

УДК 629.735.05:621.3(045)

І.О. Мачалін, канд. техн. наук, доц.

АНАЛІЗ ТА ОЦІНЮВАННЯ ВИТРАТ ЕКСПЛУАТАНТА ВИРОБІВ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ В ПЕРІОД ГАРАНТІЙНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Проаналізовано і оцінено витрати експлуатанта в період дії гарантійних зобов'язань постачальника виробів авіаційної техніки. Розроблено аналітичні вирази, що дозволяють оцінити ці витрати з урахуванням показників достовірності контролю, типів резервування систем і періодичності контролю.

An analysis and estimation of expenses of exploiter is made in the period of action of obligations of guarantees of supplier of wares of aviation technique. Analytical expressions, allowing to estimate these expenses taking into account the indexes of control authenticity, types of reserving of the systems and control periodicity, are developed.

Постановка проблеми

У період гарантійного обслуговування повітряних суден (ПС) більшість витрат з підтримки льотної придатності та потрібного рівня технічного стану виробів авіаційної техніки бере на себе постачальник. Попри це можливі ситуації, коли деякі складові експлуатаційних витрат у цей період доводиться оплачувати експлуатанту (авіакомпанії).

Значною мірою ефективність експлуатації ПС залежатиме від вибраної стратегії гарантійного обслуговування, яка визначається наявністю засобів експлуатаційного контролю, обсягом обмінного фонду запасних виробів і витратами на технічне обслуговування (ТО). Тому найважливішою проблемою в процесі планування гарантійного обслуговування для авіакомпаній є аналіз і оцінювання експлуатаційних витрат, які вони можуть мати в цей період. Ці питання безпосередньо пов'язані з питаннями формування програм ТО і ремонту (ТОіР) ПС нових типів, що надходять до експлуатації.

Аналіз досліджень і публікацій

У роботах [1–3] розглянуто питання оцінювання експлуатаційних витрат у процесі гарантійного обслуговування виробів авіаційної техніки. Проте в цих роботах запропоновані моделі розроблено з припущеннями, що в період гарантійного обслуговування ПС витрати з відновлення авіаційної техніки має тільки постачальник. Крім того, в оцінюванні експлуатаційних витрат не враховується вплив періодичності, достовірності контролю і структур резервування систем з погляду надійності.

Отже, натепер немає методики визначення фінансових витрат експлуатанта в період гарантійного обслуговування виробів авіаційної техніки і, зокрема, систем авіоніки.

Основні положення з забезпечення гарантійного обслуговування авіаційної техніки викладено в ДСТУ 3372-96. Як правило, додаткові умови щодо організаційних і фінансових взаємин між постачальником та експлуатантом визначено в договорі на постачання ПС. Останнім часом відповідно до рекомендацій EASA(PART-M) експлуатант може самостійно формувати програму ТОіР (Maintenance Plan) з урахуванням своїх особливостей для ефективнішої експлуатації ПС. При цьому одним із завдань є вибір оптимального варіанта програми ТОіР. Для цього слід проаналізувати й оцінити всі складові експлуатаційних витрат. Це завдання є техніко-економічним, оскільки ці витрати залежать від технічних параметрів експлуатованих систем та експлуатаційного забезпечення.

Мета роботи – аналіз та оцінювання складників експлуатаційних витрат експлуатанта виробів авіаційної техніки з урахуванням технічних характеристик самих систем (надійності, структури резервування, достовірності вбудованого контролю) і варіантів експлуатаційного забезпечення на прикладі експлуатації легкозамінних блоків (ЛЗБ) систем авіоніки.

Аналіз складових витрат експлуатанта

Гарантійний термін експлуатації є початковим етапом терміну служби ПС. У цей період експлуатант накопичує дані про реальні витрати на ТОіР. Здебільшого постачальники авіаційної техніки надають розрахункові очікувані витрати на ТОіР. У разі різкого перевищення реальних витрат на ТОіР над розрахунковими експлуатант має право вимагати компенсації цих витрат. Взаємодію в цьому випадку між сторонами визначено в договорі на постачання ПС.

Основними можливими причинами невідповідності між розрахунковими і реальними витратами на ТОіР можуть бути завищення порівнянно

з дійсними показниками надійності бортового устаткування і достовірності його контролю за допомогою вбудованої системи контролю (ВСК). Так, середнє напрацювання на відмову ЛЗБ авіоніки на первинному етапі експлуатації може бути на порядок менше від розрахункового, вказаного фірмами-постачальниками. А близько 50 % демонтованих ЛЗБ виявляються помилково знятими, оскільки під час перевірки в лабораторії їх відмови не підтверджуються.

