

Рагулін С. В., кандидат технічних наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID: 0000-0001-8955-0380

РОЗРОБКА МЕТОДУ КЛАСИФІКАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВІДМОВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Безперервне зростання складності радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден і розширення кола виконуваних ними функцій призвели до того, що для управління технічним станом радіоелектронних навігаційних систем, підприємства, що їх експлуатують змушені виконувати значний обсяг робіт з технічного обслуговування і ремонту. Експлуатаційні витрати на технічне обслуговування і ремонт радіоелектронних навігаційних систем в даний час досягають 30-40% від загальної вартості технічного обслуговування і ремонту повітряних суден [1]. Тому актуальним є питання підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту за рахунок зниження експлуатаційних витрат при збереженні льотної придатності та конкурентоспроможності повітряних суден.

У роботі проведено визначення критеріїв оптимізації технічного забезпечення радіоелектронних навігаційних систем на основі обґрунтування можливості використання різних технічних і техніко-економічних показників ефективності експлуатації, проведена класифікація радіоелектронних навігаційних систем за ознаками, які враховують специфічні особливості їх використання за призначенням. Проведена класифікація можливих варіантів стратегій технічного обслуговування і ремонту радіоелектронних навігаційних систем, які розрізняються рівнем діагностичного забезпечення і місцем відновлення блоків і модулів. Для правильного підходу до оптимізації обмінного фонду здійснена класифікація варіантів побудови системи управління запасами і визначена кількість рівнів зберігання запасів.

Відповідно до видів особливих ситуацій, встановленими нормами льотної придатності, класифіковано радіоелектронні навігаційні системи за ступенем впливу функціональних відмов на безпеку польотів повітряних судів. Розроблена класифікація на основі оцінки ймовірностей виникнення функціональних відмов в польоті за наявності інформації про показники надійності радіоелектронних навігаційних систем. Для варіанту відсутності статистичних даних для розрахунку ймовірнісних показників розроблено метод класифікації радіоелектронних навігаційних систем на основі логіко-лінгвістичному підходу з використанням теорії нечітких множин.

Ключові слова: критерії оптимізації, функціональні відмови, радіоелектронні навігаційні системи.

Rahulin S. V. Development of the method of classification of functional failures of radio electronic navigation systems based on the theory of fuzzy sets

The continuous increase in the complexity of radio electronic navigation systems of aircraft and the expansion of the circle of their functions have led to the fact that in order to manage the technical condition of radio electronic navigation systems, enterprises that operate forced to perform a considerable amount of work on maintenance and repair. The operating costs for maintenance and repair of radio electronic navigation systems are currently reaching 30-40% of the total cost of maintenance and repair of aircraft [1]. Therefore, it is urgent to increase the efficiency of the maintenance and repair system by reducing operating costs while maintaining flight shelf life and competitiveness of aircraft.

The work defines the criteria for optimizing the technical support of radio electronic navigation systems on the basis of substantiation of the possibility of using various technical and technical and economic indicators of efficiency of operation, classification of radio electronic navigation systems on the grounds that take into account the specific features of their use by purpose. Classification of possible variants of strategies for maintenance and repair of radio electronic navigation systems, which differ in the level of diagnostic support and place of restoration of blocks and modules. For the correct approach to optimization of the exchange fund, there is a classification of options for constructing the inventory management system and a determined number of storage levels of inventory. According to the types of special situations established by the standards of flight suitability, radio – electronic navigation systems were classified by the degree of influence of functional refusals on the safety of air courts. The classification was developed based on the probability assessment of functional failures in flight in the presence of information on reliability of radio electronic navigation systems. For the absence of statistics to calculate probabilistic indicators, the method of classification of radio electronic navigation systems was developed based on a logical-linguistic approach using fuzzy set theory.

Key words: optimization criteria, functional defines, radio electronic navigation systems.

Постановка проблеми. Сучасні повітряні судна оснащуються цифровими пілотажно-навігаційними комплексами нового покоління, в яких всі системи мають вбудовані системи контролю і конструктивно виконуються у вигляді ряду легкозамінного блоку. Безпека польотів сучасних повітряних суден забезпечується шляхом резервування радіоелектронних навігаційних систем, в той час як регулярність польотів – шляхом створення достатньої кількості запасних легкозамінних блоків в обмінному фонді базового аеропорту.

Висока інтеграція пілотажно-навігаційних комплексів і висока інтенсивність польотів повітряних суден призводить до того, що за результатами оперативного технічного обслуговування частину легкозамінних блоків помилково визнаються непрацездатними, демонтуються і відправляються на відновлення, приводячи до суттєвих недоліків. Згідно зі статистичними даними авіакомпаній від 40 до 85% демонтованих легкозамінних блоків радіоелектронних навігаційних систем насправді є працездатними [3-6]. Це породжує проблематику так званих непідтверджених дефектів. Північноамериканська авіаційна транспортна асоціація АТА оцінює щорічні втрати на рівні в середньому 100 тис. доларів на кожен середньомагістральний літак [2]. Велика кількість непідтверджених дефектів тягне за собою необхідність невинновданого збільшення обсягу обмінного фонду запасних легкозамінних блоків для підтримки регулярності польотів, що призводить до значних капітальних витрат. Зниження цих витрат можливо за рахунок використання наземних автоматизованих систем контролю, що здійснюють перевірку демонтованих блоків з високою достовірністю і запобігають помилкову відправку працездатних легкозамінних блоків на відновлення. Однак закупка та експлуатація наземних автоматизованих систем контролю також вимагає значних інвестицій.

