

УДК 629.735.083

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ МАТЕРІАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВІАКОМПАНІЇ

Кучер О. Г. д-р техн. наук, проф., Власенко П. О.

Національний авіаційний університет

kucher@nau.edu.ua

Розглянуто технологічний процес забезпечення запасними частинами, інструментами, приладами і матеріалами системи технічного обслуговування і ремонту парку повітряних суден (ПС) авіакомпанії на основі розрахункового методу з метою визначення кількісного складу комплексу запасних частин на заданий період експлуатації при обмеженій сумі фінансування.

Ключові слова: система технічного обслуговування і ремонту, льотна придатність, матеріально-технічне забезпечення, авіаційно-технічне майно, ймовірність безвідмовної роботи, резервні елементи.

In the article were considered the questions of technological process of providing the Aircraft Maintenance System by spare parts, instruments, equipment and materials on the base of calculation method with the goal to determine the quantity of spare parts on the defined operating period with limited funding.

Keywords: Aircraft Maintenance System, airworthiness, logistical support, aircraft maintenance property, reliabilities, spare parts, redundant.

Вступ

Поломки трапляються на найсучасніших авіа-підприємствах, на супернадійній авіаційній техніці, що виготовлена за новітніми технологіями. За будь-якої причини відмови для експлуатантів дуже важливим є коефіцієнт готовності системи, що залежить від можливості заміни вузла, який відмовив. Адже великий збиток може бути заподіяний навіть за малий термін. Так, тижневий простій літака через відсутність запасної частини оцінюється в \$10 тис. [1]. Ключовим елементом підтримки готовності складних технічних систем є ЗІП.

ЗІП — це комплект запасних частин, призначених для підтримки техніки в працездатному стані протягом розрахункового терміну її експлуатації. У ЗІП часто включають спеціальний інструмент, прилади і нестандартні матеріали, необхідні для технічного обслуговування і ремонту, скомплектовані залежно від призначення і особливостей використання.

Призначення і структура системи матеріально-технічного забезпечення

Основним призначенням системи технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) є збереження льотної придатності ЛА в процесі тривалої експлуатації, забезпечення справності літакомоторного парку і умов для його ефективного використання за призначенням [2].

Виходячи з вирішуваних у системі ТОіР ПС завдань, забезпечення надійної, безпечної й ефективної експлуатації ПС не може здійснюватися без ефективної системи матеріально-технічного забезпечення (МТЗ) необхідними матеріально-технічними засобами: документацією, виконавцями, устаткуванням, запчастинами, технологічними засобами ТОіР або інформацією, необхідною для організації й управління такими про-

цесами. Таким чином, при формуванні системи ТОіР ПС, склад, організація і процеси МТЗ експлуатації ПС визначають ефективність реалізації технічної експлуатації (ТЕ) ПС у цілому в очікуваних умовах з очікуваними результатами.

Досвід формування систем ТОіР ПС, включаючи основні принципи МТЗ у системі ТОіР відпрацьовані на таких авіафірмах як *Boeing* і *Airbus* дає змогу визначити загальні положення МТЗ у системі ТОіР ПС, необхідні для організації і виконання ТОіР ПС у процесі технічної експлуатації, включаючи рекомендовані форми документального, матеріального і технічного забезпечення в системі ТОіР певного типу ПС і розрахункові норми й умови такого забезпечення [3].

У загальному випадку МТЗ у системі ТОіР ПС включає такі модулі (рис.1):

- зобов'язання постачальника і експлуатанта;
- забезпечення експлуатанта засобами технічного обслуговування (ЗТО), до складу яких входять: засоби наземного обслуговування (ЗНО) і контрольно-перевірочна апаратура (КПА), інструменти і засоби експлуатаційного ремонту (ЗЕР) для ТОіР;
- забезпечення експлуатанта запасними частинами і матеріалами, необхідними для технічного обслуговування і ремонту ЗІП.

Одиночний комплект ЗІП призначений для поточного ремонту апаратури шляхом заміни несправних елементів, а також для проведення профілактичних робіт і настройки апаратури в експлуатаційних умовах. Одиночний ЗІП додається одному певному виробу. Груповий комплект ЗІП служить для поповнення одиночного ЗІПа і забезпечення техніки тими елементами, яких немає в одиночному ЗІПі [4]; забезпечення документацією для ТОіР; організаційні форми забезпечення МТЗ.

