

**ЛОГІКО-СТАТИСТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ
КОНСТРУКЦІЇ ПЛАНЕРА ПОВІТРЯНИХ СУДЕН З ПРОДОВЖЕНИМИ
ПРИЗНАЧЕНИМИ СТРОКАМИ СЛУЖБИ**

Розглянуто основні положення логіко-статистичної моделі оцінки довговічності планерів повітряних суден. Застосування інтелектуальних інформаційних технологій підтримки прийняття рішень в процесі логіко-статистичної обробки бази даних експлуатації і ремонту дозволяє визначити ранги пошкодження силових елементів і виконати моделювання траєкторій прогнозованих змін технічного стану. Передбачено прийняття припущень щодо параметрів моделі втомної міцності для визначення апіорних та апостеріорних ймовірностей оцінок технічного стану планера повітряних суден при використанні мереж Байєса. [dx.doi.org/10.29010/88.4]

Ключові слова: планер повітряного судна; ранг пошкодження; довговічність, мережі Байєса.

Вступ

Для дослідження довговічності конструкції планера повітряних суден (ПС) використано методичний апарат, який базується на сучасних математичних методах і дозволяє забезпечити інформаційну підтримку рішень прогнозування змін експлуатаційної міцності силових елементів (СЕ).

Прогнозні оцінки довговічності конструкції планера ПС мають випадковий характер і обумовлені такими факторами, як програми учбово-бойової підготовки, кваліфікація льотного складу, особливості металургійних технологій, метеорологічно-кліматичні умови, стан покриття аеродромів та інше.

Оцінка довговічності безпосередньо залежить від експлуатаційної міцності СЕ, яку можливо характеризувати таким узагальненим параметром як ранг пошкодження R_{CE} . Для ПС з продовженими призначеними строками служби ранг пошкодження R_{CE} визначається ймовірністю $\beta_{CE}(t)$ руйнування конструкції ПС і залежить від календарного строку t_K та наробітку експлуатації t_p , які опосередковано передають випадковий вплив факторів експлуатації [1].

З метою зменшення невизначеності в початкових даних при логіко-статистичній обробці баз даних застосовано мережі Байєса, які надають можливість визначити ймовірнісну оцінку експлуатаційної міцності та довговічності при використанні апіорної та апостеріорної інформації, яка отримується в результаті статистичної обробки даних експлуатації та ремонту ПС, а також експертних оцінок впливу на експлуатаційну міцність різноманітних чинників умов експлуатації [2].

Загальні положення оцінки технічного стану планера повітряних суден

Мережі Байєса можливо представити в вигляді ациклічного графу G , що складається з трьох підграфів, в вершинах яких застосовано інформаційні технології інтелектуального аналізу даних data mining [3]. Крім цього, для прийняття рішень прогнозу стосовно технічного стану СЕ, передбачено у вершинах графа G здійснювати обробку інформації на основі методів прикладної статистики й статистичних методів розпізнавання образів (рисунок 1).

Процес обробки в підграфах G_{TC} , G_{TP} , G_P передбачає: підграф G_{TC} – визначення рангів R_{CE} пошкодження СЕ за результатами контролю поточного технічного стану ПС; підграф G_{TP} – визначення траєкторій прогнозу змін рангів R_{CE} ; підграф G_P – прийняття рішення щодо можливості експлуатації на інтервалі прогнозу $\Delta T_{пр}$.

Логіко-статистична обробка бази даних експлуатації та ремонту ПС дозволяє виконати моделювання змін рангів технічного стану СЕ і провести розпізнавання до якого образу технічного стану необхідно віднести СЕ на основі формули Байєса [4. с.318]:

$$P(\omega_i | x = x_0) = \frac{P(\omega_i)p(x_0 | \omega_i)}{\sum_{i=1}^m P(\omega_i)p(x_0 | \omega_i)}, \quad (1)$$

де $P(\omega_i | x = x_0)$ – умовна апостеріорна ймовірність події, що досліджуваємий об'єкт відноситься до

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ПРОЦЕССОВ, МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ

класу ω_i при значенні x_0 признака x і кількості m класів об'єктів.

