

УДК 629.735.083

Конахович Г. Ф., д-р техн. наук,  
Козлюк И. А., канд. экон. наук

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПО ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

Институт информационно-диагностических систем Национального авиационного университета

*В статье определена методология формирования оптимального обменного фонда изделий авиационной техники для различных вариантов построения системы технического обслуживания и ремонта с целью разработки комплексного подхода к оптимизации процессов эксплуатации перспективных воздушных судов по технико-экономическим критериям эффективности технического обслуживания и ремонта.*

Создание в Украине собственных независимых авиакомпаний, государственных органов управления гражданской авиации (ГА) и намечающийся переход на эксплуатацию новых типов воздушных судов (ВС) ставит особенно актуальной проблему внедрения новых принципов технической эксплуатации перспективных радиоэлектронных систем ВС.

Применение на борту ВС сложных электронных систем привело к тому, что трудозатраты на техническое обслуживание (ТО) и восстановление систем стали недопустимо большими. Отсутствие научно обоснованной системы обеспечения запасами авиационной техники (АТ) приводит к большим финансовым убыткам. В одном случае из-за необоснованного большого запаса изделий АТ в обменном фонде (ОФ), а в другом случае – из-за простоев ВС по причине отсутствия необходимых изделий АТ.

Существенное снижение трудозатрат на ТО и ремонт АТ может быть достигнуто широким применением встроенных систем контроля (ВСК) и автоматизацией наземных средств эксплуатационного контроля (АНСЭК). Однако, внедрение ВСК порождает проблему ложных снятий изделий АТ с борта ВС, что в свою очередь влечет за собой увеличение числа заявок на запасное изделие и к неоправданному завышению количества запасных изделий в ОФ авиапредприятия (АП).

Поэтому задача рационального построения системы технической эксплуатации перспективных ВС представляет важную народно-хозяйственную проблему не только в отношении экономической эффективности, но и в отношении обеспечения безопасности полетов.

Целый ряд работ [1-8] посвящен формализации и математическому описанию систем ТО АТ как составной части системы эксплуатации, тем не менее исследованию управлением эффективностью систем технического обслуживания авиационной техники уделено мало внимания.

Поэтому целью настоящей статьи является разработка комплексного подхода к оптимизации процессов эксплуатации перспективных ВС по технико-экономическим критериям эффективности технического обслуживания и ремонта (ТОиР).

Целью создания системы обеспечения оптимальным обменным фондом процесса технической эксплуатации является создание механизма определения численности и состава запасов, обеспечивающих непрерывность использования авиационной техники по назначению при минимальных удельных средних затратах. Как следует из математических моделей, приведенных в [9], обеспечение непрерывного планового использования (регулярности полетов) может быть достигнуто при  $\Delta t_{зад} \rightarrow 0$ . Целевые функции оптимизации численности и состава обменного



фонда также могут быть определены из математических моделей, полученных в [9].

Задача определения оптимального числа запасных блоков в обменном фонде базового аэропорта следующим образом.

Требуется определить количество запасных изделий АТ  $F_{BA}$ , необходимых для функционирования совокупности  $N_{BC}^{BA}$  воздушного судна, с вероятностью  $P(F_{BA})$  того, что все приписанные к базовому аэропорту самолеты будут обеспечены изделиями данного типа и не будет нарушения регулярности полетов из-за их отсутствия. Вероятность  $P(F_{BA})$  является доверительной вероятностью. В случае неудовлетворения заявки на запасное изделие производится экстренная доставка либо с завода-изготовителя.

Целевой функцией оптимизации обменного фонда базового аэропорта являются приведенные затраты на эксплуатацию в течение года совокупности  $m N_{BC}^{BA}$  однотипных изделий АТ на приписанной парке воздушных судов:

$$З(F_{BA}) = C_{\text{э}}(F_{BA}) + E_H K_{\text{ОФ}}(F_{BA}), \quad (1)$$

где  $C_{\text{э}}(F_{BA})$  – себестоимость эксплуатации совокупности однотипных изделий в течение года;  $K_{\text{ОФ}}(F_{BA})$  – капитальные вложения в обменный фонд базового аэропорта для данного типа изделия;  $F_{BA}$  – количество запасных изделий в обменном фонде базового аэропорта.

