

Міністерство освіти та науки України
Національний авіаційний університет

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Яшанов Іван Михайлович

УДК 629.7.08: 681.518.02 (043.5)

ДИСЕРТАЦІЯ

Методи визначення статистичних характеристик процедур діагностування
технічного стану наземних засобів аеронавігації
Спеціальність 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

І.М. Яшанов

Науковий керівник – Соломенцев Олександр Васильович, доктор технічних наук,
професор, професор кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем НАУ

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

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

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – «Експлуатація та ремонт засобів транспорту». Національний авіаційний університет, МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності процедур діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації шляхом визначення статистичних характеристик показників цих процедур.

Задача вирішена шляхом аналізу складових елементів системи експлуатації наземних радіотехнічних засобів під час аеронавігаційного обслуговування (зокрема, таких елементів: обладнання, документи, ресурси, процеси тощо); аналізу процедур та методів діагностування технічного стану радіотехнічних засобів; обґрунтування доцільності використання щільності розподілу ймовірності показників ефективності систем експлуатації; вирішення так званої «прямої задачі», що пов'язана з визначенням статистичних характеристик процедур діагностування (у рамках часових витрат, вартості та трудомісткості робіт, імовірності правильного діагностування); вирішення так званої «оберненої задачі», що пов'язана зі знаходженням оптимальних значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду під час діагностування наземних засобів аеронавігації в рамках використання показника ефективності математичного сподівання тривалості діагностування; розробки методик вирішення прямої та оберненої задач щодо визначення статистичних характеристик процедур діагностування.

У роботі проведений аналіз структури систем експлуатації наземних засобів аеронавігації. Для цього представлена структурна схема процесу експлуатації і види робіт, що в неї входять. Аналіз показав, що до складу системи експлуатації входять власне наземні засоби аеронавігації, нормативна та регулятивна

документація, обслуговуючий персонал, процеси, ресурси, допоміжні засоби та приладдя тощо. Досвід експлуатації показує, що для нових наземних засобів аеронавігації не в повній мірі розроблені регламенти технічного обслуговування, які необхідні для розрахунку трудомісткості робіт з технічного обслуговування та ремонту і тим самим не дають змогу планувати діяльність обслуговуючого персоналу провайдерів аеронавігаційних послуг. Крім того, в підприємствах з аеронавігаційного обслуговування польотів використовується старе обладнання, що потребує виконання робіт з технічного обслуговування та ремонту.

У дисертаційній роботі проаналізовані наземні засоби аеронавігації, що наразі використовуються в цивільній авіації України. Визначено, що в організаційній структурі провайдерів з надання аеронавігаційних послуг не в повному обсязі приділяється увага комплексам діагностування та відновлення працездатності у системах експлуатації наземних засобів аеронавігації. Тому впровадження такого комплексу є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої може підвищити ефективність надання послуг з аеронавігаційного обслуговування в цивільній авіації України.

У цій роботі основна увага приділена процедурам поточного ремонту, що включають в себе такі технологічні операції: діагностування, заміна елемента наземного засобу аеронавігації, що відмовив, контроль працездатності об'єкта, що відмовив, та регулювання і налаштування після ремонту за необхідністю. Процедури технічного обслуговування в підприємствах-провайдерах аеронавігаційних послуг виконуються як для нового, так і застарілого обладнання, при цьому задачі поточного ремонту є актуальними. Основна увага під час поточного ремонту була приділена процедурам діагностування, оскільки згідно з ДСТУ 2389-94 це є основною операцією з пошуку вузла, який відмовив.

Під час виконання дослідження була розглянута та вирішена задача обґрунтування доцільності використання статистичних характеристик під час діагностування наземних засобів аеронавігації. Постановка цієї задачі базувалася на гіпотезі про те, що має місце суперечність між статистичним характером показників ефективності процедур діагностування та поточного ремонту і тим, що

в нормативній документації усі показники ефективності розглядаються з точки зору визначення лише математичних сподівань. Зокрема згідно з ГОСТ 18322 – 78 показниками ефективності є середня вартість, середня трудомісткість, середня тривалість ремонтних робіт. Отриманий результат є першим елементом наукової новизни. Розрахунки та аналітичні перетворення проводилися для різних прикладів моделей витрат ресурсів у вигляді їх щільності розподілу ймовірностей, серед яких нормальна, вейбулівська, експоненціальна. Окрім того, враховувалися додаткові витрати ресурсів обумовлені введенням функції додаткових витрат у випадках залучення кредитних коштів у рамках стрибкоподібної моделі. Аналіз показав, що економія витрат ресурсів на ремонт обладнання для досліджуваних значень параметрів складає від 15 до 30% в залежності від щільності розподілу ймовірності витрат. Тобто наявність інформації щодо щільності розподілу ймовірностей дозволить розрахувати оптимальний ресурсний фонд на ремонт, що забезпечує економію експлуатаційних витрат.

У роботі з точки зору системних позицій розглянуто питання діагностування системи експлуатації на засадах стандартів ISO серії 9000 у сфері надання послуг. Аналітичні розрахунки виконувалися для довільних щільностей розподілу ймовірностей сумарних витрат. При цьому розглянуто чотири стратегії діагностування елементів системи експлуатації. За результатами порівняння найбільш ефективною виявилася стратегія зі всеосяжним контролем всіх елементів системи експлуатації. При цьому задача вирішувалася аналітично. Отримані результати можуть бути використані під час розробки та модернізації систем експлуатації наземних засобів аеронавігації в частині поточного ремонту та інших процесів та можуть бути складовою методології оброблення даних у системах експлуатації наземних засобів аеронавігації в Україні.

У роботі вирішена задача удосконалення методу визначення статистичних характеристик часових витрат процедур діагностування, що враховують щільності розподілу ймовірності параметрів контрольно-вимірювальних процедур. Крім того, пояснено, як знаходити щільності розподілу ймовірності витрат вартості та трудомісткості.

У дисертаційній роботі вперше розроблений метод визначення раціональних значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду за умов використання аналітичних співвідношень, що були отримані під час розробки методу визначення статистичних характеристик часових, вартісних та трудомістких робіт під час діагностування, тобто базується на використанні відповідних щільностей розподілу імовірності показників ефективності процедур діагностування. Під час перевірки отриманих аналітичних співвідношень було проведено статистичне моделювання для гаусівської щільності розподілу імовірності параметрів контрольно-вимірювальних операцій. Результати розрахунків та статистичне моделювання показали, що максимальне покращення ефективності, яке досягається за рахунок оптимізації, становить 15% для показника ефективності у вигляді математичного сподівання тривалості діагностування.

У дисертаційній роботі розроблено методику вирішення прямої задачі діагностування, що на відміну від існуючої базується на використанні показників трудомісткості та вартості, що дає можливість більш адекватно провести оцінку витрат ресурсів під час діяльності авіаційного підприємства. При цьому виконано розрахунки для прикладу використання методики вирішення прямої задачі діагностування, що засвідчило необхідність використання не тільки математичного сподівання показника ефективності, але найбільш повного його статистичного представлення у вигляді щільності розподілу ймовірності.

У роботі розроблено методику вирішення оберненої задачі діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації, що дозволяє визначати оптимальні значення величин умовних ймовірностей помилок першого та другого роду контрольно-вимірювальної апаратури, що забезпечують мінімізацію у рамках показника ефективності – математичного сподівання тривалості діагностування. При цьому виконано розрахунки для прикладу використання методики вирішення оберненої задачі діагностування, що показало існування оптимальних значень показника ефективності та дозволило знайти таку

сукупність початкових параметрів процедури діагностування, які забезпечують цей оптимум.

Методики вирішення прямої та оберненої задачі можуть бути використані під час розробки та вдосконалення системи експлуатації НЗА в Україні.

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

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

Список публікацій здобувача

Статті в 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.

Розділи монографій

12. 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.
13. 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 конференцій, які включено до наукометричних баз Scopus

14. 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.

15. 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)*

Матеріали конференцій

16. Яшанов І. М. Підходи до розв'язання оберненої задачі під час проектуванні систем експлуатації радіотехнічних засобів. *«Політ». Сучасні проблеми науки.* Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції 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 Всеукраїнської науково-практичної конференції 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.

ANNOTATION

Yashanov I.M. Methods for determining the statistical characteristics of procedures for the technical condition diagnostics of ground air navigation equipment. – Qualification scientific work under manuscript copyright.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.22.20 – "Operation and repair of vehicles". National Aviation University, MES of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is directed on the decision of an actual scientific and technical problem of efficiency increase of technical condition diagnostics procedures for ground air navigation equipment by definition of statistical characteristics of indicators of these procedures.

The problem is solved by analyzing the components of the operation system of radio equipment during air navigation services (in particular, the following elements: equipment, documents, resources, processes, etc.); analysis of procedures and methods for the technical condition diagnostics of radio equipment; substantiation of feasibility of use of probability density function of efficiency indicators for operation systems; solving the so-called "direct problem", which is associated with determining the statistical characteristics of diagnostic procedures (within the time costs, cost and complexity of work, the probability of correct diagnosis); solving the so-called "inverse

problem", which is associated with finding the optimal values of the conditional probabilities of errors of the first and second kind in case of ground-based air navigation equipment diagnostics; development of methods for solving direct and inverse problems to determine the statistical characteristics of diagnostic procedures. The analysis of the structure of ground air navigation systems operation systems is carried out in the work. For this purpose the structural scheme of process of operation and types of works which are included in it are presented. The analysis showed that the operation system includes ground-based air navigation equipment, regulatory documentation, personnel, processes, resources, means of operation, etc. Operation experience shows that maintenance regulations are not fully developed for new ground-based air navigation equipment, which are necessary to calculate the complexity of maintenance and repair work and thus do not allow to plan the activities of service personnel of air navigation service providers. In addition, air navigation service companies use old equipment that requires maintenance and repair work.

In the thesis the ground air navigation equipment, which are currently used in civil aviation of Ukraine, are analyzed. It is determined that the organizational structure of air navigation service providers does not pay attention to the complexes of diagnostics and recovery in the operation systems of ground air navigation equipment.

Therefore, the introduction of such a complex is an urgent scientific and technical problem, the solution of which can increase the efficiency of air navigation services in civil aviation of Ukraine. This thesis focuses on running repair procedures, which include the following technological operations: diagnostics, replacing a failed element of ground-based air navigation equipment, monitoring the failure of failing equipment, and adjusting after repair as needed. Maintenance procedures in air navigation service providers are performed for all equipment, and the tasks of current repairs are relevant. The main attention during the current repair was paid to the diagnostic procedures, because according to DSTU 2389-94 it is the main operation to find the element that failed.

During the study, the problem of substantiating the feasibility of using statistical characteristics when diagnosing ground-based air navigation equipment was considered and solved. The formulation of this problem was based on the hypothesis that there is a contradiction between the statistical nature of the efficiency indicators for diagnostic procedures and maintenance and the fact that in the regulatory documentation all efficiency indicators are considered in terms of determining only mathematical expectations. In particular, according to GOST 18322 - 78 efficiency indicators are the average cost, average labor intensity, average duration of repair work. The obtained result is the first element of scientific novelty. Calculations and analytical transformations were performed for various examples of resource consumption models in the form of their probability density functions, including normal, Weibulian and exponential. More over, additional resource costs due to the introduction of the cost function in cases of borrowing under the jump model were taken into account. The analysis showed that the cost savings for the repair of equipment for the studied values of the parameters is from 15 to 30% depending on the probability density function of costs. That is, the availability of information on the probability density function will allow to calculate the optimal resource fund for repairs, which saves operation costs.

In the work from the point of view of system approach the question of diagnostics in the operation system on the basis of ISO 9000 series standards in the field of service provision is considered. Analytical calculations were performed for arbitrary probability density function of total costs. Four strategies for the operation system elements diagnostics are considered. According to the results of the comparison, the strategy with comprehensive control of all elements of the operation system proved to be the most effective. The problem was solved analytically. The obtained results can be used during the development and modernization of ground-based air navigation systems in terms of current repairs and other processes and can be part of the data processing methodology in ground-based air navigation systems in Ukraine.

The problem of improvement of a method of definition of statistical characteristics of time expenses of diagnostic procedures taking into account probability density function of control and measuring procedures parameters is solved in work.

In addition, it is explained how to find the probability density function of cost and labor costs. In the thesis for the first time the method of definition of rational values of conditional probabilities of errors of the first and second kind under conditions of use of the analytical relations received during development of a method of definition of statistical characteristics of time, cost and labor-consuming works at diagnosis is developed. During the verification of the obtained analytical relations, statistical modeling was performed for the Gaussian probability density function of control and measurement operations parameters. The results of calculations and statistical modeling showed that the maximum efficiency improvement achieved through optimization is 15% for the efficiency indicator in the form of mathematical expectation of the diagnostics duration.

In the thesis the technique of the decision of a direct problem of diagnostics, which is based on use of indicators of complexity and cost that gives the chance to carry out more adequately an estimation of expenses of resources during activity of the aviation enterprise, is developed.

The calculations for the example of using the method of solving the direct problem of diagnostics, which showed the need to use not only the mathematical expectation of the efficiency indicator, but its most complete statistical representation in the form of probability density function.

The method of solving the inverse problem of diagnosing the technical condition of ground air navigation equipment is developed, which allows to determine the optimal values of the probabilities of errors of the first and second kind of control and measuring equipment, optimizing the operating costs of the diagnostic procedure.

Calculations were performed for an example of using the technique of solving the inverse diagnostic problem, which showed the existence of optimal values of the efficiency indicator and allowed to find such a set of initial parameters of the diagnostic procedure that provide this optimum.

Methods for solving the direct and inverse problem can be used in the development and improvement of the operation system for ground air navigation equipment in Ukraine.

The research results are proposed for use in the State Enterprise “Research institute “Kvant” and in the teaching processes of the National Aviation University that are confirmed by the acts of implementation.

Keywords: operation system, ground-based air navigation equipment, reliability parameters, statistical data processing, changepoint, heteroskedasticity, efficiency.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	16
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. ОРГАНІЗАЦІЙНА СТРУКТУРА СИСТЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАЗЕМНИХ ЗАСОБІВ АЕРОНАВІГАЦІЇ.....	27
1.1 Аналіз організаційної структури системи експлуатації наземних засобів аеронавігації.....	27
1.2 Нормативна база щодо систем експлуатації наземних засобів аеронавігації	34
1.3 Контроль, діагностування та відновлення працездатності в системах експлуатації наземних засобів аеронавігації	40
1.4 Огляд літератури у сфері експлуатації наземних засобів аеронавігації	45
1.5 Постановка задачі дисертаційної роботи.....	49
1.6 Висновки до розділу 1.....	53
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ВИТРАТ В СИСТЕМІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАЗЕМНИХ ЗАСОБІВ АЕРОНАВІГАЦІЇ ПІД ЧАС ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТУВАННЯ	55
2.1 Побудова моделей оцінки відповідності в системі експлуатації наземних засобів аеронавігації.....	55
2.2 Імовірно-подієва модель процесу діагностування.....	64
2.3 Аналіз експлуатаційних витрат під час відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації.....	67
2.4 Висновки до розділу 2.....	77
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ВИРІШЕННЯ ПРЯМОЇ ТА ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧ ПІД ЧАС ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ПОТОЧНОГО РЕМОНТУ	80
3.1 Приклад визначення статистичних характеристик ймовірності правильного діагностування	80
3.2 Метод вирішення прямої задачі під час визначення статистичних характеристик процесу діагностування та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації.....	84
3.3 Розрахунок витрат під час вирішення прямої задачі	96
3.4 Метод вирішення оберненої задачі під час оптимізації рівнів ймовірностей помилки першого та другого роду, що мають місце у процесі діагностування та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації.....	103
3.5 Висновки до розділу 3.....	113
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	116
4.1 Методика вирішення прямої задачі в системах експлуатації наземних засобів аеронавігації	116
4.2 Приклади використання методики вирішення прямої задачі діагностування	124
4.3 Методика вирішення оберненої задачі оцінки ефективності процедур діагностування наземних засобів аеронавігації	133

4.4 Приклади використання методики вирішення оберненої задачі діагностування	138
4.5 Висновки до розділу 4.....	147
ВИСНОВКИ	150
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	152
Додаток Акти впровадження	

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АНО	–	аеронавігаційне обслуговування
АНС	–	аеронавігаційна система
АТС	–	авіаційна транспортна система
АС		автоматизованих систем
ВВ	–	випадкова величина
ВП	–	визначальний параметр
ДВЧ	–	дуже високі частоти
ЕОМ	–	електронно обчислювальна машина
ЗНС	–	зв'язок, навігація, спостереження
ЗРТЗ	–	засіб радіотехнічного забезпечення
КПІ	–	комплексний інформаційний параметр
КП	–	комплексний параметр
КПО	–	контроль працездатності об'єкта
КПР		керування повітряним рухом
НД	–	нормативний документ
НТО	–	набір технологічних операцій
ОД	–	обробка даних
ОЕ	–	об'єкт експлуатації
ОП	–	оцінювання параметрів
ОПР	–	організація повітряного руху
ПД	–	програма діагностування
ПС	–	повітряне судно
ПТЕ	–	Правила технічної експлуатації
РЕА	–	радіоелектронна апаратура
РЕЗ	–	радіоелектронний засіб
РЛС	–	радіолокаційна станція
РСП	–	регіональний структурний підрозділ
РТЗ	–	радіотехнічне забезпечення
САПР	–	система автоматизованого проектування

СЕ	–	система експлуатації
СМЯ	–	система менеджменту якості
ТЗ	–	технологічне завдання
ТО і Р	–	технічне обслуговування і ремонт
ТП	–	технологічний процес
ТХО	–	технологічна операція
ТХС	–	технологічна система
ЦА	–	цивільна авіація
ЩРІ	–	щільність розподілу імовірностей
ІСАО	–	International Civil Aviation Organization

ВСТУП

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, імовірність 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-вимірвальних 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 наступні задачі:

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

– розробка методики вирішення оберненої задачі щодо пошуку оптимальних значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду під час діагностування та відновлення працездатності НЗА.

Теоретичні дослідження в сфері статистичної обробки даних, теорії та практики експлуатації технічних комплексів проводилися у роботах багатьох вітчизняних і закордонних вчених, 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 у 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 боку ці показники в найбільш повному вигляді характеризуються ЩРІ. З урахуванням цього тема дисертаційної роботи, що призначена розробці методів визначення статистичних характеристик процедур діагностування є актуальною науково-технічною задачею.

Об'єктом дослідження – процес експлуатації наземних засобів аеронавігації.

Предметом 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 наступному:

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 ЦПР 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 ЦПР часових витрат на діагностування та відновлення працездатності НЗА, що на відміну від існуючого методу заснований: на використанні матричного апарату представлення аналітичних співвідношень; на використанні ЦПР часових витрат окремих контрольних-вимірювальних операцій; на застосуванні аналітичних співвідношень, що дають можливість проводити оцінювання ЦПР 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 ймовірностей 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. Отримані результати можуть бути використані в науково-дослідних установах під час проектування, створення та модернізації систем експлуатації наземних засобів аеронавігації, в експлуатаційних підрозділах цивільної авіації, а також в 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 у 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 [130; 131; 133] виконані самостійно. Деякі результати отримані у співавторстві з науковим керівником та іншими науковцями. Із них здобувачеві належать: у роботі [12] – розроблено метод визначення статистичних характеристик параметрів процедури діагностування; у роботі [129] – проаналізовано склад засобів

радіотехнічного забезпечення польотів; у роботі [143] – проаналізовано можливості використання експертних процедур оцінювання в системах експлуатації; [139] – визначено структуру систем менеджменту якості підприємств цивільної авіації; у роботі [140] – розв’язано задачу оцінювання відповідності процесів для підсистеми підтримки ефективності СЕ; у роботі [141] – виконано моделювання оцінок показника ефективності систем експлуатації; у роботі [135] – проведено моделювання процесів експлуатації в разі наявності підсистеми підтримки ефективності СЕ; у роботі [142] – розглянуто процедуру розв’язання оберненої задачі діагностування; у роботі; [144] – наведено підхід щодо урахування помилок першого та другого роду під час розв’язання оберненої задачі діагностування; у роботі [18] – розв’язано задачу діагностування компонентів безпілотного літального апарату; в роботі [19] – розв’язано задачу діагностування антенної системи; в роботі [21; 22] – наведено підхід щодо розв’язання прямої та оберненої задач діагностування; [138] – проаналізовано склад сучасних засобів аеронавігації та спостереження в цивільній авіації; у роботі [136] – проведено обґрунтування необхідності моніторингу процесів у системі експлуатації; у роботі [137] – виконано розрахунок надійності заданого радіоелектронного обладнання; у роботі [132; 13] – 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, Міжнародній науковій конференції «Статистичні методи обробки сигналів та даних», VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки,

телекомунікацій та інформаційних технологій», Міжнародної наукової конференції, 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 сторінки друкованого тексту. Роботу ілюстровано 9 таблицями, 34 рисунками. Список використаних джерел містить 143 найменування, із них 123 кирилицею та 42 латиницею.

РОЗДІЛ 1. ОРГАНІЗАЦІЙНА СТРУКТУРА СИСТЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАЗЕМНИХ ЗАСОБІВ АЕРОНАВІГАЦІЇ

1.1 Аналіз організаційної структури системи експлуатації наземних засобів аеронавігації

Аеронавігаційне обслуговування польотів є важливою складовою, яка забезпечує регулярність та безпеку польотів.

Відповідно до реєстру в Україні станом на 26.01.2021 р. функціонують 40 провайдерів з обслуговування повітряного руху, серед них, зокрема:

- Державне підприємство обслуговування повітряного руху (ОПР) України «Украерорух»,
- Державне підприємство «Антонов»,
- Державне підприємство «МА «Львів» ім. Данила Галицького»,
- Державне підприємство Міжнародний аеропорт «Бориспіль»,
- Льотна академія НАУ,
- Товариство з обмеженою відповідальністю «Міжнародний аеропорт Одеса» тощо.

Частина провайдерів з надання послуг аеронавігаційного обслуговування мають нескладну структуру, оскільки виконують невеликий обсяг робіт, або надають незначний обсяг послуг.

Основний провайдер в Україні – це Державне підприємство ОПР України «Украерорух».

З урахуванням певних обставин із 7 регіональних структурних підрозділів (РСП) функціонують лише 5, при чому у зв'язку зі збиттям рейсу МН17 обсяг робіт додатково зменшився, що негативно вплинуло на імідж і економіку нашої держави.

Відомо, що перераховані в реєстрі провайдери аеронавігаційних послуг є системами обслуговуючого типу. Тобто вони надають специфічні послуги для забезпечення польотів ПС. Згідно з ГОСТ 27.004-85 (Надійність в техніці. Технологічні системи) системи обслуговуючого типу повинні мати організаційну

структуру, персонал, документи, засоби оснащення та інші складові, які необхідні для функціонування систем.

Структура системи використання повітряного простору України складається з таких елементів: Міністерство інфраструктури України, Державна авіаційна служба України, провайдери аеронавігаційних послуг, районні диспетчерські центри, відомчі органи обслуговування повітряного руху, Український центр планування використання повітряного простору України та регулювання повітряного руху, цивільно-військова система обслуговування повітряного руху, служба аеронавігаційної інформації, Український авіаметеорологічний центр, центри обслуговування засобів аеронавігації, підрозділи наукового супроводу, центри підготовки фахівців [103].

Початковою позицією присвяченою аналізу функціонування підприємств є їхня організаційна структура, типова схема якої наведена рис. 1.1.

Організаційна структура служби НЗА головного підприємства ДП ОПР України «Украерорух» містить наступні складові: головний інженер проєктів, відділ розвитку НЗА, відділ організації експлуатації НЗА та технічний відділ. Організаційна структура служби НЗА РСП «Київцентраеро» містить служби: зв'язку, навігації та спостереження, системи оброблення даних, електропостачання та відділ організації виробництва (рис. 1.2).

Отже, в організаційних структурах провайдерів з надання аеронавігаційних послуг недостатньо приділяється увага науково-методичному супроводженню процесів діагностування в системах експлуатації НЗА, тому його впровадження, є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої може підвищити ефективність надання послуг з радіотехнічного забезпечення польотів у цивільній авіації України.

Слід виділити, що основними працівниками є диспетчери керування повітряним рухом і працівники з радіотехнічного забезпечення польотів. Наразі згідно з міжнародною термінологією працівники відносяться до служби зв'язку навігації спостереження (ЗНС). Організаційна структура відображує багатовекторну діяльність провайдера аеронавігаційних послуг «Украерорух»

при цьому розрізняємо центральний апарат «Украерорух» та РСП «Київцентраеро».

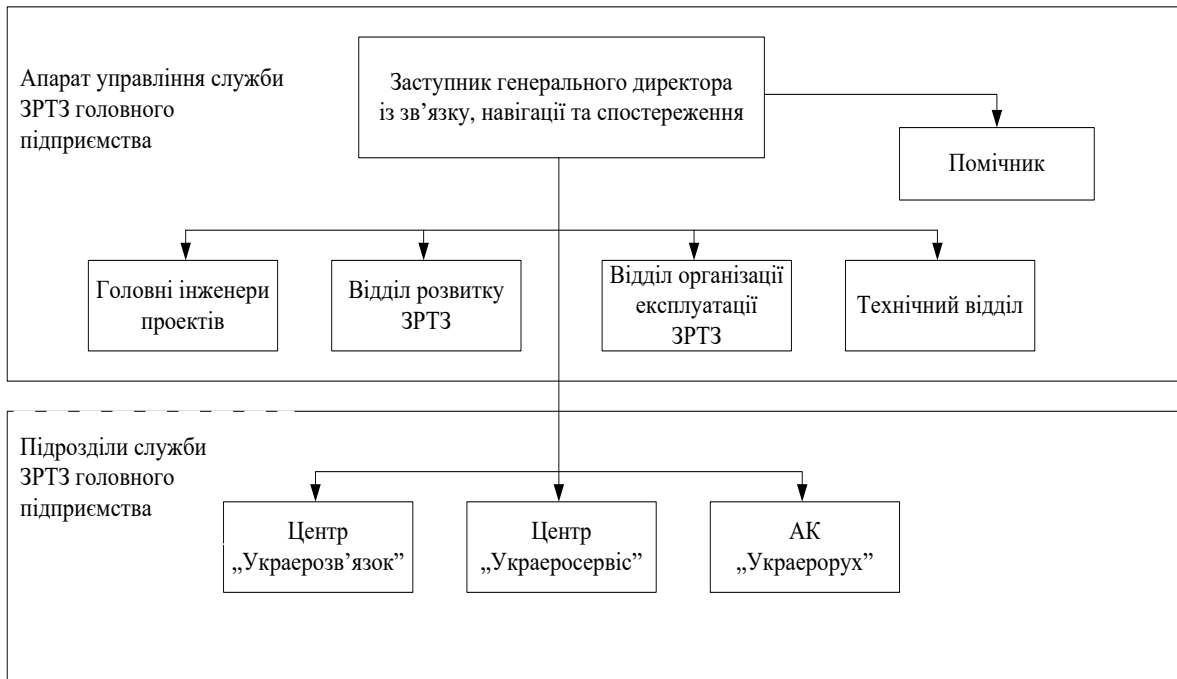


Рис. 1.1. Організаційна структура служби НЗА Державного підприємства ОПР України «Украерорух»

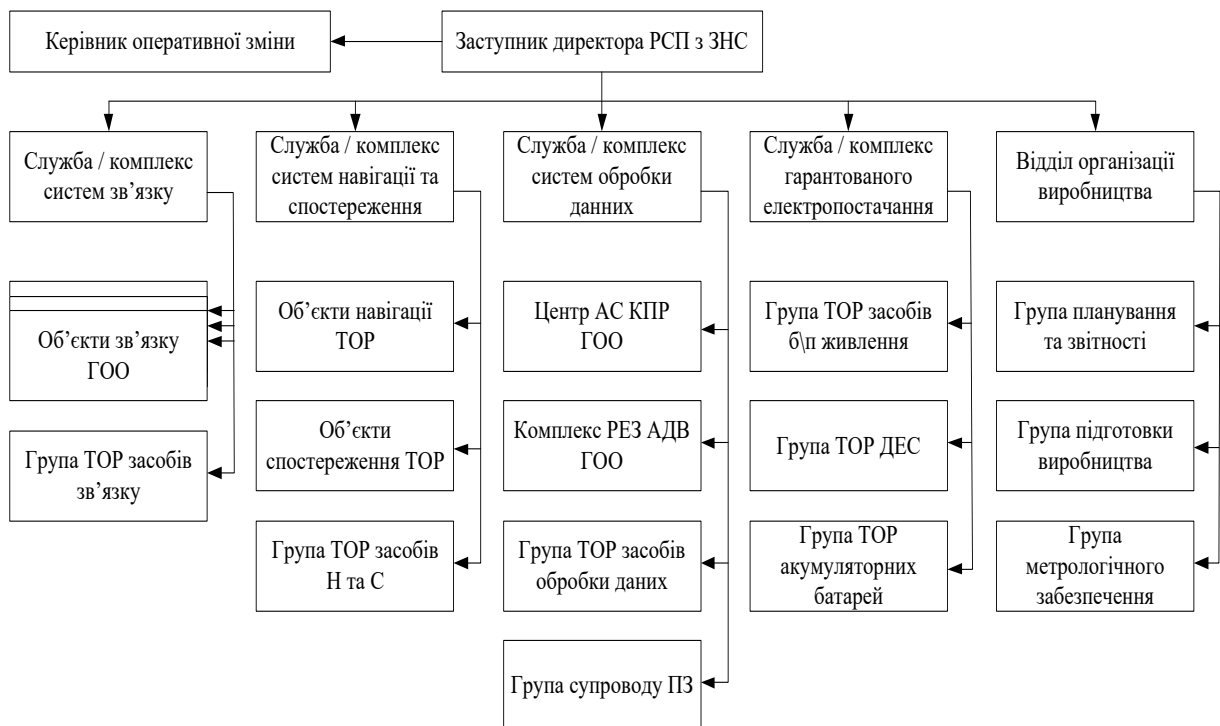


Рис. 1.2 Типова організаційна структура служби ЗНС РСП

Можна підкреслити, що «Украерорух» розвивається та вдосконалюється і в ньому працює Інтегрована система управління «Украерорухом». Вона

відноситься до структурного підрозділу з аудиту діяльності руху. Ця система має п'ять складових: управління безпекою польотів; напрям що стосується охорони праці; напрям, що стосуються захисту навколишнього середовища; напрям, що стосується впровадження функціонування системи менеджменту якості; напрям, що стосується контролю доступу до життєво важливих підрозділів забезпечення діяльності «Украерорух».

Слід зазначити, що в цій Інтегрованій системі не приділена належним чином увага напрямку забезпечення ефективності функціонування засобів ЗНС.

Критично аналізуючи організаційну структуру Державної системи використання повітряного простору слід зазначити, що для її ефективного функціонування необхідно мати спеціально уповноважені державні органи у сфері ЦА, власне підприємства які надають аеронавігаційні послуги вітчизняним та зарубіжним ПС та ряд структурних елементів, що забезпечують науково-методичне забезпечення діяльності авіаційно транспортної системи, постачання кваліфікованих кадрів, виготовлювачів обладнання НЗА, тощо. Для системного розгляду організаційної побудови системи організації польотів потрібно на більш високому рівні розглянути ряд елементів, що забезпечують функціонування діяльності систем, що розглядаються. Тобто на рис. 1.3 представлена авіаційна транспортна система, де є ряд елементів, які забезпечують виконання авіаперевезень в державі, і є провайдери навігаційних послуг, перелік яких наведений в.

Відомо, що експлуатація – це комплекс заходів, що проводиться для забезпечення необхідної якості використання авіаційних наземних радіотехнічних засобів для вирішення виробничих задач авіапідприємств ЦА [110; 112; 121].

Поняття експлуатація містить у собі як безпосереднє використання НЗА для вирішення виробничих задач авіапідприємства, так і комплекс робіт, що проводиться з метою забезпечення необхідної якості функціонування НЗА. Комплекс робіт, який не пов'язаний безпосередньо з оперативним використанням НЗА, називають технічною експлуатацією, що являє собою сукупність взаємозалежних у місці, часі, в об'ємі, заходів, які служать для забезпечення

необхідного якості НЗА в процесі його зберігання, транспортування, установки й підготовки до оперативного використання.

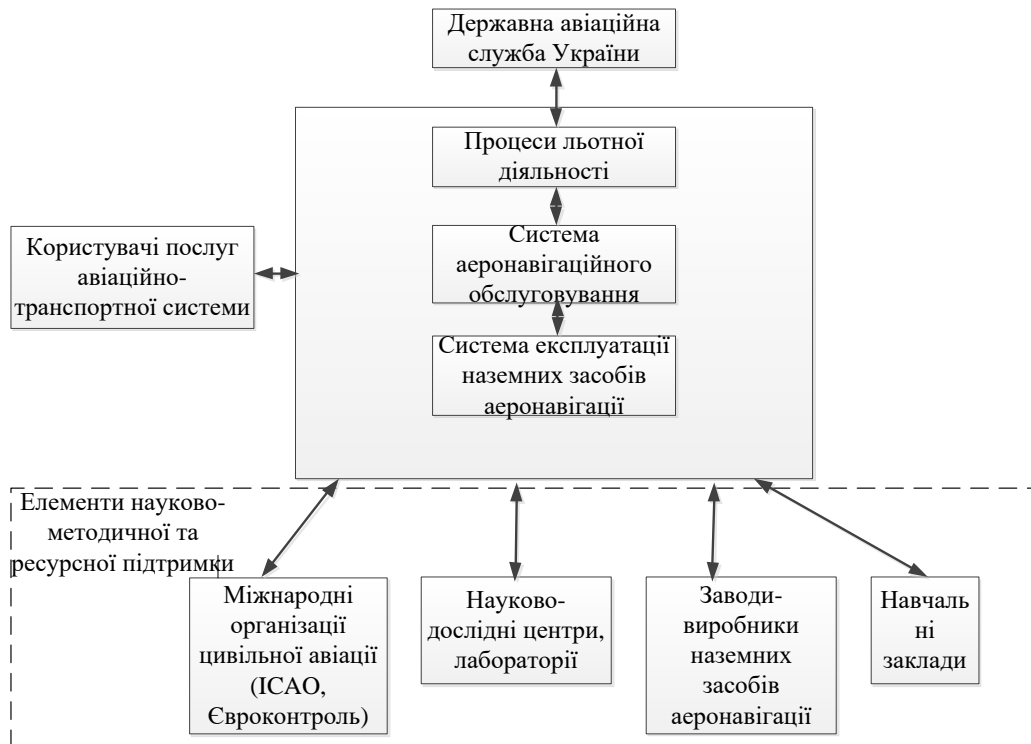


Рис. 1.3. Узагальнена структурна схема авіаційної транспортної системи

Сукупність заходів, проведених у певній послідовності, утворює технологічний процес експлуатації НЗА. Найпростішим прикладом технологічного процесу є послідовно виконувані операції контролю технічного стану НЗА й технологічні операції відновлення й регулювання НЗА за результатами контролю [58; 61].

Для процесу експлуатації характерна наявність об'єкта експлуатації, засобів експлуатації й персоналу, що здійснюють цей процес. Об'єктом експлуатації будемо вважати НЗА аеропортів і повітряних трас ЦА. Технічні засоби експлуатації являють собою комплекс засобів контролю технічного стану НЗА, засобів механізації й автоматизації та джерел живлення НЗА тощо. Керування об'єктом й технічними засобами експлуатації здійснюється інженерно-технічним складом авіапідприємств ЦА.

У процесі експлуатації НЗА можливі випадки виникнення невідповідностей параметрів цих засобів встановленим державними та міжнародними стандартами у сфері цивільної авіації вимогам. Своєчасне виявлення таких невідповідностей

може підвищити ефективність системи експлуатації в цілому, а також регулярність та безпеку польотів повітряних суден [67; 71].

Для вирішення такого роду задач в системах експлуатації використовується різного роду процеси, що спрямовані на підтримання надійності функціонування НЗА та ефективності системи експлуатації в цілому. Головним процесом в системі експлуатації є процес використання засобів за призначенням. Інші процеси є допоміжними. До таких процесів зокрема відносять:

- технічне обслуговування;
- ремонт;
- діагностування;
- контроль;
- продовження ресурсу тощо.

У процесі технічного обслуговування виконують такі операції:

- контроль технічного стану РЕА;
- настроювання РЕА;
- регулювання визначальних параметрів у РЕА;
- попереджувальна заміна блоків, вузлів, агрегатів у РЕА;
- чищення конструкції і конструктивних елементів РЕА.

Розглянемо основні види робіт, виконуваних у процесі експлуатації НЗА ЦА. Насамперед необхідно виділити використання НЗА за призначенням для вирішення задач радіотехнічного забезпечення виробничої діяльності авіапідприємства. Далі слід виділити види робіт, які виконують при введенні НЗА в експлуатацію. Це роботи з монтажу, установки, налагодження, апробації, випробування, тобто той великий комплекс робіт, який відповідає всякому процесу введення в експлуатацію НЗА. У процесі експлуатації можливі ситуації, коли нове або вже експлуатований НЗА ставиться на зберігання протягом певного часу. Роботи із зберігання НЗА також є складовою частиною експлуатації. Певний обсяг робіт доводиться виконувати також при транспортуванні НЗА [68; 69].

У процесі експлуатації НЗА значний обсяг робіт проводиться для підтримки його працездатності, а також з відновлення працездатного стану у випадку

виникнення відмов, тобто при ремонті НЗА. Для поліпшення якості роботи НЗА в процесі експлуатації можливе проведення модернізації та доопрацювання, що є ще одним з видів робіт. Необхідність підтримки якості засобів вимірювання, використовуваних під час експлуатації НЗА приводить до робіт з метрологічного забезпечення процесу експлуатації.

З наведеного переліку робіт, який може бути доповнений, можна зробити висновок, що в процесі експлуатації виконується комплекс різноманітних заходів, основна мета яких – забезпечення необхідного рівня якості роботи НЗА в процесі використання їх за призначенням.

Узагальнення багаторічного досвіду використання НЗА показує, що необхідна якість роботи авіаційної техніки не може бути досягнута без виконання широкого комплексу експлуатаційних заходів.

Система технічного обслуговування (ТО) і ремонту техніки – це сукупність взаємозалежних засобів, документації ТО і ремонту та виконавців, необхідних для підтримки й відновлення якості виробу, що входять у цю систему. У загальному випадку у систему ТО і ремонту можуть входити матеріали, запасні частини тощо [8].

Технічне обслуговування може здійснюватися різними методами. Під методом ТО розуміють сукупність технологічних і організаційних правил виконання операцій ТО. Відомі наступні методи: потоковий, централізований, децентралізований, метод ТО експлуатаційним персоналом, спеціалізованим персоналом, метод ТО експлуатуючою організацією, спеціалізованою організацією й метод ТО підприємством-виробником [74; 93].

До складу НЗА входять засоби спостереження, засоби навігації та засоби зв'язку.

Основними засобами спостереження на базі первинних радіолокаційних станцій (РЛС) є оглядові радіолокатори. Радіолокатори 1РЛ139-2 та ТРЛК-10 використовуються як трасові РЛС. У більшості випадків термін служби радіолокаторів 1РЛ139-2 перевищує відповідні середні терміни експлуатації. Радіолокаційні комплекси ТРЛК-10 мають перевагу в тактико-технічних

характеристиках порівняно з 1РЛ139-2. Після введення в експлуатацію всіх радіолокаційних позицій ТРЛК-10 стануть основою системи спостереження.

Радіолокатори ДРЛ-7СМ, ДРЛ-7СК, Іртиш, Екран-85, АТСР-33S використовуються як аеродромні РЛС. Перші чотири типи радіолокаторів є морально застарілими – термін їх експлуатації становить від 10 до 15 років. Для забезпечення обслуговування повітряного руху (ОПР) використовуються автономні (Корень-АС) та вмонтовані вторинні радіолокатори (Корень-С, вторинний канал ДРЛ-7СМ).

Диспетчерські пункти (сектори) безпосереднього керування повітряним рухом забезпечені радіоприймачами та радіопередавачами. На кожній з частот працюють основний та резервний комплекти радіопередавачів і радіоприймачів.

Для забезпечення ОПР використовується приймально-передавальне обладнання діапазону дуже високих частот (ДВЧ) із сіткою частот 8,333 кГц. Покриття зв'язковим полем ДВЧ забезпечується для всіх маршрутів ОПР, диспетчерських районів та диспетчерських зон.

Серед навігаційних НЗА використовуються наступні: привідні радіостанції ПАР-8СС, ПАР-10С, ПАР-10, ПАР-10А; системи посадки СП-75, СП-80М, СП-80, СП-80Н, СП-80Н1, СП-90; радіопеленгатори АРП-7, АРП-8, АРП-80К, АРП-АС, АРП-75/4, АРП-75/8, АРП-75, АРП-7С; навігаційний комплекс VOR/DME.

1.2 Нормативна база щодо систем експлуатації наземних засобів аеронавігації

Нормативно-правова база є одним із головних елементів системи експлуатації та всієї АТС. Її метою є забезпечення безпеки та регулярності польотів, а також ефективно застосувати засоби аеронавігації в цивільній авіації. Чітке виконання всіх положень нормативної бази є запорукою безпеки польотів.

Слід зазначити, що має місце затримка створення Державної програми розвитку «Державної системи використання повітряного простору України (ДСВПП)», яка закінчилася в 2014 році. Умовно нормативну базу можна поділити на національну та міжнародну. Для імплементації положень міжнародної

нормативної бази необхідно виконати роботи з перекладу тексту, визначити національні документи які будуть включати норми міжнародних документів. Останнім часом робота з імплементації міжнародної нормативної бази з національною є більш активною. Аналіз нормативної бази в частині нових НЗА показав, що відсутні регламенти технічного обслуговування, які прописують перелік робіт для планування робіт з ТО та їх підрахунком.

Нормативно-правова база цивільної авіації України складається з законів, міжнародних угод, постанов Верховної Ради та Кабінету Міністрів, указів Президента, міжнародних нормативно-правових актів тощо. Узагальненому вигляді структуру правової бази ЦА можна представити на рис. 1.4. Наведена структура зазвичай також включає специфічні нормативні документи, які регламентують порядок проведення робіт, вимоги до цих робіт, методики розрахунку показників ефективності СЕ [3; 4; 51; 52; 58-63; 68-70; 89-92; 103]. тобто мається на увазі різного роду інструкції. На рис 1.4 також виділений блок регуляторних документів, що є важливими і є обов'язковими для виконання. Мається на увазі Державні стандарти України, накази Державної авіаційної служби України (ДАСУ), Авіаційні правила України, галузеві керівні документи.

