

УДК (045)

О.А. ТАМАРГАЗИН¹, І.І. ЛІННІК¹, Т.Ю. КРАМАРЕНКО¹, М.В. ОЛЕГ¹

¹Національний авіаційний університет, Україна

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ МАТЕРІАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВІАДВИГУНІВ

У статті розглянута структурна схема системи матеріально-технічного забезпечення експлуатації двигунів в авіаційних підприємствах, які задіяні для ліквідації надзвичайних ситуацій. Показано відміну побудови таких систем від загальноприйнятих у цивільній авіації. Розглянуто базові методи аналізу їх ефективності залежно від схеми поповнення складів запасними частинами. Враховуючи особливості вирішення завдання для конкретної схеми реалізації матеріально-технічного забезпечення, запропоновано застосування різних форм повного заміщення в логічній функції працездатності системи матеріально-технічного забезпечення.

Ключові слова: двигун, матеріально-технічне забезпечення, експлуатація, моделювання.

Постановка задачі

Структурна схема системи матеріально-технічного забезпечення (СМТЗ) експлуатації авіаційних двигунів не завжди може бути зведена до двополусної схеми. Особливо це стосується випадків, коли авіаційна техніка застосовується для усунення наслідків надзвичайних ситуацій. У таких випадках СМТЗ має кілька рівнів (рангів) управління й кожному органу (ланці) управління деякого рівня безпосередньо підлегли кілька органів (ланок) управління більше низького рівня (рангу), а сам він перебуває в підпорядкуванні й управляється органом (ланкою) більш високого рівня (рангу). Згідно з [1] такі системи називають ієрархічними, а структуру таких систем називають багаторівневою.

При формалізації процесу функціонування СМТЗ з багаторівневою структурою зручно користуватися термінологією теорії графів і називати органи й ланки управління вершинами, а елементи підсистеми передачі запасних частин (ЗЧ) – дугами.

Традиційні СМТЗ мають лінійну структуру управління, в якій кожна вершина має зв'язок тільки з вершинами сусідніх рангів (меридіанні зв'язки), але не має зв'язків у межах даного рангу (рокадних зв'язків) і через кілька рангів. Такі структури називають структурами безпосереднього підпорядкування або структурами типу «дерево». Але на практиці в СМТЗ дуже часто існують довільні меридіанні зв'язки між вершинами різних рангів і довільні рокадні зв'язки.

Тому про ефективність СМТЗ можна говорити тільки в тому випадку, якщо вдається чітко сформулювати критерії відмови в заявках на запасні частини з урахуванням того, що у

СМТЗ із багаторівневою структурою зниження ефективності відбувається поступово.

Крім того, при аналізі СМТЗ треба враховувати те, що в залежності від конкретної ситуації, яка складається в експлуатації, можна розглядати СМТЗ без поповнення та з поповненням. У першому випадку ЗЧ, які використовуються для підтримання працездатного стану авіаційних двигунів, на складах не замінюються на нові. У другому випадку ЗЧ, які були взяті зі складу, замінюються на нові, які надходять з ремонтного фонду або із заводів-виробників. У обох випадках нові ЗЧ надходять спочатку на склади нульового рівня.

Вирішення задачі

Спираючись на результати, отримані в [2,3,4,5], розглянемо методи аналізу ефективності СМТЗ. Для СМТЗ без поповнення, які найчастіше створюються при використанні авіаційної техніки під час надзвичайних ситуацій, процес побудови розрахункової формули ефективності можна представити у вигляді трьох етапів:

Етап 1. Кожному складу СМТЗ ставляться у відповідність логічні змінні, які можуть приймати два значення: 1, якщо потрібна запасна частина є на складі, та 0, якщо запасної частини на складі немає. Потім з умов працездатності системи складається логічна функція працездатності (ЛФП) виду $f(X)$, де $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор-рядок логічних змінних. Функція $f(X) = 1$, якщо є хоча б один працездатний шлях передачі запасної частини від вхідного полюса до вихідного. Кожному шляху в логічній функції працездатності відповідає елементарна кон'юнкція булевих

змінних, відповідних елементів, що входять у шлях, а $f(X)$ є диз'юнкція всіх елементарних кон'юнкцій, що відповідають можливим шляхам між вхідним та вихідним полюсами. Отримана в такий спосіб форма функції є вхідною.