В кожному підграфі за допомогою експертів встановлюється кількість класів інформаційних образів. Наприклад, в підграфі G_p мінімальну кількість складають наступні інформаційні образи [5]:

ω_1 — коли не слід очікувати відмови СЕ протягом інтервалу прогнозу $\Delta T_{пр}$;

ω_2 — кінцева точка інтервалу $\Delta T_{пр}$ прогнозу ранга практично співпадає з обмеженнями, які визначено для рангів пошкодження з умов безпеки польотів;

ω_3 — ранг пошкодження перевищує дозволене значення на інтервалі прогнозу $\Delta T_{пр}$.

Дослідження експлуатаційної міцності конкретного СЕ передбачає порівняльний аналіз рангу пошкодження цього СЕ з іншими СЕ, які перебували в різних умовах експлуатації ПС. При цьому визначається СЕ з максимальним ступенем пошкоженості $R_{СЕ}^{MAX}$.

При перетворенні на основі методів прикладної статистики від багатовимірної шкали значень параметрів контролю технічного стану до одновимірної шкали рангів, якою користуються експерти при прийнятті рішень, ранговий порядок ступеню пошкоджень ПС не змінюється. Тому можливо використання значення максимального рангу $R_{СЕ}^{MAX}$.

На рисунку 2 показано загальну схему класифікації технічного стану конструкції планера ПС на основі використання в підграфі G_{TC} методу дискри-

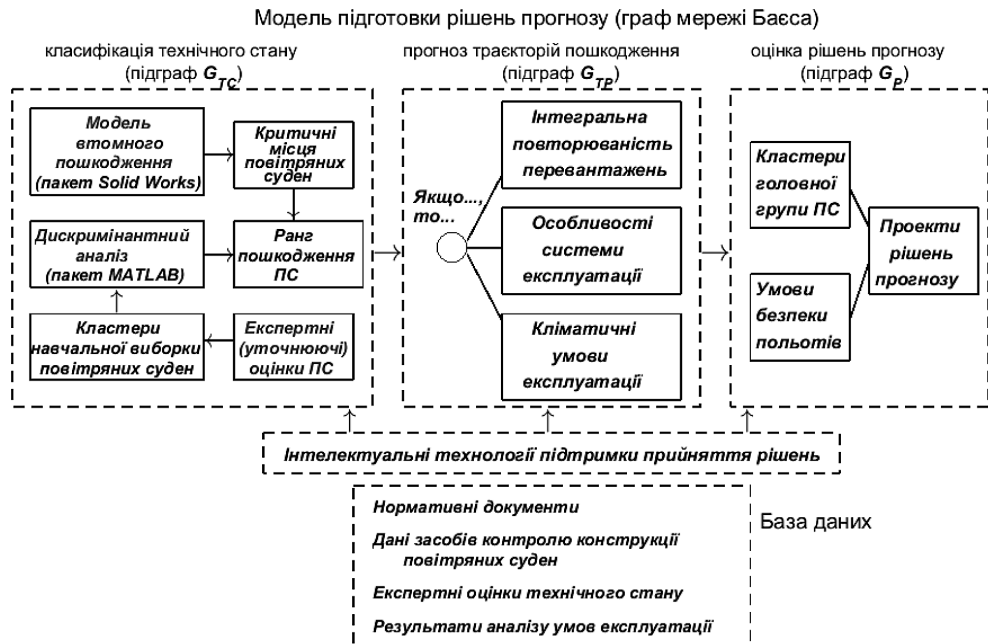


Рис. 1. Граф G дерева рішень в загальній структурі математичної моделі оцінки довговічності СЕ планера ПС

