

УДК 629.735:620.193

**ДОБРИДЕНКО О.М.**, начальник науково-дослідного управління, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**БОЛОГІН А.С.**, начальник науково-дослідного відділу, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**ГОРОХОВ Г.Т.**, провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

## **ЗАСТОСУВАННЯ МЕРЕЖ БАЙЄСА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ МІЦНОСТІ ПЛАНЕРА ПОВІТРЯНИХ СУДЕН**

*Пропонується структура мережі Байєса для підготовки рішень прогнозування технічного стану авіаційних конструкцій на основі обробки даних експлуатації та ремонту*

*Ключові слова: планер літака, прийняття рішень, мережі Байєса*

При експлуатації парку старіючих повітряних суден (ПС) виникає науково-технічна проблема підтримання їх справності й забезпечення експлуатаційної міцності силових елементів (СЕ) планерів.

Експлуатаційна міцність - це міцність СЕ при всій сукупності умов експлуатації та збереження ПС. Як узагальнюючий показник, що характеризує експлуатаційну міцність, в роботі [1] досліджено значення рангу пошкодження  $R_{CE}$ , яке обчислюється за даними експлуатації й ремонту ПС і відповідає ступеню пошкодження СЕ планера ПС.

Процес прогнозування технічного стану СЕ доцільно розглядати в системі управління експлуатацією ПС, в якій зміни технічного стану планера ПС описуються стохастичним процесом у вигляді випадкової послідовності рангів  $R_{CE}(t_i)$ , де  $t_i, i = \overline{1, n}$  - дискретні моменти прийняття рішень управління.

Методи управління експлуатацією складних технічних систем передбачають використання математичних моделей Маркова [2,3]. Практична реалізація марковських моделей для прогнозування технічного стану СЕ потребує визначення переліку можливих станів технічної системи та встановлення ймовірнісних зв'язків між цими станами. Внаслідок часткової невизначеності механізмів, що обумовлюють зміни міцності матеріалів СЕ, застосування марківських моделей для прогнозування експлуатаційної міцності потребує прийняття припущень, які вносять суттєві обмеження й не завжди відповідають дійсним умовам експлуатації.

Мережі Байєса надають можливість формувати ймовірнісний висновок щодо оцінки експлуатаційної міцності на основі результатів обробки даних експлуатації та ремонту ПС й отримання необхідної апріорної та апостеріорної інформації. Такий підхід дозволяє обґрунтовано виконувати підготовку рішень управління та пропонувати необхідні зміни в системі управління експлуатацією ПС залежно від

умов і припущень при прогнозуванні.

### **Аналіз особливостей побудови структури мереж Байєса при дослідженні технічного стану планера повітряних суден**

Мета застосування мереж Байєса полягає в отриманні ймовірнісних оцінок експлуатаційної міцності СЕ протягом інтервалу прогнозу  $\Delta T_{\text{пр}}$  залежно від запланованих змін призначених показників при експлуатації ПС.

Використання байєсівського підходу припускає обчислення згідно з формулою Байєса умовної апостеріорної ймовірності  $\pi(\vartheta | X)$  за результатами спостережень множини змінних  $V = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , для яких задано розподіл апіорних  $\pi(\vartheta)$  та апостеріорних  $\pi(X | \vartheta)$  ймовірностей [4]:

$$\pi(\vartheta | X) = \frac{\pi(X | \vartheta)\pi(\vartheta)}{\sum_{\vartheta} \pi(X | \vartheta)\pi(\vartheta)}. \quad (1)$$

Для мереж Байєса формально необхідно задати трійку  $N = \langle V, G, J \rangle$  [5]:

де  $G$  - спрямований ациклічний граф, вершини якого відповідають випадковим змінним  $V$  модельованого процесу;  $J$  - спільний розподіл ймовірностей змінних  $V$  при виконанні марківської умови стосовно того, що кожна змінна мережі не залежить від усіх інших змінних, за винятком батьківських попередників цієї змінної.

Процес прогнозу рангів  $R_{CE}(t)$ , які є змінними в мережі Байєса і значення яких представляють стохастичний процес відповідно до зміни призначених показників, доцільно описати як структуру ациклічного графу  $G$ , що складається з трьох підграфів (рисунок 1).