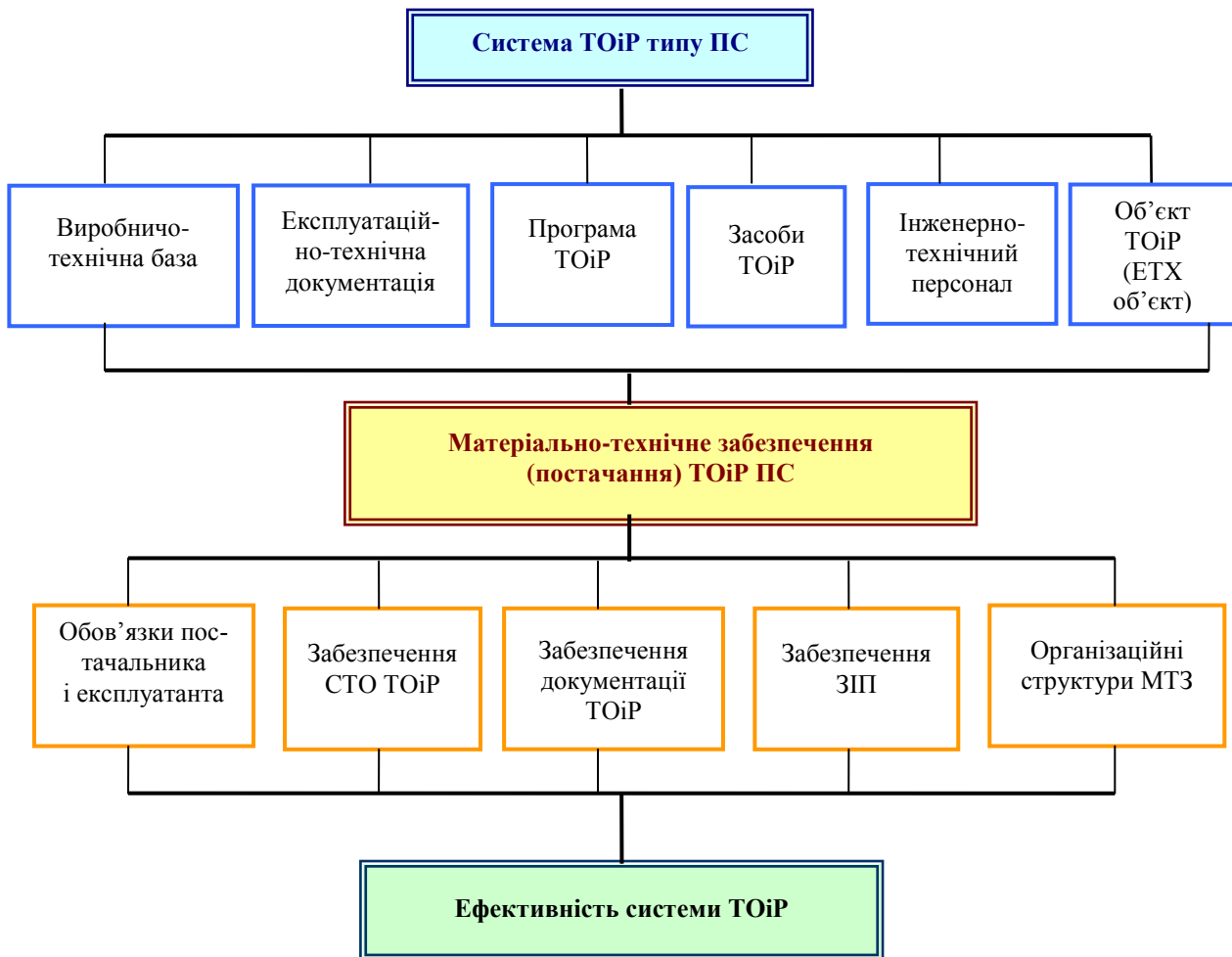


Рис. 1. Структура МТЗ у системі ТОіР

Завдання матеріально-технічного забезпечення в ТОіР

Завдання матеріально-технічного забезпечення полягає в безперервному забезпеченні технологічних процесів ТОіР двигунами, запасними частинами, матеріалами, засобами ТОіР в кількостях, що вимагаються для надійного функціонування системи.

Матеріально-технічне забезпечення, як складова частина інфраструктури системи ТОіР, є сукупністю взаємозв'язаних операцій створення, зберігання і раціонального використання потрібних запасів запасних частин, витратних матеріалів, засобів технічного оснащення й іншого авіаційно-технічного майна (АТМ) у процесі технічної експлуатації літальних апаратів [2].

Організація матеріально-технічного забезпечення в сучасних умовах пов'язана з переходом від планової системи поставок і централізованого розподілу запасних частин і устаткування між авіапідрприємствами до роботи авіапідрприємств безпосередньо з заводами-виробниками на поставку запасних частин і устаткування на основі контрактів.

