

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

ЯШАНОВ ІВАН МИХАЙЛОВИЧ

УДК 629.7.08: 681.518.02 (043.5)

**МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРОЦЕДУР ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НАЗЕМНИХ
ЗАСОБІВ АЕРОНАВІГАЦІЇ**

Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України

- Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Соломенцев Олександр Васильович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри телекомунікаційних
та радіоелектронних систем
- Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Сагін Сергій Вікторович,
Національний університет
«Одеська морська академія»,
завідувач кафедри суднових енергетичних установок;
- доктор технічних наук, доцент
Горобченко Олександр Миколайович,
Державний університет інфраструктури та технологій,
професор кафедри тягового рухомого складу
залізниць.

Захист відбудеться « 01 » квітня 2021 р. о 14⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, ауд. 1.001.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1.

Автореферат розіслано « 26 » лютого 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Н. С. Кузьменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Базу для інформаційно-технічного забезпечення аеронавігаційної системи складає комплекс наземних, супутникових та бортових засобів, від якості і надійності функціонування яких значною мірою залежить безпека і регулярність польотів повітряних суден (ПС) цивільної авіації (ЦА). До цих засобів належать наземні радіонавігаційні та радіолокаційні системи, засоби радіозв'язку, які формують та надають споживачам інформацію щодо параметрів польоту впродовж усього маршруту від зльоту до посадки повітряного судна.

Для підтримання ефективності функціонування наземних засобів аеронавігації (НЗА) використовуються системи експлуатації (СЕ).

До складу СЕ відносять: наземні засоби аеронавігації, нормативну документацію, обслуговуючий персонал, процеси, контрольно-вимірювальну апаратуру, ресурсне забезпечення, допоміжне приладдя тощо. До процесів експлуатації належать: використання за призначенням, технічне обслуговування, ремонт, контроль технічного стану, наземні та льотні перевірки, продовження ресурсу тощо. У зв'язку з постійним удосконаленням НЗА щодо надійності технічне обслуговування характеризується меншою трудомісткістю. Це також стосується процесів відновлення працездатності після відмов та пошкоджень обладнання.

Аналіз показує, що до складу процесу поточного ремонту відносять такі технологічні операції, як: діагностування, відновлення працездатності, контроль технічного стану після відновлення працездатності, можливе налагодження та регулювання за необхідності.

Аналіз науково-технічних результатів у сфері експлуатації показує, що завдання діагностування розглядаються зокрема з погляду визначення показників ефективності у вигляді функціональних залежностей від параметрів процесу діагностування.

Згідно з нормативною та науково-технічною літературою показниками ефективності при цьому є: середня тривалість діагностування, середні витрати матеріальних ресурсів під час діагностування, середня трудомісткість робіт, ймовірність правильного діагностування тощо. Ці показники залежать від структури об'єкта діагностування, показників контрольно-вимірювальних операцій (тривалості, вартості, трудомісткості), ймовірностей відмов складових елементів об'єкту тощо. Тому вважаємо, що задачу визначення кількісних значень показників ефективності можна назвати прямою.

Аналіз показує, що в СЕ витрати ресурсів на виконання технологічних операцій діагностування та окремі показники ефективності є випадковими величинами. Під час розв'язання задач проєктування та модернізації систем експлуатації зазвичай використовують математичне сподівання показників ефективності процедур діагностування та відновлення працездатності. Але такий підхід не є достатнім з точки зору найбільш повної характеристики випадкових величин. Тобто така суперечність між об'єктивним характером показників ефективності в СЕ і їх описом та застосуванням лише математичних сподівань

під час розв'язання задач проєктування та модернізації СЕ може призвести до додаткових витрат матеріальних ресурсів, зниження ефективності СЕ та можливого негативного впливу на безпеку та регулярність польотів.

На вирішення такої суперечності та підвищення ефективності функціонування системи експлуатації наземних засобів аеронавігації спрямована ця дисертаційна робота. Отримані в логічній послідовності наукові результати дали змогу:

– по-перше, обґрунтувати доцільність застосування щільностей розподілу ймовірностей (ЩРІ) витрат ресурсів під час діагностування НЗА, що є першим методом, отриманим у дисертаційному дослідженні, який відрізняється від існуючих застосуванням функціональних залежностей додаткових витрат ресурсів, аналізом додаткових вартісних витрат на основі аналітичного та статистичного моделювання з використанням нормальної, вейбулівської та експоненціальної ЩРІ витрат ресурсів;

– по-друге, провести удосконалення методу знаходження ЩРІ характеристик часових витрат процедур діагностування, що враховують ЩРІ параметрів контрольно-вимірювальних процедур, а також пояснено, як знаходити ЩРІ витрат вартості та трудомісткості з використанням матричного апарату представлення функціональних залежностей;

– по-третє, уперше розробити метод визначення оптимальних значень умовних імовірностей помилок першого та другого роду за умов використання аналітичних співвідношень, що були отримані в дисертаційній роботі під час розроблення методу визначення статистичних характеристик часових, вартісних та трудомістких робіт у разі діагностування, тобто базується на використанні відповідних ЩРІ показників ефективності процедур діагностування.

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 спрямована 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 (державної реєстрації номер 0106U002741).

2. Комп'ютеризована система моніторингу якості функціонування вищого навчального закладу. Шифр 601 – ДБ 09 (державної реєстрації номер 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 (державної реєстрації номер 0118U100176).

Роль автора в зазначених науково-дослідних роботах, у яких дисертант був безпосереднім виконавцем, полягає у розв'язанні задач аналізу процесів діагностування та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності процедур діагностування технічного стану та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації шляхом визначення статистичних характеристик процедур діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації.

Для досягнення наведеної мети в рамках цієї роботи розглянуті такі задачі:

- аналіз системи експлуатації наземних радіотехнічних засобів під час аеронавігаційного обслуговування (обладнання, документи, процеси);
- аналіз нормативного забезпечення щодо процесів експлуатації, зокрема діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації;
- розроблення методу для обґрунтування доцільності використання щільності розподілу ймовірності показників ефективності СЕ;
- розроблення методу розв'язання прямої задачі щодо визначення статистичних характеристик процедур діагностування;
- розроблення методу розв'язання оберненої задачі щодо пошуку оптимальних значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду діагностування та відновлення працездатності;
- розроблення методики розв'язання прямої задачі щодо визначення статистичних характеристик процедур діагностування;
- розроблення методики розв'язання оберненої задачі щодо пошуку оптимальних значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду під час діагностування та відновлення працездатності НЗА.

Теоретичні дослідження у сфері статистичної обробки даних, теорії та практики експлуатації технічних комплексів проводилися у роботах багатьох вітчизняних і закордонних учених, насамперед: М. М. Фішмана, І. А. Ібрагімова, Є. Ю. Барзіловіча, В. А. Каштанова, Б. Р. Левіна, Ю. К. Беляєва, С. О. Дмитрієва, В. П. Харченка, В. С. Дем'янчука, Г. Ф. Конаховича, І. О. Мачаліна, В. В. Коніна, В. О. Ігнатова, В. С. Новікова, О. Л. Петрашевського, В. Г. Мелкумяна, Ю. Я. Бобала, Р. Барлоу, Ф. Прошана, Б. П. Креденцера, В. В. Уланського та інших. Аналіз наукових публікацій засвідчив, що зазвичай під час аналізу систем експлуатації використовують значення показників ефективності, що є їх математичним сподіванням. При цьому, з іншого боку, показники ефективності є випадковими значеннями, проте їх

числові значення розглядаються в рамках математичних сподівань, хоча найбільш повна їх статистична характеристика – це щільності розподілу ймовірності. Отже, маємо суперечність, де, з одного боку, в розрахунках використовують математичні сподівання показників ефективності СЕ НЗА, а з іншого ці показники в найбільш повному вигляді характеризуються ЩРІ. З урахуванням цього тема дисертаційної роботи, що призначена розв'язанню методів визначення статистичних характеристик процедур діагностування, є актуальним науково-технічним завданням.

Об'єкт дослідження – процес експлуатації наземних засобів аеронавігації.

Предмет дослідження – методи визначення статистичних характеристик процедури діагностування та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії функціональних перетворень випадкових величин, теорії надійності, теорії експлуатації та ремонту технічних систем, методів математичного моделювання, теорії оптимізації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

1. Удосконалено метод визначення рівня експлуатаційних витрат під час діагностування та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації, який на відміну від існуючого базується на використанні щільностей розподілу ймовірностей витрат експлуатаційних ресурсів, запропонованої оптимізаційної функції, використанні функціональної залежності додаткових витрат у випадках, коли запланований обсяг витрат на ремонт є недостатнім. Аналіз ефективності витрат ресурсів під час діагностування та відновлення працездатності НЗА проводився з використанням аналітичного підходу та статистичного моделювання на основі методу Монте-Карло для гаусівської, вейбулівської та експоненціальної ЩРІ витрат ресурсів, при цьому для параметрів, що розглядалися, під час аналізу економія ресурсів складала від 15 до 31 %. Цей метод дозволив обґрунтувати доцільність використання статистичних характеристик під час діагностування та відновлення працездатності НЗА.