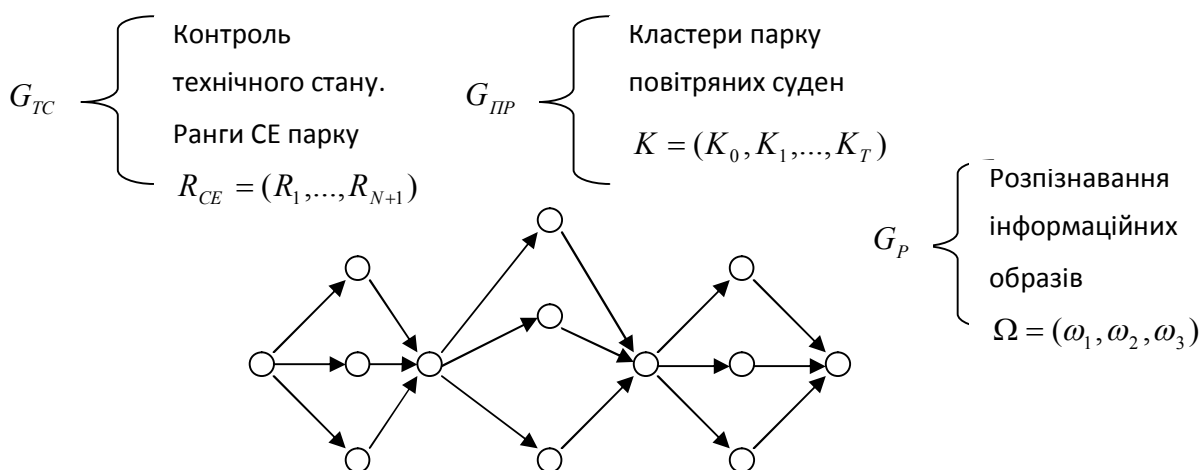


Рис. 1. Граф  $G$  дерева рішень прогнозування надійності СЕ планера ПС

Для прийняття рішень прогнозу стосовно технічного стану СЕ у вершинах графа  $G$  здійснюється обробка інформації на основі методів прикладної статистики й статистичних методів розпізнавання образів:

де підграф  $G_{TC}$  - визначення рангів  $R_{CE}$  пошкодження СЕ за результатами контролю поточного технічного стану ПС; підграф  $G_{PP}$  - визначення траєкторій прогнозу змін рангів  $R_{CE}$  пошкодження СЕ; підграф  $G_P$  - прийняття рішення щодо можливості експлуатації на інтервалі прогнозу  $\Delta T_{PP}$ .

Визначення оптимальної структури графа  $G_{opt}$  за критерієм мінімального ризику при прогнозі технічного стану ПС потребує пошук у графі  $G$  оптимального шляху від початкової точки підграфу  $G_{TC}$  до кінцевої точки підграфу  $G_P$ . Пошук оптимальної структури графа  $G_{opt}$  передбачає виконання послідовного аналізу підграфів  $G_{TC}$ ,  $G_{PP}$ ,  $G_P$  і прийняття в підграфах рішень розпізнавання образів технічного стану за критерієм Байеса (1).

При побудові мережі Байеса з метою не здійснювати повний перебір усіх можливих структур мережі доцільно застосувати евристичні методи для побудови підграфів  $G_{TC}$ ,  $G_{PP}$ ,  $G_P$ , які враховують експертні оцінки щодо особливостей експлуатації ПС.

У підграфі  $G_{TC}$  - розпізнавання до якого з можливих образів слід віднести поточний технічний стан СЕ на основі аналізу рангу пошкодження  $R_{CE}$ . Розрахунки рангу пошкодження  $R_{CE}$  виконують на основі вектора  $\vec{SE}$ , координати якого створено за допомогою вектора параметрів діагностики  $\vec{P}_D = \{pd_k\}$ ,  $k = \overline{1, s}$  і зважено оцінками експертів  $E_k$  в багатовимірному просторі розміром  $s$ , де  $s$  - кількість параметрів діагностики [1]:

$$\vec{SE} = (E_1pd_1, E_2pd_2, \dots, E_spd_s). \quad (2)$$

На практиці в експлуатації ПС експерти розглядають образи “добрий стан”, “задовільний стан”, “потребує капітального ремонту”. Тому структура підграфу  $G_{TC}$  складається з трьох вершин.

На рисунку 2, як приклад, показано функції розподілу ймовірностей оцінки технічних станів “Добрий” і “Задовільний” та їх використання при розпізнаванні образів залежно від значення загальної кількості тріщин, які виникли за час експлуатації ПС й характеризують інтенсивність появи тріщин  $\lambda_{TP}$  на внутрішніх і зовнішніх поверхнях СЕ.