Доцільно розглядати різні варіанти організації матеріально-технічного забезпечення:

1) роботу на основі контрактів авіапідрприємств із заводами-виробниками на поставку запасних частин проводити в поєднанні зі встановленням кооперації між авіапідрприємствами, або шляхом створення сумісних зональних і транзитних складів, або по взаємному забезпеченню літаків авіапідрприємств, які простоюють на своїх складах у певних зонах;

2) зміцнення зв'язків через посередницьку організацію, яка виконує роль демпфера, що припускає встановлення двох типів договірних зв'язків: «завод-виробник — посередницька організація» і «посередницька організація — підприємство-споживач» запасних частин.

Забезпечення кількісного складу запасних частин, інструментів і матеріалів ЗІП у ТОіР

Під час розв'язання задач надійності необхідно забезпечити задані показники надійності з якнайменшими витратами. Як основні показники надійності системи, які необхідно поліпшити шляхом використання ЗІП, можуть бути взяті:

імовірність безвідмовної роботи (БР); коефіцієнт готовності, середній час напрацювання на відмову, гамма-процентний термін експлуатації.

Загальна постановка задачі із забезпечення запасними елементами може бути сформульована таким чином: необхідно визначити кількісний склад ЗПІ для того, щоб технічна система з імовірністю α безвідмовно функціонувала протягом часу t .

Розглянемо цю задачу на прикладі системи, що складається з n елементів. Нехай R_i — число відмов i -го елемента, який у системі працює протягом часу t_i ($t_i \leq t$). Ураховуючи, що кількість запасних частин повинна бути не менше кількості відмов, визначення кількості запасних елементів зводиться до знаходження найменшого з можливих чисел N за умови [5]:

$$P(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \leq N) \geq \alpha.$$

При експоненціальному розподілі ймовірності безвідмовності роботи елементів $G(t) = 1 - e^{-\Lambda t}$ сума $R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$ буде випадковою величиною з експоненціальним розподілом, у якому параметр Λ визначається як:

$$\Lambda = \lambda \sum_{i=1}^n t_i.$$

У цьому випадку

$$P(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \leq N) \geq \sum_{i=0}^N \frac{\Lambda^i e^{-\Lambda}}{i!},$$

тобто ймовірність того, що за час t системі потрібно точно m запасних елементів, визначиться за формулою Пуассона:

$$P_m(t) = \frac{(\Lambda t)^m}{m!} e^{-\Lambda t}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Середнє число запасних елементів $m_{\text{неод}}$, що витрачаються, за час експлуатації t дстається так:

$$m_{\text{неод}} = M\{m\} = \sum_{m=1}^{\infty} m P_m(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\Lambda(t)^m}{m!} = \Lambda t.$$

При заданій ймовірності працездатності системи основою для розрахунку числа запасних елементів m_p є таке співвідношення

$$P(m_p) = e^{-\Lambda t} \sum_{i=0}^{m_p} \frac{(\Lambda t)^i}{i!} = e^{-m_{\text{неод}}} \sum_{i=0}^{m_p} \frac{(m_{\text{неод}})^i}{i!}. \quad (1)$$

Число запасних елементів можна також визначити такою наближеною формулою [4]

$$m_p = \lambda t + U_r \sqrt{t \lambda},$$

де λ — інтенсивність відмов; t — заданий час функціонування об'єкта; U_r — квантиль функції ймовірності нормального розподілу.

На рис. 2 показано залежності кількості виробів $m_p = n(t)$, що не перевищують верхню межу регулювання із заданою ймовірністю $P_{\text{зад}} = 0,975$ для різних прогнозованих значень параметра потоку відмов $\omega_{\text{н0}} = \{0,4; 0,65; 0,8; 1,2; 1,6\} \cdot 10^{-3}$ від напрацювання виробу T .

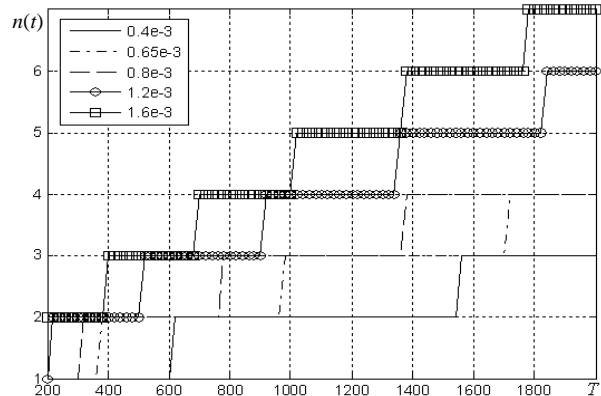


Рис. 2. Кількість виробів, що не перевищують верхню межу регулювання з ймовірністю $P_{\text{зад}} = 0,975$ для різних значень параметра потоку відмов

При обслуговуванні за станом технічної системи число запасних елементів можна визначити, використовуючи співвідношення для нормального розподілу часу між відмовами [5]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P \left\{ \frac{v(t) - \frac{t}{T}}{\sqrt{\frac{\sigma^2 t}{T^3}}} < x \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau = F(x),$$

де T — середнє напрацювання на відмову елемента; σ^2 — дисперсія напрацювання на відмову; t — сумарне напрацювання.