Положення про використання повітряного простору України [106] встановлює порядок використання та організації повітряного простору України юридичними і фізичними особами, а також органами, що здійснюють контроль за дотриманням порядку використання повітряного простору.

Повітряний кодекс України [103] встановлює правові, організаційні та економічні засади діяльності авіації та направлений на підтримку єдиної державної економічної, науково-технічної, страхової, фінансової, науково-технічної, тарифної, інвестиційної та соціальної політики у сфері керування і регулювання діяльності авіації.



Рис. 1.4. Структура національної нормативно-правової бази ЦА

Правила авіаційного електрозв'язку в ЦА України регламентують структуру, організацію та порядок використання авіаційного електрозв'язку, а також порядок організації та здійснення радіотелефонного зв'язку.

Процеси обслуговування повітряного руху та систем експлуатації засобів аеронавігації регламентуються міжнародними стандартами ESARR [3 – 4]. Вони містять вимоги щодо безпеки польотів, що обов'язкові до виконання для всього персоналу служб ОПР, та вимоги до інженерно-технічного персоналу, який здійснює експлуатаційні задачі, що стосуються безпеки польотів. Документ [4] також регулює процес гарантії безпеки програмного забезпечення, метою яких є забезпечення мінімальних ризиків, що пов'язані з використанням програмного забезпечення в наземних системах ОПР.

Відносно ESARR можна зробити основні висновки: ESARR встановлюють вимоги відносно ОПР, що мають доповнюватися діючою нормативною базою конкретної держави. Окрім цього, ESARR направлені на дотримання процесного

підходу до нагляду за підтримкою безпеки польотів провайдерами послуг ОНР і встановлюють мінімальний набір елементів, що мають бути присутніми у процесі нагляду за безпекою польотів.

Також у положеннях ESARR наводиться класифікація ризиків і вимоги щодо їх забезпечення. Проте у документах відсутні посилання на методики оцінювання ризиків, а також не встановлені граничні рівні цих ризиків.

Правила технічної експлуатації наземних засобів радіотехнічного забезпечення цивільної авіації (ПТЕ РТЗ ЦА – 2007) України [110] висувують вимоги відносно організації робіт з технічної експлуатації наземних засобів радіотехнічного забезпечення польотів і авіаційного електрозв'язку, що спрямовані на забезпечення безпеки польотів повітряних суден, а також виконання встановлених функцій ОНР та виробничої діяльності підприємств і організацій. Правила також спрямовані на персонал, що здійснює технічну експлуатацію наземних засобів аеронавігації. У розділах 2.1 «Надійність роботи засобів РТЗ», 3.1 «Планування, облік та звітність при технічній експлуатації наземних засобів РТЗ», 3.2 «Уведення в експлуатацію об'єктів і наземних засобів РТЗ», 3.4 «Ремонт наземних засобів РТЗ», 3.6 «Продовження терміну служби (ресурсу) наземних засобів РТЗ», 3.7 «Наземні та льотні перевірки наземних засобів РТЗ» розглядаються питання, відносно збору і обробки статистичних даних щодо напрацювання до відмови, терміну проведення поточного ремонту, прийняття рішень про технічний стан засобів аеронавігації в процесі здійснення наземних та льотних перевірок. Організація робіт, структура показників і методик, які необхідні для їх кількісного розрахунку, містяться у нормативних документах [108 – 109].

Правила технічної експлуатації НЗА України є поєднанням вимог «Повітряного кодексу» України і нормативних документів та положень Конвенції про міжнародну цивільну авіацію та додатків до неї.

Основними документами служби радіотехнічного забезпечення є:

– Правила технічної експлуатації засобів радіотехнічного забезпечення в цивільній авіації України (ПТЕ РТЗ ЦА – 2007), затверджені наказом Міністерства транспорту та зв'язку №381 від 08.05.2007;

– Правила авіаційного електрозв'язку в цивільній авіації України (ПЗ ЦА – 2003), затверджені наказом Міністерства юстиції України №736 від 31.10.2003;

– Правила організації і проведення наземних і льотних перевірок наземних засобів радіотехнічного забезпечення польотів, аеронавігаційного електрозв'язку і світлосигнального обладнання аеродромів цивільної авіації України, затверджені наказом Міністерства юстиції України №374/10654 від 07.04.2005;

– Інструкція з обліку та звітності при технічній експлуатації наземних засобів радіотехнічного забезпечення польотів і авіаційного електрозв'язку цивільної авіації України, затверджена наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 11.11.2003 №874 та зареєстрована в Міністерстві юстиції України 30.12.2003 за №1264/8585. Ця інструкція встановлює вимоги до ведення обліку та звітності щодо складу і технічного складу НЗА, а також щодо виробничої діяльності підрозділів, служб підприємств ЦА, які здійснюють технічну експлуатацію НЗА;

– Інструкція про порядок продовження терміну служби (ресурсу) наземних засобів радіотехнічного забезпечення польотів і авіаційного електрозв'язку цивільної авіації України, затверджена наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 11.11.2003 №871 та зареєстрована в Міністерстві юстиції України 02.12.2003 за №1002/8423.

У документі [108] наведені методики льотних перевірок оглядового радіолокатора – трасового (ОРЛ-Т), вторинного оглядового радіолокатора (ВОРЛ), оглядового радіолокатора – аеродромного (ОРЛ-А), трасового радіолокаційного комплексу (ТРЛК) із застосуванням літака-лабораторії (ЛЛ). Методики містять процедури розрахунку середньої імовірності виявлення на відрізьку маршруту за усіма горизонтальними польотами, при цьому розрахунок проводиться шляхом оцінювання математичного сподівання показника та середньо квадратичної помилки для фіксованого числа горизонтальних польотів.

Середня систематична похибка автоматичного радіопеленгатора (АРП) та оцінка середньоквадратичної помилки пеленгування АРП при польоті по орбіті визначаються за відомими в математичній статистиці формулами для фіксованого обсягу вибірки. При льотних перевірках радіомаячних систем I, II, III категорії автоматизована система льотного контролю вимірює поточні значення різниці глибини модуляції і кутів відхилення ЛЛ від осьової лінії злітно-посадкової смуги та виконує оцінку математичного сподівання параметрів для фіксованого обсягу вибірки.

До нормативно-правової бази в сфері СЕ засобів аеронавігації можна додати такі нормативні документи [58 – 63]. Питання надійності та порядок розрахунку її показників у СЕ засобів аеронавігації регламентують також державні стандарти.

У нормативному документі [58] розглянуті питання діагностики та контролю технічного стану технічних комплексів. Цей стандарт встановлює основні терміни та визначення основних понять технічного діагностування та контролю технічного стану об'єкту.

Також використовуються міжнародні документи та рекомендації:

– Додаток 10 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію «Авиационная электросвязь». Том 1. «Радионавигационные средства», ІКАО, 1996;

– Додаток 10 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію «Авиационная электросвязь». Том 2. «Правила связи, включая правила, имеющие статус PANS», ІКАО, 2001;

– Додаток 10 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію «Авиационная электросвязь». Том 4. «Системы обзорной радиолокации и предупреждения столкновений», ІКАО, 2002;

– Додаток 11 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію «Обслуживание воздушного движения. Диспетчерское обслуживание воздушного движения, полетно-информационное обслуживание, служба аварийного оповещения», ІКАО, 2001.

Аналізуючи перераховані документи, можна зробити такі висновки:

1) у документах не в повній мірі визначено використання певних термінів та визначень стосовно процесів експлуатації;

2) вимоги ESARR не в повному обсязі імплементовані у вітчизняних нормативних документах;

3) у міжнародних нормативних документах представлені вимоги щодо НЗА, які в свою чергу регламентують тактико-технічні характеристики і встановлюють стабільність аеронавігаційного обслуговування під час використання цих засобів;

4) в ESARR наведені показники, проте відсутні ризики, та вказується, що на державному рівні процедури обробки інформації повинні визначатися самостійно;

Загалом слід зазначити, що в нормативних документах ЦА недостатньо уваги приділено науково-методичному супроводженню процесів експлуатації НЗА, у тому числі діагностуванню обладнання.

1.3 Контроль, діагностування та відновлення працездатності в системах експлуатації наземних засобів аеронавігації

У процесі експлуатації під дією зовнішніх факторів дій персоналу або відмов елементної бази виникають відмови та пошкодження блоків, вузлів типових елементів заміни. Для того щоб забезпечити надійну та безперебійну роботу НЗА та ефективність СЕ, проводять роботи з технічного обслуговування, ремонту та інші роботи.

Згідно з ГОСТ 25866-83 експлуатація – це один з трьох етапів життєвого циклу НЗА, на якому підтримується та відновлюється корисні властивості обладнання. Цей етап найбільш тривалий. Експлуатація є складним процесом і вона включає ряд процесів, спрямованих на забезпечення ефективності функціонування НЗА. Серед таких процесів можна виділити: технічне обслуговування, ремонт відновлення НЗА (поточний, капітальний, плановий тощо), наземні та льотні перевірки технічного стану обладнання НЗА, продовження ресурсу, охорони праці та навколишнього середовища тощо

Технічне обслуговування НЗА – це процес, що призначений для підтримки надійного функціонування НЗА. Ремонт НЗА – це процес пов'язаний з

відновленням працездатності НЗА. Ці два процеси є найбільш важливими з точки зору трудомісткості робіт обслуговуючого персоналу [98].

Технічне обслуговування та ремонт є важливими, але на сучасному етапі розвитку НЗА з урахування збільшення надійності їх функціонування технічне обслуговування відіграє меншу роль, а питання поточного ремонту є актуальним. В загальному випадку розрізняють види та методи ремонту відповідно до проєкту ДСТУ 9050: 2020, але на сьогодні актуальність питань капітального, середнього та планового ремонту знижується, більш актуальним є поточний ремонт відновлення працездатності після відмови НЗА. В даній роботі основна увага приділена питанням підвищення ефективності саме поточного ремонту в частині діагностування технічного стану обладнання. Згідно з ДСТУ 2389-94 діагностування – це процес з виконання контрольних-вимірювальних робіт та знаходження вузлів, що відмовили. У процесі поточного ремонту для відновлення працездатності обладнання також слід виконати заміну вузла або елемента, що відмовив, виконати контроль працездатності після виконання ремонтних робіт і за необхідності провести налагодження вузлів. Слід зазначити, що через виникнення помилок першого та другого роду, які можуть мати місце під час контрольних-вимірювальних операцій, необхідно буде виконати додаткові технологічні операції для пошуку вузла, що відмовив. При цьому можуть розглядатися ряд стратегій дій для виконання додаткових робіт. Цей аспект пов'язаний в аналітичному плані з урахуванням помилок першого та другого роду розглядається в роботі і вирішуються як з точки зору підвищення ефективності поточного ремонту, так і в аспекті пошуку оптимальних значень ймовірностей помилок першого та другого роду [64; 67].

Перелічені вище технологічні операції представлені на рис. 1.5 за умов, коли не враховується вплив помилок першого та другого роду.

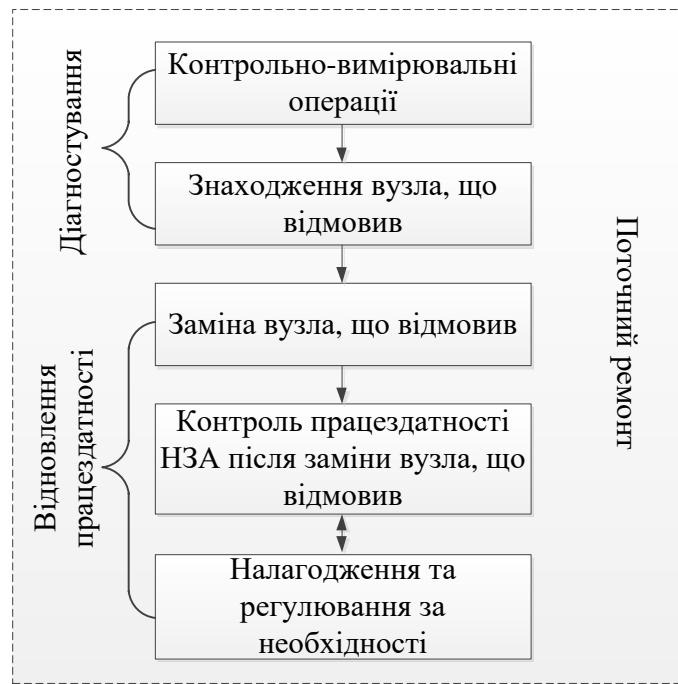


Рис.1.5. Узагальнена схема взаємозв'язку основних операцій під час ремонту НЗА

На рис. 1.5 представлена узагальнена схема взаємозв'язку основних операцій під час ремонту НЗА.

В дисертаційній роботі об'єктом дослідження є процес експлуатації НЗА в частині діагностування та відновлення працездатності обладнання. Для визначення числових значень показників ефективності процедур діагностування, вирішення можливих оптимізаційних задач необхідно конкретизувати певну послідовність робіт. Насамперед необхідно скласти діагностичну модель об'єкта поточного ремонту (діагностування НЗА). Діагностична модель складається з урахуванням особливостей структурних, функціональних та принципів схем НЗА.

При цьому модель обладнання як об'єкт поточного ремонту не завжди буде повторювати його структурної чи функціональну схему, а зазвичай визначається глибиною локалізації відмов. При побудові діагностичних моделей (ДМ) враховують вид структурної, функціональної, а також принципової схем об'єкту поточного ремонту (ОПР). Під час розроблення ДМ потрібно вибрати рівень розукрупнення об'єкту діагностування. Також зважати на наявність контрольних точок у РЕА або спроможність їх створення під час процесу діагностування об'єкту діагностування (ОД). Зазвичай ДМ зображають у вигляді графа, що

містить прямокутники, які відповідають технологічним операціям діагностування, відновлення працездатності та поточного ремонту загалом. Ребрами графа позначають вхідні сигнали, які приходять на кожний елемент ОПР, а однією стрілкою позначають вихідний сигнал для даного елемента [106; 112]. При розробці ДМ, робиться таке припущення:

- що для усіх елементів діагностичної моделі відомі номінальні значення та допуски можливих відхилень значень вхідних та вихідних сигналів відповідно, контрольні точки для зняття інформації стосовно цих сигналів та використовується контрольно-вимірювальна апаратура (КВА);

- елемент ДМ приймається справним, коли при номінальних вхідних сигналах значення вихідних сигналів знаходиться у заданому полі допусків;

- при виході поза межі припустимих значень хоча б одного з вхідних сигналів, вихідний сигнал елемента ДМ відповідно теж виходить за межі встановленого допуску;

- довільний елемент ДМ відповідно може мати лише один вихідний сигнал за довільної кількості вхідних сигналів;

- у ДМ не має бути обернених зв'язків між елементами, бо це створює невизначеність при визначенні відмов.

Під час дослідження використовували припущення в тому, що зв'язки між окремими функціональними вузлами розірвати неможливо. Реалізація процесу діагностування реалізується у вигляді програми діагностування (ПД). При розробці програм діагностування використовують декілька методів. На основі цих методів розробляють декілька ПД і вирішують задачу пошуку оптимального варіанту цієї програми. Відомі результати, які пов'язують точності характеристик контрольно-вимірювальної апаратури з умовними ймовірностями помилок першого та другого роду. В даному дослідженні робимо припущення, що помилки першого та другого роду не дорівнюють нулю. В якості прикладу у дисертаційній роботі представлена діагностична модель адаптивної антенної системи (рис. 1.6).

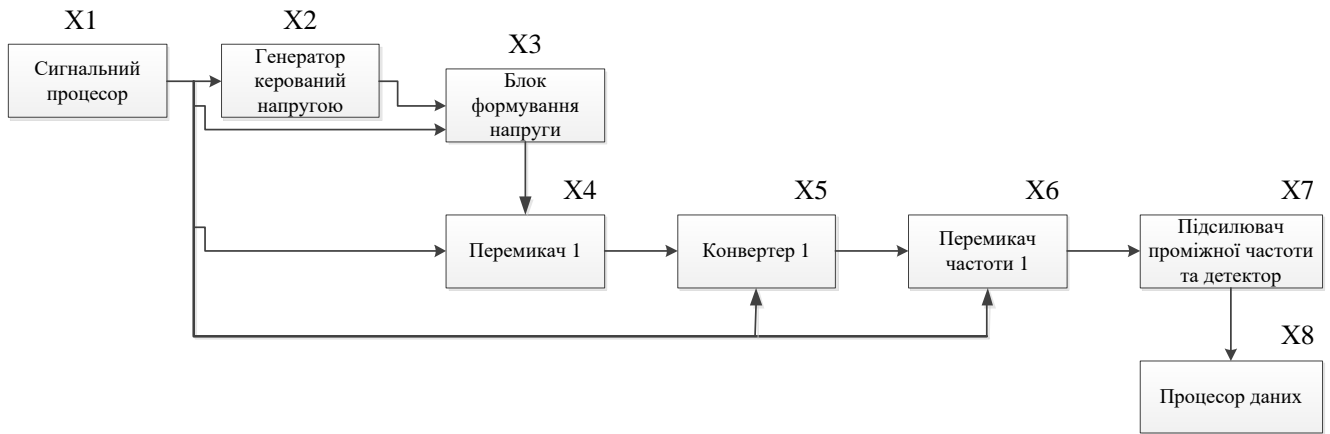


Рис. 1.6. Діагностична модель.

Приклад побудови ПД було розглянуто в [18], де обрано інженерний метод діагностики у разі відсутності помилок першого та другого роду. Відповідна ПД показана на рис. 1.7.

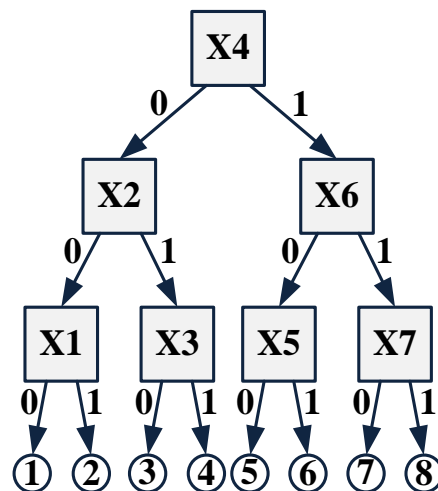


Рис. 1.7. Програма діагностики на основі інженерного методу.

Таким чином, якщо розглядати кожний функціональний елемент ДМ поза взаємозв'язком з іншими функціональними елементами, то працездатність i -го елемента буде характеризувати його вихідний параметр X_i . Якщо електричні зв'язки між функціональними елементами розірвати не можна, то тоді значення параметра X_i будуть характеризувати працездатність як i -го елемента, так і інших, пов'язаних з ним елементів.

Якщо діагностувати технічний стан РЕА за допомогою методу проміжних вимірювань, то тоді ПД реалізує послідовність вимірювальних операцій, необхідних для локалізації елемента, що відмовив [24–25].

У науково-технічній літературі процедуру розроблення ПД називають синтезом ПД. Для синтезу ПД використовують методи діагностування [122]. Методи діагностування містять формулювання правила, за якими можна створити (синтезувати) ПД. Процедура синтезу ПД містить у собі такі основні етапи:

- обстеження ОД і побудова ДМ об'єкта діагностування (у загальному випадку для ОД розробляють кілька ДМ з урахуванням подання РЕА на різних рівнях розукрупнення);

- обстеження ОД і складання таблиці даних про параметри \bar{X}_n ОД;

- вибір методу діагностування технічного стану ОД;

- синтез ряду ПД для відповідних методів діагностування;

- порівняльний аналіз ПД між собою і вибір найбільш ефективною ПД.

1.4 Огляд літератури у сфері експлуатації наземних засобів авіонавігації

Контроль під час експлуатації є важливою складовою частиною технології роботи НЗА і від підвищення його якості і ефективності залежить безвідмовність роботи обладнання і безпека та регулярність польотів.

Питання експлуатації, надійності, контролю і прогнозуванню технічних систем розглянуті у книгах Новікова В.С., Александрова А.И., Барлоу Р., Барзиловича Є.Ю., Гніденко Б.В., Ксенз С.П., Давидов П.С., Савіна С.К., Конахович Г.Ф. тощо.

У [77] розглянуто питання керування якістю експлуатації радіоелектронного обладнання аеродромів і злітних смуг. Викладені теоретичні основи експлуатації складного радіоелектронного обладнання з точки зору системного підходу до питань експлуатації. Розглянуті питання контролю технічного стану окремих систем і складних комплексів НЗА. Наведені приклади організації експлуатації на підприємствах ЦА.

У монографії [10] розглянуто зарубіжний досвід у питанні надійності «старіючих систем», приведено ряд математичних моделей корисних для рішення проблем надійності. Ці моделі носять ймовірнісний характер, коли на основі

інформації і початкових розподілів, таких як розподілу часу безвідмовної роботи, роблять висновки відносно часу безвідмовної роботи системи, оптимальної побудови системи тощо. Статистичні проблеми такі як оцінка часу безвідмовної роботи елементу або системи за результатами випробувань у книзі не розглянуто. Значна увага приділена розгляду моделей експлуатації і їх оптимізації. Окремо розглянуті ймовірнісні моделі складних систем (з використанням марківських і напівмарківських процесів). Приведені кількісні співвідношення між надійністю системи і надійністю її елементів. Автори наводять приклади задач для оптимізації термінів профілактичних робіт (планове ТО) та викладають питання оптимального резервування складних систем.

У книзі [97] викладенні питання теорії і практики експлуатації радіотехнічних комплексів. У першій частині книги розглянуті основні положення теорії експлуатації, характеристики і критерії, що використовуються при оцінці стану радіотехнічних систем у різних режимах, приведено графічні схеми переходу обладнання з одного стану експлуатації в інший і роботи, що при цьому виконуються. У другій частині розглянуті найбільш доцільні шляхи і методи організації технічного обслуговування, ремонту і зберігання, способи перевірки і оцінки технічного стану окремих пристроїв, систем і комплексів в цілому. Теоретичні питання ілюстровані прикладами і розрахунками складних радіотехнічних систем і комплексів.

У книзі [106] викладенні основні поняття діагностики радіоелектронних пристроїв. Наведений ряд задач теорії дискретного пошуку, що дозволяють побудувати модель РЕА та близькі до оптимальних по тривалості процедури пошуку у формі гілок логічних можливостей. Особлива увага приділена розширенню простору станів по відношенню до схем РЕА при роздільному врахуванні обривів та замикань, легко замінних і ділянок, які виключаються зі схем. Описано характер дій та проявів розповсюдження відмов, пов'язаних з перевантаженнями і короткими замиканнями в електричних ланцюгах РЕА.

У книзі [84] розглянуті методи і засоби технічної діагностики РЕА, а також принципи вибору параметрів для визначення працездатності та алгоритмів

пошуку місця відмови у складних структурах. Наведені дані для розрахунків показників діагностування та параметрів процесу технічного обслуговування. Наведені методичні основи оцінки ефективності систем, об'єктів і засобів технічного діагностування.

У [28, 68] ставляться і вирішуються задачі визначення оптимальної організації обслуговування систем, при якій параметри, що характеризують якість роботи системи, приймають оптимальні значення. Описуються різноманітні способи (схеми) технічного обслуговування і приводиться порівняння цих схем. Приводиться класифікація відновлювальних робіт, що проводяться в процесі експлуатації технічних систем. Також дослідженні різні стратегії обслуговування, в яких передбачається проведення тільки відновлювальних робіт, що повністю відновлюють експлуатовані технічні пристрої.

У книзі [30] приведені основні поняття теорії ймовірності і математичної статистики, а також приведені основні властивості перетворень Лапласа. Запропоновані шляхи оцінки параметрів надійності на основі результатів випробувань, а також шляхи перевірки різного типу гіпотез про надійність. Значна увага приділена експоненціальному розподілу, який грає значну роль в теорії надійності. Розглянуті питання підвищення надійності шляхом резервування і відновлення. Представлені різноманітні результати, що відносяться до статистичних методів теорії надійності це все ілюстровано графіками і таблицями.

У публікації [3] проаналізовано способи підвищення надійності шляхом моніторингу та діагностики їх технічного стану. Попередити раптові несправності транспортних засобів можливо за допомогою вбудованих діагностичних систем. У статті проаналізовано існуючі бортові та стаціонарні системи діагностики. Наведено типи датчиків та їх сигнали, що використовуються для діагностики стану систем транспортних засобів. Визначено методи перетворення та обробки сигналів. Встановлено зв'язки структурних та діагностичних параметрів транспортних засобів. Автори запропонували спосіб вдосконалення бортової діагностичної системи за допомогою набору методів, правил та засобів,

необхідних для вимірювання параметрів роботи системи, перетворення їх у діагностичні параметри для оцінки технічного стану досліджуваної системи.

У статті [1] розглядаються системи управління діагностичними процесами в випробувальних лабораторіях. Розглянуто застосування вимог системи управління до обраного діагностичного процесу згідно з ISO 17025: 2017.

У публікації [6] йдеться про те, як досягнення діагностичних інструментів можна інтегрувати з програмним забезпеченням автоматичного тестування для створення всебічного тестового середовища та автоматизованого діагностування. Розглянуто ремонт сучасних складних технічних засобів, що вимагають високого рівня кваліфікації. Представлена вдосконалена методологія проектування діагностики складних технічних засобів.

У публікації [7] розглянуті різні економічні моделі діагностики та ремонту в процесі розробки, виробництві та підтримці. Розглянуто особливості використання вбудованих систем самотестування та автоматизовану діагностику.

У роботі [9] розглянута система моніторингу та діагностики визначена для запису аналогових та бінарних сигналів, що надходять від прямого вимірювання та за допомогою загальних стандартів зв'язку даних. Система призначена для встановлення в розподілених місцях поруч з електрообладнанням енергоблоків, за яким здійснюється моніторинг. Розглянуто метод полегшення первинного введення в дію електрообладнання енергоблоків, а також для проведення вимірювань та діагностики під час нормальної роботи блоку та аналізу несправних процесів та перехідних умов. Описано вибраний діагностичний процес, а ризики цього процесу аналізуються та оцінюються за допомогою матриці напів-кількісної оцінки ризиків.

У публікації [14] представлено веб-програмне забезпечення (DiagConsole), доступ до якого можна отримати дистанційно за допомогою веб-браузера. Програмне забезпечення збирає дані в режимі он-лайн та в режимі офлайн, оцінюючи показник стану обладнання, залишок терміну експлуатації та представляє тип технічного обслуговування, необхідного для його продовження.

Звіт про оцінку стану складається автоматично і може дуже добре замінити традиційну паперову базу даних.

У публікації [15] розглянуто поєднання різних типів методів якості та нечітких математичних інструментів, Досліджено конструкції відмовостійкості підходом Lean Six Sigma, а також аналіз за допомогою нечіткої експертної системи.

В цілому аналіз літератури в галузі проектування, розробки та модернізації систем експлуатації засобів НЗА та технологічних операцій в тому числі операцій діагностування показує, що незначна увага приділена питанням визначення їх ефективності з точки зору визначення їх статистичних характеристик у вигляді щільностей розподілу ймовірностей хоча найбільш повною характеристикою випадкових величин є саме вони.

1.5 Постановка задачі дисертаційної роботи

Проведений аналіз структури систем експлуатації засобів НЗА процесів експлуатації і видів робіт, що в неї входять, показує, що недостатньо вирішені завдання експлуатації нових систем НЗА в частині обґрунтування регламентів, процедур та параметрів діагностування технічного стану обладнання. В цілому питання технічної експлуатації нового та застарілого потребують нових підходів для прийняття рішень модернізації СЕ НЗА. В значній мірі питання впровадження нових засобів НЗА затримується недостатністю ресурсів в підприємствах з аеронавігаційного обслуговування польотів.

Стан засобів аеронавігації змінюється внаслідок відмов, пошкоджень та інших впливів, що має відображення на числових значеннях їх тактико-технічних параметрів та надійнісних характеристик. Проведений аналіз літературних джерел та досвід експлуатації НЗА показує, що в системі експлуатації витрати ресурсів на виконання технологічних процесів, окремі показники ефективності системи експлуатації є стохастичними. Під час вирішенні задач проектування та модернізації систем експлуатації у частині діагностування НЗА враховують зазвичай числові значення різного роду показників ефективності у вигляді

математичного сподівання. Але відомо, що ці статистичні параметри не є достатніми з точки зору характеристик випадкових подій. Таке протиріччя між об'єктивним характером показників СЕ і їх описом під час вирішення задач проектування та модернізації СЕ може призвести до додаткових витрат матеріальних ресурсів, зниженню ефективності СЕ та негативному впливу на безпеку та регулярність польотів.

Виходячи з цього для більш адекватного розгляду процесів експлуатації в тому числі діагностування та з урахуванням складних систем авіаційної техніки і забезпечення якості ТО відповідно до державних та міжнародних стандартів у сфері аеронавігаційного обслуговування та ЦА актуальною науково-технічною задачею є розробка методів визначення статистичних характеристик процедур діагностування наземних радіоелектронних засобів аеронавігації, що спрямоване на підвищення ефективності процедур діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації та підвищення ефективності СЕ в цілому.

Для досягнення наведеної мети в рамках цієї роботи вирішуються наступні задачі:

- аналіз складових елементів системи експлуатації НЗА (обладнання, документи, процеси);
- аналіз процедур та методів діагностування технічного стану НЗА;
- побудова моделей оцінки відповідності в системі експлуатації НЗА;
- обґрунтування доцільності використання щільності розподілу ймовірності показників ефективності СЕ для процесів діагностування;
- вирішення прямої задачі щодо визначення статистичних характеристик процедур діагностування;
- вирішення оберненої задачі щодо визначення статистичних характеристик процедур діагностування;
- розробка методики вирішення прямої задачі щодо визначення статистичних характеристик процедур діагностування;
- розробка методики вирішення оберненої задачі щодо визначення статистичних характеристик процедур діагностування.

Виконаємо математичне формулювання задачі дослідження у вигляді узагальнених функціоналів.

Нехай технічний стан НЗА характеризується сукупністю визначених ознак, які залежать від кількісних та якісних характеристик елементів апаратури. Функціональні елементи НЗА є взаємопов'язаними та взаємозалежними. Це визначає внутрішні властивості засобів. Загальне число станів НЗА визначається числом станів його функціональних елементів та числом їх зв'язків.

У загальному випадку НЗА може характеризуватися полем станів $S(t)$ та сукупністю вихідних сигналів $X(t)$. Поле сигналів є векторним і в ньому міститься інформація щодо технічного стану НЗА тому його можна вважати інформаційним полем $I(S)$.

Інформаційне поле станів існує об'єктивно незалежно від того проводиться діагностування чи ні. В процесі діагностування визначається сигнальне інформаційне поле $I(U)$, які відображаються в інформаційному полі $I(S)$, проте не повністю. Сигнальна інформація приймається, оброблюється та оцінюється на основі чого приймається рішення щодо технічного стану НЗА.

Розглянемо процес діагностування та відновлення працездатності НЗА на рівні узагальнених операторів. Для цього введемо наступні позначення: $O(t)$ – поле умов експлуатації; $N(t)$ – шуми та завади при чому $N_1(t)$ – адитивний шум, $N_2(t)$ – мультиплікативна завада; α та β – умовні ймовірності помилок першого та другого роду, що можуть мати місце під час контролю технічного стану; $P(t)$ – множина можливих програм діагностування НЗА; $M(t)$ – множина можливих параметрів контрольно вимірювальної апаратури для діагностування НЗА; $D(t)$ – вектор взаємо зв'язків елементів у внутрішній структурі НЗА.

У загальному випадку сигнальне інформаційне поле визначається як:

$$I(U) = V(S, O, N_2, \alpha, \beta, P, M, D) + N_1,$$

де V – узагальнений оператор, що характеризує взаємодію всіх елементів процесу діагностування та відновлення працездатності, у тому числі НЗА.

Процес вимірювання з використанням контрольно-вимірювальної апаратури характеризується обсягом інформації на виході вимірювального пристрою:

$$I^*(U)=W(I(U))=W(V(S, O, N_2, \alpha, \beta, P, M, D)+N_1),$$

де W – оператор, що характеризує процес визначення інформаційних характеристик протягом діагностування та відновлення працездатності НЗА.

В обчислювальному пристрої на базі $I^*(U)$ формується поле оцінок станів елементів НЗА:

$$I(S^*)=R(I^*(U))=R(W(V(S, O, N_2, \alpha, \beta, P, M, D)+N_1)),$$

де R – оператор, що характеризує визначення параметрів системи на основі отриманої інформації.

Оцінки станів елементів НЗА порівнюються з нормативними технічними параметрами $I(S_0)$ за допомогою оператора L , в наслідок чого визначається поточний стан елементів.

$$I^*(S^*)=L(I(S^*), I(S_0))=L(W(V(S, O, N_2, \alpha, \beta, P, M, D)+N_1), I(S_0)).$$

Операторне представлення процесу діагностування та відновлення працездатності дозволяє:

- формалізувати процес та структуру взагалом;
- визначити оператори перетворення інформації;
- оптимізувати процес діагностування.

Оскільки в досліджувальній структурі міститься інформація в якості критерію оптимізації можуть бути вибрані такі характеристики:

1. $\max I(S^*)$ – максимум інформації щодо поля параметрів.
2. $\max I^*(S^*)$ – максимум інформації щодо поля станів.
3. $\min (I(S^*) - I(S))$ – мінімально похибка визначення поля параметрів.

Під час вирішення задачі діагностування умовно можна виділити так звану пряму та так звану обернену задачу.

Розв'язання прямої задачі може бути представлено у вигляді наступного функціоналу:

$$\max I(S^*) = \max R(W(V(S, O, N_2, \alpha, \beta, P, M, D)+N_1)).$$

Цілком зрозуміло, що максимум інформації щодо поля параметрів, які у загальному випадку є випадковими величинами, міститься у щільності розподілу

ймовірності. Тому під час вирішення так званої прямої задачі діагностування у цій роботі буде знаходитися функціональна залежність саме для цієї характеристики.

Розв'язання оберненої задачі може бути представлено у вигляді наступного функціоналу:

$$\min (I(S^*) - I(S)) = R(W(V(S, O, N_2, \alpha_{\text{opt}}, \beta_{\text{opt}}, P, M, D) + N_1)) - I(S).$$

Тому в цій роботі будуть знаходитися такі значення умовних ймовірностей похибок першого та другого роду, які забезпечать найкраще значення показника ефективності у вигляді мінімізації тривалості пошуку несправного елемента (вартості та трудомісткості).

1.6 Висновки до розділу 1

1. Розглянуто організаційну структуру авіаційно-транспортної системи та проаналізовано основний склад НЗА, що наразі використовується у ЦА. Визначено, що в організаційній структурі провайдера 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 оцінюють технічний стан НЗА, у документах є плутанина термінів, зокрема АНО, АНС тощо, немає методичних документів щодо методичного супроводження процесів експлуатації в тому числі процесів діагностування. Міжнародні рекомендації ESARR є узагальненими і недостатньо імплементовані у діяльність підприємств АТС України.

3. У розділі сформульовані основні завдання дослідження, які спрямовані на розробку методів на визначення статистичних характеристик параметрів, що характеризують процес діагностування, що є підставою для можливості вирішення прямої та оберненої задач діагностування.

Список публікацій здобувача за матеріалами першого розділу

1. 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.
2. Зуєв О. В., Яшанов І. М., Мусієнко А. О. Особливості експлуатації сучасних засобів зв'язку, навігації та спостереження . *Проблеми інформатизації та управління*. 2013. № 44. С. 25 – 30.
3. Яшанов І.М., Заліський М.Ю. Ефективність процедур експертного оцінювання . *Електроніка та системи управління*. 2009. № 2 (20). С. 81 – 86.
4. 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*: Тезидоповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції: Запоріжжя, 19–21 вересня 2012 р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. С. 262 – 264.
5. Яшанов І.М., Німич В.В., Заліський М.Ю. Обґрунтування структури системи менеджменту якості. *Електроніка та системи управління*. 2008. №1 (15). С. 158 – 164.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ВИТРАТ В СИСТЕМІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАЗЕМНИХ ЗАСОБІВ АЕРОНАВІГАЦІЇ ПІД ЧАС ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТУВАННЯ

2.1 Побудова моделей оцінки відповідності в системі експлуатації наземних засобів аеронавігації

З точки зору системного підходу до вирішення задач діагностування пропонується вирішити задачу, як на рівні НЗА, так і на рівні СЕ в цілому. Розв'язуючи такі задачі на рівні СЕ, умовно можна перейти до процедури оцінки відповідності складових СЕ встановленим вимогам. Такий підхід не є прямим вирішенням задачі діагностування НЗА, але може бути напрямком для удосконалення системи науково-методичного супроводження експлуатації НЗА.

При розгляді СЕ в цілому, її елементів і технологічних процесів (ТП) будемо використовувати процесний підхід, який застосовується в стандартах ISO серії 9000. Такий підхід зокрема використовується в Інтегрованій системі управління ДП ОПР України «Украерорух» для опису функціонування складових організаційної структури. Згідно з ISO 9001: 2015 кожний процес характеризується входом, виходом, сукупністю технологічних операцій (ТХО) та вимогами до входу і виходу ТП, а також вимогами до сукупності ТХО [65]. У системах обслуговуючого типу входом є завдання споживачів (замовників) на виконання певної сукупності завдань щодо надання послуг із заданими вимогами. Виходом є виконані завдання, які характеризуються набором параметрів, що можуть відрізнятися від вихідних вимог споживачів. Узагальнена схема ТП наведена на рис. 2.1.

До складу опису технологічного процесу також входять ресурси (інфраструктура, робочі місця, персонал, засоби технологічного забезпечення, фінанси тощо), а також керуючі впливи на систему аеронавігаційного забезпечення польотів. Керуючими впливами можуть бути: розпорядження керівництва, плани, графіки, регламенти, нормативи, інформація, дані тощо [140]. Вважаємо, що вимоги до ТП в цілому формуються з урахуванням вимог до керуючих впливів, ресурсів та окремих ТХО. Окрім планових керуючих впливів,

що відповідають завданням підприємства, можливі додаткові керуючі впливи, що обумовлені нагальними потребами.

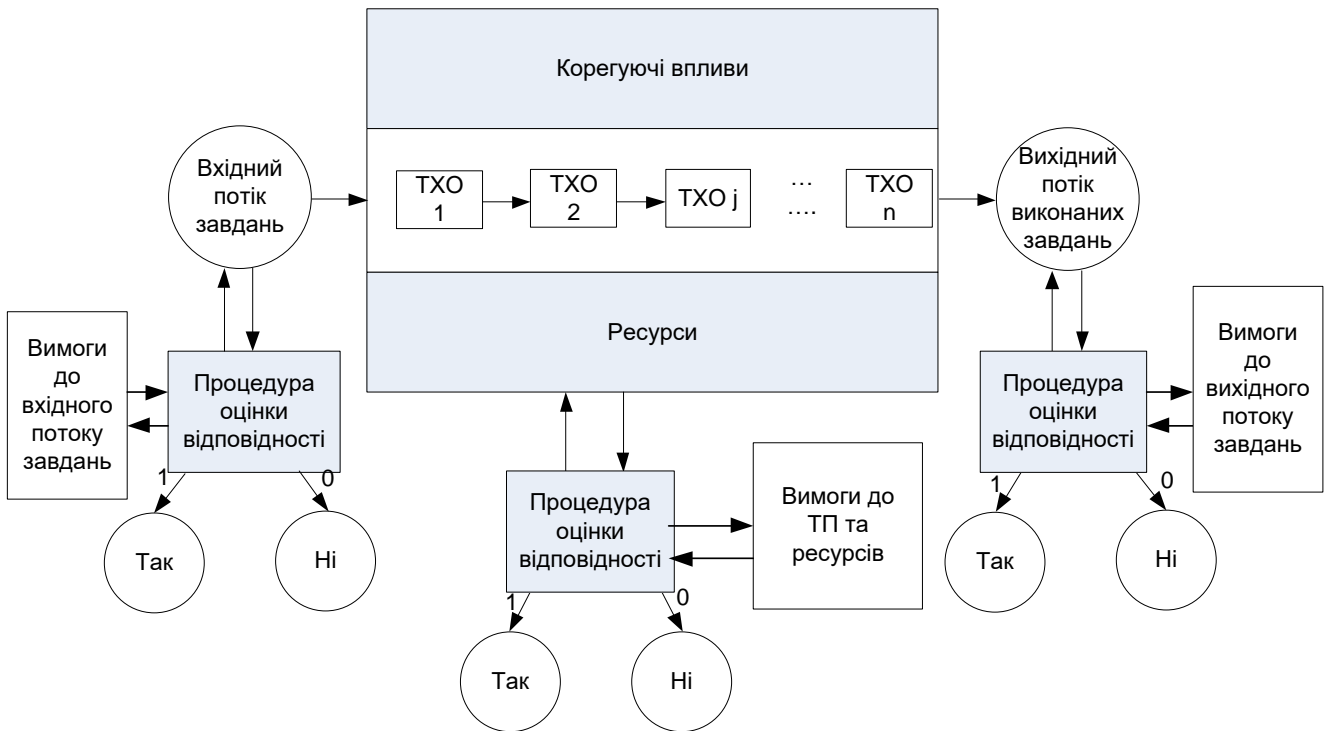


Рис. 2.1. Узагальнена схема оцінки відповідності складових СЕ встановленим вимогам

Основна мета функціонування підприємства з аеронавігаційного обслуговування польотів та ТП, що входять до її складу – це забезпечення досягнення цілі функціонування складної технологічної системи. У процесі функціонування аеронавігаційної системи необхідно виконувати операції з оцінки відповідності ТП, які є підставою для можливих керуючих впливів до аеронавігаційної системи. Визначення стану об'єкту розгляду щодо відповідності пов'язано зі значними витратами ресурсів. З урахуванням цього на рис. 2.1 в цілому можна виділити три складових для оцінки відповідності елементів СЕ встановленим вимогам – вхідний потік завдань, вихідний потік завдань та об'єднана сукупність керуючих впливів, набору ТХО і ресурсів, кожний з яких класифікуємо за двох-альтернативною схемою – відповідність встановленим вимогам є чи немає.

У випадку, коли об'єкт оцінки відповідності задовольняє встановленим вимогам, тоді процедура оцінки відповідності формує рішення «так» і видає

сигнал типу логічної одиниці, а у разі невідповідності – формує рішення «ні» і видає сигнал типу логічного нуля.

