

УДК 629.735.017.083

ЛОГИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОГРАММ ПОДДЕРЖАНИЯ ЛЕТНОЙ ГОДНОСТИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А.А. ИЦКОВИЧ, И.А. ФАЙНБУРГ

В статье рассмотрены логистические аспекты оптимизации программы поддержания летной годности (ПЛГ) воздушных судов с использованием моделей управляемых полумарковских процессов.

Ключевые слова: воздушные суда (ВС), программы ПЛГ, логистические аспекты оптимизации, модели управляемых полумарковских процессов.

В состав задач интегрированной логистической поддержки управления процессами ПЛГ ВС с целью повышения их эффективности на протяжении всего жизненного цикла (ЖЦ) входит задача оптимизации программы ПЛГ ВС на основе применения современных CALS-технологий, логистическим аспектам которой посвящена настоящая статья [2; 4].

Многоцелевой характер программы ПЛГ ВС определяет возможность постановки двух видов задач оптимизации: многокритериальной оптимизации и условной однокритериальной оптимизации программ. При многокритериальной постановке задачи в качестве критериев оптимизации принимаются показатели безопасности полетов, регулярности отправок, интенсивности использования, затрат времени труда и средств на ПЛГ ВС. При однокритериальной постановке задачи критерий оптимизации выбирается из числа показателей эффективности программы, остальные показатели эффективности используются в качестве ограничений.

Учитывая особенности исходной информации на ранних стадиях жизненного цикла ВС, следует рекомендовать применение многокритериального метода оптимизации программ, а на стадиях серийной эксплуатации - однокритериального метода. Результаты исследований по разработке однокритериального метода рассматриваются в данной статье.

Для оптимизации программы ПЛГ ВС целесообразно использовать модель управляемого полумарковского процесса ПЛГ, которая рассмотрена в работах [1; 3; 5] и удовлетворяет следующим требованиям:

- 1) отражает изменение технического состояния ВС (старение объекта) и процесса ПЛГ ВС (динамика процесса) в течение всего жизненного цикла;
- 2) различает при использовании ВС по назначению состояния, соответствующие различному уровню работоспособности ее функциональных систем;
- 3) обеспечивает возможность оценки влияния параметров программы ПЛГ ВС на показатели эффективности ПЛГ ВС (безотказности авиационной техники (АТ), безопасности и регулярности полетов, интенсивности использования, экономичности ПЛГ ВС);
- 4) допускает сочетание различных стратегий и режимов ПЛГ ВС функциональных систем и элементов;
- 5) предусматривает возможность неполного восстановления исправности функциональных систем ВС.

При построении и реализации программы ПЛГ ВС возникает задача выбора из множества альтернативных вариантов программ ПЛГ ВС функциональных систем, наилучших в смысле обеспечения заданных условий оптимизации. Для программы ПЛГ ВС условия оптимизации заключаются в получении значений показателей безопасности полетов, регулярности отправок, интенсивности эксплуатации не ниже заданных при минимальных затратах средств на ПЛГ ВС на всех стадиях ЖЦ.

Общая постановка задачи состоит в следующем [2].

Пусть известно множество $X(t) = \{X_i(t), i = \overline{1, n}\}$ возможных переменных программы ПЛГ ВС, принимающих конечное множество значений на отрезке $[X_{imin}(t), X_{imax}(t)]$. Варьируя значения элементов множества $X(t)$, можно получить множество $K(t)$ возможных вариантов программы ПЛГ ВС. Требуется выбрать варианты $k(t) \in K(t)$, обеспечивающие множество $L(t) = \{L_f, f = \overline{1, m}\}$ заданных показателей эффективности программы $[Z_l(t), l \in L]$ при минимальных удельных (на летный час) затратах $C_{yo}(t)$ на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) в течение всего ЖЦ ВС, т.е. требуется определить $\min C_{yo}(X, t)$ при ограничениях $Z_l(X, t) \{ \leq \} [Z_l(t)]^\infty$.