Тому ефективність експлуатації повітряних суден безпосередньо визначається оптимальним варіантом організації системи технічного обслуговування і ремонту, вибір якого ґрунтується на вирішенні комплексу завдань діагностичного забезпечення, методичного, нормативного забезпечення та оптимального формування обмінного фонду.

Найважливішими етапами життєвого циклу радіоелектронних навігаційних систем є періоди гарантійного та післягарантійного обслуговування, які відрізняються різними підходами до оцінки вартісних, надійнісних та імовірнісних показників ефективності експлуатації, а також фінансовими та організаційними взаємовідносинами між постачальниками і експлуатантами. Тому методи і підходи до підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту відрізняються для кожного з періодів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш значний вплив на діяльність експлуатантів здійснює етап післягарантійного обслуговування оскільки основний фінансовий тягар по організації системи технічного обслуговування і ремонту лягає на плечі експлуатанта.

Відомі приклади вирішення окремих завдань підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту в роботах колективу дослідників С. В. Далецького, В. О. Ігнатова, О. П. Ковтуненка, Г. Ф. Конаховича, О. А. Тамаргазіна, В. В. Уланського.

Значний внесок у вирішення завдань підвищення технічної експлуатації на різних етапах експлуатації вніс І.О. Мачалін, який представив методологічні основи технічного обслуговування і ремонту повітряних суден. Проте питання, підвищення ефективності післягарантійного обслуговування висвітлені не повністю.

Таким чином, розробка методів підвищення ефективності експлуатації радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден в період післягарантійного обслуговування являє собою важливе народногосподарське наукове завдання спрямоване на удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту, зниження експлуатаційних витрат і підтримки необхідного рівня безпеки та регулярності польотів повітряних суден.

Постановка завдання. Основною метою даної роботи є дослідження питання розробки методів підвищення ефективності експлуатації радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден в період післягарантійного обслуговування.

Виклад основного матеріалу. Для вибору показників ефективності необхідно провести класифікацію РЕНС ПС за ознаками, які б враховували специфічні особливості їх використання за призначенням. Такими основними ознаками є: вплив систем на безпеку польотів (наслідки відмови) і можливість економічної оцінки наслідків відмови.

Для поділу множини різнотипних систем на підмножини використовуємо ієрархічну систему класифікації з порядкової реєстрацією окремих значень ознак [2].

Класифікацію будемо проводити за двома ознаками: ψ – ознака наслідків відмови; ϕ – ознака економічної оцінки наслідків відмови.

Відповідно до норм льотної придатності цивільних літаків [3] розрізняють такі особливі ситуації, що виникають у польоті при функціональних відмовах (ФВ) систем:

- ускладнення умов польоту (УУП), коли ситуація вимагає від екіпажу тільки уваги до джерела її виникнення і не вимагає екстрених дій для благополучного завершення польоту;
- складна ситуація (СС), при якій запобігання її переходу в аварійну або катастрофічну ситуацію може бути забезпечено своєчасними і правильними діями членів екіпажу, в тому числі негайною зміною плану, профілю та режиму польоту;

– аварійна ситуація (АС), що характеризується необхідністю екстреної посадки ПС і вимагає значного підвищення фізичних і психофізіологічних навантажень на екіпаж, високої професійної майстерності екіпажу для запобігання загибелі людей і втрати ПС;

– катастрофічна ситуація (КС), при якій практично неможливо запобігти загибелі людей і втрату ПС.

Ознака наслідків відмови. Встановлюються такі значення ознаки наслідків відмови: $\psi = 1$ – відповідає невиконанню системою покладених на неї відповідальних функцій в заданому обсязі, що приводить до УУП, ОС або АС; $\psi = 2$ – відповідає невиконанню системою покладених на неї відповідальних функцій в заданому обсязі при довільному моменті початку «режиму роботи», що приводить до УПП, ОС або АС; $\psi = 3$ – відповідає простою системи при користуванні її за призначенням і можливого простою, пов'язаного з відновленням (заміною).

При оцінці наслідків відмови значення ознаки $\psi = 1$ відповідає випадку, коли наслідки відмови впливають на безпеку польоту. Значення ознаки $\psi = 2$ відповідає випадку, коли система експлуатується в двох режимах. У першому режимі система знаходиться в режимі очікування до дії по тривозі, а в другому, після сигналу тривоги, система виконує відповідальні функції. Значення ознаки $\psi = 3$ відповідає випадку, коли система входить в MEL, а матеріальний збиток через відмову зумовлений простоєм системи при використанні за призначенням і (або) можливим простоєм, обумовленим відновленням працездатності системи на стоянці ПС.

Отже, на першому ступені класифікації вихідна множина РЕНС ψ_0 ділиться за ознакою ψ на три класи:

$$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \text{ тобто } \psi_0 = \bigcup_{i=1}^3 \psi_i,$$

де $\bigcup$ – знак, що означає об'єднання підмножин.

Ознака економічної оцінки наслідків відмови. Приймає наступні значення: $\phi = 1$ – економічна оцінка можлива; $\phi = 2$ – економічна оцінка неможлива або її складно виконати в разі загибелі людей.

У випадку, коли наслідки відмови можна оцінити економічно, в якості показників ефективності обслуговування необхідно використовувати економічні показники у вигляді повних середніх експлуатаційних витрат (ПСЕЗ) або усереднених середніх витрат (витрат), наведених до часу експлуатації системи – підклас систем ψ_{31} .

Якщо матеріальний збиток від відмови системи, що належить класу ψ_3 , з якихось причин не вдається оцінити кількісно, то, для оцінки ефективності експлуатації доцільно використовувати критерій «надійність – витрати», який передбачає наявність двох показників ефективності. Один з них характеризує готовність системи до використання за призначенням, а другий – витрати на експлуатацію. Тому, в даному випадку, крім ПСЕЗ, в якості додаткового показника ефективності експлуатації слід використовувати комплексний показник надійності – коефіцієнт готовності (КГ).