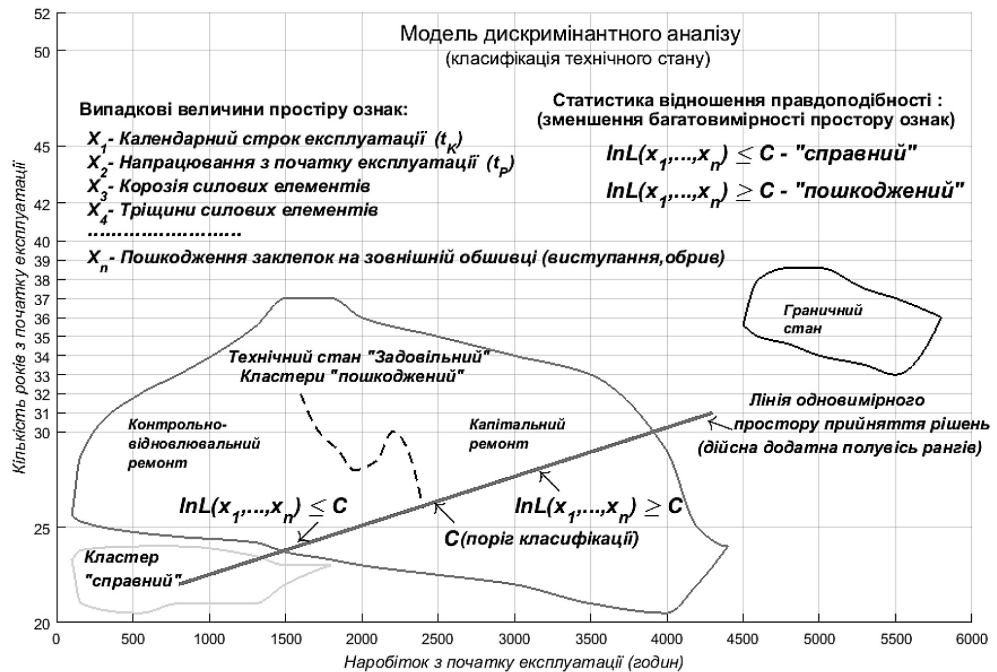


Рис. 2. Зменшення багатовимірності простору ознак технічного стану для прийняття рішень класифікації технічного стану планера ПС

мінантного аналізу для визначення розподілу на кластери, а також дослідження рангів на лінії одновимірного простору рішень прогнозу. Формування узагальненої оцінки технічного стану в значеннях шкали рангів дозволяє поєднати оцінки експертів та значення ймовірностей руйнування СЕ.

В результаті порівняльного аналізу значень рангів відносно досліджуваного ПС визначається група

головних ПС, для якої в подальшому проводиться статистична обробка даних експлуатації і ремонту.

Особенности построения моделей оценки долговечности конструкции планера ПС

Досвід експлуатації ПС різного типу вказує, що більшість руйнувань СЕ має втомний характер. Це обумовлено впливом одного з найбільш важливих фізичних факторів при експлуатації, а саме змінних навантажень, що приводить до погіршення характеристик міцності СЕ [6, с. 169].

Крім цього, при експлуатації ПС з продовженими строками служби внаслідок корозійних пошкоджень СЕ збільшується кількість концентраторів напруження, що призводить до зміщення розрахункових кривих втоми і зменшенню довговічності [7, с. 74].

Тому в підграфі G_{TC} застосовано модель втомної довговічності – двохпараметричний логарифмічний нормальний закон розподілу ймовірності руйнування [8, с. 168]:

$$F(\lg N) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\lg N} e^{-(x-\mu)/(2\sigma^2)} dx, \quad (2)$$

де x – втомна довговічність в кількості циклів N навантажень при лабораторних випробуваннях або кількість годин польоту t_p за даними експлуатації; μ та σ – параметри функції розподілу (μ – математичне очікування, σ – середнє квадратичне відхилення логарифмів довговічностей, при цьому приймається, що $\sigma = 0,15$ для алюмінієвих сплавів).

При визначенні діапазону змін математичного очікування довговічності μ в залежності від діапазону змін отриманих пошкоджень для СЕ, які спроектовано за принципом «безпечного пошкодження», зроблено наступні припущення.

Перше припущення стосується збереження експлуатаційної міцності до завершення призначеного ресурсу (випадок відсутності пошкоджень – значення $\mu = \mu_0$).

Друге припущення відноситься до можливості появи граничного стану в випадку невиявлення тріщини при першому капітальному ремонті. Другий капітальний ремонт необхідно виконувати по закінченні міжремонтного ресурсу. Тому з урахуванням рекомендації встановлювати інтервал контролю появи тріщини в два рази менший інтервалу розвитку тріщини до граничного стану вибрано значення $\mu = \mu_{TP}$ [9, с. 35].

Таким чином, математичне очікування μ довговічності СЕ при моделюванні пошкоджень знаходиться в межах інтервалу $\mu_0 \div \mu_{TP}$.

Значення ймовірності $\beta_{CE}(t)$ часткового або повного руйнування СЕ, яке обчислено згідно (2) і

яке доцільно вважати апріорною ймовірністю $P(\omega)$, дозволяє характеризувати експлуатаційну міцність і встановити відповідне значення рангу пошкодження R_{CE} пропорційно значенню ймовірності $\beta_{CE}(t)$.