Фінансові витрати і втрати експлуатанта в період дії гарантійних зобов'язань на поставлену авіаційну техніку включають такі складові:

- витрати на закупівлю необхідної кількості запчастин;
- витрати на оперативне ТО;
- втрати унаслідок незапланованих простоїв ПС (порушення регулярності польотів);
- транспортні витрати на відправку ЛЗБ, що відмовили (забракованих ВСК), і доставку відновлених блоків.

Розрахунок необхідної кількості запасних ЛЗБ зазвичай виконує постачальник авіаційної техніки. Результати розрахунків за кожним типом устаткування постачальник оформляє у вигляді рекомендованого переліку запчастин.

Під час розрахунку необхідної кількості запчастин особлива увага має бути приділена достовірності початкових даних і побудові математичної моделі експлуатації бортового обладнання, адекватній системі експлуатації цього обладнання у експлуатанта. Це пов'язано з тим, що у разі недостатньої кількості запасних частин у авіакомпанії простоюватимуть ПС. Розплачуватися за простій буде як експлуатант (порушення регулярності польотів), так і постачальник (штраф за перевищення гарантійної тривалості відновлення або оплата оренди експлуатантом запасного виробу в іншій авіакомпанії). Наприклад, вартість оренди запасних ЛЗБ систем авіоніки в авіакомпанії Lufthansa становить 1 % на добу від їх купівельної ціни.

Якщо є надлишок запасних ЛЗБ, експлуатант може вимагати викупити їх у постачальника. В обох випадках постачальник зазнаватиме фінансових втрат.

У період дії гарантійних зобов'язань експлуатант згідно з регламентом виконує всі форми оперативного ТО, а відновлення демонтованих виробів виконує або постачальник, або постачальник оплачує ремонт виробів, що відмовили.

Утрати внаслідок незапланованих простоїв ПС пов'язані з відмовами функціональних систем і браком запасних ЛЗБ в обмінному фонді. Розмір фінансових втрат у таких випадках дорівнює недоотриманому прибутку від використання ПС протягом часу простою.

Скорочення часу простою ПС можна досягнути за рахунок використання наземних автоматизованих систем контролю (НАСК) для повторної перевірки демонтованих ЛЗБ.

За наявності НАСК в авіакомпанії «помилково» зняті блоки після повторної перевірки надходять до обмінного фонду. Оскільки тривалість контролю працездатності ЛЗБ за допомогою НАСК відносно мала, то і середня тривалість відновлення систем також зменшується. При цьому зменшується кількість запасних ЛЗБ, потрібних для забезпечення регулярності польотів.

Транспортні витрати на відправку демонтованих ЛЗБ і доставку відновлених ЛЗБ залежать від варіанта організації гарантійного обслуговування.

Для варіанта W_1 (в авіакомпанії немає НАСК і відновлення ЛЗБ проводиться на заводі-постачальнику) транспортні витрати будуть найбільшими, оскільки для відновлення на завод-постачальник відправлятимуться як блоки, що справді відмовили, так і помилково зняті. Для варіанта W_3 , якщо в авіакомпанії є НАСК, що дозволяє проводити контроль працездатності (КП) і відновлення ЛЗБ з глибиною до з'ємно-складальних модулів (ЗСМ), транспортні витрати будуть найменшими. Тут відновлення демонтованих блоків буде повністю проводитися у експлуатанта. На завод-постачальник відправлятимуться тільки ЗСМ, що відмовили.

Отже, фінансові втрати експлуатанта протягом гарантійного терміну експлуатації можна подати у вигляді

$$F_{LC} = S_p + O_M + F_C + T_C, \quad (1)$$

де S_p – витрати на закупівлю потрібної кількості ЛЗБ;

O_M – витрати на оперативне ТО;

F_C – втрати внаслідок незапланованих простоїв ПС;

T_C – транспортні витрати на відправку ЛЗБ, що відмовили (забракованих ВСК), і доставку відновлених.

Складові S_p , O_M , F_C , T_C , що входять у формулу (1), визначаються на інтервалі гарантійного терміну експлуатації або гарантійного напрацювання T_0 .

Витрати на запасні легкозамінні блоки

Для визначення витрат на закупівлю запасних ЛЗБ слід знати обсяг постачань додаткових запасних блоків у кожній точці t інтервалу T_0 .