Розглядаючи рис. 2.1 припускаємо, що стан першого об'єкту оцінки відповідності залежить від того, як виконуються попередні ТХО, стан другого об'єкту оцінки відповідності залежить від того відповідають чи не відповідають встановленим вимогам корегуючи впливи, ресурси і ТХО, стан третього об'єкту відповідності залежить від станів першого і другого об'єктів. Схема формування станів об'єктів відповідності можна представити у вигляді табл. 2.1. Незважаючи на те, що кількість елементів системи дорівнює трьом одиницям в табл. 2.1 представлено чотири стани системи оцінки відповідності елементів СЕ, тобто діагностування її працездатності, тому що у випадку, коли перший або другий елемент системи не відповідає встановленим вимогам, тоді третій елемент теж не відповідає встановленим вимогам, оскільки є напряму залежним від станів першого та другого.

Таблиця 2.1

Можливі стани об'єктів контролю

Стан об'єктів оцінки відповідності		
Вхідний потік завдань	Об'єднана сукупність керуючих впливів, набору ТХО і ресурсів	Вихідний потік виконаних завдань
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

Загалом функціонування СЕ та її процесів спрямовано на забезпечення задоволення вимог замовників. Для забезпечення якості надання послуг замовникам можна проводити оцінку відповідності встановленим вимогам об'єктів з урахуванням таблиці станів і виконувати роботи з формування та реалізації керуючих впливів у тих випадках, коли третій об'єкт оцінки відповідності не відповідає вимогам. Керуючі впливи виконують відносно попередніх ТХО або відносно складових того ТП, що розглядається. При цьому можливі різні варіанти організації процесів оцінки відповідності в залежності від

вартості робіт з оцінки відповідності та імовірності виникнення невідповідностей у першому і другому об'єктах. Імовірнісні характеристики третього об'єкту обумовлені імовірнісними характеристиками перших двох об'єктів.

Для вибору раціонального варіанту організації робіт з оцінки відповідності можна використовувати показник ефективності у вигляді середньої вартості процедур оцінки відповідності. Критерієм ефективності варіанта організації робіт є мінімальне значення показника. Можливі і інші варіанти показника ефективності, такі як коефіцієнт готовності, коефіцієнт оперативної готовності, коефіцієнт технічного використання тощо. Однак у цій роботі розглянемо ефективність лише з точки зору експлуатаційних витрат.

Для визначення формули показника ефективності вважаємо, що задані середні вартості оцінки відповідності зазначених трьох об'єктів контролю відповідно C_1, C_2, C_3 . Будемо вважати, що C_2 набагато більше ніж C_1 та C_3 . Крім того, задані імовірності невідповідностей, що можуть виникати в першому та другому об'єктах контролю $p_0^{(1)}$ і $p_0^{(2)}$ відповідно. Імовірності того, що перший і другий об'єкти контролю відповідають встановленим вимогам визначаємо, як – $p_1^{(1)} = 1 - p_0^{(1)}$ та $p_1^{(2)} = 1 - p_0^{(2)}$, звідси:

$$p_0^{(3)} = 1 - p_1^{(3)}, p_1^{(3)} = p_1^{(1)} p_1^{(2)}.$$

У загальному випадку сумарні витрати є випадковою величиною, тому що випадковими є величини C_1 та C_2 . Вони характеризуються своїми ЩРІ $f(C_1), f(C_2)$ відповідно. Для знаходження ЩРІ сумарних витрат необхідно здійснити функціональні перетворення, що базуються на методах теорії ймовірності.

Розглянемо перший варіант організації процедури оцінки відповідності другого об'єкту контролю, коли контролюється тільки він сам. На інтервалі спостереження $t_{\text{спост}}$ сумарна кількість витрат визначається співвідношенням

$$C_{\Sigma} = p_1^{(1)} C_2 + p_0^{(1)} C_2 = C_2 (p_1^{(1)} + p_0^{(1)}) = C_2.$$

При цьому $f(C_{\Sigma}) = f(C_2)$.

Якщо математичне сподівання набагато більше дисперсії, то тоді доцільно оперувати з математичним сподіванням випадкових величин C_1 та C_2 і тоді сумарні витрати дорівнюють:

$$m_1(C_\Sigma / \text{вар1}) = p_1^{(1)}C_2 + p_0^{(1)}C_2 = C_2(p_1^{(1)} + p_0^{(1)}) = C_2.$$

Отже, у випадку першого варіанту середні витрати на контроль будуть дорівнювати середнім витратам на контроль другого об'єкту контролю.

Другий варіант – одночасно виконують оцінку відповідності для першого та третього об'єктів контролю, а за необхідністю (у випадку невідповідності потоку вхідних завдань) і другого об'єкту.

Середні витрати на контроль визначаються за формулою.

$$\begin{aligned} m_1(C_\Sigma / \text{вар2}) &= p_1^{(1)}p_1^{(3)}(C_1 + C_3) + p_1^{(1)}p_0^{(3)}(C_1 + C_3) + p_0^{(1)}p_1^{(2)}(C_1 + C_2 + C_3) + \\ &+ p_0^{(1)}p_0^{(2)}(C_1 + C_2 + C_3) = (C_1 + C_3)[p_1^{(1)}p_1^{(3)} + p_1^{(1)}p_0^{(3)}] + (C_1 + C_2 + \\ &+ C_3)[p_0^{(1)}p_1^{(2)} + p_0^{(1)}p_0^{(2)}] = (C_1 + C_3)p_1^{(1)}(p_1^{(3)} + p_0^{(3)}) + (C_1 + C_2 + C_3)p_0^{(1)}(p_1^{(2)} + p_0^{(2)}) = \\ &= (C_1 + C_3)p_1^{(1)} + (C_1 + C_2 + C_3)p_0^{(1)} = (C_1 + C_3)(1 - p_0^{(1)}) + (C_1 + C_2 + C_3)p_0^{(1)} = C_1 + C_3 + C_2p_0^{(1)}. \end{aligned}$$

Позначимо $C_{1,3} = C_1 + C_3$, тоді отримаємо:

$$m_1(C_\Sigma / \text{вар2}) = C_{1,3} + C_2p_0^{(1)}.$$

У загальному випадку наведена вище формула може бути представлена наступним чином

$$C_\Sigma = C_1 + C_3 + p_0^{(1)}C_2.$$

Якщо відомі ЩРІ витрат на контроль першого, другого та третього елементу $f(C_1)$, $f(C_2)$, $f(C_3)$, то можна знайти ЩРІ сумарних витрат $f(C_\Sigma)$.

Відповідно до умови нормування можна записати

$$\int f(C_\Sigma)dC_\Sigma = \int \int \int f(C_1)f(C_2)f(C_3)dC_1dC_2dC_3.$$

Після математичних спрощень отримаємо узагальнений вираз ЩРІ сумарних витрат.

$$f(C_\Sigma) = \int \int f(C_1)f(C_2)f(C_3) \left. \frac{dC_3}{dC_\Sigma} \right| dC_1dC_2.$$

При цьому обернена функція має вигляд

$$C_3 = C_\Sigma - C_1 - p_0^{(1)} C_2.$$

Якобіан перетворення

$$\frac{dC_3}{dC_\Sigma} = 1.$$

Тоді ЩРІ сумарних витрат матиме вигляд

$$f(C_\Sigma) = \int_0^\infty \int_0^\infty f(C_1) f(C_2) f(C_3) \Big|_{C_3=C_\Sigma-C_1-p_0^{(1)}C_2} dC_1 dC_2.$$

Отже, у випадку другого варіанту середні витрати на контроль лінійно залежать від витрат на контроль кожного елементу об'єкту контролю та ймовірності невідповідності першого об'єкту.

Третій варіант – контролюється третій елемент процесу, а у випадку його невідповідності – другий елемент технологічного процесу. Граф схеми виконання робіт із оцінки відповідності наведений на рис. 2.2.

Середні витрати на контроль визначаються за формулою.

$$\begin{aligned} m_1(C_\Sigma / \text{варЗ}) &= p_1^{(3)} C_3 + (1 - p_1^{(3)}) p_1^{(2)} (C_2 + C_3) + (1 - p_1^{(3)}) p_0^{(2)} (C_2 + C_3) = \\ &= p_1^{(3)} C_3 + (C_2 + C_3) (p_0^{(2)} + p_1^{(2)}) p_0^{(3)} = p_1^{(3)} C_3 + (C_2 + C_3) p_0^{(3)} = p_1^{(1)} p_1^{(2)} C_3 + \\ &+ (1 - p_1^{(1)} p_1^{(2)}) (C_2 + C_3) = C_2 + C_3 - C_2 p_1^{(1)} p_1^{(2)} = C_{2,3} - C_2 p_1^{(2)} (1 - p_0^{(1)}). \end{aligned}$$

$$C_{2,3} = C_2 + C_3.$$

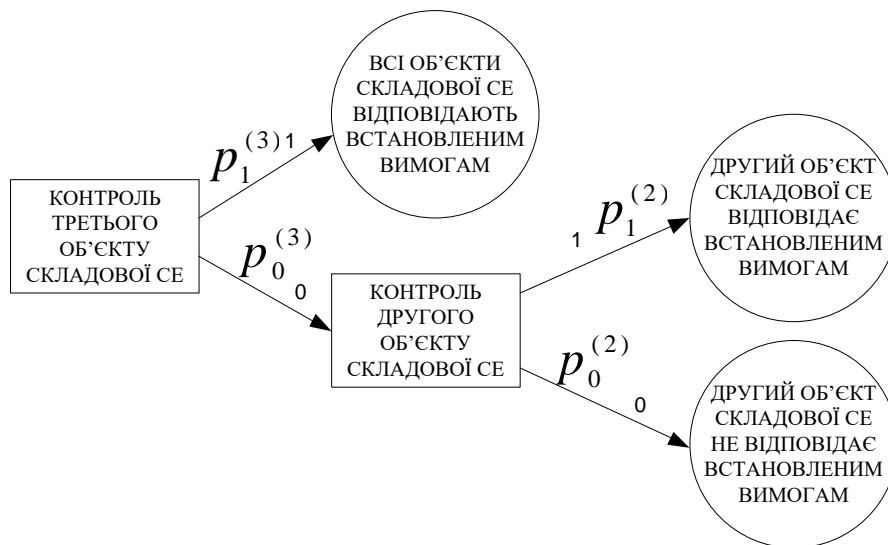


Рис. 2.2. Граф схеми оцінки відповідності за третім варіантом.

У загальному випадку наведена вище формула може бути представлена наступним чином

$$C_{\Sigma} = C_2 + C_3 - C_2 p_1^{(2)} (1 - p_0^{(1)}) = C_3 + C_2 (1 - p_1^{(2)} + p_1^{(2)} p_0^{(1)}).$$

Якщо відомі ЩРІ витрат на контроль першого, другого та третього елементу $f(C_1)$, $f(C_2)$, $f(C_3)$, то можна знайти ЩРІ сумарних витрат $f(C_{\Sigma})$.

Відповідно до умови нормування можна записати

$$\int f(C_{\Sigma}) dC_{\Sigma} = \iint f(C_2) f(C_3) dC_2 dC_3.$$

Після математичних спрощень отримаємо узагальнений вираз ЩРІ сумарних витрат.

$$f(C_{\Sigma}) = \int f(C_2) f(C_3) \frac{dC_2}{dC_{\Sigma}} dC_3.$$

При цьому обернена функція має вигляд

$$C_2 = \frac{C_{\Sigma} - C_3}{(1 - p_1^{(2)}) + p_1^{(2)} p_0^{(1)}}.$$

Якобіан перетворення

$$\frac{dC_2}{dC_{\Sigma}} = \frac{1}{1 - p_1^{(2)} + p_1^{(2)} p_0^{(1)}}.$$

Тоді ЩРІ сумарних витрат матиме вигляд

$$f(C_{\Sigma}) = \frac{1}{1 - p_1^{(2)} + p_1^{(2)} p_0^{(1)}} \int_0^{\infty} f(C_3) f(C_2) \Big|_{C_2 = \frac{C_{\Sigma} - C_3}{1 - p_1^{(2)} + p_1^{(2)} p_0^{(1)}}} dC_3.$$

Отже, у випадку третього варіанту середні витрати на контроль лінійно залежать від витрат на контроль другого та третього елементу процесу та ймовірності невідповідності першого об'єкту процесу і ймовірності відповідності другого об'єкту.

Четвертий варіант – контролюється перший об'єкт складової СЕ, у випадку його невідповідності другий об'єкт, у випадку відповідності – третій об'єкт технологічного процесу. Граф схеми виконання робіт з оцінки відповідності наведений на рис. 2.3.

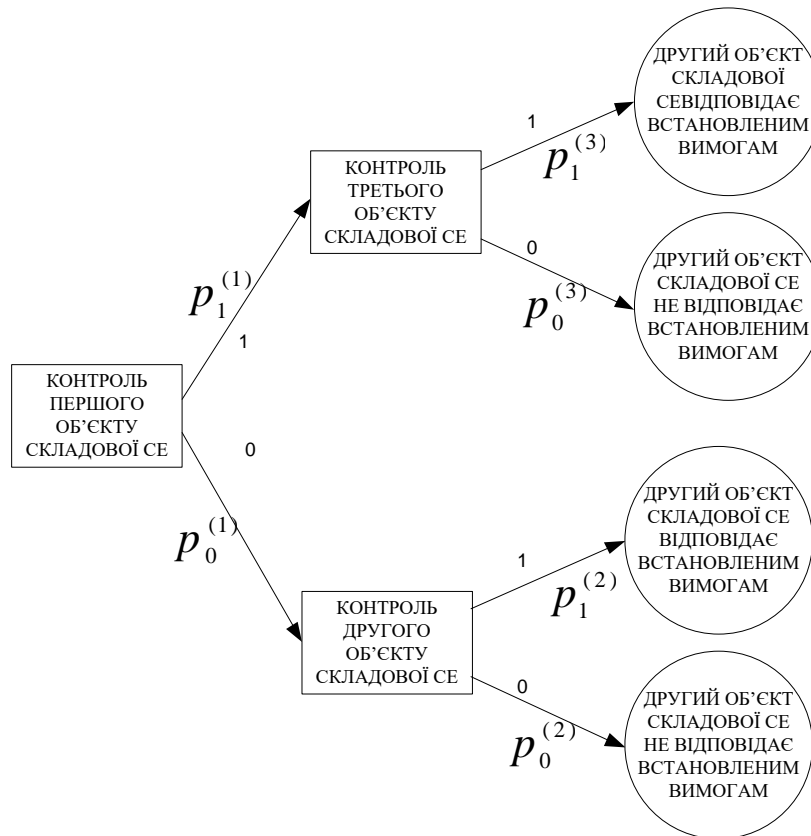


Рис. 2.3. Граф схеми оцінки відповідності за четвертим варіантом.

Середні витрати на контроль визначаються за формулою.

$$m_1(C/\text{вар}4) = p_1^{(1)} p_1^{(3)} (C_1 + C_3) + p_1^{(1)} p_0^{(3)} (C_1 + C_3) + p_0^{(1)} p_1^{(2)} (C_1 + C_2) + p_0^{(1)} p_0^{(2)} (C_1 + C_2) = \\ = (C_1 + C_3) p_1^{(1)} + (C_1 + C_2) p_0^{(1)} = (C_1 + C_3)(1 - p_0^{(1)}) + (C_1 + C_2) p_0^{(1)} = C_{1,3}(1 - p_0^{(1)}) + C_{1,2} p_0^{(1)}.$$

У загальному випадку наведена вище формула може бути представлена наступним чином

$$C_{\Sigma} = (C_1 + C_3) - (1 - p_0^{(1)}) + C_{1,2} p_0^{(1)} = C_1 + C_2 p_0^{(1)} + C_3 (1 - p_0^{(1)}).$$

Якщо відомі ЩРІ витрат на контроль першого, другого та третього елементу $f(C_1)$, $f(C_2)$, $f(C_3)$, то можна знайти ЩРІ сумарних витрат $f(C_{\Sigma})$.

Відповідно до умови нормування можна записати

$$\int f(C_{\Sigma}) dC_{\Sigma} = \int \int \int f(C_1) f(C_2) f(C_3) dC_1 dC_2 dC_3.$$

Після математичних спрощень отримаємо узагальнений вираз ЩРІ сумарних витрат.

$$f(C_{\Sigma}) = \int \int f(C_1) f(C_2) f(C_3) \frac{dC_3}{dC_{\Sigma}} dC_1 dC_2.$$

При цьому обернена функція має вигляд

$$C_3 = \frac{C_\Sigma - C_1 - C_2 p_0^{(1)}}{1 - p_0^{(1)}}.$$

Якобіан перетворення

$$\frac{dC_3}{dC_\Sigma} = \frac{1}{1 - p_0^{(1)}}.$$

Тоді ЩРІ сумарних витрат матиме вигляд

$$f(C_\Sigma) = \frac{1}{1 - p_0^{(1)}} \int_0^\infty \int_0^\infty f(C_1) f(C_2) f(C_3) \Big|_{C_3 = \frac{C_\Sigma - C_1 - C_2 p_0^{(1)}}{1 - p_0^{(1)}}} dC_1 dC_2.$$

Отже, у випадку четвертої стратегії середні витрати на контроль лінійно залежать від витрат на контроль всіх елементів процесу та ймовірності невідповідності першого об'єкту контролю.

Третій та четвертий варіанти оцінки відповідності відрізняються послідовністю виконання контролю.

Проаналізуємо залежності середніх витрат на оцінку відповідності кожного з варіантів від ймовірності невідповідностей в першому об'єкті моделі $p_0^{(1)}$ (рис. 2.4). Ці графіки були отримані при наступних значеннях середніх вартостей контролю, які будемо виміряти в умовних одиницях (у.о.), та ймовірності відповідностей другого об'єкту $C_1 = 10$ у.о., $C_2 = 100$ у.о., $C_3 = 20$ у.о., $p_1^{(2)} = 0.6$.

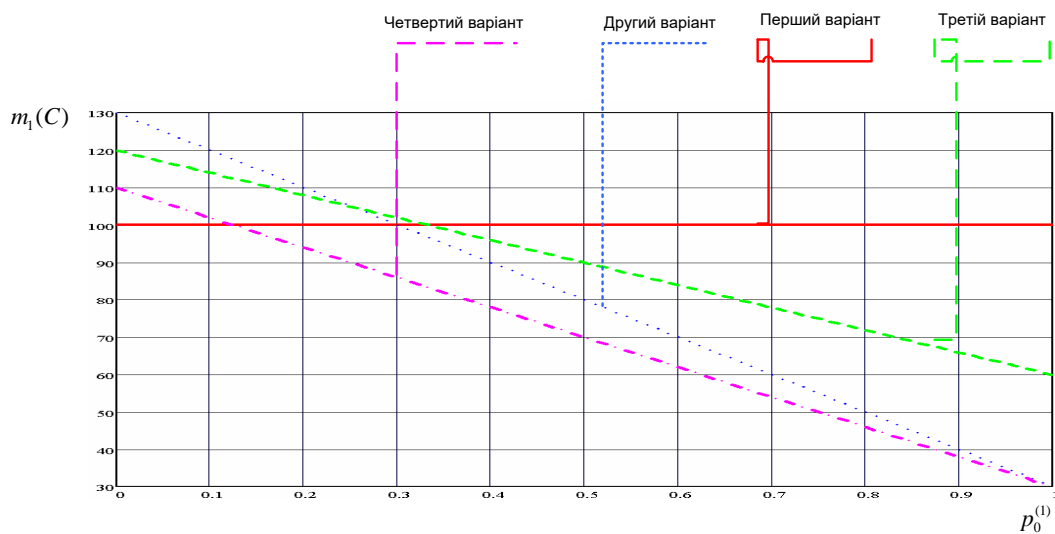


Рис. 2.4. Залежність середніх витрат кожного з варіантів від ймовірності невідповідностей в першому елементі моделі $p_0^{(1)}$.

На рис. 2.4 можна побачити, що при $p_0^{(1)} \leq 0,12$ найменші витрати на контроль процесу в цілому буде забезпечувати перший варіант, а при $p_0^{(1)} > 0,12$ випадку – четвертий варіант.

Залежність середніх витрат на контроль кожного з варіантів від вартості оцінки відповідності другого елементу моделі C_2 зображена на рис. 2.5. Графіки на рис. 2.5 були отримані при наступних значеннях вартостей оцінки відповідності та ймовірностей відповідностей $C_1 = 10$ у.о., $C_3 = 20$ у.о., $p_0^{(1)} = 0,1$, $p_1^{(2)} = 0,6$.

На рис. 2.5 можна побачити, що при $C_2 \leq 100$ у.о. найменші витрати на оцінку відповідності всього процесу буде забезпечувати перший варіант, а при $C_2 > 100$ у.о. – четвертий варіант [139, 140].

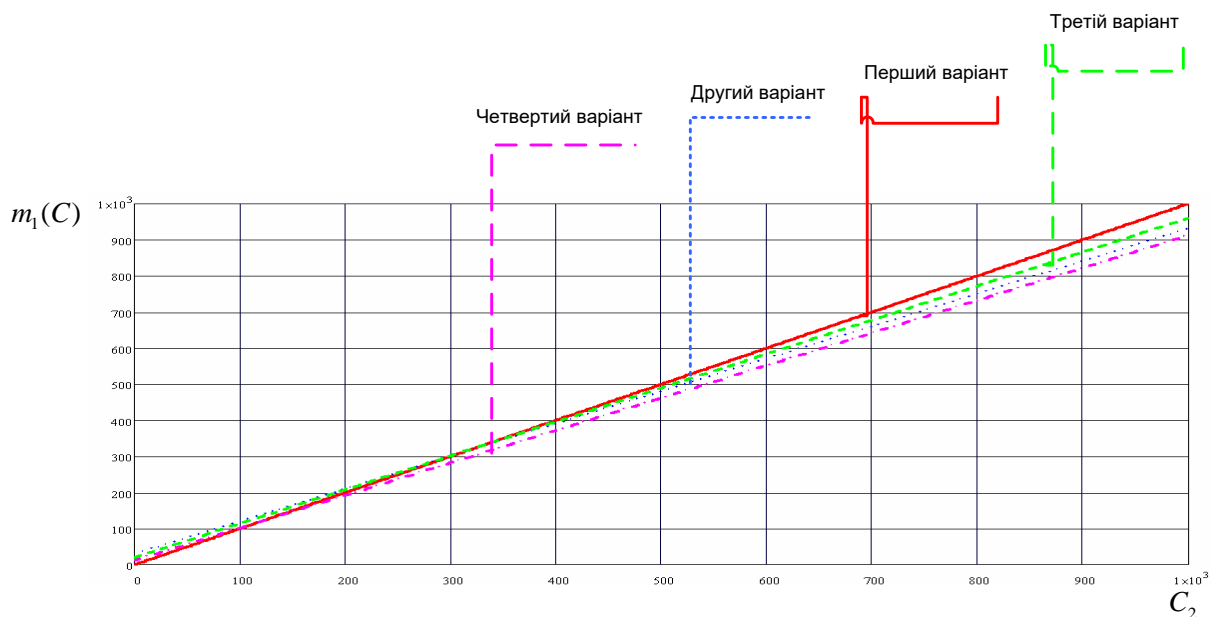


Рис. 2.5. Залежність середніх витрат на контроль кожного з варіантів від вартості оцінки відповідності другого елементу моделі C_2

2.2 Імовірісно-подієва модель процесу діагностування

Для удосконалення науково-методичного супроводження процесів експлуатації, у тому числі діагностування, може бути використана імовірісно-подієва модель. Ця модель відображає реальні ситуації, що можуть виникати в експлуатаційних підприємствах у процесі діагностування та відновлення

працездатності НЗА. Елементами цієї моделі будуть: можливі події, їхні ймовірності, а також експлуатаційні витрати, пов'язані з ними [127; 128].

Початковими даними для складання ймовірнісно-подієвої таблиці будемо вважати наступні:

1. Щільність розподілу ймовірності тривалості діагностування $f(t_d)$.
2. Щільність розподілу ймовірності експлуатаційних витрат пов'язаних з діагностуванням та відновленням працездатності НЗА $f(C_d)$.
3. Резерв ресурсів на виконання ремонтних робіт C .

Елементи моделі представимо у вигляді табл. 2.2.

У таблиці зроблені такі позначення: a та b – параметри моделі витрат, $h(t)$ – функція Хевісайда. В загальному випадку витрати на діагностування та відновлення працездатності C та додаткові витрати $C_{\text{дод}}$ є випадковими величинами. Тоді середні витрати з урахуванням параметрів p та q і припущенні про незалежність випадкових величин C та $C_{\text{дод}}$ можуть бути представлені в наступному вигляді:

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

де $m_1(C)$ та $m_1(C_{\text{дод}})$ – математичні сподівання витрат ресурсів достатніх та додаткових відповідно.

Таблиця 2.2

Елементи ймовірнісно-подієвої моделі

Можлива подія	Ймовірність 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: $C_{\text{дод}} = a(t_d - b)^2 h(t_d - b)$

Ймовірності подій визначаємо відповідно до формул:

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

Цілком зрозуміло, що у випадку перевищення витрат на діагностування рівня запланованих витрат підприємство експлуатант буде нести додаткові витрати, пов'язані з кредитами, перерозподілом фінансових коштів з інших процесів експлуатації тощо.

Щільність розподілу ймовірностей сумарних витрат на діагностування може бути визначена 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 $f(C, C_{\text{дод}})$ представимо у вигляді добутку одновимірних щільностей розподілу ймовірностей випадкових величин C та $C_{\text{дод}}$:

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

Звідси отримаємо:

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

При цьому в отриману формулу необхідно підставити щільність розподілу ймовірностей додаткових витрат $f(C_{\text{дод}})$. Ця щільність може бути розрахована з використанням апарату перетворення випадкових величин відповідно до заданої моделі додаткових витрат.

Запропонована імовірно-подієва модель може бути використана під час проектування та модернізації СЕ НЗА з метою оцінки можливих додаткових витрат та їх впливу на фінансовий стан підприємства з аеронавігаційного обслуговування польотів.

2.3 Аналіз експлуатаційних витрат під час відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації

Розглянемо приклад розрахунку для підтвердження необхідності мати статистичні характеристики затрат ресурсів більших ніж математичне сподівання. Цей приклад відповідає першому пункту наукової новизни.

Зазвичай кількість відмов НЗА на певний період спостереження описується законом Пуассона [49], якщо щільності розподілу імовірностей (ЩРІ) напрацювань на відмову мають експоненціальну модель. У випадках, коли інтенсивності відмов або пошкоджень в НЗА достатньо великі, тобто кількість подій відмов або пошкоджень достатньо велика, тоді дискретний розподіл кількості подій може бути збігатися до нормального розподілу. Для спрощення розрахунків у цій роботі будемо використовувати ЩРІ довільного вигляду, яка як і нормальна ЩРІ має коефіцієнт асиметрії рівний нулю. Розглянемо приклад розрахунку витрат ресурсів на діагностування та відновлення працездатності НЗА, що пов'язаний з обґрунтуванням підходу для більш адекватного врахування статистичних характеристик витрат, що мають місце в СЕ НЗА під діагностування та відновлення працездатності радіоелектронних засобів [133].

Нехай є ремонтний орган та обладнання, що необхідно відремонтувати. Нехай за час спостереження $T_{\text{спост.}}$ маємо такий розподіл числа відмов НЗА, який наведений на рис. 2.6. Припустимо, що середня вартість одного ремонту дорівнює $C_{\text{рем.}} = 10y.o.$

Тоді з урахуванням рис. 2.6 будемо мати такий розподіл витрат ресурсів на ремонт НЗА $P_1(C_{\Sigma}/T_{\text{спост.}})$, як це показано на рис. 2.7.

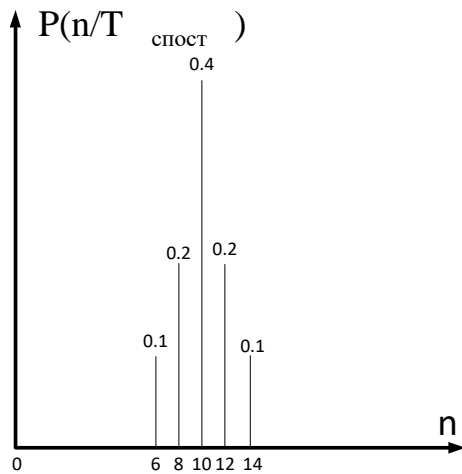


Рис. 2.6. Приклад розподілу кількості відмов

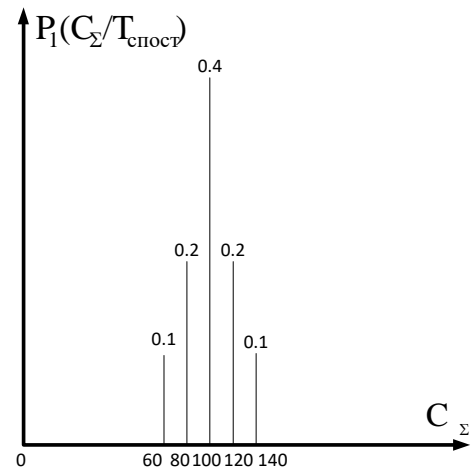


Рис. 2.7. Розподіл витрат ресурсів на ремонт НЗА

Вирішимо завдання визначення нового розподілу витрат на ремонт НЗА $P_2(C_\Sigma/T_{\text{спост}})$, якщо маємо вихідний розподіл витрат $P_1(C_\Sigma/T_{\text{спост}})$ та різні варіанти фінансування ремонтних робіт — Варіант А та Варіант Б.

Варіант А. Системі експлуатації визначили потрібний рівень витрат на ремонт на рівні математичного сподівання $m_1(C_\Sigma/\text{Вар.А})$ з урахуванням розподілу витрат $P_1(C_\Sigma/T_{\text{спост}})$. Тобто проектне рішення щодо витрат ресурсів на ремонт дорівнює $m_1(C_\Sigma/\text{Вар.А}) = 100\text{у.о.}$, яке визначаємо наступним чином

$$m_1(C_\Sigma/\text{Вар.А}) = 0,1 * 60\text{у.о.} + 0,2 * 80\text{у.о.} + 0,4 * 100\text{у.о.} + 0,2 * 120\text{у.о.} + 0,1 * 140\text{у.о.} = 100\text{у.о.}$$

Вважаємо, що в системі експлуатації є достатня кількість ресурсів, щоб виконати ремонт НЗА в межах від 60 до 140 у.о. в залежності від того, скільки відмов сталося на інтервалі спостереження $T_{\text{спост}}$. При цьому очікуваний проектний обсяг витрат дорівнює $m_1(C_\Sigma/\text{Вар.А}) = 100\text{у.о.}$

Варіант Б. Система має певний резерв ресурсів на виконання ремонтних робіт. Якщо фактичні витрати ресурсів будуть більші ніж $C_{\text{резерв}}$, тоді в СЕ залучають кредитні кошти, які потім потрібно повернути з обумовленим рівнем відсотків $M\%$. При розрахунках розглянемо варіанти відсоткових ставок $M\%$ на рівнях – 0%, 2%, 5%, 7%, 10%, 20%, 30%, 40-100%. Звісно, що в такому випадку в СЕ маємо додаткові витрати ресурсів на ремонт НЗА. Зазначимо, що наведений

перелік відсоткових ставок для процедур діагностування та відновлення працездатності і поточного ремонту в цілому можуть мати різні функціональні залежності виходячи з недостатнього обсягу ресурсів для наведених процедур.

Визначимо математичні сподівання витрат ресурсів на ремонт НЗА $m_1(C_\Sigma / \text{Вар.Б})$ для відсоткових ставок від 0-100% і різних значень запасу ресурсів $C_{\text{резерв}} = 60; 80; 100; 110; 120$ у.о.

З урахуванням резерву розподіл витратних коштів зміниться і набуде іншої форми $P_2(C_\Sigma / T_{\text{спост}})$, що представлено на рис.2.7.

Нагадаємо, що для варіанту А проєктне рішення щодо майбутніх витрат ресурсів в СЕ обране як $m_1(C_\Sigma / \text{Вар.А}) = 100$ у.о.

Нехай в СЕ маємо запас ресурсів $C_{\text{резерв}} = 60$ у.о. і рівень відсоткової ставки $M\%$ дорівнює 0% .

Якщо на інтервалі $T_{\text{спост}}$ буде потрібно витрати 60 у.о., то ці ресурси в СЕ будуть – $C_{\text{рез}} = 60$ у.о. Ймовірність такого випадку – $0,1$. Якщо на інтервалі $T_{\text{спост}}$ необхідно буде витрати 80 у.о. то беремо з запасу ресурсів $C_{\text{рез}} = 60$ у.о. і додаємо 20 у.о. без відсотків на додаткові витрати. Ця подія з урахуванням рис 2.6 має ймовірність $0,2$. Якщо необхідно витратити 100 у.о., тоді беремо з запасу $C_{\text{рез}} = 60$ у.о. і додаємо 40 у.о. без відсотків із збільшенням ресурсів. Ця подія з урахуванням рис 2.7 має ймовірність $0,4$ і так далі. Тоді математичне сподівання витрат ресурсів визначаємо як

$$m_1(C_\Sigma / \text{Вар.Б}; C_{\text{рез}} = 60 \text{ у.о.}; M = 0\%) = 0,1 * 60 + 0,2(60 + 20) + 0,4(60 + 40) + 0,2(60 + 60) + 0,1(60 + 80) = 100 \text{ у.о.}$$

Цей приклад відповідає випадку, коли ремонтній організації надавали відсутні ресурси без відсотків.

Нехай тепер відсоткова ставка M дорівнює 5% . Тоді отримаємо

$$m_1(C_\Sigma / \text{Вар.Б}; C_{\text{рез}} = 60 \text{ у.о.}; M = 5\%) = 0,1 * 60 + 0,2(60 + 20 * 1,05) + 0,4(60 + 40 * 1,05) + 0,2(60 + 60 * 1,05) + 0,1(60 + 80 * 1,05) = 102 \text{ у.о.}$$

Особливу уваги привертає варіант, коли $C_{рез} = 100 \text{ у.о.}$. Тобто СЕ налаштована на рівень витрат, що відповідає проектному рішенню $m_1(C_{\Sigma} / \text{Вар.А}) = 100 \text{ у.о.}$ Тоді для витрат за $T_{\text{спост.}}$ рівних 60 у.о., 80 у.о. і 100 у.о. ресурсів на рівні $C_{рез} = 100 \text{ у.о.}$ буде достатньо. Ймовірність такої події дорівнює 0.7. Наведемо дві формули для варіанту, коли $C_{рез} = 100 \text{ у.о.}$, а рівні відсоткових ставок $M\%$ дорівнює 0% і 10%

$$m_1(C_{\Sigma} / \text{Вар.Б}; C_{рез} = 100 \text{ у.о.}; M = 0\%) = 0,7 * 100 + 0,2(100 + 20) + 0,1(100 + 40) = 108 \text{ у.о.},$$

$$m_1(C_{\Sigma} / \text{Вар.Б}; C_{рез} = 100 \text{ у.о.}; M = 10\%) = 0,7 * 100 + \\ + 0,2(100 + 20 * 1,1) + 0,1(100 + 40 * 1,1) = 108,8 \text{ у.о.}$$

У табл. 2.3 наведені дані розрахунків сумарних витрат на поточний ремонт НЗА для варіантів, коли $M\%$ змінюється в межах 0-100%, а $C_{резерв}$ дорівнює 60, 80, 100, 110 і 120 у.о.

Таблиця 2.3

Результати розрахунків сумарних витрат на ремонт НЗА

$M\%$	$C_{резерв} = 60 \text{ у.о.}$	$C_{резерв} = 80 \text{ у.о.}$	$C_{резерв} = 100 \text{ у.о.}$	$C_{резерв} = 110 \text{ у.о.}$	$C_{резерв} = 120 \text{ у.о.}$
0	100	102	108	115	122
2	100,8	102,44	108,16	115,1	122,04
5	102	103,1	108,4	115,25	122,1
7	102,8	103,54	108,56	115,351	122,14
10	104	104,2	108,8	115,5	122,2
20	108	106,4	109,6	116	122,4
30	112	108,6	110,4	116,5	122,6
40	116	110,8	111,2	117	122,8
50	120	113	112	117,5	123
60	124	115	112,8	118	123,2
70	128	117,4	113,6	118,5	123,4
80	132	119,6	114,4	119	123,6
90	136	121,8	115,2	119,5	123,8
100	140	124	116	120	124

На основі результатів розрахунків сумарних витрат на ремонт, що наведені у табл. 2.3, можна зробити де-які висновки. Для будь якого фіксованого значення $C_{резерв}$ зі збільшенням відсоткової ставки $M\%$ середні сумарні витрати збільшуються. Для $C_{резерв} = 60 \text{ у.о.}$ у межах 0%-10% сумарні витрати на ремонт є

найменшими серед усіх результатів. Такий же ефект маємо для $C_{\text{резерв}} = 80$ у.о. коли $M\%$ коливається у межах 20%-40%. Для $C_{\text{резерв}} = 100$ у.о. середні витрати на ремонт найменші, коли $M\%$ коливається у межах 50%-100%. Таким чином, використовувати традиційне проектне рішення на рівні математичного сподівання витрат ресурсів на ремонт є оптимальним для великих відсоткових ставок. Отже, для рівня відсоткових ставок у межах від 0% до 50% доцільніше використовувати резерв ресурсів на поточний ремонт, які менш чим математичне сподівання витрат, що очікуються (мається на увазі варіанти $C_{\text{резерв}} = 60$ у.о., 80 у.о.). Таким чином, традиційний підхід щодо планування рівня витрат ресурсу на поточний ремонт НЗА не є оптимальним.

В загальному випадку доцільно мати співвідношення, за допомогою яких можна було би вирішити задачу оптимізації резервного обсягу ресурсів $C_{\text{резерв}}$ підчас проектування підсистеми поточного ремонту в СЕ НЗА. При цьому зробимо припущення про те, що ЩРІ сумарних витрат на поточний ремонт за певний час спостереження $f(C_{\Sigma} / \vec{\Theta}; T_{\text{спост.}})$ має неперервний вид. Таке припущення може існувати незважаючи на те, що розподіл ймовірностей кількості відмов за термін $T_{\text{спост.}}$ є дискретним, але витрати ресурсів на виконання окремих технологічних операцій має власні ЩРІ з неперервним видом функцій. Також маємо на увазі, що вектор параметрів $\vec{\Theta}$ включає опис моделі кількості відмов за інтервал $T_{\text{спост.}}$ та параметри ЩРІ витрат ресурсів на один ремонт.

Приведемо формулу для розрахунку $m_1(C_{\Sigma} / \text{Вар.Б}; C_{\text{рез.}}; T_{\text{спост.}}; K; \vec{\Theta})$ за умови, що затрати ресурсів на ремонт за час $T_{\text{спост.}}$ є безперервними та описуються за допомогою ЩРІ – $f(C_{\Sigma} / \vec{\Theta}; T_{\text{спост.}})$.

Коефіцієнт K – це множник збільшення ресурсів, яких не вистачає виходячи з відсоткової ставки $M\%$

$$K = \frac{100\% + M\%}{100\%} = 1 + \frac{M\%}{100},$$

де $M\%$ – відсоткова ставка залучення додаткових ресурсів.

Для аналітичного вирішення задачі обґрунтування оптимального рівня витрат ресурсів на ремонт розглянемо дві змінні X_1 та X_2 . Вважаємо, що змінна X_1 дозволяє оцінити математичне сподівання витрат ресурсів на поточний ремонт за умов, що планується резервування коштів за традиційною методикою (математичне сподівання вартості ремонту де $C_{\text{рез.пр.}}$ – відповідає проектному рішенню).

Змінна X_2 призначена для вирішення задачі мінімізації витрат ресурсів на ремонт шляхом визначення параметру $C_{\text{рез.змін.}}$.

Формули для математичних сподівань параметрів X_1 та X_2 має вигляд

$$\begin{aligned}
 X_1 &= m_1(C_\Sigma / \text{Вар.Б}; C_{\text{рез.пр.}}; T_{\text{спост.}}; K; \vec{\Theta}) = C_{\text{рез.пр.}} \int_0^{C_{\text{рез.пр.}}} f(C_\Sigma) dC_\Sigma + \\
 &+ \int_{C_{\text{рез.пр.}}}^{\infty} [C_{\text{рез.пр.}} + (C_\Sigma - C_{\text{рез.пр.}})K] f(C_\Sigma) dC_\Sigma; \\
 X_2 &= m_1(C_\Sigma / \text{Вар.Б}; C_{\text{рез.змін.}}; T_{\text{спост.}}; K; \vec{\Theta}) = C_{\text{рез.змін.}} \int_0^{C_{\text{рез.змін.}}} f(C_\Sigma) dC_\Sigma + \\
 &+ \int_{C_{\text{рез.змін.}}}^{\infty} [C_{\text{рез.змін.}} + (C_\Sigma - C_{\text{рез.змін.}})K] f(C_\Sigma) dC_\Sigma.
 \end{aligned}$$

Якщо відомі апріорні дані щодо $f(C_\Sigma / \vec{\Theta}; T_{\text{спост.}})$ та рівень відсоткової ставки $M\%$, тоді можна знайти змінну $\Delta(C_{\text{рез.змін.}}, T_{\text{спост.}}, K, \vec{\Theta})$

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

Підбираючи параметр $C_{\text{рез.змін.}}$ прагнемо максимізувати величину Δ .

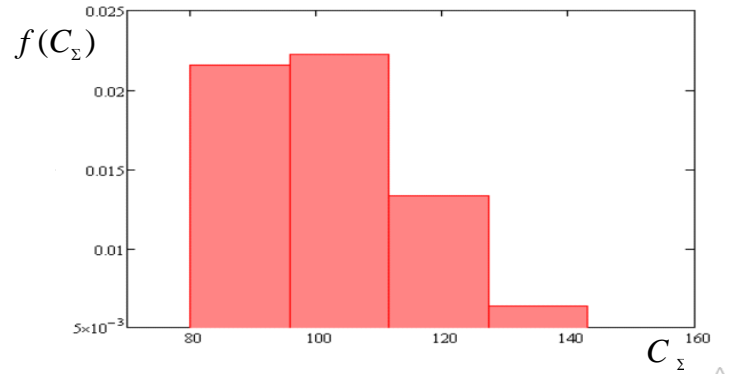
Відсоткова функція взята для випадку стрибкоподібної моделі, хоча в загальному випадку вона може бути довільною.

У наведених виразах для X_1 та X_2 відсоткова ставка $M\%$ є сталою величиною. У загальному випадку можна розглядати її як функцію від коштів, взятих у кредит. При цьому функціональний вигляд виразів для X_1 та X_2 ускладниться.

