

УДК 629.735.083 (045)

ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВІАЦІЙНОЇ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ

О. П. Ліннік, канд. фіз.-мат. наук; Е. Р. Кравченко

Національний авіаційний університет
avia_icao@mail.ru

Досліджено сучасні методи визначення ефективності систем технічного обслуговування авіаційної наземної техніки та обгрунтовано підхід до розробки методології формування програм технічної експлуатації авіаційної наземної техніки з урахуванням особливостей задач, які стоять перед авіаційною транспортною системою: забезпечення заданого рівня безпеки та регулярності польотів.

Ключові слова: надійність, технічне обслуговування, авіаційна наземна техніка.

Modern methods of efficiency definition of aviation land engineering maintenance systems are examined and the approach to working out of methodology of programs shaping of aviation land engineering technical maintenance taking into account features of problems which face to aviation transport system is justified: security of the set level of safety and a regularity of flights.

Keyword: reliability, maintenance, aviation land engineering.

Постановка завдання

Програма забезпечення необхідної ефективності систем технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) авіаційної наземної техніки (АНТ) складається з сукупності заходів щодо оцінки, підвищення і контролю надійності, точності, працездатності, якості функціонування та інших експлуатаційних характеристик АНТ та їх комплектуючих.

Ця програма реалізується як у сфері розробки і виробництва АНТ, так і безпосередньо в процесі їх експлуатації в аеропорту. Комплексне використання різних методів підвищення ефективності систем ТОіР АНТ може суттєво підвищити надійність і якість роботи функціональних систем АНТ. В основі цих методів лежить кількісна оцінка ефективності систем ТОіР як інструмент, що дає змогу оцінити ефективність проведених заходів щодо забезпечення необхідної надійності та якості роботи АНТ.

Під ефективністю системи ТОіР зазвичай розуміють сукупність властивостей системи ТОіР, які характеризують співвідношення між витратами ресурсів (матеріальних, часових або трудових) на підтримання і відновлення працездатності АНТ і ефектом, що досягається.

Але при цьому ефективність систем ТОіР суттєво залежить від безвідмовності, ремонтпридатності та довговічності АНТ, вірогідності результатів і тривалості експлуатаційного контролю. Тому проаналізуємо існуючі на сьогодні критерії надійності АНТ з метою визначення найбільш пристосованих до використання в експлуатації.

Вирішення проблеми

Найбільша кількість публікацій в області математичного моделювання процесів ТОіР АНТ присвячено задачам знаходження оптимальних

за обраним критерієм моментів проведення робіт з ТОіР. Однією з перших у цьому напрямку була праця [1], у якій оптимальні моменти ТОіР визначаються з умови мінімізації середніх експлуатаційних витрат:

$$V = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} [C_{кр} t_{кр} (k+1) + Q(t_{k+1} - \xi)] dF(\xi) + C_{в} t_{в},$$

де $C_{кр}$ і $C_{в}$ — середні витрати в одиницю часу на ТОіР АНТ; Q — середній збиток в одиницю часу через перебування АНТ у стані прихованої відмови; ξ — момент відмови АНТ; t_k — момент проведення ТОіР.

У цій формулі передбачається, що відмови АНТ виявляються тільки під час ТОіР.

У праці [2] наведено формулу для середніх експлуатаційних витрат при експонентному законі розподілу напрацювання до відмови:

$$V = \frac{C_{кр} t_{кр} + Q\tau}{1 - e^{-\lambda\tau}} - \frac{Q}{\lambda} + C_{в} t_{в},$$

де τ — періодичність ТОіР; λ — інтенсивність відмов АНТ.

