

УДК 629.735.083(045)

О.М. АВДЄЄВ

Національний авіаційний університет, Україна

## ФОРМАЛІЗАЦІЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

Розглянуто питання розробки методології побудови організаційно-технічної системи технічної експлуатації сучасних авіаційних двигунів. Запропонований підхід базується на розгляді безперервного супроводу льотної придатності авіаційної техніки протягом усього життєвого циклу. Формалізований опис процесів представлений у вигляді комплексного алгоритму, реалізованого в рамках людино-машинної системи керування авіаційною технікою. При розгляді методології враховувалося, що в системі вирішуються питання інформаційного, алгоритмічного, організаційно-методичного, програмного та технічного забезпечень. Для цього сформована логічна схема взаємозв'язку завдань, яка характеризує вхідні дані для рішення кожного завдання і яка дозволяє розглядати результати рішення як вхідні дані для наступних завдань.

**Ключові слова:** авіаційний двигун, експлуатація, життєвий цикл, організаційно-технічна система.

### Вступ

У організаційно-технічній системі експлуатації авіаційних двигунів (ОТСЕАД) на кожному з етапів життєвого циклу двигуна (ЖЦД) відображаються склад робіт, функцій і задач розглядаемого об'єкта.

Управління в ОТСЕАД здійснюється на основі широкого використання засобів інформатизації та принципів інтеграції [1]. Різні стратегії управління в ОТСЕАД на етапах ЖЦД ефективно можуть бути реалізовані у автоматизованій системі, яка базується на єдності вимог до технічного, інформаційного, методичного і програмного забезпечення системи.

### 1. Постановка проблеми

Формалізований опис процесів в ОТСЕАД може бути представлений у вигляді комплексного алгоритму, реалізованого у рамках людино-машинної системи управління авіаційною технікою. У загальній постановці ОТСЕАД може бути представлена як

$$\{\varphi\} : \{\chi\} = \{y\},$$

де  $\{\chi\}$  – множина входів,  $\chi = \{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n\}$ ;  
 $\{y\}$  – множина виходів,  $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ ;  
 $\{\varphi\}$  – множина операторів відображення множини  $\{\chi\}$  на множину  $\{y\}$ .

Розглядаема система А функціонує у часі Т, має відповідну ціль – Ц<sub>е</sub>, визначається станом – V, функціонує в умовах збурень – Е, характеризується наявністю управлінь – U, які забезпечують досягнення наміченої цілі. ОТСЕАД включає систему управління і об'єкт управління, і її в цілому необхідно розглядати як об'єднання деяких множин, тобто

$$A = A_i \cup A_j \cup A_k, \quad i = \overline{1, I}; \quad j = \overline{1, J}; \quad k = \overline{1, K},$$

де  $A_i$  – множина об'єктів управління;  
 $A_j$  – множина систем управління;  
 $A_k$  – множина процесів управління.

При цьому структура множини оператора  $\varphi$  включає три підмножини  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , оскільки їх логічне об'єднання має вигляд

$$\varphi(A) = \varphi_1(A_i) \cup \varphi_2(A_j) \cup \varphi_3(A_k).$$

Кожний об'єкт управління у множині  $A_i, i = \overline{1, I}$  включає

$$A_i = \varphi_i(I_i, \Phi_i, M_i, O_i, \Xi_i),$$

де  $I_i, \Phi_i, M_i, O_i, \Xi_i$  – відповідно інформаційне, алгоритмічне, математичне, організаційно-методичне і технічне забезпечення.

Об'єкт управління  $A_i$  відповідно може включати підмножини

$$A_{i1} = \varphi_{i1}(I_{i1}, \Phi_{i1}, M_{i1}, O_{i1}, \Xi_{i1});$$

$$A_{in} = \varphi_{in}(I_{in}, \Phi_{in}, M_{in}, O_{in}, \Xi_{in}).$$

Задача інтеграції зводиться до об'єднання відповідних підмножин, наприклад, для алгоритмічного забезпечення

$$\Phi_i = \Phi_{i1} \cup \Phi_{i2} \cup \dots \cup \Phi_{in}.$$

Враховуючи, що кожна підмножина  $\Phi_i$  включає елементи

$$\Phi_{i1} = \Phi_{i1}(f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{i1});$$

$$\Phi_{in} = \Phi_{in}(f_{e+1}, f_{e+2}, \dots, f_n) \quad e \neq k \neq n,$$

задача інтеграції полягає не тільки в об'єднанні, а й у встановленні функціонально подібних елементів із множини  $\Phi_i$  які забезпечують створення нової стру-