З умови

$$P[v(t) \leq m_p] = 1 - \alpha,$$

де α — мале число, одержуємо

$$m_p = \frac{t}{T} + U_{1-\alpha} \sqrt{\frac{\sigma^2 t}{T^3}}, \quad (2)$$

де $U_{1-\alpha}$ — квантиль нормального розподілу для ймовірності, що дорівнює $(1 - \alpha)$.

Величини T і σ^2 розраховуються за теорією поглинаючих ланцюгів Маркова. Причому, способи їх визначення залежать від виду випадкового процесу, що описує зміни технічного стану в часі. В окремих випадках ці характеристики можуть бути визначені аналітично, в складніших випадках — на основі статистичного моделювання. Відзначимо, що за допомогою статистичного моделювання можна побудувати функцію розподілу числа запасних елементів, з якої виз-

начаються всі необхідні параметри числа запасних елементів для заданого терміну експлуатації.

При статистичному визначенні цих параметрів можна скористатися формулами:

$$T = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (t_{i+1} - t_i)$$

або $T = \frac{t_s}{n}$;

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-1} [(t_{i+1} - t_i) - T]^2, \quad (3)$$

де t_i — напрацювання на момент i -ої відмови елемента; n — число відмов елемента ($n = m_p$); t_s — сумарне напрацювання за час функціонування елемента.

На рис. 3 подано залежності кількості запасних елементів від напрацювання для різних імовірностей нормального розподілу $p = 1 - \alpha = (0,5; 0,9; 0,95; 0,975; \text{і } 0,99)$ при математичному сподіванні і середньому квадратичному відхиленні часу між відмовами, що дорівнюють $T = 750$, $\sigma = 250$.

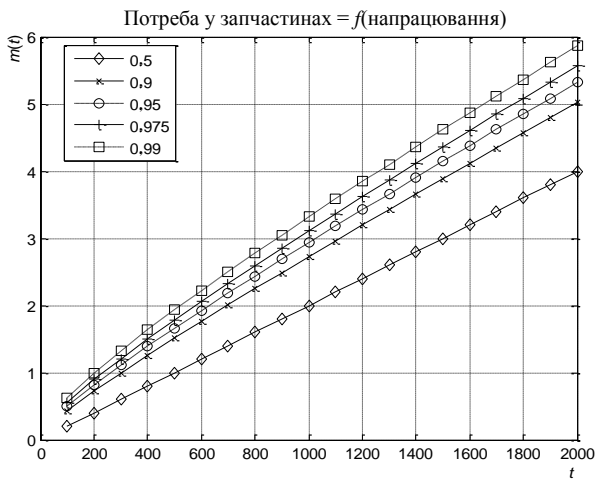


Рис. 3. Залежність від напрацювання необхідної кількості виробів, що відмовили, замість гарантуючих задану ймовірність замін

Якщо накладаються обмеження на загальну суму витрат, що виділяються на закупівлю запасних елементів, то виникає задача визначення оптимальної кількості запасних елементів, яка формулюється таким чином.

Вважаємо, що структурна схема надійності системи представлена у вигляді n послідовно сполучених елементів і надійність кожного елемента відома. Кількість запасних елементів визначається з урахуванням обмеження

$$\sum_{i=1}^k c_i m_i \leq C, \quad (4)$$

де m_i — кількість запасних елементів i -го типу; c_i — вартість одного елемента i -го типу; C —

виділена кількість коштів на закупівлю запасних елементів.

Під вартістю елемента c_i тут розуміється вартість відновлення його працездатності, тобто середньостатистична сума всіх коштів, затрачених на закупівлю, ремонт, відновлення робочого стану на борту одного елемента.

Ставиться задача максимізації ймовірності безвідмовної роботи виробів на заданому інтервалі часу t за допомогою раціонального вибору резервних елементів.

Інакше кажучи, необхідно знайти

$$\min Q(t) = \min \left[1 - \prod_{i=1}^k (1 - Q_i(t)) \right],$$

де Q_i — імовірність відмови i -го елемента; k — число різнотипних елементів

Найпростішим, але і водночас трудомістким методом розв'язання цієї задачі є направлений перебір варіантів розподілу запасних елементів. Для великих значень k і C ефективним методом розв'язання даної задачі є метод динамічного програмування.

