

УДК 629.735.017.1 (045)

О.А. Тамаргазін

ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ БАЙЕСІВСЬКОГО ПІДХОДУ

Розглянута можливість використання байесівського підходу до розв'язання проблем розпізнавання ранніх стадій погіршення надійності авіаційних двигунів на основі використання постійно модифікованої щільності розподілу основних показників їхньої надійності.

Підвищення рентабельності авіаперевезень, зокрема за рахунок підвищення інтенсивності використання авіаційної техніки, є основним завданням для авіакомпаній. Інтенсивність використання літаків, в свою чергу, значною мірою залежить від їхніх простоїв на технічному обслуговуванні (ТО). Планування робіт з виконання ТО безпосередньо залежить від можливості оцінки надійності літаків у цілому, їхніх систем та комплектуючих виробів у експлуатації. Особливо актуальним це є для авіаційних двигунів як найбільш відповідальних і енергонасичених підсистем літаків, що значною мірою впливають на безпеку польотів.

Оцінка надійності газотурбінних двигунів (ГТД) в експлуатації значно ускладнюється внаслідок відсутності достатньої інформації про умови їхнього використання. Ці труднощі зростають при експлуатації двигунів за технічним станом, оскільки вони використовуються у статистично неоднорідних умовах. Ситуація ще більше ускладнюється із введенням в експлуатацію модифікацій ГТД, проведенням локальних ремонтів, регулювань, виконанням до робок.

Аналіз експлуатації двигунів, таких, як НК-8-2У, Д-30КП, Д-30КУ, Д-30КУ-154, ПС-90А, показав, що існує значний розкид показників надійності цих двигунів, який спричинений впливом ряду конструктивних змін цих двигунів упродовж їхнього життєвого циклу та експлуатацією літаків, на яких встановлено ці двигуни, у різноманітних кліматичних умовах.

Однією з причин виникнення цієї ситуації є недостатня інформаційна підтримка, внаслідок чого при експлуатації спостерігаються:

- недостатня ефективність рішень, що приймаються з метою запобігання відмовам двигунів у польоті та зменшення витрат на їхнє ТО;
- запізнення оцінки ефективності конструктивно-технологічних заходів;
- невисока швидкість проходження інформаційних потоків.

З метою усунення цих недоліків потрібно:

- безперервно відслідковувати динаміку зміни показників надійності;
- здійснювати виявлення ранніх стадій погіршення надійності;
- прогнозувати рівень надійності з урахуванням різноманітної інформації.

Для вирішення цих питань в першу чергу потрібно мати досить гнучкі математичні моделі процесу зміни технічного стану авіаційних двигунів, здатних постійно враховувати експлуатаційну інформацію при прогнозуванні рівня надійності в залежності від стратегії їхнього ТО.

Зараз в цивільній авіації засоби контролю рівня надійності двигунів традиційно базуються на статистичній інтерпретації імовірності, як це прийнято для об'єктів масового виробництва, працюючих в однорідних умовах. Це знайшло відображення у використанні коефіцієнтів надійності [1]; [2], які виражаються або через відповідні значення інтенсивності від-

мов λ , або через сумарне напрацювання на відмову T . Проте практика показала, що застосування відомих моделей для короткострокового прогнозування малоефективне. Це зумовлено тим, що на окремих часових інтервалах домінуючий вплив виявляють тільки деякі види відмов, які значно змінюють локальні значення показників T і λ .

Для оцінки надійності ГТД в специфічних умовах експлуатації доцільно застосовувати підходи, що базуються на використанні поточної інформації із вибірок невеликого обсягу, дозволяють враховувати індивідуальні особливості окремих двигунів, а також характер їхнього навантаження. Значний інтерес у цьому плані викликає байєсівський підхід, який дозволяє об'єднувати об'єктивну та суб'єктивну інформацію. Це призводить до адитивного зростання кількості інформації про параметри, що оцінюються, та дозволяє замість точкових оцінок одержати вирази для їхньої щільності розподілу.

