

Оцінка (класифікація) силових елементів літальних апаратів за областями технічного стану використовуючи статистичний метод розпізнавання та метод експертів

Максим Стрела^{* А}; Олег Добриденко^А; Георгій Горохов^А

^А Державний науково-дослідний інститут авіації, м. Київ, Україна

Received: July 1, 2020 | Revised: August 11, 2020 | Accepted: August 31, 2020

DOI: 10.33445/sds.2020.10.4.1

Анотація

Відповідно до діючого курсу підтримки справності авіації Збройних Сил України виникла проблема забезпечення справності парку літальних апаратів та виконання точної класифікації технічного стану силових елементів різних типів літаків для своєчасного виявлення їх граничного стану. Мета статті полягає в оприлюдненні результатів дослідження щодо системи класифікації технічного стану – системи розпізнавання образів. В статті розглянуто проблематику щодо вибору ефективного методу розпізнавання, головні вимоги до нього, проаналізовано обраний метод класифікації технічного стану (або розпізнавання образів технічного стану), який заснований на статистичному методі розпізнавання. Виконана реалізація методу в графічній оболонці (для застосування на персональних електронно-обчислювальних машинах) за допомогою мови програмування *Python* та допоміжних наукових і графічних бібліотек. Обрані еталонні об'єкти, визначені основні визначальні параметри, які характеризують інтенсивність вичерпання ресурсного потенціалу, які були розділені на два образи технічного стану, а саме на “добрі” та “погані”, та контрольний досліджуваний об'єкт. Як приклад, проаналізовано технічний стан відповідального силового елемента літака-винищувача Збройних Сил України, які мають приблизно однакові ресурсні напрацювання, та різні статистичні дані щодо інтенсивності використання в процесі експлуатації. Проаналізовано адекватність роботи методу за допомогою експертів, надані рекомендації у вигляді рішень управління щодо досліджуваного об'єкта.

Ключові слова: розпізнавання образів, класифікація технічного стану, силовий елемент.

Постановка проблеми

У Воєнній доктрині України [1] зазначено, що формування національних оборонних можливостей буде здійснюватися шляхом підвищення бойового потенціалу, відновлення справності, продовження ресурсу, проведення модернізації військової техніки ЗС України. Авіація Повітряних Сил має високий пріоритет в розвитку сучасної, мобільної та потужної армії, що в свою чергу призвело до планування переоснащення парку літаків на нові багатоцільові типи літаків-винищувачів покоління 4++. Застарілі

літаки планується замінювати новими типами по мірі виробітки застарілими літаками свого ресурсного потенціалу. Визначення передруйнівного технічного стану будь-якого технічного об'єкта за межами призначених показників не має чіткого алгоритму, та продовження ресурсних показників застарілих літаків виконується індивідуально. Виходячи з цього – визначення технічного стану планеру та відповідальних силових елементів літаків являє собою актуальну задачу.

* Corresponding author: ад'юнкт. e-mail: maxim.strela1991@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4055-1600

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблемою визначення запасів невичерпаного ресурсного потенціалу технічних об'єктів займалось багато дослідників. Всі дослідження в цій сфері можливо умовно розділити на два основні типи: *силові* та *статистичні*. *Силові* дослідження технічного стану, застосовують опираючись більшістю на теорію опору матеріалів. Дослідники будують свої гіпотези навколо силової моделі напружено-деформованого стану, до якої прикладені навантаження, які отримують в експлуатаційних умовах, перераховують ресурсні показники використовуючи втомні

методи та порівнюють із встановленими розробником ресурсу. Найбільш розгорнуто ці методи використовують в таких працях, як [2-7] та інші. *Статистичні* дослідження використовують, зазвичай, теорію класифікації, або теорію розпізнання образів. Опираючись на значні статистичні дані парку технічних об'єктів та конкретного об'єкта, який потрібно діагностувати – застосовують методи розпізнання образів, результат досліджень відображає належність досліджуваного об'єкта до одного з образів технічного стану, яких як мінімум двоє. Ці методи знайшли застосування в таких працях, як [8-11] та інші.

