

УДК 629.735.083(045)

**БАЗОВІ ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ  
ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ЛІТАКІВ****О. П. Ліннік**, канд. фіз-мат. наук

Національний авіаційний університет

avia\_icao@mail.ru

*Досліджено методи визначення ефективності моделі системи технічної експлуатації авіаційної техніки з метою мінімізувати людські та матеріальні ресурси, які виділяються на виконання цього процесу в авіакомпанії.*

**Ключові слова:** літак, технічне обслуговування, моделювання, аналіз.

*In the article the methods of determination of efficiency of model of the system of technical exploitation of aerotechnics are prospected with the purpose of minimization of human and material resources that is distinguished on implementation of this process in an airline.*

**Keywords:** airplane, maintenance, modeling, analysis.

**Вступ**

В останнє десятиріччя різко знизилися обсяги авіаперевезень, ускладнилися фінансові взаєморозрахунки, почастилися випадки порушення розкладу через затримки заправки літаків паливно-мастильними матеріалами і несвоєчасне обслуговування в аеропортах, зростає соціальна напруженість у трудових колективах. В умовах кризи галузь позбавилася відносної рівноваги, загострилися взаємовідносини не тільки із зовнішніми організаціями, але й між самими підприємствами цивільної авіації, зокрема між аеропортами і авіакомпаніями. Незважаючи на те, що постійно відбувається скорочення числа авіапідприємств, потреба авіації в нових літаках неухильно зростає. Ця ситуація складається на тлі спаду виробництва у світовій авіаційній промисловості у зв'язку з об'єктивними і суб'єктивними факторами.

Відповідно до Повітряного кодексу України дотримання правил льотної експлуатації та технічного обслуговування авіаційної техніки повністю покладено на експлуатаційні підприємства, що і закладається у власні нормативно-технічні документи, які затверджуються авіаційною адміністрацією і забезпечують їм можливість і право діяльності на ринку авіаційних послуг (Керівництво з виробництва польотів; Керівництво з ТО літаків і гелікоптерів; Керівництво з якості та інші нормативно-технічні документи, які адаптуються до конкретних умов експлуатації авіаційної техніки). Це потребує створення максимально ефективних наглядових функцій державного органу управління повітряним транспортом, розробки принципів сертифікації та нагляду за реалізацією процедур управління якістю авіапослуг. Нові форми державного регулювання, а також нові технологічні можливості створення й експлуатації авіаційної техніки ви-

магають негайного переходу до процедур надання сертифікованих авіапослуг на основі сертифікованої техніки і сертифікованих процедур підтримання льотної придатності літаків через сертифіковані системи якості та сертифікований або атестований персонал.

Функції забезпечення і контролю діяльності авіакомпаній у системі підтримання льотної придатності літаків передбачають управління як на рівні реалізації загальної технічної політики, так і на рівні їх виробничо-технічної діяльності. Схвалення діяльності організацій з технічного обслуговування здійснюється через процедуру сертифікації цих організацій за державними стандартами, що, по суті, зводиться до обов'язкової процедури сертифікації їхніх систем якості.

**Постановка проблеми**

Отже, аналіз змін, які відбуваються в галузі експлуатації авіаційної техніки, показав їх значне ускладнення, пов'язане зі зростанням складності технології комплексу робіт, що виконуються на сучасних пасажирських літаках (ПЛ). Неправильна реакція на зміни призводить до зриву кінцевих термінів робіт з підтримки їх льотної придатності. При цьому в процесі координації цих робіт можна виділити дві послідовні в часі стадії: планування і контроль.

Перша передбачає розробку показників мережевого графа, розбиття його у вигляді зв'язаних підмереж, визначення вхідних даних для розрахунку різних варіантів, безпосередній розрахунок і затвердження одного з варіантів як планової мережевої моделі. Вхідними даними на цій стадії є термін завершення і вартість робіт, необхідні та наявні ресурси. Одразу розв'язується оптимізаційна задача, з додатковими обмеженнями на ресурси. Можуть розглядатися два типи ресурсів: складуваві та нескладувані.