Щільність розподілу інтенсивності відмов, модифікована згідно з байєсівським підходом, може бути представлена у вигляді [3]:

$$H(\lambda|r) = \frac{f(\lambda)P(\lambda|r)}{\hat{n}(r)} \quad (1)$$

Прийнявши пуассонівський характер розподілу відмов, поточну інформацію про надійність аналізованого двигуна у вигляді r відмов за ΔT_{Σ} годин експлуатації можна представити як

$$P(r|\lambda) = \frac{(\lambda \Delta T_{\Sigma})^r}{r!} e^{-\lambda \Delta T_{\Sigma}} \quad (2)$$

Як апіорну щільність розподілу, що оцінює параметр λ , доцільно обрати гамма-розподіл, який найбільшою мірою відповідає фізичній суті завдання та водночас є розподілом, "спряженим" із експоненціальним.

$$f(\lambda) = \frac{\rho^{\delta} \lambda^{\delta-1} e^{-\rho \lambda}}{\Gamma(\delta)}, \quad (3)$$

де ρ , δ – параметри апіорного гамма-розподілу; $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функція.

Вибір гамма-розподілу можна обґрунтувати і теоретично, якщо припустити, що час напрацювання до відмови є експоненціальним розподілом. Відповідно до засобів, запропонованих у роботі [4], щільність розподілу параметра λ можна представити у вигляді

$$f(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{k\lambda},$$

де $L(\lambda)$ – нормована функція правдоподібності; k – нормуючий коефіцієнт.

Нормуючий коефіцієнт k визначається за загальною формулою

$$k = \int_0^{\infty} L(\lambda, T_1, \dots, T_r) \frac{d\lambda}{\lambda}, \quad 0 < \lambda < \infty.$$

Функцію правдоподібності можна показати через напрацювання на відмову T_i :

$$L(\lambda, T_1, \dots, T_r) = \prod_{i=1}^r f(T_i) = \lambda^r e^{-\lambda \sum_{i=1}^r T_i}.$$

Значення нормуючого коефіцієнта k знаходять за формулою

$$k = \int_0^{\infty} \lambda^{r-1} e^{-\lambda \sum_{i=1}^r T_i} d\lambda = \frac{\Gamma(r)}{\left(\sum_{i=1}^r T_i\right)^r}.$$

Тоді апіорну щільність розподілу параметра λ обчислюють як

$$f(\lambda) = \frac{\left(\sum_{i=1}^r T_i\right)^r}{\Gamma(r)} \lambda^{r-1} e^{-\lambda \sum_{i=1}^r T_i}$$

Отже, апіорний розподіл інтенсивності відмов є гамма-розподілом із параметром форми $r = \delta$ та параметром масштабу $\sum_{i=1}^r T_i = \rho$.

Використання об'єктивних даних для апіорного розподілу в байесівському підході ґрунтується на тому, що в міру, як зростає число спостережень, апостеріорний (модифікований) розподіл прагне до межі, незалежної від апіорного розподілу.

Оскільки чисельник правої частини формули (1) є щільністю сумісного розподілу випадкових величин λ, r , то відповідно до формул (2) та (3) будемо мати [3]:

$$h(\lambda, r) = \frac{\rho^\delta \Delta T_\Sigma^r}{\Gamma(\delta) \Gamma(r+1)} \lambda^{\delta+r-1} e^{-\lambda(\rho+\Delta T_\Sigma)}$$

Прийнявши в розрахунок щільність безумовного розподілу

$$h(r) = \frac{\rho^\delta \Delta T_\Sigma^r}{\Gamma(\delta) \Gamma(r+1)} \int_0^\infty \lambda^{\delta+r-1} e^{-\lambda(\rho+\Delta T_\Sigma)} d\lambda,$$

після ряду перетворень можна одержати модифіковану щільність розподілу для інтенсивності відмов, що оцінюється:

$$H(\lambda | r) = \frac{(\rho - \Delta T_\Sigma)^{\delta+r}}{\Gamma(\delta+r)} \lambda^{\delta+r-1} e^{-\lambda(\rho+\Delta T_\Sigma)},$$

яка є фізичною мірою, що характеризує певність щодо дійсної інтенсивності відмов.