Структуризация задачи оптимизации программ ПЛГ ВС позволяет выделить номенклатуру входных данных и результирующих характеристик с учетом воздействия внешних и внутренних факторов, от которых зависит выбор оптимального варианта программы ПЛГ ВС. Выбор номенклатуры исходных данных, внешних и внутренних факторов, а также результирующих характеристик программы ПЛГ ВС состоит в определении перечня переменных $X_i(t), i = \overline{1, n}$, показателей $Z_l, l \in L$ и вариантов $k(t) \in K(t)$.

Проведенные исследования по формированию программы ПЛГ ВС показали, что на ее содержание оказывают влияние конструктивно-эксплуатационные свойства ВС и эксплуатационные факторы: интенсивность использования, оснащенность авиапредприятий, квалификация обслуживающего персонала, уровень организации труда, климатические условия и т.д.

Состав и значимость факторов, влияющих на формирование программы ПЛГ ВС, а следовательно, и состав характеристик программы определяются следующим: этапом формирования программы, целевым назначением ВС, предполагаемыми условиями эксплуатации, глубиной научно-технической проработки проблемы обоснования программы ПЛГ ВС, координацией действия разработчика и заказчика, наличием временных и материально-технических ресурсов.

Для решения этой задачи необходимо использовать математическую модель [1; 2] управляемых полумарковских процессов ПЛГ ВС, удовлетворяющую изложенным выше требованиям (рисунок). Рассмотренная модель управляемых полумарковских процессов ПЛГ ВС нашла применение для оценки эффективности и оптимизации современных программ ПЛГ самолетов Ту-154М на основе прогрессивных технологий [6].

Целевая функция представляет собой удельные суммарные затраты на летный час во всех состояниях [2; 3]

$$C_{уд} = \sum_{j \in B_q} \sum_{k \in K_i} \tilde{\pi}_j \mu_j^k \tilde{N}_{j(l)}^k d_j^k / \sum_{i \in H_q} \sum_{k \in K_i} \tilde{\pi}_i \mu_i^k d_j^k. \quad (1)$$

Полагая

$$X_i^k = \tilde{\pi}_j^k d_j^k \geq 0, j \in S_q, k \in K_j \quad (2)$$

и используя тот факт, что $\pi_j = \sum_{k \in K_j} X_j^k, \sum_{j \in S_q} \sum_{k \in K_i} \mu_j^k X_j^k \geq 0$, введя новые переменные

$$Y_i^k = X_i^k / \sum_{j \in S_q} \sum_{k \in K_i} \mu_j^k X_j^k, \quad (3)$$

представим задачу определения оптимального варианта программы ПЛГ ВС в следующем виде