Постановка завдання

Вище зазначені методи мають як свої переваги, так і недоліки. Силові методи надають більш якісні дані щодо навантаження, критичних місць об'єктів, кількісної характеристики залишку ресурсу тощо. Проте ці методи не враховують інших експлуатаційних факторів (умови експлуатації, дані засобів неруйнівного контролю тощо) на відміну від статистичних методів. Для використання силових методів необхідно мати алгоритм розрахунку втоми, яким користувався розробник, та закладені в нього розрахункові значення навантажень, які технічний об'єкт повинен отримувати в процесі експлуатації. Такі дані зазвичай є комерційною таємницею фірми-виробника, що ускладнює розрахунки. Для статистичних методів достатньо мати лише визначальні параметри, які впливають на

вичерпання ресурсу технічного об'єкта, та мінімум два технічні стани (наприклад “справний” та “несправний”). Проте також потрібно мати значну статистику експлуатації об'єкта та еталонні образи технічного стану, які формуються із маючих еталонних експлуатуючих об'єктів.

Стаття присвячується дослідженню технічного стану за допомогою статистичних методів розпізнавання образів, оскільки дані експлуатації більш доступні, ніж алгоритми розрахунку втоми виробника.

Задача дослідження полягає в аналізі різних методів розпізнавання образів, визначенні технічного стану досліджуваного силового елемента обраним методом, та наданні рекомендацій щодо отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу

В експлуатації через те, що вироблення ресурсного потенціалу різних класів технічних об'єктів, як правило, йде нерівномірно – найчастіше трапляються випадки необхідності класифікації технічного стану одного конкретного технічного об'єкта. Звідси постає науково-інженерна задача визначити належність певного об'єкта до одного з образів технічного стану, як мінімум до стану “добрі” або “погані”.

Практика експлуатації свідчить, що головну роль в забезпеченні безпеки польотів з точки зору безвідмовності має своєчасне виявлення передруйнівного стану складного технічного об'єкта (або його відповідальної частини) для прийняття своєчасних заходів з його ремонту або заміни.

В загальному вигляді можливо вважати [7], що досліджуваний об'єкт може примати один

з двох взаємовиключних станів: S_1 – стан із запасом ресурсу, або “добрий” стан та S_2 – стан “поганий”, або передруйнівний. Розпізнання являє собою віднесення спостережуваного невідомого стану, заданого сукупністю X_n спостережень над його ознаками X_1, X_2, \dots, X_p ,

$$\overline{X}_n = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{p1} & X_{p2} & \dots & X_{pn} \end{pmatrix},$$

до одного з двох взаємовиключних станів S_1 або S_2 .

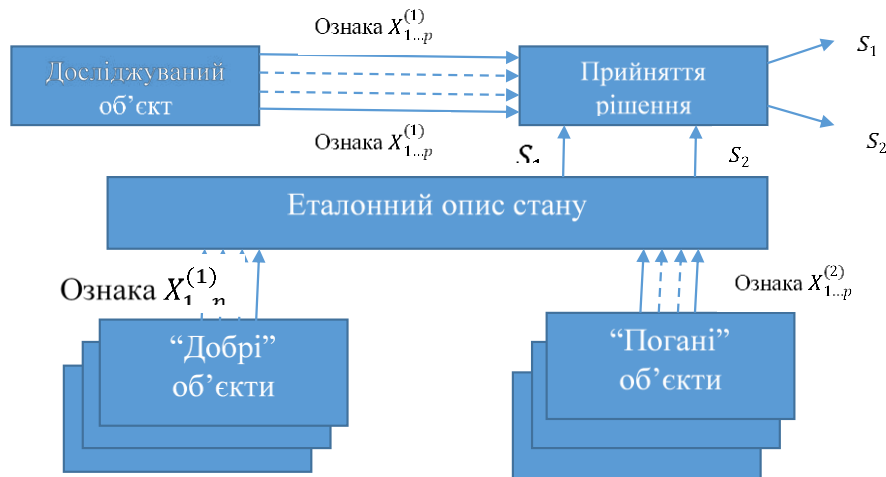
Кожен стовбець

$$\overline{x}_i = \begin{pmatrix} x_{1i} \\ x_{2i} \\ \dots \\ x_{pi} \end{pmatrix} = (x_{1i} \ x_{2i} \ \dots \ x_{pi})^T, \ i = 1, 2, \dots, n$$

матриці \overline{X}_n являє собою p -вимірний параметр спостережуваних значень p ознак X_1, X_2, \dots, X_p , що відображають найбільш важливі для розпізнання властивості.