Обсяг постачань додаткових запасних ЛЗБ V_t^* до моменту початку t -го ($t > 1$) етапу гарантійної експлуатації, визначають за формулою

$$V_t^* = \begin{cases} n_t^* - n_{t-1}^*, & \text{якщо } n_t^* > n_{t-1}^*; \\ 0, & \text{якщо } n_t^* \leq n_{t-1}^*, \end{cases}$$

де n_t^* – кількість запасних ЛЗБ, поставлених до моменту початку першого етапу гарантійної експлуатації.

Витрати на закупівлю потрібної кількості запасних ЛЗБ протягом інтервалу T_0 визначають за формулою

$$S_P = \sum_{t=1}^{T_0} C_t (V_t^* + M_{nt}^*) (1 + \varepsilon)^\theta, \quad (2)$$

де C_t – купівельна ціна ЛЗБ в точці t ;

M_{nt}^* – математичне сподівання кількості екстрених доставок запасних ЛЗБ у точці t інтервалу T_0 ;

ε – норма дисконту часу, що виражається в частках одиниці або у відсотках за рік.

Кількість місяців, кварталів або років, що відокремлюють витрати цього місяця, кварталу або року від розрахункового моменту:

$$\theta = 1 - t.$$

У разі допущення рівномірного розподілу кількості екстрених доставок запасних ЛЗБ протягом інтервалу T_0 параметр M_{nt}^* обчислюють за формулою

$$M_{nt}^* = \frac{M_{n1}^*}{T_0}. \quad (3)$$

З урахуванням формули (3) вираз (2) матиме вигляд

$$S_P = \frac{M_{n1}^*}{T_0} \sum_{t=1}^{T_0} C_t V_t^* (1 + \varepsilon)^{1-t}.$$

Параметри V_t^* і M_{n1}^* можна визначити, використовуючи методику, наведену в роботі [4].

Витрати на оперативне технічне обслуговування

Оперативне ТО включає:

– контроль працездатності ЛЗБ за допомогою ВСК на стоянці ПС у базовому аеропорту

з періодичністю t_n , що дорівнює середньому часу польоту ПС між ТО;

– демонтаж забракованого ВСК ЛЗБ;

– монтаж запасного ЛЗБ з обмінного фонду.

Після монтажу запасного ЛЗБ знову виконується його КП.

Оскільки випадковий процес зміни станів ЛЗБ $L(t)$ передбачається таким, що регенерує, питомі середні витрати на оперативне ТО одного ЛЗБ в точці t інтервалу T_0 становлять [5]:

$$O_{m1} = \frac{C_{3,t} M_{S3} + C_{4,t} M_{S4}}{M_{S0}}, \quad (4)$$

де $C_{3,t}$ – середні витрати за одиницю часу на КП ЛЗБ за допомогою ВСК на стоянці ПС у базовому аеропорту;

M_{S3} – середня тривалість контролю працездатності ЛЗБ за допомогою ВСК на стоянці ПС у базовому аеропорту;

$C_{4,t}$ – середні витрати за одиницю часу на демонтаж і монтаж ЛЗБ на борту ПС у базовому аеропорту;

M_{S4} – середній час на демонтаж і монтаж ЛЗБ на ПС у базовому аеропорту;

M_{S0} – середній цикл регенерації (середній час між окремими відновленнями) ЛЗБ.

Середні тривалості $M_{S0} - M_{S3}$, що входять у вираз (4), обчислюють за формулами [5]:

$$M_{S0} = M_{S1} + M_{S2} + M_{S5};$$

$$M_{S1} = \frac{1 - e^{-\lambda t_n}}{\lambda [1 - (1 - \alpha) e^{-\lambda t_n}]};$$

$$M_{S2} = \frac{1}{1 - (1 - \alpha) e^{-\lambda t_n}} \times \left[\frac{\tau (1 - \beta e^{-\lambda t_n})}{1 - \beta} - \frac{1 - e^{-\lambda t_n}}{\lambda} \right];$$

$$M_{S5} = \frac{t_{nb} (1 - e^{-\lambda t_n})}{1 - (1 - \alpha) e^{-\lambda t_n}},$$

де α – умовна ймовірність того, що працездатний ЛЗБ буде помилково забракований ВСК;

β – умовна ймовірність того, що непрацездатний ЛЗБ буде помилково визнаний працездатним;

λ – інтенсивність раптових відмов ЛЗБ;

$t_{\text{ПВ}}$ – середня тривалість правильного відновлення ЛЗБ на заводі-постачальнику або в центрі ТОіР.