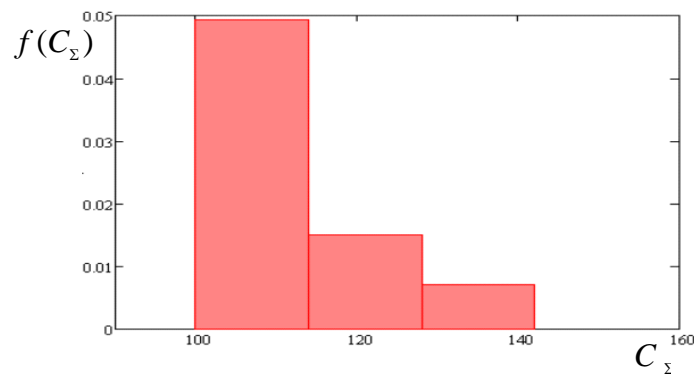
Було проведено моделювання у програмному середовищі MathCad для даних наведених у табл. 2.3.

Як видно з рис. 2.8 при збільшенні $C_{\text{рез}}$ відбувається зменшення кількості можливих значень сумарних витрат.

Результати теоретичних розрахунків математичного сподівання витрат представлені у вигляді номограми, поданої на рис. 2.9.



а) $C_{\text{рез}} = 80$ у.о.



б) $C_{\text{рез}} = 100$ у.о.

Рис. 2.8. Гістограми сумарних витрат на ремонтні роботи.

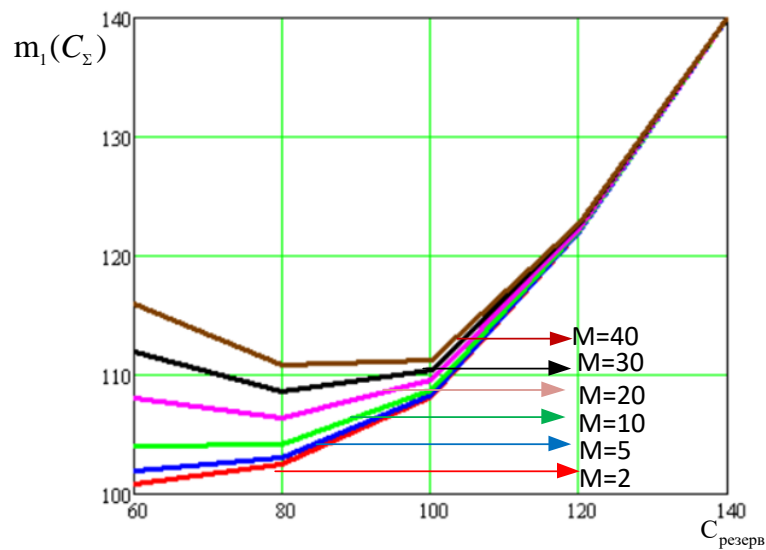


Рис. 2.9. Номограма витрат на ремонтні роботи

Аналіз графіків на рис. 2.9 показує, що за певних кредитних ставок існує оптимальне значення максимального запасу ресурсів, що забезпечує мінімум експлуатаційних витрат. В Україні кредитна ставка складає приблизно 20-30%. Як видно з графіку, при 20% вже існує оптимум. Значення оптимуму може бути знайдено шляхом дослідження аналітичних співвідношень наведених вище, які порівнюють витрати ресурсів за традиційною методикою та методикою, яка запропонована у даній роботі.

Виконаємо розрахунки щодо порівняльного аналізу ефективності процедури обґрунтування витрат на експлуатацію. Для цього будемо використовувати формулу для $\Delta = X1 - X2$. Первинними даними для розрахунку приймемо наступні:

- 1) тип щільності розподілу ймовірності витрат,
- 2) параметри заданої щільності розподілу ймовірності.

Розглянемо декілька варіантів ЩРІ витрат.

Для випадку нормальної щільності розподілу ймовірностей витрат з параметрами: математичне сподівання дорівнює 100 у.о., середньо квадратичне відхилення дорівнює 60 у.о., – результати розрахунків у вигляді номограм наведені на рис. 2.10 – 2.11.

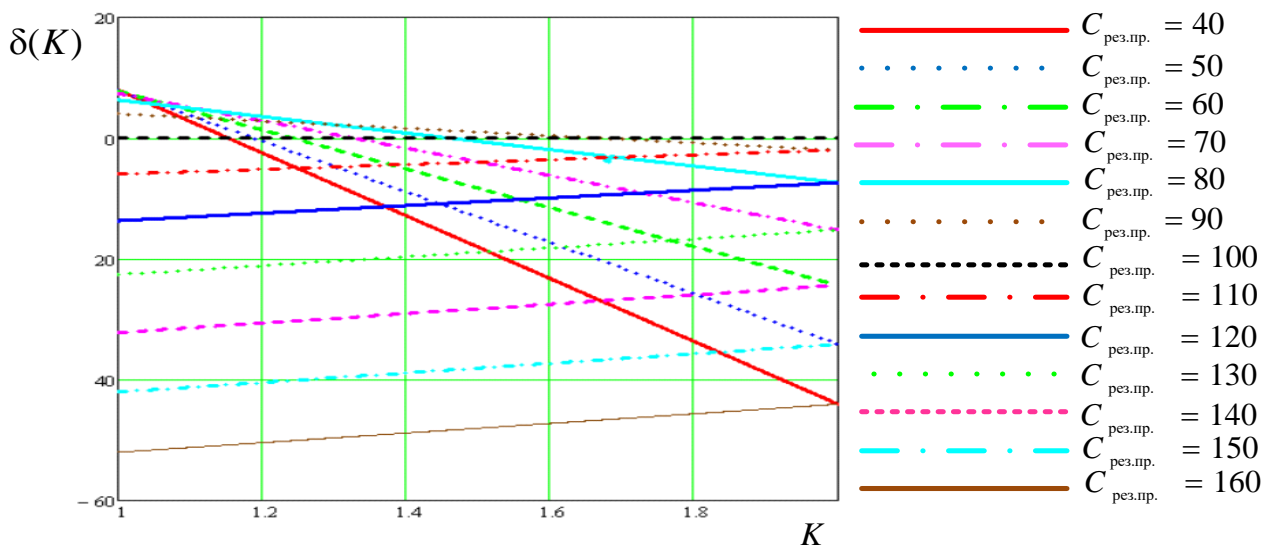


Рис. 2.10. Номограми залежності від множника збільшення ресурсів

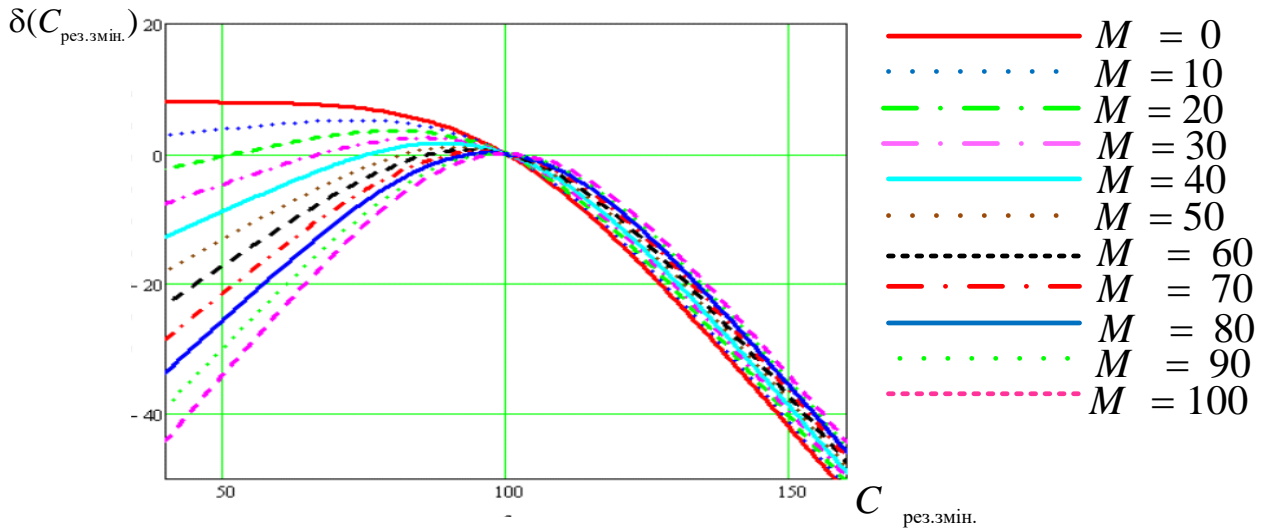


Рис. 2.11. Номограми залежності від мінімізованого значення припустимих витрат

Як видно з номограм залежності, вигрaш присутній лише при невеликих відсоткових ставках до 30% лише у випадку, коли проєктне значення витрат менше математичного сподівання. При цьому максимальний вигрaш приблизно становить 8 %.

Для випадку релеєвської щільності розподілу ймовірностей витрат з параметром $\sigma = 80$ у.о. (при цьому математичне сподівання витрат дорівнює 100.625 у.о.) результати розрахунків у вигляді номограм наведені на рис. 2.12. – 2.13.

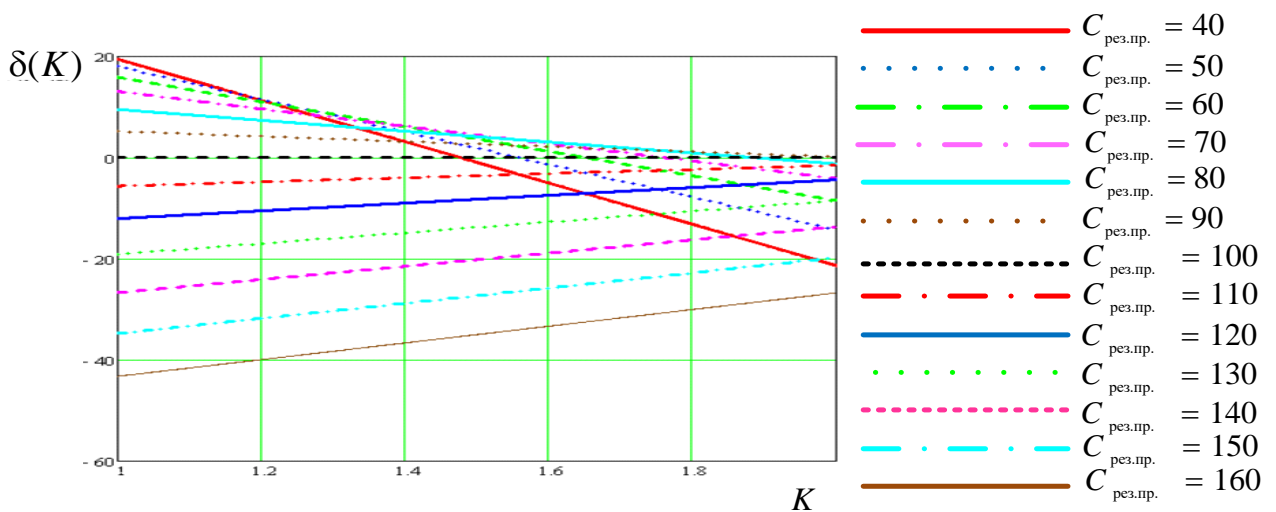


Рис. 2.12. Номограми залежності Δ від множника збільшення ресурсів

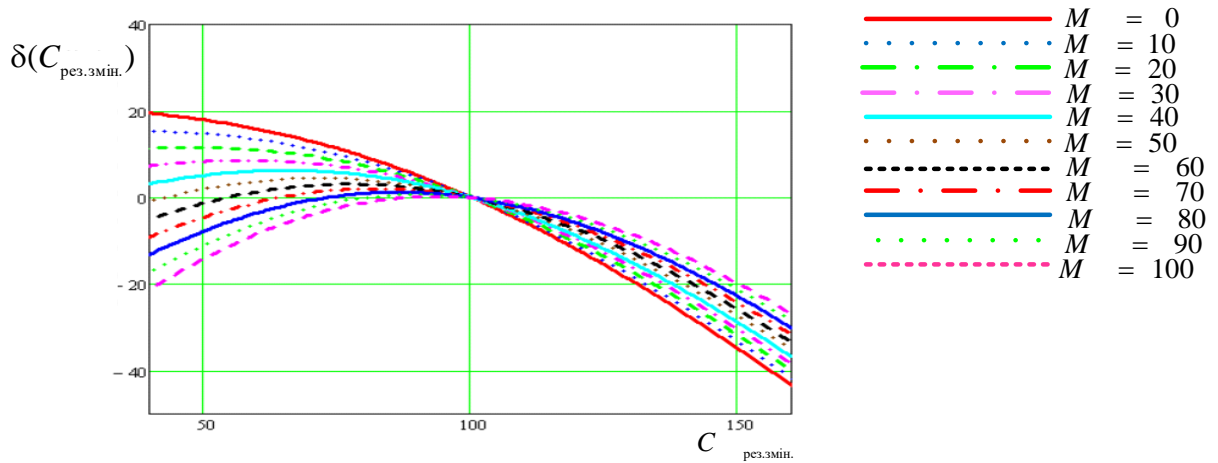


Рис. 2.13. Номограми залежності Δ від мінімізованого значення припустимих витрат

Як видно з номограм залежності, виграш присутній лише при відсоткових ставках до 60% лише у випадку, коли проектне значення витрат менше математичного сподівання. При цьому максимальний виграш приблизно становить 19 %.

Для випадку експоненціальної щільності розподілу ймовірностей витрат з параметром $\lambda = 0.01$ у.о.⁻¹ (при цьому математичне сподівання витрат дорівнює 100 у.о.) результати розрахунків у вигляді номограм наведені на рис. 2.14 – 2.15.

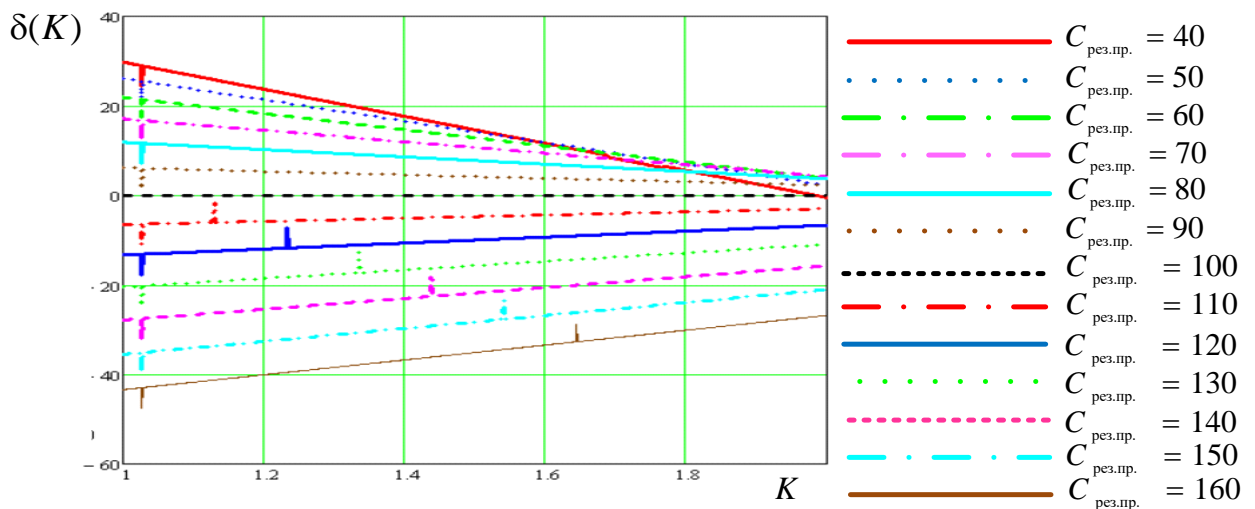


Рис. 2.14. Номограми залежності Δ від множника збільшення ресурсів

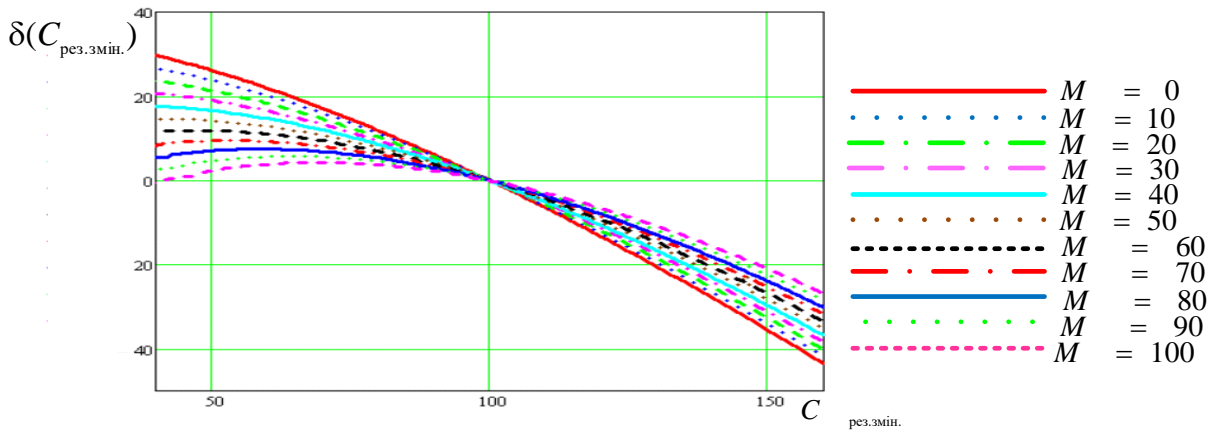


Рис. 2.15. Номограми залежності Δ від мінімізованого значення припустимих витрат

Як видно з номограм залежності, вигрaш присутній при довільних відсоткових ставка у випадку, коли проектне значення витрат менше математичного сподівання. При цьому максимальний вигрaш приблизно становить 27 %.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Побудовані моделі оцінки відповідності елементів в системі експлуатації НЗА під час аеронавігаційного обслуговування, що може використовуватися у процесі науково-методичного супроводження проектування та вдосконалення СЕ НЗА. При розгляді моделей елементів СЕ було використано процесний підхід, тому результати можуть бути використані в системах обслуговуючого типу при вирішенні задач проектування та модернізації СЕ НЗА. Наведені формули можуть застосовуватися для розрахунку показників ефективності процесів систем експлуатації НЗА, комплексів обробки інформації тощо.

2. У розділі розглянуто ймовірнісно-подієва модель, що може застосовуватися в процесі науково-методичного супроводження процедур діагностування елементів СЕ, у тому числі НЗА, для аналізу додаткових витрат. Елементами цієї моделі у загальному випадку включають можливі події, їхні ймовірності, а також експлуатаційні витрати, пов'язані з ними. Використання

ймовірно-подієвої моделі дозволило отримати аналітичні співвідношення для щільності розподілу ймовірності сумарних витрат на діагностування.

3. Проведений у роботі аналіз показав, що для розрахунку експлуатаційних витрат недостатньо враховувати тільки математичне сподівання, урахування щільності розподілу ймовірностей дає можливість раціонально спроектувати систему експлуатації в частині очікуваних витрат на технічне обслуговування та ремонт. Крім того, наявність інформації щодо щільності розподілу ймовірностей дозволить розрахувати оптимальний ресурсний фонд на ремонт, що забезпечує мінімум експлуатаційних витрат. Розрахунки були виконані під час аналізу оптимізаційної функції $\Delta(C_{\text{рез.змін.}}, T_{\text{спост.}}, K, \vec{\Theta})$, що оцінює витрати ресурсів за стандартним підходом до визначання резервного фонду та запропонованим підходом оптимізації витрат з використанням функції розрахування додаткових витрат. Отриманий вииграш може становити: – для нормальної моделі витрат – 8%, для релеївської моделі витрат – 19%, для експоненціальної моделі витрат – 27%. Цей результат показує доцільність застосування методу визначення статистичних характеристик показників процесів експлуатації.

Список публікацій здобувача за матеріалами другого розділу

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

2. Зуев О. В., Яшанов И. М., Мусієнко А. О. Особенности эксплуатации современных средств связи, навигации та спостереження . *Проблеми інформатизації та управління*. 2013. № 44. С. 25 – 30.

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

4. Яшанов И.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.

5. 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.

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

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ВИРІШЕННЯ ПРЯМОЇ ТА ОБЕРНЕНОЇ ЗАДАЧ ПІД ЧАС ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ПОТОЧНОГО РЕМОНТУ

3.1 Приклад визначення статистичних характеристик ймовірності правильного діагностування

Зазвичай параметри, що характеризують виконання процедури контролю, є випадковими величинами, тому доцільно використовувати апарат теорії ймовірності та математичної статистики для знаходження оцінок ефективності процедур діагностування. Окрім того, необхідно проводити статистичне моделювання для перевірки правильності отриманих аналітичних співвідношень. Параметрами ефективності згідно з нормативними документами та науково-технічною літературою в сфері діагностування та експлуатації в цілому є часові, вартісні, трумісткісні та ймовірність правильного діагностування [32; 38; 39].

В науково-технічній літературі визначено ймовірності правильного діагностування приділено недостатньо уваги.

Нижче наведено приклад, що для показника ефективності у вигляді ймовірності правильного діагностування маємо статистичні характеристики цього показника. Підтверджуємо основну гіпотезу, що для процедур діагностування необхідно розраховувати статистичні показники. Приклад об'єкту діагностування буде складатися з чотирьох послідовно з'єднаних елементів, що відповідають виробу «Баклан – 20». Перший елемент – це вхідні ланцюги. Другий елемент – це гетеродин та змішувач. Третій елемент – це підсилювач проміжної частоти. Четвертий елемент – це детектор та підсилювач низької частоти. Нехай для діагностування використовуємо програму послідовного контролю параметрів. Вигляд програми діагностування для одного з чотирьох варіантів наведений на рис. 3.1.

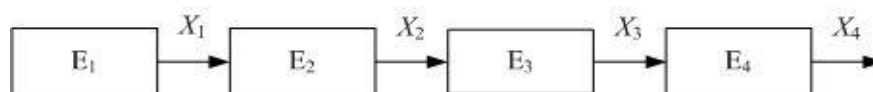


Рис. 3.1. Приклад об'єкта діагностування (радіоприймач Баклан 20)

На рис. 3.1 X_i – комплексний інформаційний параметр (КІП), який характеризує роботу відповідного i -го елемента ОД. Вважаємо, що КІП X_i має складові елементи x_i , які перевіряють на відповідність вимогам. Якщо хоч один елемент x_i не відповідає вимогам, то КІП X_i також не відповідає вимогам. Невідповідність КІП X_i вимогам має бути при невідповідності роботи i -го елемента ОД або при невідповідності вимогам КІП X_{i-1} .

Для розрахунку дискретного розподілу ймовірності правильного діагностування будемо вважати, що параметри відмови елементів 1 – 4 відповідають значенням, наведеним у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Дані про числові значення параметрів генеральної сукупності яка описує процес діагностування ОД.

Параметри генеральної сукупності	Номер варіанта				
	1	2	3	4	5
Q_1	0,4	0,25	0,1	0,2	0,1
Q_2	0,2	0,25	0,25	0,5	0,2
Q_3	0,1	0,25	0,4	0,15	0,3
Q_4	0,3	0,25	0,25	0,15	0,4
$m_1(t_{\text{НГО1}} / \text{відмова ел.1})$	50	50	50	50	50
$m_1(t_{\text{НГО2}} / \text{відмова ел.2})$	60	60	70	70	55
$m_1(t_{\text{НГО3}} / \text{відмова ел.3})$	75	70	80	90	75
$m_1(t_{\text{НГО4}} / \text{відмова ел.4})$	90	80	100	100	90
$\mu_2(t_{\text{НГО1}} / \text{відмова ел.}i)$	25	25	49	49	36
$\mu_2(t_{\text{НГО2}} / \text{відмова ел.}i)$	36	25	36	49	36
$\mu_2(t_{\text{НГО3}} / \text{відмова ел.}i)$	25	25	36	25	49
$\mu_2(t_{\text{НГО4}} / \text{відмова ел.}i)$	49	25	25	36	25
α	0,02	0,04	0,05	0,05	0,05
β	0,03	0,02	0,03	0,04	0,05

Для розрахунку статистичних характеристик показника правильного діагностування необхідно в загальному випадку скласти чотири програми діагностування. Приклад для відмови 3-го елемента наведено на рис 3.2.

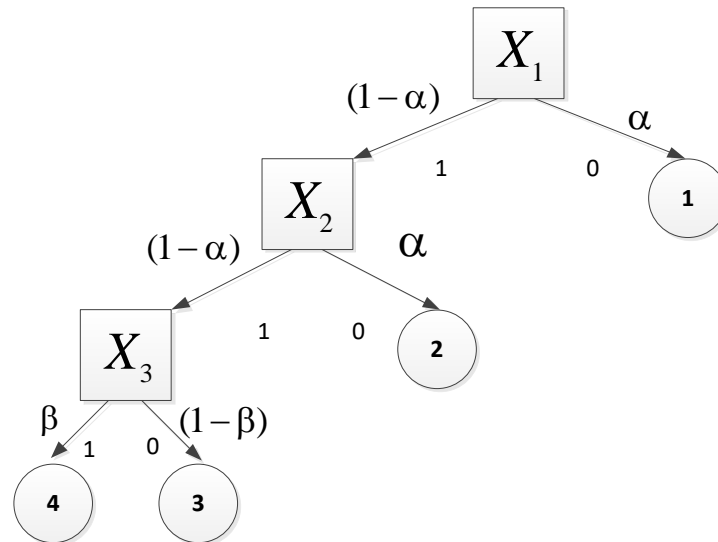


Рис. 3.2. Приклад ПД для відмови третього елементу.

Для розрахунку ймовірності правильного діагностування необхідно побудувати три інших графа (для випадку відмов інших елементів ОД). В результаті 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 представлені у ряду ймовірностей, який для заданого прикладу наведений у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

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

З табл. 3.2. слідує, що ймовірність правильного діагностування має дискретний розподіл. Тобто цей показник ефективності діагностування характеризується як випадкова величина незалежно від того які значення приймають умовні ймовірності помилок першого та другого роду.

Шляхом використання табл. 3.2 розрахуємо приклад розподілу ймовірності правильного виявлення для вихідних параметрів: $Q_1 = 0,1$, $Q_2 = 0,25$, $Q_3 = 0,4$, $Q_4 = 0,25$, $\alpha = 0,02$, $\beta = 0,01$.

Результати розрахунку ЩРІ наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Приклад дискретного розподілу ймовірностей правильного діагностування

Ймовірність правильного діагностування	0,9411	0,9507	0,9702	0,99
Ймовірність відмови	0,25	0,4	0,25	0,1

Для даних з табл. 3.3 знайдемо математичне сподівання та дисперсію.

$$m_1(D) = Q_1(1-\beta) + Q_2(1-\alpha)(1-\beta) + Q_3(1-\alpha)^2(1-\beta) + Q_4(1-\alpha)^3 = 0,9411*0,25 + 0,9507*0,4 + 0,9702*0,25 + 0,99*0,1 = 0,9571.$$

$$\mu_2(D) = Q_1(1-\beta)^2 + Q_2(1-\alpha)^2(1-\beta)^2 + Q_3(1-\alpha)^4(1-\beta)^2 + Q_4(1-\alpha)^6 - m_1^2(D) = 0,9411^2 * 0,25 + 0,9507^2 * 0,4 + 0,9702^2 * 0,25 + 0,99^2 * 0,1 - 0,9571^2 = 0,00283.$$

Графік умовного розподілу ймовірностей показує, що показник ефективності у вигляді ймовірності правильного діагностування є випадковим як зазначалось вище. Тому формально можливе визначення лівої границі рівня D , яке б характеризувало, що рівень ймовірності правильного діагностування не буде нижче бажаного.

Розглянута методика визначення статистичних характеристик ймовірності правильного діагностування може бути пов'язана з великим обсягом робіт, коли кількість елементів в об'єкті діагностування є значною. Також можна констатувати, що попередній аналіз показав, що кількісна оцінка показників ефективності процедур діагностування, а також в цілому поточного ремонту є достатньо складною науково-практичною задачею, оскільки під час її знаходження використовуються доволі складні аналітичні співвідношення.

В цьому випадку пропонується використовувати так званий матричний метод розрахунків. Він дуже добре пристосований для застосування в програмних середовищах MatLab та MathCAD. З його допомогою можна проводити необхідні розрахунки статистичних характеристик процесу діагностування, виконувати моделювання процедур діагностування для перевірки отриманих аналітичних співвідношень тощо.

3.2 Метод вирішення прямої задачі під час визначення статистичних характеристик процесу діагностування та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації

У загальному випадку параметри тривалості проведення набору технологічних операцій (НТО) визначаються характеристиками комплексний інформаційний параметр (КІП) X_i , до яких належать: тривалість контрольних операцій щодо визначення технічного стану i -го елемента t_{ki} , тривалість заміни елемента t_{se} , тривалість контролю працездатності всього об'єкту $t_{кпо}$. Кожен НТО визначається сукупністю КІП, які перевіряються, наприклад $НТО1 = \{X_i, \dots, X_p, \dots, X_m\}$. У загальному випадку тривалість контролю кожного набору КІП, є різною. Розглянемо два можливі випадки: 1) t_{ki} описуються різними ЩРІ, 2) t_{ki} описуються однаковою ЩРІ. Розглянемо спочатку спрощений другий випадок. При цьому будемо вважати, що для проведення НТО_{*i*} виконується перевірка m елементів об'єкту діагностування. Загалом під час НТО можливе лише одне вірне рішення та інші помилкові [34; 35].

У разі вірного рішення виконується лише одна заміна елемента та один контроль працездатності об'єкта (КПО). У разі помилкового рішення виконується n замін елементів та КПО, при чому число n визначається стратегією виконання ремонтних операцій (порядком заміни елементів у разі наявності помилок першого та другого роду).

Будемо вважати, що тривалості проведення контрольних операцій КІП є незалежними випадковими величинами, а їх ЩРІ $f(t_k)$, $f(t_{se})$, $f(t_{кпо})$ відомі.

У загальному випадку тривалість проведення НТО під час прийняття вірного рішення визначається за формулою:

$$t_{НТОi} = mt_k + t_{se} + t_{кпо}.$$

Відповідно до умови нормування ЩРІ можна записати наступне:

$$f(t_{НТОi} / \text{відмова ел.}i) dt_{НТОi} = f(t_k) f(t_{se}) f(t_{кпо}) dt_k dt_{se} dt_{кпо}.$$

Перенесемо диференціал із лівої частини у праву і виконаємо інтегрування:

$$f(t_{\text{НТО}i} / \text{відмова ел.}i) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(t_k) f(t_{ze}) f(t_{\text{КПО}}) \frac{dt_k}{dt_{\text{НТО}i}} dt_{ze} dt_{\text{КПО}}.$$

Обернена функція визначається співвідношенням:

$$t_k = \frac{1}{m} t_{\text{НТО}i} - \frac{t_{ze} + t_{\text{КПО}}}{m}.$$

Тоді якобіан перетворення:

$$\frac{dt_k}{dt_{\text{НТО}i}} = \frac{1}{m}.$$

Підставивши якобіан перетворення та обернену функцію в підінтегральний вираз, отримаємо:

$$f(t_{\text{НТО}i} / \text{відмова ел.}i) = \frac{1}{m} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(t_k) f(t_{ze}) f(t_{\text{КПО}}) \Big|_{t_k = \frac{t_{\text{НТО}i} - t_{ze} - t_{\text{КПО}}}{m}} dt_{ze} dt_{\text{КПО}}.$$

У загальному випадку тривалість проведення НТО під час прийняття помилкового рішення визначається за формулою:

$$t_{\text{НТО}i} = m t_k + n(t_{ze} + t_{\text{КПО}})$$

Обернена функція визначається співвідношенням:

$$t_k = \frac{t_{\text{НТО}i} - n(t_{ze} + t_{\text{КПО}})}{m}.$$

Тоді якобіан перетворення:

$$\frac{dt_k}{dt_{\text{НТО}i}} = \frac{1}{m}.$$

Підставивши якобіан перетворення та обернену функцію в підінтегральний вираз, отримаємо:

$$f(t_{\text{НТО}i} / \text{відмова ел.}i) = \frac{1}{m} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(t_k) f(t_{ze}) f(t_{\text{КПО}}) \Big|_{t_k = \frac{t_{\text{НТО}i} - n(t_{ze} + t_{\text{КПО}})}{m}} dt_{ze} dt_{\text{КПО}}.$$

Розглянемо більш складний випадок. При цьому кожне t_i описується власною ЩРІ $f(t_i)$. Тоді тривалість НТО визначатиметься формулою:

$$t_{\text{НТО}i} = \sum_{i=1}^m t_{ki} + n(t_{ze} + t_{\text{КПО}}).$$

Обернена функція визначається співвідношенням:

$$t_{k1} = \frac{t_{HTO_i} - \sum_{i=2}^m t_{ki} - n(t_{ze} + t_{KPO})}{m}.$$

Тоді якобіан перетворення:

$$\frac{dt_{k1}}{dt_{HTO_i}} = \frac{1}{m}.$$

Відповідно до умови нормування ЩРІ можна записати наступне:

$$f(t_{HTO_i} / \text{відмова ел.}i) dt_{HTO_i} = f(t_{ze}) f(t_{KPO}) dt_{ze} dt_{KPO} \prod_{i=1}^m f(t_{ki}) dt_{ki}.$$

Перенесемо диференціал із лівої частини у праву і виконаємо інтегрування:

$$f(t_{HTO_i} / \text{відмова ел.}i) = \underbrace{\int_0^\infty \dots \int_0^\infty}_{m+1} f(t_{ze}) f(t_{k1}) f(t_{KPO}) \frac{dt_{k1}}{dt_{HTO_i}} dt_{ze} dt_{KPO} \prod_{i=2}^m f(t_{ki}) dt_{ki}.$$

Підставивши якобіан перетворення та обернену функцію в підінтегральний вираз, отримаємо:

$$f(t_{HTO_i} / \text{відмова ел.}i) = \frac{1}{m} \underbrace{\int_0^\infty \dots \int_0^\infty}_{m+1} f(t_{k1}) f(t_{ze}) f(t_{KPO}) \left| \begin{array}{l} dt_{ze} dt_{KPO} \prod_{i=2}^m f(t_{ki}) dt_{ki} \\ t_{k1} = \frac{t_{HTO_i} - \sum_{i=2}^m t_{ki} - n(t_{ze} + t_{KPO})}{m} \end{array} \right.$$

Аналіз технологічних операцій при відсутності помилок першого та другого роду був проведений у роботі [130].

Розглянемо випадок, коли $\alpha \neq 0$, $\beta \neq 0$. При цьому програма діагностування стану заданого об'єкта буде розділена на n умовних підпрограм, де n – число елементів у об'єкті діагностування. Кожна i -та підпрограма буде будуватися за умови, що в об'єкті відмовив i -тий елемент. Тобто на гілках графу необхідно позначати значення помилок першого та другого роду.

Для заданого об'єкта діагностування (рис. 3.1) приведемо один із чотирьох графів для випадку, коли відмовив перший елемент та обраний метод діагностування половинного розбиття (рис. 3.3).

На рис. 3.3 на ребрах графа у вигляді «1» вказують результати операцій оцінки відповідності, якщо значення КІП X_i відповідають вимогам, та у вигляді

«0», якщо значення КІП X_i не відповідають вимогам. Крім того, на ребрах позначаються значення ймовірностей помилок першого та другого роду (α та β).

Вважаємо, що після прийняття рішення про невідповідність вимогам i -го елемента реалізуємо i -й набір операцій НТО i для $i = \overline{1,4}$.

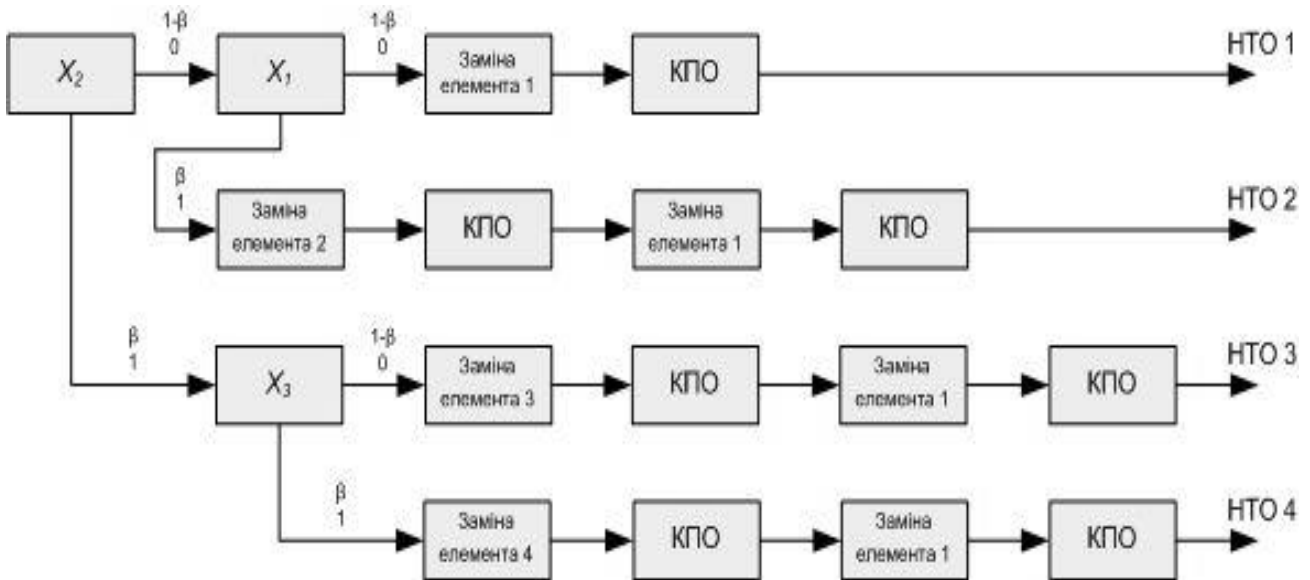


Рис. 3.3. Програма діагностування у разі відмови першого елемента та наявності похибок контролю

Зазначимо, що кожний граф буде містити три НТО, пов'язані з «помилковим» виявленням елемента, і лише один – з «вірним». Кількість операцій, які будуть входити до складу НТО, пов'язані з «помилковим» виявленням елемента, що відмовив, буде визначатися тим, яка стратегія дій прийнята в цих випадках. До числа цих стратегій можна віднести зокрема повторення ПД спочатку, тобто повторний контроль тих елементів, які мають максимальну ймовірність відмови.

При складанні графів використовувалася стратегія, при якій у процесі діагностування виконується заміна елемента, що відмовив, на об'єктивно справний, а також контроль працездатності всього виробу (вважаємо, що цей вид контролю не має помилок першого та другого роду), і у випадку, якщо результат підсумкового контролю об'єкта не відповідає вимогам, приймається рішення про невідповідність наступного елемента вихідної системи, починаючи з першого. Після цього знову виконується вихідний контроль працездатності всього

об'єкта. З рис. 3.3 видно, що при наявності помилок першого та другого роду витрати ресурсів на діагностування різко зростають.

Розглянемо питання визначення виду підсумкової ЩРІ витрат часу на реалізацію програм діагностування $f(t_d)$ за умови, що імовірності помилок першого та другого роду окремих контрольних-вимірних операцій не дорівнюють нулю.

У процесі виконання аналітичних викладок будемо використовувати матричну форму представлення функціональних залежностей.

Підкреслимо ще раз, що такий вибір пояснюється наступними міркуваннями:

1. Представлення формул у вигляді добутку матриць спрощує аналітичну форму запису функціональних залежностей, позбавляючись у них від сум.
2. Представлення рівнянь у матричному вигляді є більш компактним.
3. Матричні рівняння легше реалізуються під час моделювання.
4. Сучасні системи автоматизованого проектування, зокрема MatLab, призначені насамперед для роботи з матрицями.

Розглянемо більш предметно застосування матричного методу під час використання методу діагностування половинного розбиття.

Будемо вважати, що в процесі діагностування можливі помилки першого та другого роду. В цьому випадку можливе проведення одного з чотирьох можливих НТО з відновлення працездатності ОД. Проведення i -го НТО за умови відмови j -го елемента буде характеризуватися умовною ймовірністю $p_{i,j}$. При відмові j -го елемента системи тільки одне НТО буде вірним, а три НТО будуть хибними. В загальному випадку умовні ймовірності $p_{i,j}$ є функціями ймовірностей помилок першого та другого роду, де

$$p_{i,j} = \varphi(\alpha, \beta).$$

У силу випадкового характеру результатів контрольних-вимірних операцій окремі НТО теж будуть випадковими як за кількістю, так і за

тривалістю. Імовірності виконання окремих НТО $p_{i,j}$ є умовними й утворять повну групу подій:

$$\sum_{i=1}^4 p_{i,j} = 1.$$

Крім того, зробимо припущення, що помилки першого ($\alpha_i = \alpha$) та другого ($\beta_i = \beta$) роду всіх елементів рівні між собою.

В цілому умовні ймовірності утворюють матрицю ймовірностей виконання НТО, яка для даного ОД буде мати розмір 4x4, тобто

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

Для даного прикладу ОД елементи матриці розраховуються за формулою

$$\begin{aligned} p_{1,1} &= (1-\beta)^2, p_{2,1} = \beta - \beta^2, p_{3,1} = \beta - \beta^2, p_{4,1} = \beta^2, \\ p_{1,2} &= (1-\beta)\alpha, p_{2,2} = (1-\beta)(1-\alpha), p_{3,2} = \beta - \beta^2, p_{4,2} = \beta^2, \\ p_{1,3} &= \alpha^2, p_{2,3} = (1-\alpha)\alpha, p_{3,3} = (1-\alpha)(1-\beta), p_{4,3} = (1-\alpha)\beta, \\ p_{1,4} &= \alpha^2, p_{2,4} = (1-\alpha)\alpha, p_{3,4} = (1-\alpha)\alpha, p_{4,4} = (1-\alpha)^2. \end{aligned}$$

Для розрахунку $p_{i,j} = \varphi(\alpha, \beta)$ необхідно виконати попередній аналіз програм діагностування у разі наявності помилок першого та другого роду. На аналізованій програмі потрібно визначити справні та несправні елементи. Наприклад, для даного ОД (рис. 3.1) у випадку несправності другого елементу, сигнали, що характеризують справний стан третього та четвертого елементів будуть відсутні. Тобто відмова другого елемента характеризуватиметься вектором станів

$$\text{Відмова } E_2 = \{C_{п_1}, \overline{C_{п_2}}, \overline{C_{п_3}}, \overline{C_{п_4}}\}$$

де $C_{п_i}$ – справний стан, $\overline{C_{п_j}}$ – несправний стан.

У загальному випадку відмова j -го елементу характеризується вектором станів

$$\text{Відмова } E_j = \{\overline{C_{п_l}}, \overline{C_{п_k}}\},$$

де $l + k = n$, де n – загальна кількість елементів системи.

Рішення пов'язані з вектором справних станів, характеризуються ймовірностями помилок першого роду α . Рішення пов'язані з вектором несправних станів $\overline{C}_{п_k}$, характеризується ймовірністю помилок другого роду β .