ктури. Це вирішується операцією перетину над множиною  $\Phi_i$

$$\Phi_1 \cap \Phi_2 \cap \dots \cap \Phi_n = \bigcap_{i=1}^n \Phi_i .$$

Система управління  $A_j$  може бути представлена у векторній формі

$$A_j = \varphi_2(X, Y, V, U, E, \Pi, T),$$

де  $X$  – вхід системи,  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ ;  
 $Y$  – вихід системи,  $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ ;  
 $V$  – управління,  $V = (V_1, V_2, \dots, V_e)$ ;  
 $E$  – збурення,  $E = (E_1, E_2, \dots, E_p)$ ;  
 $\Pi$  – ціль системи,  $\Pi = (\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_\phi)$ ;  
 $U = (U_1, U_2, \dots, U_d)$ ;  
 $T$  – час,  $0 < \tau < T$ ;  
 $\varphi_2$  – оператор функціонування системи.

Тому можна записати

$$Y_{V_1 T} = \varphi_{2i}(X, U, E, V) V_{1 T} .$$

$$A_1 \leftrightarrow Y_{(1)U_1 T} = \varphi_{21}(X_1, U_1, E_1, V_1) V_{1 T} ;$$

$$A_n \leftrightarrow Y_{(n)U_n T} = \varphi_{2n}(X_n, U_n, E_n, V_n) V_{n T} .$$

Ієрархічна суть і взаємна залежність між етапами ЖЦД обумовлює упорядковану послідовність переходу від системи до системи

$$Y_0(X_1) \rightarrow Y_{(1)V_1 T}(X_2) \rightarrow \dots \rightarrow Y_{(n)U_n T}(X_n + 1) .$$

Можна допустити, що серед множини параметрів системи виконуються умови

$$X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_n = \Phi ; U_1 \cap U_2 \cap \dots \cap U_n = \Phi ;$$

$$E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n = \Phi ; V_1 \cap V_2 \cap \dots \cap V_n = \Phi .$$

Оцінка цих перетинів характеризує вирішення задачі інтеграції у  $A_j$ .

Існування взаємозв'язку поміж  $A_1, A_2, \dots, A_n$  вимагає оцінки міжсистемних зв'язків і забезпечення

$$w_1 : y = x_2 ; w_2 : y_2 = x_3 ; \dots ; w_{n-1} : y_{n-1} = x_n .$$

Відсутність тотожної рівності вимагає не тільки аналізу міжсистемних зв'язків, а відповідного управління процесами перетворення

$$\varphi_1 : y = x_2 ; \varphi_2 : y_2 = x_3 ; \dots ; \varphi_{n-1} : y_{n-1} = x_n .$$

У загальному випадку процес функціонування ОТСЕАД визначається його технологією, а виконання цього процесу досягається за рахунок формування множини функцій  $F_{jk}$ , задач  $Z_{jk}$  і підсистем  $\Sigma_{jk}$ , що забезпечують їх реалізацію [2, 3].

## 2. Вирішення проблеми

Кожна підсистема описується сигнатурою

$$g_{jk} = \langle S'_{jk}, F_{jk}, Z_{jk} \rangle ,$$

де  $S'_{jk}$  – структура підсистеми.

Якщо на рівні  $S$  декомпозиції  $F_{jk}$  ресурс  $g_{jk}$  не є однорідним, то рівень  $S$  не є кінцевим. Це витікає із того факту, що завжди можна декомпонувати функцію  $F_{jk}$  на задачі, кожна з яких виконується тільки

однією людиною. Окремо взятий виконавець, являє собою однорідний ресурс. Група виконавців, що реалізують задачу, являють однорідний ресурс, якщо усі виконавці взаємозамінні при виконанні деякої множини задач. Можна при цьому записати

$$S \in D \exists g_{ik} \in L_{jk} : p(S_{jk}) = 0 \leftarrow S' \in D : S' > S ;$$

$$p(S'_{jk}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } S_{jk} \rightarrow < \text{однорідний ресурс} >; \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Для будь-якої функції  $F_{jk}$  можна отримати множину задач  $Z_{jk}$  вирішення яких буде інваріантним ресурсам, які є у наявності, або способам їх вирішення. Множина задач може бути отримана шляхом декомпозиції загальної множини на деяку підмножину інваріанту ресурсам. Для того щоб вирішення множини задач було інваріантним ресурсам, необхідно однозначно виконати наступні умови:

1. Задачі повинні мати означеність відносно їх постановки в усіх аспектах інформаційного, алгоритмічного, організаційно-методичного, програмного і технічного забезпечень.

