

УДК 656.7.08.001.57 (04731)

А.В. Гончаренко

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ПРОФІЛАКТИЧНИХ ЗАМІН НА ПОКАЗНИКИ БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ

Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail: andygoncharenko@yahoo.com

*Розглянуто спрощену модель зв'язку між частотою потоку катастрофічних подій, періодичністю профілактичних замінів і глибиною діагностування авіаційного обладнання. Отримано частинні формули розрахунку впливу параметрів замінів і діагностики на частоту потоку катастрофічних подій та критерій техніко-економічного чинника керування рівнями безпеки польотів.*

### Вступ

Забезпечення безпеки польотів (БП) може бути представлено як діяльність, спрямовану на утримання сумарної частоти потоку випадкових подій  $\lambda$  у заданих межах [1; 2].

Технічна складова частоти  $\lambda$  залежить від ефективності діагностування та профілактичних замінів (ПЗ) авіаційної техніки (АТ), які проводяться під час технічного обслуговування і ремонту (ТОіР).

У даній роботі здійснено спробу формалізувати вплив чинників ПЗ і діагностування (ПЗіД) на характеристику частоти  $\lambda$ . Розв'язки рівнянь, складених за спрощуючих припущень дозволяють оцінити ефективність ПЗіД.

Опрацювання критеріїв БП з урахуванням функціональних залежностей  $\lambda$  дають можливість відшукати оптимальні значення керуючого впливу на рівні БП.

Вирішується задача зв'язку між фінансуванням ПЗіД АТ і БП як складовою функціонування авіаційної транспортної системи (АТС).

### Аналіз досліджень і публікацій

Ідеологію підтримання рівнів БП визначено в працях [1; 2].

У праці [3] оптимальні періодичності та тривалості, вартості проведення ПЗ і ремонту розраховано за критеріями коефіцієнта технічного використання (КТВ) та питомих експлуатаційних витрат (ПЕВ) із застосуванням допоміжних функцій Лагранжа.

Оптимальні значення показників знайдені як розв'язки прямих і зворотних задач із залученням невизначених множників Лагранжа при складанні функціоналів, цільовими функціями в яких виступали КТВ та ПЕВ.

У працях [4–7] для розрахунку частоти  $\lambda$  було застосовано модельне співвідношення

$$\lambda(V_s) = \lambda_{\min} + \frac{\lambda_0 - \lambda_{\min}}{1 + \alpha V_s}, \quad (1)$$

де  $\lambda(V_s)$  – сумарна частота потоку несприятливих випадкових подій  $\lambda$  як функція від величини цілеспрямованих відрахувань безпосередньо на підтримання рівня БП;  $\lambda_{\min}$  – мінімально досяжна за даного рівня розвитку техніки частота подій, яка не може бути зменшеною подальшим нарощуванням витрат;  $\lambda_0$  – інтенсивність подій без проведення цілеспрямованих заходів з підтримки БП (витрати, пов'язані з проведенням регламентних робіт із забезпечення експлуатації, не входять у  $V_s$  і тому  $\lambda_0 \neq \infty$ );  $\alpha$  – ефективність використання витрат на підтримку БП.

Невирішеним в працях [1–7] залишається питання впливу керування процесами ПЗ і Д на рівні БП.

Ця стаття присвячена спробі спрощено оцінити зв'язок між  $V_s$  та  $\lambda$  у вигляді техніко-економічного чинника керування рівнем БП.

### Постановка завдання

Припустимо, що технічна складова потоку  $\lambda$ , відповідного до виразу (1), має подібний характер залежності. У даному розгляді  $\lambda$ ,  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_0$  характеризують значення технічної складової.

Інтенсивність керування процесом ТОіР  $V_s$  виражена в умовних грошових одиницях.

Величина  $V_s$  показує швидкість відрахування коштів на проведення таких робіт.

Процедура ТОіР відповідно до вимог технологічного процесу передбачає проведення ПЗіД АТ, тому доцільно розглянути  $V_s$  як суму

$$V_s = V_z + V_d, \quad (2)$$

де  $V_z$ ,  $V_d$  – швидкості відрахування коштів на проведення ПЗіД відповідно.