Етап 2. Вхідна форма перетворюється до однієї зі стандартних форм, які назвемо формами повного заміщення (ФПЗ) і які допускають заміщення логічних змінних ймовірностями, а логічних операцій арифметичними.

Етап 3. У стандартній формі логічної функції проводиться заміщення логічної змінної x_i імовірністю $p_i = P(x_i = 1)$, заперечення логічної змінної x_i імовірністю $q_i = 1 - p_i = P(x_i = 0)$, диз'юнкції \vee додаванням $+$, кон'юнкції \wedge множенням \cdot , логічного заперечення \neg у виразом $1 - P(y = 1)$.

З аналізу робіт [6] у якості ФПЗ можна використовувати декілька форм. Застосування конкретної ФПЗ залежить від особливостей рішення тієї або іншої задачі. Диз'юнктивна нормальна форма (ДНФ) є формою повного заміщення (ФПЗ-1) і базується на тому, що конституанти одиниці, що входять у ДНФ, ортогональні й тому можна використати формулу додавання ймовірностей для неспільних подій. Так, якщо логічна функція працездатності системи за схемою «2 з 3» має вигляд:

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1 x_2 \vee x_1 x_3 \vee x_2 x_3$$

і необхідно знайти ймовірність $P_c = P(f = 1)$, тоді використовуючи правила перетворення логічних функцій. Приведемо цю формулу до ДНФ:

$$f = x_1 x_2 x_3' \vee x_1 x_2 x_3 \vee x_1 x_2' x_3 \vee x_1' x_2 x_3.$$

Звідси заміщенням знаходимо:

$$P_c = P(f = 1) = p_1 p_2 p_3 + p_1 p_2 q_3 + p_1 q_2 p_3 + q_1 p_2 p_3.$$

ДНФ є не зовсім зручною формою переходу до повного заміщення через велику трудомісткість перетворень на другому етапі й громіздкі кінцеві формули. Проте вона добре пристосована до формалізації процесу аналізу. Іншим алгоритмом переходу до форми повного заміщення (ФПЗ-2) є використання безповторної форми логічної функції в базисі «кон'юнкція - заперечення». Для одержання безповторної форми можуть використовуватись операції поглинання, склеювання, розподільний закон булевої алгебри, а для виключення операції диз'юнкції – правило де Моргана: $x_1 \vee x_2 = (x_1' x_2')'$.

Наприклад, якщо для $f = x_1 \vee x_2 x_3' \vee x_2 x_4$ необхідно знайти $P_c = P(f = 1)$, тоді спочатку необхідно за допомогою розподільного закону отримати безповторну форму цієї функції

$f = x_1 \vee x_2 (x_3' \vee x_4)$, а потім двічі застосувавши правило де Моргана – $f = (x_1' (x_2 (x_3 x_4'))')$. Після заміщення отримаємо: $P_c(t) = 1 - q_1 (1 - p_2 (1 - p_3 p_4))$.

Третім підходом до форми повного заміщення (ФПЗ-3) є використання диз'юнкції ортогональних безповторних форм у базисі «кон'юнкція - заперечення». В цьому випадку ФПЗ має вигляд:

$$f = Y_1 \vee Y_2 \vee \dots \vee Y_m, \quad (1)$$

де $Y_i Y_j = 0$ для $i \neq j$; Y_i – безповторна форма в базисі «кон'юнкція - заперечення».

Ця форма запису є узагальненням ФПЗ-2. В (1) безповторність повинна бути тільки в межах кожного диз'юнктивного члена, а в різних Y_i змінні можуть повторюватися. Основна складність застосування логіко-імовірнісного методу є перетворення вихідної форми ЛФП до виду (1). Щоб зробити це перетворення впорядкованим і придатним до автоматизації, можна використати один з наступних алгоритмів, запропонованих в [7].

Перший алгоритм, це алгоритм розрізування. Він заснований на використанні формули розкладання функцій у булевій алгебрі:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1 f(1, x_2, \dots, x_n) \vee x_1' f(0, x_2, \dots, x_n). \quad (2)$$

Обидва логічних доданків в цій формулі ортогональні за будовою. Тому послідовність дій в алгоритмі наступна.

1. Підраховують кількість входжень кожної змінної у вхідну форму f і вибирають букву x_i , з найбільшим числом входжень.

