

УДК 629.735:620.193

**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

**КАРУСКЕВИЧ М.В.**, професор кафедри конструкції літальних апаратів  
Національного авіаційного університету, доктор технічних наук, старший науковий  
співробітник

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ЩОДО ПРОДОВЖЕННЯ СТРОКІВ СЛУЖБИ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ПЛАНЕРІВ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

*Розроблена математична модель та алгоритм вирішення завдання підготовки прийняття рішення продовження строків служби з урахуванням старіння конструкції планера в умовах експлуатації.*

*Ключові слова:* математична модель, старіння конструкції планера, технічний стан планера, біонічна математична модель.

Об'єктивно ресурси і строки служби ЛА пов'язані з технічним станом силових елементів (СЕ) конструкції планера. Можливості збільшення ресурсних показників старіючої авіаційної техніки реалізуються на основі проведення ресурсних розрахунків із використанням гіпотези лінійного підсумування втомних пошкоджень при обробці даних бортових засобів контролю параметрів польоту, що всебічно досліджено в [1].

Проблемні питання прийняття рішень щодо продовження строків служби старіючих ЛА тільки частково досліджено в роботах по технічній діагностиці, тому існує необхідність розробки методів, що дозволяють збільшити достовірність рішень, які приймає посадова особа (ОПР) для конкретної ситуації продовження строків служби ЛА за результатами дефектування конструкції планера при його оглядах в умовах експлуатуючих частин та авіаційних підприємств.

### **Постановка завдання**

Аналіз даних, які отримують за допомогою засобів неруйнівного контролю СЕ конструкції планера, дозволяє розподілити досліджені ЛА на окремі групи (класи) в залежності від методів експлуатації і, відповідно, спрогнозувати ймовірність безвідмовної роботи при експлуатації конструкції планера:

- технічний стан планера при системі експлуатації за ресурсом;
- технічний стан планера за результатами контрольно-технічного огляду при експлуатації за технічним станом ЛА;

© Бологін А.С., Горохов Г.Т., Карускевич М.В., 2012

- технічний стан планера за результатами контрольних-відновних робіт при переведенні на експлуатацію за технічним станом;
- технічний стан планера за результатами виконання робіт на авіаремонтному підприємстві.

На рис.1 показана якісна залежність прогнозованих змін ймовірності відмов СЕ конструкції планера  $P_{РН}(t)$  в залежності від календарного строку служби ЛА.

Зміни технічного стану показано для конструкції планера після проведення робіт на авіаремонтному підприємстві.