$$\min \sum_{j \in S_q} \sum_{k \in K_i} \mu_j^k C_{j(l)}^k Y_j^k, \quad (4)$$

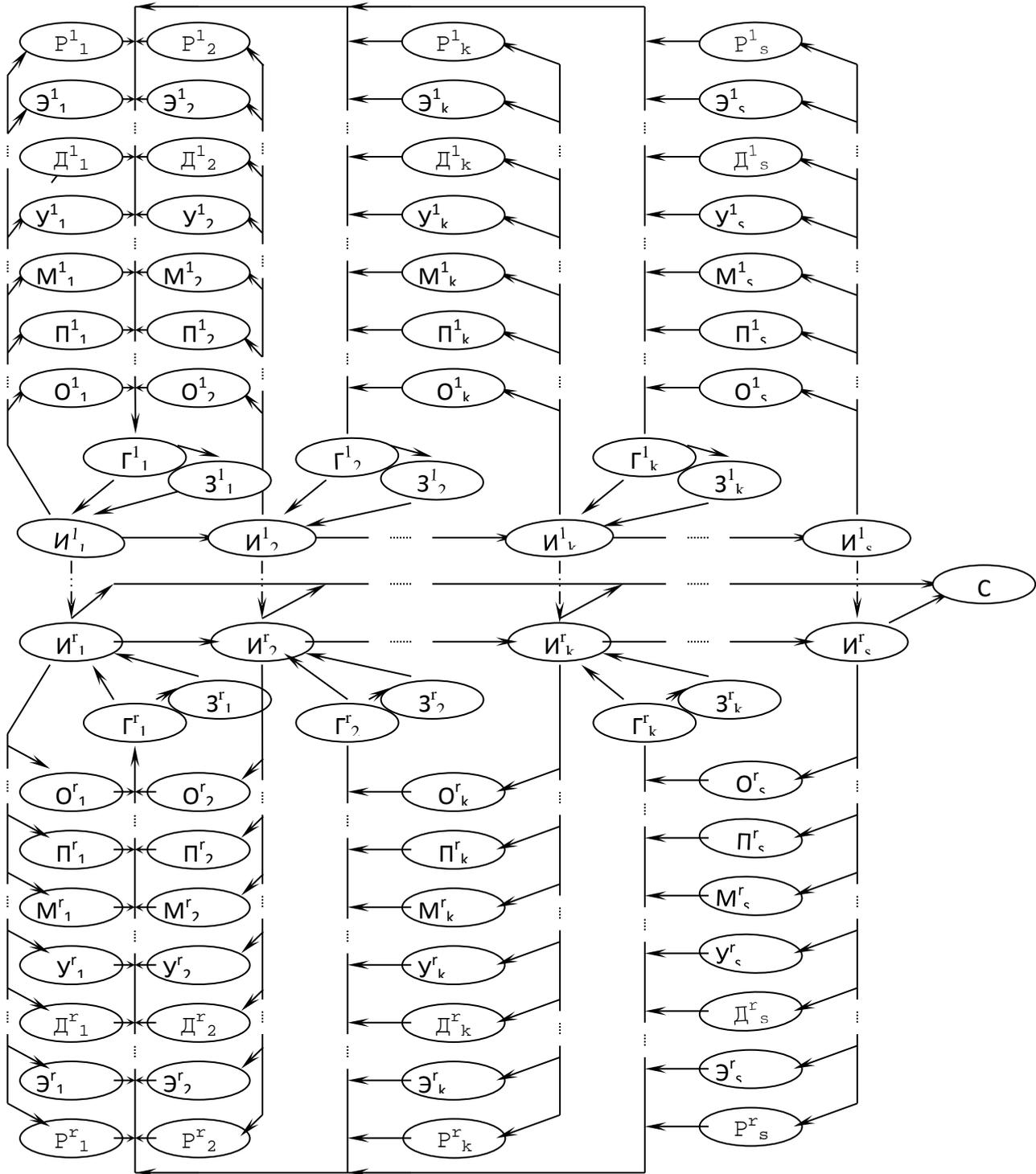


Рисунок. Полумарковская модель управляемого процесса ПЛГ ВС. Состояния процесса ПЛГ ВС:

$I_i^q \in I$ - использование по назначению на q -м этапе эксплуатации ($q=1, \dots, r$), при i -м уровне работоспособности ($i=1, \dots, s$); $O_i^q \in B$ - оперативное техническое обслуживание (ТО); $\Pi_i^q \in B$ - периодическое ТО; $M_i^q \in B$ - мониторинг летной годности ВС в Центре ТО и Р; $Y_i^q \in B$ - установление (продление) ресурсов и сроков службы ВС; $D_j^q \in B$ - выполнение доработок и директив летной годности; $P_i^q \in B$ - ремонт; \mathcal{E}_i^q - сертификация экземпляра ВС; \mathcal{Z}_i^q - задержка вылета по техническим причинам; Γ_i^q - готовность к использованию по назначению; C - списание ВС (поглощающее состояние)

при стандартных ограничениях:

$$\sum_{k \in K_i} Y_j^k - \sum_{i \in S_q} \sum_{k \in K_i} P_{ij}^k Y_j^k = 0, \quad 1 \leq j \leq N-1, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I_q} \sum_{k \in K_i} \mu_j^k Y_j^k = 1; \quad (6)$$

$$Y_j^k \geq 0, \quad J \in S_q, \quad k \in K_j,$$

при дополнительных ограничениях:

$$Y_i^k / \sum_{j \in I_q} \sum_{k \in K_i} Y_j^k \leq [Q_{\text{ууп}}], \quad i \in I_{s-1}^q, \quad (7)$$

$$Y_i^k / \sum_{j \in I_q} \sum_{k \in K_i} Y_j^k \leq [Q_{\text{сс}}], \quad i \in I_s^q, \quad (8)$$

$$1 - \sum_{j \in S_q} \sum_{k \in K_i} Y_j^k / \sum_{i \in I_q} \sum_{k \in K_i} Y_i^k \geq [P_B], \quad (9)$$