Набір ознак p , зазвичай, є однаковим для всіх розпізнаваних класів S_1 та S_2 . Якщо кожен клас S_1 та S_2 описується своїм набором ознак, тоді задача розпізнання є тривіальною, оскільки однозначне віднесення маючої сукупності спостережень к певному класу легко виявляється за набором складових її ознак.

Загальна схема системи розпізнання технічного стану об'єкта наведена на малюнку 1.



Мал. 1 – Загальна схема розпізнання технічного стану об'єкта

Таким чином, розглядаєма задача визначення технічного стану спостережуваного об'єкта до одного з двох образів S_1 та S_2 повинна описуватись однаковими для всіх класів набором ознак X_1, X_2, \dots, X_p . При цьому різниця між класами буде виявлятися лише в тому, що у різних об'єктів однакові ознаки будуть мати різні характеристики (кількісні, якісні тощо), та для будь-якого набору ознак X_1, X_2, \dots, X_p можливо задавати правила, згідно якого класам S_1 та S_2 ставиться у відповідність вектор d_{12} :

$$d_{12} = \begin{pmatrix} d_1^{12} \\ \dots \\ d_p^{12} \end{pmatrix}$$

станів з p скалярів, які мають назву між класові відстані та висловлюють ступінь різниці у цих класів характеристик даних ознак.

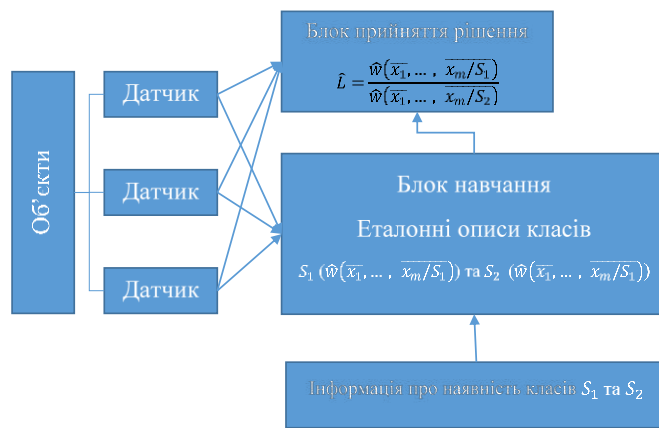
Розглядаєма система розпізнання технічного стану повинна забезпечувати гарантовану достовірність розпізнання. Існує декілька найбільш поширених систем та методів розпізнання, це такі як:

- детерміністичні (перцептронні) методи розпізнання;
- лінгвістичні (синтаксичні) методи розпізнання;
- логічні та алгебраїчні методи розпізнання;
- статистичні методи розпізнання.

Кожні з цих методів мають свої переваги та недоліки. Але з усіх вище перелічених методів лише один може забезпечити достовірність розпізнавання – статистичні методи [12].

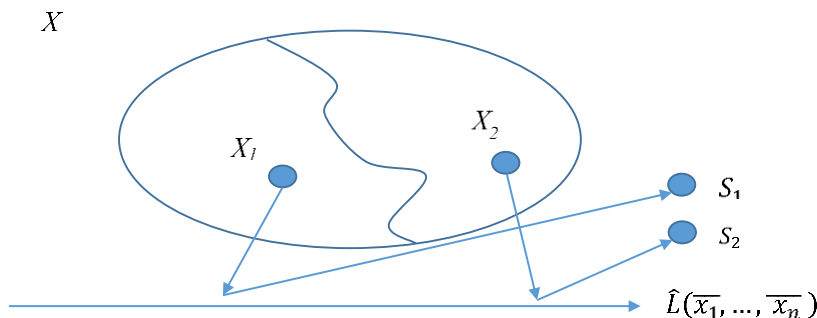
В статистичному методі розпізнавання (рис. 2) під час навчання формується еталонні опис-оцінки багатомірних умовних щільностей ймовірностей, які мають всю інформацію, присутню в спостереженнях $x_1^1, \dots, x_m^1, \dots, x_1^p, \dots, x_m^p$ та за всі взаємозв'язки між ознаками X_1, X_2, \dots, X_p . Оцінка $\hat{w}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m/S_i)$ є випадковою величиною. Для прийняття рішення використовується статистична теорія правдоподібності $\hat{L}(\bar{x}) =$