Визначення параметрів функцій розподілу образів здійснено за припущенням щодо нормального закону розподілу даних контролю.

Апріорна ймовірність технічного стану “Добрий” і “Задовільний” дорівнює відповідно значенню 0.15 і 0.85 для ПСдослід, у якого за даними засобів контролю встановлено інтенсивність тріщин  $\lambda_{TP} = 1.69$ .

Результати обробки інформації в підграфі  $G_{TC}$  надалі використовуються в підграфі  $G_{PP}$  при визначенні кутового коефіцієнту  $K_{PP}$  лінії прогнозу. Лінійна

апроксимація траєкторії змін рангів  $R_{CE}(t)$  дозволяє отримати якісну оцінку умов безпеки польотів протягом інтервалу прогнозу  $\Delta T_{пр}$ .

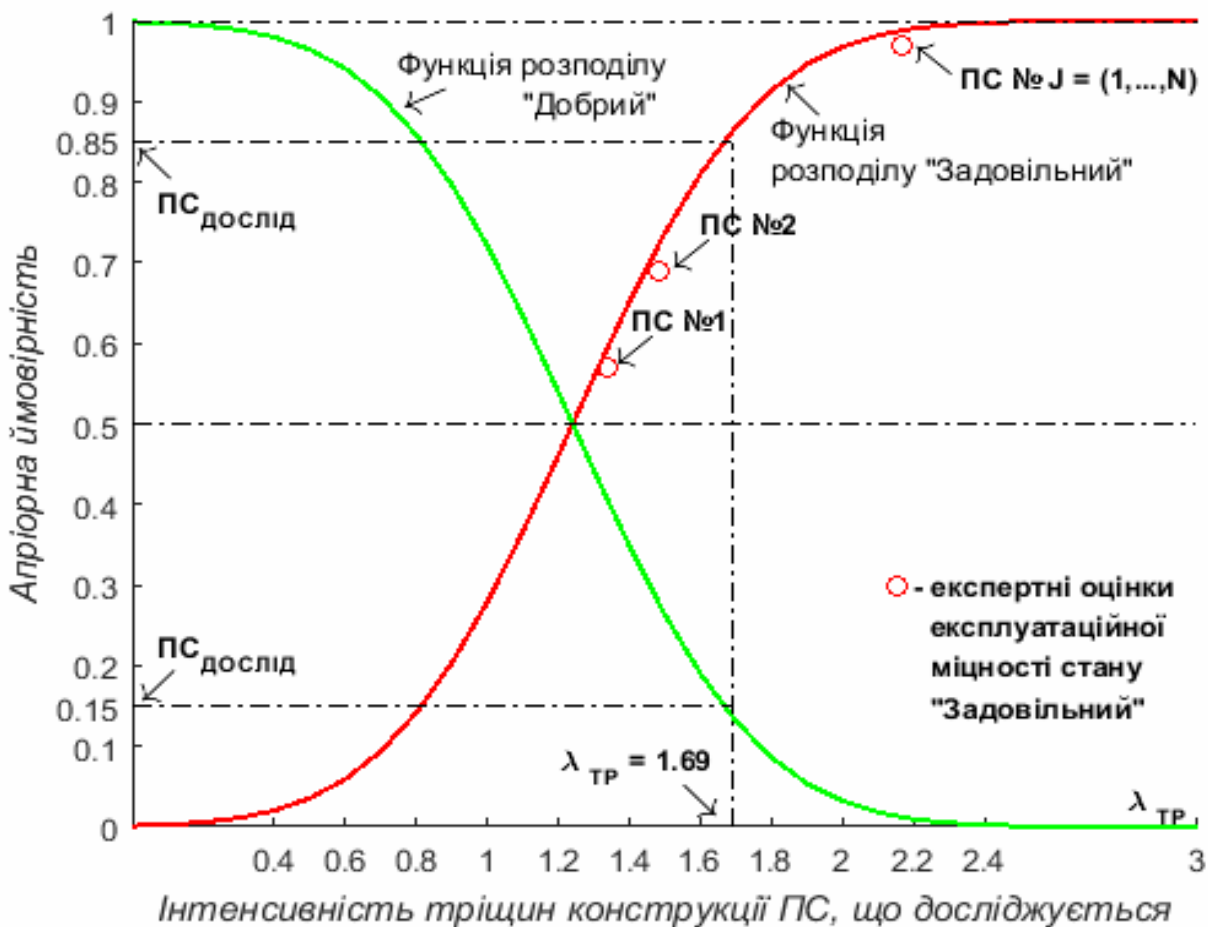


Рис. 2. Апріорні ймовірності оцінки технічних станів "Добрий", "Задовільний" при прогнозі для планера ПС, що досліджується