З цієї формули неважко одержати формулу для розрахунку коефіцієнта готовності при ідеальному ТОіР:

$$K_{г} = \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda[\tau + t_{в}(1 - e^{-\lambda\tau})]}.$$

У праці [3] отримано функцію експлуатаційних витрат з урахуванням помилок контролю:

$$C(\xi) = \begin{cases} A, & \text{якщо } t_{к} < \xi \leq t_{к+1}; \\ B, & \text{якщо } t_{к} < \xi \leq T; \\ C, & \text{якщо } \xi > T. \end{cases}$$

$$A = \alpha \sum_{n=1}^k (1 - \alpha)^{n-1} (mc - s) - (1 - \alpha)^k \{(1 - \beta) \times$$

$$\begin{aligned} & \times \sum_{m=k+1}^n \beta^{m-k-1} [mc + Q(t_m - \xi)] + \\ & + \beta^{n-k} [nc + Q(T - \xi)]; \\ B &= \sum_{k=1}^n (1-\alpha)^{k-1} \alpha (kc + s) + \\ & + (1-\alpha)^n [nc + Q(T - \xi)]; \\ C &= \sum_{k=1}^n (1-\alpha)^{k-1} \alpha (kc + s) + (1-\alpha)^n nc, \end{aligned}$$

де n — число контрольних операцій усередині інтервалу $(0, T)$; s — штраф за визнання АНТ непрацездатною тоді, як вона є працездатною; $t_{кр} = t_{кр} C_{кр}$.

Ця формула отримана за таких припущень: ймовірності «помилкової відмови» і «невиявленої відмови» не залежать від напрацювання АНТ і результатів попереднього ТОіР. Але легко довести, що дані припущення справедливі тільки в тому випадку, коли закон розподілу напрацювання до відмови є експонентним, математичні сподівання і дисперсія похибки вимірювання кожного з контрольованих параметрів не залежать від напрацювання АНТ.

У праці [4] отримано формулу для коефіцієнта готовності АНТ з періодичним контролем технічного стану при експонентному законі розподілу напрацювання до відмови:

$$K_r = \frac{1}{e^{-\lambda\tau} + \frac{(t_{кр} + t_B \alpha)\lambda}{e^{\lambda\tau} - 1} - \frac{\lambda(t_{кр} + t_B(1-\beta) + \tau)}{\beta - 1}}.$$

Підставивши в цю формулу значення $\alpha = \beta = 0$, одержимо:

$$K_r = \frac{1}{e^{-\lambda\tau} + \lambda \left(t_{кр} + t_B + \tau + \frac{t_{кр} + \tau}{-1 + e^{\lambda\tau}} \right)}.$$

Факт розбіжності отриманої формули з формулою, отриманою в праці [2] при ідеальному ТОіР, свідчить про те, що в [4] у разі знаходження K_r допущено помилку.

У праці [5] приведено такий вираз для розрахунку K_r АНТ для однієї зміни:

$$\begin{aligned} K_r &= \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda \{A + B\}}; \quad A = (\tau + t_{кр} + \alpha t_B) q e^{-\lambda\tau}; \\ B &= \left[(\tau + t_{кр}) \frac{1}{1-\beta} + t_B \right] \frac{1 - q e^{-\lambda\tau}}{1-\gamma}, \end{aligned}$$

де γ — ймовірність незавершення відновлення; q — ймовірність безвідмовної роботи АНТ до моменту її ТОіР.

Легко перекоонатися, що ні за яких значень ймовірностей q і γ та ідеального ТОіР ця формула не зводиться до формули, отриманої в [2].

У праці [6] визначено мінімаксну стратегію обслуговування АНТ на інтервалі $(0, T)$. Функція експлуатаційних витрат має вигляд:

$$C(\xi) = \begin{cases} nc & \text{якщо } \xi > T; \\ nc + Q(T - \xi) & \text{якщо } t_n < \xi \leq T; \\ A \times \sum_{i=k-1}^{n-1} B_i & \text{якщо } t_k < \xi \leq t_{k+1}; \end{cases}$$

$$A = (1-\beta)(k+1)c + (1-\beta)Q(t_{k+1} - \xi) + (1-\beta);$$

$$B_i = \beta^{i-k} [(i+1)c + Q(t_{i+1} - \xi)] + \beta^{n-k} [nc + Q(T - \xi)].$$

