

УДК 629.735.05:621, 3(045)

І. О. Мачалін, канд. техн. наук, доц.

ОПТИМІЗАЦІЯ ІЄРАРХІЧНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ ВИРОБІВ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

НАУ, Інститут інформаційно-діагностичних систем, e-mail: tks@nau.edu.ua

Наведено ієрархічну класифікацію можливих варіантів побудови систем управління запасами виробів авіаційної техніки. Розроблено показник для оцінювання ефективності системи. Вибрано оптимальний варіант управління запасами.

Hierarchical classification of possible variants of construction of the control of inventories of wares of aviation technique systems is made. An index is developed for the estimation of efficiency of the system. The choice of optimum variant of control of inventories is made.

Постановка проблеми

Оптимальне забезпечення процесу експлуатації авіаційної техніки запасними агрегатами і компонентами – одна з найважливіших проблем, оскільки від її рішення значною мірою залежить регулярність і безпека польотів повітряних кораблів (ПК). Вирішення цієї проблеми можливе тільки в разі комплексного, науково-обґрунтованого підходу до побудови системи управління запасами виробів (СУЗВ) авіаційної техніки. Перехід від існуючого централізованого забезпечення виробами до децентралізованого призвів до певних складнощів для авіакомпаній щодо підтримання регулярності польотів. Постачання виробів для ПК закордонного виробництва, що експлуатуються, здебільшого організовані відповідними сервісними центрами. Проте для вітчизняних ПК нового покоління, що вводяться в експлуатацію, системного підходу до організації постачань немає, оскільки запасними виробами авіакомпанії забезпечує тільки завод-виробник (ЗВ). Усе це не дозволяє досягти високої ефективності експлуатації ПК. Тому обґрунтування стратегії побудови СУЗВ на сьогодні є актуальною проблемою. Вона безпосередньо пов'язана з програмою введення до експлуатації ПК нового покоління.

Аналіз досліджень і публікацій

Розробленню математичних моделей забезпечення запасами виробів авіаційної техніки присвячено ряд праць вітчизняних і зарубіжних авторів [1–4]. У праці [1] розглядається узагальнена модель управління запасами, у [2; 3] – однорівнева модель управління запасами, що дозволяє оптимізувати кількість запасних виробів на рівні базового аеропорту, у праці [4] досліджено дворівневі математичні моделі управління запасами. Але в них не наводяться показники, що дозволяють оптимізувати запаси в багаторівневій

ієрархічній СУЗВ. Крім того, у них немає комплексного підходу до побудови багаторівневої СУЗВ для випадків, коли забезпечення виробами здійснюється з різних рівнів системи.

Цілі

Нове покоління виробів авіаційного радіоелектронного обладнання, як правило, має блоково-модульну структуру. Кожний з виробів – це один або декілька блоків, що легко змінюються. У міжнародній практиці їх називають Line Replacible Units (LRUs). Кожен LRU має вбудовану систему контролю (ВСК), яка дозволяє контролювати працездатність (КП) на борту ПК. У свою чергу, LRU складається з набору модулів, які називають знімальними складальними модулями (ЗСМ). Можливий і подальший конструктивний поділ складових частин LRU.

Позначимо: F – кількість запасних LRUs одного типу, що експлуатуються; Q – кількість посадочних місць на приписному парку ПК для LRUs цього типу. Тепер для цивільної авіації відношення F/Q коливається у межах

$F/Q = (0,2 \dots 0,4)$. Розроблення СУЗВ буде доцільним в тому випадку, якщо за вищого рівня регулярності польотів буде досягнуто менше значення показника F/Q .

Передусім високу ефективність СУЗВ можна досягнути за рахунок науково-обґрунтованого підходу до її побудови. Для забезпечення регулярності польотів ПК потрібно створити певні запаси виробів. Надмірний запас виробів потребує високих капітальних вкладень. Проте в разі недостатнього запасу виробів капітальні вкладення знижуються, але ризик дефіциту зростає, а отже, збільшуються втрати через порушення регулярності польотів. Для будь-якого із вказаних крайніх випадків характерні значні

економічні втрати. Таким чином, завдання визначення оптимального обсягу запасів виробів може ґрунтуватися на мінімізації загальних витрат, що включають витрати, зумовлені втратами через порушення регулярності польотів ПК і витратами внаслідок придбання надмірного запасу.