Модифікований розподіл є гамма-розподілом із параметрами $(\rho+\Delta T_\Sigma)$ та $(\delta+\rho)$ і математичним сподіванням

$$\hat{\lambda} = \frac{\delta+r}{\rho+\Delta T_\Sigma}$$

Для оцінки прогнозованого числа відмов r парку двигунів, який досліджується за період t_k , необхідно всі відмови, що виявилися при експлуатації, розподілити на характерні за конструктивним признаком та побудувати їхні окремі моделі, аргументом яких було б сумарне напрацювання парку двигунів з початку експлуатації T_Σ (рис. 1 і 2). У такому разі оцінка інтенсивності відмов буде мати вигляд точкової оцінки математичного сподівання від апіорної щільності розподілу, яка модифікується на основі інформації, джерелом якої є окремі моделі:

$$\lambda = \frac{\delta + r_{\text{од}} + \sum_{i=1}^m \frac{(1-\alpha)r_i}{\eta}}{\rho + \Delta T_\Sigma},$$

де $r_{\text{од}}$ – розрахункова оцінка числа відмов одиничного прояву; m – число груп відмов систематичного прояву; α – процент доробок парку двигунів; r_i – розрахункова оцінка числа відмов систематичного прояву; η – ефективність доробок парку двигунів; ΔT_Σ – сумарне напрацювання парку двигунів за рік.

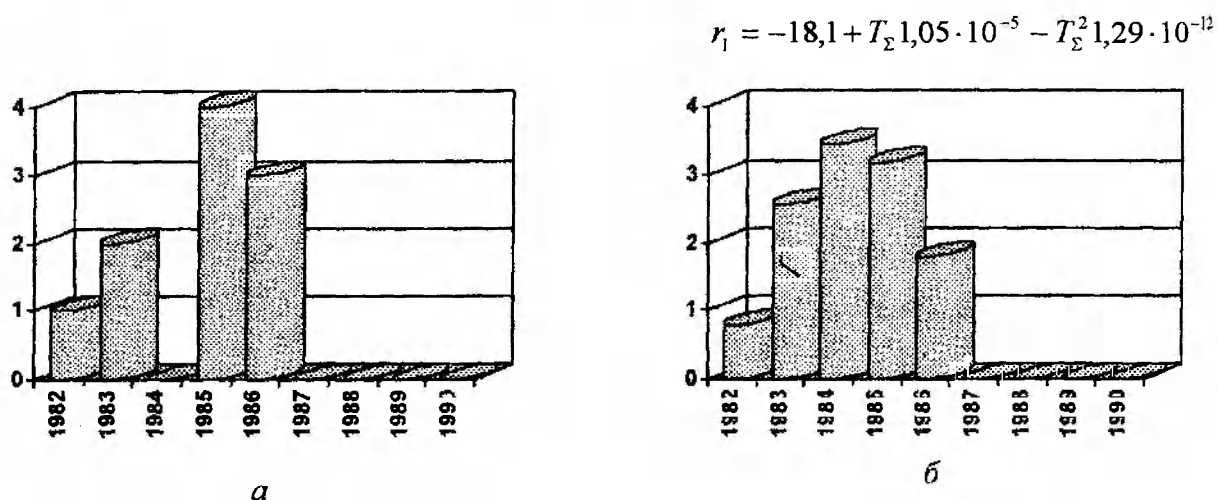


Рис. 1. Тріщина на болтах кріплення лабіринту до диску XI ступеня компресора високого тиску:
a – експлуатаційні дані; *б* – розраховані дані