где $[Q_{\text{ууп}}], [Q_{\text{сс}}], [P_B], [K_{\text{и}}]$ - заданные значения показателей $Q_{\text{ууп}}, Q_{\text{сс}}, P_B, K_{\text{и}}$.

Это стандартная задача линейного программирования (1)-(9).

Если $\{Y_j^k, j \in S_q, k \in K_j\}$ - ее решение, то оптимальной является рандомизированная (смешанная) стратегия (программа ПЛГ ВС) с вероятностями $d_j^k = Y_j^k / \sum_{k \in K_j} Y_j^k$, т.е. обычная

стратегия с вероятностями перехода $\tilde{P}_{ij} = \sum_{k \in K_i} P_{ij}^k d_i^k$ и средним временем пребывания в i -м

состоянии, $\mu_i = \sum_{k \in K_i} \mu_i^k d_i^k, i \in S_q$ средними затратами в единицу времени пребывания в i -м

состоянии $C_{i(1)} = \sum_{k \in K_i} \mu_j^k C_{j(1)}^k d_j^k / \sum_{k \in K_i} \mu_i^k d_i^k$.

Для оптимального варианта программы выполняется расчет показателей эффективности процесса ПЛГ ВС, приведенным в [1].

Задача оптимизации программы ПЛГ ВС для процесса $m_n \in M$ с поглощающим состоянием существенно отличается от рассмотренной [1; 5]. По условиям разбиения всего процесса на полумарковские процессы $m_n \subset M, q = \overline{1, r}$ среднее время поглощения объекта является конечным, а среднее время нахождения объекта в состояниях использования можно считать фиксированным.

Введем вектор начального распределения $(a_j), j = \overline{1, n}$. Для расчета элементов вектора используются параметры процесса m_{n-1} такие, как вероятности $d_j^k, \sum_{k \in K_j} d_j^k = 1,$

характеризующие оптимальную рандомизированную стратегию, стационарные вероятности $\tilde{\pi}_i = \sum_{i \in S_q} \sum_{k \in K_i} \pi_i P_{ij}^k d_i^k, \sum_{i \in S_q} \tilde{\pi}_i = 1,$ среднее время μ_i^k пребывания объекта в i -м состоянии

процесса $m_n \in M$, которые позволяют вычислить

$$a_j = \pi_j \sum_{k \in K_i} \mu_j^k d_j^k / \sum_{j=1}^N \sum_{k \in K_j} \pi_j \mu_j^k d_j^k, \quad j = \overline{1, N}.$$

В качестве критерия оптимизации программы ПЛГ ВС в рамках процесса m_n используют средние затраты (доходы) за конечное время. Дополнительные ограничения необходимо наложить на вероятности перехода самолета в состояния функциональных отказов и особых ситуаций в полете

$$\sum_{k \in K_i} P_{ij}^k d_i^k = \sum_{i \in I^1} P_{ij}^k \left(X_i^k / \sum_{i \in I} X_i^k \right) \leq [Q], j \in I^{11},$$

где $X_i^k = \tilde{\pi}_i d_i^k$, $[Q]$ - заданная вероятность функциональных отказов и особых ситуаций в полете.