Запаси виробів можуть зберігатися на різних рівнях, з кожного з яких їх можна постачати на ПК, що простіше. Така система є ієрархічною, для правильної організації постачань необхідно чітко розмежувати всі рівні взаємодії і класифікувати можливі варіанти її побудови.

Таким чином, метою статті є класифікація можливих варіантів побудови СУЗВ і розроблення математичних моделей для оцінювання ефективності та вибору оптимального варіанта.

Класифікація варіантів СУЗВ

Система управління запасами виробів авіаційної техніки в Україні може включати декілька рівнів. Першим рівнем зберігання запасів є ЗВ. Далі для організації системи забезпечення можуть створюватися регіональні центри (РЦ), які можуть поєднуватися з центрами технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р), також міжрегіональні центри (МРЦ), які здійснюють постачання виробів у РЦ. Регіональні центри, у свою чергу, забезпечують базові аеропорти (БА). І, нарешті, самий нижній рівень це – транзитні аеропорти (ТА). При цьому забезпечення будь-якого рівня може здійснюватися і безпосередньо із ЗВ. У загальному випадку кількість рівнів зберігання запасів може бути і більшим, але реально вона коливається від чотирьох (МРЦ, РЦ, БА, ТА – варіант 1111) до одного. Одиниця вказує на наявність запасів на даному рівні. Оскільки запас у ТА створюється не завжди і лише для $LRUs$, що не входять у перелік припустимих несправностей, то четвертий рівень, порівнюючи варіанти СУЗВ, урахувати не будемо. Тут і далі вважатимемо, що ЗВ є невичерпним джерелом поповнення запасів.

Таким чином, альтернативними є такі варіанти СУЗВ: 111X, 101X, 011X, 001X, де X – байдужий стан запасу в ТА. Основні запаси виробів доцільно зберігати в центрі ТО і Р. Для класифікації можливих варіантів СУЗВ на рівні центра ТО і Р необхідно вибрати ознаки класифікації. Як показав аналіз параметрів, що впливають на структуру і обсяг обмінного фонду, ознаками класифікації можуть бути: a – ознака наявності у LRU даного типу гарантії ЗВ; b – ознака наявності у LRU ВСК; c – ознака наявності в центрі ТО і Р наземних автоматизованих систем

контролю (НАСК); d – ознака місця відновлення демонтованого з борту ПК LRU або його компонентів.

Ознака a набуває таких значень: $a = 1$ – є гарантія ЗВ; $a = 2$ – немає гарантії ЗВ. За наявності гарантії демонтований LRU або його компоненти відновлюється за рахунок ЗВ. Без гарантії ЗВ відновлення провадиться за рахунок авіа-підприємства.

Отже, на першому ступені класифікації безліч варіантів (W_0) СУЗВ на рівні центра ТО і Р розділяється на два класи $W_1 \cup W_2$, де \cup – знак об'єднання підмножин.

Ознака b набуває таких значень: $b = 1$ – ВСК є; $b = 2$ – ВСК немає. Якщо $b = 1$, демонтаж LRU з борту ПК проводитиметься після висновку ВСК про його непрацездатність. Якщо $b = 2$, демонтаж буде проводитися за наявності зауважень екіпажу або в разі потреби виконання планового технічного обслуговування.

На другому ступені класифікації залежно від значення ознаки b кожний з класів і W_2 підрозділяється на два підкласи

$$W_1 = W_{11} \cup W_{12}, W_2 = W_{21} \cup W_{22}.$$

Кількість підкласів c визначається в першу чергу за кількістю рівнів ТО і Р.