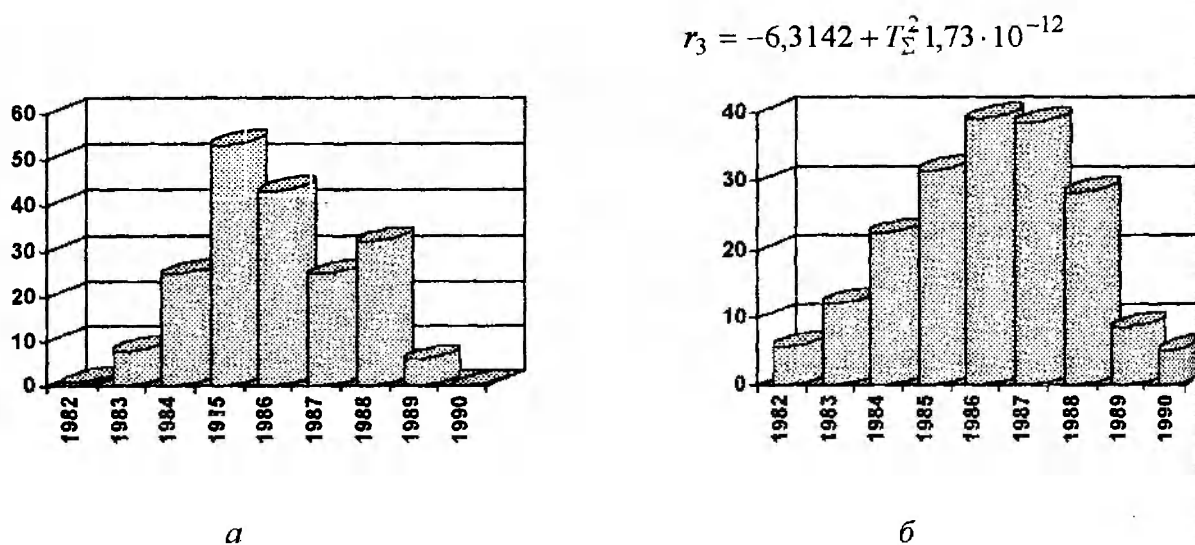


Рис. 2. Тріщина на лопатках соплового апарату I, II, III ступенів компресора низького тиску:
a – експлуатаційні дані; *б* – розраховані дані

Для побудови окремих моделей відмов $r_i(t_k)$ та сумарного напрацювання парку двигунів за рік $\Delta T_{\Sigma}(t_k)$ можна використовувати парний регресивний аналіз $y = a + b \cdot x$ [5], а також сплайн-апроксимацію. Для нелінійних моделей $r_i(t_k)$ або $\Delta T_{\Sigma}(t_k)$ регресія будується на базі лінеаризуючих перетворень, які приводять нелінійну залежність до лінійної.

При аналізі ефективності розглянутого підходу була використана інформація про достроково зняті двигуни Д-30КУ за 1982–1990 роки, оскільки саме для даного періоду є найбільш повна та достовірна інформація про надійність авіаційної техніки.

На рис. 3 та в таблиці приведені співвідношення щільностей розподілу інтенсивностей відмов за 1990 рік:

$$\Delta T_{\Sigma} = -2622656 + 121686 \cdot \lg(t_k).$$

Можливість уточнення оцінок надійності в міру, як надходить інформація, а також слабкий вплив апріорного розподілу є основними позитивними рисами байесівського підхо-

ду. Це важливо для підтвердження ефективності конструкторсько-технологічних заходів, а також для забезпечення безпеки польотів.