У праці [7] отримано наступну формулу для розрахунку K_r АНТ з періодичним контролем технічного стану:

$$K_r = \frac{(1-\beta)[1 - P_c(\tau)]\tilde{t}_1}{\tau + \tilde{t}_6 + A + B};$$

$$A = [1 - P_0(\tau)]\tilde{t}_2 + 2\tilde{t}_3[1 - P_c(\tau)]\tilde{t}_4;$$

$$B = \alpha P_0(\tau) - \beta[1 - P_c(\tau)]\tilde{t}_1,$$

де $P_0(\tau)$ і $P_c(\tau)$ — відповідно ймовірності того, що в АНТ і засобі контролю протягом напрацювання T не виникає жодного дефекту; $\tilde{t}_1, \dots, \tilde{t}_6$ — відповідно середні тривалості безвідмовної роботи АНТ, відновлення АНТ, відновлення засобу контролю, самоконтролю, ТОіР АНТ.

У праці [8] визначено середні експлуатаційні витрати, пов'язані з ТОіР АНТ і втратами внаслідок прихованих відмов:

$$V = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} \{A + [c(k+1) + Q(t_{k+1} - t)]\bar{G}(t_{k+1} - t)\} dF(t);$$

$$A = \int_0^{t_{k+1}-t} (kc + Qy) dG(y),$$

де $\bar{G}(x) = 1 - G(x)$ — функція розподілу часу прояву відмови.

Під час виведення цієї формули вважалося, що $\alpha(t) = \beta(t) = 0$ і $T = \infty$.

Крім того, в праці [9] запропоновано показник ефективності ТОіР на основі прогнозування технічного стану АНТ:

$$E(\tau) = \frac{W(\tau)}{C_k(\tau)},$$

де $W(\tau)$ — вигреш у середньому напрацюванні АНТ за рахунок попередження відмов; $C_k(\tau)$ — середні витрати на прогнозування технічного стану, яке здійснюється з періодичністю τ .

Цей показник ефективності не враховує характеристик ремонтпридатності і довговічності АНТ, а також ймовірностей помилок операції прогнозування технічного стану.

З наведеного стислого аналізу найбільш характерних математичних моделей видно, що зараз відсутній єдиний методологічний підхід до

визначення показників ефективності систем ТОіР АНГ, який би враховував структуру, вид експлуатаційного контролю, глибину відновлення і зовнішній прояв відмов, періодичність ТОіР. У результаті цього реальні показники ефективності багатьох систем ТОіР у процесі експлуатації часто гірші їх розрахункових значень і не задовольняють вимоги нормативних документів. Така ситуація зумовлена декількома причинами. До основної з них, по-перше, належить те, що для нормування і оцінювання ефективності систем ТОіР АНГ, як правило, використовуються показники, запозичені з теорій надійності та експлуатації простих систем. Такі показники враховують лише факт зміни ефективності складових частин системи ТОіР, але не дають уявлення про вплив окремих факторів на кінцевий результат функціонування систем ТОіР і що особливо важливо для АНГ, розглядають АНГ як складні технічні системи, а не як засоби транспорту. По-друге, сьогодні практично відсутні досить обґрунтовані методи оцінювання ефективності систем ТОіР і оцінки її впливу на ефективність функціонування АНГ. І, по-третє, важливою властивістю сучасних АНГ є функціональна надмірність більшості їх систем, що дозволяє розв'язувати поставлену задачу з ТОіР різними способами. Кожний з цих способів характеризується визначеним рівнем ефективності систем ТОіР. Таким чином, кількісна оцінка рівнів ефективності систем ТОіР є необхідним елементом у схемі розрахунку ефективності застосування АНГ як транспортних засобів, метою експлуатації яких при заданих рівнях безпеки і регулярності польотів, є отримання максимальних прибутків.