Вибір цього показника пов'язаний з тим, що ПС експлуатуються в переривчастому часовому режимі. Його польоти чергуються з плановими простоями (стоянками) на Землі. Тому в основному заміна забракованих ЛБ здійснюється під час планових стоянок. При безперервному часовому режимі використанні, характерному для наземних РЕНС, непланові простой пов'язані не тільки з відмовами, але і з необхідністю відновлювальних робіт. Отже, при безперервному режимі використання РЕНС в аналогічній ситуації необхідно використовувати коефіцієнт технічного використання.

Таким чином, для підкласу РЕНС ψ_2 ефективність експлуатації необхідно характеризувати двома показниками ПСЕЗ і КГ. Причому до складу ПСЕЗ цьому випадку не входять втрати внаслідок відмови системи під час польоту. Якщо відмова системи призводить до невиконання покладених на неї відповідальних функцій, то домінуючим фактором при оцінці наслідків відмови в таких умовах є факт невиконання завдання. Тому класи ψ_1 і ψ_2 включають в себе тільки підкласи ψ_{12} і ψ_{22} , тобто $\psi_1 = \psi_{12}$ і $\psi_2 = \psi_{22}$.

Ефективність ТО підкласів РЕНС ψ_{12} і ψ_{22} також будемо оцінювати за допомогою двох показників, що характеризують відповідно експлуатаційну надійність системи і витрати на її експлуатацію. Як показник експлуатаційної надійності будемо використовувати експлуатаційну ймовірність безвідмовної роботи (ЕЙБР) для підкласу ψ_{12} і коефіцієнт оперативної готовності (КОГ) – для підкласу ψ_{22} .

Під ЕЙБР будемо розуміти ймовірність безвідмовної роботи системи на інтервалі напрацювання (t_k, t) з урахуванням того, що в моменти t_1, t_k проводилось ТО, що включає в себе експлуатаційний контроль і відновлення забракованих URUs [4,5].

Отже, на другому ступені класифікації залежно від значення ознаки ϕ , класи РЕНС поділяються на такі два підкласи:

$$\psi_1 = \psi_{12}, \psi_2 = \psi_{22}, \psi_3 = \psi_{31} \cup \psi_{32}.$$

Ієрархічна система класифікації РЕНС для вибору показників ефективності експлуатації показана на рис. 1.

В табл. 1 наведені шифри підкласів РЕНС і відповідні їм найменування показників ефективності. Тут прийняті наступні позначення: P_E – ЕЙБР; K_{OG} – КОГ; K_F – КГ.

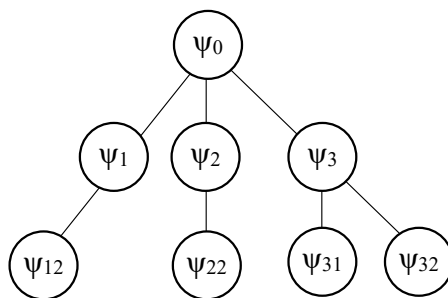


Рис. 1. Ієрархічна система класифікації РЕНС

Таблиця 1

Показники ефективності експлуатації

Клас РЕНС	Показники ефективності системи ТОіР
ψ_{31}	ПСЕЗ
ψ_{32}	ПСЕЗ, K_r
ψ_{12}	ПСЕЗ, P_E
ψ_{22}	ПСЕЗ, $K_{ог}$

Приклад 2.1. Визначити показники ефективності експлуатації короткохвильової системи посадки MLS.

Функціонування MLS впливає на безпеку польотів, так як у випадку відмови на етапі посадки можуть виникнути ситуації УУП або ОС. Тому для MLS наслідками відмови є факт невиконання відповідальних функцій, тобто $\psi = 1$. Економічна оцінка наслідків відмови не завжди можлива, тобто $\phi = 2$.

Таким чином, MLS відноситься до підкласу ψ_{12} . Згідно з табл. 1, показниками ефективності експлуатації MLS є ПСЕЗ і ЕЙБР.

Приклад 2.2. Визначити показники ефективності експлуатації для автоматичного радіокомпасу (АРК).

Функціонування АРК не впливає на безпеку польотів ПС, оскільки при його відмові необхідна навігаційна інформація може бути отримана бортовою радіотехнічною системою ближньої навігації (РСБН). Тому, як правило, АРК входить в головний перелік мінімально-допустимого обладнання (ГПМДО). Наслідки відмови пов'язані з непрацездатністю АРК у польоті і з можливим простоем при заміні на стоянці літака ($\psi = 3$). Економічна оцінка збитку внаслідок непрацездатності АРК неможлива ($\phi = 2$). Отже, АРК відноситься до підкласу ψ_{32} . Відповідно до табл. 1, показниками ефективності експлуатації є ПСЕЗ і КГ.

Однією з ознак для класифікації РЕНС є ознака наслідків відмови, тобто ступінь впливу систем на безпеку польотів. Для оцінки впливу РЕНС на безпеку польоту ПС необхідно провести аналіз позаштатних ситуацій, які можуть виникнути при відмові системи або її складової частини, що виконує ті ж функції. Надалі будемо вважати, що відмова складової частини системи (якщо система має резерв) або всієї системи є повною. При цьому система або її складова частина не може виконувати основні функції.

Визначення ступеня впливу ФВ РЕНС на безпеку польотів можливе за наявності такої інформації [6]:

- перелік функцій, які виконуються кожною РЕНС на різних етапах і в різних умовах польоту;
- наявність апаратурної та інформаційної надмірності по найбільш важливих функцій РЕНС;
- ступінь інформованості екіпажу про ФВ РЕНС;
- ймовірність виникнення тих чи інших ФВ і небезпечних ситуацій.