Якщо припустити, що структура мережі, яка відображає певний процес технічного обслуговування (ТО), має незмінну конфігурацію, тобто, є тільки одна, а не безліч мереж, а ресурси, які розподіляються, нескладувані, що часто справедливо для процесів ТО ПЛ, розв'язується така задача:

$$\min_F \max_{l \in L} \sum_{i,j} c_{ij}^l \hat{t}_{ij} \quad (1)$$

при

$$\hat{t}_{ij} = f(s_{ij}, r_{ij}^\alpha); \quad (2)$$

$$s_{ij \min} \leq s_{ij} \leq s_{ij \max}; \quad (3)$$

$$r_{ij \min}^\alpha \leq r_{ij}^\alpha \leq r_{ij \max}^\alpha; \quad (4)$$

$$\sum_{ij} s_{ij} \leq s_\Sigma; \quad (5)$$

$$\sum_{ij} r_{ij}^\alpha \leq R_\Sigma^\alpha; \quad (6)$$

$$c_{ij}^l = \begin{cases} 1, & \text{якщо } u_{ij} \in l; \\ 0, & \text{якщо } u_{ij} \notin l; \end{cases} \quad (7)$$

$$t_j - t_i - t_{ij} \geq 0; \quad (8)$$

$$t_n - t_i \leq T_g, \quad (9)$$

де  $i, j \in V$ ,  $u_{ij} \in U$ ,  $\alpha \in A$ ,  $F = \{\hat{t}_{ij}\}$ .

Основним параметром мережі є термін реалізації, тому у формулі (1) ведеться пошук варіанта з мінімальним значенням цього параметра. Результатом пошуку є розклад  $t_i$  — моментів подій у мережі та тривалості робіт  $t_{ij}$ . Різні значення тривалості окремих гілок мережі дають декілька альтернатив реалізації комплексу робіт. Потужність множини  $F$  визначається числом комбінацій різних значень  $t_{ij}$  робіт мережі, тривалості є функціями вартості та ресурсів (2), а тип ресурсу  $r_{ij}^\alpha$  визначається індексом  $\alpha$ . Для всієї мережі задана множина типів ресурсів  $A = \{\alpha\}$ , обмеження за вартістю (3), максимальне значення вартості (5), максимальне значення ресурсів, які споживаються (6), а також директивний термін реалізації (9).

### Вирішення проблеми

Зміст оптимізації на стадії планування робіт з ТО ПЛ полягає у варіюванні параметрами  $\hat{t}_{ij}$ ,  $r_{ij}^\alpha$  і  $s_{ij}$  з тим, щоб отримати найбільш прийнятне значення (1). Результатом оптимізації є затверджений розклад виконання окремих робіт. Метод варіювання, як правило, неформалізований і ґрунтується на порівняльному аналізі значень (1) шляхом послідовних розрахунків мережі [1]. Ці розрахунки виконуються багаторазово на етапах

синтезу мережевої моделі. Процес синтезу мережі структурно розбитий на однотипні цикли, число яких визначається кількістю рівнів ієрархії моделі процесу ТО ПЛ. Процес проектування починається з циклу верхнього рівня і послідовно проходить через цикли нижніх рівнів. Оператори позначимо  $(a, b)$ , де  $a$  — перша цифра номера оператора;  $b$  — друга. Тоді кожний оператор  $(a, b)$  відповідає кроку  $a$  циклу  $b$  ( $a = \overline{1, r}; b = \overline{0, n}$ ).

Починається цикл визначенням структури мережевої моделі, встановленням апріорної тривалості окремих робіт. Гілки мережевої моделі верхнього рівня є укрупненим відображенням підмереж нижнього рівня, тому на третьому етапі здійснюється детальна структуризація мережевої моделі, визначаються вхідні дані для проектування підмереж, які відображають процеси ТО конкретного літака або групи літаків. На четвертому етапі здійснюється аналіз відповідності вартості та ресурсів існуючим обмеженням.

Якщо умови (3) і (4) не виконуються, тоді на цьому циклі здійснюється повернення до другого етапу, де перевизначаються вхідні дані мережевої моделі. На п'ятому етапі виконується розрахунок часових параметрів, а на шостому етапі отримані результати аналізуються на предмет відповідності обмеженням (9). Якщо обмеження на тривалість робіт не виконуються, тоді на шостому етапі здійснюється корекція вхідних даних моделі та повернення до четвертого етапу. Якщо всі обмеження після шостого етапу виконуються, тоді починається новий цикл створення мережевої моделі, який відповідає наступному ієрархічному рівню деталізації. На ньому виконуються етапи, аналогічні циклу верхнього рівня. Відмінність полягає в тому, що якщо після багаторазового повторення четвертого та шостого етапів не вдається досягти виконання умов (3)...(9), тоді можливе повернення до попереднього циклу, де здійснюється перегляд вхідних даних і нова структуризація мережевої моделі. Останній цикл створення мережевої моделі не містить етапу, на якому здійснюється структуризація на підмережі.

Математичною моделлю стадії планування є мережева модель, на якій мінімізується загальний сумарний термін її реалізації (1). Кінцевим результатом стадії планування є вибір одного з альтернативних варіантів, який найбільш повно задовольняє умови (2)...(9), і затвердження його як планової мережевої моделі комплексу робіт з ТО ПЛ. Плановій мережевій моделі відповідає вектор планових показників на кожному рівні деталізації комплексу, що є затвердженими плановими термінами готовності окремих робіт, які

отримуються при розрахунку розкладу здійснення подій мережі.