Тоді з урахуванням випадку

$$p_{i,j} = (1 - \beta)^{n_{1i}} \beta^{n_{2i}} (1 - \alpha)^{n_{3i}} \alpha^{n_{4i}}, \quad (3.1)$$

де n_{1i} – кількість несправних елементів ПД на шляху до i -го НТО, вихідний сигнал яких дорівнює логічному 0; n_{2i} – кількість несправних елементів ПД на шляху до i -го НТО, вихідний сигнал яких дорівнює логічній 1; n_{3i} – кількість справних елементів ПД на шляху до i -го НТО, вихідний сигнал яких дорівнює логічній 1; n_{4i} – кількість справних елементів ПД на шляху до i -го НТО, вихідний сигнал яких дорівнює логічному 0.

При цьому

$$n_{1i} + n_{2i} + n_{3i} + n_{4i} = m_i$$

де m_i – кількість елементів ПД, які необхідно перевірити для прийняття рішення щодо виконання i -го НТО.

Тривалість проведення i -го НТО характеризується щільністю розподілу ймовірностей затрат часу. У випадку помилкового рішення ЩРІ буде зміщуватися вправо за віссю часу внаслідок додаткових операцій, пов'язаних з обраною стратегією ремонту.

Нехай стратегія ремонту у випадку помилкового рішення полягає у послідовній заміні елементів від першого до останнього.

Вважатимемо, що на виконання заміни елементів та контроль справності всієї системи витрачається час $\Delta\tau$. Оскільки досліджувана система містить 4 елементи, то в цьому випадку матимемо вектори зміщень $\{0; \Delta\tau; 2\Delta\tau; 3\Delta\tau\}$. Коефіцієнт при $\Delta\tau$ у цьому векторі визначається значеннями i та j . У загальному випадку ЩРІ виконання i -го НТО можуть бути представлені у вигляді

квадратичної матриці, яка у цьому випадку має розмірність 4×4 . Ця матриця має вигляд:

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

Умовні ЩРІ тривалості проведення діагностування у випадку відмови j -го елемента системи визначають за формулою:

$$\mathbf{F}_2^j = \mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{P}^{(j)}, \quad (3.2)$$

де $\mathbf{P}^{(j)}$ – j -тий стовпчик матриці \mathbf{P} .

Внаслідок перемноження отримаємо вектор-рядок ЩРІ $f(t_d / \text{відм.ел. } j)$.

Відповідно до умови нормування можна записати:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty f(t_d / \text{відм.ел.1}) dt_d &= p_{1.1} \int_0^\infty f_1(t / \text{відм.ел.1}) h(t) dt + \\ &+ p_{2.1} \int_0^\infty f_2(t-3\Delta\tau / \text{відм.ел.1}) h(t-3\Delta\tau) dt + p_{3.1} \int_0^\infty f_3(t-2\Delta\tau / \text{відм.ел.1}) h(t-2\Delta\tau) dt + \\ &+ p_{4.1} \int_0^\infty f_4(t-\Delta\tau / \text{відм.ел.1}) h(t-\Delta\tau) dt = p_{1.1} + p_{2.1} + p_{3.1} + p_{4.1} = 1. \end{aligned}$$

Для знаходження безумовної ЩРІ тривалості діагностування використовуємо формулу

$$f(t_d) = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{F}_2, \quad (3.3)$$

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

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{pmatrix}$$

Безумовна ЩРІ $f(t_d)$ буде задовольняти умові нормування, тобто:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty f(t_d) dt_d &= Q_1 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.1}) dt_d + Q_2 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.2}) dt_d + \\ &+ Q_3 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.3}) dt_d + Q_4 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.4}) dt_d = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 1. \end{aligned}$$

Отримані вище формули для умовних і безумовних ЩРІ можна узагальнити й на випадок, коли в об'єкті діагностування є n елементів. При цьому вирази для

ЩРІ тривалості виконання НТО будуть залежати від числа елементів у об'єкті й виду ПД.

Для знаходження числових характеристик ефективності процедур діагностування, можна знайти математичне сподівання та дисперсію тривалості діагностування за формулами:

$$m_1(t_d) = \int_0^{\infty} (\mathbf{Q}(\mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{P}^{(j)})) dt. \quad (3.4)$$

$$\mu_2(t_d) = \int_0^{\infty} t^2 (\mathbf{Q}(\mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{P}^{(j)})) dt - m_1^2(t_d). \quad (3.5)$$

Середня ймовірність правильного діагностування:

$$m_1(D) = (\mathbf{P} \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{Z})^T \cdot \mathbf{Q}, \quad (3.6)$$

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

Дисперсія ймовірності правильного діагностування:

$$\begin{aligned} \mu(D) &= ((\mathbf{P} \times \mathbf{E} \cdot D)^T \times (\mathbf{P} \times \mathbf{E} \cdot D)^T) \cdot \mathbf{Q} - ((\mathbf{P} \times \mathbf{E} \cdot D)^T \cdot \mathbf{Q})^2 = \\ &= (1-\beta)^4 \cdot Q_1 + (1-\alpha)^2(1-\beta)^2 \cdot Q_2 + (1-\alpha)^2(1-\beta)^2 \cdot Q_3 + (1-\alpha)^4 \cdot Q_4 - (m_1(D))^2 \end{aligned}$$

Конкретний приклад матриць, що входять до рівнянь (3.1) – (3.6) для ОД на рис. 3.1 та методу діагностування половинного розбиття, має вигляд:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} (1-\beta)^2 & \alpha(1-\beta) & \alpha^2 & \alpha^2 \\ \beta(1-\beta) & (1-\beta)(1-\alpha) & \alpha(1-\alpha) & \alpha(1-\alpha) \\ \beta(1-\beta) & \beta(1-\beta) & (1-\beta)(1-\alpha) & \alpha(1-\alpha) \\ \beta^2 & \beta^2 & \beta(1-\alpha) & (1-\alpha)^2 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{pmatrix}.$$

При цьому

$$\mathbf{P} \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} (1-\beta)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-\beta)(1-\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\beta)(1-\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-\alpha)^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-\beta)^2 \\ (1-\beta)(1-\alpha) \\ (1-\beta)(1-\alpha) \\ (1-\alpha)^2 \end{pmatrix}$$

Тоді математичне сподівання ймовірності правильного діагностування:

$$m_1(D) = (\mathbf{P} \times \mathbf{E} \cdot \mathbf{Z})^T = ((1-\beta)^2(1-\alpha)(1-\beta)(1-\alpha)(1-\beta)(1-\alpha)^2) \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{pmatrix} =$$

$$= Q_1(1-\beta)^2 + Q_2(1-\beta)(1-\alpha) + Q_3(1-\beta)(1-\alpha) + Q_4(1-\alpha)^2$$

Аналіз показує, що застосування матричного методу розрахунків дає ідентичний результат з формулами, які наведені у п. 3.1 цієї дисертаційної роботи.

Залежність середньої ймовірності правильного діагностування від умовної ймовірності помилки першого роду при заданих умовних ймовірностях помилки другого роду та заданих ймовірностей відмов наведено на рис. 3.4.

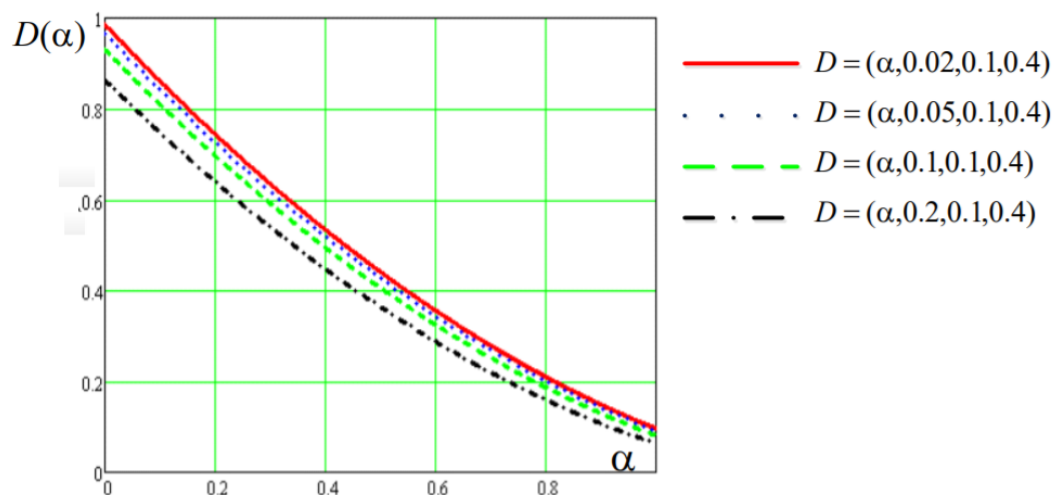


Рис. 3.4. Залежність середньої ймовірності правильного діагностування від умовної ймовірності помилки першого роду

Двовимірна функціональна залежність середньої ймовірності правильного діагностування від умовних ймовірностей помилок першого та другого роду на рис. 3.5.

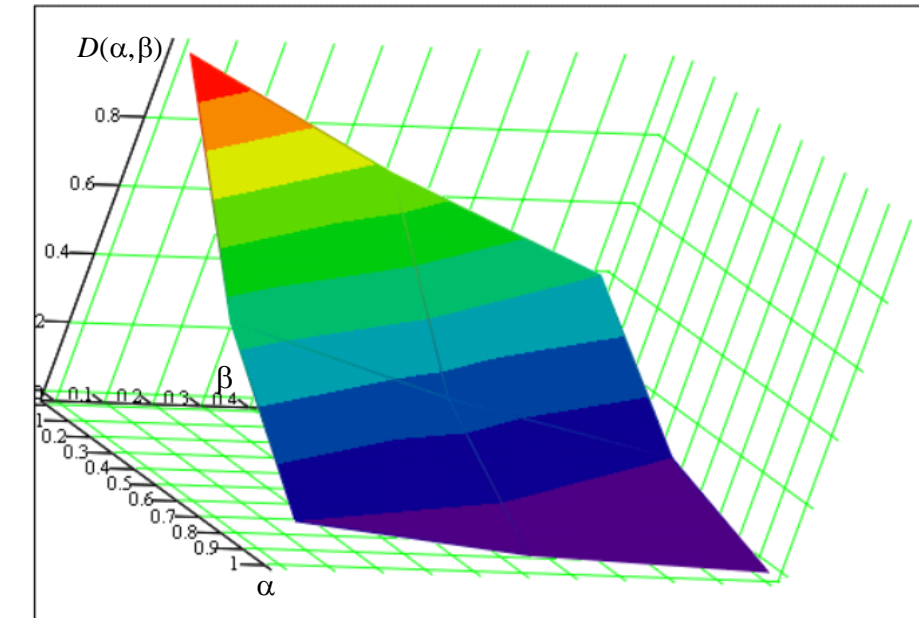


Рис. 3.5. Двовимірна функціональна залежність середньої ймовірності правильного діагностування від умовних ймовірностей помилок першого та другого роду

Для оцінки достовірності наведених формул було проведено статистичне моделювання з використанням метода Монте-Карло для ОД, представленого на рис. 3.1. Моделювання виконувалось за умов, що ЩРІ витрат часових ресурсів на виконання i -го НТО є гаусівською з параметрами $m_1(t_{\text{НТО}i}/\text{НВ}_i)$, $\mu_2(t_{\text{НТО}i}/\text{НВ}_i)$ ($i = \overline{1,4}$). В табл. 3.1 наведено дані про числові значення параметрів генеральної сукупності яка описує процес діагностування ОД. Крім того, прийемо, що при $i \neq j$: $m_1(t_{\text{НТО}i}/\text{відмова ел.}j) = m_1(t_{\text{НТО}i}/\text{відмова ел.}i) + 5$ при $i=1$ або $i=j+1$; $m_1(t_{\text{НТО}i}/\text{відмова ел.}j) = m_1(t_{\text{НТО}i}/\text{відмова ел.}i) + 10$ для довільних $i=j+2$; $m_1(t_{\text{НТО}i}/\text{відмова ел.}j) = m_1(t_{\text{НТО}i}/\text{відмова ел.}i) + 15$ при $i=j-1$.

У процесі моделювання виконувалась статистична оцінка математичного сподівання тривалості однієї процедури діагностування $m_1^*(t_{\text{Д}})$, дисперсії $\mu_2^*(t_{\text{Д}})$, середньоквадратичного відхилення тривалості однієї процедури $\sigma^*(t_{\text{Д}})$, ЩРІ

тривалості реалізації однієї процедури діагностування $f^*(t_d)$.

В табл. 3.4 наведено результати моделювання у вигляді точкових оцінок параметрів $m_1^*(t_d)$, $\mu_2^*(t_d)$, $\sigma^*(t_d)$, нижня $t_{днмс}$ та верхня $t_{двмс}$ границі інтервальних оцінок математичного сподівання $m_1^*(t_d)$, а також результати теоретичних розрахунків параметрів $m_1(t_d)$, $\mu_2(t_d)$, $\sigma(t_d)$. Інтервальні оцінки розраховувались для довірчої ймовірності $\gamma = 0,95$.

Таблиця 3.4

Результати моделювання та теоретичних розрахунків

Номер варіанта	Точкові оцінки			Інтервальні оцінки	Дані розрахунків		
	$m_1^*(t_d)$	$\mu_2^*(t_d)$	$\sigma^*(t_d)$	$t_{днмс}$ $t_{двмс}$	$m_1(t_d)$	$\mu_2(t_d)$	$\sigma(t_d)$
1	66,3	270	16,43	65,98/66,62	66,35	268,1	16,37
2	65	251	15,8	64,68/65,32	65	259	16,03
3	79,9	212,1	14,6	79,58/80,22	80,1	238,3	15,4
4	73	262,4	16,2	72,68/73,32	73,1	371	16,46
5	74,4	272	16,5	74,08/74,72	74,3	266,6	16,33

На рис. 3.6 приведені графіки ЩРІ для 5-го варіанта набору параметрів генеральної сукупності.

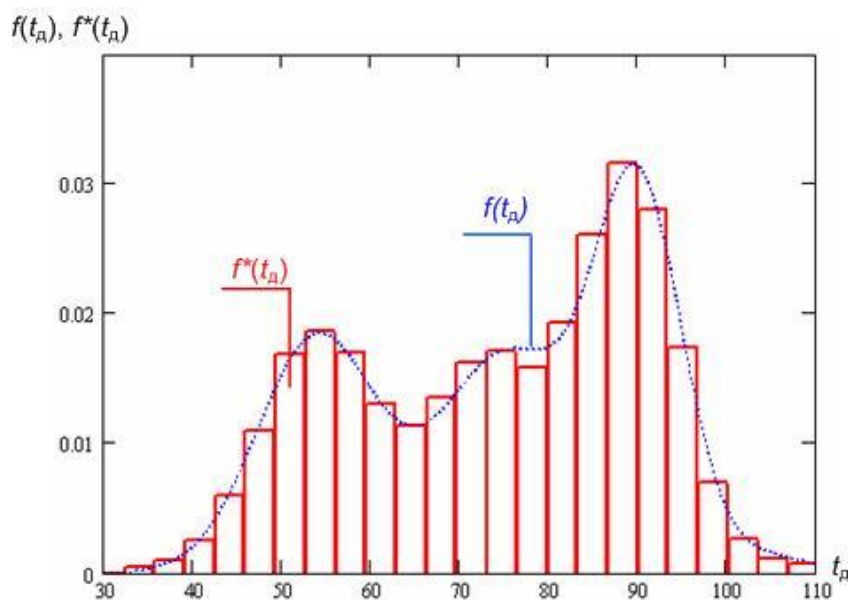


Рис. 3.6. Результати теоретичного розрахунку ($f(t_d)$) та статистичного ($f^*(t_d)$) моделювання для визначення ЩРІ тривалості діагностування (варіант вихідних даних № 5)

Порівняння теоретичних розрахунків ЩРІ тривалості діагностування при відсутності ($f_1(t_d)$) та наявності ($f_2(t_d)$) помилок першого та другого роду зображено на рис. 3.7 [135].

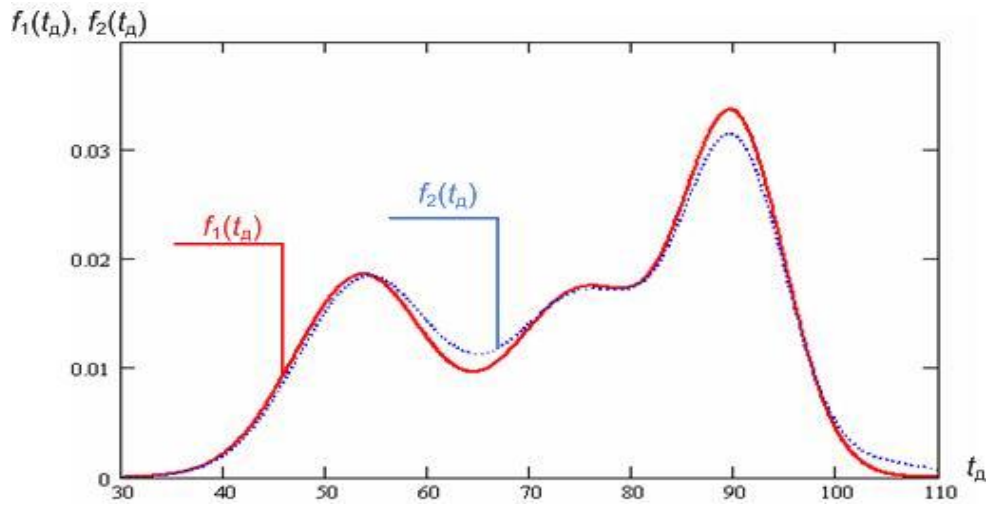


Рис. 3.7. Порівняння теоретичних розрахунків ЩРІ тривалості діагностування при відсутності ($f_1(t_d)$) та наявності ($f_2(t_d)$) помилок першого та другого роду (варіант вихідних даних № 5)

3.3 Розрахунок витрат під час вирішення прямої задачі

Виконаємо розрахунок показників ефективності у вигляді статистичних характеристик вартості діагностування.

У загальному випадку будемо вважати, що функції витрат пов'язані з тривалістю діагностування [42–44] певною функціональною залежністю. Можливі такі варіанти залежності:

а) лінійна $C_{\Sigma} = \varphi(t_d) = bt_d + a$,

б) квадратична $C_{\Sigma} = \varphi(t_d) = bt_d + a + ct_d^2$,

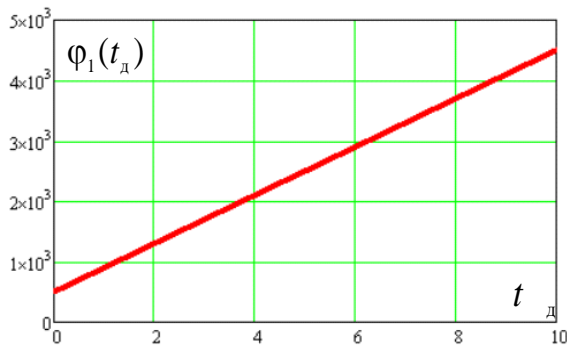
в) експоненціальна $C_{\Sigma} = \varphi(t_d) = ae^{\alpha t_d}$,

г) поліноміальна (узагальнена) $C_{\Sigma} = \varphi(t_d) = \sum_{i=0}^n a_i t_d^i$.

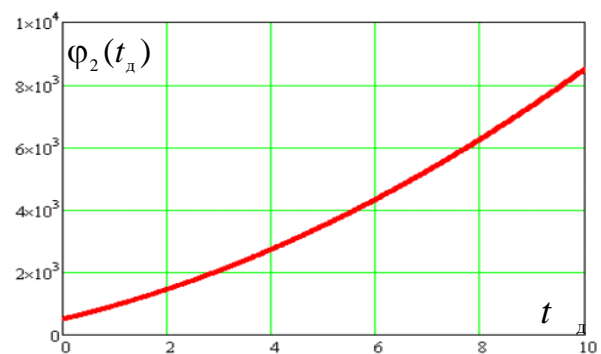
У цих формулах коефіцієнт a характеризує постійний рівень видатків, які будуть витрачатися у будь-якому випадку у процесі діагностування. Коефіцієнти b , c , α , $a_i (i = 0 \dots n)$ – це коефіцієнти, що характеризують величину видатків, що

витрачається у процесі діагностування в залежності від тривалості діагностування.

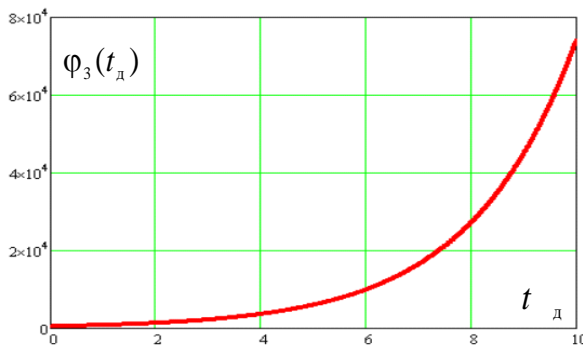
Приклади залежностей зображені на рис. 3.8.



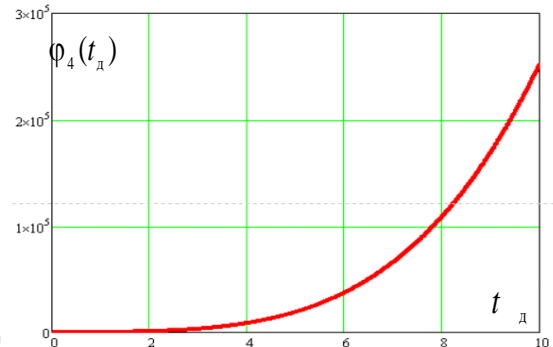
а) лінійна залежність витрат від часу
діагностування



б) квадратична залежність витрат від часу
діагностування



в) експоненціальна залежність витрат від
часу діагностування



г) поліноміальна залежність витрат від
часу діагностування

Рис. 3.8. Моделі витрат

Нехай після вирішення прямої задачі відома ЩРІ тривалостей діагностування $f(t_d)$. Тоді необхідно визначити ЩРІ сумарних витрат $f(C_\Sigma)$.

Для вирішення цієї задачі використаємо метод функціональних перетворень щільностей розподілу ймовірностей.

Оскільки функціональна залежність $C_\Sigma = \varphi(t_d)$ є монотонною, тоді випадкова величина C_Σ набуде значень менших наперед відомого значення C'_Σ ймовірність цієї події позначимо $P(C_\Sigma < C'_\Sigma)$, якщо випадкова величина t_d набуде значень менших t'_d , тобто

$$P(C_{\Sigma} < C'_{\Sigma}) = P(t_{\Delta} < t'_{\Delta})$$

Наведене можна записати у вигляді рівності інтегральних функцій розподілу

$$F(C_{\Sigma}) = F(t_{\Delta})$$

Продиференціюємо обидві частини цього виразу за C_{Σ} та отримаємо:

$$\frac{dF(C_{\Sigma})}{dC_{\Sigma}} = \frac{dF(t_{\Delta})}{dC_{\Sigma}} \frac{dt_{\Delta}}{dt_{\Delta}} = \frac{dF(t_{\Delta})}{dt_{\Delta}} \frac{dt_{\Delta}}{dC_{\Sigma}}$$

Звідси

$$f(C_{\Sigma}) = f(t_{\Delta})I$$

$$\text{де } I = \frac{dt_{\Delta}}{dC_{\Sigma}}.$$

Для визначення якобіана перетворення попередньо необхідно знайти зворотню функцію $t_{\Delta} = \psi(C_{\Sigma})$

Тоді можна записати:

$$f(C_{\Sigma}) = f(\psi(C_{\Sigma})) \left| \psi'(C_{\Sigma}) \right| \quad (3.7)$$

Розглянемо варіанти вирішення цієї задачі для різних моделей сумарних затрат:

1. Лінійна модель.

Для лінійної функції

$$C_{\Sigma} = a + bt_{\Delta}.$$

Зворотна функція матиме вигляд

$$\psi(C_{\Sigma}) = \frac{C_{\Sigma} - a}{b}.$$

Звідси якобіан перетворення

$$\frac{d\psi(C_{\Sigma})}{dC_{\Sigma}} = \frac{1}{b}.$$

Тоді ЩРІ затрат

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

2. Квадратична модель

Зворотна функція в цьому випадку

$$\psi_{1,2}(C_{\Sigma}) = -\frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4(a - C_{\Sigma})c}}{2c}.$$

Тоді

$$f(C_{\Sigma}) = \sum_{i=1}^{\alpha} (\psi'_i(C_{\Sigma})) f_{t_o}(\psi_i(C_{\Sigma})).$$

Звідси

$$\begin{aligned} f(C_{\Sigma}) &= f_{t_a} \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4(a - C_{\Sigma})c}}{2c} \right) \frac{1}{\sqrt{b^2 - 4(a - C_{\Sigma})c}} + \\ &+ f_{t_a} \left(\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4(a - C_{\Sigma})c}}{2c} \right) \frac{1}{\sqrt{b^2 - 4(a - C_{\Sigma})c}} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{b^2 - 4(a - C_{\Sigma})c}} \left(f_{t_a} \left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4(a - C_{\Sigma})c}}{2c} \right) + f_{t_a} \left(\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4(a - C_{\Sigma})c}}{2c} \right) \right). \end{aligned}$$

3. Експоненціальна модель

Зворотна функція в цьому випадку матиме вигляд

$$\psi(t_a) = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{C_{\Sigma}}{a}.$$

Тоді якобіан перетворення

$$I = \psi'(t_a) = \frac{1}{\alpha C_{\Sigma}}.$$

Тоді ЩРІ затрат

$$f(C_{\Sigma}) = f_{t_o} \left(\frac{1}{\alpha} \ln \frac{C_{\Sigma}}{a} \right) \frac{1}{\alpha C_{\Sigma}}.$$

4. Поліноміальна модель

У цьому випадку зворотної функції є складною і розв'язання залежить від порядку полінома. У загальному випадку при цьому ЩРІ витрат визначатиметься формулою (3.12).

Розглянемо приклади розрахунків ЩРІ витрат.

1. Лінійна модель

Нехай витрати пов'язані з тривалістю діагностування наступним співвідношенням.

$$C_{\Sigma} = 10 + 2t_d.$$

Тоді ЩРІ матиме вигляд

$$f(C_{\Sigma}) = \frac{1}{2} f\left(\frac{C_{\Sigma}}{2} - 5\right).$$

Графічне зображення гістограми, отриманої за результатами статистичного моделювання, та розрахованою ЩРІ зображені на рис. 3.9.

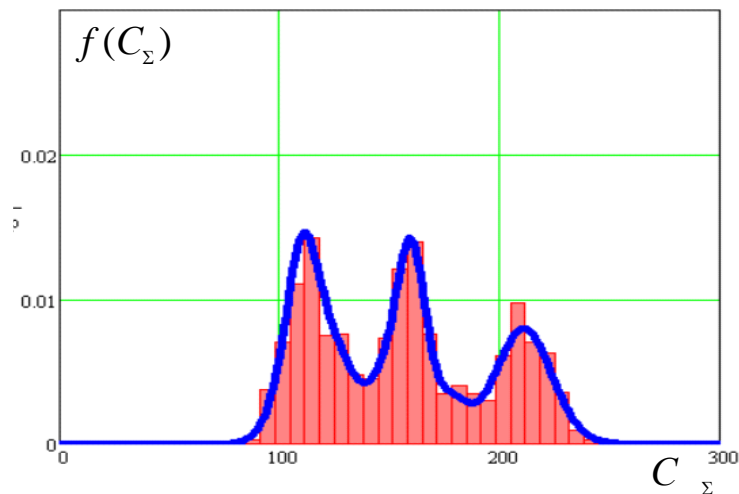


Рис. 3.9. ЩРІ витрат на діагностування у випадку лінійної моделі

2. Квадратична модель.

Нехай витрати пов'язані з тривалістю діагностування наступним співвідношенням.

$$C_{\Sigma} = 10 + 0.2t_d + 0.1t_d^2.$$

Тоді ЩРІ матиме вигляд

$$f(C_{\Sigma}) = f\left(\frac{-0.2 + \sqrt{0.2^2 - 4(10 - C_{\Sigma})0.1}}{2 \cdot 0.1}\right) + \\ + f\left(\frac{-0.2 - \sqrt{0.2^2 - 4(10 - C_{\Sigma})0.1}}{2 \cdot 0.1}\right) \frac{1}{\sqrt{0.2^2 - 4(10 - C_{\Sigma})0.1}}.$$

Графічне зображення гістограми, отриманої за результатами статистичного моделювання, та розрахованою ЩРІ зображені на рис. 3.10.

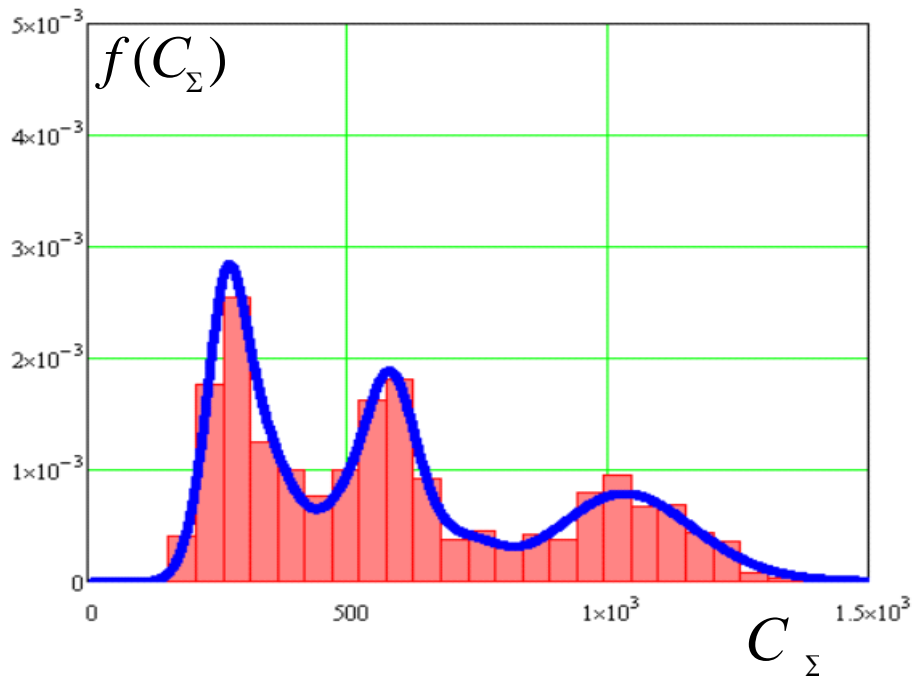


Рис. 3.10. ЩРІ витрат на діагностування у випадку квадратичної моделі

3. Експоненціальна модель.

Нехай витрати пов'язані з тривалістю діагностування наступним співвідношенням

$$C_{\Sigma} = 10e^{0,05t_d}.$$

Тоді ЩРІ матиме вигляд

$$f(C_{\Sigma}) = f\left(\frac{1}{0,05} \ln\left(\frac{C_{\Sigma}}{10}\right)\right) \frac{1}{0,05C_{\Sigma}}.$$

Графічне зображення гістограми, отриманої за результатами статистичного моделювання, та розрахованою ЩРІ зображені на рис. 3.11.

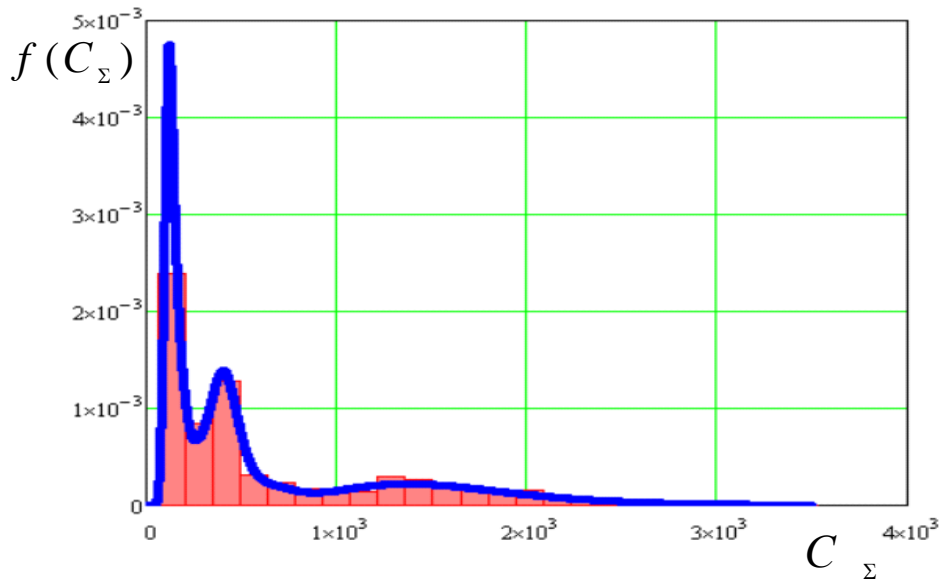


Рис. 3.11. ЩРІ витрат на діагностування у випадку експоненціальної моделі

4. Поліноміальна модель

Нехай витрати пов'язані з тривалістю діагностування наступним співвідношенням

$$C_{\Sigma} = 10 + 0.05t_d^2 + 0,0005t_d^4.$$

Знайдемо допоміжну ЩРІ квадрату тривалостей діагностування

$$f_2(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{x}}(f(\sqrt{x}) + f(-\sqrt{x})) & \text{якщо } x > 0 \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases}$$

Тоді ЩРІ матиме вигляд

$$f(C_{\Sigma}) = f_2\left(\frac{-0.5 + \sqrt{0.5^2 - 4(1 - C_{\Sigma})0.0005}}{2 \cdot 0.0005}\right) + \\ + f_2\left(\frac{-0.5 - \sqrt{0.5^2 - 4(1 - C_{\Sigma})0.0005}}{2 \cdot 0.0005}\right) \frac{1}{\sqrt{0.5^2 - 4(1 - C_{\Sigma})0.0005}}.$$

Графічне зображення гістограми, отриманої за результатами статистичного моделювання, та розрахованою ЩРІ зображені на рис. 3.12.

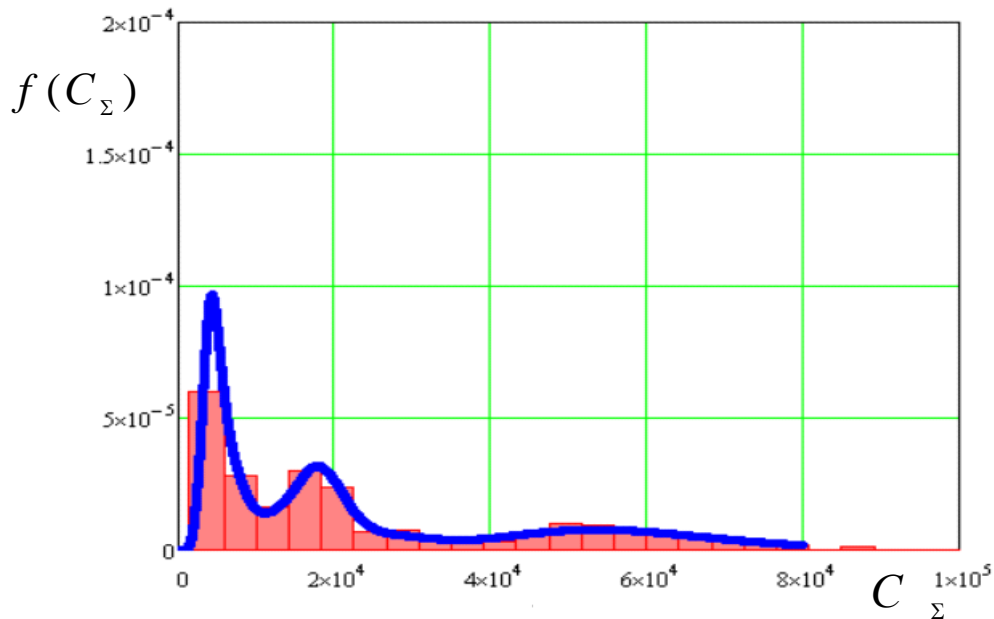


Рис. 3.12. ЩРІ витрат на діагностування у випадку поліноміальної моделі

У випадку розрахунку статистичних характеристик для трудомісткості всі розрахунки виконуються за аналогічною методикою.

3.4 Метод вирішення оберненої задачі під час оптимізації рівнів ймовірностей помилок першого та другого роду, що мають місце у процесі діагностування та відновлення працездатності наземних засобів аеронавігації

На етапі проектування НЗА вирішуються задачі вибору контрольно-вимірювальної апаратури для забезпечення процесів діагностування та відновлення працездатності. Для цієї апаратури характерні помилки першого та другого родів [45–47]. Під час вирішення прямої задачі діагностування, розглянутої в п. 3.2, була встановлена функціональна залежність показника ефективності (математичного сподівання тривалості діагностування) від параметрів контрольно-вимірювальної апаратури. У загальному випадку ця залежність має поліноміальний характер відносно умовних ймовірностей помилок першого та другого родів. Такі функції зазвичай мають оптимальні значення. Тому є очевидним існування таких параметрів КВА, що будуть забезпечувати мінімум математичного сподівання тривалості діагностування.

Для розв'язання оберненої задачі необхідно знати: структуру досліджуваного об'єкта; вид ПД; імовірності невідповідності елементів

досліджуваного об'єкта вимогам; рівні витрат ресурсів на реалізацію ПД тощо [142].

Розглянемо узагальнений підхід до розв'язання оберненої задачі визначення параметрів поточного ремонту ОПР, коли під час оцінювання відповідності КПП можливі помилки першого та другого роду.

Нехай маємо деякий ОПР, що складається з n структурних елементів. Для цього об'єкта відома модель діагностування і програма діагностування. При цьому діагностична модель складається з m ієрархічних рівнів операцій оцінювання відповідності, де $m \leq n-1$.

Для рішення оберненої задачі визначають повну групу параметрів (вектор помилок першого й другого роду $\vec{\alpha}$ й $\vec{\beta}$ відповідно, вектори тривалостей операцій з оцінювання відповідності \vec{t}_k , операцій заміни невідповідних елементів $\vec{t}_{3.e}$ тощо), які входять до складу одного чи декількох показників ефективності, що характеризують процес поточного ремонту. Один або декілька параметрів визначають як оптимізаційні. При цьому обирають критерій ефективності (наприклад, мінімум або максимум деякого оптимізаційного параметра; не перевищення ним наперед заданого рівня тощо) для фіксації інших параметрів. Для зручності й спрощення завдання припускаємо $\alpha_i = \alpha$; $\beta_i = \beta$; $t_{k_i} = t_k$; $t_{3.e_i} = t_{3.e}$ $\forall i \in (0; m]$.

Для прикладу показниками ефективності можуть бути:

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

Розглянемо випадок оптимізації за показником ефективності у вигляді математичного сподівання тривалості поточного ремонту $m_1(t_{np})$. Вважаємо, що оптимізація буде виконуватись за α , β та t_k . Оскільки відомі ДМ та ПД, то можна встановити залежність

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

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 (рис. 3.13). Розглянемо кожний із цих варіантів.

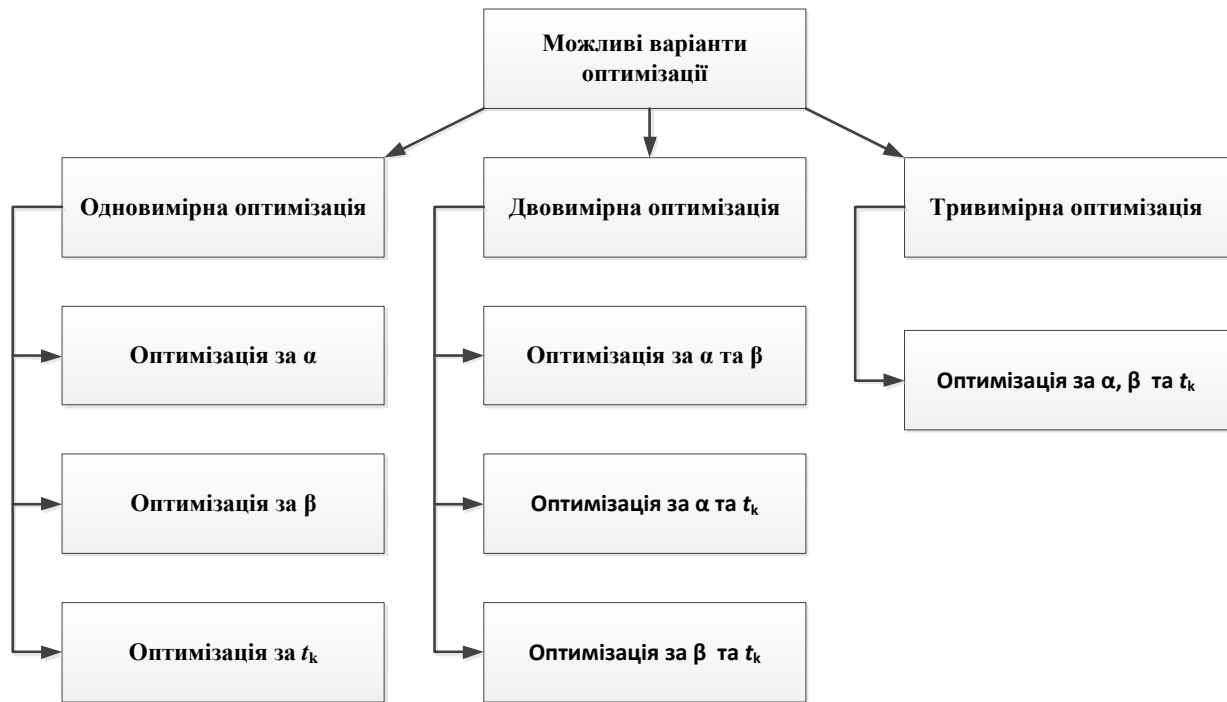


Рис. 3.13. Варіанти оптимізації

Для випадку оптимізації за α необхідно знайти першу похідну функції $\phi(\alpha, \beta, t_k)$ за α . Оскільки ПД має m ієрархічних рівнів операцій оцінки відповідності, то дану функцію можна подати поліномом m -го ступеня відносно α з відомими коефіцієнтами (оскільки β і t_k вважаємо відомими), тобто:

$$\phi(\alpha, \beta, t_k) = a_m(\beta, t_k)\alpha^m + a_{m-1}(\beta, t_k)\alpha^{m-1} + \dots + a_1(\beta, t_k)\alpha + a_0(\beta, t_k); \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha} = m(\beta, t_k)\alpha^{m-1} + (m-1)a_{m-1}(\beta, t_k)\alpha^{m-2} + \dots + a_1(\beta, t_k) = 0 \\ 0 \leq \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (3.9)$$

Розв'язавши рівняння (3.9), можна знайти оптимальне значення параметра α .