Аналіз проводиться в такій послідовності:

- з'ясовується кратність резерву виконуваних РЕНС функцій;
- визначається структура системи з точки зору надійності;
- обчислюються ймовірності різних сполучень ФВ основних і резервних с системи;
- встановлюється, з якими системами взаємодіє дана РЕНС в польоті і яку інформацію отримує і видає;
- досліджується можливість виконання функцій даної системи іншими РЕНС ПС;
- встановлюється характер появи ФВ і можливість його індикації інформаційними та сигналізують системами ПС;

- з'ясовується характер використання системи на різних етапах польоту ПС;
- проводиться класифікація РЕНС по класах особливих ситуацій.

Класифікацію РЕНС по класах особливих ситуацій пропонується проводити на підставі структурно-логічної схеми, наведеної на рис. 2, з якої видно, що для класифікації необхідно визначити значення ймовірності ФВ РЕНС протягом польоту [4,5]. Якщо відома експлуатаційна ймовірність безвідмовної роботи

(ЕЙБР-Р_Е), то ймовірність ФВ протягом польоту дорівнює $Q_E = 1 - P_E$. Далі необхідно задати допустиму ймовірність ФВ РЕНС в польоті.

У табл. 2 наведені допустимі ймовірності виникнення особливих ситуацій, які встановлені нормами льотної придатності.

На підставі табл. 4 можна визначити вимоги до нормування величини допустимої ймовірності ФВ в польоті Q_E^d .

Таким чином, якщо прийняти для $Q_E^d < 10^{-9}$, то значення допустимої ймовірності ФВ повинні лежати в межах, наведених в табл. 3.



Рис. 2. Структурно-логічна схема класифікації РЕНС по класах особливих подій

Таблиця 2

Допустимі ймовірності виникнення ФВ

Вид особливої ситуації	Допустимі ймовірності виникнення ФВ
Аварійна ситуація (АС)	$10^{-9} \leq Q_{ЕАС}^d < 10^{-7}$
Небезпечна ситуація (НС)	$10^{-7} \leq Q_{ЕНС}^d < 10^{-5}$
Ускладнення умов польоту (УУП)	$10^{-5} \leq Q_{ЕУП}^d < 10^{-3}$
Без наслідків (БН)	$Q_{ЕБН}^d > 10^{-3}$

При оцінці ймовірностей ФВ РЕНС необхідно враховувати не тільки інтенсивності відмов ЛБ, а й основні параметри, що характеризують режим експлуатації і структуру систем. До таких параметрів відносяться періодичність виконання різних форм ТО, достовірність результатів експлуатаційного контролю, кратність резервування і тип структури системи з точки зору надійності. Тому необхідно розробити вирази для розрахунку ймовірностей відмови РЕНС, що враховують параметри режиму експлуатації.

Для використання розглянутих вище імовірнісних показників для класифікації РЕНС за ступенем їх впливу на БП та оцінки ймовірностей виникнення ФВ в польоті необхідно мати розрахункові значення показників надійності РЕНС або мати статистичну інформацію про відмови, що на етапі проектування ПС не завжди можливо. Крім того, імовірнісні показники не дозволяють оцінити можливість прояву всіх ситуацій в процесі польоту ПС, до яких можуть призвести ФВ. Такими ситуаціями, видно з рис. 2, можуть бути: зміна техніки пілотування при відмові систем на різних етапах польоту; зміна умов для екіпажу, які можуть вести до різних помилок; ускладнення дій екіпажу при зміні метеоумов.

Параметрична оцінка впливу цих ситуацій на безпеку польотів не завжди можлива. Тому в подібних випадках і при відсутності статистичної інформації про відмови РЕНС доцільно використовувати логіко-лінгвістичний підхід, що дозволяє на основі нечітких множин зробити оцінку впливу цих ситуацій на БП [2]. Наприклад, можливі такі ситуації, перелік яких наведено в табл. 3.

Як видно з табл. 3 призвести вірогідну оцінку подібних подій досить складно, тому тут доцільно використовувати логіко-лінгвістичний підхід до класифікації з використанням теорії нечітких множин.

При використанні логіко-лінгвістичного підходу необхідно провести аналіз можливих ситуацій, до яких призводить ФВ, сформулювати експертний запит, провести експертну оцінку всіх наслідків і оцінити загальний рівень впливу даного ФВ на БП. На підставі цього в сукупності з імовірнісними оцінками (якщо вони є) прийняти рішення про віднесення ФВ РЕНС до відповідного класу особливих ситуацій. Пропонований підхід складається з наступних етапів, що включають в себе обробку результатів експертних оцінок.

Аналіз можливих ситуацій польоту ПС до яких може привести ФВ. На цьому етапі експертами здійснюється аналіз можливих ситуацій $\tilde{O}_i (i=1, N)$, де N – кількість ситуацій. Далі аналізується їх вплив на раніше визначені характеристики БП. Множина цих ситуацій служить вхідною інформацією для формування експертних запитів.

Формування базового експертного опитування. Базовий експертний запит – це оціночний запит експерта, характерний для певної системи і визначає рівень впливу відмови на БП щодо заданої множини характеристик безпеки. На підставі кожної сформульованої ситуації нормуються масиви вихідних даних $D_{11}, D_{12}, D_{21}, \dots, D_{2m}, D_{i1}, \dots, D_{ip}$ (де i – кількість ситуацій у сформованій вище множині; k, m і p – кількість складових запиту першої, другої та i -ї ситуацій відповідно), які є компонентами вектора запиту.