На основі складових параметрів вектора контролю технічного стану розраховують поточні значення інтенсивності появи тріщин λ_{TP} , корозії λ_{KP} , пошкодження заклепок λ_{ZAK} а також за допомогою методів технології data mining прогнозовані оцінки інтенсивності появи тріщин λ_{TP} , корозії λ_{KP} , пошкодження заклепок λ_{ZAK} на інтегральному рівні опису конструкції ПС [6, с.99].

Корегування моделі прогнозування індивідуально для конкретного ПС передбачає припущення щодо лінійної пропорційності змін ймовірностей руйнування $\beta_{CE}(t)$ в залежності від змін інтенсивностей появи тріщин на внутрішніх та зовнішніх поверхнях СЕ від початку експлуатації ($\lambda_0 = \lambda_{TP} = 0$) до граничного стану $\lambda_{TP} = \lambda_{TP}$.

Для визначення параметра $\mu_{ПРОГНОЗ}$ застосовано припущення щодо лінійної пропорційної зміни параметра μ в діапазоні ($\mu_0 \div \mu_{TP}$) відповідно змін λ_{TP} в діапазоні ($\lambda_0 \div \lambda_{TP}$):

$$\begin{aligned} \mu_{ПРОГНОЗ} &= \mu_0 + \delta\mu; \\ \frac{\delta\mu}{\lambda_{ПРОГНОЗ}} &= \frac{\Delta\mu}{\Delta\lambda_{TP}} = \frac{\mu_0 - \mu_{TP}}{\lambda_0 - \lambda_{TP}}; \quad (3) \\ \delta\mu &= \frac{\mu_0 - \mu_{TP}}{\lambda_0 - \lambda_{TP}} \times \lambda_{ПРОГНОЗ}, \end{aligned}$$

де значення $\lambda_{ПРОГНОЗ}$ обчислюється на основі регресійних залежностей $\lambda_{TP}(t_p)$ шляхом екстраполяції значень λ_{TP} , які отримано в процесі експлуатації та ремонту парку ПС.

В підграфі G_{TP} процес прогнозування змін рангів $R_{CE}(t_i)$ доцільно представити в вигляді стохастичного процесу, що управляється в дискретному режимі і описуються випадковою послідовністю значень рангів $R_{CE}(t_i)$, де $t_i, i=1, n$ – дискретні моменти прийняття рішень управління.

До одного з видів управління відноситься застосування переліку робіт, що додатково до регламенту технічного обслуговування виконують при продовженні призначених показників ПС для надійної експлуатації у продовжений період.

Дослідження експлуатаційної міцності конкретного СЕ передбачає кластерний аналіз і класифікацію рангів СЕ для парку ПС в залежності від параметрів напрацювання по ресурсу t_p та строку служби t_k , а також передбачає отримання регресійних залежностей змін рангів від цих параметрів.

Результати прогнозу інформаційного образу траєкторій змін рангів для конкретного СЕ використовуються при розпізнаванні та визначенні кутового коефіцієнту K_{TP} лінії прогнозу на основі байєвського критерію. Лінійна апроксимація траек-

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

В підграфі G_p виконується порівняльний аналіз ступеню пошкодження конкретного СЕ з іншими СЕ, які перебували на інших ПС. Визначається СЕ з максимальним ступенем пошкоженості R_{CE}^{MAX} , що і є однією із підстав для прийняття рішень стосовно залишкової експлуатаційної міцності досліджуемого СЕ.

Крім цього, в підграфі G_p проводиться перевірка дотримання умови безпеки польотів, при якій ймовірність виникнення аварійної ситуації внаслідок утворення втомних тріщин не повинна бути більше 10^{-6} на одну годину польоту [10, с.14].

При прогнозуванні змін технічного стану СЕ необхідно передбачати дотримання умов безпеки польотів:

$$R_{CE}(t) \leq R_{\text{Зад}} = R_{CE}^{\text{MAX}} \quad (4)$$

Наприклад, для ПС типу Л-39 значення ймовірності $\beta_{CE}(t)$ не повинно перебільшувати значення $\beta_{CE}(t) = R_{\text{Зад}} = 4500 \times 10^{-6} = 4.5 \times 10^{-3}$ для призначеного ресурсу нальоту 4500 годин. Враховуючи неточності обчислень доцільно задати значення рангу $R_{\text{Зад}}$ в інтервалі $R_{\text{Зад}} = (1.0 \div 4.5) \times 10^{-3}$.