2. Проводять розрізування функції f за змінною x_i , відповідно до (2).

3. У кожному з доданків виконують перетворення з метою одержати безповторної форми в базисі (\wedge, \neg) типу ФПЗ-2.

4. Якщо хоча б в одному з доданків не вдається одержати ФПЗ-2, тоді проводять розрізування в цьому доданку по іншій змінній згідно п.1 та 2 алгоритму. Якщо ж у всіх доданках отримані форми ФПЗ-2, тоді алгоритм закінчує роботу.

Як приклад розглянемо систему матеріально-технічного забезпечення з двома основними складами 1 і 2 та трьома оперативними складами (3, 4, 5). При цьому ЗЧ можуть передаватись зі складу 1 безпосередньо до складів 3 і 5, а зі складу 2 – до складів 4 і 5. Крім того, зі складу 1 через склад 5 запасні частини передаються на склад 4 і зі складу 2 через склад 5 передаються на склад 3. Для цієї схеми логічна функція працездатності має вигляд:

$$f = x_1(x_3 \vee x_4 x_5) \vee x_2(x_4 \vee x_3 x_5).$$

Підраховуючи число входжень, переконаємося, що двічі входять три змінні: x_3 , x_4 , x_5 . Вибираємо x_5 і проводимо розрізування:

$$f = x_5(x_1(x_3 \vee x_4) \vee x_2(x_3 \vee x_4)) \vee x_5'(x_1 x_3 \vee x_2 x_4). \quad (3)$$

Перетворимо кожний доданок до ФПЗ-2:

$$f = x_5(x_1 \vee x_2)(x_3 \vee x_4) \vee x_5'(x_1 x_3 \vee x_2 x_4) = x_5(x_1' x_2') \vee (x_3' x_4')' \vee x_5'(x_1 x_3)' \vee (x_2 x_4)''.$$

$$\text{Звідси: } P_c = P(f = 1) = p_5(1 - q_1 q_2)(1 - q_3 q_4) + q_5(1 - (1 - p_1 p_3)(1 - p_2 p_4)).$$

Іншим алгоритмом є алгоритм ортогоналізації. Вихідною формою функції в цьому алгоритмі є ДНФ. Її перетворення до ФПЗ-3 засноване на використанні наступних формул булевої алгебри:

$$f = Q_1 \vee Q_2 \vee \dots \vee Q_m = Q_1 \vee Q_1' Q_2 \vee Q_1' Q_2' Q_3 \vee \dots \vee Q_1' \dots Q_{m-1}' Q_m, \quad (4)$$

$$(x f)'_x = f'_x, (x' f)'_x = x, (x f_1)'(x f_2)' = (x(f_1' f_2'))'. \quad (5)$$

Послідовність дій в алгоритмі наступна. Вихідну форму ЛФП перетворюють до ДНФ і всі елементарні кон'юнкції розташовують у порядку зростання числа букв. ДНФ перетворюють до ортогональної диз'юнктивної форми за (4). Кожний доданок спрощують за допомогою (5), поки не будуть отримані неповторні форми ФПЗ-2. Проводять заміщення булевих змінних і логічних операцій. За допомогою цього алгоритму розглянута вище задача вирішується наступним чином. Функцію (3) перетворимо до виду:

$$f = x_1 x_3 \vee x_2 x_4 \vee x_1 x_4 x_5 \vee x_2 x_3 x_5.$$

Проводимо ортогоналізацію:

$$f = x_1 x_3 \vee (x_1 x_3)' x_2 x_4 \vee (x_1 x_3)'(x_2 x_4)' x_1 x_4 x_5 \vee (x_1 x_3)'(x_2 x_4)'(x_1 x_4 x_5)' x_2 x_3 x_5.$$