Перший рівень полягає в оперативному ТО на стоянці ПК шляхом заміни демонтованого LRU , визнаного несправним за наслідками контролю за допомогою ВСК. Далі LRU надходить на другий рівень відновлення, який передбачає відновлення демонтованих ЛСБ заміною ЗСМ, що відмовили. Третій рівень – це відновлення ЗСМ через заміну, якщо це можливо, невідновлюваних елементів (НЕ), що відмовили.

Ознака c може набувати таких значень: $c = 1$ – НАСК немає; $c = 2$ – є НАСК, що здійснює тільки контроль працездатності LRU (позначимо такий засіб контролю як НАСК-КП); $c = 3$ – є НАСК, що здійснює контроль працездатності LRU і пошук місця відмови в LRU з глибиною до ССМ (позначимо цей НАСК через НАСК-ЗСМ); $c = 4$ – є НАСК-ЗСМ і засіб контролю, контроль працездатності ЗСМ і пошук місця відмови в них з глибиною до НЕ (позначимо ці засоби контролю через НАСК-НЕ).

Якщо $c = 1$, НАСК у центрі ТО і Р немає, тому відновлювати демонтовані $LRUs$ у центрі ТО і Р неможливо. Якщо $c = 2$, у центрі ТО і Р є НАСК-КП, що здійснює КП демонтованих $LRUs$. Такий засіб контролю доцільно використовувати для повторної перевірки демонтованих $LRUs$ або $LRUs$, що надходять із місця зберігання.

Оскільки в цьому випадку пошук місця відмови в LRU з глибиною до ЗСМ неможливий, то LRU , що відмовили, можна відновлювати тільки на ЗВ. Якщо $c = 3$, у центрі ТО і Р використовується НАСК-ЗСМ. Відновлення LRU , що відмовили, проводять заміною забракованих ЗСМ на працездатні. Ремонт ЗСМ, що відмовили, здійснюється на ЗВ. Якщо $c = 4$, зовнішні засоби контролю в центрі ТО і Р включають НАСК-НЕ. Відновлення ЗСМ проводять заміною НЕ, що відмовили.

Отже, за значень ознаки $c = 1, 2$ в центрі ТО і Р можна здійснювати тільки перший рівень відновлення $LRUs$, якщо $c = 3$, – перший і другий рівні, а якщо $c = 4$, – усі три рівні відновлення $LRUs$.

На третьому ступені класифікації підкласи W_{ab} ($a = 1, 2; b = 1, 2$) підрозділяють на такі групи: $W_{11} = W_{111} \cup W_{112}$, $W_{12} = W_{122}$, $W_{21} = \bigcup_{c=1}^4 W_{21c}$,

$$W_{22} = \bigcup_{c=2}^4 W_{22c}.$$

Підклас W_{12} містить тільки одну групу, оскільки поєднання значень ознак $b = 2$ і $c = 1$ для експлуатації неприйнятне. Не можна експлуатувати $LRUs$, які не мають вбудованих і зовнішніх засобів контролю. З аналогічної причини не розглядається варіант W_{221} .

Ознака d набуває таких значень: $d = 1$ – відновлення демонтованого LRU або ЗСМ проводять на ЗВ; $d = 2$ – відновлення демонтованих LRU виконують у центрі ТО і Р заміною ЗСЕ, що відмовили, а ЗСЕ відновлюють на ЗВ; $d = 3$ – демонтовані LRU відновлюють повністю в центрі ТО і Р.

Як видно, ознака d відносно строго підпорядкована ознаці c . Тому на четвертому ступені класифікації групи W_{21c} ($c = \overline{1, 4}$) і W_{22c} ($c = \overline{1, 4}$) підрозділяють на такі підгрупи:

$$\begin{aligned} W_{111} &= W_{1111}, & W_{112} &= W_{1121}, & W_{122} &= W_{1221}, \\ W_{211} &= W_{2111}, & W_{212} &= W_{2121}, & W_{213} &= W_{2132}, \\ W_{214} &= W_{2143}, & W_{222} &= W_{2221}, & W_{223} &= W_{2232}, \\ W_{224} &= W_{2243}. \end{aligned}$$

Таким чином маємо ієрархічну систему класифікації можливих варіантів СУЗВ на рівні центра ТО і Р.