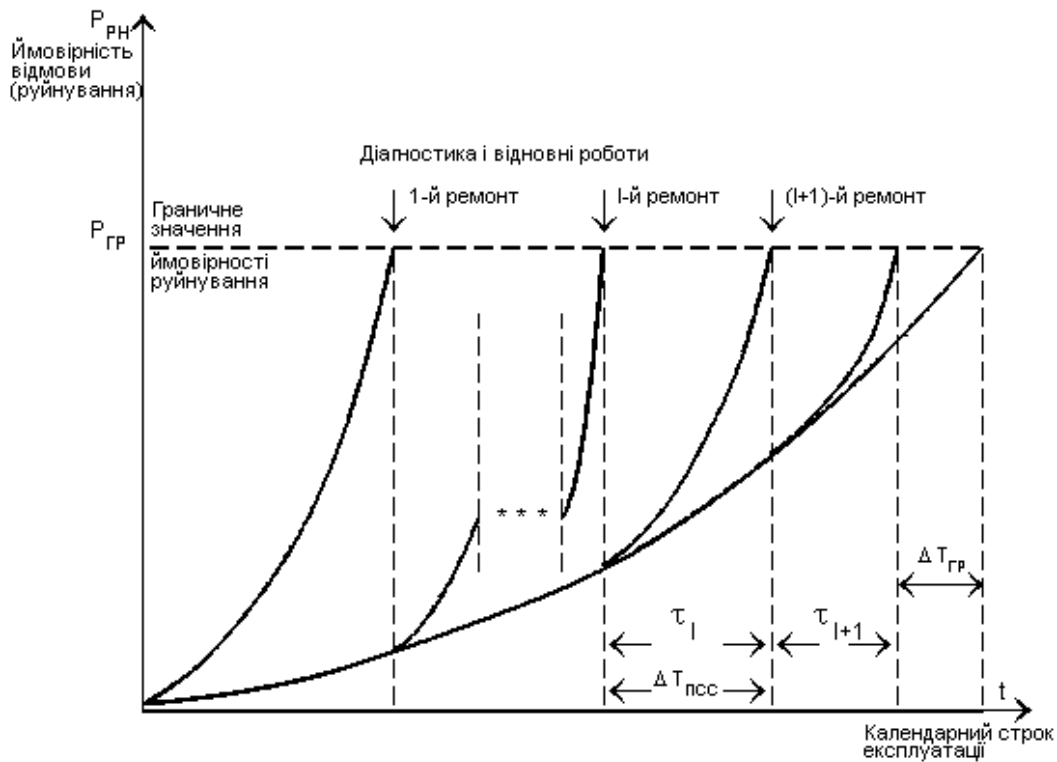


Рис.1. Функціональні залежності зміни ймовірності відмов силових елементів конструкції планера

Виконання вимог забезпечення безпеки польотів при продовженні строків служби визначається інтервалами в часі, протягом яких дотримуються умови збереження міцності. На рис.1 схематично показано часові інтервали  $\tau_I, \tau_{I+1}$ , в межах яких можливе продовження на строк  $\Delta T_{псс}$  календарних строків служби ЛА.

Особливість старіючого парку ЛА полягає в поступовій деградації механічних характеристик сплавів, які застосовуються в конструкції, їх опору втомі та тріщиностійкості [2]. В результаті дії вказаних обставин

$$\tau_{I+1} \leq \tau_I,$$

що приводить до необхідності приймати рішення з корегування значення  $\Delta T_{псс}$ , на який планується збільшити строк служби після кожного етапу робіт із діагностики

конструкції планера. При цьому існує граничне значення  $\Delta T_{гр}$ , після якого експлуатація ЛА повинна бути припинена.

Ймовірність руйнування  $P_{рн}(t)$  може бути визначена формулою [3]:

$$P_{рн}(t) = e^{-\gamma(t)(\alpha_{кр}(t) - \alpha_0)},$$

де  $\gamma(t)$  – коефіцієнт дефектності конструкції,  $\alpha_{кр}(t)$  і  $\alpha_0$  – розмір дефекту критичний і початковий.

Для підвищення достовірності прийняття рішення ОПР необхідно розробити математичну модель, яка дозволить імітувати процес мислення експертів із урахуванням результатів аналізу надійності старіючого парку літаків.

### **Структура математичної біонічної моделі**

Один із напрямків розробки методів підготовки прийняття рішень щодо старіючих ЛА полягає в розробці математичної моделі обробки експериментальних даних, яка імітує механізми прийняття рішень при функціонуванні біологічних систем і дозволяє ОПР розуміти обґрунтованість і доцільність різних варіантів рішень.

На рис.2 наведено структуру математичної моделі, до складу якої входять модулі біонічної моделі, які відображають в формальному вигляді перетворення, що здійснюються ОПР при узагальненні результатів дії експлуатаційних факторів і формуванні багатовимірних даних контролю в образі психосемантичного простору предметної області

В біонічній математичній моделі пропонується розглядати три векторних простори  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$ , розмірність яких визначається кількістю параметрів предметної області контролю СЕ планера ЛА.

Перший простір  $\Phi_1$  утворюють оцінки показників втрати міцності СЕ на основі обробки даних засобів контролю кожного окремого СЕ планера ЛА і визначення переліку дискретних елементів поверхні пошкоджених СЕ.

Використання методів нечіткого кластер-аналізу дозволяє визначити образ технічного стану планера в залежності від кількості і параметрів втрати міцності пошкоджених СЕ.

В другому просторі  $\Phi_2$  на основі алгоритмів нечіткого логічного аналізу прийняття рішень здійснюється корегування результатів аналітичних розрахунків і стохастичного моделювання швидкості змін міцності в залежності від оцінки старіння конструкції.

В просторі  $\Phi_3$  до результатів контролю міцності окремих СЕ, однотипних для парку ЛА, застосовуються методи багатовимірного шкалування з подальшим визначенням факторів, що впливають на довговічність конструкції і дозволяють прогнозувати довговічність.

Використання оцінок відповідності експериментальних даних математичним моделям змін міцності СЕ дозволяє формувати для ОПР варіанти можливих рішень із продовження призначеного строку служби конструкції планера ЛА.

## Математична модель оцінки строку експлуатації конструкції планера

Умова руйнування СЕ конструкції планера ЛА згідно з гіпотезою лінійного сумування пошкоджень формулюється наступним чином: сума відносних втомних пошкоджень  $\zeta_{рез}$  дорівнює одиниці [1]:

$$\zeta_{рез} = \sum_{i=1}^{\nu} \frac{m_i}{N_i} = 1,$$

де  $N_i$  - кількість циклів навантаження до руйнування при рівні напруження  $\sigma_i$ ;  $m_i$  - поточна кількість циклів навантаження ( $i = 1, \dots, \nu$ );  $\nu$  - кількість рівнів навантаження.