Після спрощення за допомогою (5) отримаємо:

$$f = x_1 x_3 \vee (x_1 x_3)' x_2 x_4 \vee x_2' x_3' x_1 x_4 x_5 \vee x_1' x_4' x_2 x_3 x_5.$$

$$\text{Звідки: } P_c = P(f = 1) = p_1 p_3 + (1 - p_1 p_3) p_2 p_4 +$$

$$+ p_1 q_2 q_3 p_4 p_5 + q_1 p_2 p_3 q_4 p_5.$$

На першому етапі рішення задачі створення СМТЗ за допомогою логіко-імовірнісного

методу необхідно скласти логічну функцію працездатності. Якщо система матеріально-технічного забезпечення не дуже розгалужена, тоді ЛФП складається як диз'юнкція елементарних кон'юнкцій, кожна з яких представляє шлях між полюсами системи. Однак не завжди це просто зробити, тому що таких різних шляхів може бути дуже багато. Тоді зручніше будувати логічні рівняння як компактну форму запису зв'язку між різними елементами системи. Особливо це корисно для систем з неорієнтованими зв'язками. Але надалі однаково треба представляти ЛФП у явному вигляді, щоб одержати ФПЗ. Тому виникає задача рішення систем логічних рівнянь. Найбільш відомі два методи: метод визначників і метод підстановки. Найбільш доцільно їх використовувати у постановці наведеній у [8].

Для СМТЗ ЛФП можна представити у вигляді залежності від інших функцій алгебри логіки (ФАЛ), зв'язаних системою рівнянь:

$$y = y(f_1, f_2, \dots, f_n),$$

$$f_i = a_i \vee a_{i1} f_1 \vee a_{i2} f_2 \vee \dots \vee a_{in} f_n, i = \overline{1, n},$$

де a_i – ФАЛ, виражена через логічні змінні; A_1 – вектор-стовпець вільних членів; $A = \|a_{ij}\|$ – матриця коефіцієнтів рівнянь, причому $a_{ii} = 1$.

Розглянемо СМТЗ, яка складається із трьох складів першого рівня, які підпорядковані безпосередньо керівництву транспортної системи (1, 2 і 3), трьох складів, підпорядкованих керівництву відповідних авіапідприємств (4, 5 і 6), трьох складів наземного забезпечення польотів (7, 8 і 9), шести вторинних складів авіапідприємств (10-15) і трьох груп авіаційної техніки з різними типами двигунів (16, 17 і 18). За умови максимізації ефективності транспортної системи повинні бути забезпечені ЗЧ усі повітряні судна. Для цього досить, щоб потрібна ЗЧ була хоча б на одному із складів, що знаходяться на гілці постачання ЗЧ для даного повітряного судна. Необхідно знайти ймовірність працездатності СМТЗ при відсутності постачання.

Позначимо через f_i – логічну функцію-індикатор події, що полягає в тому, що до складу з номером (i) є хоча б один шлях передачі ЗЧ від одного з головних складів. Тоді ЛФП СМТЗ можна записати у вигляді:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_{15}) = (x_{10} f_4 \vee x_{12} f_5) (x_{11} f_4 \vee x_{14} f_6) (x_{13} f_5 \vee x_{15} f_6). \quad (6)$$

Функції f_i задовольняють наступній системі рівнянь:

$$f_4 = x_4(x_1 \vee x_7 f_5 \vee x_9 f_6), f_5 = x_5(x_2 \vee x_7 f_4 \vee x_8 f_6), \\ f_6 = x_6(x_3 \vee x_8 f_5 \vee x_9 f_4)$$

Складемо визначники для невідомих функцій:

$$f_4 = \begin{vmatrix} x_1 x_4 & x_4 x_7 & x_4 x_9 \\ x_2 x_5 & 1 & x_5 x_8 \\ x_3 x_6 & x_6 x_8 & 1 \end{vmatrix}, f_5 = \begin{vmatrix} 1 & x_1 x_4 & x_4 x_9 \\ x_5 x_7 & x_2 x_5 & x_5 x_8 \\ x_6 x_9 & x_3 x_6 & 1 \end{vmatrix},$$

$$f_6 = \begin{vmatrix} 1 & x_4 x_7 & x_1 x_4 \\ x_5 x_7 & 1 & x_2 x_5 \\ x_6 x_9 & x_6 x_8 & x_3 x_6 \end{vmatrix}.$$

Тоді

$$f_4 = x_4(x_1 \vee x_2 x_5(x_7 \vee x_6 x_8 x_9) \vee x_3 x_6(x_9 \vee x_5 x_7 x_8)), \\ f_5 = x_5(x_2 \vee x_1 x_4(x_7 \vee x_6 x_8 x_9) \vee x_3 x_6(x_8 \vee x_4 x_7 x_9)), \\ f_6 = x_6(x_3 \vee x_1 x_4(x_9 \vee x_5 x_7 x_8) \vee x_2 x_5(x_8 \vee x_4 x_7 x_9)).$$

Якщо зробити відповідні заміни в (6) і розкрити дужки, тоді можна перекоонатись, що ЛФП системи містить 1000 кон'юнктивних членів, тобто в структурній схемі є 1000 різних шляхів між полюсами. Скласти таку ЛФП безпосередньо досить важко.

