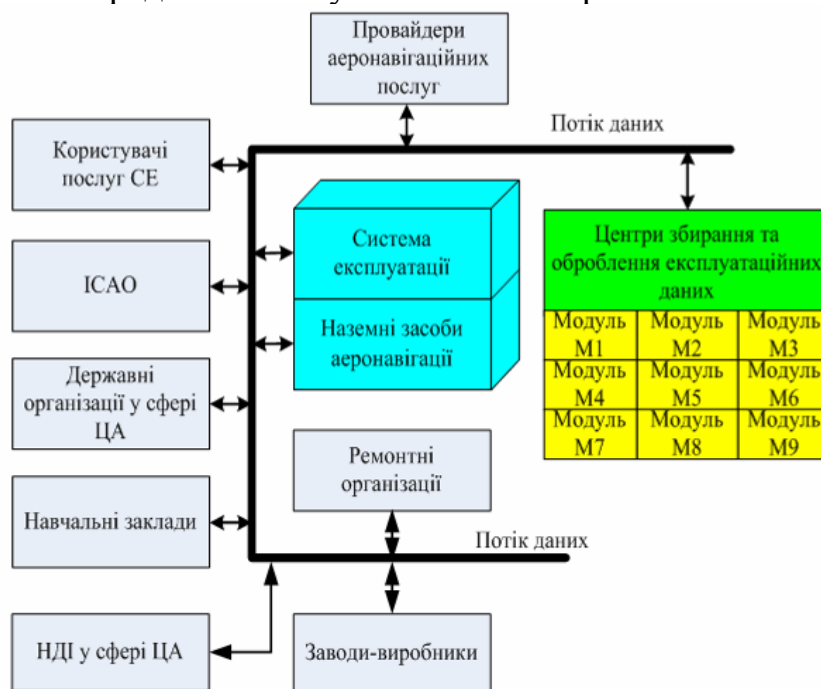


Рис. 14. Варіант підключення Центрів збирання та оброблення експлуатаційних даних

На рис. 14 модулями оброблення даних є: M1 – модуль контролю параметрів потоку вхідних заявок та вимог до них; M2 – модуль контролю задоволеності споживачів; M3 – модуль контролю цілей; M4 – модуль контролю персоналу; M5 – модуль контролю ресурсів; M6 – модуль оцінювання відповідності документації; M7 – модуль оцінювання відповідності процесів; M8 – модуль моніторингу якості функціонування наземних засобів авіації; M9 – модуль моніторингу ефективності.

Для підтвердження ефективності запропонованих алгоритмів оброблення експлуатаційних даних виконане статистичне моделювання функціонування наземних засобів авіації в умовах виникнення розладнання. Оброблення

виконувалося у кожному вікні. Початковими даними для моделювання були кількість засобів, інтенсивність відмов, модель розладнання, експлуатаційні витрати на оброблення, ТО, ремонт, превентивне ТО. Показниками ефективності було обрано питомі експлуатаційні витрати та ймовірність правильного виявлення розладнання. Моделювання обмежувалося рівнем експлуатаційного підрозділу, в якому здійснюється основний процес СЕ – використання НЗА за призначенням. Під час моделювання виконувалося оброблення даних щодо показників надійності та визначальних параметрів НЗА.

Моделювання методом Монте-Карло показало, що використання процедур оброблення експлуатаційних даних дозволило підвищити ефективність СЕ. Так, для випадку використання за призначенням десяти зразків НЗА у разі оброблення показників надійності середній виграш становить 51.1 %, а випадку оброблення визначальних параметрів – 79.4 %.

Результати досліджень упроваджені в Державному підприємстві «Антонов», Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут «Квант», Комунальному підприємстві «Міжнародний аеропорт «Київ» (Жуляни), навчальному та науковому процесах Національного авіаційного університету, що підтверджено відповідними актами впровадження.

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

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему підвищення ефективності функціонування наземних засобів аеронавігації та систем їх експлуатації шляхом розроблення методології оброблення даних у відповідних системах. Основні результати дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Розроблено методологію оброблення статистичних даних у системах експлуатації наземних засобів аеронавігації, яка охоплює методи виявлення погіршення технічного стану НЗА та складових елементів СЕ, методи оцінювання показників надійності після розладнання, методи формування стратегій технічного обслуговування НЗА за станом із превентивними порогоми, які були обґрунтовані відповідними теоремами у рамках використання нового показника ефективності СЕ, що загалом надає можливість підвищувати ефективність функціонування НЗА та СЕ шляхом формування та реалізації своєчасних та правильних запобіжних та коригувальних дій.