2. Удосконалено метод визначення ЩРІ часових витрат на діагностування та відновлення працездатності НЗА, що на відміну від існуючого методу заснований: на використанні матричного апарату представлення аналітичних співвідношень; на використанні ЩРІ часових витрат окремих контрольних-вимірювальних операцій; на застосуванні аналітичних співвідношень, що дають можливість проводити оцінювання ЩРІ вартісних та трудомістких витрат на основі часових витрат на діагностування та відновлення працездатності. Розроблений метод є підґрунтям для розв'язання задач проектування та модернізації систем експлуатації в частині діагностування та відновлення працездатності НЗА, а також в розв'язання оберненої задачі пошуку оптимальних значень умовних імовірностей помилок першого та другого роду для показника ефективності у вигляді математичного сподівання тривалості діагностування.

3. У роботі вперше розроблено метод визначення оптимальних значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду за умов використання аналітичних співвідношень, що були отримані під час розроблення методу визначення статистичних характеристик часових, вартісних та трудомістких робіт діагностування НЗА, тобто базується на використанні відповідних ЩРІ показників ефективності процедур діагностування. Оптимізаційна задача розв'язання на основі диференціального числення та застосування матриці гесіана для перевірки можливості отримання оптимізаційного розв'язку. Для певних значень параметрів досліджень за рахунок розв'язання задачі оптимізації значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду зменшення витрат на діагностування становить 15 %.

Вищенаведені наукові результати дають можливість розв'язати сформульовану науково-технічну задачу щодо розроблення методів визначення статистичних характеристик процедур діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації з метою підвищення ефективності систем експлуатації наземних засобів аеронавігації.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати можуть бути використані в науково-дослідних установах під час проєктування, створення та модернізації систем експлуатації наземних засобів аеронавігації, в експлуатаційних підрозділах цивільної авіації, а також у навчальному процесі під час викладання дисциплін «Системи логістичного забезпечення життєвого циклу авіаційних радіоелектронних систем», «Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронної апаратури».

Результати досліджень упроваджені в Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут «Квант» та навчальному процесі Національного авіаційного університету, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи отримано здобувачем самостійно й опубліковано в 22 наукових працях. Роботи [3; 4; 16] виконані самостійно. Деякі результати отримані у співавторстві з науковим керівником та іншими науковцями. Із них здобувачеві належать: у роботі [1] – розроблено метод визначення статистичних характеристик параметрів процедури діагностування; у роботі [2] – проаналізовано склад засобів радіотехнічного забезпечення польотів; у роботі [5] – проаналізовано можливості використання експертних процедур оцінювання в системах експлуатації; [6] – визначено структуру систем менеджменту якості підприємств цивільної авіації; у роботі [7] – розв'язано задачу оцінювання відповідності процесів для підсистеми підтримки ефективності СЕ; у роботі [8] – виконано моделювання оцінок показника ефективності систем експлуатації; у роботі [9] – проведено моделювання процесів експлуатації в разі наявності підсистеми підтримки ефективності СЕ; у роботі [10] – розглянуто процедуру розв'язання оберненої задачі діагностування; у роботі; [11] – наведено підхід щодо урахування помилок першого та другого роду під час розв'язання оберненої задачі діагностування; у роботі [12] – розв'язано задачу діагностування компонентів безпілотного літального апарату; в роботі

[13] – розв’язано задачу діагностування антенної системи; в роботі [14; 15] – наведено підхід щодо розв’язання прямої та оберненої задач діагностування; [17] – проаналізовано склад сучасних засобів аеронавігації та спостереження в цивільній авіації; у роботі [18] – проведено обґрунтування необхідності моніторингу процесів у системі експлуатації; у роботі [20] – виконано розрахунок надійності заданого радіоелектронного обладнання; у роботі [21; 22] – наведено підхід щодо обґрунтування структури системи експлуатації технічних систем.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати, отримані автором, доповідались на VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2007», IX Міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2009», на VIII Міжнародній науково-технічній конференції студентів та молодих учених «Політ-2008», X Міжнародній науково-технічній конференції студентів та молодих учених «Політ-2010. Сучасні проблеми науки», на наукових семінарах факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету, першому міжнародному Workshop Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks, П’ятнадцятій міжнародній конференції Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunication and Computer Engineering (TCSET).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 22 друкованих роботах: із них 10 у фахових наукових виданнях, 2 розділ монографії, опублікований у США, та 7 у матеріалах наукових конференцій. При цьому 2 наукові праці входять до науково-метричної бази Scopus, 1 робота у закордонному періодичному виданні.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційну роботу викладено на 165 сторінках друкованого тексту, складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 1 додатка. Обсяг основного тексту дисертації становить 150 сторінок друкованого тексту. Роботу ілюстровано 9 таблицями, 34 рисунками. Список використаних джерел містить 143 найменування, із них 123 кирилицею та 42 латиницею.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У **першому розділі** розглянуто сукупність провайдерів аеронавігаційних послуг, у тому числі особливості основного провайдера Державного підприємства обслуговування повітряного руху України «Украерорух». Для аеронавігаційного забезпечення польотів використовують наземні засоби аеронавігації, а саме: засоби радіолокації, засоби радіонавігації та засоби електровз’язку тощо. Надійність функціонування НЗА значною мірою сприяє безпеці та регулярності польотів повітряних суден ЦА. На важливості

експлуатаційних завдань наголошується у Національній транспортній стратегії України на період до 2030 р., схваленій розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р. Відповідно до цієї стратегії актуальним питанням є удосконалення процесів експлуатації засобів транспорту, зокрема, аналіз та використання статистичних даних з метою удосконалення системи науково-методичної підтримки процесів експлуатації. Такі задачі є безумовно актуальними під час проектування та модернізації систем експлуатації НЗА.

Аналіз публікацій у сфері експлуатації показує, що до складу системи експлуатації НЗА входять: об'єкти експлуатації, нормативні документи, персонал, засоби експлуатації, процеси, ресурси тощо. У дисертаційній роботі вважається, що НЗА є головною складовою СЕ. Виходячи з цього, можна стверджувати, що основні процеси експлуатації пов'язані з НЗА. Тому головним процесом є процес використанням обладнання за призначенням. До забезпечувальних процесів, які підтримують реалізацію основного процесу, можна віднести такі: технічне обслуговування, ремонт, продовження ресурсу, наземні та льотні перевірки, охорону праці та навколишнього середовища, пожежну безпеку тощо.

Загалом у розділі основну увагу зосереджено на аналізуванні процесів поточного ремонту НЗА, які включають підпроцеси: діагностування, відновлення працездатності, контролю технічного стану після відновлювальних робіт, налагоджування за необхідності. Під час проектування та модернізації СЕ, зокрема процесів ремонту, використовують відповідні показники ефективності, що регламентовані нормативною документацією. Ці показники у зазвичай є випадковими величинами. У нормативній документації показники ефективності процесів ремонту НЗА розглядаються у вигляді оцінок математичних сподівань. Такий підхід не дозволяє повною мірою описати випадкові величини. При цьому відомо, що найбільш розгорнутою характеристикою випадкової величини є щільність розподілу ймовірності.

У розділі сформульовано суперечність між об'єктивним характером показників СЕ і їх описом під час розв'язання задач проектування та модернізації СЕ, що може призвести до додаткових витрат матеріальних ресурсів, зниження ефективності СЕ та можливого негативного впливу на безпеку та регулярність польотів.

У науково-технічній літературі вирішенню цієї суперечності приділяється недостатньо уваги. Тому з урахуванням цього були сформовані задачі дисертаційного дослідження, спрямовані на підвищення ефективності СЕ НЗА, зокрема процедур діагностування. Для наведених задач виконано математичну постановку у вигляді узагальнених функціоналів.

Другий розділ присвячено обґрунтуванню доцільності використання статистичних характеристик процедури діагностування та відновлення працездатності.

Аналіз показує, що під час реалізації процесів діагностування та відновлення працездатності використовують переважно часові характеристики, однак на

практиці доцільно застосовувати ще й ймовірність правильного діагностування, витрати та трудомісткість.