Теорія дослідження складних ергатичних систем, якою зокрема є система ТОіР, зараз має досить розвинутий математичний апарат. Тому саме цю теорію доцільно використати для розробки методологічних основ оцінки й аналізу ефективності систем ТОіР АНГ та їхніх складових частин. Під час дослідження цих питань необхідно виходити з визначених послань. Це потребує формулювання основних положень і принципів дослідження ефективності систем ТОіР. Розглянемо основні з них з позиції врахування найбільшого числа факторів, які мають вплив на ефективність досліджуваних систем ТОіР.

Сучасні системи ТОіР АНГ — це складні ергатичні системи, які мають сукупність важливих властивостей: розгалужені функціональні зв'язки, змінну структуру, різного роду надмірності, які дають змогу розв'язувати поставлену функціональну задачу в різноманітних збійних ситуаціях в окремих їх складових частинах.

Цей принцип визначає зміст ряду інших важливих вхідних посилок.

Система ТОіР АНГ складається з великої кількості підсистем, більшість яких є також складними ергатичними системами. Ці підсистеми розрізняються за принципом організації, технічного та інформаційного забезпечення. Експлуатація таких підсистем здійснюється різними фахівцями. Тому теорія ефективності повинна надавати дослідникам «мову» у вигляді відповідних термінів і визначень для можливості обміну наявною інформацією.

Вивчення системи ТОіР конкретного екземпляру АНГ повинно здійснюватись протягом повного життєвого циклу АНГ. Цей принцип ґрунтується на об'єктивно існуючому взаємозв'язку між послідовними процесами проектування, випробувань, виготовлення й експлуатації АНГ. Взаємозв'язок етапів життєвого циклу АНГ, і відповідно їх систем ТОіР, здійснюється як у прямому, так і зворотному напрямку. Важливе значення при цьому відіграють доробки і модернізація АНГ за результатами випробувань і на основі досвіду експлуатації.

Проблема ефективності систем ТОіР, розв'язується в рамках загальної задачі забезпечення необхідної ефективності експлуатації АНГ. Вона містить у собі питання роботи окремих її складових частин без збійних ситуацій, що прямо пов'язано з точністю формування їх параметрів. Методи теорії ефективності систем ТОіР повинні забезпечувати практичне розв'язання цих важливих задач. Інформація про систему ТОіР АНГ і її складові частини часто виявляється недостатньою для побудови їх детальних математичних моделей. Але і в умовах невизначеності потрібно досліджувати ефективності систем ТОіР.

До основних факторів невизначеності належать: імовірісно-статистична природа збійних ситуацій; випадкові переходи системи з одного стану в інший через відмови АНГ і (чи) збійні ситуації у складових частинах системи ТОіР; випадковий характер моментів часу застосування АНГ; різні режими роботи АНГ тощо. Таким чином, задачі дослідження ефективності систем ТОіР повинні розв'язуватися у багатовимірній області невизначеності. Дотримання цього важливого принципу підвищує об'єктивність оцінки ефективності систем ТОіР на всіх етапах життєвого циклу АНГ. Реальні показники ефективності систем ТОіР, як правило, відрізняються від розрахункових і заданих (у гірший бік). Звідси часто виникають спроби з боку зацікавлених організацій яким-небудь чином виправдати або зовсім заперечити факт недостатньо високої ефективності системи ТОіР конкретного типу або екземпляру АНГ. Це потребує дослідження сис-

ем ТОіР як об'єктів експлуатації і зокрема визначення показників їх ефективності.

Оцінювання і забезпечення необхідної ефективності систем ТОіР неможливі без використання математичних методів. Проведення відповідних розрахунків потребує знання ймовірнісних характеристик надійності комплектуючих АНТ, якості і точності функціонування складових частин системи ТОіР, опис яких не може здійснюватися тільки на основі статистичного аналізу. Формальний статистичний опис далеко не завжди дозволяє виявляти причини збійних ситуацій, а без цього неможлива раціональна діагностика і впровадження заходів з поліпшення конкретної системи ТОіР. Тому при дослідженні ефективності систем ТОіР поряд з використанням статистичних методів слід застосовувати причинно-наслідковий підхід, який дозволяє проводити розрахунки з використанням виявлених теоретичних закономірностей процесів функціонування систем ТОіР, що досить адекватно відбивають реальні процеси, які відбуваються в ній.