Якщо на борту ПС є m однотипних ЛЗБ, гарантію мають N_t ПС і планований наліт одного ПС

дорівнює τ_t , то середні витрати на оперативне ТО в точці t інтервалу T_0 становлять

$$O_{M,m} = \frac{mN_t\tau_t(C_{3,t}M_{S3} + C_{4,t}M_{S4})}{M_{S0}}$$

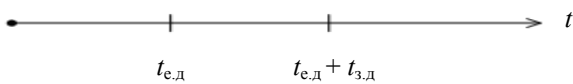
Середні витрати на оперативне ТО протягом інтервалу T_0 визначають за формулою

$$O_M = \frac{m}{M_{S0}} \sum_{t=1}^{T_0} N_t \tau_t (C_{3,t}M_{S3} + C_{4,t}N_{S4}) (1 + \varepsilon)^{1-t}$$

Порушення регулярності польотів

Експлуатант зазнає фінансових втрат за ситуації, коли в обмінному фонді немає жодного запасного ЛЗБ і хоч би одне ПС простоє в очікуванні екстреної доставки запасного ЛЗБ.

На рисунку показано тимчасову вісь, на якій відкладено тривалості екстреної доставки $t_{\text{ед}}$ і тривалість затримки в доставці запасного ЛЗБ $t_{\text{зд}}$. У закордонних авіакомпаніях така ситуація має назву «aircraft on ground».



Діаграма процесу доставки запасного ЛЗБ

Експлуатант зазнає фінансових втрат за кожну одиницю часу на інтервалі $(0, t_{\text{ед}})$. Моменту $t = 0$ відповідає закінчення міжрейсової стоянки ПС. Фінансові втрати споживача на інтервалі $(0, t_{\text{ед}})$ пов'язані з затримкою вильоту ПС, виплатою компенсації пасажиром, порушенням розкладу польотів та ін.

Позначимо через A_t втрати експлуатанта за одиницю часу в точці t внаслідок незапланованого простою ПС. Тоді відповідно до рисунку втрати на інтервалі $(0, t_{\text{ед}})$ становлять $A_t t_{\text{ед}}$. Середні втрати внаслідок порушення регулярності польотів залежать від імовірності появи ситуації «aircraft on ground».

Ця ймовірність для систем з різною структурою [6] обчислюється за такими формулами:

– для послідовної структури:

$$P(AG) = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \frac{M_{S5}^{(i)}}{M_{S0}^{(i)}} \right);$$

– для паралельної структури:

$$P(AG) = 1 - \left(1 - \frac{M_{S5}^{(i)}}{M_{S0}^{(i)}} \right)^m;$$

– для мажоритарної структури « h з m »:

$$P(AG) = \sum_{i=1}^m C_m^i \left(\frac{M_{S5}^{(i)}}{M_{S0}^{(i)}} \right)^i \left(1 - \frac{M_{S5}^{(i)}}{M_{S0}^{(i)}} \right)^{m-i}$$

Числове значення ймовірності $P(AG)$ визначається кількістю запасних ЛЗБ – n . Якщо в обмінному фонді мати велику кількість запасних ЛЗБ, то можна досягти дуже малих значень вірогідності $P(AG)$. Проте при цьому різко збільшуються витрати експлуатанта на закупівлю запасних ЛЗБ. За малої кількості запасних ЛЗБ витрати на їх закупівлю стають меншими, проте збільшується значення ймовірності, а отже, зростають витрати експлуатанта унаслідок порушення регулярності польотів. Тому існує оптимальна кількість ЛЗБ – n^* , що забезпечує мінімізацію фінансових втрат експлуатанта. Методику визначення n^* наведено у роботі [4].

Середні сумарні фінансові витрати споживача внаслідок незапланованих простоїв протягом інтервалу T_0 визначають за формулою

$$F_C = P(AG) \sum_{t=1}^{T_0} N_t \tau_t A_t (1 + \varepsilon)^{1-t} \quad (5)$$

Якщо авіакомпанія одночасно починає експлуатацію ПС, то

$$\{N_t\} = \{N, 0, 0, \dots\}, T_0 = T$$

і формула (5) набуде вигляду

$$F_C = NP(AG) \sum_{t=1}^T \tau_t A_t (1 + \varepsilon)^{1-t}$$

Транспортні витрати експлуатанта

Витрати за транспортування демонтованих і відновлених ЛЗБ (або ЗСМ) можуть мати або постачальник, або експлуатант, або обидві сторони. Якщо в договорі на постачання ПС вказано, що транспортування демонтованих і відновлених

ЛЗБ (або ЗСМ) оплачує постачальник, то транспортні витрати експлуатанта $T_C = 0$.