Показатели  $C_{\text{э}}$ ,  $K_{\text{ОФ}}$  и  $З$  являются функциями параметра  $F_{BA}$ . Поэтому оптимальное число запасных изделий  $F_{BA}^*$  в ОФ базового аэропорта определяется из решения задачи

$$З(F_{BA}^*) = \min_{F_{BA}} З(F_{BA}). \quad (2)$$

В рамках постановки такой задачи может быть два решения. В первом случае предполагается, что изделия АТ имеют гарантию завода. Поэтому демонтированное с борта ВС изделие отправляется для восстановления на заводе. Во втором случае демонтированное изделие отправ-

ляется либо на авиационном ремонтном заводе, либо на заводе-изготовителе для восстановления по договорной цене. В обоих случаях необходимо задать гарантированную или договорную продолжительность восстановления  $t_B$ , от величины которой в значительной степени зависит объем обменного фонда базового аэропорта.

Таким образом, целевая функция оптимизации обменного фонда изделий базового аэропорта имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} Z^{W1}(F_{BA}) = & m N_{BC}^{BA} T_{\text{ПН}} [C_{S3} t_{S3} + \\ & + C_{S32} t_{S32} + C_{TP}^{3H} + C_{BC}^{BA} \Delta t_{3AD}^{BA}(F_{BA})] / \\ & / MS_0 + (E_{\text{ОФ}} + E_H) Ц F_{BA}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta t_{3AD}^{BA}(F_{BA})$  – среднее время задержки самолета в базовом аэропорту вследствие неудовлетворения требования на запасное изделие;  $MS_0$  – среднее время между последовательными снятиями изделия с борта ВС;  $C_{TP} = C_{S04}$  (рис. 2) – транспортные расходы, связанные с доставкой блока на завод-изготовитель или авиационный ремонтный завод.

Среднее время задержки самолета в базовом аэропорту определяется по формуле

$$\begin{aligned} \Delta t_{3AD}^{BA}(F_{BA}) = & \alpha(t_{S2} + t_{S3} + \\ & + t_{S32} + \Delta t_{\text{ОФ}}^{BA}(F_{BA}) - t_C^{BA}), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Delta t_{\text{ОФ}}^{BA}(F_{BA})$  – среднее время задержки в удовлетворении требования на запасное изделие в базовом аэропорту;  $\alpha$  – индикатор, определяемый выражением

$$\begin{cases} 0, & \text{при } t_C^{BA} \geq (t_{S2} + t_{S3} + t_{S32} + \Delta t_{\text{ОФ}}^{BA}(F_{BA})), \\ 1, & \text{при } t_C^{BA} < (t_{S2} + t_{S3} + t_{S32} + \Delta t_{\text{ОФ}}^{BA}(F_{BA})). \end{cases}$$

Необходимо отметить, что  $\Delta t_{3AD}^{BA}(F_{BA})$  является показателем достаточности ОФ. Данный показатель входит в качестве параметра в целевые функции оптимизации ОФ для всех стратегий построения системы технического обслуживания и ремонта. Для расчета показателя достаточности используем теорию мар-

ковских процессов. Для чего обозначим через  $F$  количество запасных изделий данного типа в обменный фонд;  $q$  – количество изделий данного типа на приписном парке самолетов.

Тогда состояние  $S_i$  системы « $q$  основных –  $F$  запасных изделий» расширяется следующим образом:

$S_1$  –  $q$  основных изделий работоспособны и в обменном фонде находятся  $F$  запасных изделий;

$S_2$  –  $q$  основных изделий работоспособны и в обменном фонде находятся  $F - 1$  запасных изделий;

...

$S_F - q$  основных изделий работоспособны и в обменном фонде находятся одно запасной блок;

$S_{F+1} - q$  основных изделий работоспособны и в обменном фонде нет ни одного запасного блока;

$S_{F+2} - q - 1$  основных изделий работоспособны, один основной блок отказал и в ОФ нет ни одного запасного блока;

...

$S_{F+q+1}$  – отказали все основные изделия и в обменном фонде нет запасных изделий.

Граф состояний системы из  $q$  основных блоков и  $F$  запасных изделий показан на рис. 1.