$\hat{L}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n) = \frac{\hat{w}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m/S_1)}{\hat{w}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m/S_2)}$, що являє собою невід'ємну випадкову величину, яка отримується функціональним перетворенням $Z = \hat{L}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$, яке відображає точки n -вимірному простору вибірок на дійсну половину. Таким чином, для винесення рішення достатньо використовувати значення однієї випадкової величини – статистики відношення правдоподібності $\hat{L}(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)$, а не значення кожного елемента вибірки (x_1, x_2, \dots, x_n) окремо, тобто відношення правдоподібності несе всю статистичну інформацію про класи, яка міститься в даній вибірці.



Мал. 2 – Загальна схема статистичного розпізнавання

Ця статистика має назву достатньої та призводить до редукції спостережуваних значень: відображення вибіркового n -вимірному простору X на дійсну позитивну напіввісь (мал. 3).



Мал. 3 – Редукція спостережуваних даних при використанні статистики відношення правдоподібності

Поверхня в n -вимірному вибірково просторі, роз'єднуюча простір X на підпростори X_1 та X_2 , відображається в точку C на вісі $L \geq 0$. Прийняття рішення на даному етапі складається в відображенні інтервалу

$0 < L < C$ в точку S_2 та інтервалу $L \geq 0$ в точку S_1 .

Відповідно алгоритм розрахунку зводиться до трьох етапів.

Перший етап: навчання.

За приведеними діагностичними показниками із навчальної вибірки вираховуються оцінки векторів середніх \hat{a}_1 та \hat{a}_2 за формулами:

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{m_1} \sum_{i=1}^{m_1} x_i^{(1)} \quad \hat{a}_2 = \frac{1}{m_2} \sum_{i=1}^{m_2} x_i^{(2)}$$

$$\hat{M}_1 = \frac{1}{m_1 - 1} \sum_{i=1}^{m_1} (\bar{x}_i^{(1)} - \hat{a}_1)(\bar{x}_i^{(1)} - \hat{a}_1)^T$$

$$\hat{M}_2 = \frac{1}{m_2 - 1} \sum_{i=1}^{m_2} (\bar{x}_i^{(2)} - \hat{a}_1)(\bar{x}_i^{(2)} - \hat{a}_1)^T$$

На другому етапі: прийняття рішення.

де m_1 та m_2 – кількість об'єктів в кожному класі,

$x_i^{(1)}$ та $x_i^{(2)}$ – значення визначальних параметрів кожного класу.

Далі йде вираховування коваріаційних матриць \hat{M}_1 та \hat{M}_2 та загальної коваріаційної матриці \hat{M} за формулами:

На цьому етапі вираховується оцінка логарифма відношення правдоподібності $\ln \hat{L}$ за формулою

$$\ln \hat{L} = \frac{n}{2} (\hat{a}_1 - \hat{a}_2)^T \hat{M}^{-1} \left[\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x}_i - (\hat{a}_1 + \hat{a}_2) \right] \langle \text{порівняння} \rangle 0$$

де n – кількість досліджуваних об'єктів, \bar{x}_i – параметри досліджуваних об'єктів.

На третьому етапі: оцінка достовірності діагностики.