Використовуючи модельні співвідношення для залежностей частот  $\lambda(V_z)$ ,  $\lambda(V_d)$  від складових швидкостей  $V_z$ ,  $V_d$  формули (2), знайдемо залежність  $\lambda(V_z, V_d)$  і отримаємо вираз для критерію техніко-економічного чинника керування рівнем БП, враховуючи ПЗіД в АТС.

**Моделі залежності  $\lambda(V_z)$** 

Розглянемо дві моделі  $\lambda(V_z)$ .

Перша модель  $\lambda_1(V_z)$  базується на припущенні, що інтенсивність відмов  $\lambda$  за час між замінами  $\tau$  змінюється лінійно від значення  $\lambda_1 = \lambda_{\min}$  до максимально допустимого вимогами значення  $\lambda$ , що передбачає проведення заміни АТ. Це означає, що

$$\lambda(t) = \lambda_1 + kt, \quad (3)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності;  $t$  – час.

Припустимо, що сума коштів, необхідних для проведення цих робіт, формується подібним чином

$$S(t) = S_1 + n_1 t,$$

де  $S_1$  – сума коштів, що не задіяна в заміні;  $n_1$  – коефіцієнт пропорційності:

$$n_1 = \frac{S(\tau) - S_1}{\tau}, \quad (4)$$

$S(\tau) - S_1$  – сума коштів, необхідна для проведення заміни.

За своєю природою коефіцієнти  $k$  та  $n_1$  у формулах (3), (4) – це похідні  $\lambda'(t)$  та  $S'(t)$  відповідно. Нехай  $n_1 = S'(t) = V(t) = V = \text{const}$  – швидкість відрахування коштів на проведення заміни в АТС.

Припустимо, що випадкова величина – кількість подій за час  $\tau$  – підпорядкована закону Пуассона.

При змінному в часі потоці подій (3) визначимо величину  $\bar{\lambda}$ , відповідну середньому значенню  $\lambda(t)$ , за умови однакової ймовірності відсутності відмови в інтервалі часу  $[0, \tau]$ .

Після інтегрування, дорівнювання ймовірностей відсутності подій при постійному  $\bar{\lambda}$  та змінному в часі  $\lambda(t)$  і розв'язання отриманого рівняння відносно  $\bar{\lambda}$  одержимо вираз

$$\bar{\lambda} = \lambda_1 + \frac{k}{2} \tau. \quad (5)$$

Підставляючи у формулу (5) замість  $\tau$  його вираз через  $V$  за допомогою  $n_1$  з рівняння (4) і враховуючи  $V = V_z$ , отримуємо залежність

$$\lambda_1(V_z) = \lambda_1 + \frac{k}{2} \frac{S - S_1}{V_z}. \quad (6)$$

Формула (6) є окремим випадком загальних моделей залежності  $\lambda(V_s)$  у працях [4–7], зокрема формули (1).

У даному випадку

$$V = V_{z1} + V_z,$$

де  $V_{z1}$  – одинична швидкість вкладення коштів в заміни АТ, тоді

$$\lambda_1(V_z) = \lambda_1 + \frac{k}{2} \frac{S - S_1}{V_{z1} + \alpha_1 V_z}, \quad (7)$$

де  $\alpha_1$  – ефективність використання витрат на ПЗ.

Друга модель  $\lambda_2(V_z)$  передбачає, що в межах інтервалу часу між замінами  $[0, \tau_2]$  існує проміжок часу  $[0, \tau_1]$ , в якому  $\lambda(t) = \lambda_1$ , а в інтервалі  $[\tau_1, \tau_2]$  –  $\lambda(t) = \lambda_1 + kt$ .

Виходячи з аналогічних міркувань і виконавши подібні перетворення, як до  $\lambda_1(V_z)$ , одержимо

$$\lambda_2(V_z) = \lambda_1 + \frac{k}{2} (1 - \mu^2) \frac{S - S_1}{V_z}, \quad (8)$$

де  $\mu$  – фізична константа для даного повітряного корабля (ПК):  $\mu = \tau_1 / \tau_2$ .