У розділі побудовані моделі оцінювання відповідності елементів у системі експлуатації НЗА під час аеронавігаційного обслуговування, що може використовуватися у процесі науково-методичного супроводження проектування та вдосконалення СЕ НЗА. Розглядаючи моделі елементів СЕ, використовувався процесний підхід, тому результати можуть бути використані в системах обслуговуючого типу під час розв'язання задач проектування та модернізації СЕ НЗА. З погляду системних позицій розглядалися моделі трьох складових елементів СЕ та чотири стратегії оцінювання їх відповідності встановленим вимогам. Отримані аналітичні співвідношення дали змогу виконати порівняльний аналіз запропонованих стратегій та обрати найкращі з них залежно від параметрів початкових сукупностей.

Для удосконалення науково-методичного супроводження процесів експлуатації, зокрема діагностування, може бути використано імовірісно-подієву модель. Ця модель відображає реальні ситуації, що можуть виникати в експлуатаційних підприємствах у процесі діагностування та відновлення працездатності НЗА з точки зору витрат основних та можливих додаткових ресурсів. Елементами цієї моделі будуть: можливі події, їхні ймовірності, а також експлуатаційні витрати, пов'язані з ними.

Початковими даними для складання ймовірісно-подієвої таблиці вважалися такі дані:

1. Щільність розподілу ймовірностей тривалості діагностування $f(t_d)$.
2. Щільність розподілу ймовірностей експлуатаційних витрат $f(C_d)$.
3. Наявні матеріальні ресурси авіаційного підприємства-експлуатанта C .

Елементи моделі наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Елементи ймовірісно-подієвої моделі

| Можлива подія | Імовірність події | Додаткові витрати | Модель витрат |
|---|-------------------|--------------------------------------|---|
| Витрати на діагностування та відновлення працездатності не перевищують заплановані витрати C | p | – | – |
| Витрати на діагностування перевищують заплановані витрати, тоді використовуються додаткові $C_{\text{дод}}$ | q | $m_1(C_{\text{дод}}) = \varphi(t_d)$ | Лінійна модель: $C_{\text{дод}} = a(t_d - b)h(t_d - b)$. Квадратична модель: $C_{\text{дод}} = a(t_d - b)^2 h(t_d - b)$ |

У таблиці зроблені такі позначення: a та b – параметри моделі витрат, $h(t)$ – функція Хевісайда. Витрати на діагностування визначалися за формулою:

$$m_1(C_\Sigma) = pm_1(C) + qm_1(C_{\text{дод}}).$$

Імовірності подій визначаємо відповідно до формул:

$$p = \int_0^{C_\Sigma} f(C) dC, \quad q = \int_{C_\Sigma}^{\infty} f(C) dC, \quad p + q = 1.$$

Щільність розподілу ймовірностей сумарних витрат на діагностування було визначено відповідно до такої методики. Обернена функція визначається у такому вигляді:

$$C = \frac{C_\Sigma - qC_{\text{дод}}}{p}.$$

Якобіан перетворення дорівнює:

$$J = \frac{\partial C}{\partial C_\Sigma} = \frac{1}{p}.$$

При цьому

$$f(C_\Sigma) dC_\Sigma = f(C, C_{\text{дод}}) dC dC_{\text{дод}}.$$

Припускаючи незалежність витрат на діагностування та додаткових витрат підприємства-експлуатанта, двовимірну щільність розподілу ймовірностей подано у вигляді добутку одновимірних:

$$f(C, C_{\text{дод}}) = f(C) f(C_{\text{дод}}).$$

Звідси отримано:

$$f(C_\Sigma) = \int_0^{\infty} f\left(\frac{C_\Sigma - qC_{\text{дод}}}{p}\right) \frac{1}{p} f(C_{\text{дод}}) dC_{\text{дод}}.$$

Аналогічним чином можуть бути отримані співвідношення для визначення ЩРІ показників трудомісткості.

Далі в роботі для підтвердження використання більш повної статистичної характеристики затрат ресурсів розглянуто два варіанти виконання ремонтних робіт.

Варіант А. Система експлуатації використовує витрати ресурсів на ремонт у випадку проектного рішення із застосуванням математичного сподівання. У розділі розглянуто числовий приклад, коли витрати знаходяться в діапазоні від 60 до 140 у.о. залежно від того, скільки відмов сталося на інтервалі часу $T_{\text{спост}}$ (математичне сподівання вартості ремонту $C_{\text{рез.пр}}$ відповідає проектному рішенню).

Варіант Б. Система експлуатації має обмежений обсяг витратного фонду, початковий рівень якого становить $C_{\text{резерв}}$. Якщо поточні витрати більші ніж

$C_{\text{резерв}}$, то СЕ залучає кредитні кошти і нестачу ресурсів витрачає з відсотками. При розрахунках розглядалися варіанти відсоткових ставок на рівні: 2 %, 5 %, 7 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 – 100 % від додаткових витрат. Аналіз показує, що можна розрахувати оптимальне значення $C_{\text{резерв}}$ для визначеної відсоткової ставки. Водночас під час розрахунків вважалося, що проектне рішення було обрано за рівнем середніх витрат на ремонт ($m_1(C_\Sigma)$).

Для аналітичного розв'язання задачі обґрунтування оптимального рівня витрат ресурсів на ремонт розглянуто дві змінні X_1 та X_2 . Вважалося, що змінна X_1 дозволяє оцінити математичне сподівання витрат ресурсів на поточний ремонт за умов, що планується резервування коштів за традиційною методикою (Варіант А). Змінна X_2 призначена для розв'язання задачі мінімізації витрат ресурсів на ремонт шляхом визначення параметра $C_{\text{рез.пр}}$ (Варіант Б).

Формули для математичних сподівань параметрів X_1 та X_2 мають вигляд:

$$X_1 = m_1(C_\Sigma / \text{Вар.А}; C_{\text{рез.пр}}; T_{\text{спост}}; K; \bar{\Theta}) = C_{\text{рез.пр}} \int_0^{C_{\text{рез.пр}}} f(C_\Sigma) dC_\Sigma + \int_{C_{\text{рез.пр}}}^{\infty} [C_{\text{рез.пр}} + (C_\Sigma - C_{\text{рез.пр}})K] f(C_\Sigma) dC_\Sigma;$$

$$X_2 = m_1(C_\Sigma / \text{Вар.Б}; C_{\text{рез.змін}}; T_{\text{спост}}; K; \bar{\Theta}) = C_{\text{рез.змін}} \int_0^{C_{\text{рез.змін}}} f(C_\Sigma) dC_\Sigma + \int_{C_{\text{рез.змін}}}^{\infty} [C_{\text{рез.змін}} + (C_\Sigma - C_{\text{рез.змін}})K] f(C_\Sigma) dC_\Sigma.$$

При відомих апріорних даних щодо ЩРІ $f(C_\Sigma / \bar{\Theta}; T_{\text{спост}})$ та рівня відсоткової ставки M можна знайти змінну Δ

$$\Delta(C_{\text{рез.змін}}, T_{\text{спост}}, K, \bar{\Theta}) = X_1 - X_2.$$

Підбираючи параметр $C_{\text{рез.змін}}$, вирішувалася задача знаходження максимуму величини Δ .

У наведених виразах для X_1 та X_2 відсоткова ставка M є сталою величиною. Для випадку нормальної щільності розподілу ймовірностей витрат з параметрами: математичне сподівання дорівнює 100 у.о., середньоквадратичне відхилення дорівнює 6 у.о., результати розрахунків у вигляді номограм наведені на рис. 1 – 2.

Як видно з номограм залежності, виграш присутній у разі невеликих відсоткових ставок до 30 % лише у випадку, коли проектне значення витрат менше математичного сподівання.

У розділі також наведені номограми залежності Δ від множника збільшення ресурсів та Δ від мінімізованого значення допустимих витрат для випадку релеєвської щільності розподілу ймовірностей витрат та для експоненціальної щільності розподілу витрат.

Для релеєвської ЩРІ виграш присутній лише при відсоткових ставках до 60 % лише у випадку, коли проєктне значення витрат менше математичного сподівання.