При направленому переборі визначення числа елементів кожного виду для максимізації ймовірності безвідмовної роботи у разі нормального закону задача розв'язується простіше, оскільки число елементів лінійно залежить від квантиля розподілу (2).

Таким чином, формулу для оптимізації можна подати у вигляді

$$\sum_{i=1}^k \left(\frac{t}{T_i} + U_{1-\alpha} \sqrt{\frac{\sigma_i^2 t}{T_i^3}} \right) c_i \leq C, \quad (5)$$

де треба знайти таке максимальне значення квантиля розподілу $U_{1-\alpha}$ (а отже, ІБР), при якому задовольняється нерівність.

Слід зазначити, що мінімальна кількість запасних елементів, що призначаються для закупівлі, повинна бути не менше вартості середнього числа елементів, що відмовили за попередній базовий період, тобто

$$C > \sum_{i=1}^k \left(\frac{t}{T_i} \right) c_i.$$

Для розв'язання задачі із забезпечення запчастинами при експоненціальному розподілі (1) раціональна процедура максимізації ймовірності безвідмовної роботи складається з трьох етапів:

1 — задати початкове наближення до розподілу елементів, для побудови якого можна скористатися формулою (5), визначивши дисперсію розподілу у вигляді (3) або $\sigma_i^2 = 1/\lambda^2 = T_i^2$;

2 — побудувати таблиці для залежностей ймовірностей безвідмовної роботи i -го елемента від числа запасних елементів $P_i(m_p)$ за формулою (1);

3 — шляхом послідовного перебору всіх елементів (у таблиці) знаходити елемент з мінімальною поточною ймовірністю $P_i(m_p)$ і, збільшуючи кількість запасних елементів цього типу на 1, визначати нову сумарну вартість C_s за рахунок вартості доданого елемента.

Якщо $C_s < C$, то процес пошуку слід продовжувати, інакше пошук закінчується і за основу береться передостанній розподіл запасних елементів.

Як приклад проведено розрахунок кількості запасних частин для $k=200$ різнотипних елементів при нормальному і експоненціальному розподілах часу на відновлення (або відмову) елемента.

Початковими даними тут є середнє число запасних елементів $m_{\text{серп}}$, що підлягають відновленню, за час експлуатації t , середнє напрацювання і дисперсія напрацювання на відмову, вартості всіх запасних елементів, а також виділена сума фінансування $C = 400\,000$ у.о., і час між поставками запасних частин $t = 1000$ год (або 16,7 діб при парку з 10 літаків і 6 год нальоту за добу).

На рис. 4 і 5 подано залежності ІБР від числа запчастин для п'ятнадцяти перших елементів при нормальному і експоненціальному розподілах; на рис. 6 і 7 — оптимальна кількість елементів кожного типу; максимально можлива ймовірність безвідмовної роботи цих елементів і сумарні вартості комплектів однотипних запасних частин для нормального ($P_{ij} > 0,9625$) і експоненціального ($P_{pj} > 0,9631$) розподілів часу до відмови.

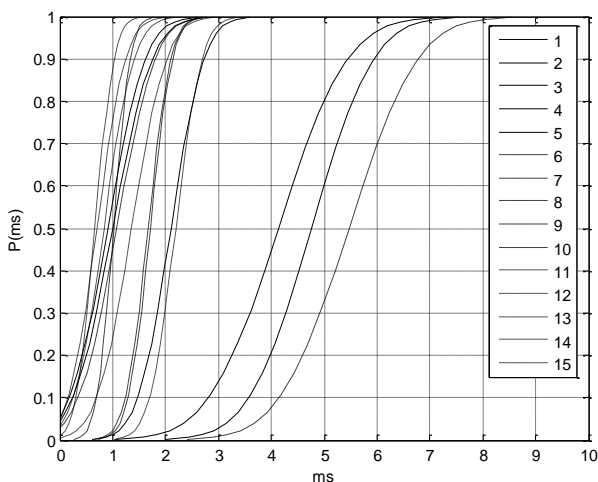


Рис. 4. До розрахунку числа запасних елементів m_p за формулою нормального закону розподілу ймовірності безвідмовної роботи