**Модель залежності  $\lambda(V_d)$** 

Припустимо, що моделлю, яка описує залежність  $\lambda$  від інтенсивності діагностування (керуючої дії вигляду –  $V_d$ ), є співвідношення

$$\lambda(V_d) = \Delta \lambda (1 - P(V_d)), \quad (9)$$

де  $\Delta \lambda$  – збільшення частоти відмов у разі невиявлення прихованих дефектів;  $P(V_d)$  – імовірність їхнього виявлення як функція від глибини діагностування, що залежить від швидкості вкладення коштів.

Моделльне співвідношення, що задає  $P(V_d)$ , передбачає зниження ймовірності невиявлення прихованих дефектів у діапазоні  $[P(V_d)_{\min} - P(V_d)_{\max}]$  на однаковий відсоток від вихідного рівня варійованої частини  $P(V_d)$ :  $\Delta P(V_d) = P(V_d)_{\max} - P(V_d)$  при збільшенні глибини діагностування на однакову величину. По суті  $P(V_d)$  є розв'язанням диференціального рівняння

$$\frac{d\Delta P(V_d)}{dV_d} = -k_p \Delta P(V_d),$$

за початкових умов:

$$\Delta P(V_d)|_0 = P(V_d)_{\max} - P(V_d)_{\min},$$

$$P(V_d)|_0 = P(V_d)_{\min},$$

де  $k_p$  – коефіцієнт пропорційності швидкості зміни  $\Delta P(V_d)$  при зміні  $V_d$ :

$$k_p = -\frac{1}{V_0} \ln \left( 1 - \frac{\xi}{100} \right),$$

$V_0$  – збільшення глибини діагностування;  $\xi$  – відповідний відсоток зменшення варійованої частини ймовірності невиявлення прихованих дефектів від її початкової величини.

Тоді

$$P(V_d) = P_1 - (P_1 - P_0) e^{-k_p V_d}; \quad (10)$$

$$\lambda(V_d) = \Delta \lambda \left\{ 1 - \left[ P_1 - (P_1 - P_0) e^{-k_p V_d} \right] \right\}, \quad (11)$$

де  $P_1 = P(V_d)_{\max}$ ,  $P_0 = P(V_d)_{\min}$ .

### Моделі залежностей $\lambda(V_z, V_d)$

Остаточно для  $\lambda_1(V_z)$  з урахуванням рівнянь (6), (11)

$$\lambda(V_z, V_d) = \lambda_1 + \frac{k}{2} \frac{S - S_1}{V_z} + \Delta\lambda \left\{ 1 - \left[ P_1 - (P_1 - P_0) e^{-\left[ \frac{1}{V_0} \ln \left( 1 - \frac{\xi}{100} \right) \right] V_d} \right] \right\}. \quad (12)$$

Для  $\lambda_2(V_s)$  з урахуванням рівнянь (8), (11)

$$\lambda_2(V_z, V_d) = \lambda_1 + \frac{k}{2} (1 - \mu^2) \frac{S - S_1}{V_z} + \Delta\lambda \left\{ 1 - \left[ P_1 - (P_1 - P_0) e^{-\left[ \frac{1}{V_0} \ln \left( 1 - \frac{\xi}{100} \right) \right] V_d} \right] \right\}. \quad (13)$$

### Вплив $\lambda(V_z, V_d)$ на показники керування рівнями безпеки польотів

Показниками рівнів БП є різні критерії, зокрема, статистичні, застосовувані ІСАО, відображені в працях [1; 2].

Технічним і економічним критеріям надійності (КТВ, ПЕВ, коефіцієнт готовності) присвячена праця [3].

Розглянемо економічний критерій керування рівнем БП – математичне сподівання (МС) витрат АТС за розрахунковий період часу  $[0, t_k]$ , який визначається замовником.

Згідно з працями [5–7] маємо в розрахунку на один ПК математичне сподівання, як функцію від  $V_s$ :

$$E(R) = \left( \frac{C + V_s}{\lambda_1 + \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{1 + \alpha V_s}} + \Delta r \right) \left( 1 - e^{-\left( \lambda_1 + \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{1 + \alpha V_s} \right) t_k} \right), \quad (14)$$

де  $C$  – постійна величина, що являє собою суму швидкостей витрат, які спрямовуються на сплату податків і експлуатаційних витрат;  $\Delta r$  – разові втрати АТС унаслідок катастрофи.