2. Повинна бути сформована логічна схема взаємозв'язку задач, яка характеризує вхідні дані для вирішення задачі, що розглядається і результати її вирішення для наступних задач.

3. Реалізація функцій повинна здійснюватись за рахунок вирішення множини задач, що характеризують об'єкти і процеси у цілому, окремі етапи ЖЦД, рівні ієрархії, окремі фактори виробництва.

Кожну групу задач можна представити моделлю типу  $Z_{jk}(P_{jk}, g_{jk})$ , де  $P_{jk}$  – множина вершин графа для  $i$ -тої групи функцій на  $k$ -му рівні;  $g_{jk}$  – множина ребер графа. Величина  $P_{jk}$  характеризує процес вирішення задачі для  $j$ -тої групи функцій на  $k$ -му рівні, а ребро  $g_{jk}$  характеризує факт використання результатів вирішення задачі  $j$ -тої групи на  $k$ -му рівні для наступної задачі.

Логічна схема вирішення задач може бути побудована таким шляхом. Нехай відома множина графів  $Z_{jk}(P_{jk}, g_{jk})$  необхідно побудувати загальний граф  $F_{jk} \rightarrow Z(p, g)$ :

$$\{Z_{jk}(p_{jk}, g_{jk}) : Z_{jk}(p_{jk}, g_{jk}) \in Z(p, g)\}$$

який задовольняє наступні умови:

1. Кожна вершина  $Z_{jk}(P_{jk}, g_{jk})$  має  $P_{jk}$ ,

$$\deg P_{jk} = 1 \text{ або } \deg P_{jk} = 2, \forall P_{jk} \in P, j = \overline{1, J} .$$

2. Дві вершини  $Z_{jk}(P_{jk}, g_{jk})$  суміжні тоді і тільки тоді, коли їх ступені задовольняють співвідношення

$$a_1 \leq \deg p_{1k} - \deg p_{2k} \leq b_1 ;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$a_{n-1} \leq \deg p_{(j-1)k} - \deg p_{jk} \leq b_{n-1} ;$$

$$0 \leq a_n \leq b_n ; p_{jk} \in P ; P = \bigcup_{j=1}^J p_{jk} ; j = \overline{1, J} .$$

Логічна схема задач формується поетапно, включаючи: побудову графа  $Z_{jk}(P_{jk}, g_{jk})$  формування загального графа задач  $Z(p, g)$ , який може складатись із функціональних блоків, що характеризують вирішення окремих груп задач. На основі загального графа може бути побудована організаційно-функціональна структура системи (підсистеми), яка забезпечує вирішення усієї множини задач  $Z_{jk}(P_{jk}, g_{jk})$  у організаційно-технологічному середовищі функціонування. При цьому для кожної задачі  $Z_{jk}(P_{jk}, g_{jk})$  формується матриця, що характеризує трудомісткість її вирішення. Знаючи трудомісткість вирішення задачі  $t_{jk} \in T$  можна при заданих характеристиках комплексів програмно-методичних і технічних засобів, а також рівнях кваліфікації виконавців отримати їх чисельність, необхідну для реалізації множини задач  $Z_{jk}$ :

$$m_{jk} = \frac{t_{jk}}{\Phi_{jk} k_a}; \quad j = \overline{1, J}; \quad k = \overline{1, K},$$

де  $m_{jk}$  – чисельність виконавців, необхідних для вирішення задач  $t_{jk}$ ;

$\Phi_{jk}$  – баланс часу спеціаліста, зайнятого вирішенням  $j$ -х задач на  $k$ -му рівні ієрархії;

$k_a$  – величина, що характеризує рівень автоматизації процесів вирішення задач (рішення задач управління).

Процес формування ОТСЕАД, як систем, що реалізують задачі ціледосягнення у предметних областях діяльності необхідно розглядати комплексно. Розглянемо формування вимог.