Таблиця 3

Можливі ситуації, до яких може призвести ФВ

Номер ситуації X_i	Опис ситуації
X_1	Техніка пілотування змінюється незначно на маршруті
X_2	Ускладнення роботи екіпажу (можливі помилки екіпажу)
X_3	Ускладнення роботи екіпажу при зміні метеоумов
X_4	Техніка пілотування змінюється незначно, але можливо буде потрібна зміна плану польоту
X_5	Техніка пілотування змінюється незначно при виконанні зльоту
X_6	Техніка пілотування змінюється незначно при виконанні посадки
X_7	Змінюється техніка пілотування і ускладнюється робота екіпажу.

Ранжування вихідних даних (ВД) і побудова функції приналежності. Для побудови ФП будемо використовувати метод кількісного парного порівняння [3,4], нехай $\tilde{A}$ – нечітка підмножина з функцією n елементів наступного виду:

$$\tilde{A} = \{ \mu_{\tilde{A}}(\tilde{o}_1) / \tilde{o}_1, \mu_{\tilde{A}}(\tilde{o}_2) / \tilde{o}_2, \dots, \mu_{\tilde{A}}(\tilde{o}_n) / \tilde{o}_n \}. \quad (1)$$

Ступінь приналежності елементів множини визначається за допомогою парних порівнянь, а кількість питань до експерта становить $n(n-1)/2$. За його оцінкою формується матриця парних порівнянь: $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|$, де значення $\tilde{a}_{ij}$ вибирається з табл. 4 оцінка елемента x_j порівнюється з j по x_i властивостями $\tilde{A}$.

Спрощенням процедури формування ФП є визначення вагових коефіцієнтів через розрахунок середнього геометричного зі співвідношення

$$\mu_{\tilde{A}}(x_i) = \omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

де a_{ij} – коефіцієнти матриці парних порівнянь, а вихідні дані представляють собою сформовану на основі експертного опитування матрицю парних порівнянь.

Складові базового експертного запиту далі упорядковуються за ступенем небезпеки ситуацій. Ранжування виконується через обчислення коефіцієнтів важливості $KB_1, \dots, KB_n$ (де n – кількість компонентів експертного опитування), які використовуються для реалізації нечітких моделей. Методи ранжирування

дозволяють виявити найбільш небезпечні ситуації для того, щоб потім розставити необхідні акценти під час оцінювання.

Таблиця 4

Шкала для побудови матриці порівнянь

Оцінка значимості	Якісна оцінка	Властивості альтернатив
1	Однакова значимість	Альтернативи мають однаковий ранг
3	Слабка перевага	Перевага однієї альтернативи перед іншою малопереконлива
5	Сильна перевага	Є надійні докази істотної переваги однієї альтернативи над іншою
7	Очевидна перевага	Існують переконливі свідчення на користь однієї альтернативи
9	Абсолютна перевага	Свідчення на користь переваги однієї альтернативи над іншою з найбільшою мірою переконливості
2,4,6,8	Проміжні значення	Використовуються, якщо необхідний компроміс

Формування лінгвістичних змінних і термів. Для формалізації лінгвістичних даних, скористаємося поняттями нечіткої змінної (НЗ) і лінгвістичної змінної (ЛЗ), введених в роботах [6].

Під ЛЗ будемо розуміти таку нечітку множину, якій присвоєно деяку назву і ця змінна визначена кортежем $\langle A, X, A \rangle$, де A – ідентифікатор НЗ, $X = \{x\}$ – область її визначення, а $\tilde{A} = \bigcup_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}/x$ – НМ на X , яка задає обмеження на набір числових значень НЗ $\tilde{A}$.

Для формалізації суб'єктивного змісту якісних показників і побудови ФП необхідно використовувати такі вихідні дані: назва параметру $x_i (i = \overline{1, n})$; діапазон $[x_i, \bar{x}_i]$, зміни параметру x_i кількість термів, які застосовуються для лінгвістичного опису параметра x_i ; назва будь-якого терма ЛЗ.

Для визначення ЛЗ «Який вплив здійснює ФВ на УУП» відповідного кортежу $\langle \text{УУП}, T_{\text{УУП}}, X_{\text{УУП}} \rangle$, необхідно задати її базову терм-множину $T_{\text{УУП}} = \{T_i\} (i = \overline{1, L})$, де L – кількість термінів, які використовуються в якості нечітких еталонів оцінюваних параметрів). Базова терм-множина такої ЛЗ визначимо п'ятьма термами:

$T_{\text{УУП}} = \bigcup_{i=1}^5 T_{\text{УУП}} = \{ \text{“НИЗЬКА” (Н), “НИЖЧЕ СЕРЕДНЬОГО” (НС), “СЕРЕДНЄ” (С), “ВИЩЕ СЕРЕДНЬОГО” (ПС), “ВИСОКА” (В)} \}$. Після визначення термінів необхідно задати універсальну множину $X_{\text{УУП}}$, на якій будуть задані ці нечіткі еталони, а потім побудувати їх ФП.