На рисунку 4 показано обмежувальну лінію, яку при прогнозі перетинати недоцільно за умови (4) забезпечення безпеки польотів.

Таким чином, в підграфі G_p необхідно передбачати дотримання умов безпеки польотів в межах:

$$R_{CE}(t) \leq R_{CE}^{\text{MAX}} \leq R_{\text{Зад}} = (1.0 \div 4.5) \times 10^{-3} \quad (5)$$

У підграфі G_p визначають точки перетину лінії регресії з лінією, яка позначає дотримання умов безпеки польотів (4), (5).

Інформація щодо координат точок перетину дозволяє передбачити необхідність проведення додаткових цільових оглядів та прогнозованих перевірок СЕ в процесі виконання робіт згідно діючої нормативної документації.

Прийняття рішення в підграфі G_p на основі формули Байеса (1) щодо оцінки довговічності експлуатації ПС на інтервалі прогнозу $\Delta T_{\text{пр}}$ потребує визначення умовних апостеріорних ймовірностей технічного стану СЕ. Для цього виконується обчислення емпіричних функцій розподілу параметрів t_k, t_p, R_{CE} і проводиться оцінка надійності експлуатації ПС з продовженими призначеними строками служби згідно з планом [NUN] експериментального оцінювання надійності (ДСТУ 2864-94).