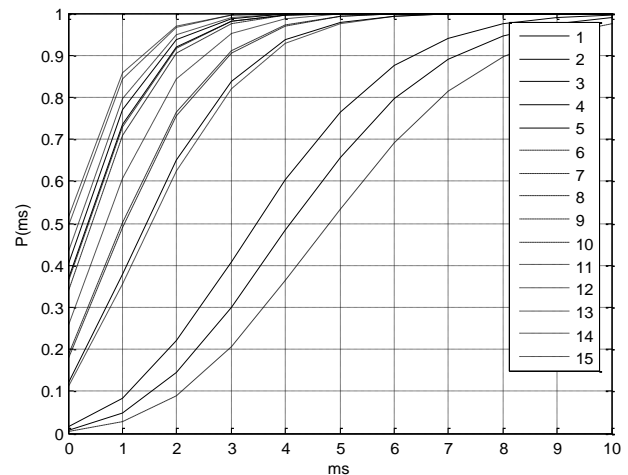


Рис. 5. До розрахунку числа запасних елементів m_p за формулою Пуассона

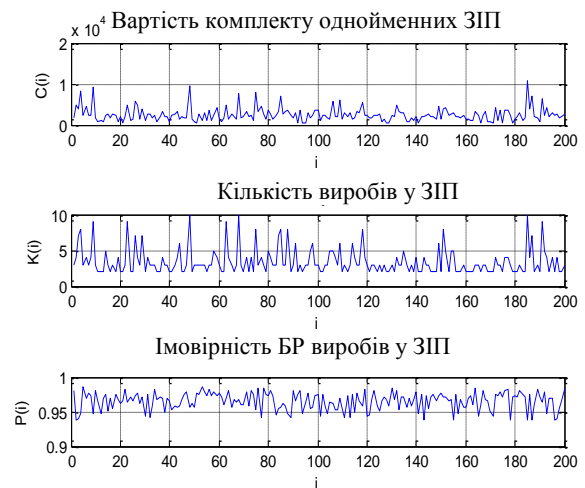


Рис. 6. Максимізація ймовірності безвідмовної роботи ПС за допомогою раціонального вибору резервних елементів при обмеженій сумі фінансування для нормального розподілу часу між відмовами

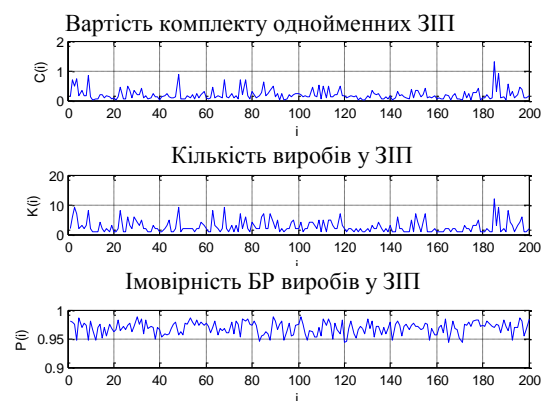


Рис. 7. Максимізація ймовірності безвідмовної роботи ПС за допомогою раціонального вибору резервних елементів при обмеженій сумі фінансування для експоненціального розподілу

На рис. 8 подано інтегральні залежності загальної вартості комплексу ЗП від часу між поставками для заданої ймовірності безвідмовної роботи при експоненціальному розподілі.

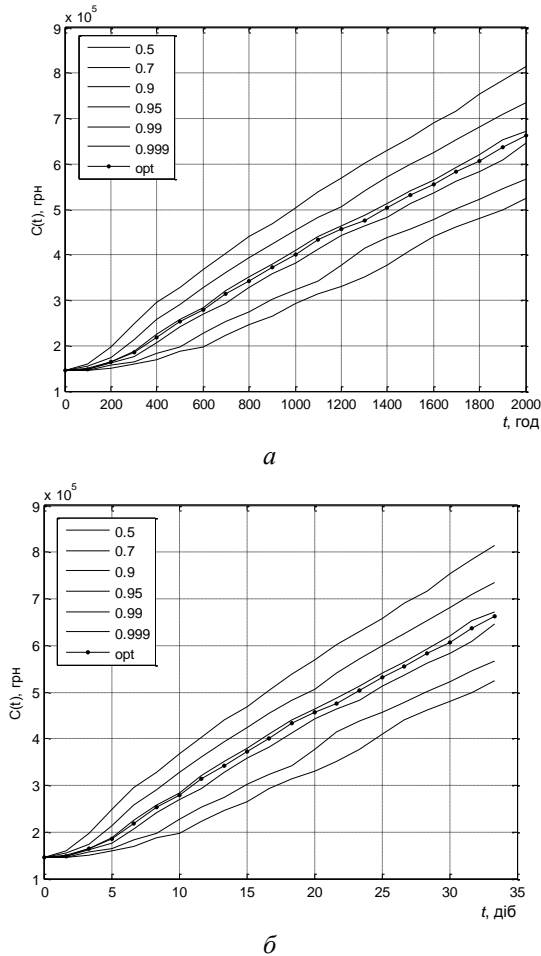


Рис. 8. Залежності загальної вартості комплексу ЗП за критерієм максимізації ймовірності безвідмовної роботи від *a* — напрацювання парку (год); *б* — календарного періоду експлуатації (діб) між поставками

Криві можна використовувати для наближеного визначення необхідних засобів $C(t)$ для заданої ймовірності безвідмовної роботи або, при виділеній сумі фінансування, для визначення максимально досяжної ймовірності безвідмовної роботи для заданого часу між поставками ЗП (напрацювання в годинах або добах).