При визначенні кутового коефіцієнта  $K_{пр}$  лінії прогнозу в структурі підграфа  $G_{пр}$  доцільно обмежитись трьома вершинами, які передбачають:

значення коефіцієнта вибирається максимальним  $K_{пр} = K_{MAX}$  у межах ліній верхньої та нижньої границь довірчого інтервалу лінії регресії, коефіцієнти якої обчислено за даними парку головної групи ПС.;

значення коефіцієнта встановлюється кінцевою точкою лінії регресії  $K_{пр} = K_P$ ;

значення коефіцієнта вибирається рівним кутовому коефіцієнту нижньої границі довірчого інтервалу лінії регресії  $K_{пр} = K_{НГ}$ .

В підграфі  $G_{пр}$  застосовується байєвський принцип (1) прийняття рішень для вибору траєкторії змін  $R_{CE}(t)$  рангів пошкоджень залежно від ступеню пошкодження ПС, яку виявлено протягом виконання профілактичних робіт і за даними експлуатації ПС головної групи.

Апостеріорні ймовірності кутового коефіцієнту  $K_{PP}$  визначаються результатами розпізнавання в підграфі  $G_{TC}$ , а саме: з якою ймовірністю і до якого образу доцільно віднести пошкодження СЕ: “добрий стан”, “задовільний стан” чи “потребує капітального ремонту”.

Апостеріорні ймовірності кутового коефіцієнту  $K_{PP} = \{K_{MAX}, K_P, K_{HG}\}$  визначаються гістограмою розподілу кількості ліній, кутові коефіцієнти яких відповідають змінам рангів головної групи ПС відносно дослідженого ПС.

На рисунку 3 показано траєкторії ліній прогнозу залежно від апостеріорних ймовірностей розподілу кутових коефіцієнтів.