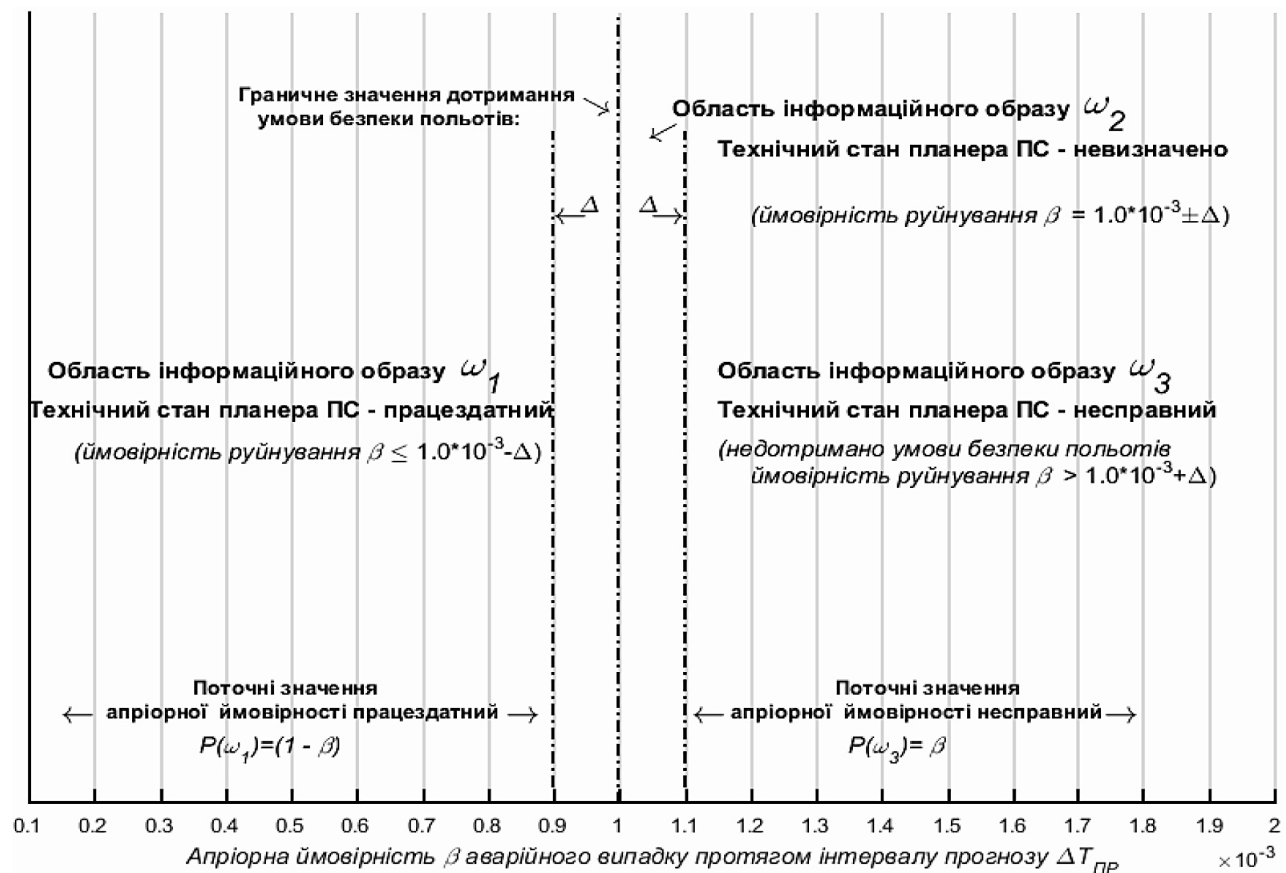


Рис. 3. Інформаційні образи прогнозованого технічного стану планера ПС

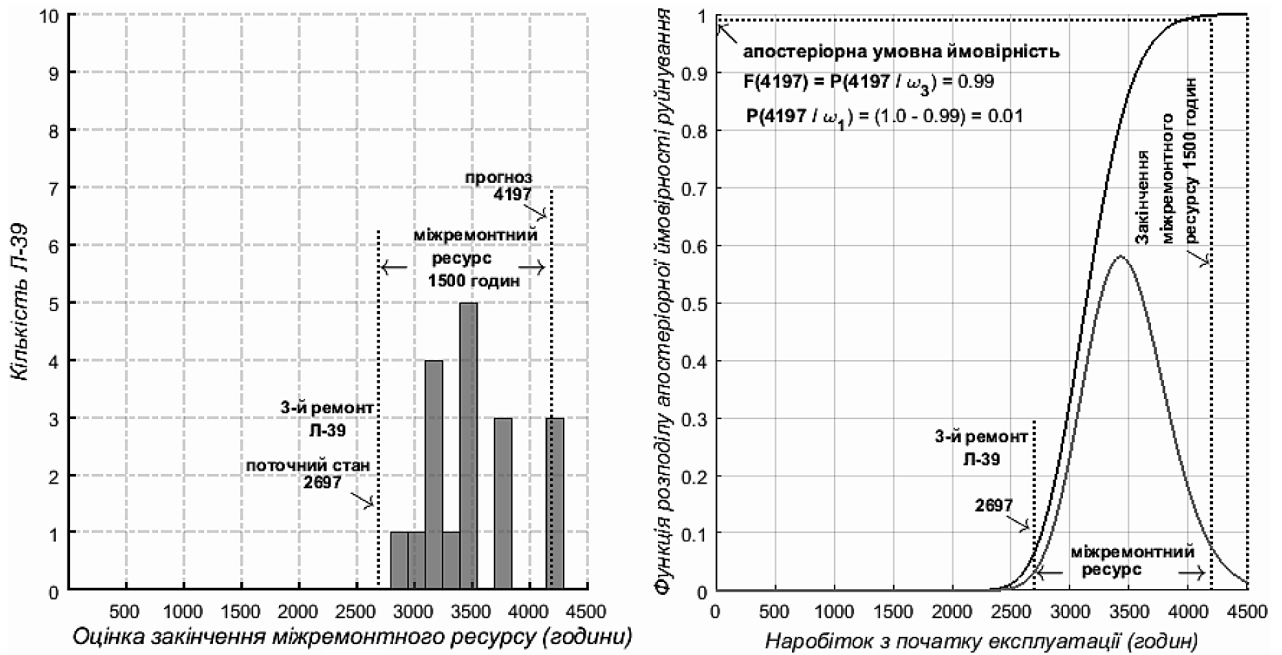


Рис. 4. а) гистограма оцінок експертів щодо продовження призначених показників ресурсу;
б) функції розподілу та щільності умовних апостеріорних ймовірностей головної групи парку ПС типу Л-39

На рисунку 4 показано умовні апостеріорні ймовірності технічного стану СЕ для параметру t_p . Припущення щодо застосування плану [NUN] полягають в тому, що за момент відмови приймається кінцеве значення прогнозу продовженого призначеного строку служби, яке встановлено експертами за даними засобів неруйнівного контролю і результатами відновлення працездатності СЕ.

Перевірку дотримання умов безпеки польотів (5) можливо здійснювати шляхом застосування баєсівського критерія теорії статистичних рішень при розпізнаванні до якого образу з множини $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ відноситься поточний технічний стан СЕ.