2. Сформульовано та доведено теорему щодо доцільності статистичного оброблення даних у системах експлуатації наземних засобів аеронавігації, яка базується на використанні моделі зміни технічного стану обладнання на основі міри інформації за Шенноном. Ця теорема може бути підґрунтям для заснування нового наукового напрямку – всеохоплюючого оброблення в системах експлуатації НЗА.

3. Виконано синтез та аналіз процедури виявлення розладнання у тренді зміни інтенсивності відмов на основі використання критерію Неймана-Пірсона, який на відміну від існуючих враховує випадки стрибкоподібної та лінійної моделей розладнання. Ці процедури дають можливість своєчасно приймати рішення щодо виконання запобіжних та коригувальних дій у разі погіршення технічного стану обладнання.

4. Виконано синтез та аналіз послідовного методу з випадковою тривалістю спостереження для виявлення розладнання у тренді зміни інтенсивності відмов, що на відміну від класичного методу з фіксованим обсягом вибірки має вигравш у середній тривалості прийняття рішення за однакових рівнів імовірності помилки першого роду.

5. Отримано аналітичні співвідношення для розрахунку оптимального значення порогу для превентивного технічного обслуговування у випадку оброблення визначальних параметрів НЗА. Ці співвідношення дозволяють мінімізувати значення питомих експлуатаційних витрат та формувати оптимальні стратегії технічного обслуговування за станом з контролем визначальних параметрів.

6. Розроблено новий метод виявлення гетероскедастичності та її урахування під час побудови математичних моделей показників надійності та визначальних параметрів НЗА. Цей метод дозволяє сформувати кількісну оцінку рівня гетероскедастичності у рамках запропонованого відповідного показника та, на відміну від існуючих, не потребує багатократних вимірювань для кожного фіксованого моменту часу. Суттєва відмінність від нуля показника гетероскедастичності є ознакою виникнення розладнання у тренді визначального параметра або показника надійності.

7. Виконано обґрунтування показника ефективності, що на відміну від існуючих використовує подійно-імовірнісну модель, яка враховує можливі події у СЕ, їх імовірності та витрати, пов'язані з ними. Цей показник було використано для формування двох теорем щодо доцільності статистичного оброблення даних та може бути покладений в основу методологічного базису під час проєктування та модернізації СЕ.

8. Виконано синтез процедури оцінювання показників надійності у випадку погіршення технічного стану НЗА для стрибкоподібної, лінійної та квадратичної моделей змін інтенсивності відмов. Ця процедура базується на використанні методу максимальної правдоподібності та, на відміну від існуючих, полягає в отриманні аналітичного співвідношення для щільності розподілу ймовірностей оцінок, що дозволяє більш адекватно визначати технічний стан НЗА.

9. Удосконалено стратегії технічного обслуговування за станом шляхом використання декількох попереджувальних порогів та адаптивного порогу, яка порівняно з існуючою може більш ефективно запобігати виникненню поступових відмов НЗА. Зазначені стратегії можуть бути використані під час створення СЕ з елементами штучного інтелекту.

10. Синтезовано метод побудови математичних моделей показників надійності та визначальних параметрів, що на відміну від існуючих використовує апарат багатосегментного регресійного аналізу. Цей метод дозволяє отримати більш точні аналітичні співвідношення за рахунок додаткової оптимізації точок з'єднання окремих сегментів.