На останньому етапі вираховуються помилки розпізнавання першого та другого роду α та β за формулою

$$\alpha = \beta = F\left(\frac{d}{\sigma_1}\right) F\left(-\frac{d}{\sigma_2}\right) + F\left(-\frac{d}{\sigma_1}\right) F\left(\frac{d}{\sigma_2}\right) + \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sigma_1 \sigma_2}{d(\sigma_1^2 - \sigma_2^2)} \right] \cdot \left[\sigma_2 \exp^{-\frac{d^2}{2\sigma_1^2}} \right] \cdot \left[F\left(\frac{d}{\sigma_2}\right) - F\left(-\frac{d}{\sigma_2}\right) \right] - \left(\sigma_1 \exp^{-\frac{d^2}{2\sigma_2^2}} \right) \cdot \left(F\left(\frac{d}{\sigma_1}\right) - F\left(-\frac{d}{\sigma_1}\right) \right)$$

де d – відстань Махаланобіса,

$$d^2 = (\hat{a}_1 - \hat{a}_2)^T \hat{M}^{-1} (\hat{a}_1 - \hat{a}_2)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad \sigma_2^2 = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} + \frac{4}{n}$$

$F(X)$ – інтеграл Лапласа.

Для дослідження обрано 9 гіпотетичних силових елементів. Сформована навчальна вибірка, яка надала змогу розділити силові елементи на два кластери, які отримали умовні назви “добрі” та “погані”. Кожен силовий елемент має свої певні класифікуючі (визначальні) параметри, за якими проаналізовано технічний стан силових елементів певних літаків. Це середнє квадратичне відхилення вертикального перевантаження під час посадки σ_{ny} та математичне очікування посадкової маси $M[m_{\text{пос}}]$.

Для використання методу розпізнавання технічного стану в якості програмного продукту вирішено застосувати мову програмування *Python*. Для реалізації графічної частини програми обрано бібліотеку графіки *PySimpleGUI*, для реалізації виконання логічних операцій використано потужності стандартних бібліотек *Python* (пакет *math*) та додавання бібліотеки наукових досліджень *numpy*.

Програма отримує на вхід навчальну вибірку в якості двох класів S_1 та S_2 із певними визначаючими ознаками $x_1^1, \dots, x_m^1, \dots, x_1^p, \dots, x_m^p$ для кожного об'єкта X в кожному класі. Також отримується досліджуваний об'єкт із певними ознаками. Після розрахунків програма повертає результат в лог вікна у вигляді рішення, в якому вказується належність

досліджуваного об'єкта до певного класу із вирахованою достовірністю.

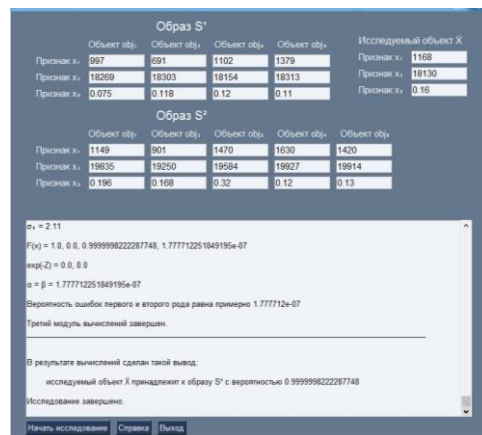
До класу S_1 увійшли чотири силові елемента із кластера “добрі”. До класу S_2 увійшли п'ять силових елементів із кластера “погані”. Також обрано досліджуваний силовий елемент. Визначальними параметрами обрано:

середньо-квадратичне відхилення вертикального перевантаження при посадці σ_{ny} , математичне очікування посадкової маси $M[m_{\text{пос}}]$ та кількість посадок з початку експлуатації $N_{3\text{ПЕ}}$ (табл. 1).

Таблиця 1 – Дані, що вводяться в розрахункову програму

Ознаки	S_1 “добрі”				S_2 “погані”					Досліджуваний силовий елемент \bar{X}
	$X_1^{(1)}$	$X_2^{(1)}$	$X_3^{(1)}$	$X_4^{(1)}$	$X_1^{(2)}$	$X_2^{(2)}$	$X_3^{(2)}$	$X_4^{(2)}$	$X_5^{(2)}$	
$N_{3\text{ПЕ}}$	997	691	1102	1379	1149	901	1470	1630	1420	1168
$M[m_{\text{пос}}]$	18269	18303	18154	18313	19835	19250	19584	19927	19914	18130
σ_{ny}	0,075	0,118	0,12	0,11	0,196	0,168	0,32	0,12	0,13	0,16

Загальний вид інтерфейсу користувача із введеними даними та отриманими розрахунками наведений на малюнку 4.