Висновок

Розроблена логіко-статистична модель обробки даних експлуатації та ремонту дозволяє оцінити довговічність і визначити можливість технічної експлуатації повітряних суден на встановленому інтервалі експлуатації до досягнення межі ресурсних показників.

Література

[1] Селихов А.Ф., Чижов В.М. Вероятностные методы в расчетах прочности самолета. — М.: Машиностроение, 1987, — 236с.
[2] Добриденко О.М., Бологін А.С., Горохов Г.Т. Застосування мереж Байеса для прогнозування експлу-

таційної міцності планера повітряних суден / 36. Наук. Праць ДНДІА. — К., 2017. — Вип.13(20) С.136-141.

[3] Снитюк В.Е. Эволюционные технологии принятия решений в условиях неопределенности. — К.: «МП Леся», 2015. — 347 с.
[4] Грешилов А.А. Математические методы принятия решений: учеб. пособие. 2-е изд. — М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. — 647 с.
[5] Бологін А.С., Горохов Г.Т. Прогнозування змін технічного стану планера повітряного судна на основі аналізу рангів пошкодження за даними експлуатації і ремонту / Технологические системы. — К., 2017. — 2(79). С.20-24.
[6] Райхер В.Л. Усталостная повреждаемость. — М.: МАТИ, 2006. — 239 с.
[7] Райхер В.Л., Селихов А.Ф., Хлебникова И.Г. Учет множественности критических мест конструкции при оценке долговечности и ресурса. / Ученые записки ЦАГИ том XV №2 1984.
[8] Стрижиус В.С. Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций. — М.: Машиностроение, 2012, 272 с.
[9] Зайцев В.Н., Фатеев С.С., Медведенко А.М. Расчет безопасно повреждаемых конструкций (учебное пособие). — КВВАИУ, 1986. — 54 с.
[10] Нормы летной годности самолетов транспортной категории (Авиационные правила, часть 25), 2009.

Bolohin A. S., Gorokhov G. T.

The State scientific research institute of aviation. Ukraine, Kyiv

LOGIC AND STATISTICAL MODEL FOR ASSESSING THE DURABILITY OF AN AIRPLANE GLIDER WITH LONGER APPOINTED TERMS OF SERVICE

The basic provisions of logical-statistical models for assessing the durability of an airplane glider are considered. The use of intelligent information technology in decision making allows you to determine the damage grades of power structural elements. The modeling of the trajectories forecast of changes in the technical condition is performed. Assumptions are assumed for the parameters of the fatigue strength model. The a priori and a posteriori probabilities of the technical condition of the airframe using Bayesian networks are determined. [dx.doi.org/10.29010/88.4]

Keywords: aircraft glider; damage rank; durability, Bayes networks.

References

- [1] Selikhov A.F., Chighov W.M. Probabilistic methods in calculating aircraft strength. — M.: Mashinostroenie, 1987, — 236 p.
- [2] Dobrydenko O.N., Bolohin A.S., Gorokhov G.T. The use of Bayes networks to predict the operational strength of an airframe / Collection scientific works of State Research Institute of aviation. — K., 2017. — 13(20) P.136-141.
- [3] Snituk W.E. Evolutionary technology decision-making in conditions of uncertainty. — K.: «MP Lesja», 2015.-347 p.
- [4] Greshilov A.A. Mathematical decision-making methods: a training manual. — M.: Mashinostroenie, 2014. — 647 p.
- [5] Bolohin A.S., Gorokhov G.T. Forecasting changes in technical state of the airframe aircraft on the basis of the analysis grades damage according to operation and repair / Technological systems. — K., 2017. -2(79). P.20-24.
- [6] Raicher W.L. Fatigue damage. — M.: MATI, 2006. — 239 p.
- [7] Raicher W.L., Selikhov A.F., Hlebnikova I.G. Taking into account the multiplicity of critical structural locations when assessing durability and resource. / Scientific notes CASI part XV, 1984.
- [8] Strigius W.S. Methods for calculating the fatigue life of aircraft structural elements. — M.: Mashinostroenie, 2012, 272 p.
- [9] Zaitcev W.N., Fateev S.S., Medvedenko A.M. Calculation of safely damaged structures (study guide). — K.:KHMAII, 1986. — 54 p.
- [10] Airworthiness standards for transport category aircraft (Aviation Rules, Part 25), 2009.