11. Порівняльний аналіз СЕ із запропонованими методами та процедурами оброблення експлуатаційних даних засвідчив, що використання цих методів та процедур підвищує ефективність функціонування НЗА та СЕ загалом.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані у науково-дослідних організаціях та експлуатаційних підрозділах з радіотехнічного забезпечення польотів під час розроблення та удосконалення систем експлуатації наземних засобів аеронавігації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в закордонних наукових журналах

1. Solomentsev O., Zaliskyi M., Zuiev O. Estimation of quality parameters in the radio flight support operational system. *Aviation*. 2016. Vol. 20. № 3. P. 123–128. (*Scopus*)
2. Zaliskyi M., Petrova Yu., Asanov M., Bekirov E. Statistical Data Processing during Wind Generators Operation. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 33–38. (*Scopus*)
3. Solomentsev O., Zaliskyi M., Herasymenko T., Kozhokhina O., Petrova Yu. Efficiency of operational data processing for radio electronic equipment. *Aviation*. 2019. Vol. 23. № 3. P. 71–77. (*Scopus*)
4. Solomentsev O., Zaliskyi M., Herasymenko T., Petrova Yu. Method for Changepoint Detection with Sample Size Accumulation During Radio Equipment Operation. *The Scientific Journal of Riga Technical University – Electrical, Control and Communication Engineering*. 2020. Vol. 16. № 1. P. 23–29. (*Web of Science*)
5. Solomentsev O., Zaliskyi M., Zuiev O., Yashanov I. Diagnostics programs efficiency analysis in operation system of radioelectronic equipment. *Computer Modelling And New Technologies*. 2015. Volume 19. № 1B. P. 49–56.

Статті у наукових фахових виданнях

6. Соломенцев О. В., Заліський М. Ю., Мусієнко А. О. Вдосконалення структур обробки даних у системах експлуатації засобів аеронавігації. *Проблеми транспорту: збірник наукових праць*. 2012. Вип. 9. С. 146–154.
7. Соломенцев О. В., Заліський М. Ю., Луньов В. В. Послідовний метод оцінювання показника надійності наземних засобів аеронавігації. *Електроніка та системи управління*. 2012. № 3 (33). С. 28–34.
8. Asanov M. M., Zaliskyi M. Yu. Temperature measurement of photovoltaic cells surface. *Електроніка та системи управління*. 2013. № 4 (38). С. 124–127.
9. Кузьмін В. М., Соломенцев О. В., Заліський М. Ю. Процедура статистичної обробки даних щодо напрацювань на відмову в системі експлуатації радіотехнічних засобів. *Проблеми інформатизації та управління*. 2013. № 4 (44). С. 82–85.
10. Соломенцев О. В., Заліський М. Ю., Герасименко Т. С. Аналіз процесу погіршення технічного стану радіотехнічних засобів. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. № 1 (49). С. 96–102.
11. Asanov M., Bekirov E., Solomentsev O., Zaliskyi M. Reducing the influence of the photocell's surface heating on its performance. *Proceedings of the National Aviation University*. 2015. №. 3. P. 55–59.
12. Соломенцев О. В., Мелкумян В. Г., Заліський М. Ю. Системи експлуатації радіоелектронних засобів. *Вісник Інженерної академії України*. 2015. № 3. С. 149–154.
13. Заліський М. Ю. Моніторинг процесів експлуатації засобів радіотехнічного забезпечення польотів. *Наукоємні технології*. 2015. № 3 (27). С. 257–260.