Тогда задача линейного программирования для процесса примет вид

$$\min \sum_{j=1}^N \sum_{k \in K_j} \mu_j^k C_{j(1)} X_j^k,$$

при ограничениях:

$$\sum_{k \in K_j} X_j^k - \sum_{j=1}^N \sum_{k \in K_j} P_{ij}^k X_i^k = a_i, \quad j = \overline{1, N}, X_j^k \geq 0, k \in K_j,$$

$$\sum_{i \in I^1} P_{ij}^k \left(X_i^k / \sum_{i \in I^{11}} X_i^k \right) \leq [Q], i \in I^1, j \in I^{11}.$$

Оптимальная рандомизированная стратегия характеризуется определяемыми в этой задаче вероятностями $d_j^k = X_j^k / \sum_{k \in K_j} X_j^k$, которые означают, что в состоянии с вероятностью d_i^k

принимается решение K , т.е. действуют вероятности $\tilde{P}_{ij}^k = \sum_{k \in K_i} P_{ij}^k d_i^k$ и средние времена

пребывания в состоянии I^1 , $I^{11} \in I$, $S_q \in S, i = \overline{1, N}$.

Задача определения исходных параметров (переходных вероятностей P_{ij} и средних времен пребывания объекта в состоянии μ_i) полумарковского процесса $m_q \subset M, q = \overline{1, n}$ рассматривается для управляемых состояний: использования по назначению I^1 , $I^{11} \in I$, $S_q \in S, i = \overline{1, N}$, состояния ГОиР $B_i^q, q = \overline{1, n}, i = \overline{1, s}$ приведена в [1].

Рассмотренные логистические аспекты оптимизации программ ПЛГ ВС на основе управляемых полумарковских процессов могут использоваться при разработке и реализации эффективных программ ПЛГ ВС на различных стадиях жизненного цикла ВС с учетом характера исходной информации о конструктивно эксплуатационных свойствах ВС и процессе ПЛГ ВС.

Построение модели управляемого полумарковского процесса ПЛГ ВС осуществляется с учетом его иерархической структуры и существующей системы учета распределения фонда календарного времени и апробирована при оценке эффективности и оптимизации современных программ ПЛГ самолетов Ту-154М на основе прогрессивных технологий [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ицкович А.А.** Управление процессами технической эксплуатации летательных аппаратов: учеб. пособие. - Ч. 2. - М.: МГТУ ГА, 2002.
2. **Ицкович А.А., Файнбург И.А.** Интегрированная логистическая поддержка управления процессами ПЛГ ВС // Статья в данном Вестнике.
3. **Майн Х., Осаки С.** Марковские процессы принятия решений. - М.: Наука, 1977.
4. **Судов Е.В.** Технологии интегрированной логистической поддержки изделий машиностроения / А.И. Левин, А.В. Петров, Е.В. Чубарова. - М.: Издательский дом «Информбюро», 2006.
5. **Файнбург И.А.** Построение полумарковской модели управления процессом поддержания летной годности воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА, серия Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. - 2007. - № 123. - С. 147-152.
6. **Шапкин В.С., Ицкович А.А., Семин А.В., Файнбург И.А.** Анализ эффективности программы поддержания летной годности самолетов Ту-154М в центре технического обслуживания и ремонта на основе прогрессивных технологий // Научный Вестник МГТУ ГА, серия Аэродинамика и прочность, поддержание летной годности воздушных судов. - 2008. - № 130. - С. 192-200.

LOGISTICS ASPECTS OF PROGRAMS OPTIMIZATION OF THE MAINTENANCE
OF THE AIRCRAFTS FLIGHT VALIDITY

Itskovich A.A., Faynburg I.A.

Logistics aspects of programs optimization of the maintenance of the aircrafts flight validity using models of steered semimarkovian processes are considered.

Key words: aircrafts, FVM (flight validity maintenance) programs, logistics aspects of optimization, models of steered semimarkovian processes.

Сведения об авторах

Ицкович Александр Абрамович, 1934 г.р., окончил УАИ (1957), профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, автор более 280 научных работ, область научных интересов – эксплуатационная надежность и эффективность эксплуатации авиационной техники, управление процессами технической эксплуатации и поддержания летной годности летательных аппаратов, интегрированная логистическая поддержка.

Файнбург Инна Александровна, окончила МИИВТ (1989), кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, автор более 60 научных работ, область научных интересов – управление процессами технической эксплуатации и поддержания летной годности летательных аппаратов, интегрированная логистическая поддержка.