Висновки

Логіко-імовірнісний метод, викладений вище і застосований для аналізу працездатності двополюсних СМТЗ авіадвигунів, містить три етапи: запис логічної функції працездатності, перетворення логічної функції до форми повного заміщення і повне заміщення всіх логічних змінних ймовірностями та логічних операцій арифметичними операціями. До цих етапів доцільно додати ще один проміжний етап — часткове заміщення логічних змінних ймовірностями. Тому замість ФПЗ логічна функція перетворюється до форми переходу до часткового заміщення, а в результаті часткового заміщення з'явиться так звана змішана форма

функції ймовірностей (ЗФФІ), що містить одночасно й імовірності, і логічні змінні, арифметичні й логічні операції. Після деяких перетворень у ЗФФІ треба буде виконати багатокрокове заміщення інших логічних змінних з метою переходу до розгорнутої форми функції ймовірностей. Запис ЗФФІ за заданими функціям алгебри логіки повинен проводитися на підставі результатів, отриманих в [7].

Література

1. Можаяев А.С. Теоретические основы общего логико-вероятностного метода автоматизированного моделирования систем [Текст] / А.С. Можаяев, В.Н. Громов. — СПб.: ВИТУ, 2000. — 145 с.
2. Райншке К. Оценка надежности систем с использованием графов [Текст] / К. Райншке., И.А. Ушаков; под ред. Ушакова И.А. — М.: Радио и связь, 1988. — 208 с.
3. Рябинин И.А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин, Г.Н. Черкесов. — М.: Радио и связь, 1981. — 166 с.
4. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Текст] / И.А. Рябинин. — СПб.: Политехника, 2000. — 248 с.
5. Левин В.И. Логическая теория надежности сложных систем. Надежность и качество [Текст] / В.И. Левин. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 128 с.
6. Rosen K.H. Handbook on Discrete Combinational Mathematics [Text] / R.H. Rosen. — CRC Press. 1999. — 1232 p.
7. Rosen K.H. Discrete Mathematics and Its Applications [Text] / H.K. Rosen. — McGraw. Hill. 2007. — 997 p.
8. Тюрин С.Ф. Дискретная математика. Практическая дискретная математика и математическая логика [Текст] / С.Ф. Тюрин, Ю.А. Аляев. — М.: Финансы и статистика, 2010. — 384 с.

Поступила в редакцию 30.05.2014

А.А. Тамаргазин, И.И. Линник, Т.Ю. Крамаренко, М.В. Олег. Модели и методы анализа эффективности систем материально-технического обеспечения эксплуатации авиадвигателей

В статье рассмотрена структурная схема системы материально-технического обеспечения эксплуатации двигателей в авиапредприятиях, которые задействованы для ликвидации чрезвычайных ситуаций. Показано отличие построения таких систем от общепринятых в гражданской авиации. Рассмотрены базовые методы анализа их эффективности в зависимости от схемы пополнения складов запасными частями. Учитывая особенности решения задачи для конкретной схемы реализации материально-технического обеспечения, предложено применение разных форм полного замещения в логической функции работоспособности системы материально-технического обеспечения.

Ключевые слова: двигатель, материально-техническое обеспечение, эксплуатация, моделирование.

A.A. Tamargazin, I.I. Linnik, T.Y. Kramarenko, M.V. Oleg. Models and methods for the analysis of efficiency material and technical provision operating aircraft engines

The article describes the system block diagram logistical exploitation engines in aviation enterprises that are involved for dealing with emergencies. Illustrates the difference of such systems from the standard in civil aviation. The basic methods of analysis of their effectiveness depending on the scheme replenishment spare parts warehouse. Given the characteristics of the decision problem for a specific circuit implementation logistics, provides for the use of different forms of complete substitution in logical functions of the system of logistics.

Key words: engine, logistics, operation, modeling.