14. Zaliskyi M. Yu. Reliability parameters estimation in case of aviation radio electronic devices technical state deterioration. *Electronics and Control Systems*. 2015. № 3 (45). P. 18–22.
15. Заліський М. Ю. Виявлення погіршення технічного стану авіаційних радіоелектронних засобів. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. № 3 (51). С. 45–50.
16. Кузьмин В. М., Соломенцев О. В., Заліський М. Ю. Методичний підхід для тестування статистичних даних на лінійність. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. № 4 (52). С. 63–67.
17. Кузьмин В. М., Соломенцев О. В., Заліський М. Ю. Использование многосегментной регрессии для оценки долговечности конструктивных элементов систем. *Проблеми інформатизації та управління*. 2016. № 1 (53). С. 42–45.
18. Solomentsev O. V., Herasymenko T. S., Zaliskyi M. Yu., Cheked I. V. Test for Condition Degradation Detection of Radio Electronic Equipment. *Electronics and control systems*. 2016. № 4. P. 11–16.
19. Solomentsev O., Zaliskyi M., Kozhokhina O., Herasymenko T. Data Processing During Condition Based Maintenance of Radio Electronic Equipment. *Electronics and control systems*. 2017. № 4. P. 11–17.
20. Кузьмин В. М., Заліський М. Ю. Статистичний аналіз даних з використанням двосегментної параболічної регресії. *Наукоємні технології*. 2018. № 2 (Том 38). С. 173–177.
21. Соломенцев О. В., Заліський М. Ю., Герасименко Т. С. Аналіз ефективності процедури виявлення розладнання в системах експлуатації наземних засобів аеронавігації. *Наукоємні технології*. 2018. № 3 (Том 39). С. 376–382.
22. Соломенцев О. В., Заліський М. Ю., Герасименко Т. С., Мусієнко А. О. Процедура аналізу нестационарних процесів в системах експлуатації наземних засобів аеронавігації. *Новітні технології*. 2018. № 2 (6). С. 69–78.
23. Kuzmyn V., Zaliskyi M., Kozhokhina O. Identification and analysis of heteroscedasticity at the econometric data approximation. *Новітні технології*. 2018. № 3 (7). С. 6–12.
24. Кузьмин В. М., Заліський М. Ю., Рудий С. В. Статистичний аналіз експлуатаційних даних вітрогенераторної установки. *Вісник Інженерної академії України*. 2018. № 2. С. 254–258.
25. Solomentsev O. V., Zaliskyi M. Yu., Herasymenko T. S. Radio electronic equipment failures model. *Electronics and control systems*. 2018. № 3 (57). P. 18–23.
26. Kuzmyn V. M., Zaliskyi M. Yu., Kozhokhina O. V., Kaminskyi Ye. O. Approximation of time series with multiple switching points. *Новітні технології*. 2019. № 1 (8). С. 6–13.
27. Kuzmin V. M., Zaliskyi M. Yu., Petrova Yu. V., Cheked I. V. Comparative analysis of two methods for taking into account heteroskedasticity during mathematical models building. *Наукоємні технології*. 2019. № 4 (Том 44). С. 449–456.
28. Соломенцев О. В., Заліський М. Ю., Камінський Є. О. Послідовна процедура аналізування розладнання під час обробки експлуатаційних даних. *Новітні технології*. 2019. № 3 (10). С. 43–51.
29. Кузьмин В. М., Заліський М. Ю., Климчук В. П. Побудова математичних моделей з використанням полісегментної регресії. *Наукоємні технології*. 2020. № 1 (Том 45). С. 11–18.

Патенти

30. Соломенцев О. В., Заліський М. Ю. Спосіб послідовного визначення середнього напрацювання на відмову технічних засобів: пат. 94852 Україна, МПК G01N 21/21 (2006.01), №201404039; заявл. 15.04.2014; опубл. 10.12.14, Бюл. № 23.

Матеріали конференцій, які включено до наукометричних баз Scopus

31. Solomentsev O. V., Zaliskyi M. Yu., Zuiev O. V. Radioelectronic equipment availability factor models. *Signal Processing Symposium 2013 (SPS 2013)*: Proceedings, Jachranka Village (Poland), 5 – 7 June 2013. P 1–3. (*Scopus*)

32. Solomentsev O. V., Zaliskyi M. Yu., Zuiev O. V. Questions of radioelectronic equipment diagnostics programs efficiency analysis. *Signal Processing Symposium 2013 (SPS 2013)*: Proceedings, Jachranka Village (Poland), 5 – 7 June 2013. P 1–3. (*Scopus*)

33. Solomentsev O. V., Zaliskyi M. Yu., Zuiev O. V., Asanov M. M. Data processing in exploitation system of unmanned aerial vehicles radioelectronic equipment. *Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments*: Proceedings of IEEE 2nd International Conference, Kyiv, 15 – 17 October 2013, K., 2013. P.77–80. (*Scopus*)

34. Zaliskyi M., Solomentsev O. Method of Sequential Estimation of Statistical Distribution Parameters. *Methods and Systems of Navigation and Motion Control*: Proceedings of IEEE Third International Conference, Kyiv, 14 – 17 October 2014, K., 2014. P. 135–138. (*Scopus*)

35. Kuzmin V. M., Zaliskyi M. Yu., Asanov M. M. Three-Dimensional Mathematical Model in Heteroskedasticity Conditions. *Methods and Systems of Navigation and Motion Control*: Proceedings of IEEE Third International Conference, Kyiv, 14 – 17 October 2014, K., 2014. P. 139–142. (*Scopus*)