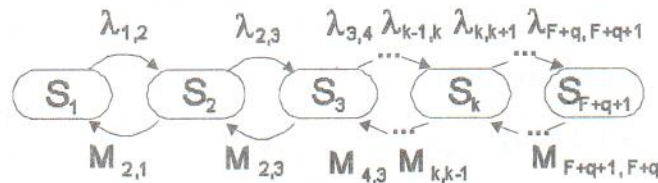


Рис. 1. Граф состояний системы из  $q$  основных блоков и  $F$  запасных блоков

На рис. 1 приведены следующие обозначения:  $\lambda_{i,i+1}$  – интенсивность снятия изделий, переводящая систему из  $i$ -го в  $(i + 1)$ -е состояние;  $\mu_{i+1,i}$  – интенсивность восстановления изделий, переводящая систему из  $(i + 1)$ -го в  $i$ -е состояние.

Предельные вероятности состояний  $P_1, P_{F+q+1}$  удовлетворяют системе линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \lambda_{1,2}P_1 - \mu_{2,1}P_2 = 0, \\ \lambda_{2,3}P_2 - \mu_{3,2}P_3 = 0, \\ \dots \\ \lambda_{k-1,k}P_{k-1} - \mu_{k,k-1}P_k = 0, \\ \dots \\ \lambda_{F+q,F+q+1}P_{F+q} - \mu_{F+q+1,F+q}P_{F+q+1} = 0, \\ \sum_{i=1}^{F+q+1} P_i = 1. \end{cases} \quad (5)$$

Решение системы уравнений (5) имеет следующий вид:

$$P_1 = \left[ 1 + \sum_{v=1}^{F+q} \frac{\prod_{i=1}^v \lambda_{i,i+1}}{\prod_{i=1}^v \mu_{i+1,i}} \right]^{-1},$$

$$P_k = P_1 \frac{\prod_{i=1}^k \lambda_{i,i+1}}{\prod_{i=1}^k \mu_{i+1,i}}, k = \overline{2, F+q+1}.$$

Интенсивность переходов марковской цепи  $\lambda_{i,i+1}$  определяются следующим образом:

$$\lambda_{i,i+1} = \begin{cases} q\lambda_c, & i = \overline{1, F+1} \\ (q + F + 1 - i)\lambda_c, & i = \overline{F+2, F+q} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $\lambda_c$  – интенсивность снятия изделия с борта ВС,  $\lambda_c = 1/MS_0$ .



Среднее время задержки в удовлетворении заявки на запасной блок вычисляется по формуле:

$$\Delta t = \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^q i P_{F+i+1}, \quad (7)$$

где  $\Lambda$  – средняя интенсивность поступления заявок в ОФ на запасные блоки,

$$\Lambda = \lambda_c \left[ q \sum_{i=1}^{F+1} P_i + \sum_{j=F+2}^{F+q+1} (q+F+1-j) P_j \right].$$

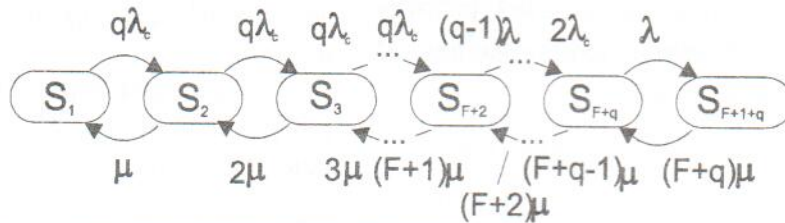


Рис. 2. Граф состояний при ограниченном восстановлении демонтированных изделий

Интенсивность восстановления

$$\mu_{i+1,i} = \mu = \frac{1}{t_B} (i = \overline{1, F+q}), \quad (8)$$

где  $t_B$  – среднее время восстановления блока.

При определении интенсивности восстановления  $\mu_{i+1,i}$  ( $i = \overline{1, F+q}$ ) возможны несколько случаев.

Случай 1. Полностью ограниченное восстановление демонтированных блоков – одновременно восстанавливается только один блок данного типа.

Граф состояний имеет вид, показанный на рис. 2.

Случай 2. Частично ограниченное восстановление демонтированных изделий – одновременно может восстанавливаться не более  $\Delta$  изделий (рис. 3), где  $\Delta = \overline{1, F+q}$ .