Нехай задані:  $\lambda \in \Lambda$  – варіант структури логічної схеми задач ( $W^3\lambda$  – структура логічної схеми задач  $\varphi^3\lambda \in W^3$ );  $\beta \in B$  – варіант структури логічної схеми алгоритмів вирішення задач ( $W\beta$  – структура логічної схеми алгоритму вирішення задач  $\varphi^A\beta \in W^A$ );  $\varphi\lambda\beta, \lambda \in E^A, \beta \in B$  – функції операцій алгоритму вирішення задач;  $IS\beta, S \in S, \beta \in B$  – функції оцінки якості процесів (результатів вирішення задач);  $P \in E^P$  – функції розподілу ресурсів по операціях алгоритму.

Вимоги до якості результуючих процесів

$$Z = I_\beta \left( \frac{Z}{W_\beta} \right) \leq Z_e,$$

де  $I_\beta$  – сімейство функціоналів ( $I_S$ ),  $S \in W_\beta$  якості вихідних даних;

$Z_{e^*}$  – нормативні (задані) характеристики досягнення якості цілі  $e^*$ .

Вимоги до заданих ресурсів

$$C = \sum_{\lambda \in E^A} T_{\lambda\beta} \leq T_{e^*},$$

де  $T_{\lambda\beta}$  – загальна трудомісткість виконання операції  $\lambda$  для варіанту структури  $\beta \in B$ ;  $T_{e^*}$  – заданий ресурс на досягнення цілі  $e^*$ . Вимоги до динаміки процесів

$$t = L_\beta \left( T_{\lambda\beta} / h_{\lambda\beta} \sum_{P \in E^P} \xi(\lambda) \right) \leq t_{e^*},$$

де  $L_\beta$  – функція, що характеризує час роботи алгоритму  $\Sigma^A$  у залежності від часу роботи  $t_{\lambda\beta}$  на окремих операціях і варіантах структури  $\beta \in B$ ;

$t_{\lambda\beta} = T_{\lambda\beta} / h_{\lambda\beta} \sum_{P \in E^P} \xi(\lambda)$  – час виконання окремої

операції  $\lambda$  при варіанті структури  $\beta \in B$ ;  $\sum_{P \in E^P} \xi(\lambda)$  –

ресурс, що використовується для виконання операції  $\lambda$ ;  $h_{\lambda\beta} \sum_{P \in E^P} \xi(\lambda)$  – трудові витрати на виконання

операції  $\lambda$  при варіанті структури алгоритму  $\beta$ .

Обмеження системного вирішення задач ОТСЕАД наступні: на розподіл ресурсів  $\sum_{P \in E^P} \xi P \leq \xi P$  на

відповідність розподілу ресурсів по операціях; заданий набір функціоналів, із яких можливий вибір ( $I_{S\beta} \in I_{S\beta}$ ;  $S \in S$ ;  $\beta \in B$ ); управління функціонування

$[Z / \varphi_\beta^A(\lambda) \varphi_{\lambda\beta}(Z) \varphi_\beta^A(\lambda)]: \lambda \in E^A$ ; заданий набір опе-

раторів, із яких можливий вибір ( $\varphi_{\lambda\beta} \in F_{\lambda\beta}$ ;  $\lambda \in E^A$ ;  $\beta \in B$ );

множина варіантів структури логічної схеми задач, із яких можливий вибір  $\pi(\varphi_\beta^A(\lambda)) = \varphi_\lambda^3[H(\lambda)]: \forall \lambda \in E^A$ ;

( $H, \pi$  – епіморфізми  $\Sigma^A$  на  $\Sigma^3$ ).

Задані: критерій ефективності  $I(u)$ , де  $u = u_1, u_2, \dots, u_n$  – вектор змінних управління; множина обмежень  $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$  накладених на змінні  $u_1, u_2, \dots, u_n$ , які можуть задаватися у вигляді системи рівнянь, або нерівностей  $\Gamma_i: \varphi_i(u_i \leq Q_i)$  і обумовлюють множину допустимих значень вектора

$$\Omega_i = \bigcap_{i=1}^K \Gamma_i.$$

Необхідно забезпечити оптимальне значення  $I$   $\in u$  по  $u$  на множині  $\Omega$ , тобто  $Opt I(u) = I(u^*)$ .

Якщо функція  $I(u)$  і множина  $\Omega$  з часом не міняються, то має місце статична оптимізація.

Задача динамічної оптимізації виникає при зміні  $I(u_i \Omega)$  в часі, тобто якщо необхідно знайти

$$Opt_{u_t \in \Omega} I_t(u) = I(u_{t^*}).$$

Позначимо через  $R$  множину усіх допустимих значень  $\Omega_t, t \in T$ , так щоб у кожний момент часу  $t$  множина  $\Omega_t \in R$ . Кожний варіант вирішення задачі динамічної оптимізації  $u_t^*$  належить одному із елементів множини  $R$ .

