

И.А. МАЧАЛИН

СТОИМОСТНЫЕ КРИТЕРИИ ОПТИМАЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ОБМЕННОГО ФОНДА АВИАЦИОННЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Abstract: *Indexes and criteria of optimization of exchange fund of spares parts of aircrafts are developed for the periods of warranty and post warranty maintenance. Got indexes allow to make optimization of amount of blocks in an exchange fund taking into account the operating costs, and also reliability, periodicity and trustworthiness of checking, depth of renewal of the systems.*

Key words: *systems of radios electronic, exchange fund, technical service, criterion of optimization, trustworthiness of checking.*

Аноація: *Розроблено показники і критерії оптимізації обмінного фонду комплектуючих виробів повітряних суден для періодів гарантійного і післягарантійного обслуговування. Отримані показники дозволяють провести оптимізацію кількості блоків в обмінному фонді з урахуванням вартісних складових експлуатаційних витрат, а також показників надійності, періодичності і достовірності контролю, глибини відновлення систем.*

Ключові слова: *радіоелектронні системи, обмінний фонд, технічне обслуговування, критерії оптимізації, достовірність контролю.*

Аноаация: *Разработаны показатели и критерии оптимизации обменного фонда комплектующих изделий воздушных судов для периодов гарантийного и послегарантийного обслуживания. Полученные показатели позволяют произвести оптимизацию количества блоков в обменном фонде с учетом стоимостных составляющих эксплуатационных затрат, а также показателей надежности, периодичности и достоверности контроля, глубины восстановления систем.*

Ключевые слова: *радиоэлектронные системы, обменный фонд, техническое обслуживание, критерий оптимизации, достоверность контроля.*

1. Введение

Постановка проблемы. Техничко-економическая ефективність експлуатації повітряних суден (ВС) в значительной мере определяется построением системы управления запасами (СУЗ) комплектующих изделий. В настоящее время на ВС используются радиоэлектронные системы (РЭС), удовлетворяющие требованиям ARINC 700 [1] и представляющие собой набор резервированных и легкозаменяемых блоков, называемых обычно Line replaceable units (LRUs). Каждый LRU представляет собой одноблочную систему, состоящую из нескольких модулей – Shop replaceable units (SRUs) и имеющую встроенное средство контроля (BCK). Модульная конструкция LRUs обеспечивает легкий доступ к цепям и компонентам для их тестирования и замены в случае отказов. Для обеспечения процесса эксплуатации в базовых аэропортах и центрах технического обслуживания и ремонта (ТОиР) формируется обменный фонд (ОФ) запасных LRUs (SRUs), предназначенный для своевременной замены отказавших блоков. Избыточное количество запасных LRUs в ОФ влечет за собой высокие капитальные вложения, но при этом практически отсутствуют нарушения регулярности полетов вследствие дефицита запасов. С другой стороны, при недостаточном запасе LRUs капитальные вложения снижаются, но риск дефицита возрастает, а, следовательно, увеличиваются потери из-за нарушения регулярности полетов. Поэтому при формировании ОФ возникает необходимость его оптимизации. Решение этой проблемы непосредственно связано с формированием программ технического обслуживания и эксплуатационного обеспечения новых ВС, поступающих на рынок авиационных перевозок.

Анализ последних исследований и публикаций. Известные показатели и критерии оптимизации запасов можно разделить на две группы: вероятностные и стоимостные. Различные варианты вероятностных показателей приведены в работах [2–4]. Как показал анализ,

вероятностный подход к расчету запасных РЭС и их комплектующих, как правило, заключается в установлении вероятности наступления определенного количества внезапных отказов на рассматриваемом интервале эксплуатации, на основе которого определяется необходимое количество запасных LRUs в зависимости от требуемой вероятности достаточности ОФ. Основной составляющей этих показателей является интенсивность отказов LRU (λ) или среднее время наработки на отказ (MTBF – mean time between failures). Таким образом, эти показатели не учитывают вероятность досрочного съема РЭС с борта ВС, а также достоверность и периодичность контроля работоспособности (КР). Вероятностные показатели не позволяют учесть стоимостные характеристики процесса эксплуатации, поэтому не позволяют определить оптимальный объем ОФ при различных стратегиях организации технического обслуживания (ТО). Кроме того, все вероятностные показатели для принятия решения используют доверительную вероятность, значение которой можно задать только экспертным путем. Известные стоимостные показатели и критерии для оптимизации ОФ [5, 6] не учитывают основные особенности процесса ТО и Р, среднюю наработку систем на досрочный съем, достоверность и периодичность КР, а также объем инвестиций на приобретение НАСК и ОФ.