Показники ефективності СУЗВ

Як показник ефективності СУЗВ використаємо повні середні витрати $TLOC$ (*Total Lifetime Operating Costs*):

$$TLOC_1 = mN \left[C_S \Psi \Delta T + C_L (t_M + t_{DM} + t_{КП}) \right] \times \frac{T}{MTBUR} + (F + MF) C_0, \quad (1)$$

де m – кількість однотипних $LRUs$, установлених на борту експлуатованих ПК; N – кількість експлуатованих ПК; C_S – середня вартість простою ПК; C_L – середня вартість робіт з оперативного технічного обслуговування; $t_{КП}$ – тривалість контролю працездатності LRU за допомогою ПКК на стоянці ПК в базовому аеропорті; t_M , t_{DM} – тривалості монтажу і демонтажу LRU на борту ПК; T – час експлуатації LRU без урахування гарантійного періоду; F – планована кількість запасних LRU ; MF – незапланована кількість запасних LRU ; C_0 – вартість одного LRU ; $MTBUR$ (*Mean Time Between Unscheduled Repairs/replacements*) – середній час напрацювання на непланове знімання LRU з борту ПК; Ψ – індикаторна функція, яка може набувати таких значень:

$$\Psi(F) = \begin{cases} 0, & t_C \geq [t_{КП} + t_{DM} + \Delta t_3(F) + t_M]; \\ 1, & t_C < [t_{КП} + t_{DM} + \Delta t_3(F) + t_M], \end{cases}$$

де $\Delta t_3(F)$ – середній час затримки в задоволенні заявки на постачання запасного LRU на борту ПК. Параметр $\Delta t_3(F)$ визначається за методикою, наведеною в праці [4]. Для розрахунку цього параметра необхідно додатково задати середню тривалість відновлення LRU на ЗВ, середню тривалість КР LRU за допомогою НАСК ($t_{КРНАСК}$).

Значення $MTBUR$ при експоненціальному законі напрацювання на відмову визначається з виразу [6]

$$MTBUR = \frac{1 - e^{-\lambda \tau}}{\lambda(1 - (1 - \alpha) \exp(-\lambda \tau))},$$

де α – умовна (априорна) імовірність того, що працездатний LRU буде помилково забракований ПКК; τ – інтервал між КП у базовому аеропорті; λ (1/год) – інтенсивність раптових відмов LRU .

Змінна ΔT у виразі (1) є середнім часом простою ПК через невчасну заміну LRU , що відмовив, і визначається за формулою

$$\Delta T = (t_{КП} + t_{DM} + \Delta t_3(F) + t_M) - t_C, \quad (2)$$

де P_C – час стоянки ПК в БА.

Оптимальну кількість запасних LRU F^* визначаємо, розв'язавши задачу

$$TLOC(F^*) = \min_F TLOC(F). \quad (3)$$

Приклад 1. Визначимо F^* для радіоприймального блока інтегрованої бортової системи посадки і навігації. Початкові дані: $N = 10$; $m = 3$; $\lambda = 6,09 \cdot 10^{-4}$; $C_0 = 18300$ ум. од.; $t_M = t_{DM} = 0,25$ год; $t_{кп} = 0,2$ год; $t_c = 1$ год; $C_L = 5$ ум. од./год.; $C_S = 2000$ ум. од./год.; $\alpha = 0,01$; $T = 20000$ год; $t_B^{3B} = 36$ год.

У результаті розв'язання задачі (3) отримуємо: $F^* = 4$; $\Psi(F^*) = 0$;

$TLOC(F^*) = 610$ ум. од./год. Оскільки $N = 10$ і $m = 3$, то параметр $F^*/Q = 0,13$.

З цього прикладу видно, що оптимальна побудова СУЗВ дозволить істотно знизити рівень запасів $LRUs$ при забезпеченні заданої регулярності польотів.

Вибір оптимального варіанта СУЗВ

Визначимо повні витрати для кожного з альтернативних запасів СУЗВ.