Мал. 4 – Робочий інтерфейс із введеними даними та отриманими розрахунками

Після виконання розрахунків логарифм правдоподібності має значення $\ln \hat{L} = 35,65$ та відповідно до вирішального правила $\ln \hat{L} = 35,65 > 0$ досліджуваний силовий елемент належить до класу S_1 “добрі”. Вірогідність достовірності належності досліджуваного силового елемента до певного класу або образу вирахований рівним 0,999.

Аналізуючи даний розподіл групою

експертів, сформованих із п'яти фахівців інституту – погодилась із розподілом та не вносила коректив.

Отриманий образ силового елемента в наступних дослідженнях з класифікації технічного стану входить в загальну базу образів “добрі” та “погані”, які вже становлять 10 силових елементів, що в свою чергу підвищує якість розпізнання в майбутніх дослідженнях.

Висновки

1. Із проаналізованих методів розпізнавання образів зроблено висновок, що статистичний

метод дозволяє вирахувати необхідну достовірність розпізнавання.

2. При застосуванні метода до гіпотетичних силових елементів визначено, що метод добре виконує свої функції та надає коректні результати.

3. Отже, опираючись на дослідження, варіанти рішення щодо досліджуваного силового елемента можуть бути такими: продовжувати призначений ресурс допускається в межах військової частини, при дотриманні чіткого контролю перспективними

засобами структуроскопії в критичних місцях та не допускати до експлуатації цих силових елементів пілотів 2-го класу та нижче; продовжувати призначений ресурс допускається в рамках виконання капітального ремонту при повній дефектації стояка, особливо в критичних місцях та допустити до експлуатації без обмежень за умови чіткого контролю перспективними засобами структуроскопії в критичних місцях.

Список використаних джерел

1. Военная доктрина Украины: за станом на 2 вересня 2015р. / Президент України. – К.: Презид. вид-во, 2015, 27 с.
2. Стрижиус В.Е. Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций. Москва: Машиностроение, 2012, 272 с.
3. Воробьев А.З., Олькин Б.И., Стебенев В.Н. и др. Сопротивление усталости элементов конструкций. Москва: Машиностроение, 1990, 240 с.
4. Труды ЦАГИ. 1981, Вып. 2117.
5. Брондз Л. Д. Технология обеспечения ресурса самолетов. Москва: Машиностроение, 1986, 184 с.
6. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность. Москва: Машиностроение, 1975, 488 с.
7. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Москва: Машиностроение, 1985, 224 с.
8. Фомин Я. А. Диагностика кризисного состояния предприятия: Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 2003, 349 с.
9. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов. Москва: Наука, 1979.
10. Акофф Р., Сасиени М. Основы исследования операций. Москва: Мир, 1971.
11. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. Москва: Советское радио, 1972, 208 с.
12. Фомин Я. А., Савич А. В. Оптимизация распознающих систем. Москва, Машиностроение, 1993

Оценка (классификация) силовых элементов по областям технического состояния используя статистический метод распознавания и метод экспертов

Максим Стрела *^A; Олег Добриденко^A; Георгий Горохов^A

*Corresponding author: ад'юнкт, e-mail: maxim.strela1991@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4055-1600

^A Государственный научно-исследовательский институт авиации, г. Киев, Украина

Аннотация

Согласно действующему курсу поддержания исправности авиации Вооруженных Сил Украины возникла проблема обеспечения исправности парка летательных аппаратов и выполнения точной классификации технического состояния силовых элементов различных типов самолетов для своевременного выявления их предельного состояния. Цель статьи состоит в обнародовании результатов исследования по системе классификации технического состояния – системы распознавания образов. В статье рассмотрена проблематика по выбору эффективного метода распознавания, главные требования к нему, проанализирован выбранный метод классификации технического

состояния (или распознавания образов технического состояния), который основан на статистическом методе распознавания. Выполнена реализация метода в графической оболочке (для применения на персональных электронно-вычислительных машинах) с помощью языка программирования *Python* и вспомогательных научных и графических библиотек. Выбраны эталонные объекты, определены основные определяющие параметры, характеризующие интенсивность исчерпывания ресурсного потенциала, которые были разделены на два образа технического состояния, а именно на “хорошие” и “плохие”, и контрольный исследуемый объект. В качестве примера, проанализировано техническое состояние силовых элементов самолетов-истребителей Вооруженных Сил Украины, которые имеют примерно одинаковые ресурсные наработки, и различные статистические данные по интенсивности использования в процессе эксплуатации. Проанализировано адекватность работы метода с помощью экспертов, даны рекомендации в виде управленческих решений по исследуемому объекту.