36. Solomentsev O., Zaliskyi M., Nemyrovets Yu., Asanov M. Signal processing in case of radio equipment technical state deterioration. *Signal Processing Symposium 2015 (SPS 2015)*: Proceedings, Debe (Poland), 10 – 12 June 2015. P 1–5. (*Scopus*)

37. Solomentsev O. V., Melkumyan V. G., Zaliskyi M. Yu., Asanov M. M. UAV Operation System Designing. *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments*: Proceedings of IEEE Third International Conference, Kyiv, 13 – 15 October 2015, K., 2015. P. 95–98. (*Scopus*)

38. Solomentsev O., Zaliskyi M., Gerasymenko T. Change-point Detection During Radar Operation. *Data Stream Mining & Processing*: Proceedings of IEEE First International Conference, Lviv, 23–27 August 2016, L., 2016. P. 295–298. (*Scopus*)

39. Solomentsev O. V., Herasymenko T. S., Zaliskyi M. Yu., Cheked I. V. Statistical Data Processing Procedures for Ground Navigation Equipment. *Methods and Systems of Navigation and Motion Control*: Proceedings of IEEE Fourth International Conference, Kyiv, 18 – 20 October 2016, K., 2016. P. 182–185. (*Scopus*)

40. Solomentsev O., Zaliskyi M., Kozhokhina O., Herasymenko T. Reliability Parameters Estimation for Radioelectronic Equipment in Case of Change-point. *Signal Processing Symposium 2017 (SPSympto 2017)*: Proceedings, Jachranka Village (Poland), 12 – 14 September 2017. P. 1–4. (*Scopus*)

41. Solomentsev O., Zaliskyi M., Kozhokhina O., Herasymenko T. Efficiency of Data Processing for UAV Operation System. *Actual Problems of UAV Developments*: Proceedings of IEEE Fourth International Conference, Kyiv, 17–19 October 2017, K., 2017. P. 27–31. (*Scopus*)

42. Solomentsev O., Kuzmin V., Zaliskyi M., Zuiev O., Kaminskyi Y. Statistical Data Processing in Radio Engineering Devices Operation System. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunication and Computer Engineering (TCSET): Proceedings of IEEE 14th International Conference, Lviv-Slavske, 20–24 February 2018, L., 2018. P. 1–4. (Scopus)*
43. Solomentsev O., Zaliskyi M. Correlated Failures Analysis in Navigation System. *Methods and Systems of Navigation and Motion Control: Proceedings of IEEE 5th International Conference, Kyiv, 16–18 October 2018, K., 2018. P. 41–44. (Scopus)*
44. Solomentsev O., Zaliskyi M., Herasymenko T., Kozhokhina O., Petrova Yu. Data Processing in Case of Radio Equipment Reliability Parameters Monitoring. *Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO 2018): Proceedings, Riga (Latvia), 15 – 16 November 2018. P. 219–222. (Scopus)*
45. Zalisky M., Odarchenko R., Gnatyuk S., Petrova Yu., Chaplits A. Method of Traffic Monitoring for DDoS Attacks Detection in e-Health Systems and Networks. *Informatics & Data-Driven Medicine (IDDM 2018): Proceedings of 1st International Workshop, Lviv, 28–30 November 2018, L., 2018. P. 193–204. (Scopus)*
46. Kuzmyn V., Zaliskyi M., Kozhokhina O., Shcherbyna O., Odarchenko R. Statistical analysis of wind turbine operational data. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM): Proceedings of 15th International Conference, Polyana-Svalyava (Zakarpattia), 26 February – 2 March 2019. P. 1–4. (Scopus)*
47. Kuzmyn V., Zaliskyi M., Chyrka Iu., Vovk V. New Method of Mode Estimation for Small and Medium Samples. *Advanced Computer Information Technologies: Proceedings of 9th International Conference, Ceske Budejovice (Czech Republic), 5–7 June, 2019. P. 68–71. (Scopus)*
48. Zaliskyi M., Solomentsev O., Kozhokhina O., Herasymenko T. Statistical Data Processing for Condition-based Maintenance. *Signal Processing Symposium 2019 (SPSymo 2019): Proceedings, Krakow (Poland), 17–19 September 2019. P. 1–4. (Scopus)*
49. Solomentsev O., Zaliskyi M., Herasymenko T., Petrova Yu. Data Processing Method for Deterioration Detection During Radio Equipment Operation. *Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW 2019): Proceedings of IEEE Workshop, Riga (Latvia), 1–2 October 2019. P. 1–4. (Scopus)*
50. Solomentsev O., Zaliskyi M. Operation System for Modern Unmanned Aerial Vehicles. *Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks: Proceedings of 1st International Workshop, Kyiv, 29–30 November 2019, K., 2019. P. 1–10. (Scopus)*
51. Yashanov I., Shcherbyna O., Zaliskyi M., Kozhokhina O., Odarchenko R., Tereshchenko L. Diagnostics Program Efficiency Analysis for Antenna System. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunication and Computer Engineering (TCSET): Proceedings of IEEE 15th International Conference, Lviv-Slavske, 25–29 February 2020, L., 2020. P. 1–4. (Scopus)*