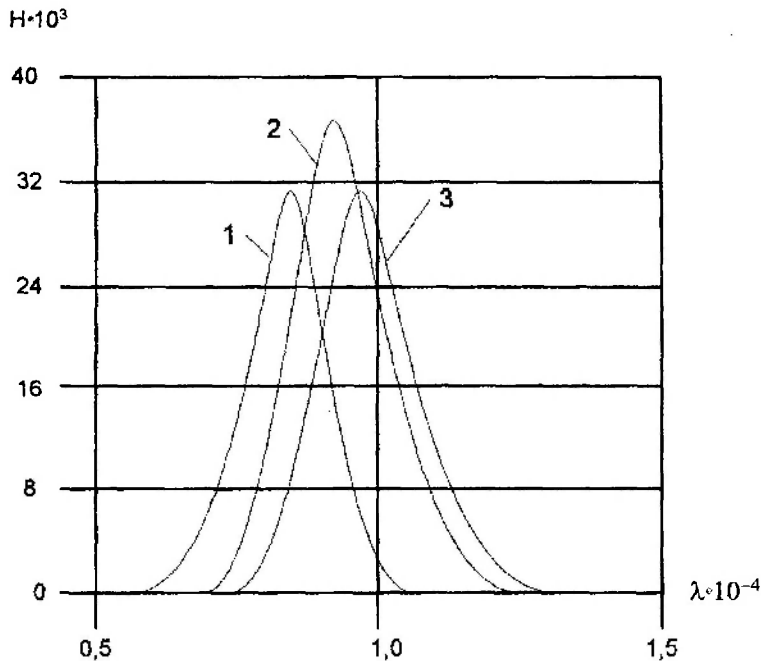


Рис. 3. Щільності розподілу: 1 - апіорна; 2 - модифікована; 3 - експериментальна

Доцільність байесівського підходу виявляється і в умовах суттєвої обмеженості інформації. Так, надійність нового чи серійного двигуна, але в нових умовах використання, можна оцінити тільки після закінчення чималого терміну після початку його експлуатації (при досягненні сумарного напрацювання не менш як 100 тис. год від початку експлуатації). Якщо в авіакомпанії п'ять літаків Іл-76, середньорічний наліт яких становить 2000 год, то для двигуна Д-30КП надійність може бути одержана практично лише через три роки після початку експлуатації. Використання у вигляді апіорної інформації даних відносно двигунів вилучає цю трудність.

Параметри гамма- розподілу	Крива		
	1	2	3
δ	64	173	106
ρ	606852	1286692	732285
$\bar{\lambda}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$
λ_m	$1,04 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$1,43 \cdot 10^{-4}$
T	9482	7438	6908
T_m	9633	7481	6974

Отже, для оцінки інтенсивності відмов авіаційних двигунів в умовах обмеженої інформації доцільно використовувати байесівський підхід, оскільки він дозволяє об'єднати апіорну і поточну експлуатаційну інформацію.

В умовах повної інформації байєсівські оцінки добре узгоджуються з оцінками класичних підходів. Інша важлива позитивна риса цього методу – це те, що результатом його є не точкові оцінки інтенсивності відмов, а щільність розподілу.

Список літератури

1. *Комаров А.А.* Надежность воздушных судов: Учеб. пособие. – К.: КМУГА, 1995. – 416 с.
2. *Капур К., Ламберсон Л.* Надежность и проектирование систем. – М.: Мир, 1980. – 605 с.
3. *Смирнов Н.Н, Ицкович А.А.* Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
4. *Венцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1988. – 480 с.
5. *Драйвер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ: В 2 кн. – М.: Финансы и статистика, 1986–1987. – Кн.1. – 366 с.; Кн. 2. – 351 с.

Стаття надійшла до редакції 23 січня 1998 року.

Олександр Анатолійович Тамаргазін (1963) закінчив Київський інститут інженерів цивільної авіації в 1990 році. Кандидат технічних наук, науковий співробітник науково-дослідної лабораторії № 2 Київського міжнародного університету цивільної авіації. Спеціалізується в галузі управління технічною експлуатацією авіаційної техніки. Має 8 наукових публікацій.

Alexander A. Tamargazin (b.1963) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation Engineers (1990). PhD (Eng) scientific researcher of the 2^d research laboratory of Kyiv International University of Civil Aviation. Specializes in the field of aircraft operation control. Author of 8 publications.