Оптимізація за β виконують аналогічно: рівняння (3.8) складається стосовно параметра β ; параметри α і t_k вважаються відомими.

Для випадку оптимізації за t_k функція $\phi(\alpha, \beta, t_k)$ є 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, робимо висновок, що оптимізація за (α, t_k) , за (β, t_k) й (α, β, t_k) також неможлива.

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

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha} = ma_m(\beta, t_k)\alpha^{m-1} + (m-1)a_{m-1}(\beta, t_k)\alpha^{m-2} + \dots + a_1(\beta, t_k) = 0; \\ \frac{\partial \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \beta} = mb_m(\alpha, t_k)\beta^{m-1} + (m-1)b_{m-1}(\alpha, t_k)\alpha^{m-2} + \dots + b_1(\beta, t_k) = 0. \end{cases} \quad (3.10)$$

Для прийняття рішення про можливість розв'язання оптимізаційної задачі необхідно розрахувати гесіан.

Екстремум існує, якщо Гесіан більше нуля, тобто:

$$G = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha^2} & \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha \partial \beta} \\ \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha \partial \beta} & \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \beta^2} \end{vmatrix} > 0$$

або в іншому вигляді:

$$\begin{aligned} & (m(m-1)a_m(\beta, t_k)\alpha^{m-2} + (m-1)(m-2)a_{m-1}(\beta, t_k)\alpha^{m-3} + \dots + 2a_2(\beta, t_k)) \times \\ & \times (m(m-1)b_m(\alpha, t_k)\beta^{m-2} + (m-1)(m-2)b_{m-1}(\alpha, t_k)\beta^{m-3} + \dots + 2b_2(\alpha, t_k)) - \\ & - (ma'_{m_\beta}(\beta, t_k)\alpha^{m-1} + (m-1)a'_{m-1_\beta}(\beta, t_k)\alpha^{m-2} + \dots + a'_{1_\beta}(\beta, t_k))^2 > 0. \end{aligned}$$

При цьому, якщо $\frac{\partial^2 \varphi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha^2} > 0$, то в точці (α, β) будемо мати мінімум, а в протилежному випадку – максимум.

З урахуванням наведеного підходу до розв'язання оберненої задачі розглянемо приклад, коли об'єкт поточного ремонту містить чотири елементи (E_1, E_2, E_3, E_4) , з'єднані послідовно (рис. 3.1) [131].

Припускаємо, що в ОПР може бути лише один невідповідний елемент, а події виникнення невідповідностей елементів – незалежні.

Розглянемо приклад оптимізації ОПР, коли показником ефективності є математичне сподівання тривалості поточного ремонту $m_1(t_k, \alpha, \beta)$.

Для цього ОПР та ПД, що наведено в праці [142], маємо:

$$\begin{aligned}
 m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta) = & Q_1((1-\beta)^2 m_1(t(\text{НТО}_1 / S_1)) + (\beta - \beta^2) m_1(t(\text{НТО}_2 / S_1)) + \\
 & + (\beta - \beta^2) m_1(t(\text{НТО}_3 / S_1)) + \beta^2 m_1(t(\text{НТО}_4 / S_1)) + Q_2(\alpha(1-\beta) m_1(t(\text{НТО}_1 / S_2)) + \\
 & + (1-\beta)(1-\alpha) m_1(t(\text{НТО}_2 / S_2)) + (\beta - \beta^2) m_1(t(\text{НТО}_3 / S_2)) + \beta^2 m_1(t(\text{НТО}_4 / S_2)) + \\
 & + Q_3(\alpha^2 m_1(t(\text{НТО}_1 / S_3)) + (\alpha - \alpha^2) m_1(t(\text{НТО}_2 / S_3)) + \\
 & + (1-\alpha)(1-\beta) m_1(t(\text{НТО}_3 / S_3)) + \beta(1-\alpha) m_1(t(\text{НТО}_4 / S_3)) + \\
 & + Q_4(\alpha^2 m_1(t(\text{НТО}_1 / S_4)) + (\alpha - \alpha^2) m_1(t(\text{НТО}_2 / S_4)) + (\alpha - \alpha^2) m_1(t(\text{НТО}_3 / S_4)) + \\
 & + (1-2\alpha + \alpha^2) m_1(t(\text{НТО}_4 / S_4))), \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

де $m_1(t(\text{НТО}_i / S_j))$ – умовне математичне сподівання сумарного часу виконання i -го набору технологічних операцій під час поточного ремонту i в разі невідповідності j -го елемента ОПР установленим вимогам; S_j – стан ОПР у разі невідповідності j -го елемента; Q_i – імовірність невідповідності i -го елемента ОПР [143].

При цьому:

$$\begin{aligned}
 m_1(t(\text{НТО}_1 / S_1)) &= t_{k2} + t_{k1} + (t_{3.e} + t_{к.п.о}), \quad m_1(t(\text{НТО}_2 / S_1)) = t_{k2} + t_{k1} + 2(t_{3.e} + t_{к.п.о}), \\
 m_1(t(\text{НТО}_3 / S_1)) &= t_{k2} + t_{k3} + 2(t_{3.e} + t_{к.п.о}), \quad m_1(t(\text{НТО}_4 / S_1)) = t_{k2} + t_{k3} + 2(t_{3.e} + t_{к.п.о}), \\
 m_1(t(\text{НТО}_1 / S_2)) &= t_{k2} + t_{k1} + 2(t_{3.e} + t_{к.п.о}), \quad m_1(t(\text{НТО}_2 / S_2)) = t_{k2} + t_{k1} + (t_{3.e} + t_{к.п.о}),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_1(t(\text{НТО}_3 / S_2)) &= t_{k2} + t_{k3} + 3(t_{3.e} + t_{к.п.о}), & m_1(t(\text{НТО}_4 / S_2)) &= t_{k2} + t_{k3} + 3(t_{3.e} + t_{к.п.о}), \\
m_1(t(\text{НТО}_1 / S_3)) &= t_{k2} + t_{k1} + 3(t_{3.e} + t_{к.п.о}), & m_1(t(\text{НТО}_2 / S_3)) &= t_{k2} + t_{k1} + 3(t_{3.e} + t_{к.п.о}), \\
m_1(t(\text{НТО}_3 / S_3)) &= t_{k2} + t_{k3} + (t_{3.e} + t_{к.п.о}), & m_1(t(\text{НТО}_4 / S_3)) &= t_{k2} + t_{k3} + 4(t_{3.e} + t_{к.п.о}), \\
m_1(t(\text{НТО}_1 / S_4)) &= t_{k2} + t_{k1} + 4(t_{3.e} + t_{к.п.о}), & m_1(t(\text{НТО}_2 / S_4)) &= t_{k2} + t_{k1} + 4(t_{3.e} + t_{к.п.о}), \\
m_1(t(\text{НТО}_3 / S_4)) &= t_{k2} + t_{k3} + 4(t_{3.e} + t_{к.п.о}), & m_1(t(\text{НТО}_4 / S_4)) &= t_{k2} + t_{k3} + (t_{3.e} + t_{к.п.о}).
\end{aligned}$$

де $t_{к.п.о}$ – середня тривалість часу контролю працездатності всього ОПР.

Можливі випадки одновимірної та двовимірної оптимізації. Розглянемо ці випадки.

1. Одновимірна оптимізація. З урахуванням формул (3.8), (3.9) при оптимізації за α маємо такі розрахункові співвідношення:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial \alpha} &= Q_2(1-\beta)(m_1(t(\text{НТО}_1 / S_2))) - m_1(t(\text{НТО}_2 / S_2)) + \\
&+ Q_3(2\alpha m_1(t(\text{НТО}_1 / S_3))) + (1-2\alpha)m_1(t(\text{НТО}_2 / S_3)) - (1-\beta)m_1(t(\text{НТО}_3 / S_2)) - \\
&- \beta m_1(t(\text{НТО}_4 / S_3)) + Q_4(2\alpha m_1(t(\text{НТО}_1 / S_4))) + (1-2\alpha)m_1(t(\text{НТО}_2 / S_4)) + \\
&+ (1-2\alpha)m_1(t(\text{НТО}_2 / S_4)) + m_1(t(\text{НТО}_3 / S_4)) - (2-2\alpha)m_1(t(\text{НТО}_4 / S_4)) = 0.
\end{aligned} \quad (3.12)$$

Виконавши математичні перетворення у формулі (3.12), зведемо його до вигляду

$$a_2(\beta, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})\alpha_{\min} = a_1(\beta, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}),$$

$$\alpha_{\min} = \frac{a_1(\beta, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})}{a_2(\beta, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})},$$

де

$$\begin{aligned}
a_1(\beta, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}) &= Q_2(1-\beta)(m_1(t(\text{НТО}_1 / S_2))) - m_1(t(\text{НТО}_2 / S_2)) + Q_3(m_1(t(\text{НТО}_2 / S_3))) - \\
&- (1-\beta)m_1(t(\text{НТО}_3 / S_3)) - \beta m_1(t(\text{НТО}_4 / S_3)) + Q_4(m_1(t(\text{НТО}_2 / S_4))) + \\
&+ m_1(t(\text{НТО}_3 / S_4)) + 2m_1(t(\text{НТО}_4 / S_4));
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_2(\beta, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}) &= 2Q_3(m_1(t(\text{НТО}_1 / S_3))) - m_1(t(\text{НТО}_2 / S_3)) + 2Q_4(m_1(t(\text{НТО}_1 / S_4))) - \\
&- m_1(t(\text{НТО}_2 / S_4)) - m_1(t(\text{НТО}_3 / S_4)) + m_1(t(\text{НТО}_4 / S_4)).
\end{aligned}$$

Під час оптимізації за β аналогічно знаходимо:

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial \beta} &= Q_1(-2(1-\beta)m_1(t(\text{НТО}_1 / S_1))) + (1-2\beta)(m_1(t(\text{НТО}_2 / S_1))) + \\ &+ m_1(t(\text{НТО}_3 / S_1)) + 2\beta m_1(t(\text{НТО}_4 / S_1)) + Q_2(-\alpha m_1(t(\text{НТО}_1 / S_2))) - \\ &- (1-\alpha)m_1(t(\text{НТО}_2 / S_2)) + (1-2\beta)m_1(t(\text{НТО}_3 / S_2)) + 2\beta m_1(t(\text{НТО}_4 / S_2)) + \\ &+ Q_3(1-\alpha)(m_1(t(\text{НТО}_3 / S_3)) + m_1(t(\text{НТО}_4 / S_3))) = 0; \\ a_2(\alpha, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})\beta_{\min} &= a_1(\alpha, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}); \beta_{\min} = \frac{a_1(\alpha, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})}{a_2(\alpha, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})}, \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} a_1(\alpha, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}) &= Q_1(-2m_1(t(\text{НТО}_1 / S_1))) + m_1(t(\text{НТО}_2 / S_1)) + m_1(t(\text{НТО}_3 / S_1)) + \\ &+ Q_2(-\alpha m_1(t(\text{НТО}_1 / S_2))) - (1-\alpha)m_1(t(\text{НТО}_2 / S_2)) + m_1(t(\text{НТО}_3 / S_2)) + \\ &+ Q_3(1-\alpha)(m_1(t(\text{НТО}_4 / S_3))) - m_1(t(\text{НТО}_3 / S_3)). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2(\alpha, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}) &= 2Q_1(m_1(t(\text{НТО}_1 / S_1))) - m_1(t(\text{НТО}_2 / S_1)) - m_1(t(\text{НТО}_3 / S_1)) + \\ &+ m_1(t(\text{НТО}_4 / S_1)) + 2Q_2(m_1(t(\text{НТО}_4 / S_2))) - m_1(t(\text{НТО}_3 / S_2)). \end{aligned}$$

Під час оптимізації за t_k припускаємо:

$$t_{k1} = t_{k2} = t_{k3} = t_k.$$

Тоді

$$\begin{aligned} \frac{\partial m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial t_k} &= Q_1((1-\beta)^2 + (\beta-\beta^2) + (\beta-\beta^2) + \beta^2) + Q_2(\alpha(1-\beta) + (1-\beta)(1-\alpha) + \\ &+ (\beta-\beta^2) + \beta^2) + Q_3(\alpha^2 + (\alpha-\alpha^2) + (1-\alpha)(1-\beta) + \beta(1-\alpha)) + Q_4(\alpha^2 + \alpha - \alpha^2 + \\ &+ \alpha - \alpha^2 + 1 - 2\alpha + \alpha^2) = Q_1(1-2\beta + \beta^2 + 2\beta - \beta^2) + Q_2(\alpha - \alpha\beta + 1 - \alpha - \beta + \alpha\beta + \beta) + \\ &+ Q_3(\alpha + 1 - \alpha - \beta + \alpha\beta + \beta - \alpha\beta) + Q_4 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 1 \neq 0. \end{aligned}$$

Отже, оптимізація за t_k неможлива.

2. Двовимірна оптимізація. Розглянемо випадок оптимізації параметрів поточного ремонту за α і β . Спочатку перевіряють можливість вирішення задачі оптимізації шляхом визначення гесіана [20].

$$\text{Якщо гесіан } G = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial \alpha^2} & \frac{\partial^2 m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial \alpha \partial \beta} \\ \frac{\partial^2 m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial \beta \partial \alpha} & \frac{\partial^2 m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial \beta^2} \end{vmatrix} > 0, \text{ то оптимум існує.}$$

Для цього прикладу ОПР та ПД [21] маємо:

$$\frac{\partial^2 m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial \alpha^2} = 2Q_3(m_1(t(\text{НТО}_1 / S_3)) - m_1(t(\text{НТО}_2 / S_3)) + m_1(t(\text{НТО}_3 / S_1))) + \\ + 2Q_4(m_1(t(\text{НТО}_1 / S_4)) - m_1(t(\text{НТО}_2 / S_4)) - m_1(t(\text{НТО}_3 / S_4)) + m_1(t(\text{НТО}_4 / S_4)));$$

$$\frac{\partial^2 m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial \alpha \partial \beta} = Q_2(m_1(t(\text{НТО}_2 / S_2)) - m_1(t(\text{НТО}_1 / S_2))) + \\ + Q_3(m_1(t(\text{НТО}_3 / S_3)) - m_1(t(\text{НТО}_4 / S_3)));$$

$$\frac{\partial^2 m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial \beta \partial \alpha} = Q_2(m_1(t(\text{НТО}_2 / S_2)) - m_1(t(\text{НТО}_1 / S_2))) + \\ + Q_3(m_1(t(\text{НТО}_3 / S_3)) - m_1(t(\text{НТО}_4 / S_3)));$$

$$\frac{\partial^2 m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta)}{\partial \beta^2} = 2Q_1(m_1(t(\text{НТО}_1 / S_1)) - m_1(t(\text{НТО}_2 / S_1)) + m_1(t(\text{НТО}_4 / S_1))) + \\ + 2Q_2(m_1(t(\text{НТО}_4 / S_2)) - m_1(t(\text{НТО}_3 / S_2))).$$

З урахуванням формули (3.10) визначають перші частинні похідні показника ефективності та знаходять оптимальні числові значення $(\alpha_{\text{opt}}; \beta_{\text{opt}})$, розв'язуючи систему рівнянь

$$\begin{cases} a_2(\beta_{\text{opt}}, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})\alpha_{\text{opt}} = a_1(\beta_{\text{opt}}, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}), \\ a_2(\alpha_{\text{opt}}, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})\beta_{\text{opt}} = a_1(\alpha_{\text{opt}}, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}). \end{cases} \quad (3.13)$$

Виразивши α_{opt} з першого рівняння системи (3.13) та підставивши його у друге рівняння цієї системи, отримаємо рівняння, з якого визначаємо β_{opt} :

$$\beta_{\text{opt}} = \frac{a_1\left(\frac{a_1(\beta_{\text{opt}}, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})}{a_2(\beta_{\text{opt}}, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})}, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}\right)}{a_2\left(\frac{a_1(\beta_{\text{opt}}, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})}{a_2(\beta_{\text{opt}}, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о})}, t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}\right)}.$$

Визначивши β_{opt} з першого рівняння системи (3.13), знаходять α_{opt} .

Розглянемо випадок оптимізації за показником ефективності у вигляді дисперсії тривалості поточного ремонту $\mu_2(t_{\text{пр}})$. Як і в випадку математичного сподівання оптимізація здійснюється за параметрами α , β та t_k у загальному випадку:

$$\mu_2(t_{\text{пр}}) = f(\alpha, \beta, t_k, m_1(t_{\text{пр}})) \quad (3.14)$$

При цьому оптимізаційна функція може бути зведена до вигляду (3.8), а порядок оптимізації (оскільки необхідно досягнути мінімального значення дисперсії) за формулою (3.9) та (3.10), а отже аналогічно випадку для математичного сподівання. Розглянемо приклад для ОПР, наведеного на рис. 3.1.

$$\mu_2(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (m_1(t(\text{НТО}_j / S_i)) - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2$$

Вираз для математичного сподівання наведено вище (формула (3.11)). Виконаємо одновимірну оптимізацію за показником α .

При цьому для $t_{ki} = t_k$

$$\begin{aligned} \mu_2(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) = & \frac{1}{16} ((2t_k + (t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + 3(2t_k + 2(t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - \\ & - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + (2t_k + 2(t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + (2t_k + (t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - \\ & - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + 2(2t_k + 3(t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + 2(2t_k + 3(t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - \\ & - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + (2t_k + (t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + 4(2t_k + 4(t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - \\ & - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + (2t_k + (t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2) = \frac{1}{4} (2t_k + (t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - \\ & - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + (2t_k + 2(t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + (2t_k + 3(t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - \\ & - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 + (2t_k + 4(t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}) - m_1(t_k, t_{\text{зе}}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta))^2 \end{aligned}$$

Позначимо $t_1 = 2t_k$ та $t_2 = t_{\text{зе}} + t_{\text{КПО}}$, тоді:

$$\begin{aligned}
\mu_2(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) &= \frac{1}{4} ((t_1 + t_2)^2 - 2(t_1 + t_2)m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) + (t_1 + 2t_2)^2 - \\
&- 2(t_1 + 2t_2)m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) + (t_1 + 3t_2)^2 - 2(t_1 + 3t_2)m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) + \\
&+ (t_1 + 4t_2)^2 - 2(t_1 + 4t_2)m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) + 4m_1^2(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) = \\
&= \frac{1}{4} (4t_1^2 + 20t_1t_2 + 30t_2^2 - 8t_1m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) - 20t_2m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) + \\
&+ 4m_1^2(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta)) = t_1^2 + 5t_1t_2 + 7,5t_2^2 - (2t_1 + 5t_2)m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) + \\
&+ m_1^2(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta)
\end{aligned}$$

Позначимо $t_3 = t_1^2 + 5t_1t_2 + 7,5t_2^2$ та $t_4 = 2t_1 + 5t_2$, тоді:

$$\mu_2(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) = t_3 - t_4 m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) + m_1^2(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) \quad (3.15)$$

Знайдемо похідну по α :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \mu_2(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta)}{\partial \alpha} &= -t_4 \frac{\partial m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta)}{\partial \alpha} + 2m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) \frac{\partial m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta)}{\partial \alpha} = \\
&= (2m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) - t_4) \frac{\partial m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta)}{\partial \alpha} = 0
\end{aligned}$$

Як видно з (3.15) функції $\mu_2(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta)$ матиме два екстремуми, а саме:

$$\begin{cases} \frac{\partial m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta)}{\partial \alpha} \Big|_{\alpha=\alpha_1^*} = 0 \\ 2m_1(t_k, t_{3e}, t_{\text{КПО}}, \alpha, \beta) - t_4 \Big|_{\alpha=\alpha_2^*} = 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

Перший вираз має розв'язок за формулою (3.13).

Для другого виразу отримаємо:

$$\begin{aligned}
&2(Q_1((1-\beta)^2(t_1+t_2) + (\beta-\beta^2)(t_1+2t_2+t_1+2t_2) + \beta^2(t_1+2t_2)) + Q_2(\alpha(1-\beta)(t_1+2t_2) + \\
&+ (1-\beta)(1-\alpha)(t_1+t_2) + (\beta-\beta^2)(t_1+3t_2) + \beta^2(t_1+3t_2)) + Q_3(\alpha^2(t_1+3t_2) + \\
&+ (\alpha-\alpha^2)(t_1+3t_2) + (1-\alpha)(1-\beta)(t_1+t_2) + \beta(1-\alpha)(t_1+4t_2)) + \\
&+ Q_4((t_1+4t_2)(\alpha^2 + \alpha - \alpha^2 + \alpha - \alpha^2) + (1-\alpha)^2(t_1+t_2) - t_4) = 0
\end{aligned}$$

Тоді:

$$\begin{aligned}
&2(Q_1((1-\beta)^2(t_1+t_2) + \beta(t_1+2t_2)) + Q_2(\alpha(1-\beta)(t_1+2t_2) + (1-\beta)(1-\alpha)(t_1+t_2) + \\
&+ \beta(t_1+3t_2)) + Q_3(\alpha(t_1+3t_2) + (1-\alpha)(1-\beta)(t_1+t_2) + \beta(1-\alpha)(t_1+4t_2)) + \\
&+ Q_4((2\alpha - \alpha^2)(t_1+4t_2) + (1-\alpha)^2(t_1+t_2)) - t_4) = 0
\end{aligned}$$

Нехай

$$Q_1((1-\beta)^2(t_1+t_2)+\beta(t_1+2t_2))+Q_2((1-\beta)(t_1+t_2)+\beta(t_1+3t_2))+Q_3(1-\beta)(t_1+t_2)+\beta(t_1+4t_2))+Q_4(t_1+t_2)-0,5t_4=b_0$$

Тоді отримаємо

$$2(b_0+Q_2(\alpha(1-\beta)(t_1+2t_2)-\alpha(1-\beta)(t_1+t_2))+Q_3(\alpha(t_1+3t_2)-\alpha(1-\beta)(t_1+t_2)-\alpha\beta(t_1+4t_2))+Q_4((2\alpha-\alpha^2)(t_1+4t_2)+(\alpha^2-2\alpha)(t_1+t_2)))=0$$

Позначимо:

$$Q_2(1-\beta)t_2+Q_3(2t_2-3t_2\beta)+Q_46t_2=b_1, -3Q_4t_2=b_2$$

Звідси отримаємо:

$$b_2\alpha^2+b_1\alpha+b_0=0$$

Отже,

$$\alpha_{2,3}^* = -\frac{b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4b_0b_2}}{2b_2}$$

Тому, оптимізація по α матиме три екстремуми.

Оптимізація по β виконується аналогічно.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Розроблено метод знаходження ЩРІ часових витрат на діагностування та відновлення працездатності НЗА, що заснований на використанні матричного апарату представлення аналітичних співвідношень, на використанні ЩРІ часових витрат окремих контрольних-вимірювальних операцій та застосуванні аналітичних співвідношень, що дозволяють проводити оцінку ЩРІ вартісних та трудомісткісних витрат на основі часових витрат на діагностування та відновлення працездатності.

2. У розділі розроблено метод визначення оптимальних значень умовних ймовірностей помилок першого та другого роду за умов використання показника ефективності у вигляді математичного сподівання та дисперсії тривалості діагностування. Оптимізаційна задача вирішувалася на основі диференціального числення та застосуванні матриці гесіана для перевірки можливості отримання

оптимізаційного рішення. Дослідження різних варіантів оптимізації показало, що за параметром тривалості контролю елементів об'єкту діагностування оптимізація неможлива.

3. Порівняння результатів статистичного моделювання процесу визначення відповідності КПП x_i вимогам та теоретичних розрахунків, які виконані на основі отриманих формул, свідчить про достовірність аналітичних співвідношень. При цьому оптимізація значень ймовірностей помилок першого та другого роду дозволяє зменшити витрати ресурсів, що у свою чергу призводить до більш ефективного функціонування СЕ.

4. У розділі виконаний розрахунок щільностей розподілу ймовірностей витрат на діагностування для чотирьох моделей залежностей між вартістю діагностування та тривалістю діагностування: лінійна, квадратична, експоненціальна, поліноміальна (узагальнена). Результати статистичного моделювання підтвердили правильність виконаних розрахунків.

Список публікацій здобувача за матеріалами третього розділу

1. 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.

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

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

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Yashanov I., Asanov M. 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.

8. 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.

9. 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.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

4.1 Методика вирішення прямої задачі в системах експлуатації наземних засобів аеронавігації

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

Методика вирішення прямої задачі базується на положеннях теорії ймовірності, математичної статистики.

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

Нормативною базою для цієї методики є наступні стандарти:

1. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення.

2. ДСТУ 3433-96 (ГОСТ 27.005-97) Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення

3. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення

4. ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними.

5. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування технічного стану. Терміни та визначення.

У цих стандартах наводяться основні положення, терміни та визначення щодо вирішення задач аналізування надійності технічних систем.

Для реалізації методики виконуються наступні етапи:

1. Обстежити структурну схему об'єкту 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 ОПР, кількість яких дорівнює кількості елементів 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 ймовірності 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.

Основна задача – визначення показника ефективності процесу проведення діагностування та поточного ремонту складної технічної системи (пряма задача).

Початковими даними для розрахунку є:

1. Структурна схема об'єкту діагностування та ремонту.
2. Тривалості контрольних операцій щодо діагностування окремих блоків та об'єкту в цілому, а також тривалості ремонтних робіт.
3. Ймовірності відмов структурних елементів ДМ.
4. Умовні ймовірності помилок першого та другого роду.

Під час синтезу цієї методики вважаємо, що під час відновлення працездатності окремого елемента об'єкта поточного ремонту виконується його заміна, тобто час ремонту дорівнює тривалості заміни елемента. У загальному випадку всі тривалості є випадковими величинами [20]. Тому для їх найбільш повного опису необхідно знати відповідні щільності розподілу ймовірностей. У випадку наближеного розрахунку достатньо обмежитися першим початковим та другим центральними моментами випадкової величини, тобто математичне сподівання та дисперсією. Крім того, відомими мають бути ймовірності відмови

кожного елемента об'єкта поточного ремонту (Q_i) [21]. Під час вирішення прямої задачі відомими також мають бути ймовірності прийняття хибних рішень у процесі діагностування, ймовірність помилок першого роду α (коли працездатний елемент вважається непрацездатним) та ймовірність помилки другого роду β (коли непрацездатний елемент вважається працездатним).

Показниками ефективності під час вирішення прямої задачі можуть бути:

- щільність розподілу витрат;
- щільність розподілу трудомісткості;
- щільність розподілу тривалості діагностування;
- щільність розподілу ймовірності правильного діагностування.

У переважній більшості науково-технічних джерел під час визначення показника ефективності зазвичай користуються лише точковими оцінками випадкової величини. Проте такий підхід може не враховувати всю повноту необхідної інформації. Тому доречним є використання щільності розподілу ймовірності, яка найбільш повно характеризує випадкову величину. З відомої щільності розподілу ймовірності можуть бути знайдені точкові оцінки.

Окрім того, припустимо, що під час діагностування в об'єкті відмовив лише один елемент.

Методика вирішення прямої задачі включає наступні операції.

1. На етапі обстеження об'єкта поточного ремонту необхідно:

1.1 Визначити структурну та функціональну схеми;

1.2 Визначити (врахувати) можливі помилки першого та другого роду під час проведення процедури діагностування;

1.3 Визначити ймовірності відмов структурних елементів ДМ на заданому рівні;

1.4 Визначити тривалості контрольних операцій для кожного елемента ДМ;

1.5 Визначити тривалості проведення НТО та ремонтних робіт.

2. Створити діагностичну модель.

В загальному випадку може бути декілька моделей на різних рівнях представлення об'єкта діагностування (стійка обладнання, блок, плата тощо).

3. Для реалізації третього етапу необхідно:

3.1 Зробити вибір методу діагностування. Умовно методи діагностування технічного стану НЗА можна поділити на дві групи – статистичні та аналітичні.

3.2 Статистичні методи ґрунтуються на застосуванні статистичних даних про відмови й ушкодження у вузлах і елементах НЗА, які заздалегідь збирають і аналізують. У результаті складають таблицю, у якій наводять ознаки прояву відмов та пошкоджень, і відповідно для кожної з ознак – ранжований перелік причин, що їх зумовили. Ранжування виконують у міру зменшення ймовірності причин відмов і пошкоджень.

3.3 Аналітичні методи діагностування технічного стану НЗА умовно можна поділити на дві підгрупи. Методи першої підгрупи встановлюють спосіб перевірки працездатності НЗА. Методи другої підгрупи визначають послідовність виконання контрольних-вимірних операцій [54–56].

У даній методиці приведений приклад на основі інженерного методу.

Використовуючи аналітичні методи, розробники НЗА створюють ПД виробів, які включають до складу експлуатаційно-технічної документації НЗА. Програми діагностування розробляють також в експлуатаційних підрозділах підприємств ЦА.

Метод половинного розбиття ефективний у разі послідовного з'єднання елементів у ДМ. Якщо елементи в ДМ не з'єднані послідовно, то тоді можна використовувати основний підхід до методу половинного розбиття, вважаючи його таким, за його допомогою реалізується інженерний метод розроблення ПД. Дотримуючись методу половинного розбиття першим контролюють той параметр в ОД, що розбиває всі елементи ДМ на дві групи з приблизно однаковою кількістю елементів. Надалі процедуру розбиття на дві групи елементів виконують у несправній частині ОД, яку визначають після проведення контрольної операції [131].

Інженерні методи ґрунтуються на досвіді експлуатації і можуть використовувати основні можливості інших методів для побудови ПД, які враховують особливості елементної бази, конструкційного виконання НЗА,

практичного застосування конкретних виробів для НЗА польотів і ряд інших особливостей цього виробу [131]. Практичний досвід розроблення ПД показує, що чим більше апріорної інформації враховується під час синтезу ПД, тим ефективніші ці програми.

4. На четвертому етапі необхідно виконати наступні роботи:

4.1 Розробити ПД та ППР, використовуючи його ДМ.

Модель обладнання як об'єкт поточного ремонту не обов'язково буде повторенням його структурної або функціональної схеми, а визначається певною глибиною локалізації відмов [120; 121].

Програма діагностування показує послідовність перевірки елементів ДМ для визначення несправного блоку.

5. На п'ятому етапі необхідно виконати наступні роботи:

5.1 Визначити стратегію заміни елементів ДМ. Найпростішою стратегією є послідовна заміна елементів від першого до останнього.

Наприклад, якщо об'єктивно відмовив третій елемент, але в наслідок хибних рішень діагностовано відмову шостого елементу, то після заміни шостого елементу далі будуть замінюватися елементи у послідовності перший, другий, третій.

Для визначеності в цій методиці таке правило є обґрунтованим, якщо $Q_1 > Q_2 > \dots > Q_n$, де n – кількість елементів ДМ.

5.2 У процесі контролю технічного стану та діагностування можуть виникати помилки двох типів: 1) коли справний об'єкт визначається як несправний (помилка першого роду) та 2) коли несправний об'єкт визначається як справний (помилка другого роду). Якщо помилки відсутні, то система контролю технічного стану працює ідеально. Наявність похибок знижує ефективність системи експлуатації в цілому [123]. Тому необхідність врахування помилок першого та другого роду є запорукою ефективного проектування систем експлуатації.

6. На шостому етапі необхідно виконати наступні роботи:

6.1 Скласти декілька програм діагностування, кількість яких дорівнює кількості елементів поточного ремонту.

Якщо допустити, що ймовірності помилок першого та другого роду не дорівнюють нулю, то у випадку відмови i -го елемента ДМ можливе виконання не одного НТО, а цілої сукупності (кількість НТО дорівнює кількості елементів ДМ). При цьому один із цих НТО буде вірним, а всі інші – хибними.

6.2 Кількість операцій, які будуть входити в склад НТО, пов'язані з хибним виявленням елемента, що відмовив, буде визначатися прийнятою стратегією виконання дій щодо відновлювальних робіт. До числа таких стратегій можна віднести:

- повторення ПД з початку;
- повторний контроль тих елементів ДМ, які мають більшу ймовірність відмови.

6.3 При цьому припустимо, що факт хибного виявлення елемента, що відмовив, буде зафіксований опосередкованим методом. Це пояснюється тим, що інженер-ремонтник буде виконувати вихідний контроль працездатності всього ОПР і зафіксує його непрацездатний стан. При цьому вважатимемо, що під час контролю працездатності всього ОПР помилки першого та другого роду відсутні.

7. На цьому етапі необхідно виконати наступні роботи:

7.1 Для знаходження числових значень ймовірності проведення НТО у випадку можливої відмови певного елемента ОПР необхідно проаналізувати програми діагностування у разі наявності похибок першого та другого роду. У загальному випадку ці ймовірності є функціями від ймовірностей похибок першого та другого роду.

7.2 У загальному випадку ймовірність проведення НТО знаходиться графо-аналітичним методом. При цьому вона дорівнює добутку всіх ймовірностей, зазначених на ребрах графу, на шляху від контролю першого елемента графу ПД до набору певного НТО.

У загальному випадку формула для ймовірності проведення певного НТО матиме вигляд:

$$P(\text{НТО } i / \text{відмова ел. } j) = \alpha^{n_1} \beta^{n_2} (1 - \alpha)^{n_3} (1 - \beta)^{n_4},$$

де n_1 – кількість помилок першого роду, позначені на ребрах графу ППР, на шляху до i -го НТО (може приймати значення від нуля до k , де k – кількість ієрархічних рівнів у ППР); n_2 – кількість помилок другого роду, позначені на ребрах графу ППР, на шляху до i -го НТО (може приймати значення від нуля до k); n_3 – кількість правильних діагностувань щодо справного стану елементу ОПР, позначені на ребрах графу ППР, на шляху до i -го НТО (може приймати значення від нуля до k); n_4 – кількість правильних діагностувань щодо несправного стану елементу ОПР, позначені на ребрах графу ППР, на шляху до i -го НТО (може приймати значення від нуля до k).

8. На восьмому етапі необхідно виконати наступні роботи:

8.1 У разі відомої ЩРІ тривалості проведення НТО для відмови i -го елементу за формулою повної ймовірності розрахувати ЩРІ тривалості діагностування для відмови i -го елементу. Якщо ЩРІ невідомо, то можна прийняти припущення про її гаусівський характер. Якщо таке припущення зробити неможливо, то необхідно розрахувати математичне сподівання тривалості діагностування на основі відомих значень середніх тривалостей виконання процедур контролю та ремонту.

8.2 Покладемо, що відомо умовні ЩРІ тривалостей виконання НТО для випадку відмови i -ого елементу – $f(\text{НТО } j / \text{відмова ел. } i)$ Вважаємо, що для цих умовних ЩРІ дотримується умова нормування. Тоді:

$$f(t_d / \text{відмова ел. } i) = \sum_{j=1}^n P(\text{НТО } j / \text{відмова ел. } i) f(t_{\text{нто } j} / \text{відмова ел. } i),$$

де n – кількість елементів ДМ.

Для випадку, коли ДМ містить сім елементів, відповідно до умови нормування можна записати

$$\int_0^{\infty} f(t_d / \text{відмова ел.1}) dt_d = P(\text{НТО1} / \text{відмова ел.1}) \int_0^{\infty} f(t_{\text{нто1}} / \text{відмова ел.1}) dt_{\text{нто1}} + \dots + \\ + P(\text{НТО7} / \text{відмова ел.1}) \int_0^{\infty} f(t_{\text{нто7}} / \text{відмова ел.1}) dt_{\text{нто7}} = P(\text{НТО1} / \text{відмова ел.1}) + \dots + \\ + P(\text{НТО7} / \text{відмова ел.1}) = 1.$$

8.3 Для визначення безумовної ЩРІ використовується формула повної ймовірності. Визначивши окремі умовні ЩРІ $f(t_d / \text{відмова ел. } i)$, можна визначити безумовну ЩРІ тривалості реалізації програми діагностування працездатності об'єкта у такому вигляді:

$$f(t_d) = \sum_{i=1}^n Q_i f(t_d / \text{відмова ел.}i).$$

Для ДМ, що містить сім елементів, безумовна ЩРІ $f(t_d)$ буде задовольняти такій умові нормування, тобто:

$$\int_0^{\infty} f(t_d) dt_d = Q_1 \int_0^{\infty} f(t_d / \text{відмова ел.1}) dt_d + Q_2 \int_0^{\infty} f(t_d / \text{відмова ел.2}) dt_d + \\ + Q_3 \int_0^{\infty} f(t_d / \text{відмова ел.3}) dt_d + Q_4 \int_0^{\infty} f(t_d / \text{відмова ел.4}) dt_d + \\ + Q_5 \int_0^{\infty} f(t_d / \text{відмова ел.5}) dt_d + Q_6 \int_0^{\infty} f(t_d / \text{відмова ел.6}) dt_d + \\ + Q_7 \int_0^{\infty} f(t_d / \text{відмова ел.7}) dt_d = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 = 1.$$

Наведені формули для умовних і безумовних ЩРІ є узагальненими на випадок, коли в об'єкті діагностування є n елементів.

9. На дев'ятому етапі необхідно виконати наступні роботи:

9.1 Вираз для математичного сподівання $m_1(t_d)$ представимо як:

$$m_1(t_d) = \int_0^{\infty} t_d f(t_d) dt_d = Q_1 \int_0^{\infty} t_d f(t_d / \text{відмова ел.1}) dt_d + \dots + \\ + Q_n \int_0^{\infty} t_d f(t_d / \text{відмова ел.}n) dt_d = \sum_{i=1}^n Q_i I_i.$$

У цій формулі вирази для I_i можна записати як:

$$I_i = P(\text{НТО1} / \text{відмова ел.}i) m_1(t_{\text{нто1}} / \text{відмова ел.}i) + \\ + P(\text{НТО2} / \text{відмова ел.}i) m_1(t_{\text{нто2}} / \text{відмова ел.}i) + \dots + \\ + P(\text{НТО}n / \text{відмова ел.}i) m_1(t_{\text{нто}n} / \text{відмова ел.}i).$$

9.2 Вираз для дисперсії доцільно представити в такому вигляді:

$$\mu_2(t_d) = \int_0^{\infty} (t_d - m_1(t_d))^2 f(t_d) dt_d = m_2(t_d) - m_1^2(t_d)$$

При цьому другий початковий момент $m_2(t_d)$ можна записати наступним чином:

$$m_2(t_d) = \int_0^{\infty} t_d^2 f(t_d) dt_d = Q_1 \int_0^{\infty} t_d^2 f(t_d / \text{відмова ел.1}) dt_d + \dots + Q_n \int_0^{\infty} t_d^2 f(t_d / \text{відмова ел.n}) dt_d = \sum_{i=1}^n Q_i J_i$$

У виразі величини J_i знаходяться наступним чином:

$$J_i = P(\text{НТО1} / \text{відмова ел.i}) m_2(t_{\text{нто1}} / \text{відмова ел.i}) + P(\text{НТО2} / \text{відмова ел.i}) m_2(t_{\text{нто2}} / \text{відмова ел.i}) + \dots + P(\text{НТО}n / \text{відмова ел.i}) m_2(t_{\text{нто}n} / \text{відмова ел.i}).$$

4.2 Приклади використання методик вирішення прямої задачі діагностування

Розглянемо контрольний приклад використання методики розв'язання прямої задачі.

1. Нехай досліджуваний об'єкт складається з семи функціональних блоків. За результатами його обстеження може бути складена діагностична модель, яка зображена на рис 4.1.

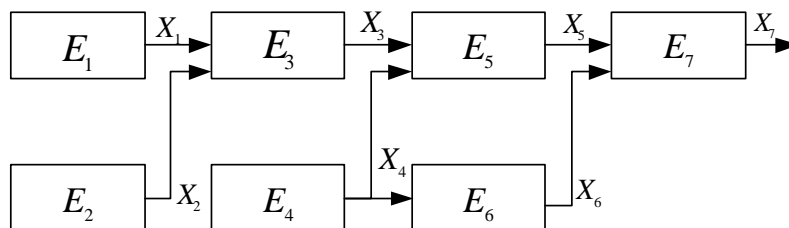


Рис. 4.1. Діагностична модель.

2. Обираємо інженерний метод діагностування, відповідно до якого програма діагностування складається на основі знань та вмінь інженера.

3. Розробимо програми діагностування та поточного ремонту у випадку відсутності похибок першого та другого роду. Програма діагностування на основі

інженерного методу у разі відсутності помилок діагностування наведена на рис. 4.2.

4. Обираємо стратегію заміни елементів у випадку наявності помилок першого та другого роду під час контролю технічного стану об'єкту поточного ремонту, при якій у випадку помилки заміна елементів виконується послідовно, починаючи з першого.

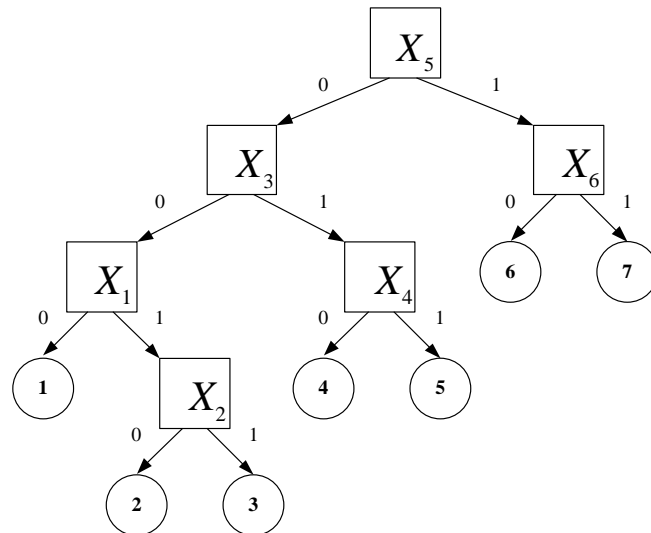


Рис. 4.2. Програма діагностування на основі інженерного метода

5. Складаємо програму діагностування та відновлення працездатності (кількість програм дорівнює кількості елементів ОПР) у випадку наявності помилок першого та другого роду.

Оскільки елементів об'єкту діагностування сім, то і програм буде сім. Приклад програми діагностування у випадку відмови першого елементу об'єкту наведений на рис. 4.3.