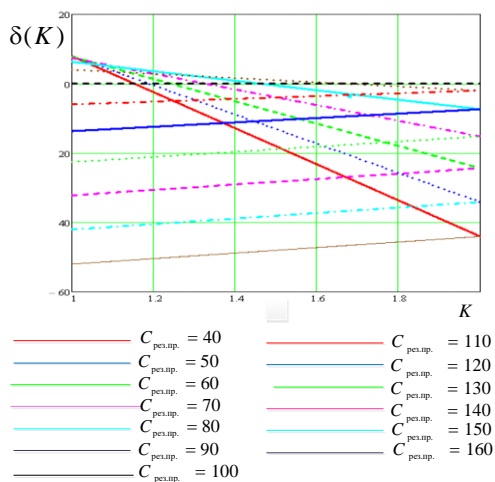


Рис. 1. Номограми залежності від множника збільшення ресурсів

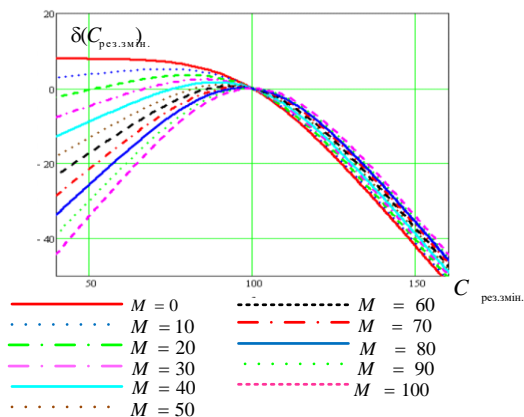


Рис. 2. Номограми залежності від значення резервних змінних витрат

Для експоненціальної ЩРІ виграш присутній при довільних відсоткових ставках у випадку, коли проєктне значення витрат менше математичного сподівання.

Отриманий виграш може становити: для нормальної моделі витрат – 8 %, для релеєвської моделі витрат – 19 %, для експоненціальної моделі витрат – 27 %. Цей результат показує доцільність застосування методу визначення та використання статистичних характеристик показників процесів експлуатації.

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено розробленню двох методів: методу розв'язання прямої задачі під час визначення статистичних характеристик процесу діагностування та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації та методу розв'язання оберненої задачі під час оптимізації рівнів умовних ймовірностей помилок першого та другого роду, що наявні у процесі діагностування та відновлення працездатності НЗА.

У розділі було розглянуто приклад об'єкта діагностування (ОД), що включає чотири елементи (E_1, E_2, E_3, E_4), з'єднані послідовно. Цей приклад відповідає виробу «Баклан-20». Перший елемент – це вхідні ланцюги, другий – гетеродин та змішувач, третій – підсилювач проміжної частоти, четвертий – детектор та підсилювач низької частоти. Загальна кількість контрольованих параметрів дорівнює чотирьом: X_1, X_2, X_3, X_4 . Під час розрахунків було зроблено припущення, що відмови є незалежними, а в об'єкті виникає не більше однієї відмови.

Показниками ефективності процесу діагностування можуть бути: ймовірність правильного діагностування; тривалість, вартість та трудомісткість діагностування. Ці показники розглядаються з точки зору визначення їх статистичних характеристик у вигляді щільностей розподілу ймовірностей.

У розділі наведено числовий приклад для обґрунтування можливості визначення ЩРІ правильного діагностування. При цьому для виробу, що

розглядається, побудовані програми діагностування на основі інженерного методу. Приклад програми діагностування (ПД) у випадку відмови третього елемента, а подано на рис. 3.

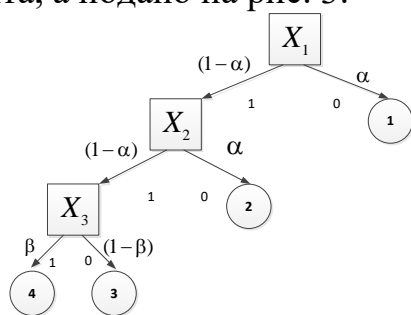


Рис. 3. Приклад ПД для відмови третього елемента

Для розрахунку ймовірності правильного діагностування необхідно побудувати три інших графа (для випадку відмов інших елементів ОД). Отже за допомогою графів можуть бути розраховані ймовірності правильного діагностування у вигляді добутку умовних ймовірностей на шляху від початку діагностування до заданого номера відмови.

Результати розрахунків можуть бути подані у ряді ймовірностей, який для заданого прикладу наведений у табл. 2. Як видно з табл. 2, для ймовірності правильного діагностування маємо дискретний розподіл, що підтверджує висунуту гіпотезу про статистичний характер показників ефективності процедури діагностування.

Таблиця 2

Дискретний розподіл ймовірностей правильного діагностування

| | | | | |
|--|-------------|---------------------------|-----------------------------|------------------|
| Ймовірність правильного діагностування | $1 - \beta$ | $(1 - \beta)(1 - \alpha)$ | $(1 - \beta)(1 - \alpha)^2$ | $(1 - \alpha)^3$ |
| Ймовірність відмови | Q_1 | Q_2 | Q_3 | Q_4 |

Для інших показників ефективності (тривалість, вартість та трудомісткість) пропонується використовувати так званий матричний метод розрахунків. Він пристосований для застосування в програмних середовищах MatLab та MathCAD, а також з його допомогою можна проводити необхідні розрахунки статистичних характеристик процесу діагностування, виконувати моделювання процедур діагностування для перевірки отриманих аналітичних співвідношень тощо.

Початковими даними для розв'язання прямої задачі діагностування є: ЩРІ тривалості проведення контрольно-вимірювальних операцій об'єкта діагностування, тривалості заміни елементів, тривалості контролю працездатності всього ОД. Також відомими вважаються умовні ймовірності помилок першого та другого роду контрольно-вимірювальної апаратури.

Загалом розв'язання прямої задачі діагностування та відновлення працездатності може бути формалізовано шляхом виконання таких операцій:

1. Визначення ЩРІ тривалостей проведення набору технологічних операцій (НТО) для випадку можливих відмов кожного з елементів ОД. Для цього використовується метод функціональних перетворень випадкових величин (початково заданих ЩРІ параметрів процесів діагностування та відновлення

працездатності). Отримані ЩРІ записуються у вигляді квадратної матриці, приклад якої для розглядуваного виробу, що має вигляд:

$$\mathbf{F}_1 = \begin{pmatrix} f_1(t/\text{відм.ел.1})h(t) & f_2(t-3\Delta\tau/\text{відм.ел.1})h(t-3\Delta\tau) & f_3(t-2\Delta\tau/\text{відм.ел.1})h(t-2\Delta\tau) & f_4(t-\Delta\tau/\text{відм.ел.1})h(t-\Delta\tau) \\ f_1(t-\Delta\tau/\text{відм.ел.2})h(t-\Delta\tau) & f_2(t/\text{відм.ел.2})h(t) & f_3(t-3\Delta\tau/\text{відм.ел.2})h(t-3\Delta\tau) & f_4(t-2\Delta\tau/\text{відм.ел.2})h(t-2\Delta\tau) \\ f_1(t-2\Delta\tau/\text{відм.ел.3})h(t-2\Delta\tau) & f_2(t-\Delta\tau/\text{відм.ел.3})h(t-\Delta\tau) & f_3(t/\text{відм.ел.3})h(t) & f_4(t-3\Delta\tau/\text{відм.ел.3})h(t-3\Delta\tau) \\ f_1(t-3\Delta\tau/\text{відм.ел.4})h(t-3\Delta\tau) & f_2(t-2\Delta\tau/\text{відм.ел.4})h(t-2\Delta\tau) & f_3(t-\Delta\tau/\text{відм.ел.4})h(t-\Delta\tau) & f_4(t/\text{відм.ел.4})h(t) \end{pmatrix}.$$

2. Визначення умовних імовірностей $p_{i,j}$ проведення i -го НТО за умови відмови j -го елемента. У роботі зроблено припущення, що умовні ймовірності помилок першого ($\alpha_i=\alpha$) та другого ($\beta_i=\beta$) роду всіх елементів рівні між собою. Загалом умовні ймовірності утворюють матрицю ймовірностей виконання НТО. Наведемо приклад такої матриці для досліджуваного виробу:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & P_{1,3} & P_{1,4} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & P_{2,3} & P_{2,4} \\ P_{3,1} & P_{3,2} & P_{3,3} & P_{3,4} \\ P_{4,1} & P_{4,2} & P_{4,3} & P_{4,4} \end{pmatrix}.$$

3. Розрахунок умовних ЩРІ тривалості проведення діагностування у випадку відмови j -го елемента системи визначають за формулою:

$$\mathbf{F}_2^j = \mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{P}^{(j)}, \quad (1)$$

де $\mathbf{P}^{(j)}$ – j -ий стовбець матриці \mathbf{P} .