Вибір методу обробки НЧ. Використовуємо максимінний метод, базою для якого є максимінна композиція (ММК). Ґрунтуючись на принципі узагальнення, ММК реалізується двома процедурами, перша з яких виконується за формулою:

$$\tilde{Z} = \tilde{X} \circ \tilde{Y} = \bigcup_{i=1}^n \{ \mu_{\tilde{X}}(x_i)/x_i \} \circ \bigcup_{j=1}^m \{ \mu_{\tilde{Y}}(y_j)/y_j \} = \bigcup_{i=1}^n \bigcup_{j=1}^m \{ \mu_{\tilde{X}}(x_i) \wedge \mu_{\tilde{Y}}(y_j) / (x_i * y_j) \}, \quad (3)$$

де $\tilde{X}$ і $\tilde{Y}$ – НЧ, які містять відповідно n і m компонентів; знаками $*$ і $\circ$ позначено одну з арифметичних операцій $+$, $-$, $\times$, $\div$ і одну з нечітких арифметичних операцій $\tilde{+}$, $\tilde{-}$, $\tilde{\times}$, $\tilde{\div}$ відповідно; у другій – здійснюється поглинання декількох компонентів $\mu_{\tilde{Z}}(z_k)/z_k, k = \overline{1, r}$ (r – кількість компонентів з рівнозначними носіями) одним $\mu_{\tilde{Z}}(z_s)/z_s : \mu_{\tilde{Z}}(z_s) = \max(\mu_{\tilde{Z}}(z_k))$.

Обчислення та інтерпретація рівня впливу ФВ на БП. Рівень впливу ФВ на БП будемо оцінювати на основі нечіткої моделі з бальною шкалою, яка реалізує безпосередньо кількісну оцінку на безперервній варіативної N -бальною шкалою. На підставі нечіткої моделі і вихідних даних ($\tilde{L}$ або $X_i, i = \overline{1, n}$) отриманих після опитування користувачів (представників експлуатанта), визначається показник рівня впливу ФВ РЕНС БП ($\tilde{L}S$ або μ_S).

Отриманий результат інтерпретується через визначення відповідності розрахованого рівня безпеки еталонним значенням, отриманих на етапі формування лінгвістичних термів. Вихідні дані представляються як в лінгвістичній формі, так і в числовий у вигляді НЧ і рівнів. Суть оцінки відповідно до цієї моделі наступна. Користувач відповідає на попередньо рокировані запитання (компоненти експертного запиту) за складеною експертом N – бальною шкалою. Діапазон шкали може варіюватися і залежить від складності оцінки ситуацій. Визначення стану безпеки реалізується за результатами опитування користувачів системи згідно складеного експертами питання, компоненти якого попередньо ранжуються через визначення КВ $P_j (j = \overline{1, n})$, де n – кількість компонентів.

Для ранжирування будемо використовувати метод на основі перетвореної матриці $A' = (a'_{vw})$, отриманої на підставі матриці парних порівнянь $A = (a_{ij})$ (див. табл. 4). Елемент перетвореної матриці визначається як:

$$\dot{a}_j = \begin{cases} \frac{100a_j}{a_j + 1}, & \forall i < j: v = i, w = j; \\ 1, & \forall i < j: v = w = j = i; \\ \frac{100}{a_j + 1}, & \forall i < j: v = j, w = i, \end{cases} \quad (4)$$

де $i = j = \overline{1, n}$.

Значення KB $P_i (i = \overline{1, n})$ для кожного з питань експертного опитування обчислюємо за формулою

$$P_i = \sum_{j=1}^n a'_j, \forall i \neq j. \quad (5)$$

Після визначення KB здійснюється їх нормалізація за виразом $PN_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$ таким чином, щоб виконувалася умова $\sum_{i=1}^n PN_i = 1$.

Діапазон $[X_j, \overline{X_j}] (X_j = 0, X_j = N_j)$ зміни параметра $X_j^*, (j = \overline{1, n})$ (N_j – максимально можлива кількість балів по кожному питанню) відображається на універсальній множині еталонних НЧ $U = [0, L - 1]$ (L – кількість еталонів), для чого фіксоване значення $X_j^* \in [X_j, \overline{X_j}]$ перераховується в відповідний елемент $U_j^* \in [0, L - 1]$ по формулі [17]:

$$U_j^* = (L - 1) \frac{X_j^* - X_j}{\overline{X_j} - X_j}. \quad (6)$$

При цьому ФП $\mu_i^j(U_j^*), i = \overline{1, L}$ нечіткого терму с і-м номером обчислюється за допомогою виразу:

$$\mu_i^j(U_j^*) = \left[\frac{1}{1 + (U_j^* - i + 1)^2} \right]^{PN_j \cdot n}, \quad (7)$$

де $PN_j, j = \overline{1, n}$ KB, обчислені за оцінками експертів для кожного компонента вищенаведеного експертного запиту. На завершальній стадії визначаємо показник рівня впливу на БП за наступним логічним виразом:

$$\mu_S(X_j^*) = \bigvee_{i=1}^L \bigwedge_{j=1}^n \mu_i^j, \quad (8)$$

де $i = \overline{1, L}$ номер терма із базової терм-множини T , а $j = \overline{1, n}$ номер компоненти експертного запиту.

Приклад 2.3. Нехай $X = \{X_1, \dots, X_7\}$ – множина, що визначає ситуації, до яких призводить відповідний ФВ. Інтерпретація цих ситуацій наведена в табл. 2, а матриця парних порівнянь ситуацій (1), пронумерованих у порядку, подання у множині X , складеної на підставі табл. 4, має вигляд

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 & 7 & 7 & 9 \\ \frac{1}{3} & 1 & 5 & 5 & 5 & 3 & 7 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & 3 & 7 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 5 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Необхідно побудувати НМ $\tilde{A}$, яка нормалізує поняття «ФВ даної РЕНС призводить до УУП». Вагові коефіцієнти відповідно до формули (2) визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \sqrt[7]{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 7 \cdot 7 \cdot 9} = 1,688; \quad \omega_2 = \sqrt[7]{\frac{1}{3} \cdot 1 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7} = 1,596; \\ \omega_3 &= \sqrt[7]{\frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 7} = 1,449; \quad \omega_4 = \sqrt[7]{\frac{1}{7} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5} = 1,448; \\ \omega_5 &= \sqrt[7]{\frac{1}{7} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1 \cdot 3 \cdot 5} = 1,403; \quad \omega_6 = \sqrt[7]{\frac{1}{7} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 1 \cdot 5} = 1,333; \\ \omega_7 &= \sqrt[7]{\frac{1}{9} \cdot \frac{1}{7} \cdot \frac{1}{7} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1} = 1,104.\end{aligned}$$

Після нормалізації отримаємо: $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_1) = 1$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_2) = 0,945$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_3) = 0,858$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_4) = 0,857$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_5) = 0,831$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_6) = 0,790$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_7) = 0,654$. Отримане НЧ представлено на рис. 3. Як видно з рис. 3, його ФП має спадаючий характер.