Ключевые слова: распознавание образов, классификация технического состояния, силовой элемент.

Evaluation (classification) of power elements by areas of technical condition using the statistical recognition method and the expert method

Maxim Strela *^A; Oleg Dobridenko^A, George Gorokhov^A

* Corresponding author: PhD student, e-mail: maxim.strela1991@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4055-1600

^A State Aviation Research Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract

In accordance with the current course of maintaining the serviceability of aircraft of the Armed Forces of Ukraine, the problem arose of ensuring the serviceability of the aircraft fleet and performing an accurate classification of the technical condition of the power elements of various types of aircraft for the timely detection of their ultimate state. The purpose of the article is to publish the results of a study on the classification system of the technical condition – pattern recognition system. The article discusses the problems of choosing an effective recognition method, the main requirements for it, analyzes the selected method for classifying a technical condition (or pattern recognition of a technical condition), which is based on a statistical recognition method. The method has been implemented in a graphical shell (for use on personal electronic computers) using the python programming language and auxiliary scientific and graphic libraries. Reference objects were selected, the main defining parameters were determined that characterize the intensity of exhaustion of the resource potential, which were divided into two images of the technical condition, namely, “good” and “bad”, and the control object under study. As an example, the technical condition of the power elements of fighter aircraft of the Armed Forces of Ukraine, which have approximately the same resource life, and various statistical data on the intensity of use during operation, is analyzed. The adequacy of the method’s work with the help of experts is analyzed, recommendations are given in the form of managerial decisions on the object under study.

Keywords: pattern recognition, classification of technical condition, power elements.

References

1. Voienna doktryna Ukrainy: za stanom na 2veresnia 2015r. / Prezydent Ukrainy. Kyiv: Prezyd. vyd-vo, 2015, 27 s. [in Ukraine]
2. Stryzhyus V.E. Metody rascheta ustalostnoi dolhovechnosty elementov avyakonstruktsyi. Moscow: Mashynostroenye, 2012, 272 s. [in Russian]
3. Vorobev A. Z., Olkyn B. Y., Stebenev V. N. y dr.

- Soprotivlenye ustalosty elementov konstruktsyi. Moscow: Mashynostroenye, 1990, 240 s. [in Russian]
4. Труды TsAHY. 1981, Выр. 2117. [in Russian]
 5. Bronz L. D. Tekhnolohiya obespecheniya resursa samoletov. Moscow: Mashynostroenye, 1986, 184 s. [in Russian]
 6. Serensen S. V., Kohaev V.P., Shneiderovnykh R.M. Nesushchaia sposobnost y raschety detalei mashyn na prochnost. Moscow: Mashynostroenye, 1975, 488 s. [in Russian]
 7. Kohaev V. P., Makhutov N.A., Husenkov A.P. Raschety detalei mashyn y konstruktsyi na prochnost y dolhovechnost. Moscow: Mashynostroenye, 1985, 224 s. [in Russian]
 8. Fomyn Ya.A. Dyagnostyka kryzysnoho sostoianiya predpriyatya: Moscow: YuNYTY-DANA, 2003, 349 s. [in Russian]
 9. Fukunaha K. Vvedenye v statystycheskuiu teoryiu raspoznavaniya obrazov. Moscow: Nauka, 1979. [in Russian]
 10. Akoff R., Sasyeny M. Osnovy yssledovaniya operatsyi. Moscow: Myr, 1971. [in Russian]
 11. Zahoruiko N.H. Metody raspoznavaniya y ykh prymerenye. Moscow: Sovetskoe radyo, 1972, 208 s. [in Russian]
 12. Fomin Ya. A., Savich AV Optimization of recognition systems. Moscow, Mechanical Engineering, 1993. [in Russian]