4. Знаходження безумовної ЩРІ тривалості діагностування за формулою

$$f(t_d) = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{F}_2, \quad (2)$$

де \mathbf{Q} – вектор-стовбець імовірностей відмов елементів системи:

$$\mathbf{Q} = (Q_1 \quad Q_2 \quad Q_3 \quad Q_4)^T.$$

5. Знаходження числових характеристик ефективності процедур діагностування (математичне сподівання та дисперсія) за формулами:

$$m_1(t_d) = \int_0^{\infty} (\mathbf{Q}(\mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{P}^{(j)})) dt; \quad (3)$$

$$\mu_2(t_d) = \int_0^{\infty} t^2 (\mathbf{Q}(\mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{P}^{(j)})) dt - m_1^2(t_d). \quad (4)$$

6. Знаходження математичного сподівання ймовірності правильного діагностування:

$$m_1(D) = (\mathbf{P} \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{Z})^T \cdot \mathbf{Q}, \quad (5)$$

де \mathbf{E} – одинична квадратична функція; \mathbf{Z} – вектор-стовбець, усі елементи якого дорівнюють 1; \times – поелементне помноження матриці. У загальному випадку ймовірність правильного діагностування є функцією $m_1(D) = \varphi(\alpha, \beta, \mathbf{Q})$.

7. Знаходження дисперсії ймовірності правильного діагностування:

$$\mu_2(D) = ((\mathbf{P} \times \mathbf{E} \cdot D)^T \times (\mathbf{P} \times \mathbf{E} \cdot D)^T) \cdot \mathbf{Q} - ((\mathbf{P} \times \mathbf{E} \cdot D)^T \cdot \mathbf{Q})^2. \quad (6)$$

Для оцінювання достовірності наведених формул було проведено статистичне моделювання з використанням методу Монте-Карло. На рис. 4 наведено приклад графіка ЩРІ тривалості діагностування для параметрів генеральної сукупності у вигляді заданих імовірностей відмов елементів досліджуваного виробу, математичних сподівань та дисперсій тривалостей проведення НТО, умовних імовірностей помилок першого та другого роду.

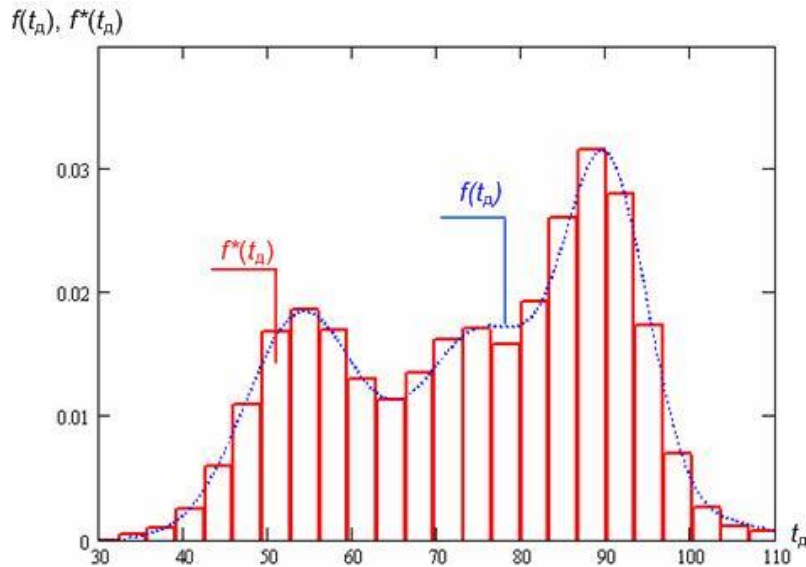


Рис. 4. Результати теоретичного розрахунку ($f(t_d)$) та статистичного ($f^*(t_d)$) моделювання для визначення ЩРІ тривалості діагностування

У розділі наведено також розрахунок показників ефективності у вигляді сумарних витрат на діагностування. Розглядалися такі варіанти залежності між витратами та часовими показниками t_d : лінійна $C_\Sigma = \varphi(t_d) = bt_d + a$; квадратична $C_\Sigma = \varphi(t_d) = bt_d + a + ct_d^2$; експоненціальна $C_\Sigma = \varphi(t_d) = ae^{at_d}$; поліноміальна (узагальнена) $C_\Sigma = \varphi(t_d) = \sum_{i=0}^n a_i t_d^i$.

Після визначення оберненої функції $t_d = \psi(C_\Sigma)$ можна записати ЩРІ сумарних витрат:

$$f(C_\Sigma) = f(\psi(C_\Sigma)) |\psi'(C_\Sigma)|. \quad (7)$$

На основі (7) було розраховано ЩРІ витрат для чотирьох наведених моделей. Приклад ЩРІ витрат для лінійної моделі має вигляд:

$$f(C_\Sigma) = f_{t_d} \left(\frac{C_\Sigma}{b} - \frac{a}{b} \right) \frac{1}{b}.$$

Графічні зображення гістограм, отриманих за результатами статистичного моделювання, та розраховані ЩРІ зображені на рис. 5.

За аналогічною методикою можливо розрахувати показник трудомісткості.

Під час розв'язання оберненої задачі для оптимізації рівнів імовірностей помилок першого та другого роду, що мають місце у процесі діагностування та

відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації, показниками ефективності можуть бути:

- 1) $m_1(t_{\text{пр}})$ – математичне сподівання тривалості поточного ремонту $t_{\text{пр}}$;
- 2) $\mu_2(t_{\text{пр}})$ – дисперсія тривалості поточного ремонту $t_{\text{пр}}$.

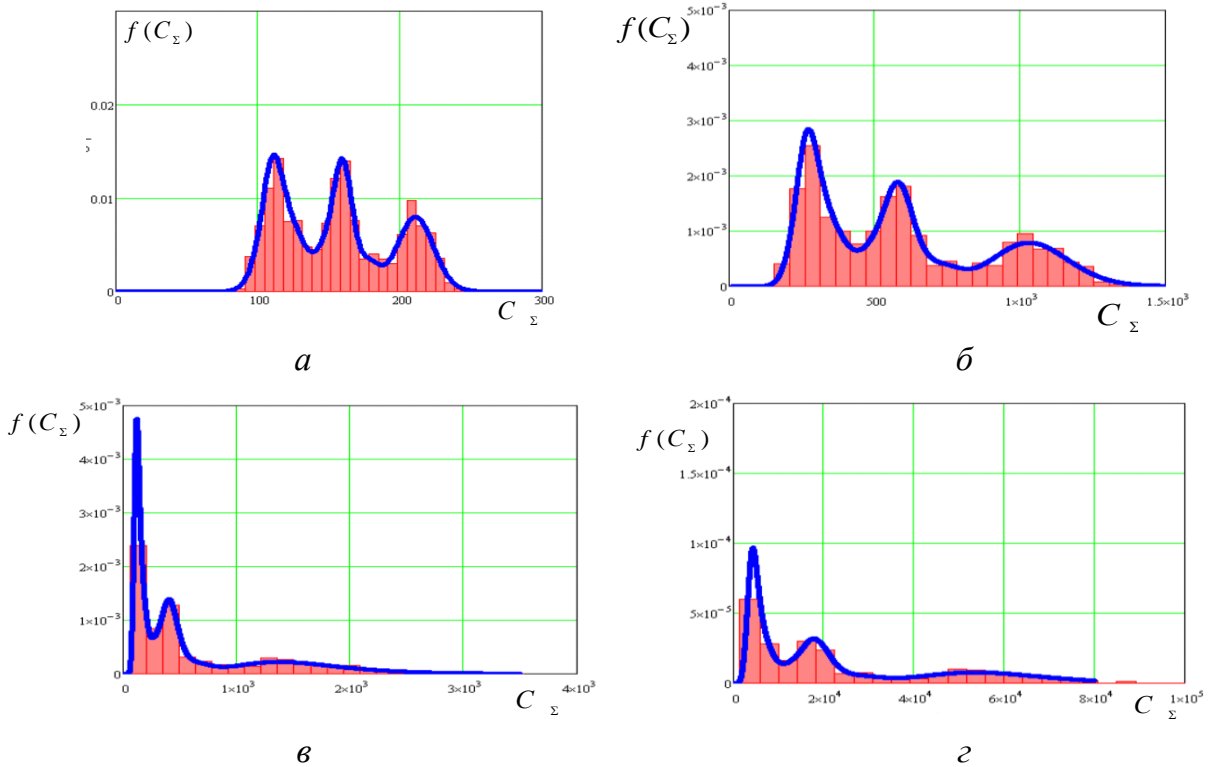


Рис. 5. Графічне зображення гістограми для лінійної (а), квадратичної (б), експоненціальної (в) та поліноміальної (г) моделей, отриманих за результатами статистичного моделювання, та розрахованої ЦПІ

Розглянуто випадок оптимізації за показником ефективності у вигляді математичного сподівання тривалості поточного ремонту $m_1(t_{\text{пр}})$. Вважалось, що оптимізація буде виконуватися за α , β та t_k . Оскільки відома діагностична модель та програма діагностування, то можна встановити залежність

$$m_1(t_{\text{пр}}) = \phi(\alpha, \beta, t_k).$$

При цьому можливі сім варіантів розв'язання оберненої задачі: оптимізація за α ; оптимізація за β ; оптимізація за t_k ; оптимізація за α, β ; оптимізація за α, t_k ; оптимізація за β, t_k ; оптимізація за α, β і t_k . У роботі розглянуто кожний із цих варіантів.