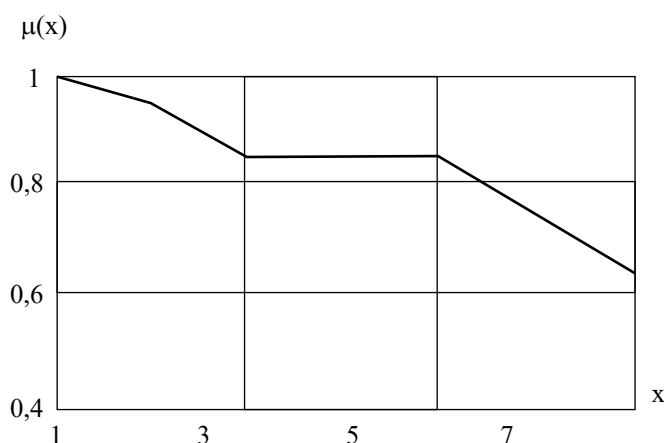


Рис. 3. Нечітке число, що оцінює ступінь впливу ФВ

Елементи перетворення матриці відповідно до виразу (4) матимуть такі значення:

$$A' = (a'_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 75 & 83.3 & 87.5 & 87.5 & 87.5 & 90 \\ 25 & 1 & 83.3 & 83.3 & 83.3 & 75 & 87.5 \\ 16.7 & 16.7 & 1 & 50 & 50 & 75 & 87.5 \\ 12.5 & 16.7 & 50 & 1 & 75 & 75 & 83.3 \\ 12.5 & 16.7 & 50 & 25 & 1 & 75 & 83.3 \\ 12.5 & 25 & 25 & 25 & 25 & 1 & 83.3 \\ 90 & 12.5 & 12.5 & 16.7 & 16.7 & 16.7 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Межі зміни діапазону шкали відповідей задає експерт для кожного компонента окремо. Нехай, наприклад, для всіх компонентів межі однакові $[0; 5]$, хоча практично вони можуть бути і різні. Використовуючи матрицю парних рівнянь (9) і перетворену матрицю (10), обчислимо КВ для кожного компонента експертного запиту.

Занесемо в табл. 5 результати обчислення КВ для всіх компонентів $P_j (j = \overline{1,7})$, нормалізовані КВ $PN_j (j = \overline{1,7})$ і відповіді користувачів.

Використовуючи вирази (5) і (6), визначаємо значення $U_j^*, (j = \overline{1,7})$ і $\mu_i^*(U_j^*), i = \overline{1,7}$, а результати обчислень заносимо в табл. 6.

Таблиця 5

Результати опитування користувачів та експертів

Номер компоненти (j)	$P_j(j=\overline{1,7})$	$PN_j(j=\overline{1,7})$	Відповіді (в балах) $X_j^*(j=\overline{1,7})$
1.	$75 + 83,3 + 3 \times 87,5 + 90 = 511,5$	0,266	1
2.	$25 + 3 \times 83,3 + 75 + 87,5 = 437,4$	0,228	2
3.	$2 \times 16,7 + 2 \times 50 + 2 \times 75 + 87,5 = 370,9$	0,193	1
4.	$12,5 + 16,7 + 50 + 2 \times 75 + 83,3 = 312,5$	0,162	3
5.	$12,5 + 16,7 + 50 + 25 + 75 + 83,3 = 262$	0,136	3
6.	$12,5 + 4 \times 25 + 83,3 = 195,8$	0,102	4
7.	$90 + 12,5 + 12,5 + 3 \times 16,7 = 165,1$	0,086	5

Таблиця 6

Результати обчислень

Номер компоненти (j)	$U_j^*, (j=\overline{1,4})$	$\mu_1^j(U_j^*)$	$\mu_2^j(U_j^*)$	$\mu_3^j(U_j^*)$	$\mu_4^j(U_j^*)$	$\mu_5^j(U_j^*)$
1.	1,2	0,190	0,930	0,398	0,068	0,017
2.	2,4	0,047	0,177	0,789	0,612	0,132
3.	1,2	0,300	0,948	0,513	0,142	0,053
4.	3,6	0,050	0,098	0,237	0,706	0,846
5.	3,6	0,082	0,142	0,299	0,746	0,868
6.	4,8	0,103	0,142	0,211	0,357	0,702
7.	6,0	0,114	0,141	0,182	0,250	0,380