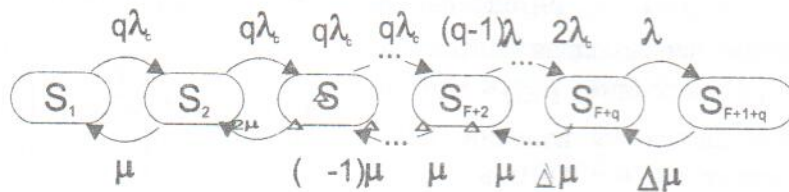


Рис. 3. Граф состояний при частично ограниченном восстановлении демонтированных изделий

Интенсивность восстановления определяется по формуле:

$$\mu_{i+1,i} = \begin{cases} i\mu = \frac{i}{t_B}, i = \overline{1, \Delta-1} \\ \Delta\mu = \frac{\Delta}{t_B}, i = \overline{\Delta, F+q}. \end{cases} \quad (9)$$

Случай частично ограниченного восстановления является наиболее общим. При  $\Delta = 1$  формула (9) преобразуется к виду (8).

Используя полученные выше результаты можно определить целевые функции и произвести расчеты для любой

стратегии построения системы технического обслуживания и ремонта. Рассмотрим целевые функции оптимизации обменного фонда транзитного аэропорта для изделий, влияющих на безопасность полетов.

Задача определения оптимального числа запасных изделий в обменном фонде транзитного аэропорта формулируется так. Требуется определить количество запасных изделий  $F_{TA}$ , необходимых для функционирования совокупности  $N_{BC}^{TA}$  м однотипных изделий, установленных на  $N_{BC}^{TA}$  воздушном судне, прибывающих в транзитный аэропорт, с вероятностью

$P(F_{TA})$  того, що все прилетаючі самолети будуть забезпечені изделиями данного типу і не буде порушення регулярності польотів із-за їх відсутності. Вероятність  $P(F_{TA})$  являється довірливою вероятністю. В випадку незадоволення заявки довірливою вероятністю. В випадку незадоволення заявки на запасне изделие АТ виробляється екстренна доставка изделия (або декількох) із аеропорту, до якого приписано повітряне судно, наприклад, черговим рейсом.

Пусть на кожному із самолетів установлено  $m$  однотипних изделий. Тоді загальна кількість изделий на самолеті, прибуваючих в транзитний аеропорт становит

$$q^{TA} = mN_{BC}^{TA} \quad (10)$$

Если задана довірлива вероятность  $P(F_{TA})$ , то порядок визначення оптимального числа запасних изделий  $F_{TA}^*$  заключається в наступному. На першому кроці визначаємо середнє час знаходження изделия в робоспособном стані за середній цикл регенерації по формуле:

$$MS_1 = \frac{1 - e^{-\lambda \tau_n}}{\lambda [1 - (1 - \alpha)e^{-\lambda \tau_n}]} \quad (11)$$

Затем визначаємо середнє час знаходження изделия в стані прихованого відмови за середній цикл регенерації

$$MS_2 = \frac{1}{1 - (1 - \alpha)e^{-\lambda \tau_n}} \left[ \frac{\tau_n(1 - \beta e^{-\lambda \tau_n})}{1 - \beta} - \frac{1 - e^{-\lambda \tau_n}}{\lambda} \right] \quad (12)$$

На наступному кроці визначаємо середнє час між послідовними зняттями изделий з борту ВС (середній цикл регенерації) по формуле

$$MS_0 = MS_1 + MS_2 \quad (13)$$

Для визначення інтенсивності зняття з борту повітряного судна використовуємо формулу

$$\lambda_C = 1 / MS_0 \quad (14)$$

Після цього визначаємо інтенсивність зняття изделия з борту повітряного судна в даному транзитному аеропорту по формуле:

$$\lambda_C^{TA} = \frac{\lambda_C}{L} = \frac{1}{LMS_0} \quad (15)$$

Затем перевіряємо виконання умов:

$$q^{TA} t_{ЭД}^{TA} \lambda_C^{TA} < 1 \quad (16)$$

Виконання умови (16) гарантує відсутність простоя самолета із-за нестачі запасних изделий. І, нарешті, визначаємо мінімальне число запасних блоків  $F_{TA}^*$ , задовольняюче нерівності

$$1 - P(F_{TA}) > \frac{(q^{TA} t_{ЭД}^{TA} \lambda_C^{TA})^{F_{TA}+1}}{(F_{TA}+1)!} \exp(-q^{TA} t_{ЭД}^{TA} \lambda_C^{TA}) \quad (17)$$

Пример 2. Припустимо, що типовим маршрутом для самолета Ан-140 задан наступний маршрут: Київ – Симферополь – Київ – Донецьк – Львів – Київ тривалістю 12 годин. Потрібно визначити кількість запасних двигунів в транзитному аеропорту г. Симферополь при наступних значеннях:  $N_{BC}^{TA} = 3$ ;  $m = 3$ ;  $\lambda = 6,09 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ ;  $\alpha = 0,01$ ;  $\beta = 0,01$ ;  $\tau_n = 2 \text{ ч}$ ;  $L = 6$ ;  $t_{ЭД}^{TA} = 6 \text{ ч}$ ;  $P(F_{TA}) = 0,99$ .