Якщо розглядати систему ТОіР як таку, що складається з K елементів (об'єкт ТОіР, ІТС, ...), то в цьому момент появи збійної ситуації в процесі функціонування довільного k -го елемента відбувається в момент t , тоді стан системи ТОіР можна визначити випадковим вектором $\{t_k\}$, $k = \overline{1, K}$, який має деяку спільну K -вимірну щільність ймовірності $q(t_1, t_2, \dots, t_K, t)$. Очевидно, умовний ефект від застосування даної системи ТОіР, збійні ситуації у складових частинах якої відбуваються у моменти часу t_1, t_2, \dots, t_K , є деякою функцією цих моментів:

$$P(t) = P(t_1, t_2, \dots, t_K, \tau). \quad (1)$$

де τ — тривалість інтервалу часу $[0, t]$, на якому вона застосовується.

Умовний показник ефективності системи ТОіР (1) залежно від задач, поставлених перед нею, може мати різний зміст. Це може бути рівень регулярності польотів, мінімізації витрат на ТОіР, мінімізація кількості виконавців тощо.

У цілому, для всіх можливих станів системи ТОіР показником ефективності можна вважати математичне сподівання функції випадкових аргументів:

$$E = M[P(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} P(t_1, \dots, t_K) dt_1 \dots dt_K. \quad (2)$$

Математичне сподівання (2) функції (1) характеризує процес функціонування системи ТОіР інтегрально для всіх можливих випадкових моментів часу виникнення збійних ситуацій, а

функція (1) характеризує цей процес лише за умови, якщо збійні ситуації відбулися в якісь визначені моменти часу t_k .

Висновки

Отже, умовний показник ефективності системи ТОіР оцінює якість процесу функціонування системи ТОіР в якомусь одному її стані, зумовленому усуненням збійних ситуацій у визначені моменти часу. Відповідно до цього можна дати таке визначення ефективності системи ТОіР з урахуванням можливості перебування АНТ у різних станах.

Ефективність системи ТОіР — це властивість процесу функціонування системи ТОіР при даній програмі експлуатації АНТ, від якої залежить кінцевий результат виконання задачі, яка поставлена перед АНТ, як транспортним засобом.

Ця властивість зумовлює корисний ефект від застосування даної системи ТОіР за умови, що збійні ситуації відбулися в певні фіксовані моменти часу. Для того щоб мати уявлення про ефективність системи ТОіР і порівнювати їх між собою, необхідно мати деякий чисельний показник ефективності функціонування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Barlow R. E. Mathematical models for system reliability / R. E. Barlow, L. S. Hunter // The Sylvania Technologist. 1960, № 8. — P. 55–67.
2. Обоснование технического задания на изготовление промышленного комплекса стендов оборудования для обслуживания радиоэлектронного оборудования в лабораториях АТБ и ремонтных заводах. Отчет о НИР / ГосНИИ ГА. — № ГР8005040456. — М., 1980. — 96 с.
3. Вопросы математической теории надежности / Е. Ю. Барзилович, Ю. К. Беляев, В. А. Каштанов [и др.]; под ред. Б. В. Гнеденко. — М. : Радио и связь, 1983. — 376 с.
4. Каштанов В. А. Оптимальные задачи технического обслуживания / В. А. Каштанов. — М. : Знания, 1981. — 67 с.
5. Основы эксплуатации средств измерений / В. А. Кузнецов, А. Н. Пашков, О. А. Подольский [и др.]; под ред. Р. П. Покровского. — М. : Радио и связь, 1984. — 184 с.
6. Дедков В. К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем / В. К. Дедков, И. А. Северцев. — М. : Высш. шк., 1976. — 406 с.
7. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е. Ю. Барзилович. — М. : Высш. шк., 1982. — 232 с.
8. Калявин В. П. Технические средства диагностирования / В. П. Калявин, А. В. Мозгалевский. — Ленинград : Судостроение, 1984. — 208 с.