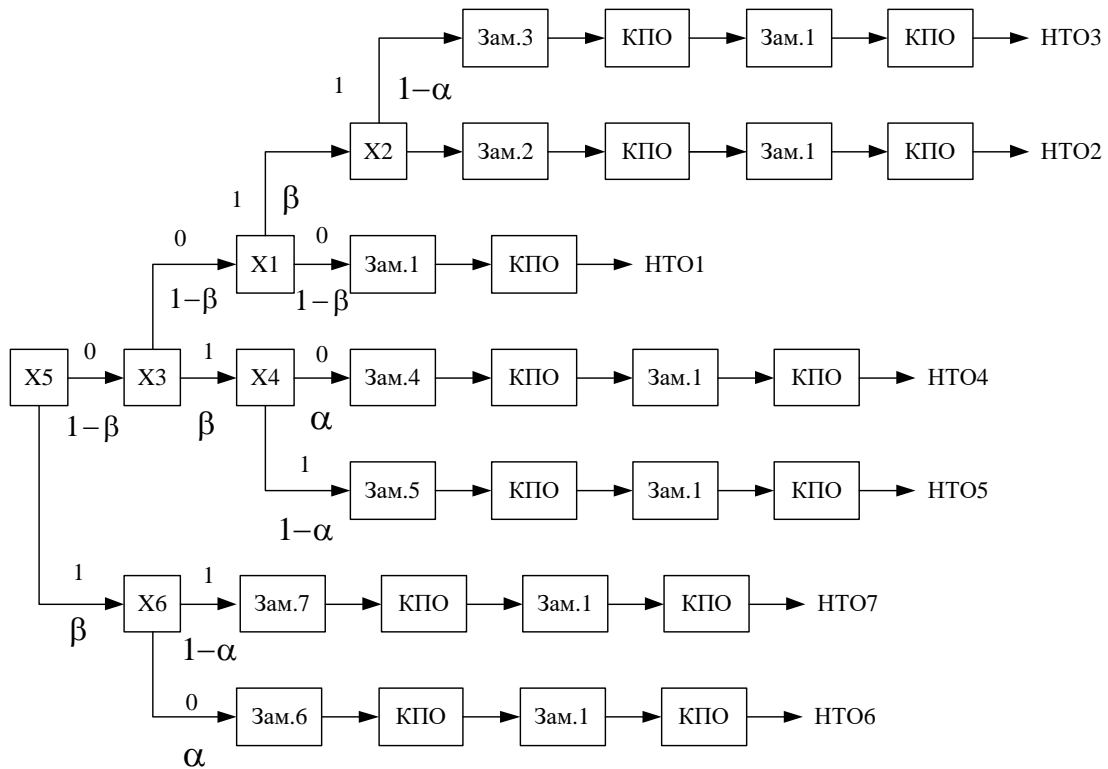


Рис. 4.3. Програма діагностування у випадку наявності помилок діагностування та відмови першого елемента.

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

У випадку відмови першого елемента:

$$\begin{aligned}
 P(\text{НТО1/відмова ел.1}) &= (1-\beta)^3, & P(\text{НТО2/відмова ел.1}) &= \alpha\beta(1-\beta)^2, \\
 P(\text{НТО3/відмова ел.1}) &= \beta(1-\alpha)(1-\beta)^2, & P(\text{НТО4/відмова ел.1}) &= \alpha\beta(1-\beta), \\
 P(\text{НТО5/відмова ел.1}) &= \beta(1-\beta)(1-\alpha), & P(\text{НТО6/відмова ел.1}) &= \alpha\beta, \\
 P(\text{НТО7/відмова ел.1}) &= \beta(1-\alpha).
 \end{aligned}$$

У випадку відмови другого елемента:

$$\begin{aligned}
 P(\text{НТО1/відмова ел.2}) &= \alpha(1-\beta)^2, & P(\text{НТО2/відмова ел.2}) &= (1-\alpha)(1-\beta)^3, \\
 P(\text{НТО3/відмова ел.2}) &= \beta(1-\alpha)(1-\beta)^2, & P(\text{НТО4/відмова ел.2}) &= \alpha\beta(1-\beta), \\
 P(\text{НТО5/відмова ел.2}) &= \beta(1-\beta)(1-\alpha), & P(\text{НТО6/відмова ел.2}) &= \alpha\beta, \\
 P(\text{НТО7/відмова ел.2}) &= \beta(1-\alpha).
 \end{aligned}$$

У випадку відмови третього елемента:

$$\begin{aligned}
P(\text{НТО1/відмова ел.3}) &= \alpha(1-\beta)^2, \quad P(\text{НТО2/відмова ел.3}) = \alpha(1-\alpha)(1-\beta)^2, \\
P(\text{НТО3/відмова ел.3}) &= (1-\alpha)^2(1-\beta)^2, \quad P(\text{НТО4/відмова ел.3}) = \alpha\beta(1-\beta), \\
P(\text{НТО5/відмова ел.3}) &= \beta(1-\beta)(1-\alpha), \quad P(\text{НТО6/відмова ел.3}) = \alpha\beta, \\
P(\text{НТО7/відмова ел.3}) &= \beta(1-\alpha).
\end{aligned}$$

У випадку відмови четвертого елемента:

$$\begin{aligned}
P(\text{НТО1/відмова ел.4}) &= \alpha^2(1-\beta), \quad P(\text{НТО2/відмова ел.4}) = \alpha^2(1-\alpha)(1-\beta), \\
P(\text{НТО3/відмова ел.4}) &= \alpha(1-\alpha)^2(1-\beta), \quad P(\text{НТО4/відмова ел.4}) = (1-\alpha)(1-\beta)^2, \\
P(\text{НТО5/відмова ел.4}) &= \beta(1-\beta)(1-\alpha), \quad P(\text{НТО6/відмова ел.4}) = \beta(1-\beta), \\
P(\text{НТО7/відмова ел.4}) &= \beta^2.
\end{aligned}$$

У випадку відмови п'ятого елемента:

$$\begin{aligned}
P(\text{НТО1/відмова ел.5}) &= \alpha^2(1-\beta), \quad P(\text{НТО2/відмова ел.5}) = \alpha^2(1-\alpha)(1-\beta), \\
P(\text{НТО3/відмова ел.5}) &= \alpha(1-\alpha)^2(1-\beta), \quad P(\text{НТО4/відмова ел.5}) = \alpha(1-\alpha)(1-\beta), \\
P(\text{НТО5/відмова ел.5}) &= (1-\beta)(1-\alpha)^2, \quad P(\text{НТО6/відмова ел.5}) = \beta\alpha, \\
P(\text{НТО7/відмова ел.5}) &= \beta(1-\alpha).
\end{aligned}$$

У випадку відмови шостого елемента:

$$\begin{aligned}
P(\text{НТО1/відмова ел.6}) &= \alpha^3, \quad P(\text{НТО2/відмова ел.6}) = \alpha^3(1-\alpha), \\
P(\text{НТО3/відмова ел.6}) &= \alpha(1-\alpha)^2(1-\beta), \quad P(\text{НТО4/відмова ел.6}) = \alpha^2(1-\alpha)^2, \\
P(\text{НТО5/відмова ел.6}) &= \alpha^2(1-\alpha), \quad P(\text{НТО6/відмова ел.6}) = \alpha(1-\alpha)^2, \\
P(\text{НТО7/відмова ел.6}) &= (1-\alpha)\beta.
\end{aligned}$$

У випадку відмови сьомого елемента:

$$\begin{aligned}
P(\text{НТО1/відмова ел.7}) &= \alpha^3, \quad P(\text{НТО2/відмова ел.7}) = \alpha^3(1-\alpha), \\
P(\text{НТО3/відмова ел.7}) &= \alpha^2(1-\alpha)^2, \quad P(\text{НТО4/відмова ел.7}) = \alpha^2(1-\alpha), \\
P(\text{НТО5/відмова ел.7}) &= \alpha(1-\alpha)^2, \quad P(\text{НТО6/відмова ел.7}) = \alpha(1-\alpha) \\
P(\text{НТО7/відмова ел.7}) &= (1-\alpha)^2.
\end{aligned}$$

7. Для заданих числових значень ймовірності відмов елементів ОПР Q_i за формулою повної ймовірності розраховуємо безумовну ЩРІ тривалості діагностування

Покладемо, що відомо умовні ЩРІ тривалостей виконання НТО для випадку відмови першого елемента – $f(\text{НТО}i/\text{відмова ел.1})$. Вважаємо, що для цих умовних ЩРІ дотримується умова нормування. Тоді:

$$\begin{aligned} f(t_d / \text{відмова ел.1}) &= P(\text{НТО1} / \text{відмова ел.1}) f(t_{\text{нто1}} / \text{відмова ел.1}) + \\ &+ P(\text{НТО2} / \text{відмова ел.1}) f(t_{\text{нто2}} / \text{відмова ел.1}) + \dots + \\ &+ P(\text{НТО7} / \text{відмова ел.1}) f(t_{\text{нто7}} / \text{відмова ел.1}). \end{aligned}$$

Відповідно до умови нормування можна записати

$$\begin{aligned} \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.1}) dt_d &= P(\text{НТО1} / \text{відмова ел.1}) \int_0^\infty f(t_{\text{нто1}} / \text{відмова ел.1}) dt_{\text{нто1}} + \dots + \\ &+ P(\text{НТО7} / \text{відмова ел.1}) \int_0^\infty f(t_{\text{нто7}} / \text{відмова ел.1}) dt_{\text{нто7}} = P(\text{НТО1} / \text{відмова ел.1}) + \dots + \\ &+ P(\text{НТО7} / \text{відмова ел.1}) = 1. \end{aligned}$$

Визначивши окремі умовні ЩРІ $f(t_d/\text{відмова ел. } i)$, можна визначити безумовну ЩРІ тривалості реалізації програми діагностування працездатності об'єкта:

$$\begin{aligned} f(t_d) &= Q_1 f(t_d / \text{відмова ел.1}) + Q_2 f(t_d / \text{відмова ел.2}) + \\ &+ Q_3 f(t_d / \text{відмова ел.3}) + Q_4 f(t_d / \text{відмова ел.4}) + Q_5 f(t_d / \text{відмова ел.5}) + \\ &+ Q_6 f(t_d / \text{відмова ел.6}) + Q_7 f(t_d / \text{відмова ел.7}). \end{aligned}$$

Безумовна ЩРІ $f(t_d)$ буде задовольняти умові нормування, тобто:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty f(t_d) dt_d &= Q_1 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.1}) dt_d + Q_2 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.2}) dt_d + \\ &+ Q_3 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.3}) dt_d + Q_4 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.4}) dt_d + \\ &+ Q_5 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.5}) dt_d + Q_6 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.6}) dt_d + \\ &+ Q_7 \int_0^\infty f(t_d / \text{відмова ел.7}) dt_d = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 = 1. \end{aligned}$$

8. Для отриманої ЩРІ розрахуємо математичне сподівання та дисперсію тривалості процедури діагностування.

$$\begin{aligned}
m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta) = & Q_1((1-\beta)^3(3t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \alpha\beta(1-\beta)^2(4t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \\
& + \beta(1-\alpha)(1-\beta)^2(4t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \alpha\beta(1-\beta)(3t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \\
& + \beta(1-\beta)(1-\alpha)(3t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \alpha\beta(2t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)(2t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о})) + \\
& + Q_2(\alpha(1-\beta)^2(3t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + (1-\alpha)(1-\beta)^3(4t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)(1-\beta)^2(4t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha\beta(1-\beta)(3t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \beta(1-\beta)(1-\alpha)(3t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \alpha\beta(2t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \\
& + \beta(1-\alpha)(2t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о})) + Q_3(\alpha(1-\beta)^2(3t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(1-\alpha)(1-\beta)^2(4t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + (1-\alpha)^2(1-\beta)^2(4t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha\beta(1-\beta)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \beta(1-\beta)(1-\alpha)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \alpha\beta(2t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + \beta(1-\alpha)(2t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о})) + Q_4(\alpha^2(1-\beta)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha^2(1-\alpha)(1-\beta)(4t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \alpha(1-\alpha)^2(1-\beta)(4t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + (1-\alpha)(1-\beta)^2(3t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \beta(1-\beta)(1-\alpha)(3t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \\
& + \beta(1-\beta)(2t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \beta^2(2t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о})) + Q_5(\alpha^2(1-\beta)(3t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha^2(1-\alpha)(1-\beta)(4t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)^2(1-\beta)(4t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(1-\alpha)(1-\beta)(3t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + (1-\beta)(1-\alpha)^2(3t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha\beta(2t_k, +6t_{3.e} + 6t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)(2t_k, +6t_{3.e} + 6t_{к.п.о})) + Q_6(\alpha^3(3t_k, +6t_{3.e} + 6t_{к.п.о}) + \alpha^2(1-\alpha)(3t_k, +7t_{3.e} + \\
& + 7t_{к.п.о}) + \alpha(1-\alpha)^2(3t_k, +6t_{3.e} + 6t_{к.п.о}) + \alpha\beta(1-\beta)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + \beta(1-\beta)(1-\alpha)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + (1-\alpha)(1-\beta)(2t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)(2t_k, + \\
& + 7t_{3.e} + 7t_{к.п.о})) + Q_7(\alpha^3(3t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \alpha^3(1-\alpha)(4t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha^2(1-\alpha)^2(4t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \alpha^2(1-\alpha)(3t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \alpha(1-\alpha)^2(3t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(1-\alpha)(2t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + (1-\alpha)^2(2t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}))
\end{aligned}$$

Отже, отримана функціональна залежність може бути представлена у поліноміальному вигляді відносно параметрів α та β . Порядок поліному визначається кількістю ієрархічних рівнів прийнятої програми діагностування.

Розглянемо ще один приклад вирішення прямої задачі для конкретної радіотехнічної системи.

Виконаємо всю послідовність операцій під час вирішення прямої задачі діагностування антенної системи, наведеної на рис. 1.6. Програма діагностування для цієї системи наведена на рис. 1.7.

Припустимо, що умовні ЩРІ j -ої тривалості у разі відмови i -го елемента мають гаусівську ЩРІ. Початкові дані для розрахунку представлені в табл. 4.1.

У табл. 4.1 були наведені наступні значення: i - це кількість елементів у ОД або кількість НТО, $m_1(\text{НТО})$ і $\sigma(\text{НТО})$ - математичне очікування та дисперсія j -ї

тривалості НТО. Ймовірності помилок першого α та другого β роду постійні для всіх елементів ОД.

Таблиця 4.1

Початкових розрахунків

i	$m_1(\text{НТО})$	$\sigma(\text{НТО})$	Q_i	α	β
1	19	3	0.3	0.08	0.05
2	35	4	0.15	0.08	0.05
3	50	6	0.13	0.08	0.05
4	30	5	0.16	0.08	0.05
5	70	4	0.09	0.08	0.05
6	40	4.5	0.08	0.08	0.05
7	65	4	0.07	0.08	0.05
8	60	3	0.02	0.08	0.05

Вибрано стратегію заміни елементів під час перевірки технічного стану ОД, для якої заміна елементів виконується послідовно від першого до останнього у разі наявності помилок діагностування.

На наступному етапі необхідно побудувати вісім ПД у разі наявності помилок першого та другого роду. Приклад програми діагностування у разі відмови першого елемента ОД показаний на рис. 4.3.

На рис. 4.4 було зроблено наступні позначення: Зам – це заміна елементів ОД, КПО – контроль працездатності об'єкта.

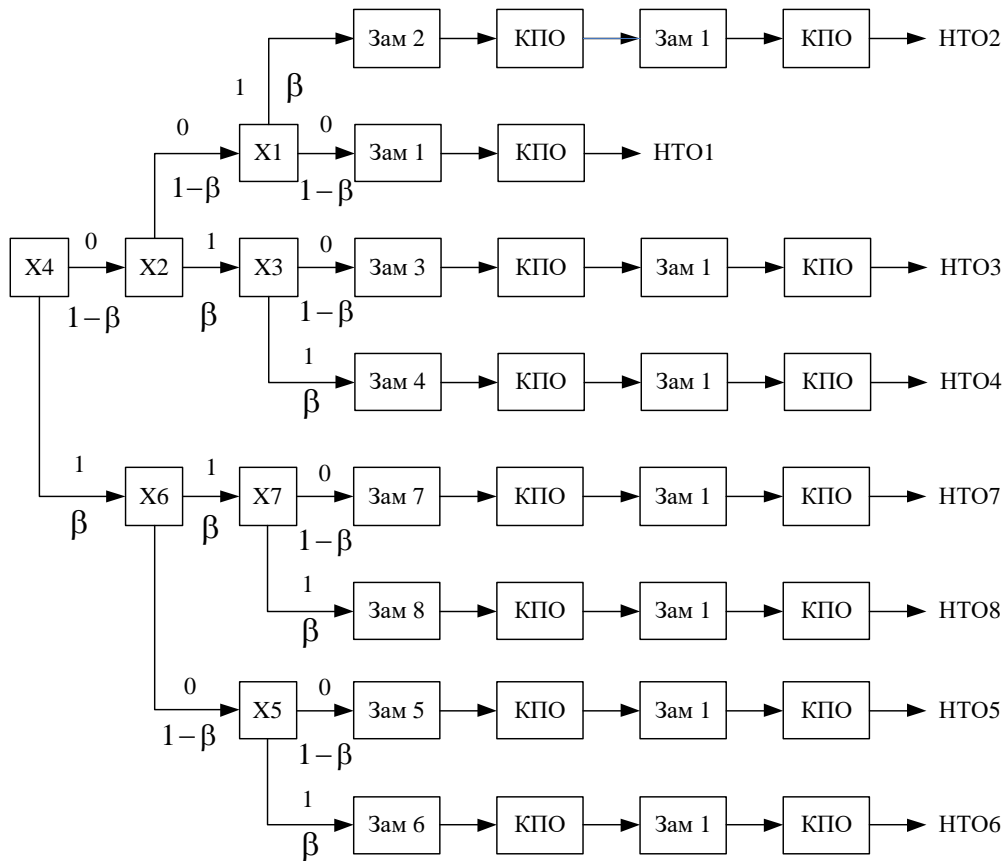


Рис. 4.4. Програми діагностування у разі наявності помилок першого та другого роду та відмови першого елемента.

Визначимо ймовірності виконання певної НТО у випадку відмови кожного з елементів ПД. Наприклад, у випадку відмови першого елемента, ймовірності НТО можуть бути представлені як

$$P(\text{НТО1/відмова ел.1}) = (1 - \beta)^3, \quad P(\text{НТО2/відмова ел.1}) = \beta(1 - \beta)^2,$$

$$P(\text{НТО3/відмова ел.1}) = \beta(1 - \beta)^2, \quad P(\text{НТО4/відмова ел.1}) = \beta^2(1 - \beta),$$

$$P(\text{НТО5/відмова ел.1}) = \beta(1 - \beta)^2, \quad P(\text{НТО6/відмова ел.1}) = \beta^2(1 - \beta),$$

$$P(\text{НТО7/відмова ел.1}) = \beta^2(1 - \beta), \quad P(\text{НТО8/відмова ел.1}) = \beta^3.$$

Умовна ЩРІ тривалості діагностування у разі відмови першого елемента може бути розрахована як

$$\begin{aligned} f(t_{д1}) = & (1 - \beta)^3 f(t_{\text{НТО1}} / \text{відмова ел.1}) + \beta(1 - \beta)^2 (f(t_{\text{НТО2}} / \text{відмова ел.1}) + \\ & + f(t_{\text{НТО3}} / \text{відмова ел.1}) + f(t_{\text{НТО5}} / \text{відмова ел.1})) + \beta^2(1 - \beta) (f(t_{\text{НТО4}} / \text{відмова ел.1}) + \\ & + f(t_{\text{НТО6}} / \text{відмова ел.1}) + f(t_{\text{НТО7}} / \text{відмова ел.1})) + \beta^3 (f(t_{\text{НТО8}} / \text{відмова ел.1})). \end{aligned}$$

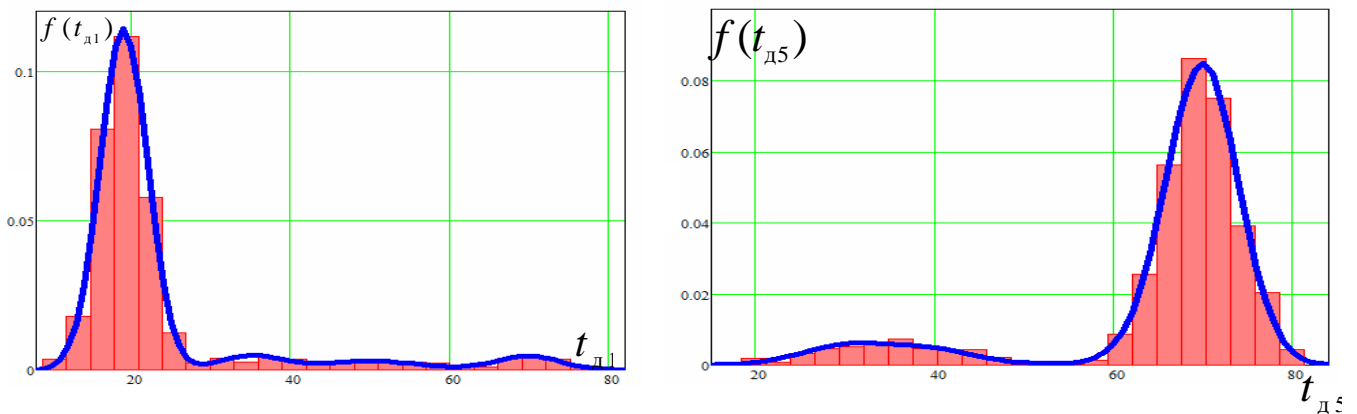
Усі інші умовні ЩРІ обчислюються аналогічно.

Гістограми діагностичного часу, отримані за результатами моделювання методу Монте-Карло у випадку відмов першого та п'ятого елементів та визначені теоретичні умовні ЩРІ показані на рис. 4.5.

Безумовна ЩРІ тривалості діагностування можна записати як

$$f(t_d) = \sum_{i=1}^8 Q_i f(t_{di}).$$

Гістограма тривалості діагностики, отримана за результатами моделювання методу Монте-Карло, та теоретична ЩРІ показані на рис. 4.6.



а) випадок відмови першого елемента

б) випадок відмови п'ятого елемента

Рис. 4.5. Гістограма тривалості діагностування та теоретичні умовні ЩРІ.

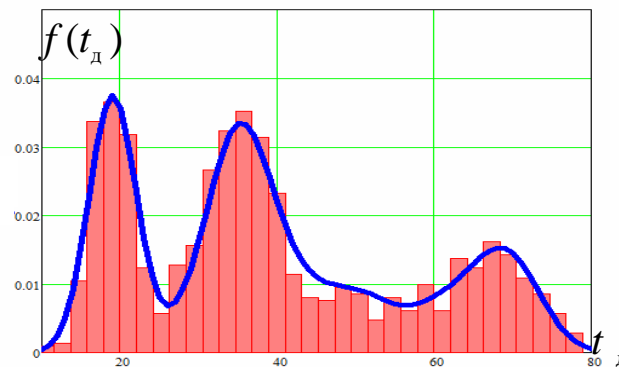


Рис. 4.6. Гістограма тривалості діагностування та розрахована теоретична ЩРІ

На завершальному етапі можна оцінити математичне сподівання та дисперсію тривалості діагностування. Результати такої оцінки для теоретичних розрахунків та статистичного моделювання представлені в табл. 4.2.

Результати теоретичних розрахунків та статистичного моделювання в широкому діапазоні вихідних даних дають можливість знайти максимальні

абсолютні помилки для оцінок математичних очікувань та дисперсії, що приблизно дорівнюють 0,4% та 0,3% відповідно.

Таблиця 4.2

Результати розрахунків

Теоретичні розрахунки		Статистичне моделювання	
$m_1(t_d)$	$\sigma(t_d)$	$m_1(t_d)$	$\sigma(t_d)$
39.16	17.77	39.03	17.82

4.3 Методика вирішення оберненої задачі оцінки ефективності процедур діагностування наземних засобів аеронавігації

Для знаходження оптимальних значень умовних імовірностей помилок першого та другого роду під час контролю елементів об'єкту поточного ремонту у процесі проектування програм поточного ремонту, а також у процесі розробки нових та модернізації існуючих систем експлуатації НЗА може бути розроблена методика вирішення оберненої задачі. Основою для її розробки є результати отримані в другому та третьому розділі цього дисертаційного дослідження.

Методика вирішення оберненої задачі базується на положеннях теорії ймовірності, математичної статистики та диференціального числення.

Нормативною базою для цієї методики є наступні стандарти:

1. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення.
2. ДСТУ 3433-96 (ГОСТ 27.005-97) Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення
3. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення
4. ДСТУ 3004-95 Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними.
5. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування технічного стану. Терміни та визначення.

У цих стандартах наводяться основні положення, терміни та визначення щодо вирішення задач аналізування надійності НЗА.

Для реалізації методики виконуються наступні етапи:

1. Проаналізувати результати розв'язання прямої задачі.

2. Знайти функціональну залежність ймовірностей 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 ймовірностей 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 .

Основна задача – визначення оптимальних значень параметрів α , β , за яких досягається максимальне (мінімальне) значення показника ефективності (середньої тривалості діагностування), у процесі проведення діагностування та поточного ремонту складної технічної системи (зворотна задача).

Початковими даними для розрахунку є:

1. Результати розв'язання прямої задачі діагностування.
2. Тривалості заміни елементів ОПР, та контролю працездатності всього ОПР.
3. Ймовірності відмов структурних елементів ДМ.

Методика вирішення оберненої задачі включає наступні операції.

Для реалізації першого етапу необхідно:

1. На етапі аналізу результатів вирішення прямої задачі:
 - 1.1 Ознайомитися зі структурною та функціональною схемами;
 - 1.2 Визначити тривалості контрольних операцій для кожного елементу діагностичної моделі;
 - 1.3 Визначити тривалості проведення набору технологічних операцій та ремонтних робіт;
 - 1.4 Проаналізувати створену на етапі вирішення прямої задачі діагностичну модель;
 - 1.5 Проаналізувати розроблені на етапі вирішення прямої задачі програму діагностування та програму поточного ремонту;

1.6 Ознайомитися зі стратегією заміни елементів ДМ. Найпростішою стратегією є послідовна заміна елементів від першого до останнього. Для визначеності в цій методиці таке правило є обґрунтованим, якщо $Q_1 > Q_2 > \dots > Q_n$, де n – кількість елементів ДМ;

1.7 Проаналізувати програми діагностування у випадку наявності помилок першого та другого роду. При цьому припустимо, що факт хибного виявлення елемента, що відмовив, буде зафіксований опосередкованим методом. Це пояснюється тим, що інженер-ремонтник буде виконувати вихідний контроль працездатності всього ОПР і зафіксує його непрацездатний стан. При цьому вважатимемо, що під час контролю працездатності всього об'єкту поточного ремонту (ОПР) помилки першого та другого роду відсутні.

2. На другому етапі необхідно виконати наступні роботи:

2.1 Для знаходження функціональних залежностей ймовірності проведення НТО від ймовірностей помилок першого та другого роду у випадку можливої відмови певного елемента ОПР необхідно проаналізувати програми діагностування у разі наявності похибок першого та другого роду.

2.2 У загальному випадку ймовірність проведення НТО знаходиться графо-аналітичним методом. При цьому вона дорівнює добутку всіх ймовірностей, зазначених на ребрах графу, на шляху від контролю першого елемента графу ПД до набору певного НТО.

У загальному випадку формула для ймовірності проведення певного НТО матиме вигляд:

$$P(\text{НТО } i / \text{відмова ел. } j) = \alpha^{n_1} \beta^{n_2} (1 - \alpha)^{n_3} (1 - \beta)^{n_4},$$

де n_1 – кількість помилок першого роду, позначені на ребрах графу ППР, на шляху до i -го НТО (може приймати значення від нуля до k , де k – кількість ієрархічних рівнів у ППР); n_2 – кількість помилок другого роду, позначені на ребрах графу ППР, на шляху до i -го НТО (може приймати значення від нуля до k); n_3 – кількість правильних діагностувань щодо справного стану елемента ОПР, позначені на ребрах графу ППР, на шляху до i -го НТО (може приймати значення

від нуля до k); n_4 – кількість правильних діагностувань щодо несправного стану елемента ОПР, позначені на ребрах графу ППР, на шляху до i -го НТО (може приймати значення від нуля до k).

3. На третьому етапі необхідно виконати наступні роботи:

3.1 Математичне сподівання знаходимо, як сума добутоків ймовірності відмови i -го елемента на умовні ймовірності i -го НТО за умови відмови j -го елемента ОПР та відповідної тривалості i -го діагностування. Тривалість i -го діагностування знаходиться графо-аналітичним методом, у разі якого сумарна тривалість дорівнює сумі всіх тривалостей на шляху графа від початку діагностування до i -го НТО. Нехай встановлені залежності умовних ЩРІ тривалостей виконання НТО для випадку відмови i -ого елемента від параметрів α та β . Тоді

$$f(t_d / \text{відмова ел.}i) = \sum_{j=1}^n P(\text{НТО } j / \text{відмова ел.}i) t_{\text{НТО } j},$$

де n – кількість елементів ДМ.

Для випадку, коли ДМ містить сім елементів, відповідно до умови нормування можна записати

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} f(t_d / \text{відмова ел.}1) dt_d &= P(\text{НТО } 1 / \text{відмова ел.}1) \int_0^{\infty} f(t_{\text{НТО}1} / \text{відмова ел.}1) dt_{\text{НТО}1} + \dots + \\ &+ P(\text{НТО } 7 / \text{відмова ел.}1) \int_0^{\infty} f(t_{\text{НТО}7} / \text{відмова ел.}1) dt_{\text{НТО}7} = P(\text{НТО } 1 / \text{відмова ел.}1 + \dots \\ &+ P(\text{НТО } 7 / \text{відмова ел.}1) = 1. \end{aligned}$$

3.2 За формулою повної ймовірності визначаємо математичне сподівання:

$$m_1(t_d) = \sum_{i=1}^n Q_i f(t_d / \text{відмова ел.}i).$$

У загальному випадку математичне сподівання є функцією від трьох параметрів:

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

При цьому можливі три варіанти розв'язання оберненої задачі: оптимізація за α ; оптимізація за β ; оптимізація за α, β .

4. На четвертому етапі необхідно виконати наступні роботи:

4.1 Знайти частинну похідну від математичного сподівання за параметром α .

Для випадку оптимізації за α необхідно знайти першу похідну функції $\phi(\alpha, \beta, t_k)$ за α . Оскільки ПД має m ієрархічних рівнів операцій оцінки відповідності, то дану функцію можна подати поліномом m -го ступеня відносно α з відомими коефіцієнтами (оскільки β і t_k вважаємо відомими), тобто:

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

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

Розв'язавши отримане рівняння, можна знайти оптимальне значення параметра α у випадку одновимірної оптимізації.

4.2 Знайти частинну похідну від математичного сподівання за параметром β .

Оптимізація за β виконують аналогічно: рівняння складається стосовно параметра β ; параметри α і t_k вважаються відомими, тоді

$$\phi(\alpha, \beta, t_k) = b_m(\alpha, t_k)\beta^m + b_{m-1}(\alpha, t_k)\beta^{m-1} + \dots + b_1(\alpha, t_k)\beta + b_0(\alpha, t_k);$$

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

Розв'язавши отримане рівняння, можна знайти оптимальне значення параметра β у випадку одновимірної оптимізації.

4.3 Прирівняти частинні похідні нулю та розв'язати отриману систему рівнянь.

При цьому необхідно розв'язати систему рівнянь за умов, що $0 \leq \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta \leq 1$:

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

4.4 Дослідити точки можливих екстремумів. Для цього знайти другі частинні похідні та розрахувати матрицю Гесе. Екстремум існує, якщо:

$$G = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha^2} & \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha \partial \beta} \\ \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha \partial \beta} & \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \beta^2} \end{vmatrix} > 0,$$

або в іншому вигляді:

$$\begin{aligned} & (m(m-1)a_m(\beta, t_k)\alpha^{m-2} + (m-1)(m-2)a_{m-1}(\beta, t_k)\alpha^{m-3} + \dots + 2a_2(\beta, t_k)) \times \\ & \times (m(m-1)b_m(\alpha, t_k)\beta^{m-2} + (m-1)(m-2)b_{m-1}(\alpha, t_k)\beta^{m-3} + \dots + 2b_2(\alpha, t_k)) - \\ & - (ma'_{m\beta}(\beta, t_k)\alpha^{m-1} + (m-1)a'_{m-1\beta}(\beta, t_k)\alpha^{m-2} + \dots + a'_{1\beta}(\beta, t_k))^2 > 0. \end{aligned}$$

При цьому, якщо $\frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha^2} > 0$, то в точці (α, β) будемо мати мінімум, а

в протилежному випадку – максимум.

4.4 Приклади використання методик вирішення оберненої задачі діагностування

Контрольний приклад використання методики розв'язання оберненої задачі.

1. Нехай досліджуваний об'єкт складається з семи функціональних блоків. За результатами вирішення прямої задачі була складена діагностична модель, яка зображена на рис. 4.1. Програма діагностування на основі інженерного методу у разі відсутності помилок діагностування наведена на рис. 4.2. Була обрана стратегія заміни елементів у випадку наявності помилок першого та другого роду під час контролю технічного стану об'єкту поточного ремонту, при якій у випадку помилки заміна елементів виконується послідовно, починаючи з першого.

Приклад програми діагностування у випадку відмови першого елементу об'єкту та наявності помилок діагностування наведений на рис. 4.3.

2. Знайдемо числові значення ймовірностей проведення певного НТО у випадку можливості відмови кожного з елементів ОПР. Ці ймовірності є функціями від параметрів α та β [143].

У випадку відмови першого елементу:

$$\begin{aligned} P(\text{НТО1/відмова ел.1}) &= (1 - \beta)^3, \quad P(\text{НТО2/відмова ел.1}) = \alpha\beta(1 - \beta)^2, \\ P(\text{НТО3/відмова ел.1}) &= \beta(1 - \alpha)(1 - \beta)^2, \quad P(\text{НТО4/відмова ел.1}) = \alpha\beta(1 - \beta), \\ P(\text{НТО5/відмова ел.1}) &= \beta(1 - \beta)(1 - \alpha), \quad P(\text{НТО6/відмова ел.1}) = \alpha\beta, \\ P(\text{НТО7/відмова ел.1}) &= \beta(1 - \alpha). \end{aligned}$$

У випадку відмови другого елементу:

$$\begin{aligned} P(\text{НТО1/відмова ел.2}) &= \alpha(1 - \beta)^2, \quad P(\text{НТО2/відмова ел.2}) = (1 - \alpha)(1 - \beta)^3, \\ P(\text{НТО3/відмова ел.2}) &= \beta(1 - \alpha)(1 - \beta)^2, \quad P(\text{НТО4/відмова ел.2}) = \alpha\beta(1 - \beta), \\ P(\text{НТО5/відмова ел.2}) &= \beta(1 - \beta)(1 - \alpha), \quad P(\text{НТО6/відмова ел.2}) = \alpha\beta, \\ P(\text{НТО7/відмова ел.2}) &= \beta(1 - \alpha). \end{aligned}$$

У випадку відмови третього елементу:

$$\begin{aligned} P(\text{НТО1/відмова ел.3}) &= \alpha(1 - \beta)^2, \quad P(\text{НТО2/відмова ел.3}) = \alpha(1 - \alpha)(1 - \beta)^2, \\ P(\text{НТО3/відмова ел.3}) &= (1 - \alpha)^2(1 - \beta)^2, \quad P(\text{НТО4/відмова ел.3}) = \alpha\beta(1 - \beta), \\ P(\text{НТО5/відмова ел.3}) &= \beta(1 - \beta)(1 - \alpha), \quad P(\text{НТО6/відмова ел.3}) = \alpha\beta, \\ P(\text{НТО7/відмова ел.3}) &= \beta(1 - \alpha). \end{aligned}$$

У випадку відмови четвертого елементу:

$$\begin{aligned} P(\text{НТО1/відмова ел.4}) &= \alpha^2(1 - \beta), \quad P(\text{НТО2/відмова ел.4}) = \alpha^2(1 - \alpha)(1 - \beta), \\ P(\text{НТО3/відмова ел.4}) &= \alpha(1 - \alpha)^2(1 - \beta), \quad P(\text{НТО4/відмова ел.4}) = (1 - \alpha)(1 - \beta)^2, \\ P(\text{НТО5/відмова ел.4}) &= \beta(1 - \beta)(1 - \alpha), \quad P(\text{НТО6/відмова ел.4}) = \beta(1 - \beta), \\ P(\text{НТО7/відмова ел.4}) &= \beta^2. \end{aligned}$$

У випадку відмови п'ятого елементу:

$$\begin{aligned} P(\text{НТО1/відмова ел.5}) &= \alpha^2(1 - \beta), \quad P(\text{НТО2/відмова ел.5}) = \alpha^2(1 - \alpha)(1 - \beta), \\ P(\text{НТО3/відмова ел.5}) &= \alpha(1 - \alpha)^2(1 - \beta), \quad P(\text{НТО4/відмова ел.5}) = \alpha(1 - \alpha)(1 - \beta), \\ P(\text{НТО5/відмова ел.5}) &= (1 - \beta)(1 - \alpha)^2, \quad P(\text{НТО6/відмова ел.5}) = \beta\alpha, \end{aligned}$$

$$P(\text{НТО7/відмова ел.5}) = \beta(1 - \alpha).$$

У випадку відмови шостого елемента:

$$P(\text{НТО1/відмова ел.6}) = \alpha^3, P(\text{НТО2/відмова ел.6}) = \alpha^3(1 - \alpha),$$

$$P(\text{НТО3/відмова ел.6}) = \alpha(1 - \alpha)^2(1 - \beta), P(\text{НТО4/відмова ел.6}) = \alpha^2(1 - \alpha)^2,$$

$$P(\text{НТО5/відмова ел.6}) = \alpha^2(1 - \alpha), P(\text{НТО6/відмова ел.6}) = \alpha(1 - \alpha)^2,$$

$$P(\text{НТО7/відмова ел.6}) = (1 - \alpha)(1 - \beta).$$

У випадку відмови сьомого елемента:

$$P(\text{НТО1/відмова ел.7}) = \alpha^3, P(\text{НТО2/відмова ел.7}) = \alpha^3(1 - \alpha),$$

$$P(\text{НТО3/відмова ел.7}) = \alpha^2(1 - \alpha)^2, P(\text{НТО4/відмова ел.7}) = \alpha^2(1 - \alpha),$$

$$P(\text{НТО5/відмова ел.7}) = \alpha(1 - \alpha)^2, P(\text{НТО6/відмова ел.7}) = \alpha(1 - \alpha),$$

$$P(\text{НТО7/відмова ел.7}) = (1 - \alpha)^2.$$

3. Для заданих числових значень ймовірності відмов елементів ОПР Q_i за формулою повної ймовірності розраховуємо математичне сподівання тривалості діагностування

$$\begin{aligned}
m_1(t_k, t_{3.e}, t_{к.п.о}, \alpha, \beta) = & Q_1((1-\beta)^3(3t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \alpha\beta(1-\beta)^2(4t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \\
& + \beta(1-\alpha)(1-\beta)^2(4t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \alpha\beta(1-\beta)(3t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \\
& + \beta(1-\beta)(1-\alpha)(3t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \alpha\beta(2t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)(2t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о})) + \\
& + Q_2(\alpha(1-\beta)^2(3t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + (1-\alpha)(1-\beta)^3(4t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)(1-\beta)^2(4t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha\beta(1-\beta)(3t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \beta(1-\beta)(1-\alpha)(3t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha\beta(2t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)(2t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о})) + Q_3(\alpha(1-\beta)^2(3t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(1-\alpha)(1-\beta)^2(4t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + (1-\alpha)^2(1-\beta)^2(4t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha\beta(1-\beta)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \beta(1-\beta)(1-\alpha)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha\beta(2t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)(2t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о})) + Q_4(\alpha^2(1-\beta)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha^2(1-\alpha)(1-\beta)(4t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \alpha(1-\alpha)^2(1-\beta)(4t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + (1-\alpha)(1-\beta)^2(3t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \beta(1-\beta)(1-\alpha)(3t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \\
& + \beta(1-\beta)(2t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \beta^2(2t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о})) + Q_5(\alpha^2(1-\beta)(3t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha^2(1-\alpha)(1-\beta)(4t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)^2(1-\beta)(4t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha^2(1-\alpha)(3t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \alpha(1-\alpha)^2(3t_k, +6t_{3.e} + 6t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha\beta(1-\beta)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \beta(1-\beta)(1-\alpha)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + (1-\alpha)(1-\beta)(2t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \beta(1-\alpha)(2t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о})) + Q_7(\alpha^3(3t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha^3(1-\alpha)(4t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \alpha^2(1-\alpha)^2(4t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha^2(1-\alpha)(3t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \alpha(1-\alpha)^2(3t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(1-\alpha)(2t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + (1-\alpha)^2(2t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о})).
\end{aligned}$$

4. Дослідимо отриману функцію на екстремуми:

4.1 Знайдемо частинну похідну від математичного сподівання за параметром α .

$$\begin{aligned}
\frac{\partial m_1}{\partial \alpha} = & Q_2((1-\beta)^2(3t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) - (4t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о})) + Q_3((1-\beta)^2(3t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \\
& + (1-2\alpha)(4t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + (2\alpha-2)(4t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о})) + Q_4(2\alpha(1-\beta)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + (1-2\alpha)(1-\beta)(4t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) - (1-\beta)^2(3t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) - \beta(1-\beta)(3t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о})) + \\
& + Q_5(1-\beta)((3t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + (1-2\alpha)(4t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + (2\alpha-2)(3t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о})) + \\
& + Q_6(3\alpha^2(3t_k, +6t_{3.e} + 6t_{к.п.о}) + (2\alpha-3\alpha^2)(4t_k, +6t_{3.e} + 6t_{к.п.о}) + (2\alpha-3\alpha^2)(3t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \\
& + (1-4\alpha+3\alpha^2)(3t_k, +6t_{3.e} + 6t_{к.п.о}) + (1-\beta)(2t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) - \beta(2t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о})) + \\
& + Q_7(3\alpha^2(3t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + (2\alpha-3\alpha^2)(4t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + (1-2\alpha)(3t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + \\
& + (1-2\alpha)(2t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}) + (2\alpha-2)(2t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}))
\end{aligned}$$

4.2 Знайдемо частинну похідну від математичного сподівання за параметром β .

$$\begin{aligned}
\frac{\partial m_1}{\partial \beta} = & Q_1(-2(1-\beta)^2(3t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \alpha(1-4\beta+3\beta^2)(4t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \\
& + (1-\alpha)(1-4\beta+3\beta^2)(4t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \alpha(1-2\beta)(3t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \\
& + (1-2\beta)(1-\alpha)(3t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + \alpha(2t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) + (1-\alpha)(2t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о})) + \\
& + Q_2(\alpha(2\beta-2)(3t_k, +2t_{3.e} + 2t_{к.п.о}) - (1-\alpha)2(1-\beta)^2(4t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \\
& (1-\alpha)(1-4\beta+3\beta^2)(4t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(1-2\beta)(3t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + (1-2\beta)(1-\alpha)(3t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(2t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + (1-\alpha)(2t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о})) + Q_3(\alpha(2\beta-2)(3t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(1-\alpha)(2\beta-2)(4t_k, +3t_{3.e} + 3t_{к.п.о}) + (1-\alpha)^2(2\beta-2)(4t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(1-2\beta)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + (1-2\beta)(1-\alpha)(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(2t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + (1-\alpha)(2t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о})) + Q_4(-\alpha^2(3t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) - \\
& - \alpha^2(1-\alpha)(4t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) - \alpha(1-\alpha)^2(4t_k, +4t_{3.e} + 4t_{к.п.о}) + \\
& + (1-\alpha)(2\beta-2)(3t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + (1-2\beta)(1-\alpha)(3t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + \\
& + (1-2\beta)(2t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) + 2\beta(2t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о})) + Q_5(-\alpha^2(3t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) - \\
& - \alpha^2(1-\alpha)(4t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) - \alpha(1-\alpha)^2(4t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) - \\
& - \alpha(1-\alpha)(3t_k, +5t_{3.e} + 5t_{к.п.о}) - (1-\alpha)^2(3t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + \\
& + \alpha(2t_k, +6t_{3.e} + 6t_{к.п.о}) + (1-\alpha)(2t_k, +6t_{3.e} + 6t_{к.п.о})) + \\
& + Q_6(-(1-\alpha)((2t_k, +t_{3.e} + t_{к.п.о}) + (1-\alpha)(2t_k, +7t_{3.e} + 7t_{к.п.о}))).
\end{aligned}$$

4.3 Прирівняти частинні похідні нулю та розв'язати отриману систему рівнянь.