Модулі біонічної системи

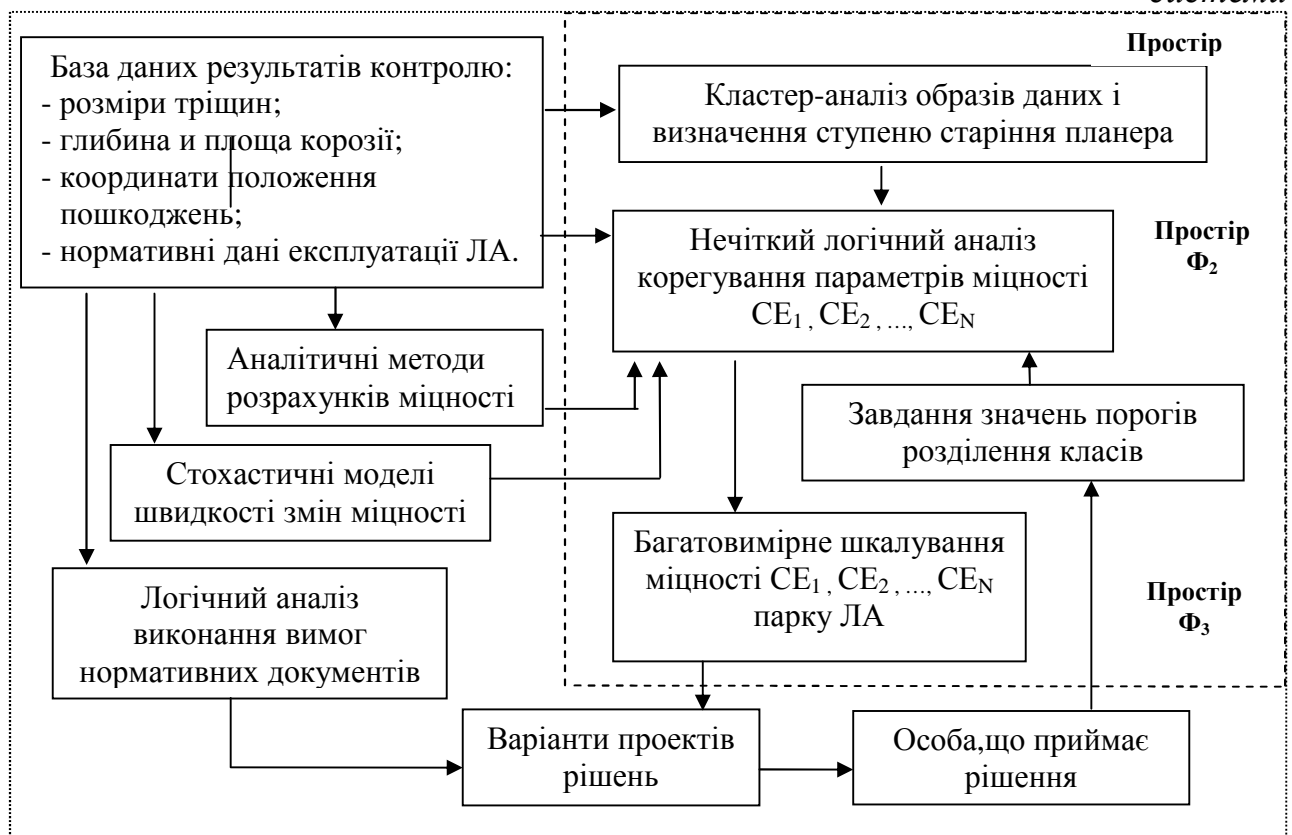


Рис.2. Модулі структури математичної моделі аналізу даних при підготовці рішень щодо продовження строків служби конструкції планера

Для старіючих конструкцій фактичний рівень напружень  $\sigma_j$  збільшується внаслідок накопичення пошкоджень в поверхневому і внутрішніх шарах матеріалу.

Внутрішні пошкодження, як відомо, обумовлено еволюцією дислокаційних структур. Пошкоджуваність поверхневого шару асоціюється з формуванням дефектної структури – деформаційного рельєфу.

Останнім часом розроблена методологія кількісної оцінки деформаційного рельєфу і відповідного втомного пошкодження [4].