Для випадку оптимізації за α маємо:

$$\phi(\alpha, \beta, t_k) = a_m(\beta, t_k)\alpha^m + a_{m-1}(\beta, t_k)\alpha^{m-1} + \dots + a_1(\beta, t_k)\alpha + a_0(\beta, t_k); \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha} = m a_m(\beta, t_k)\alpha^{m-1} + (m-1)a_{m-1}(\beta, t_k)\alpha^{m-2} + \dots + a_1(\beta, t_k) = 0; \\ 0 \leq \alpha \leq 1. \end{cases}$$

Оптимізацію за β виконують аналогічно: рівняння (8) складається стосовно параметра β ; параметри α і t_k вважаються відомими.

Для випадку оптимізації за t_k функція $\phi(\alpha, \beta, t_k)$ має вигляд:

$$\phi(\alpha, \beta, t_k) = a_1(\alpha, \beta)t_k + a_0(\alpha, \beta).$$

Тоді

$$\frac{\partial \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial t_k} = a_1(\alpha, \beta) \neq 0.$$

Тому оптимізація за t_k для випадку знаходження мінімуму $m_1(t_{\text{пр}})$ неможлива. Отже, зроблений висновок, що оптимізація за (α, t_k) , за (β, t_k) і (α, β, t_k) також неможлива.

Розглянуто випадок оптимізації за α й β . При цьому розв'язано систему рівнянь за умов, що $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 1$:

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha} = m a_m(\beta, t_k) \alpha^{m-1} + (m-1) a_{m-1}(\beta, t_k) \alpha^{m-2} + \dots + a_1(\beta, t_k) = 0; \\ \frac{\partial \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \beta} = m b_m(\alpha, t_k) \beta^{m-1} + (m-1) b_{m-1}(\alpha, t_k) \beta^{m-2} + \dots + b_1(\alpha, t_k) = 0. \end{cases}$$

Для прийняття рішення щодо можливості розв'язання оптимізаційної задачі було розраховано Гесіан.

Запропонований метод розв'язання оберненої задачі можна узагальнити для таких показників, як вартість та трудомісткість.

Четвертий розділ присвячено, аналізу можливостей упровадження результатів дисертаційної роботи.

Результати дисертаційної роботи, описані в другому та третьому розділах, є підґрунтям для розроблення методики прямої задачі діагностування НЗА.

Методика розв'язання прямої задачі базується на положеннях теорії ймовірностей, математичної статистики.

Методика використовується для оцінювання ефективності процедур поточного ремонту та обґрунтування структур обробки даних, під час проєктування програм поточного ремонту, а також у процесі розроблення нових та модернізації існуючих систем експлуатації НЗА.

Метою розв'язання прямої задачі діагностування є знаходження статистичних характеристик у вигляді щільності розподілу ймовірностей витрат та тривалостей діагностування.

Методика розв'язання прямої задачі включає такі етапи:

1. Обстежити структурну схему об'єкта поточного ремонту.
2. Скласти діагностичну модель.
3. Обрати методи діагностування.
4. Скласти програму діагностування та поточного ремонту у випадку відсутності помилок першого та другого роду.

5. Обрати стратегію заміни елементів у випадку наявності помилок першого та другого роду під час контролю технічного стану об'єкту поточного ремонту.

6. Скласти програми поточного ремонту об'єкт поточного ремонту (ОПР), кількість яких дорівнює кількості елементів діагностичної моделі (ДМ), у випадку наявності помилок першого та другого роду.

7. Знайти числові значення ймовірностей проведення певного НТО у випадку можливості відмови кожного з елементів ОПР. Ці ймовірності є функціями від параметрів α та β .

8. Для заданих числових значень імовірності відмов елементів ОПР Q_i за формулою повної ймовірності розрахувати безумовну ЩРІ тривалості діагностування.

9. Для отриманої ЩРІ розрахувати математичне сподівання та дисперсію тривалості процедури діагностування.

У розділі також розглянуто методику розв'язання оберненої задачі.

Метою вирішення оберненої задачі оцінювання ефективності процедур поточного ремонту радіоелектронної апаратури є знаходження оптимальних значень умовних імовірностей помилок першого та другого роду. Для реалізації методики виконуються такі етапи:

1. Проаналізувати результати розв'язання прямої задачі.

2. Знайти функціональну залежність імовірностей проведення певного НТО у випадку можливості відмови кожного з елементів ОПР від параметрів α та β .

3. Розрахувати функціональні залежності математичного сподівання та дисперсії від імовірностей помилок першого та другого роду, а також тривалостей контролю елементів ОПР, використовуючи формулу повної ймовірності (ймовірності відмов елементів ОПР Q_i вважаються відомими).

4. Дослідити отриману функціональну залежність на екстремуми, знайти оптимальні значення параметрів α , β .

У розділі також розглянуто приклади розв'язання прямої та оберненої задачі, зокрема для діагностичної моделі, зображеної на рис. 6.

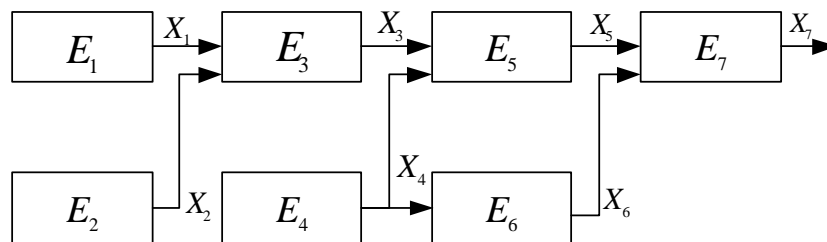


Рис. 6. Діагностична модель

У прикладі знайдено частинні похідні від математичного сподівання тривалості діагностування за параметром α та параметром β . Прирівнявши частинні похідні до нуля та розв'язавши систему рівнянь, були знайдені такі оптимальні значення ймовірностей помилок першого та другого роду.

$$\frac{\partial m}{\partial \alpha} = C_0 + C_1 \alpha + \alpha^2 C_2 = 0$$

$$\alpha_{\text{оптм1,2}} = \frac{-C_1 \pm \sqrt{C_1^2 - 4C_0 C_2}}{2C_2}$$

де C_0, C_1, C_2 – невідомі коефіцієнти, що визначаються згідно з формулою.

$$\begin{aligned} C_0 = & -Q_2 t_k + 3Q_2 t_{3.e} + 3Q_2 t_{к.п.о} - 6Q_2 \beta t_k - 4Q_2 \beta t_{3.e} - 4Q_2 \beta t_{к.п.о} + 3Q_2 \beta^2 t_k + 2Q_2 \beta^2 t_{3.e} + 2Q_2 \beta^2 t_{к.п.о} - \\ & - Q_3 t_k + 4Q_3 t_{3.e} + 4Q_3 t_{к.п.о} - 6Q_3 \beta t_k - 6Q_3 \beta t_{3.e} - 6Q_3 \beta t_{к.п.о} + 3Q_3 \beta^2 t_k + 3Q_3 \beta^2 t_{3.e} + 3Q_3 \beta^2 t_{к.п.о} + \\ & + Q_4 t_k + 3Q_4 t_{3.e} + 3Q_4 t_{к.п.о} - Q_4 \beta t_k - 7Q_4 \beta t_{3.e} - 7Q_4 \beta t_{к.п.о} + 4Q_4 \beta^2 t_{3.e} + 4Q_4 \beta^2 t_{к.п.о} + \\ & + Q_5 t_k + 8Q_5 t_{3.e} + 8Q_5 t_{к.п.о} - 7Q_5 \beta t_k - 10Q_5 \beta t_{3.e} - 10Q_5 \beta t_{к.п.о} + 5Q_6 t_k + 7Q_6 t_{3.e} + 7Q_6 t_{к.п.о} - 4Q_6 \beta t_k \\ & - 8Q_6 \beta t_{3.e} - 8Q_6 \beta t_{к.п.о} + Q_7 t_k + 12Q_7 t_{3.e} + 12Q_7 t_{к.п.о}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_1 = & -4Q_3 t_{3.e} - 4Q_3 t_{к.п.о} - 2Q_4 t_k + 2Q_4 \beta t_k - 7Q_5 t_k - 8Q_5 t_{3.e} - 8Q_5 t_{к.п.о} + \\ & + 2Q_5 \beta t_k + 9Q_5 \beta t_{3.e} + 9Q_5 \beta t_{к.п.о} + 2Q_6 t_{3.e} + 2Q_6 t_{к.п.о} + 2Q_7 t_k - 12Q_7 t_{3.e} - 12Q_7 t_{к.п.о}; \end{aligned}$$

$$C_2 = -12Q_6 t_k + 18Q_6 t_{3.e} + 18Q_6 t_{к.п.о} - 3Q_7 t_k.$$

Визначені точки можливих екстремумів. Для цього знайдено другі частинні похідні та розраховано Гесіан.