Розділи монографії

52. Zaliskyi M., Solomentsev O., Yashanov I. Analysis and optimization of diagnostic procedures for aviation radioelectronic equipment. *Cases on Modern Computer Systems in Aviation: Chapter in the book, IGI Global, Pennsylvania, USA, 2019, P. 249–273.*

53. Solomentsev O., Zaliskyi M., Zuiev O. Intelligence-Based Operation of Aviation Radioelectronic Equipment. *Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries*: Chapter in the book., IGI Global, Pennsylvania, USA, 2020, P. 148–179.

АНОТАЦІЯ

Заліський М. Ю. Методологія оброблення даних у системах експлуатації наземних засобів аеронавігації – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. Національний авіаційний університет, Київ, 2020.

У роботі розроблено методологію оброблення статистичних даних у системах експлуатації наземних засобів аеронавігації, яка охоплює методи виявлення погіршення технічного стану наземних засобів аеронавігації та складових елементів систем їх експлуатації, методи оцінювання показників надійності після розладнання, методи формування стратегій технічного обслуговування наземних засобів аеронавігації за станом із превентивними порогоми, які були обґрунтовані відповідними теоремами у рамках використання запропонованого показника ефективності систем експлуатації. Наведені складові методології надають можливість підвищувати ефективність функціонування наземних засобів аеронавігації та систем їх експлуатації шляхом формування та реалізації своєчасних та правильних запобіжних та коригувальних дій. За допомогою розробленої методології проєктувальники та експлуатанти наземних засобів аеронавігації та систем їх експлуатації можуть розв'язувати задачі мінімізації експлуатаційних витрат за рахунок: прийняття своєчасних та правильних рішень щодо виявлення моменту виникнення погіршення технічного стану в трендах визначальних параметрів та показників надійності як наземних засобів аеронавігації, так і систем їх експлуатації; використання удосконалених стратегій технічного обслуговування на основі системи превентивних порогів та застосування принципів адаптивності як складової штучного інтелекту.

Отримані наукові результати доцільно використовувати під час розроблення та вдосконалення наземних засобів аеронавігації та систем їх експлуатації, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців експлуатаційного спрямування, зокрема в авіації.

Ключові слова: система експлуатації, наземні засоби аеронавігації, показники надійності, статистичне оброблення даних, розладнання, гетероскедастичність, ефективність, регресійний аналіз.

АННОТАЦИЯ

Залиский М. Ю. Методология обработки данных в системах эксплуатации наземных средств аэронавигации – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.20 – Эксплуатация и ремонт средств транспорта. Национальный авиационный университет, Киев, 2020.

В работе разработана методология обработки статистических данных в системах эксплуатации наземных средств аэронавигации, которая охватывает методы обнаружения ухудшения технического состояния наземных средств

аэронавигации и составляющих элементов систем их эксплуатации, методы оценки показателей надежности в стохастических задачах про разладку, методы формирования стратегий технического обслуживания наземных средств аэронавигации по состоянию с превентивными порогами, обоснованные соответствующими теоремами в рамках использования нового показателя эффективности систем эксплуатации, что в целом дает возможность повышать эффективность функционирования наземных средств аэронавигации и систем их эксплуатации путем формирования и реализации своевременных и правильных предупреждающих и корректирующих действий. С помощью разработанной методологии проектировщики и эксплуатанты наземных средств аэронавигации, а также специалисты по разработке и совершенствованию систем эксплуатации могут решать задачи минимизации эксплуатационных расходов за счет: принятия своевременных и правильных решений относительно обнаружения момента возникновения ухудшения технического состояния в трендах определяющих параметров и показателей надежности как наземных средств аэронавигации, так и систем их эксплуатации; использования усовершенствованных стратегий технического обслуживания на основе системы превентивных порогов и применения принципов адаптивности.