Цель статьи и постановка задач исследования. *Целью* настоящей статьи является разработка обобщенных показателей и критериев, позволяющих осуществлять оптимизацию ОФ с учетом контроля и ремонтпригодности LRUs, надежности LRUs, достоверности многоразового КР с помощью ВСК, его периодичности, наличия наземных автоматизированных систем контроля (НАСК) и глубины поиска места отказа в дефектных LRUs.

Демонтированный с борта ВС LRU может быть восстановлен на заводе-изготовителе (ЗИ) или в базовом аэропорту. В последнем случае необходимо иметь НАСК, позволяющую осуществлять КР LRUs и поиск места отказа с заданной глубиной. Если потребитель не имеет в базовом аэропорту НАСК, то демонтированный по результатам встроенного контроля LRU необходимо отправить для восстановления на ЗИ. Так как достоверность ВСК не абсолютна, некоторые из демонтированных LRUs ошибочно признаются неработоспособными и отправляются на ЗИ для восстановления, что приводит к дополнительным издержкам.

Показатели для оптимизации ОФ должны отличаться для гарантийного и послегарантийного периодов. Это связано с тем, что данные периоды имеют различные составляющие затрат для эксплуатанта. Поэтому необходимо рассматривать периоды гарантийного и послегарантийного обслуживания отдельно.

Далее будем анализировать два наиболее вероятных варианта стратегии организации гарантийного ТО:

– в первом варианте W1 предполагается, что потребитель не имеет НАСК, и все демонтированные LRUs отправляются на ЗИ для восстановления;

– во втором варианте W2 предполагается, что в базовом аэропорту используется НАСК для перепроверки LRUs, забракованных ВСК. При этом каждый демонтированный LRU отправляется на ЗИ только в том случае, если НАСК подтверждает его неработоспособность. Если НАСК не подтверждает результат контроля ВСК, то LRU устанавливается обратно на борт ВС.

Также будем рассматривать три основных варианта стратегий послегарантийного ТО.

Первый вариант PW1 – самый простой для авиакомпании, но может оказаться и самым дорогим. Все LRUs, признанные ВСК неработоспособными, отправляются на ЗИ для восстановления. При этом авиакомпания не имеет HACK, однако должна иметь достаточное количество запасных LRUs для обеспечения регулярности полетов. В этом варианте на ЗИ отправляются как отказавшие LRUs, так и работоспособные, которые были ложно забракованы ВСК. При этом авиакомпания будет нести потери как за счет оплаты восстановления ложно забракованных LRUs, так и за счет большого числа запасных LRUs, необходимых для обеспечения регулярности полетов.

Во втором варианте PW2 предполагается, что авиакомпания имеет HACK, который может проверять забракованные ВСК LRUs в базовом аэропорту, но не может осуществлять поиск места отказа в LRUs с глубиной до SRU. При этом LRUs, признанные HACK неработоспособными, отправляют на ЗИ для восстановления. Ошибочно демонтированные LRUs возвращают в ОФ.

В третьем варианте PW3 предполагается, что авиакомпания имеет HACK-S, который может перепроверять забракованные LRUs в базовом аэропорту и осуществлять там же поиск места отказа в LRU с глубиной до SRU.

2. Показатели и критерии оптимизации ОФ в период гарантийного обслуживания

Полные ожидаемые эксплуатационные затраты эксплуатанта (total lifetime expected costs – TLEC) на интервале T_w в зависимости от количества LRUs в ОФ можно представить в следующем виде [7]:

$$TLEC(F) = m \cdot N_A \cdot (T_w / MTBUR) \cdot ECC(F) + K_{\Sigma}(F), \quad (1)$$

где F – количество однотипных LRUs в ОФ; T_w – конечный интервал планирования гарантийного обслуживания; m – количество однотипных LRUs, установленных на борту ВС; N_A – количество эксплуатируемых ВС; $ECC(F)$ – ожидаемые (средние) затраты (expected cost per cycle), связанные с простоем ВС из-за несвоевременной замены LRU и выполнением основных операций ТО за средний цикл регенерации системы; $MTBUR$ – средняя наработка LRU между незапланированными восстановлениями (mean time between unscheduled repairs).