Приклади розрахунків у MathCad та відповідні графіки показника ефективності від α та β наведені на рис. 7 та 8. Ці рисунки були отримані для таких початкових параметрів генеральної сукупності $t_k = 100$, $t_{3.e} = 50$, $t_{к.п.о} = 1$, $Q_3 = 0.8$, $Q_6 = 0.2$, $Q_1 = Q_2 = Q_4 = Q_5 = Q_7 = 0$.

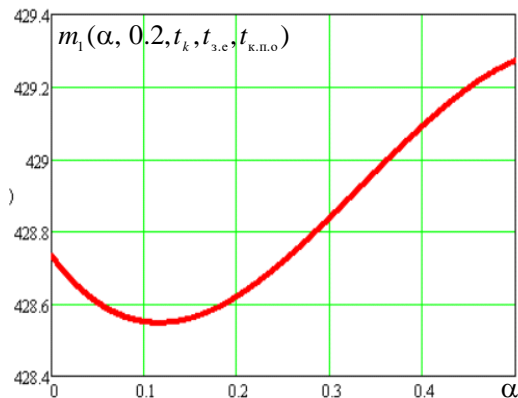


Рис. 7. Оптимізація за α

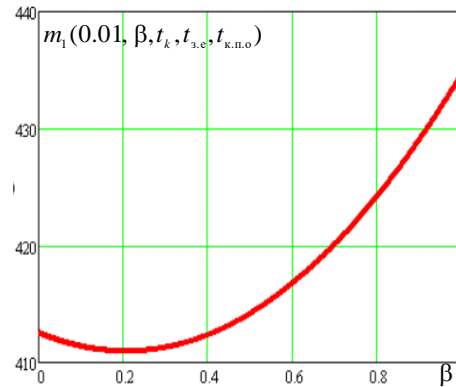


Рис. 8. Оптимізація за β

Як видно із графіків, в обох випадках оптимізації за α та β існують оптимальні (мінімальні) значення.

Виконано порівняльний аналіз ефективності для цього прикладу використання методики розв'язання оберненої задачі процесу діагностування.

Для порівняльного аналізу ефективності розв'язання оптимізаційної задачі використовувався безрозмірний коефіцієнт, який визначається за формулою:

$$K_{ef} = \frac{|A_d - A_{opt}|}{A_{opt}} 100\% ;$$

де A_d – значення показника ефективності для довільних α та β , A_{opt} – значення показника ефективності для оптимальних α та β .

Для заданого варіанта вхідних даних оптимальні значення показників α і β складають 0.12 та 0.2 відповідно для показника ефективності – математичне сподівання тривалості поточного ремонту. Тому максимальне покращення ефективності, яке досягається за рахунок оптимізації, становить 15 %.

Показник ефективності у вигляді середньоквадратичного відхилення тривалості діагностування варіюється у межах від 14 до 23 умовних одиниць часу. Тому максимальне покращення ефективності, яке досягається за рахунок оптимізації за цим показником, становить 38 %.

Для аналізу діапазону зміни коефіцієнту покращення ефективності було проведено моделювання для широких діапазонів варіювання параметрів: тривалості контролю одного елемента ОД, тривалості заміни елемента ОД, тривалості контролю працездатності об'єкта. Аналіз результатів моделювання показав, що коефіцієнт покращення ефективності найбільш чутливий до змін тривалостей контрольних операцій. Під час зміни тривалості контролю працездатності всього ОД коефіцієнт покращення ефективності майже не змінюється. Зміни тривалості заміни елемента ОД також майже не впливають на цей коефіцієнт.

У Додатку дисертаційної роботи наведені акти впровадження результатів дослідження.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної науково-практичної задачі підвищення ефективності процедур діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації шляхом визначення статистичних характеристик показників цих процедур. У рамках вирішення цієї задачі отримані такі наукові результати:

1 Розглянуто організаційну структуру авіаційно-транспортної системи та проаналізовано основний склад НЗА, що наразі використовується у ЦА. Визначено, що в організаційній структурі провайдерів з надання аеронавігаційних послуг не достатньо приділяється увага процесам діагностування НЗА, визначення статистичних характеристик яких є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої може підвищити ефективність надання послуг з радіотехнічного забезпечення польотів у цивільній авіації України.

2. Державна нормативна база у сфері експлуатації, а також міжнародні вимоги та рекомендації не в певній мірі містять науково-методичні матеріали для супроводження процесів систем експлуатації НЗА, в тому числі процесів діагностування та відновлення працездатності.

3. Удосконалено метод визначення рівня експлуатаційних витрат під час діагностування та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації,

який на відміну від існуючого базується на використанні щільностей розподілу ймовірностей витрат експлуатаційних ресурсів, запропонованої оптимізаційної функції, використання функціональної залежності додаткових витрат у випадках, коли запланований обсяг витрат на ремонт є недостатнім. Аналіз ефективності витрат ресурсів проводився з використанням аналітичного підходу та статистичного моделювання. Для параметрів, що розглядалися, під час аналізу економія ресурсів складала від 15 до 31 %. Використання методу дозволяє обґрунтувати доцільність використання статистичних характеристик під час діагностування та відновлення працездатності НЗА.

4. Удосконалено метод знаходження ЦРІ часових витрат на діагностування та відновлення працездатності НЗА, що на відміну від існуючого методу заснований: на використанні матричного апарату представлення аналітичних співвідношень; на використанні ЦРІ часових витрат окремих контрольних вимірювальних операцій; на застосуванні аналітичних співвідношень, що дозволяють проводити оцінку ЦРІ вартісних та трудомісткісних витрат на основі часових витрат на діагностування та відновлення працездатності. Метод може бути складовою науково-методичного супроводження процесів експлуатації на стадії проєктування та модернізації систем експлуатації в частині діагностування та відновлення працездатності НЗА.

5. У роботі вперше розроблено метод визначення оптимальних значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду у випадку використання аналітичних співвідношень, що були отримані під час розроблення методу визначення статистичних характеристик часових, вартісних та трудомістких робіт діагностування НЗА, тобто базується на використанні відповідних ЦРІ показників ефективності процедур діагностування. Для певних значень параметрів досліджень за рахунок вирішення задачі оптимізації значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду зменшення витрат на діагностування становить 15% у рамках показника ефективності – математичного сподівання тривалості діагностування.

6. Розроблено методику вирішення прямої задачі діагностування, що конкретизує наукові результати щодо реалізації метода визначення статистичних характеристик процесів експлуатації для можливості застосування під час діяльності провайдерів з аеронавігаційного обслуговування.

7. Розроблено методику вирішення оберненої задачі діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації, що дозволяє визначати оптимальні значення величин умовних ймовірностей помилок першого та другого роду контрольних вимірювальної апаратури, що забезпечують мінімум показника ефективності у вигляді математичного сподівання тривалості процедури діагностування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у закордонних наукових журналах

1. 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

2. Яшанов І. М., Зуєв О. В., Мусієнко А. О. Особливості експлуатації сучасних засобів зв'язку, навігації та спостереження . Проблеми інформатизації та управління. 2013. № 44. С. 25 – 30.

3. Яшанов И. М. Оптимизация показателей надёжности в системах эксплуатации наземных средств радиотехнического обеспечения. *Водный транспорт*. 2014. № 1. С. 55 –60.

4. Яшанов І. М. Обґрунтування моделі витрат на експлуатацію наземних засобів аеронавігації. *Наукоємні технології*. 2020. № 3 (47). С. 415–421.

5. Яшанов І. М., Заліський М. Ю. Ефективність процедур експертного оцінювання . *Електроніка та системи управління*. 2009. № 2 (20). С. 81 – 86.

6. Яшанов І. М., Німич В. В., Заліський М. Ю. Обґрунтування структури системи менеджменту якості. *Електроніка та системи управління*. 2008. №1 (15). С. 158 – 164.

7. Яшанов І. М., Німич В. В., Заліський М. Ю. Оцінка відповідності процесів. *Проблеми інформатизації та управління*. 2009. № 2 (26). С. 52 – 57.