Якщо транспортування повністю або частково оплачує експлуатант, то

$$T_C = \frac{m}{M_{S_0}} \sum_{t=1}^{T_0} N_t \tau_t (P_{ЛБ} S_{ЛБ, t} + P_{ПВ} S_{ПВ, t}) (1 + \varepsilon)^{1-t}, \quad (6)$$

де $S_{ЛБ, t}$ і $S_{ПВ, t}$ – транспортні витрати, пов'язані з помилковим і правильним відновленням одного ЛЗБ у t -й точці інтервалу T_0 .

Імовірності помилкового $P_{ЛБ, i}$ і правильного $P_{ПВ, i}$ відновлень i -го ЛЗБ, визначувані за такими формулами [5]:

$$P_{ЛБ, i} = \frac{\alpha_i e^{-\lambda_i t_{П}}}{1 - (1 - \alpha_i) e^{-\lambda_i t_{П}}};$$

$$P_{ПВ, i} = \frac{1 - e^{-\lambda_i t_{П}}}{1 - (1 - \alpha_i) e^{-\lambda_i t_{П}}}.$$

Для варіанта стратегії ТОіР W_1 формула (6) перетвориться до вигляду

$$T_C = \frac{m}{M_{S_0}} \sum_{t=1}^{T_0} N_t \tau_t S_t (1 + \varepsilon)^{1-t}. \quad (7)$$

У формулі (7) величина S_t дорівнює витратам на транспортування демонтованого (правильно або помилково) ЛЗБ для відновлення.

Для варіанта стратегії W_2 (в авіакомпанії є НАСК, що дозволяє проводити тільки КП демонтованих ЛЗБ) транспортні витрати експлуатанта становлять

$$T_C = \frac{m P_{ПВ}}{M_{S_0}} \sum_{t=1}^{T_0} N_t \tau_t S_t (1 + \varepsilon)^{1-t}.$$

Для варіанта W_3 транспортні витрати експлуатанта обчислюють за формулою

$$T_C = \frac{m P_{ПВ}}{M_{S_0}} \sum_{t=1}^{T_0} N_t \tau_t S_{E, t} (1 + \varepsilon)^{1-t},$$

де $S_{E, t}$ – витрати на транспортування демонтованого ЗСМ до місця відновлення і назад.

Висновки

Проведено аналіз можливих витрат експлуатанта виробів авіоніки в період дії гарантійних зобов'язань постачальника. Основними складовими є витрати на купівлю потрібної кількості запасних ЛЗБ, витрати на оперативне ТО, втрати внаслідок незапланованих простоїв ПС і транспортні витрати на відправку блоків, що відмовили (забракованих), і доставку відновлених. Розроблено аналітичні вирази, що дозволяють провести оцінювання цих витрат. Показано, що витрати залежать від достовірності контролю, надійності систем, типів їх резервування і періодичності контролю. Отримані результати дозволяють підвищити ефективність експлуатації ПС в період гарантійного обслуговування. Подальшим розвитком отриманих результатів є розробка методики вибору оптимальної стратегії ТОіР в період дії гарантійних зобов'язань постачальника.

Література

- 1 *Helfrick A.* Principals of Avionics // Third Edition. – Avionics Communications Inc. – 2003. – 414 p.
- 2 *Мачалин И.А.* Стратегии организации гарантийного обслуживания систем авионики // Электроника і системи управління. – 2007. – № 1. – С. 82–89.
- 3 *Ulanyskiy V., Machalin I.* The choice of optimum variant of warranty maintenance management of modern avionics products // Материали VI МНТК “Авіа-2004”. – К., 2004. – Т. 2. – С. 30–34.
- 4 *Мачалин И.А.* Математические модели двухуровневой системы управления запасами систем авионики // Электроника і системи управління. – 2006. – № 4. – С. 164–172.
- 5 *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.
- 6 *Уланский В.В., Мачалин И.А.* Показатели эффективности эксплуатации резервированных авиационных радиоэлектронных систем // Математичні машини і системи. – 2006. – № 4. – С.155–163.