Вхідними даними математичної моделі стадії контролю повинні бути реальні терміни готовності окремих робіт і підмережі планової моделі. Оцінити вплив цих даних на терміни реалізації комплексу робіт можна за допомогою розрахунку мережі, конфігурація якої є плановою моделлю, а тривалості гілок скоректовані відповідно до реальних термінів готовності.

Результатом такого аналізу є вектор поточних значень показників комплексу робіт. На будь-якому рівні деталізації цей вектор можна уявити як матрицю готовності. Кожному її елементу  $u_{ij} \in U$  відповідає поточне значення готовності  $b_{ij}$ . Вектор планових значень також можна подати як матрицю, елементами якої є значення готовності  $a_{ij}$ , розраховані на стадії планування. Якщо виконання комплексу робіт здійснюється відповідно до затвердженого плану, тоді в будь-який момент  $t$  стадії контролю повинно виконатися співвідношення  $|T_{пл} - T_{пот}| = \Delta_D$ , де  $T_{пл}$  —  $T_{пот}$  — вектори планових і поточних показників відповідно;  $\Delta_D$  — вектор допустимих відхилень.

Якщо відкинути величину  $\Delta_D$ , тоді повинна дотримуватися рівність  $a_{ij} = b_{ij}$ . У реальних умовах в різні моменти стадії контролю трапляються збурення, які призводять до відхилень реальних термінів від планових. Для того щоб ці збурення не мали великого впливу на термін реалізації, необхідно збільшити інтенсивність виконання робіт, які знаходяться у критичній зоні, що пов'язано з призначенням додаткових ресурсів, фінансових витрат тощо. З урахуванням результатів отриманих у праці [2], в загальному вигляді задача оптимізації комплексу робіт на стадії контролю може бути подана таким чином.

У заданий момент  $t = \tau$  стадії контролю для мережі  $G(U, V)$ , отриманої на стадії планування, знайти:

$$\min_{F=\{t_{ij}^*\}} \max_{l \in L} \sum_{i,j \in V} t_{ij}^* [1 - \eta_{ij}(\tau)] c_{ij}^l \quad (10)$$

при

$$t_{ij}^* = \begin{cases} f(\xi_{ij}(\tau)) & , \text{якщо } 0 < \eta_{ij}(\tau) < 1; \\ 0 & , \text{якщо } \eta_{ij}(\tau) = 1; \\ t_{ij} + b_{ij} - a_{ij} & , \text{якщо } (\eta_{ij}(\tau) = 1) u(a_{ij} \leq t); \\ t_{ij} & , \text{якщо } (\eta_{ij}(\tau) = 0) u(a_{ij} > t); \end{cases} \quad (11)$$

$$\xi_{ij}(\tau) = \phi(s_{ij}, r_{ij}^\alpha); \quad (12)$$

$$\sum_{i,j \in V} s_{ij}^\alpha \xi_{ij}(\tau) \leq S^\alpha(\tau); \quad (13)$$

$$\sum_{i,j \in V} r_{ij}^\alpha \xi_{ij}(\tau) \leq R^\alpha(\tau); \quad (14)$$

$$\xi_{ij}(\tau)(1 - \eta_{ki}(\tau)) = 0, \quad (15)$$

для

$$u_{ki} \in U, \quad c_{ij}^l = \begin{cases} 1, & \text{якщо } u_{ij} \in l; \\ 0, & \text{якщо } u_{ij} \notin l. \end{cases} \quad (16)$$

Параметром для моделі керування процесом ТО ПЛ є значення  $\eta_{ij}(\tau)$  — відношення обсягу виконаних на момент  $\tau$  робіт  $u_{ij}$  до її загального обсягу. Цю величину назвемо коефіцієнтом виконання роботи. Значення коефіцієнта лежать у діапазоні  $[0, 1]$ . Фактична тривалість гілки  $t_{ij}^*$  в (10) визначається формулою (11). Якщо робота знаходиться в стані виконання ( $0 < \eta_{ij}(\tau) < 1$ ), тоді її фактична тривалість визначається інтенсивністю  $\xi_{ij}(\tau)$  в момент  $\tau$ . Якщо робота вже виконана ( $\eta_{ij}(\tau) = 1$ ), тоді її фактична тривалість дорівнює 0, а якщо вона ще не почала виконуватися ( $\eta_{ij}(\tau) = 0$ ) — її тривалість вважається рівною плановій  $t_{ij}$  плюс відставання від планових термінів готовності  $(b_{ij} - a_{ij})$ .