На рис.3 показано зміни положення кривої втомної міцності матеріалу СЕ старіючої конструкції і наявність відповідного співвідношення зміни кількості циклів допустимих навантажень.

$$N_{ц1} < N_{ц0} .$$

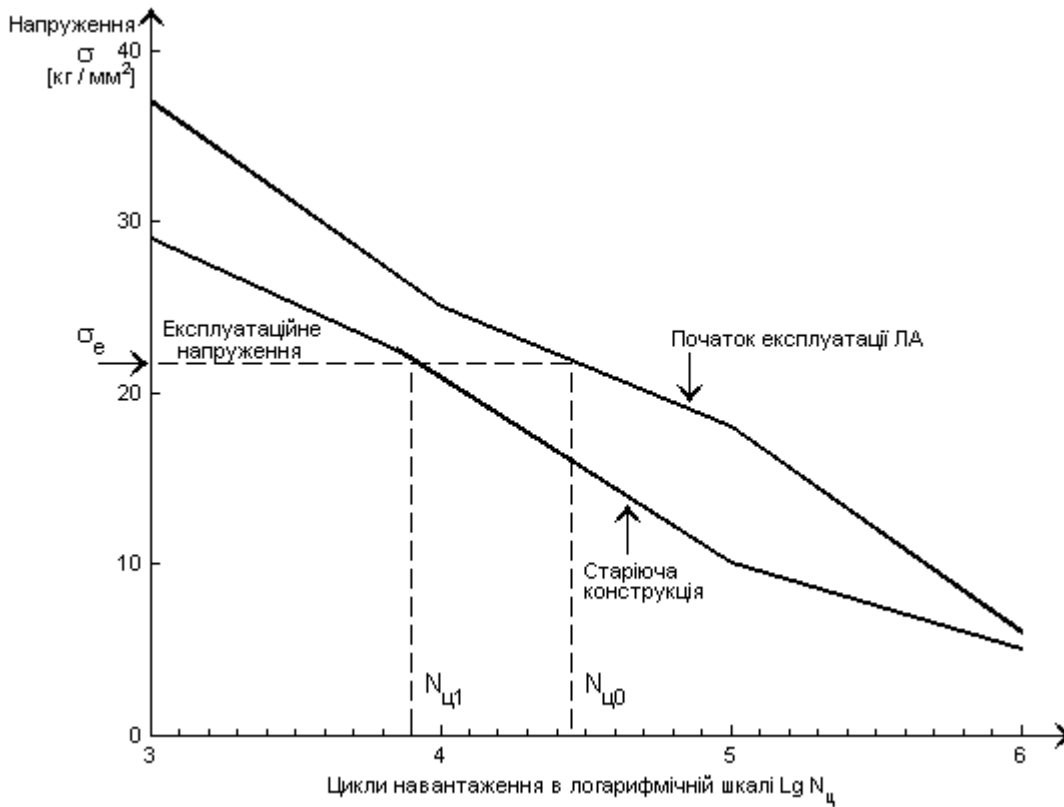


Рис.3. Зменшення кількості циклів допустимих навантажень внаслідок старіння матеріалу конструкції планера

Результатом старіння матеріалу конструкції є зменшення «безпечного» ресурсу [1]:

$$T_{без1} < T_{без0} .$$

Тому необхідно при прийнятті рішення щодо продовження строків служби ЛА одночасно вирішувати проблемні питання зменшення установленого ресурсу ЛА.

З метою визначення для старіючих конструкцій функціональної залежності кривої втомної міцності від зафіксованих під час контролю порушень поверхні матеріалу СЕ необхідно попередньо виконати дискретизацію поверхні і описати пошкодження за допомогою дискретних елементів.

Перелік пошкоджених СЕ кількістю  $N$  складає множину  $SE = \{CE_1, \dots, CE_j\}$ , ( $j = 1, 2, \dots, N$ ). Міцність планера залежить від СЕ, що має її мінімальний рівень. Для оцінки значення міцності розроблено відповідні аналітичні методи розрахунків [5].

Експерти на основі результатів неруйнівного контролю СЕ конструкції і аналізу загального технічного стану конкретного літака можуть скорегувати оцінку міцності конструкції, яка отримана розрахунковим методом.

### **Математична модель прийняття рішення щодо термінів продовження строків служби конструкції планера літака**

Математичний метод нечіткого логічного аналізу слабо формалізованих параметрів оцінки технічного стану СЕ дозволяє отримати скореговану оцінку міцності планера [6]. При цьому в якості параметрів доцільно прийняти кількісні оцінки тріщин, місць корозійних пошкоджень, забоїн, вм'ятин, місць тертя на поверхні і ослаблення, випадіння заклепок.