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

$$\alpha_{\text{оптм1,2}} = \frac{C_1 \pm \sqrt{C_1^2 - 4C_0C_2}}{2C_0}$$

$$\begin{aligned}
C_0 = & -Q_2t_k + 3Q_2t_{3.e} + 3Q_2t_{к.п.о} - 6Q_2\beta t_k - 4Q_2\beta t_{3.e} - 4Q_2\beta t_{к.п.о} + 3Q_2\beta^2 t_k + 2Q_2\beta^2 t_{3.e} + 2Q_2\beta^2 t_{к.п.о} - \\
& - Q_3t_k + 4Q_3t_{3.e} + 4Q_3t_{к.п.о} - 6Q_3\beta t_k - 6Q_3\beta t_{3.e} - 6Q_3\beta t_{к.п.о} + 3Q_3\beta^2 t_k + 3Q_3\beta^2 t_{3.e} + 3Q_3\beta^2 t_{к.п.о} + \\
& + Q_4t_k + 3Q_4t_{3.e} + 3Q_4t_{к.п.о} - Q_4\beta t_k - 7Q_4\beta t_{3.e} - 7Q_4\beta t_{к.п.о} + 4Q_4\beta^2 t_{3.e} + 4Q_4\beta^2 t_{к.п.о} + \\
& + Q_5t_k + 8Q_5t_{3.e} + 8Q_5t_{к.п.о} - 7Q_5\beta t_k - 10Q_5\beta t_{3.e} - 10Q_5\beta t_{к.п.о} + 5Q_6t_k + 7Q_6t_{3.e} + 7Q_6t_{к.п.о} - \\
& - 4Q_6\beta t_k - 8Q_6\beta t_{3.e} - 8Q_6\beta t_{к.п.о} + Q_7t_k + 12Q_7t_{3.e} + 12Q_7t_{к.п.о}.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_1 = & -4Q_3t_{3.e} - 4Q_3t_{к.п.о} - 2Q_4t_k + 2Q_4\beta t_k - 7Q_5t_k - 8Q_5t_{3.e} - 8Q_5t_{к.п.о} + \\
& + 2Q_5\beta t_k + 9Q_5\beta t_{3.e} + 9Q_5\beta t_{к.п.о} + 2Q_6t_{3.e} + 2Q_6t_{к.п.о} + 2Q_7t_k - 12Q_7t_{3.e} - 12Q_7t_{к.п.о}.
\end{aligned}$$

$$C_2 = -12Q_6t_k + 18Q_6t_{3.e} + 18Q_6t_{к.п.о} - 3Q_7t_k.$$

$$\frac{\partial m}{\partial \beta} = C_3 + C_4\beta + \beta^2 C_5 = 0.$$

$$\beta_{\text{онмум1,2}} = \frac{C_4 \pm \sqrt{C_4^2 - 4C_3C_5}}{2C_3}.$$

$$\begin{aligned} C_3 = & 3Q_1t_k + 4Q_1t_{3,e} + 4Q_1t_{\text{к.п.о}} - 5Q_2t_k + 3Q_2t_{3,e} + 3Q_2t_{\text{к.п.о}} + 4Q_2\alpha t_k - Q_2\alpha t_{3,e} - Q_2\alpha t_{\text{к.п.о}} + \\ & + 2Q_3\alpha t_k - 8Q_3\alpha t_{3,e} - 8Q_3\alpha t_{\text{к.п.о}} + Q_3\alpha^2 t_k + 5Q_3\alpha^2 t_{3,e} + 5Q_3\alpha^2 t_{\text{к.п.о}} - 3Q_3t_k + 6Q_3t_{3,e} + 6Q_3t_{\text{к.п.о}} - \\ & - Q_4t_k + 8Q_4t_{3,e} + 8Q_4t_{\text{к.п.о}} - Q_4\alpha t_k - 7Q_4\alpha t_{3,e} - 7Q_4\alpha t_{\text{к.п.о}} + Q_4\alpha^2 t_k - Q_5\alpha^2 t_k - 4Q_5\alpha^2 t_{3,e} + \\ & + 4Q_5\alpha^2 t_{\text{к.п.о}} + 8Q_5\alpha^3 t_k + 10Q_5\alpha^2 t_{3,e} + 10Q_5\alpha^2 t_{\text{к.п.о}} - 5Q_5\alpha t_k + Q_5\alpha t_{3,e} + Q_5\alpha t_{\text{к.п.о}} - Q_5t_k + \\ & + 5Q_5t_{3,e} + 5Q_5t_{\text{к.п.о}} - 4Q_6t_k - 8Q_6t_{3,e} - 8Q_6t_{\text{к.п.о}} + 2Q_6\alpha t_k + Q_6\alpha t_{3,e} + Q_6\alpha t_{\text{к.п.о}} - \\ & - 2Q_6\alpha^2 t_k - 7Q_6\alpha^2 t_{3,e} - 7Q_6\alpha^2 t_{\text{к.п.о}}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_4 = & -16Q_1t_k - 10Q_1t_{3,e} - 10Q_1t_{\text{к.п.о}} + 12Q_2\alpha t_k + 18Q_2\alpha t_{3,e} + 18Q_2\alpha t_{\text{к.п.о}} - \\ & - 12Q_2t_k - 20Q_2t_{3,e} - 20Q_2t_{\text{к.п.о}} - 2Q_3\alpha t_k + 2Q_3\alpha t_{3,e} + 2Q_3\alpha t_{\text{к.п.о}} - 4Q_3\alpha^2 t_{3,e} - \\ & - 4Q_3\alpha^2 t_{\text{к.п.о}} + 2Q_3t_k - 6Q_3t_{3,e} - 6Q_3t_{\text{к.п.о}} - 8Q_4t_{3,e} - 8Q_4t_{\text{к.п.о}}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_5 = & 21Q_1t_k + 11Q_1t_{3,e} + 11Q_1t_{\text{к.п.о}} - 12Q_1\alpha t_k - 6Q_2\alpha t_{3,e} - 6Q_2\alpha t_{\text{к.п.о}} + \\ & + 4Q_2t_k + 7Q_2t_{3,e} + 7Q_2t_{\text{к.п.о}} - 4Q_2\alpha t_k - 7Q_2\alpha t_{3,e} - 7Q_2\alpha t_{\text{к.п.о}}. \end{aligned}$$

4.4 Дослідити точки можливих екстремумів. Для цього знайти другі частинні похідні та розрахувати матрицю Гесе. Екстремум існує, якщо:

$$G = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha^2} & \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha \partial \beta} \\ \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \alpha \partial \beta} & \frac{\partial^2 \phi(\alpha, \beta, t_k)}{\partial \beta^2} \end{vmatrix} > 0,$$

$$G = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 m_1}{\partial \alpha^2} & \frac{\partial^2 m_1}{\partial \alpha \partial \beta} \\ \frac{\partial^2 m_1}{\partial \alpha \partial \beta} & \frac{\partial^2 m_1}{\partial \beta^2} \end{pmatrix},$$

$$\frac{\partial^2 m_1}{\partial \alpha^2} = C_1 + 2C_2\alpha,$$

$$\frac{\partial^2 m_1}{\partial \beta^2} = C_4 + 2C_5\beta,$$

$$\frac{\partial^2 m_1}{\partial \alpha \partial \beta} = \frac{\partial C_0}{\partial \beta} + \frac{\partial C_1}{\partial \beta} \alpha + \frac{\partial C_2}{\partial \beta} \alpha^2,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_0}{\partial \beta} &= -6Q_2t_k - 4Q_2t_{3.e} - 4Q_2t_{к.п.о} + 6Q_2\beta t_k + 4Q_2\beta t_{3.e} + 4Q_2\beta t_{к.п.о} - 6Q_3t_k - \\ &- 6Q_3t_{3.e} - 6Q_3t_{к.п.о} + 6Q_3\beta t_k + 6Q_3\beta t_{3.e} + 6Q_3\beta t_{к.п.о} - Q_4t_k - 7Q_4t_{3.e} - 7Q_4t_{к.п.о} + \\ &+ 8Q_4\beta t_{3.e} + 8Q_4\beta t_{к.п.о} - 7Q_5t_k - 10Q_5t_{3.e} - 10Q_5t_{к.п.о} - 4Q_6t_k - 8Q_6t_{3.e} - 8Q_6t_{к.п.о}, \\ \frac{\partial C_1}{\partial \beta} &= 2Q_5t_k + 9Q_5t_{3.e} + 9Q_5t_{к.п.о}, \\ \frac{\partial C_2}{\partial \beta} &= 0. \end{aligned}$$

Приклади розрахунків у MathCad та відповідні оптимізаційні графіки наведені на рис. 4.7 та 4.8. Ці рисунки були отримані для таких початкових параметрів генеральної сукупності $t_k=100$, $t_{3.e}=50$, $t_{к.п.о}=1$, $Q_3= 0.8$, $Q_6= 0.2$, $Q_1= Q_2= Q_4= Q_5= Q_7= 0$.

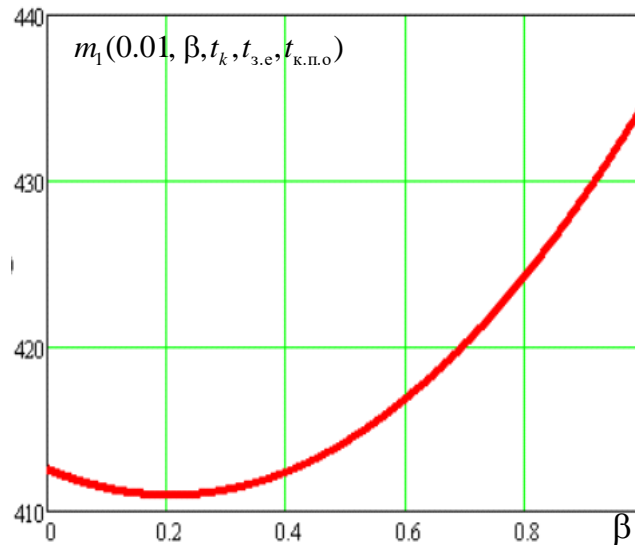
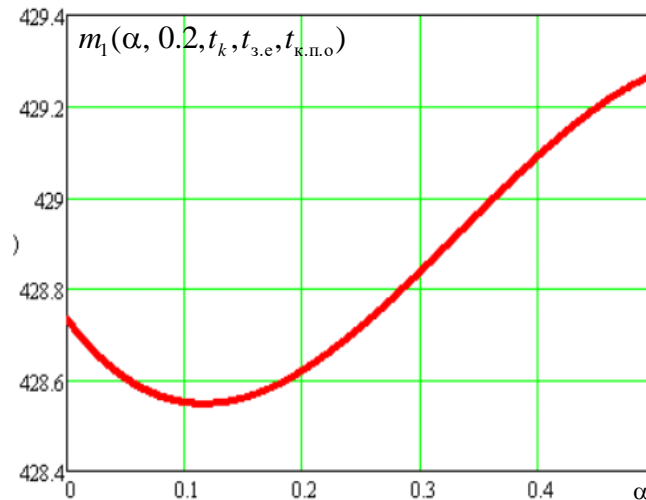


Рис. 4.7. Оптимізація за β

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

Рис. 4.8. Оптимізація за α

Як видно за графіком існує таке значення параметру α , яке мінімізує середню тривалість діагностування.

Виконаємо порівняльний аналіз ефективності для цього прикладу використання методики вирішення оберненої задачі процесу діагностування.

Для порівняльного аналізу ефективності вирішення оптимізаційної задачі використовується 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 .

Вхідними даними для розрахунку були наступні: $t_k=2$, $t_{з.е}=20$, $t_{к.п.о}=5$, $Q_3=0.8$, $Q_6=0.2$, $Q_1=Q_2=Q_4=Q_5=Q_7=0$.

У випадку вибору довільних значень α та β математичне сподівання тривалості діагностування буде варіюватися у межах від 410 до 483 умовних одиниць часу. Для заданого варіанту вхідних даних оптимальні значення показників α і β складають 0 та 0.2 відповідно. За оптимальних значень цих показників математичне сподівання тривалості діагностування складає 410 умовних одиниць часу. Тому максимальне покращення ефективності, яке досягається за рахунок оптимізації, становить 15%.

Показник ефективності у вигляді середньо квадратичного 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 37%.

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 КПО. Відповідні графіки наведені на рис. 4.9 – 4.11.

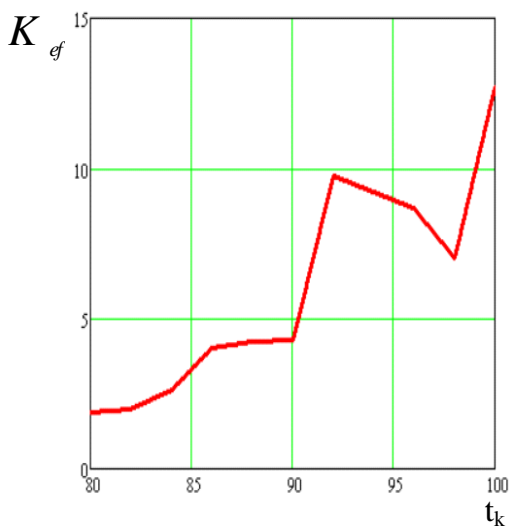


Рис. 4.9 Залежність коефіцієнту покращення ефективності від тривалості контролю елемента ОД

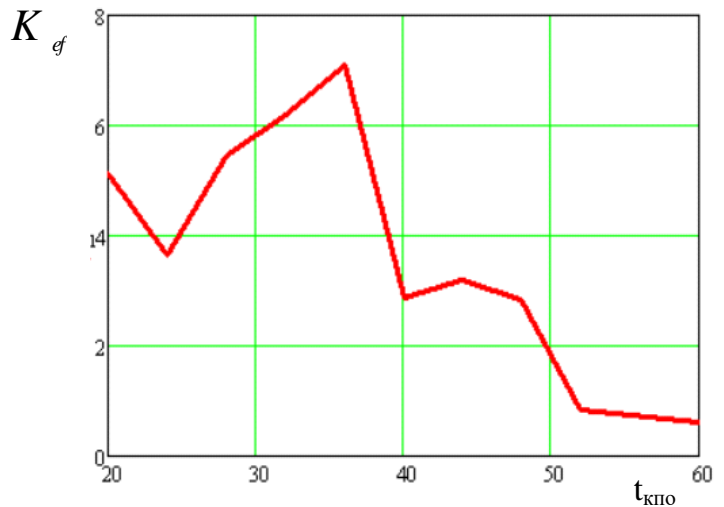


Рис. 4.10 Залежність коефіцієнту покращення ефективності від тривалості контролю працездатності ОД

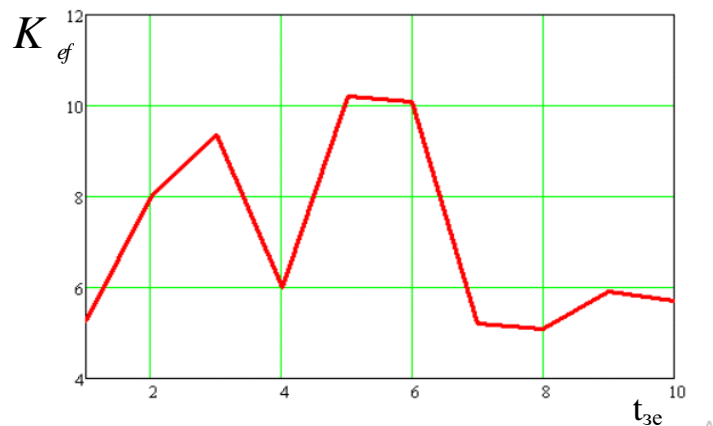


Рис. 4.11 Залежність коефіцієнту покращення ефективності від тривалості заміни елемента ОД

Як видно з рис. 4.9 – 4.11, 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 елементу ОД також майже не впливають на цей коефіцієнт.

Отже, за рахунок вирішення задачі оптимізації та вибору оптимальних значень параметрів α та β вдається покращити ефективність процесу діагностування до 15 %.

4.5 Висновки до розділу 4

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

2. Виконано розрахунки для прикладу використання методики вирішення прямої задачі діагностування, що засвідчило необхідність використання не тільки математичного сподівання показника ефективності, але найбільш повною його статистичної характеристики – щільності розподілу ймовірності.

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

4. Виконано розрахунки для прикладу використання методики вирішення оберненої задачі діагностування, що показало існування оптимальних значень показника ефективності у вигляді математичного сподівання тривалості процедури діагностування та дозволило знайти таку сукупність вихідних параметрів діагностування, які забезпечують цей оптимум. Для обраного об'єкту

діагностування та відповідних параметрів максимальне покращення ефективності, яке досягається за рахунок оптимізації, становить 15%. Для показника ефективності у вигляді середньоквадратичного відхилення тривалості процедури діагностування максимальний вигравш становить 37%.

Список публікацій здобувача за матеріалами четвертого розділу

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

2. 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*: Тезидоповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції: Запоріжжя, 19–21 вересня 2012 р. Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. С. 262 – 264.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Yashanov I., Asanov M. 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.

8. 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*)

9. 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.

10. 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.

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 недостатньо приділяється уваги процедурам діагностування НЗА з точки зору, визначення статистичних характеристик цих процедур, що може бути резервом для підвищення ефективності функціонування систем експлуатації обладнання.

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 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 ЦПІ часових витрат окремих контрольованих операцій; на застосуванні аналітичних співвідношень, що дозволяють проводити оцінку ЦПІ 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 ЦПІ 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 контрольованої апаратури, що забезпечують мінімум показника ефективності у вигляді математичного сподівання тривалості процедури діагностування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Benešová A., Hirman M., František Steiner and Jiří Tupa «Current trends in the management of diagnostic processes in testing laboratories», *Conference on Diagnostics in Electrical Engineering*. Pilsen, Czech Republic, Proceedings, 2016, P. 1 – 4.
2. Dewey M., Lauffer J. «Creating Automated Test and Repair Solutions with Advanced Diagnostics and ATE Software» USA, 2012,
3. Eurocontrol-spec-0147. Eurocontrol specification for ATM surveillance system performance (Volume 1). Brussels: Eurocontrol, 2012. 86 p.
4. Eurocontrol-spec-0147. Eurocontrol specification for ATM surveillance system performance (Volume 2). Brussels: Eurocontrol, 2012. 169
5. Hoyland, A. System reliability theory / A. Hoyland, M. Rausand. – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1994. P. 518.
6. Irina Makarova, Eduard Mukhametdinov, Vadim Mavrin, Ksenia Shubenkova, Ravil «Garipov Improvement of the Vehicle's Onboard Diagnostic System by Using the Vibro-Diagnostics Method», Dep. Service of transport system. Naberezhnye Chelny, Russia, 2018 P. 1 – 4.
7. Lowenstein D. The Economics of Diagnostics and Repair in Development, Production and Support. IEEE AUTOTESTCON, 2011. Baltimore, MD, USA
8. Makarova I., Mukhametdinov E., Mavrin V. «Garipov Improvement of the Vehicle's Onboard Diagnostic System by Using the Vibro-Diagnostics Method», Dep. Service of transport system (2018), (Naberezhnye Chelny, Russia), Proceedings.
9. Mareček O. «Monitoring and Diagnostic System of Power Plant Electrical Equipment» , Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (CDEE 2016), (Czech, Prague), Proceedings, pp. 1-4.
10. Rausand, M. System reliability theory: models, statistical methods and applications / M. Rausand – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 2004. – 458 p.
11. Sijtsma, K. Reliability Beyond Theory and Into Practice. *Psychometrika*. 2009. 74 (1). P.169 – 173.

12. 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.

13. 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.*

14. Solomentsev O.V. Support of efficiency in exploitation systems / O.V. Solomentsev, M.J. Zalisky // *The Fourth World Congress «Aviation in the XXI-st Century» «Safety in Aviation and Space Technologies». Proceedings. Kyiv, September 21-23, 2010. – K.: NAU, 2010. – Volume 1. – P. 21.18 – 21.21.*

15. Tanasescu G., Gorgan., Busoi S., Badita A. «Monitoring and diagnosis of electrical equipment using a web software. Health index and remaining lifetime estimation» *Bucharest, Romania., 2016, pp. 28 –32.*

16. Tarba L., Mach P., «Analysis on Quality of Diagnostic Processes in Power Electrical Engineering using Combined Methods of Lead Six Sigma and Fuzzy Approaches», *Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (CDEE 2016), (Czech, Prague), Proceedings, pp. 1-4.*

17. Williams J.H., Davies A., and Drake P.R. *Condition-Based Maintenance and Machine Diagnostics*. London: Chapman and Hall, 1998.

18. Yashanov I., Asanov M. 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.*

19. 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)*

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. 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.

22. 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.

23. Абраменко В. С., Григорьев В. А., Дорохов А. Н., Зеленцов В. А. и др. Эксплуатация и ремонт средств связи. / Под ред. А. Я. Маслова. ВИККА им. А. Ф. Можайского. СПб.: 1995. 533 с.

24. Абрамов О. В. Мониторинг и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения. Информатика и системы управления. 2011. № 2 (28). С. 4-15.

25. Александров А.И. Эксплуатация радиотехнических комплексов. – Москва: Советское радио, 1976. 280 с.

26. Алексеенко А.Я., Адерихин И.В. Эксплуатация радиотехнических систем. Москва: Воениздат 1980. 244 с.

27. Астафьев А.В. Окружающая среда и надежность радиоэлектронной аппаратуры. Москва: Энергия, 1965. 360 с.

28. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и и техническое обслуживание. Математический подход. Москва: Радио и связь, 1988. 392 с.

29. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. Москва: Высшая школа, 1982. 232 с.

30. Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Б. Эксплуатация авиационных систем по состоянию. Москва: Транспорт, 1981. 197 с.
31. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. Москва: Советское радио, 1969. 488 с.
32. Бережной В.П., Дубицкий Л.Г. Выявление причин отказов радиоэлектронной аппаратуры. Москва: Радио и связь, 1983. 232 с.
33. Бигус Г. Диагностика технических устройств. Москва. 2016. 617 с.
34. Благов В. А., Дембровский А. С., Зайцев В. Н., Пантелеев А. В., Ульянов А. А., Фатеев Б. Л. Аппаратура для частотных и временных измерений. / Под ред. Горшкова А. П. Москва: Сов. радио, 1971. 335с.
35. Буравлев А. И. и др. Управление техническим состоянием динамических систем. Москва: Машиностроение, 1995. 240 с.
36. Буртаев Ю.Ф., Острейковский В.А. Статистический анализ надежности объектов по ограниченной информации. Москва: Энергоатомиздат, 1995. 240 с.
37. Варжапетян А.Г. Системы управления. Инжинеринг качества. Москва: Вузовская книга, 2001. 316 с.
38. Васильев Б.В. Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств. Москва: Сов. радио, 1980. 336 с.
39. Ведерников В.В., Горюнов Н.Н., Чернышов А.А. Причины, механизмы отказов и надежность полупроводниковых приборов. Москва: Знание, 1977. 44 с.
40. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва: Наука, 1969. 576 с.
41. Вишняков В.А. Надежность электронной аппаратуры. Ярославль: ЯПИ, 1988. 64 с.
42. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. Москва: Высшая школа, 1987. 400 с.
43. Воробьев В.Г., Константинов В.Д., Куликов Г.А. Техническая эксплуатация авиационного оборудования. Москва: МИИГА, 1987. 96 с.
44. Гаскаров Д.В. Мозгалеvский А.В. Техническая диагностика: Непрерывные объекты: Уч. пособие для вузов. Москва: Высшая школа, 1975. 207 с.

45. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалевский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. Москва: Сов. радио, 1974. 224 с.
46. Герцбах И. Б. Модели профилактики. Москва: Сов. радио, 1969. 216 с.
47. Герцбах И.Б., Кордонский Ю.Б. Модели отказов. Москва: Сов. радио, 1966. 168 с.
48. Глудкин О. П. Управление качеством электронных средств. Москва: Высш. шк, 1994. 199 с.
49. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьёв Л.Д. Математические методы в теории надёжности. Москва: Наука, 1965. 524 с.
50. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности. Москва: Высшая школа, 1985. 168 с.
51. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Чинний від 01.01.1980. 13 с.
52. ГОСТ 24212-80. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения. Чинний від 01.04.1980. 15 с.
53. Давыдов П.С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. Москва: Радио и связь, 1988. 256 с.
54. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем. Пер. с англ. Москва: Мир, 1984. 318 с.
55. Добров Г.М., Ершов Ю.В. Экспертные оценки в научно техническом прогнозировании. Киев: Наукова думка, 1974. 256 с.
56. Дружинин Г.В. Методы оценки и прогнозирования качества. Москва: Радио и связь, 1982. 160 с.
57. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных систем. Москва: Энергоатомиздат, 1986. 564 с.
58. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування технічного стану. Терміни та визначення; чинний від 1 січня 1995 р. Держстандарт України, 1995. 24 с.

59. ДСТУ 2819-94. Радіотехнічне забезпечення обслуговування повітряного руху. Терміни та визначення; чинний від 1 січня 1996 р. Держстандарт України, 1994. 45 с.
60. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення; чинний від 1 січня 1996 р. Держстандарт України, 1995. 92 с.
61. ДСТУ ISO 8422-2001. Статистичний контроль. Вибірковий контроль за альтернативною ознакою. Послідовні плани вибіркового контролю (ISO 8422:1991, IDT).
62. ДСТУ ISO 9000:2001. Системи управління якістю. Основні положення та словник. –Чинний від 2001–10–01.
63. ДСТУ ISO 9001:2001. Системи управління якістю. Вимоги. – Чинний від 2001–10–01.
64. Ефремов Л.В. Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. Санкт-Петербург: Наука, 2008. 216 с.
65. Заліський, М.Ю., Зуєв О.В., Соломенцев О.В. Показник якості функціонування систем експлуатації наземних засобів радіотехнічного забезпечення польотів. Збірник наукових праць Державного університету інформаційних технологій. 2010. Т. 8. № 2 С. 194 – 200.
66. Зеленцов В. А., Гагин А. А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи. Москва , 1991. 169 с.
67. Игнатов В.А., Мачалин И.А. Оптимальное управление диагностированием изделий авиационной техники. Проблеми інформатизації та управління: зб. наук. пр. – Київ: НАУ, 2006. № 2 (17). С. 72 – 81.
68. Інструкція з обліку та звітності при технічній експлуатації наземних засобів радіотехнічного забезпечення польотів і авіаційного електрозв'язку цивільної авіації України [Електронний ресурс]: Наказ Міністерства транспорту України від 11.11.2003 р. № 874. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1264-03/ed20031230> (дата звернення: 01.05.2020). Назва з екрану.

69. Інструкція з організації та здійснення об'єктивного контролю при обслуговуванні повітряного руху та виробничій діяльності цивільної авіації України [Електронний ресурс]: Наказ Міністерства транспорту України від 11.11.2003 р. № 872, зареєстрований в Міністерстві юстиції України від 02.12.2003 р. за № 1103/8424. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1103-03> (дата звернення: 01.05.2020). Назва з екрану.

70. Інструкція про порядок продовження терміну служби (ресурсу) наземних засобів РТЗ польотів і авіаційного електрозв'язку ЦА України [Електронний ресурс]: Наказ Мінтрансу України від 11.11.2003 р. № 871, зареєстрований в Міністерстві юстиції України 02.12.2003 р. за №1102/8423. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1102-03> (дата звернення: 01.05.2020). Назва з екрану.

71. Калявин В.П. Основы теории надежности и диагностики. – Санкт-Петербург: Эл-мор, 1998. 172 с.

72. Капур К. Надежность и проектирование систем. Пер. с англ. / К. Капур, Л. Ламберсон. Москва: Мир, 1980. 604 с.

73. Каштанов В.А., Медведев В.И. Теория надежности сложных систем. Москва: Европейский центр по качеству, 2002. 470 с.

74. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ. И.И Грушко; под ред. В.И. Неймана. Москва, 1979. 432 с.

75. Королев, М.В., Моисеев С.А., Тихонов Б.Н. Определение показателей безотказности сложных радиоэлектронных изделий по определяющему параметру. Сборник научных трудов Академии ФАПСИ. Орел: Академия ФАПСИ, 2002. № 13. С. 108–112.

76. Кофман А. Введение в теорию нечетных множеств. Москва: Радио и связь, 1982 432 с.

77. Кротова Е.И. Основы конструирования и технологии производства РЭС. Ярославль: ЯрГУ., 2013. 120 с.

78. Ксенз С.П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств. Москва, 1989. 247 с.
79. Кудрицкий, В.Д. Автоматизация контроля радиоэлектронной аппаратуры. – Москва: Советское радио, 1977. 255 с.
80. Кудрицкий, В.Д. Прогнозирующий контроль радиоэлектронных устройств. Киев: Техшка, 1982. 168 с.
81. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. Москва: Логос, 2000. 268 с.
82. Левин Б.Р. Теория надёжности радиотехнических систем. Москва: Советское радио, 1978. 274 с.
83. Леонов А.И., Дубровский Н.Ф. Основы технической эксплуатации бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. Москва: Легпромбытиздат, 1991. 272 с.
84. Литвак Б.Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа. Москва: Радио и связь, 2004. 184 с.
85. Логов А.Б., Замараев Р.Ю. Математические модели диагностики уникальных объектов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 228 с.
86. Малинский В.Д. Контроль и испытания радиоаппаратуры. Москва: Энергия, 1970. 335 с.
87. Маньшин Г. Г. Управление режимами профилактики сложных систем. Москва.: Наука и техника, 1976. 256 с.
88. Медведев А. Сборка и монтаж электронных устройств. – Москва: Техносфера, 2007. 256 с.
89. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Авиационная электросвязь. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Том 1. Радионавигационные средства. Шестое издание. Монреаль: ИКАО, 2006. 608 с.
90. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Авиационная электросвязь. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской

авиации. Том 2. Правила связи, включая правила, имеющие статус PANS. Монреаль: ИКАО, 2001. 105 с.

91. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Авиационная электросвязь. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Том 4. Системы обзорной радиолокации и предупреждения столкновений. Пятое издание. Монреаль: ИКАО, 2014. 232 с.

92. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Обслуживание воздушного движения. Диспетчерское обслуживание воздушного движения, полётно-информационное обслуживание, служба аварийного оповещения. Приложение 11 к Конвенции о международной гражданской авиации. Тринадцатое издание. Монреаль: ИКАО, 2014. 106 с.

93. Мелкумян В.Г. Технологічні системи обслуговуючого типу. Елементи теорії проектування і прикладні задачі експлуатації. К.: НАУ, 2003. 171 с.

94. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надежность в радиоэлектронной аппаратуре. Москва: Сов. радио, 1970. 216 с.

95. Надежность технических систем: Справочник. Под ред. И. А.Ушакова. Москва: Радио и связь, 1985. 608 с.

96. Нечетные множества. Под редакцией Р.Я. Ягеря. Москва: Радио и связь. 1986. 408 с.

97. Новиков В.С. Техническая эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования: Учебник для вузов. Москва: Транспорт, 1987. 260 с.

98. Орлов А.И. Статистические методы анализа экспертных оценок. Москва: Наука, 1977. С.7 – 30.

99. Основы эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры. Под ред. В.Ю. Лавриенко. Москва, 1978. 320 с.

100. Оценка эффективности технических мероприятий по обеспечению надежности радиоэлектронной аппаратуры А.С. Груничев и др. Москва, 1976. 135 с.

101. Пашковский Г.С. Задачи оптимального обнаружения и поиска отказов в РЭА. Москва, 1981. 280 с.

102. Перроте А.И., Сторчак М.А. Вопросы надёжности РЭА.. Москва: Сов. радио, 1976. 185 с.
103. Повітряний кодекс України. Чинний від 19.05.2011 р. № 3393-VI. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/ru/3393-17>.
104. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. Москва: Наука, 1982. 254 с.
105. Подиновский В.В., Потапов М.А. Методы анализа и системы поддержки принятия решений. Москва: Спутник плюс, 2003. 432 с.
106. Положення про використання повітряного простору України [Електронний ресурс]: Постанова Кабінету Міністрів України від 6 грудня 2017 р. № 954. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/954-2017-п> (дата звернення: 01.05.2020). Назва з екрану.
107. Полупан А.В. Диагностирование технических объектов. Москва: Машиностроение, 2006 . 294 с.
108. Правила організації і проведення наземних та льотних перевірок наземних засобів радіотехнічного забезпечення польотів, авіаційного електрозв'язку та світлосигнального обладнання аеродромів цивільної авіації України [Електронний ресурс]: Наказ Державної служби України з нагляду за забезпеченням безпеки авіації 23.03.2005 р. № 210, зареєстрований в Міністерстві юстиції України 7.04.2005 р. за № 374/10654. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0374-05> (дата звернення: 01.05.2020). Назва з екрану.
109. Правила сертифікації наземних засобів радіотехнічного забезпечення в цивільній авіації України [Електронний ресурс]: Наказ Міністерства інфраструктури України від 25.05.2011 р. № 121, зареєстрований в Міністерстві юстиції України 14.06.2011 р. за № 701/19439. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0701-11> (дата звернення: 01.05.2020). Назва з екрану.
110. Правила технічної експлуатації наземних засобів радіотехнічного забезпечення в цивільній авіації України [Електронний ресурс]: Наказ

Міністерства транспорту та зв'язку України від 08.05.2007 р. № 381. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0705-07> (дата звернення: 01.05.2020).

Назва з екрану. Сидельников Ю.В. Теория и организация экспертного прогнозирования. - М.: ИМЭМО АН СССР, 1990. - 196 с.

111. Сингх Ч. Надежности систем: Пер. с англ. Москва: Мир, 1984. 318 с.

112. Скляревич А.Н. Надежность системы с накоплением. – Рига: Зинатне, 1970. 210 с.

113. Соломенцев А.В. Проектирование систем эксплуатации радиоэлектронного оборудования предприятий гражданской авиации. Киев: Общество знание, 1987. 20 с.

114. Соломенцев О.В., Заліський М.Ю., Соловйов Д.О. Операторна схема обробки даних у системах експлуатації радіотехнічних засобів. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей. Міжнародної науково-практичної конференції, Запоріжжя, 17 – 19 вересня 2014 р., Запоріжжя, 2014. С. 305–307*

115. Соломенцев О.В., Хмелько Ю.М., Жаров І.К., Німич В.В. Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронної апаратури: Конспект лекцій. К.: НАУ, 2007. 108 с.

116. Справочник конструктора РЭА: Компоненты, механизмы, надежность / под ред. Р. Г. Варламова. Москва: Радио и связь, 1985. 384 с.

117. Стрельников В.П. Новая технология исследования надёжности. Математические машины и системы. К.: 1997. № 2. С. 78 – 83.

118. Теория надежности РЭС в примерах и задачах. Под ред. Г.В. Дружинина. Москва, 1976. 448 с.

119. Технические средства диагностирования: Справочник / Под общ. ред. В.В. Ключева. Москва: Машиностроение, 1989. 672 с.

120. Тихонов Б.Н. Основы управления техническим состоянием сложной радиоэлектронной аппаратуры, находящейся в эксплуатации. Орел: Академия ФАПСИ, 2002. 198 с.

121. Тихонов Б.Н., Моисеев С.А., Ходжаев И.А. Управление состоянием сложных радиоэлектронных изделий, находящихся в эксплуатации Орел: : Академия ФСО России, 2010. 207 с.
122. Фомин, А. В. Инженерные методы обеспечения качества при проектировании. Москва: Изд-во МАИ, 2007. 276 с.
123. Хабаров Б.П., Куликов Г.В., Парамонов А.А. Техническая диагностика и ремонт бытовой радиоэлектронной аппаратуры: учебное пособие для вузов. Москва: Телеком, 2004. 376 с.
124. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надёжность технических систем и оценка риска: Пер. с англ. Москва: Машиностроение, 1984. 528 с.
125. Ченцов Н.А. Организация, управление и автоматизация ремонтной службы. Донецк: ДонНТУ, 2007. 258 с.
126. Широков А.М. Надёжность радиоэлектронных устройств. Москва, 1972. 272 с.
127. Яроцкий В. Г. Основы проектирования радиоэлектронных средств: учеб. пособие. Рыбинск: РГАТА, 2000. 175 с.
128. Ястребенецкий М.А., Иванова Г.М. Надёжность автоматизированных систем управления технологическими процессами. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 264 с.
129. 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.
130. Яшанов И.М. Оптимизация показателей надёжности в системах эксплуатации наземных средств радиотехнического обеспечения. *Водный транспорт*. 2014. № 1. С. 55 –60.
131. 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.

132. 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.
133. Яшанов І.М. Обґрунтування моделі витрат на експлуатацію наземних засобів аеронавігації. *Наукоємні технології*. 2020. № 3 (47). С. 415–421.
134. Яшанов І.М., Заліський М.Ю. Ефективність процедур експертного оцінювання. *Електроніка та системи управління*. 2009. № 2 (20). С. 81 – 86.
135. 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.
136. 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: Тезидоповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції: Запоріжжя, 19–21 вересня 2012 р.* Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. С. 262 – 264.
137. 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.
138. 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.
139. Яшанов І.М., Німич В.В., Заліський М.Ю. Обґрунтування структури системи менеджменту якості. *Електроніка та системи управління*. 2008. №1 (15). С. 158 – 164.
140. Яшанов І.М., Німич В.В., Заліський М.Ю. Оцінка відповідності процесів. *Проблеми інформатизації та управління*. 2009. № 2 (26). С. 52 – 57.

141. 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.

142. 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.

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

144. 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.

Додаток

Акти впровадження

ПОГОДЖЕНО

Проректор з навчальної роботи
А.Г. Гудманян
« » 2020 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
В.П. Харченко
« » 2020 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Яшанова Івана Михайловича «Методи визначення статистичних характеристик процедур
діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації»
в навчальний процес Національного авіаційного університету

Ми, що підписалися нижче, декан факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій (ФАЕТ), д.т.н., проф. Мачалін І.О., завідувач кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, д.т.н., проф. Конахович Г.Ф., склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи здобувача кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Яшанова Івана Михайловича «Методи визначення статистичних характеристик процедур діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації» використовуються в навчальному процесі факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем.

№	Що впроваджено	Форма впровадження	Ефект від впровадження
1	Методи вирішення прямої та зворотної задач під час визначення статистичних характеристик процесу діагностування та поточного ремонту наземних засобів аеронавігації	Постановка нової лабораторної роботи з дисципліни «Основи теорії надійності, експлуатації та ремонту РЕА»	Підвищення якості підготовки бакалаврів за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
2	Процедури обґрунтування доцільності використання статистичних характеристик процесу діагностування та поточного ремонту наземних засобів аеронавігації	Розробка нового практичного заняття з дисципліни «Системи логістичного забезпечення життєвого циклу авіаційних радіоелектронних систем»	Підвищення якості підготовки магістрів за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Декан ФАЕТ

Завідувач кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем

І.О. Мачалін

Г.Ф. Конахович

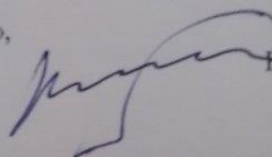
АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Яшанова Івана Михайловича «Методи визначення статистичних характеристик процедур
діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації»

Я, що підписав нижче, начальник науково-дослідного відділу надійності та стандартизації Державного підприємства «Науково-дослідний інститут «Квант», к.т.н., с.н.с. Костановський В.В. склав цей акт про те, що результати дисертаційної роботи здобувача кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Національного авіаційного університету Яшанова Івана Михайловича «Методи визначення статистичних характеристик процедур діагностування технічного стану наземних засобів аеронавігації» використовуються в Державному підприємстві «Науково-дослідний інститут «Квант».

№	Що впроваджено	Форма впровадження	Ефект від впровадження
1	Метод вирішення прямої задачі під час визначення статистичних характеристик процесу діагностування та поточного ремонту радіолокаційних засобів	Методика визначення статистичних характеристик процесу діагностування та поточного ремонту радіолокаційних засобів	Підвищення точності оцінки витрат ресурсів під час діагностування та поточного ремонту радіолокаційних засобів, підвищення надійності та ефективності використання цих засобів за призначенням
2	Метод вирішення зворотної задачі під час оптимізації рівнів похибок першого та другого роду, що мають місце у процесі діагностування та поточного ремонту радіолокаційних засобів	Методика визначення оптимальних рівнів похибок першого та другого роду, що мають місце під час діагностування та поточного ремонту радіолокаційних засобів	Підвищення ефективності процесу діагностування та поточного ремонту радіолокаційних засобів за рахунок оптимізації рівнів похибок першого та другого роду

Начальник науково-дослідного відділу
надійності та стандартизації ДП «НДІ «Квант»,
к.т.н., с.н.с.



В.В. Костановський

Підпис начальника науково-дослідного відділу надійності та стандартизації ДП «НДІ
«Квант», к.т.н., с.н.с. Костановського В.В. затверджую

Вчений секретар ДП «НДІ «Квант»,
головний науковий співробітник, к.т.н.



І.М. Русняк