При постановці задач динамічної оптимізації представляють інтерес два питання, що включають:

1. Чи змінюється оптимальне рішення  $u^{(0)}$ , якщо так, то наскільки при зміні варіанту постановки задачі з  $\langle I_{t_i}, \Omega_{t_i} \rangle$  на  $\langle I_{t_j}, \Omega_{t_j} \rangle$ .

2. Чи можна знайти таку множину підмножин  $R = \{ \langle I_t, \Omega_t \rangle \mid t \in T \}$ , на якій оптимальне рішення інваріантне, або стійке.

Оптимальне рішення  $u^*$  називається  $\varepsilon$  – стійким відносно зміни структури задачі  $\langle I, \Omega \rangle$  на  $\langle I_\varepsilon, Q \rangle$ , якщо має місце нерівність

$$I(u^*) - I_\varepsilon(u_\varepsilon^*) < \varepsilon.$$

При інваріантності цільової функції  $I_t(u)$  існує множина  $\Gamma_t \in \Gamma$  така, що  $u^* \in \Gamma_t$  є оптимальним рішенням для кожної множини  $\Omega_t \in \Gamma_t$ .

Можна ввести поняття субоптимальної області  $Z(u^* + \bar{a}; u^* - \bar{a})$  і вважати, що люба точка  $u^*$  із  $Z$  є допустимим рішенням оптимізаційної задачі.

### Висновок

Запропонований підхід забезпечує розробку на єдиній системній основі ОТСЕАД, які реалізують по

усіх етапах ЖЦД інформаційні технології вирішення задач, а також перейти до формування єдиної сукупності відповідних моделей і методів.

### Література

1. Гриценко В.И. Информатизация производственных процессов на транспорте / В.И. Гриценко, А.А. Типченко, Н.Р. Левковец: Препр. / АН Украины, Ин-т кибернетики; 90-48. – К., 1989. – 25 с.

2. Долгополов Б.П. О методике разработки технических условий на ремонт в условиях ограниченных исходных данных / Б.П. Долгополов, С.Ю. Багачев // Проблемы обеспечения надежности машин при ремонте: Сб. научных трудов МАДИ (ГТУ). – М., 2001. – С. 76-81.

3. Тимченко А.А. Исследование структуры и моделирование логико-динамических систем / А.А. Тимченко, К.Д. Жук, Т.И. Доленко. – К.: Наукова думка, 1975. – 197 с.

Надійшла до редакції 30.05.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.А. Тамаргазін, Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*А.Н. Авдеев*

Рассмотрены вопросы разработки методологии построения организационно-технической системы технической эксплуатации современных авиационных двигателей. Предложенный подход базируется на рассмотрении непрерывного сопровождения летной годности авиационной техники в течение всего жизненного цикла. Формализованное описание процессов представлено в виде комплексного алгоритма, реализованного в рамках человеко-машинной системы управления авиационной техникой. При рассмотрении методологии учитывалось, что в системе решаются вопросы информационного, алгоритмического, организационно-методического, программного и технического обеспечения. Для этого сформирована логическая схема взаимосвязи задач, которая характеризует входные данные для решения каждой задачи и позволяет рассматривать результаты их решения для последующих задач.

**Ключевые слова:** авиационный двигатель, эксплуатация, жизненный цикл, организационно-техническая система

## FORMALIZATION OF ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEM OF MAINTENANCE OF AIRCRAFT ENGINES

*A.M. Avdeev*

In this article observed the problems of working out of methodology of construction of organizational-technical system of engineering maintenance of modern aircraft engines. The offered approach is based on consideration of continuous tracking of the flight validity of an aeronautics during all life cycle. The formalized exposition of processes is presented in the form of the complex algorithm realised within the limits of a cheloveko-machine control system by an aeronautics. By methodology consideration it was considered, that in system problems of the informational, algorithmic, organizational-methodical, programm and engineering securities are solved. The logical circuit of interconnection of problems which characterises input datas for the solution of each problem is for this purpose generated and allows to observe outcomes of their solution for the subsequent problems.

**Key words:** the aircraft engine, maintenance, life cycle, organizational-technical system.

**Авдєєв Олександр Миколайович** – аспірант кафедри збереження льотної придатності авіаційної техніки Національного авіаційного університету, Київ, Україна.