Інтенсивність виконання роботи є функцією інтенсивності споживання ресурсів  $r_{ij}^\alpha$  та інтенсивності фінансування  $s_{ij}$  (12). У будь-який момент  $\tau$  існують обмеження (13) і (14) на інтенсивність споживання ресурсів і фінансування всього комплексу робіт.

Значення інтенсивності  $\xi_{ij}(\tau)$  може бути відмінними від нуля тільки для робіт, які згідно з конфігурацією планової мережі знаходяться в стані виконання. Ця умова задана (14). Формула (16) дозволяє за допомогою (10) отримувати альтернативні оцінки довжини різних шляхів. Пошук мінімального значення (10) ведеться на множині альтернативних варіантів різних комбінацій  $t_{ij}^*$ . Число елементів множини  $F$  залежить від конкретної ситуації і має біноміальну оцінку. Розв'язок (10) з урахуванням (11)...(16) дозволяє знайти оптимальний розподіл величин  $s_{ij}$  і  $r_{ij}^\alpha$  у заданий момент стадії керування.

Розподіл цих величин між окремими операціями комплексу робіт є керуючою дією в момент  $\tau$ . Правильність рішень, які приймаються, залежить від періодичності їхнього формування. Завданням керування є наближення до планової моделі в кожний момент часу і мінімізація за-

гального терміну виконання комплексу робіт. Планова модель протягом стадії керування може зазнавати певних змін. Координати векторів  $T_{ПЛ}$  і  $T_{ПОТ}$  у загальному випадку є такою функціональною залежністю:

$$a_{ij} = f_{ij}(R_{pij}, \theta_{ij}); b_{ij} = \varphi_{ij}(R_{rij}, p_{ij}).$$

Величина  $\theta_{ij}$  характеризує параметри, які необхідно враховувати в зв'язку з поточною модернізацією;  $p_{ij}$  — характеризує випадкові збурення;  $R_{pij}$  — керуючі дії, викликані необхідністю скоригувати планову модель для врахування нових умов виконання комплексу робіт;  $R_{rij}$  — керуючі дії, викликані необхідністю вирівнювання показників реальної моделі з тим, щоб всі значення вектора поточних показників знаходились у зоні допустимих відхилень  $\Delta_D$ .

Задача оптимізації на цій стадії з урахуванням (1)...(7) полягає у визначенні керуючих дій  $R_{pij}$  і  $R_{rij}$  таким чином, щоб виконувалася умова (10), і вектор поточних показників був у зоні допустимих відхилень.

### Висновки

Наявність впливу типу  $p_{ij}$  потребує своєчасного прийняття організаційно-технічних заходів, перерозподілу ресурсів для вирівнювання координат  $b_{ij}$ .

Якщо як потік випадкових подій, які призводять до відхилення поточного показника  $b_{ij}$  від планового  $a_{ij}$ , взяти найпростіший пуассонівський потік, тоді ймовірність відсутності

подій  $p_0$  на ділянці  $\tau$  має вид  $P_0 = e^{-\lambda\tau}$  (де  $\lambda$  — інтенсивність потоку).

Звідси видно, що для більш ефективного керування роботами з урахуванням потоку відхиляючих подій, відрізки часу  $\tau$ , протягом яких аналізуються відхилення від планової моделі, повинні бути вибрані невеликими. З іншого боку, інтервал  $\tau$  обмежений знизу:

$$\tau \geq t_{вв} + t_{обр} + t_{рiш} + t_{iнф},$$

де  $t_{вв}$  — тривалість надходження інформації від виконавців у модель;  $t_{обр}$  — тривалість обробки інформації;  $t_{рiш}$  — тривалість аналізу і прийняття рішення з вирівнювання показників;  $t_{iнф}$  — тривалість інформування виконавців про рішення.

Оцінкою ефективності величини  $\tau$  може служити ймовірність відсутності впливу збурення на цьому відрізку часу.

При відомому значенні інтенсивності потоку збурень  $\lambda$ , ця ймовірність визначається формулою  $P_0 = e^{-\lambda\tau}$ .

Математичні моделі стадії планування і керування є оптимізаційними задачами на мережах, ізоморфних модельованим процесам ТО ПЛ. Рішення оптимізаційних задач на мережах дозволяє більш ефективно будувати обчислювальний процес для аналізу множини альтернативних варіантів програм ТО ПЛ.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Rosen K. H.* Handbook on Discrete Combinational Mathematics / K. H. Rosen //CRC Press-Hil, 1999. — 1232 p.
2. *Kenneth H. Rosen* Discrete Mathematics and Its Applications / H. Kenneth //McGraw-Hil, 2007. — 997 p.

Стаття надійшла до редакції 07.07.2014.