Базуючись на виразах (2), (12), (13), отримаємо

$$E(R) = f(V_z, V_d),$$

тоді

$$E(R) = \left( \frac{C + V_s(V_z, V_d)}{\lambda(V_z, V_d)} + \Delta r \right) \left( 1 - e^{-\lambda(V_z, V_d) t_k} \right). \quad (15)$$

У випадку, коли в АТС експлуатується  $n$  ПК, формула (14) набуває вигляду:

$$E(R) = n \left\{ V_r(V_s) \left[ X(V_s) Y^{n-1}(V_s) + t_k e^{-n\lambda(V_s) t_k} \right] + \Delta r Y^n(V_s) \right\}, \quad (16)$$

де  $V_r(V_s)$  – швидкість витрат коштів як функція від  $V_s$ :

$$V_r(V_s) = V_t + V_e + V_s,$$

$V_t, V_e$  – відповідно швидкості відрахувань на сплату податків, експлуатаційні витрати;  $X(V_s);$

$Y(V_s)$  – відповідні функції:

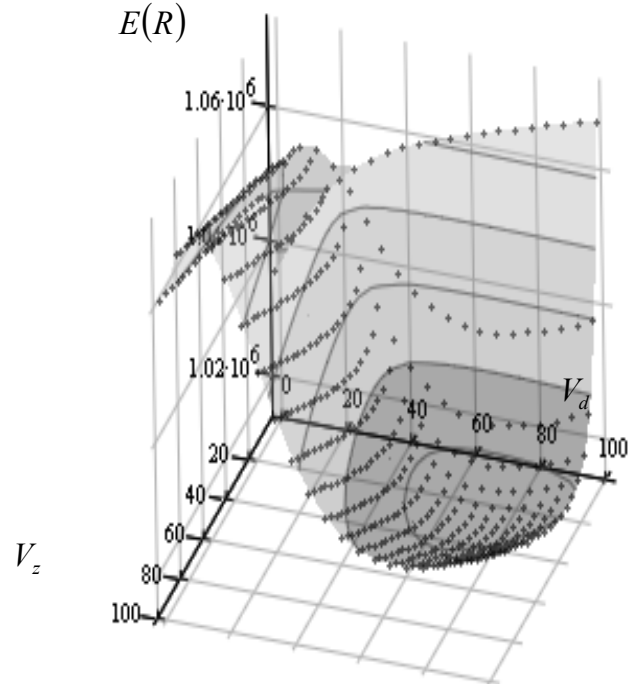
$$X(V_s) = \frac{1}{\lambda(V_s)} - t_k e^{-\lambda(V_s) t_k} - \frac{1}{\lambda(V_s)} e^{-\lambda(V_s) t_k};$$

$$Y(V_s) = 1 - e^{-\lambda(V_s) t_k}.$$

Розрахунки за умовними числовими значеннями величин, що входять у формули (2)–(16):

$V_z = 1 \dots 10^2$ ;  $V_d = 0 \dots 10^2$ ;  $\tau_1 = 7 \cdot 10^2$ ;  $\tau_2 = 9 \cdot 10^2$ ;  $\lambda_0 = 1 \cdot 10^2$ ;  $\lambda_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ ;  $S = 1 \cdot 10^3$ ;  $S_1 = 1 \cdot 10^2$ ;  $k = 1 \cdot 10^{-5}$ ;  $k_p = 6 \cdot 10^{-2}$ ;  $P_0 = 2 \cdot 10^{-1}$ ;  $P_1 = 8 \cdot 10^{-1}$ ;  $t_k = 6 \cdot 10^2$ ;  $\Delta\lambda = 1 \cdot 10^{-2}$ ;  $C = 5 \cdot 10^2$ ;  $\Delta r = 1 \cdot 10^6$ ;  $n = 1$ , дають результати, які показані на рисунку.

### $E(R)$



Математичне сподівання витрат  $E(R)$  за період  $t_k$  залежно від  $V_z$  та  $V_d$

Графік побудовано за формулою (15) для випадку моделі (12).

Функція  $E(R)$  має екстремум.

Оптимальні значення величин  $V_z$  та  $V_d$  знаходяться в області 20–40 одиниць для  $V_z$  та 60–80 одиниць для  $V_d$  відповідно.