Оптимізація процесу постачання для забезпечення заданої ймовірності безвідмовної роботи складної технічної системи

Для складно структурованих систем при розрахунку ІБР найчастіше використовуються методи структурних, логічних схем і схемно-функціональний метод. Ці методи можна використовувати і в задачах оптимізації системи постачання запасними частинами, застосовуючи схему резервування заміщенням. У цьому випадку при відмові елемента системи, що складається з n елементів, кожен елемент замінюється новим з такими самими характеристиками надійності, як і початковий елемент. Формула розрахунку ймовірності безвідмовної роботи для схеми з m кратним ненавантаженим резервом має вигляд [2]:

$$P_i = \exp(-\lambda_i t) \sum_{j=0}^m \frac{\lambda_i^j t^j}{j!}.$$

При цьому ймовірність безвідмовної роботи елемента збільшується при кожному додаванні резервного елемента, а разом з нею збільшується і ІБР системи. Задача полягає в тому, щоб знайти послідовність замінь елементів, яка при кожному виборі елемента максимізує ймовірність безвідмовної роботи системи. Для забезпечення безвідмовної роботи паливної системи повинен виконуватися ряд логічних умов, які можна побачити на рис. 9 [4].

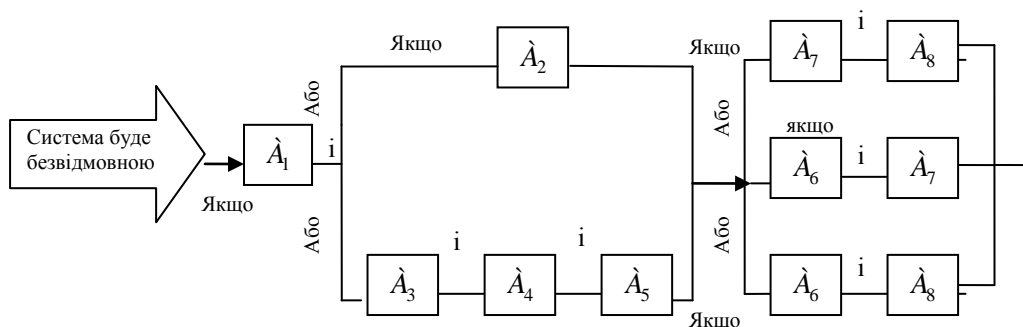


Рис. 9. Логічна схема безвідмовної роботи паливної системи літака

На цій схемі через A_i позначені події, що полягають у дотриманні безвідмовної дії окремих частин системи, а саме: літакової частини паливної системи (подія A_1); автоматики, що забезпечувала витрату палива (подія A_2); льотчика, що користується ручним увімкненням підкачуваль-

них pomp (подія A_3); паливоміра (подія A_4); пристрою ручного увімкнення підкачувальних pomp (подія A_5); автомата центрування (подія A_6); рухової системи подачі палива лівого двигуна (подія A_7); рухової системи подачі палива правого двигуна (подія A_8).

Імовірність безвідмовної роботи паливної системи літака $D_{\text{непб}}$, згідно з рис. 9, можна розрахувати методом логічних схем за формулою

$$D_{\text{непб}} = D_1(D_2 + D_3D_4D_5 - D_2D_3D_4D_5) \times \\ \times (D_7D_8 + D_6D_7 + D_6D_8 - 2D_6D_7D_8),$$

де $D_1, D_2, D_3, \dots, D_8$ — імовірність здійснення i -х подій (відмов).

На підставі статистичних даних значення інтенсивності відмов елементів паливної системи наведено в таблиці.