Варіант 111X. Формулу (1) виведено для випадку, коли всі заявки на запасні $LRUs$ задовольняються з обмінного фонду БА з імовірністю, що дорівнює одиниці.

Насправді, через випадкові природні відмови $LRUs$ можлива ситуація, коли чергова заявка на замовлення залишається незадоволеною. Тоді у варіанті СУЗВ роблять екстрений запит у РЦ і екстрена доставка $LRUs$ із страхового запасу РЦ. Якщо в страховому запасі РЦ також немає $LRUs$ цього типу, то екстрена доставка здійснюється з МРЦ. І нарешті, якщо немає необхідних $LRUs$ у страхових запасах РЦ і МРЦ, то екстрена доставка здійснюється із ЗВ. Очевидно, що з правильно організованою СУЗВ має виконуватись нерівність

$$\Delta t_{пр}^{РЦ} < \Delta t_{пр}^{МРЦ} < \Delta t_{пр}^{ЗВ},$$

де $\Delta t_{пр}^{РЦ}$, $\Delta t_{пр}^{МРЦ}$, $\Delta t_{пр}^{ЗВ}$ – відповідно час, що витрачається на екстрену доставку $LRUs$ з РЦ, МРЦ і ЗВ у БА.

Нехай у виразі (1) $\Psi \Delta T = \Delta t_{пр}^{ПК}$ – середня тривалість простою ПК через відсутність запасного LRU .

Для варіанта 111X параметр $\Delta t_{пр}^{ПК}$ визначається за формулою математичного сподівання дискретної випадкової величини:

$$\Delta t_{пр}^{ПК}(111X) = P^{БА} \Delta t_{пр}^{БА}(F^*) + P^{РЦ} \Delta t_{пр}^{РЦ} + P^{МРЦ} \Delta t_{пр}^{МРЦ} + P^{ЗВ} \Delta t_{пр}^{ЗВ}, \quad (4)$$

де $P^{БА}$ – безумовна імовірність наявності запасу $LRUs$ у БА; $P^{РЦ}$ – безумовна вірогідність сумісного настання наступних двох подій: немає запасу в БА, але є запас РЦ; $P^{МРЦ}$ – безумовна імовірність настання трьох подій: немає запасу в БА, немає запасу в РЦ, але є запас МРЦ; $P^{ЗВ}$ – безумовна вірогідність настання чотирьох подій: немає запасу в БА, РЦ і МРЦ, але є запас у ЗВ.

Середню тривалість простою ПК у БА за оптимального запасу в обмінному фонді з урахуванням виразу (2), визначаємо за формулою

$$\Delta t_{пр}^{ПК}(F^*) = \Psi[t_{кп} + t_D + \Delta t_3(F^*) + t_M - t_c]. \quad (5)$$

Для імовірності, $P^{МРЦ}$ і $P^{ЗВ}$ має виконуватись очевидна умова нормування

$$P^{РЦ} + P^{МРЦ} + P^{ЗВ} = 1 - P^{БА}. \quad (6)$$

Варіант 101X. Параметр $\Delta t_{пр}^{ПК}$ визначається за формулою

$$\Delta t_{пр}^{ПК}(101X) = P^{БА} \Delta t_{пр}^{БА}(F^*) + P^{МРЦ} \Delta t_{пр}^{МРЦ} + P^{ЗВ} \Delta t_{пр}^{ЗВ}. \quad (7)$$

Умова нормування має вигляд:

$$P^{МРЦ} + P^{ЗВ} = 1 - P^{БА}. \quad (8)$$

Варіант 011X. Параметр $\Delta t_{пр}^{ПК}$ обчислюємо за формулою

$$\Delta t_{пр}^{ПК}(011X) = P^{БА} \Delta t_{пр}^{БА}(F^*) + P^{РЦ} \Delta t_{пр}^{РЦ} + P^{ЗВ} \Delta t_{пр}^{ЗВ}. \quad (9)$$