8. Яшанов І. М., Німич В. В., Заліський М. Ю. Підсистема забезпечення результативності та ефективності системи експлуатації технічних комплексів *Електроніка та системи управління*. 2009. № 4 (22). С. 116 – 120.

9. Яшанов І. М., Заліський М. Ю., Німич В. В., Соломенцев О. В. Ефективність функціонування систем експлуатації технічних комплексів в авіації. *Проблеми інформатизації та управління*. 2009. № 4 (28). С. 55 – 59.

10. Яшанов І. М., Німич В. В., Заліський М. Ю. Підходи до розв'язання зворотної задачі при оцінці відповідності встановленим нормам. *Електроніка та системи управління*. 2008. №1 (15). С. 153 – 157.

11. Яшанов І. М., Німич В. В., Соломенцев О. В., Заліський М. Ю. Урахування похибок діагностування під час аналізу технологічних операцій. *Електроніка та системи управління*. 2007. №3 (13). С. 134–140.

Матеріали конференцій, які включення до науково-метричної бази Scopus

12. Yashanov I., Asanov M., Shakhovska, N Method of Direct Diagnostic Problem Solvation in UAV Operation System. *Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks. 1st International Workshop. 29–30 November 2019: Proceedings*. Kyiv (Ukraine), 2019. P. 1 – 10.

13. 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 монографій

14. 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.

15. Zaliskyi M., Solomentsev O., Yashanov I. Analysis and optimization of diagnostic procedures for aviation radioelectronic equipment. Chapter in the book "Management Association, Information Resources, editor. Research Anthology on Reliability and Safety in Aviation Systems, Spacecraft, and Air Transport", IGI Global, Pennsylvania, USA, 2021, pp. 948-972.

Матеріали інших конференцій

16. Яшанов І. М. Підходи до розв'язання оберненої задачі під час проектуванні систем експлуатації радіотехнічних засобів. *«Політ». Сучасні проблеми науки*. Матеріали XV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів. Київ. 2015. 56 с.

17. Яшанов І.М., Мусієнко А.О. Сучасні засоби зв'язку, навігації, спостереження та їх експлуатація. *Статистичні методи обробки сигналів та даних*: тези доповідей Міжнародної наукової конференції, Київ, 16 – 17 жовтня 2013 р., К., 2013. С. 163–167.

18. Яшанов І. М., Мусієнко А. О Моніторинг процесів в системі експлуатації авіаційних радіотехнічних засобів. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій*: тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції: Запоріжжя, 19–21 вересня 2012 р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. С. 262 – 264.

19. Яшанов І.М., Мусієнко А.О. Інформаційна взаємодія елементів системи експлуатації радіотехнічних засобів забезпечення польотів. *Проблеми навігації і управління рухом* : тези доповідей Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів, Київ, 18 – 20 листопада 2013 р., К., 2013. С. 99.

20. Yashanov I.M., Shavlovska O.I. Sequential estimation of ground-based radioelectronic equipment reliability. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: тези доповідей Науково- технічної конференції, Київ, 17 – 19 листопада 2014 р., К., 2014. С. 102.

21. Яшанов І. М., Німич В. В., Соломенцев О. В., Заліський М. Ю. Методика обґрунтування технологічних систем. *Авіа – 2007. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції*: Київ, 25 – 27 квітня 2007 р. Т.2. К.: НАУ, 2007. С. 22.234 – 22.237.

22. Solomentsev O. V., Musienko A. O., Zaliskyi M. Yu., Yashanov I. M. Approach to obtaining maintenance characteristics of aviation radioelectronic equipment. *Aviation in the XXI-st Century: Proceedings of The Fifth World Congress*, Kyiv, 25 – 27 September 2012, K., 2012, Volume 2. P. 3.2.5–3.2.8.

АНОТАЦІЯ

Яшанов І. М. Методи визначення статистичних характеристик процедур діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертації на здобуття науково ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Національний авіаційний університет, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі щодо розроблення методів визначення статистичних характеристик процедур діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації з метою підвищення ефективності систем експлуатації наземних засобів аеронавігації. Удосконалено метод визначення рівня експлуатаційних витрат під час діагностування та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації, який на відміну від існуючого базується на використанні щільностей розподілу ймовірностей витрат експлуатаційних ресурсів, запропонованої оптимізаційної функції, використанні функціональної залежності додаткових витрат у випадках, коли запланований обсяг витрат на ремонт є недостатнім. Удосконалено метод знаходження ЦПРі часових витрат на діагностування та відновлення працездатності НЗА, що на відміну від існуючого методу: заснований на використанні матричного апарату представлення аналітичних співвідношень, на використанні ЦПРі часових витрат окремих контрольних-вимірювальних операцій та застосуванні аналітичних співвідношень, що дозволяють проводити оцінку ЦПРі вартісних та трудомісткісних витрат на основі часових витрат на діагностування та відновлення працездатності.

У роботі вперше розроблено метод визначення оптимальних значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду за умов використання аналітичних співвідношень, що були отримані під час розроблення методу визначення статистичних характеристик часових, вартісних та трудомістких робіт діагностування НЗА, тобто базується на використанні відповідних ЦПРі показників ефективності процедур діагностування.

Ключові слова: система експлуатації; наземні засоби аеронавігації; процедури діагностування та відновлення працездатності; статистичні характеристики показників процесів експлуатації.

АННОТАЦІЯ

Яшанов И. М. Методы определения статистических характеристик процедур диагностирования технического состояния наземных средств аэронавигации – Квалификационная научный труд на правах рукописи.

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – Эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Национальный авиационный университет, Киев, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи по разработке методов определения статистических характеристик процедур диагностирования технического состояния наземных средств аэронавигации с целью повышения эффективности систем эксплуатации наземных средств аэронавигации.

Усовершенствован метод определения уровня эксплуатационных расходов при диагностировании и восстановления работоспособности наземных средств аэронавигации, который в отличие от существующего базируется на использовании плотностей распределения вероятностей расходов эксплуатационных ресурсов, предложенной оптимизационной функции, использовании функциональной зависимости дополнительных расходов в случаях, когда запланированный объем затрат на ремонт является

недостаточным. Усовершенствован метод нахождения плотности распределения вероятности (ПРВ) временных затрат на диагностики и восстановления работоспособности наземных средств аэронавигации (НСА), что в отличие от существующего способа: основанный на использовании матричного аппарата представления аналитических соотношений, на использовании ПРВ временных затрат отдельных контрольно-измерительных операций и применении аналитических соотношений, позволяющих проводить оценку ПРВ стоимостных и трудоемкости расходов на основе временных затрат на диагностики и восстановления работоспособности

В работе впервые разработан метод определения оптимальных значений условных вероятностей ошибок первого и второго рода при использовании аналитических соотношений, полученных при разработке метода определения статистических характеристик временных, стоимостных и трудоемких работ диагностирования НСА, то есть базируется на использовании соответствующих ПРВ показателей эффективности процедур диагностирования.

Ключевые слова: система эксплуатации; наземные средства аэронавигации; процедуры диагностики и восстановления работоспособности; статистические характеристики показателей процессов эксплуатации.

ABSTRACT

Yashanov I. M. Methods of determining the statistical characteristics of procedures for diagnostics of the technical condition for ground air navigation equipment – As a manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.22.20 – Operation and repair of vehicles. – National aviation university, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem concerning methods development for determining statistical characteristics of p procedures for diagnostics of the technical condition for ground air navigation equipment for the purpose of efficiency increase for corresponding operation systems.

Improved method for determining the level of operation costs when diagnosing and restoring ground air navigation equipment, which in contrast to the existing is based on the use of probability density function of operation resources, the proposed optimization function, the use of functional dependence of additional costs in cases where planned costs are insufficient. The method of finding the time costs of diagnosing and restoring the ground air navigation equipment, which in contrast to the existing method: based on the use of matrix apparatus for representing analytical equations, the use of time costs of individual control and measuring operations and the use of analytical ratios that allow to estimate probability density function of costs and labor-intensity based on time spent on equipment diagnostics and repair.

For the first time, a method of determining the optimal values of conditional probabilities of errors of the first and second kind under the conditions of using analytical ratios obtained during the synthesis of the method of determining statistical characteristics for time, costs and labor-intensity is considered.

Keywords: operation system; ground-based air navigation equipment; diagnostics and repair procedures; statistical characteristics of operational processes indicators.

Підп. до друку 22.02.2021. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,39. Обл.-вид. арк. 1,5.
Тираж 100 пр. Замовлення № 22-1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Любомира Гузара, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002