Статистичні дані інтенсивності відмов елементів паливної системи літака

Події	Умовне позначення інтенсивності відмови i -го елементу	Значення інтенсивності $\lambda = \frac{1}{m}$ (де m — напрацювання на відмову)
A_1	λ_1	$2,5 \cdot 10^{-4}$
A_2	λ_2	$10 \cdot 10^{-5}$
A_3	λ_3	0
A_4	λ_4	$8 \cdot 10^{-5}$
A_5	λ_5	$10 \cdot 10^{-5}$
A_6	λ_6	$10 \cdot 10^{-5}$
A_7	λ_7	$5 \cdot 10^{-5}$
A_8	λ_8	$1 \cdot 10^{-5}$

Якщо тривалість польоту дорівнює 4 год ($t=4$), то, обираючи розподіл напрацювання між відмовами в усіх елементах паливної системи за експоненціальним законом $D_i = e^{-\lambda_i t}$, одержимо $D_{\text{непб}} = 0,99820130$. Для малих t , беручи $D_i \approx 1 - \lambda_i t$, можна знайти наближене значення для ймовірності відмови системи $D_{\text{непб}} = 0,99820072$, яке збігається з точністю до шостого знаку. Якщо взяти за інтервал прогнозування $t=5000$ год, а як граничну ІБР — $P_{\text{непб}}^0 = 0,975$, то на підставі статистичних даних значень інтенсивності відмов елементів паливної системи літака (див. таблицю) номери доданих елементів у порядку максимальної зміни ІБР розміщуються таким чином:

$$n(t) = [7, 1, 1, 2, 1, 7, 2, 1].$$

При цьому ІБР системи набуває значення

$$P_{\text{непб}} = [0,2014, 0,4532, 0,6105, 0,7539, \\ 0,8348, 0,9040, 0,9470, 0,9757].$$

При загальній кількості запасних частин, що дорівнюють $k_s = 8$, кількість доданих елементів за типами подана: $k(i) = [4, 2, 0, 0, 0, 0, 2, 0]$ і їх графік (рис. 10, а).

Якщо в розрахунках ІБР паливної системи використовувати схему послідовного, в значенні

надійності, з'єднання елементів, то вказані послідовності номерів доданих елементів у порядку максимальної зміни ІБР і їх графік (рис. 10, б) набудуть вигляду

$$n(t) = [1, 2, 5, 6, 4, 1, 7, 1, 2, 5, 6, 4, 8, \\ 1, 7, 2, 5, 6, 1].$$

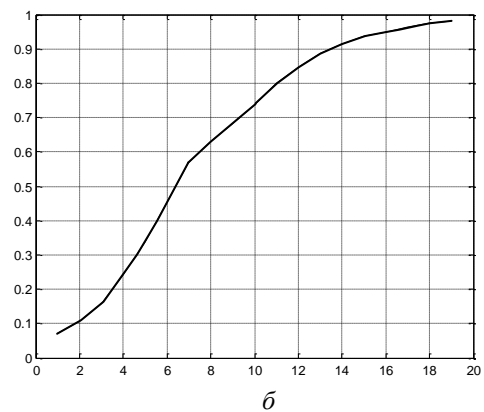
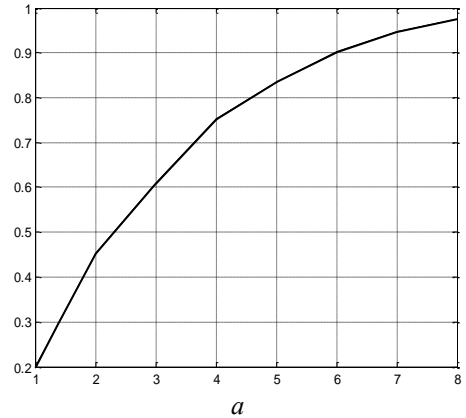


Рис. 10. Зміна ІБР паливної системи літака при а — схемному і б — послідовному з'єднанні

Висновок

Розроблена модель поставок запасних елементів при обмеженій сумі фінансування на основі максимізації ймовірності безвідмовної роботи при нормальному розподілі часу між відмовами і пуассонівському потоці відмов.

ЛІТЕРАТУРА

1. Рыжиков Ю. И. Теория очередей и управление запасами / Ю. И. Рыжиков. (Серия «Учебники для вузов»). — СПб. : Питер, 2001. — 384 с.
2. Смирнов Н. Н. Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов: учеб. пособие. — Ч. 1. / Н. Н. Смирнов. — М. : МГТУ ГА, 2001. — 100 с.
3. Техническая эксплуатация самолетов за рубежом: учеб. пособие / под общ. ред. д. т. н., проф. Н. Н. Смирнова. — М. : МИИГА, 1992. — 112 с.
4. Остренковский В. А. Теория надежности: учеб. для вузов / В. А. Острейковский. — М. : Высш. шк., 2003. — 463 с.
5. Надежность технических систем: монография / Е. Переверзев, А. Алпато, Ю. Даниев, П. Новак. — Днепропетровск : Пороги, 2002. — 396 с.