Умова нормування має вигляд:

$$P^{РЦ} + P^{ЗВ} = 1 - P^{БА}. \quad (10)$$

Варіант 001X. Параметр $\Delta t_{пр}^{ПК}$ визначаємо як

$$\Delta t_{пр}^{ПК}(001X) = P^{БА} \Delta t_{пр}^{БА}(F^*) + P^{ЗВ} \Delta t_{пр}^{ЗВ}. \quad (11)$$

Умова нормування має вигляд:

$$P^{ЗВ} = 1 - P^{БА}. \quad (12)$$

Приклад 2. Виконаємо порівняльний аналіз варіантів СУЗВ при $\Delta t_{пр}^{ЗВ} = 48$ год. і решти початкових даних таких самих, як і в прикладі 1.

У таблиці наведено результати розрахунків за формулами (1), (5)–(12) за різної довірчої імовірності знаходження запасів $LRUs$ у БА ($P^{БА}$). Якщо $P^{БА} = 0,9(0,95; 1,0)$ значення решти імовірності було взято такими:

- для варіанта 111X- $P^{РЦ} = 0,05(0,025)$;
 $P^{МРЦ} = 0,03(0,015)$; $P^{ЗВ} = 0,02(0,01)$;
- для варіанта 101X – $P^{МРЦ} = 0,06(0,03)$;
 $P^{ЗВ} = 0,04(0,02)$;

- для варіанта 011X – $P^{PI} = 0,06(0,03)$;
 $P^{3B} = 0,04(0,02)$;
 – для варіанта 111X – $P^{3B} = 0,1(0,05)$.

Значення повних середніх витрат

Варіант СУЗВ	TLOC, ум. од./год		
	$P^{BA} = 0,9$	$P^{BA} = 0,95$	$P^{BA} = 1,0$
111X	16810	8710	610
101X	27010	13810	610
011X	23410	12010	610
001X	48610	24610	610

Із таблиці видно, що при $P^{BA} < 1$ оптимальним є варіант трирівневої СУЗВ – 111X. Слід так само відзначити, що зі зменшенням імовірності наявності запасу в БА абсолютний виграв у використанні цього варіанта зростає. Наведені розрахунки можна використовувати для порівняльного аналізу можливих варіантів СУЗВ, метою якого є попередній вибір якомога оптимальнішого варіанта.

Висновки

Виконано ієрархічну класифікацію можливих варіантів побудови СУЗВ. Обґрунтовано чотирирівневу структуру побудови СУЗВ, на підставі якої запропоновано чотири альтернативні варіанти її побудови. Отримано вирази для оцінки ефективності СУЗВ. Розроблено критерій вибору оптимального варіанта. Показано, що варіант трирівневої побудови СУЗВ найбільш ефективний. Наведено приклади розрахунку показників.

Отримані результати важливі для процесу обґрунтування стратегії побудови СУЗВ ПК нового покоління. Подальшими перспективами розвитку досліджень у цьому напрямі є оптимізація кількості запасних виробів на кожному рівні СУЗВ і обґрунтування вимог до побудови центрів технічного обслуговування і ремонту ПК нового покоління.

Література

1. *Линдерс М. Р., Фирон Харольд Е.* Управление снабжением и запасами // Логистика. – С. Пб.: Полигон. – 1999. – 768 с.
2. *Helfrick A.* Principals of Avionics // Third Edition - Avionics Communications Inc. – 2003. – 414 p.
3. *Мачалин И. А.* Оптимальные задачи управления запасами систем авионики // Матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф. “Авіа-2006” (Київ, 25–27 вересня 2006). – С. 12.17 – 12.21.
4. *Мачалин И. А.* Математические модели двухуровневой системы управления запасами систем авионики // Електроніка і системи управління.–2006.– №4–С.164–172.
5. *Мачалин И. А.* Математические модели стратегий технического обслуживания современной авионики // Математичні машини і системи. – 2005. – №2. – С. 130–138.
6. *Уланский В. В., Мачалин И. А.* Математическая модель процесса эксплуатации легкозаменяемых блоков систем авионики // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2006. – № 6(32).–С. 74–80.

Стаття надійшла до редакції 08.02.07.