Згідно з виразом (8) знаходимо показник рівня впливу ФВ на УУП:

$$\begin{aligned}
 \mu_S(X_j^*) &= \bigvee_{i=1}^L \bigwedge_{j=1}^n \mu_i^j = [\mu_1^1(1,2) \wedge \mu_1^2(2,4) \wedge \mu_1^3(1,2) \wedge \mu_1^4(3,6) \wedge \mu_1^5(3,6) \wedge \mu_1^6(4,8) \wedge \mu_1^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_2^1(1,2) \wedge \mu_2^2(2,4) \wedge \mu_2^3(1,2) \wedge \mu_2^4(3,6) \wedge \mu_2^5(3,6) \wedge \mu_2^6(4,8) \wedge \mu_2^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_3^1(1,2) \wedge \mu_3^2(2,4) \wedge \mu_3^3(1,2) \wedge \mu_3^4(3,6) \wedge \mu_3^5(3,6) \wedge \mu_3^6(4,8) \wedge \mu_3^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_4^1(1,2) \wedge \mu_4^2(2,4) \wedge \mu_4^3(1,2) \wedge \mu_4^4(3,6) \wedge \mu_4^5(3,6) \wedge \mu_4^6(4,8) \wedge \mu_4^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_5^1(1,2) \wedge \mu_5^2(2,4) \wedge \mu_5^3(1,2) \wedge \mu_5^4(3,6) \wedge \mu_5^5(3,6) \wedge \mu_5^6(4,8) \wedge \mu_5^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_6^1(1,2) \wedge \mu_6^2(2,4) \wedge \mu_6^3(1,2) \wedge \mu_6^4(3,6) \wedge \mu_6^5(3,6) \wedge \mu_6^6(4,8) \wedge \mu_6^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_7^1(1,2) \wedge \mu_7^2(2,4) \wedge \mu_7^3(1,2) \wedge \mu_7^4(3,6) \wedge \mu_7^5(3,6) \wedge \mu_7^6(4,8) \wedge \mu_7^7(6)] = \\
 &= [0,19 \wedge 0,047 \wedge 0,3 \wedge 0,05 \wedge 0,081 \wedge 0,103 \wedge 0,114] \vee \\
 &\vee [0,93 \wedge 0,177 \wedge 0,948 \wedge 0,098 \wedge 0,141 \wedge 0,142 \wedge 0,14] \vee \\
 &\vee [0,398 \wedge 0,789 \wedge 0,513 \wedge 0,237 \wedge 0,299 \wedge 0,211 \wedge 0,182] \vee \\
 &\vee [0,068 \wedge 0,612 \wedge 0,142 \wedge 0,706 \wedge 0,746 \wedge 0,357 \wedge 0,25] \vee \\
 &\vee [0,017 \wedge 0,132 \wedge 0,053 \wedge 0,845 \wedge 0,868 \wedge 0,702 \wedge 0,38] = \\
 &= [0,047 \wedge 0,098 \wedge 0,182 \wedge 0,068 \wedge 0,017] = 0,182
 \end{aligned}$$

Із табл. 6 видно, що обчислене значення $\mu_s = \mu_3$ (тобто $i=3$), тому для прийняття рішення вибирається нечіткий терм ТЗ, назва якого «Середній», що визначає рівень впливу ФВ на УУП. На основі цього твердження і імовірнісних характеристик, описаних вище, можна прийняти рішення про віднесення ФВ РЕНС до відповідного класу особливих ситуацій.

Висновки. Запропонована ієрархічна система класифікації радіоелектронних систем ПС, що дозволяє обґрунтовано вибрати показники ефективності їх експлуатації. Показано, що в якості імовірнісних показників для оглянутих класів РЕНС ПС доцільно використовувати КГ і ЕЙБР, а в якості техніко-економічного показника – повні експлуатаційні витрати (ПСЕЗ).

Обґрунтовані вимоги до граничних значень ймовірностей ФВ в період польоту ПС. Розроблено логіко-лінгвістичний метод класифікації ФВ РЕНС по класах особливих ситуацій, що базується на теорії нечітких множин, складений метод дозволяє провести аналіз впливу ФВ на безпеку польотів у випадках, коли відсутні необхідні показники надійності РЕНС для оцінки ймовірностей ФВ і для тих ситуацій, імовірність виникнення яких оцінити неможливо.

На підставі розроблених класифікацій показників ефективності РЕНС і систем ТО запропоновано критерій, який, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати комплексну оптимізацію системи ТО з урахуванням показників достовірності, періодичності контролю, структури НАСК і обсягу ОФ.

Список використаних джерел:

1. Airline manufacturer maintenance program planning document: MSG-3. / ed. by Air Transport Association of America. Maintenance Steering Group – 3 Task Force. 2nd ed. Washington, DC : Air Transport Association of America, 1993.
2. Pham H., Wang H. Reliability and Optimal Maintenance. Springer, 2006.
3. Gertsbakh I. B. Reliability theory: With applications to preventive maintenance. Berlin : Springer, 2000. 219 p.
4. Pham H., Wang H. Imperfect maintenance. European Journal of Operational Research. 1996. Vol. 94, no. 3. P. 425–438. URL: [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(96\)00099-9](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(96)00099-9)
5. Stochastic Models in Reliability and Maintenance / ed. by S. Osaki. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2002.
6. Kumar U. D. Reliability, Maintenance and Logistic Support: – A Life Cycle Approach. Boston, MA : Springer US, 2000. 490 p.

References:

1. Air Transport Association of America. Maintenance Steering Group – 3 Task Force. (1993). Airline/manufacturer maintenance program planning document: MSG-3. (2nd ed.). Air Transport Association of America.
2. Pham, H., & Wang, H. (2006). Reliability and Optimal Maintenance. Springer.
3. Gertsbakh, I. B. (2000). Reliability theory: With applications to preventive maintenance. Springer.
4. Pham, H., & Wang, H. (1996). Imperfect maintenance. European Journal of Operational Research, 94(3), 425–438. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(96\)00099-9](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(96)00099-9)
5. Osaki, S. (Ред.). (2002). Stochastic Models in Reliability and Maintenance. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-24808-8>
6. Kumar, U. D. (2000). Reliability, Maintenance and Logistic Support: – A Life Cycle Approach. Springer US.