Порядок розрахунку заключається в наступному.

1. Визначаємо середнє час знаходження двигуна в робоспособном стані по формуле (11)

$$MS_1 = 176 \text{ ч.}$$

2. Визначаємо середнє час знаходження двигуна в стані прихованого відмови по формуле (12)



$$MS_2 = 0,15 \text{ ч.}$$

3. Определяем среднее время между двумя последовательными снятиями двигателя с борта ВС по формуле (13)

$$MS_0 = 176,15 \text{ ч.}$$

4. Определяем интенсивность снятия двигателя с борта ВС по формуле (14)

$$\lambda_C^{TA} = 5,68 \cdot 10^{-3}.$$

5. Определяем интенсивность снятия двигателя  $MLS$  в транзитном аэропорту г. Симферополь по формуле (15)

$$\lambda_C^{TA} = 9,46 \cdot 10^{-4}.$$

6. Проверяем выполнение условия (16)

$$q^{TA} t_{ЭД}^{TA} \lambda_C^{TA} = m N_{ВС}^{TA} t_{ЭД}^{TA} \lambda_C^{TA} = 5,1 \cdot 10^{-2} < 1.$$

7. Определяем минимальное число запасных двигателей  $F_{ТА}^*$ , удовлетворяющее неравенству (17).

Примечание. Если доверительную вероятность выбрать равной  $P(F_{ТА}^*) = 0,999$ , то  $F_{ТА}^* = 2$ .

Таким образом, для разработки комплексного подхода к оптимизации процессов эксплуатации перспективных воздушных судов по технико-экономическим критериям эффективности технического обслуживания и ремонта необходимо последовательно решить ряд задач:

- провести анализ и выполнить классификацию возможных вариантов построения системы технического обслуживания и ремонта;

- выделить базовые варианты построения системы технического обслуживания и ремонта;

- разработать обобщенный показатель эффективности технического обслуживания и ремонта, а также провести выбор критериев эффективности технического обслуживания и ремонта;

- выполнить математическое моделирование базовых вариантов построения технического обслуживания и ремонта;

- разработать методологию формирования оптимального обменного фонда изделий двигателей для различных вари-

антов построения системы технического обслуживания и ремонта;

- разработать методы повышения эффективности ремонта двигателя;

- обосновать основные направления разработки средств эксплуатационного контроля двигателей, как основного фактора повышения эффективности технического обслуживания и ремонта;

- разработать рекомендации по выбору рациональной системы технической эксплуатации для двигателей перспективных самолетов.

### Список литературы

1. Шилов А. М. Оценка надежности технических устройств при наличии ошибок контроля // Надежность и контроль качества. – 1989. – № 3. – С. 38-43.

2. Тамаргазін О. А. Формування складу робіт з технічного обслуговування і ремонту функціональної системи. // Проблеми системного підходу в економіці.: Сб. науч. тр. – К.: КМУЦА, 1999. – С. 74-77.

3. Леонтьев А. П. Оценка критериев выбора оптимальных характеристик профилактики // Автоматика и вычислительная техника / Под ред. Е. И. Кринецкого. – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.

4. Ллойд Д., Липов М. Надежность: организация, исследования, методы, математический аппарат. – М.: Мир, 1974. – 612 с.

5. Волков Л. И. Надежность летательных аппаратов. – М.: Высшая школа, 1975. – 294 с.

6. Гличев А. Г. Экономическая эффективность технических систем. – М.: Экономика, 1971. – 270 с.

7. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1988. – 232 с.

8. Барзилович Е. Ю., Воскобоев В. Б. Эксплуатация авиационных систем по состоянию. – М.: Транспорт, 1981. – 197 с.

9. Конахович Г. Ф. Повышение эффективности обслуживания и ремонта технических систем. – Киев: «Знание», 1987. – 324 с.