Абсолютні значення математичного сподівання витрат, які помітно більші від оптимальних,

свідчать про те, що можуть скластися умови в практиці проведення технічного обслуговування, коли відсутність або недостатня глибина діагностування чи неоптимальність ПЗ можуть призвести лише до невиправданих витрат.

Проведені для моделі (15) розрахунки з урахуванням залежності типу  $\lambda_2(V_z, V_d)$ , отриманої за допомогою формули (13), дають аналогічний результат.

Оптимальні значення величин  $V_z$  та  $V_d$  знаходяться в області 15–25 одиниць для  $V_z$  та 65–85 одиниць для  $V_d$  відповідно.

Абсолютні оптимальні значення математичного сподівання витрат помітно нижчі, аніж для моделі залежності  $\lambda_1(V_z, V_d)$ .

### Висновки

У роботі отримано модель критерію техніко-економічного чинника керування рівнем БП, за допомогою якого можна досліджувати вплив інтенсивності керування процесом ТО на показники діяльності АТС, коли в експлуатації знаходяться  $n$  ПК.

За оптимальними значеннями  $V_z$  при заданих  $S(\tau) - S_I$  є можливість отримувати оптимальні значення періодичностей ПЗ, які доцільно в подальшому порівняти зі значеннями, одержаними за працею [3].

Залежності  $\lambda(V_z, V_d)$  потребують підтвердження шляхом обробки статистичного матеріалу.

Запропонований підхід урахує чинники, що впливають на критерій керування рівнем БП, але поза увагою залишаються питання впливу попиту та переваг пасажирів, які користуються транс-

портними послугами АТС. Розгляд таких питань започатковано в праці [4], їхнє вирішення потребує подальшого дослідження.

### Список літератури

1. Новожилів Г.В., Неймарк М.С., Цесарський Л.Г. Безопасность полета самолета. Концепция и технология. – М.: Машиностроение, 2003. – 144 с.
2. Жулев В.И., Иванов В.С. Безопасность полетов летательных аппаратов: Теория и анализ. – М.: Транспорт, 1986. – 224 с.
3. Игнатов В.А., Маньшин Г.Г., Костановский В.В. Элементы теории оптимального обслуживания технических изделий. – Минск: Наука и техника, 1974. – 192 с.
4. Касьянов В.А., Гончаренко А.В. Субъективный анализ и безопасность активных систем // Кибернетика и вычислительная техника. – 2004. – Вып. 142. – С. 41–56.
5. Kasyanov V., Goncharenko A. Modeling of technical and economical aspects of flight safety // The World Congress “Aviation in the XXI Century” press-release. – К. (Ukraine): NAU, 2003. – P. 2.63–2.66.
6. Касьянов В.О., Гончаренко А.В. Визначення оптимальної швидкості витрат ресурсів, які спрямовуються безпосередньо на підтримку безпеки польотів // Виробництво та експлуатація авіаційної техніки: Матеріали V міжнар. наук.-техн. конф. “Авіа-2003”. – К.: НАУ, 2003. – Т.3. – С. 31.7–31.11.
7. Касьянов В.А., Гончаренко А.В. Оценка характеристик функционирования системы в условиях, допускающих возникновение техногенных катастроф // Сучасні авіаційні технології: Матеріали IV міжнар. наук.-техн. конф. “Авіа-2002”. –К.: НАУ, 2002. –Т. 3. – С. 31.23–31.26.

Стаття надійшла до редакції 24.06.04.

А.В. Гончаренко

Моделирование влияния профилактических замен на показатели безопасности полетов

Рассмотрена упрощенная модель связи между частотой потока катастрофических событий, периодичностью профилактических замен и глубиной диагностирования авиационного оборудования. Получены частные формулы расчета влияния параметров замен и диагностики на частоту потока катастрофических событий и критерий технико-экономического фактора управления уровнями безопасности полетов.

A.V. Goncharenko

Modeling of preventive maintenance changes influence upon flight safety indexes

It is considered a simplified model of connection between the catastrophic events flow frequency and both preventive maintenance changes periodicity and diagnosis depth of aviation equipment. It is deduced specific formulas for computing the changes and diagnostics parameters influence upon the values of both the catastrophic events flow frequency and technical-economical control factor criterion of flight safety levels.