Полученные научные результаты целесообразно использовать во время разработки и совершенствования систем эксплуатации наземных средств аэронавигации, а также в учебном процессе во время подготовки специалистов эксплуатационного направления, в том числе в авиации.

Ключевые слова: система эксплуатации, наземные средства аэронавигации, показатели надежности, статистическая обработка данных, ухудшение технического состояния, гетероскедастичность, эффективность, регрессионный анализ.

ABSTRACT

Zaliskyi M. Yu. Methodology of data processing for operation systems of ground air navigation equipment – As a manuscript.

Thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.22.20 – Operation and repair of vehicles. National aviation university, Kyiv, 2020.

Ground air navigation devices, which include ground equipment for radio engineering support of flights, play an important role in the process of flights' safety and regularity providing. The operational efficiency of ground air navigation equipment in the civil aviation is ensured by the system of their operation. The components of the operation system are equipment, regulatory documentation, personnel, means for operation, which include facilities, technological devices, the main and additional technological processes and procedures, etc. The main process in the operation system is intended use of equipment, the additional processes are maintenance, repair, continuation of life service, monitoring, statistical data processing, and others.

A promising direction for improving the operation system may be the utilization of the complex for supporting the efficiency of the operation system using the principles and provisions of ICAO and Eurocontrol regulatory documentation, international quality standards, etc. The tasks of the efficiency support complex include assessing the compliance of operation system parameters with the established requirements through the use of subsystems of collection, processing, decision

making, formation of control actions and their implementation based on information on the condition of structural elements of operation system, including the current condition of ground air navigation equipment. In the general case, this complex should be created on the basis of widespread use of information technology for operational data processing, principles of adaptation, systems approach, elements of artificial intelligence to automate management decision-making procedures in the operation system for ground air navigation equipment.

Information signals on the condition of ground air navigation equipment are related to estimates of mean time between failures, mean time between restores, steady-state availability, availability function, which are generally random.

During the intended use of ground air navigation devices, their technical condition may deteriorate due to failures, incorrect actions of service personnel, delays in making decisions on corrective and preventive actions, etc. Deterioration of the technical condition of the equipment belongs to the class of problems of changepoint analysis. Such tasks can be of two types: changepoint detection and parameters estimation in trends of technical condition change. The tasks of changepoint analysis are important in terms of determining the residual lifetime of ground air navigation equipment, making timely and accurate corrective and preventive action. So the class of problems on the synthesis and analysis of algorithms for processing non-stationary random processes in order to detect changepoint and estimate its parameters is a new and insufficiently studied area of the theory of operation and reliability of ground air navigation equipment.

This thesis concentrates on the methodology of statistical data processing in the operation systems for ground air navigation equipment. Such methodology includes methods for detecting deterioration of technical condition by analyzing the monitoring parameters trends for ground air navigation equipment and components of their operation systems, estimation methods of reliability indicators after changepoint, methods of improving maintenance policies with preventive thresholds, which were substantiated by the relevant theorems in the framework of the use of the new indicator for efficiency of those operation systems. The methodology generally provides an opportunity to improve the efficiency of functioning of ground air navigation equipment and their operation system by creating and implementing timely and correct preventive and corrective actions.

With the help of the developed methodology, designers and engineers of ground air navigation equipment, as well as specialists in the field of development and improvement of operation systems can solve the problem of minimizing operating costs by: making timely and correct decisions to identify deterioration in the monitoring parameters and reliability indicators trends for ground air navigation equipment and systems of their operation; use of advanced maintenance strategies based on a system of preventive thresholds and application of the principles of adaptability as a component of artificial intelligence.

The obtained scientific results should be used during the design and improvement of operation system for ground air navigation equipment, as well as in the educational process.

Key words: operation system, ground air navigation equipment, reliability parameters, statistical data processing, changepoint, heteroskedasticity, efficiency, regression analysis.