В математичній моделі передбачено наявність структурних блоків фаззифікатора, базових правил (бази знань), формування висновку і дефаззифікатора [7].

Багатовимірне шкалування скорегованих оцінок експертів по встановленій сукупності парку ЛА дозволяє визначити граничний ресурс конструкції з урахуванням граничного строку експлуатації.

Для отримання варіантів проектів рішень застосовано нечітко – алгоритмічний підхід до задачі забезпечення надійності конструкції планера шляхом вибору в структурі лінійного алгоритму  $B$ , який здійснює ОПР при прийнятті рішень щодо необхідної кількості  $R$  заходів із контролю та відновлювання пошкоджених СЕ [8].

Функціональний вигляд лінійного алгоритму  $B$  із  $x_j$  - кратним контролем оператора  $A_j$  при відновленні  $j$  - го СЕ $_j$  передбачає:

$$B(X) = A_1 R_1^{x_1} A_2 R_2^{x_2} \dots A_j R_j^{x_j} \dots A_N R_N^{x_N},$$

де  $A_j$  – робочий оператор, що залежить від параметра  $\zeta_{рез,j}$ ;  $R_j$  – оператор контролю і відновних робіт СЕ $_j$ , який функціонально залежить від параметра якості виконання робіт  $r_j$  – низьке ( $r_j = 1$ ), середнє ( $r_j = 3$ ), високе ( $r_j = 5$ );  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  – вектор кратності контролю та відновлення.

Задача пошуку оптимального варіанта рішення формулюється в вигляді: знайти вектор  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ , який забезпечує

$$C_B(X) \rightarrow \min$$

при обмеженнях:

$$P_{рн}(\zeta_{рез}, X) \leq P_{рн}^{гр},$$

де  $C_B(X)$  – вектор витрат на контроль та відновні роботи;  $P_{рн}^{гр}$  – граничне значення ймовірності руйнування.

Для визначення вектора  $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$  необхідно застосувати алгоритм пошуку оптимального значення функції, що враховує нелінійні особливості цільової функції  $C_B(X)$ .

## **Висновки**

1. Для дотримання вимог безпеки польотів необхідно при продовженні строків служби конструкції планера старіючого літального апарата в необхідних випадках розглядати окремо питання щодо зменшення ресурсних показників її основних силових елементів.

2. Запропонований в роботі алгоритм після подальшого його відпрацювання до рівня працюючої розрахункової комп'ютерної програми та її відповідного тестування і апробації може бути надійним інструментом вирішення завдання продовження строків служби конструкції планера ЛА.

## **ЛІТЕРАТУРА**

1. Харченко О.В., Пашенко С.В., Хільченко М.Ф. Методологія збільшення ресурсів авіаційної техніки // Збірник наукових праць ДНДІА, №8 (15), 2012.
2. Басов В.Н., Нестеренко Б.Г., Нестеренко Г.И., Петрусенко В.Г. Экспериментальное исследование влияния длительной эксплуатации самолетов на деградацию механических характеристик, сопротивление усталости и трещиностойкости применяемых алюминиевых сплавов // Прочность, колебания и ресурс авиационных конструкций и сооружений, Труды ЦАГИ, вып. 2669, 2005, С.126-142.
3. Кузьмичевский А.Ю., Гетман А.Ф. Расчет прочности и ресурса оборудования и трубопроводов атомных электростанций в вероятностном аспекте // Заводская лаборатория, №8, 2010. Том 76, С.48-50.
4. Карускевич М.В. Методологія визначення відпрацювання ресурсу літальних апаратів за параметрами деформаційного рельєфу поверхні конструктивних елементів та зразків – свідків. Автореферат дисертації на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук. Національний авіаційний університет, Київ, 2012.
5. Безпека авіації. За редакцією В.П. Бабака. – К.: Техніка, 2004. – 584 с.
6. Горохов Г.Т. Біонічна модель нечіткого логічного аналізу параметрів контрольно-технічних оглядів авіаційних систем // Збірник наукових праць ДНДІА, №7 (14), 2011. С.193-198.
7. Щерба А.А., Кирик В.В. Системи з нечіткою логікою регулювання електроенергетичних режимів.-К: Інститут електродинаміки Національної академії наук України, 2011. с.329.
8. Кательников Д.И., Ротштейн А.П. Нечетко-алгоритмическое моделирование надежности: оптимизация ресурсов контроля и коррекции // Известия РАН. Теория и системы управления, №6, 2010, С.138-142.