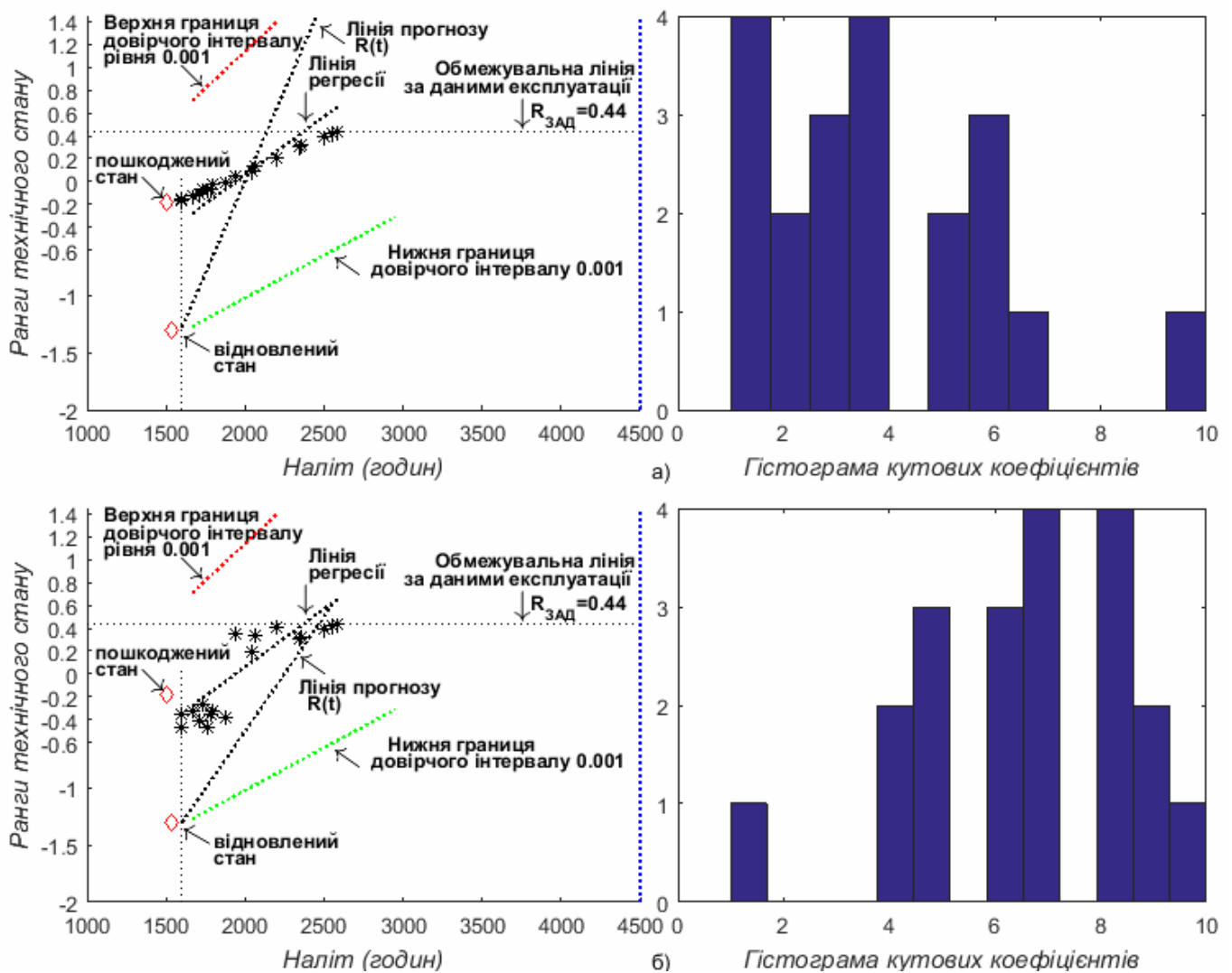


Рисунок 3 – а) кутовий коефіцієнт  $K_{PP} = K_{MAX}$ ; б) кутовий коефіцієнт  $K_{PP} = K_P$

При визначенні кількості вершин у підграфі  $G_P$  доцільно обмежитись мінімальною кількістю образів:

$\omega_1$  - коли неварто очікувати відмови СЕ протягом інтервалу прогнозу  $\Delta T_{PP}$ ;  $\omega_2$  - значення рангу кінцевої точки інтервалу прогнозу  $\Delta T_{PP}$  практично співпадає з обмеженнями, які визначено для рангів пошкодження з умов безпеки польотів;  $\omega_3$  -

ранг пошкодження перевищує дозволене значення  $R_{CE}(t) \leq R_{зад}$  на інтервалі прогнозу  $\Delta T_{пр}$ .

Прийняття рішення в підграфі  $G_p$  щодо ймовірнісного висновку оцінки експлуатаційної міцності СЕ передбачає використання статистичних методів розпізнавання одного з трьох образів  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ , для яких апіорні й апостеріорні ймовірності отримуються за результатами математичного моделювання точки перетину лінією прогнозу заданого значення  $R_{зад}$  рангу пошкодження.

**Висновок.** Розроблено структуру мережі Байєса, за допомогою якої можна здійснювати прогноз експлуатаційної міцності конструкції планера повітряних суден. Застосування мережі Байєса дозволить підвищити вірогідність прийняття рішень прогнозу шляхом врахування експертної оцінки впливу причинно-наслідкових зв'язків поміж наявності різноманітних чинників експлуатації.

Математичну модель структури мережі Байєса застосовано при продовженні призначених показників експлуатації ПС типу Л-39.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Добриденко О.М., Бологін А.С., Горохов Г.Т. Математична модель статистичної обробки та прогнозування технічного стану планерів повітряних суден / Зб. наук. праць ДНДІА. – К., 2016. – Вип.12(19).
2. Барзилович Е.Ю., Савенков М.В. Статистические методы оценки состояния авиационной техники. - М.: Транспорт, 1987.- 240 с.
3. Северцев Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и отработке. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
4. Парамонов Ю.М. Методы математической статистики в задачах, связанных с оценкой и обеспечением усталостной долговечности авиационных конструкций. РИИГА, 1992. – 248 с.
5. Довгий С.О., Бідюк П.І., Трофимчук О.М. Системи підтримки прийняття рішень на основі статистично-ймовірнісних методів. - Київ: Логос, 2014.- 419 с.

*Надійшла до редакції 23.10.2017*

*Рецензент: ДТН Чепіженко В.І.*