С учетом разновременности затрат на обслуживание и капитальных вложений формула (1) приводится к виду

$$TLEC(F) = m \left(\frac{T_0}{MTBUR} \right) \left\{ \sum_{t=1}^{T_K} N_{A,t} ECC_t(F) (1 + \varepsilon)^{1-t} \right\} + \sum_{t=1}^{T_K} K_t(F) (1 + \varepsilon)^{1-t}, \quad (2)$$

где T_0 – средний налет ВС за год; T_K – календарная продолжительность обслуживания LRU, определяемая числом лет эксплуатации; $ECC_t(F)$ – ожидаемые годовые затраты, связанные с простоем ВС из-за несвоевременной замены LRU и выполнением основных операций ТО в году t ; $K_t(F)$ – капитальные вложения эксплуатанта в году t ; ε – норма дисконта времени, выражаемая в долях единицы или в процентах за год; $N_{A,t}$ – количество ВС, эксплуатируемых в

году t .

В соответствии с выражением (2) полные ожидаемые затраты $TLEC_W$ за период гарантийного обслуживания в зависимости от количества LRUs в ОФ определяются по формуле

$$TLEC_W(F) = m \left(\frac{T_0}{MTBUR_W} \right) \left\{ \sum_{t=1}^{T_W} N_{WA,t} ECC_{W,t}(F) (1 + \varepsilon)^{1-t} \right\} + \sum_{t=1}^{T_W} K_{W,t}(F) (1 + \varepsilon)^{1-t}, \quad (3)$$

где $MTBUR_W$ – средняя наработка LRU между двумя восстановлениями на конечном интервале $T_{WM} = T_W \times T_0$.

Показатель $MTBUR_W$ в период гарантийного обслуживания, в соответствии с работой [7], для экспоненциального закона распределения наработки LRU на отказ вычисляется из выражения

$$MTBUR_W \approx \frac{\tau}{\alpha} \cdot [1 - (1 - \alpha)^N e^{-(N+1)\lambda\tau}] + \left[(1 - e^{-\lambda\tau}) \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{\tau}{\alpha} \right) - \tau \cdot e^{-\lambda\tau} \right] \times \\ \times \frac{1 - (1 - \alpha)^{N+1} e^{-(N+1)\lambda\tau}}{1 - (1 - \alpha)e^{-\lambda\tau}} + \tau (1 - \alpha)^N e^{-(N+1)\lambda\tau}, \quad (4)$$

где τ – интервал между КР LRU в базовом аэропорту; $N = \left(\frac{T_{WM}}{\tau} - 1 \right)$ – число КР на интервале T_{WM} ; α – условная (априорная) вероятность того, что работоспособный LRU будет ошибочно забракован ВСК (“ложный отказ”); β – условная (априорная) вероятность того, что неработоспособный LRU будет ошибочно признан работоспособным ВСК (“необнаруженный отказ”); λ – интенсивность отказов LRU.

Ожидаемые (средние) затраты, связанные с простым ВС из-за несвоевременной замены LRU, выполнением основных операций ТО и восстановлением LRU, определяются следующим образом:

$$ECC_{W1,t}(F) = P_{AG}(F) \Psi \Delta T(F) A_{W,t} + C_{TO,t} (t_{KP,t} + t_{M,t} + t_{D,t}) + C_{TR,t}, \quad (5)$$

где $P_{AG}(F)$ – вероятность появления ситуации “aircraft on ground”, связанной с простым ВС из-за несвоевременной замены LRU; $A_{W,t}$ – потери эксплуатанта в единицу времени в году t вследствие незапланированного простоя ВС; $C_{TO,t}$ – стоимость работ по монтажу/демонтажу LRU в час в году t ; $C_{TR,t}$ – средняя стоимость транспортировки LRU на ЗИ для ремонта и обратно в году t ; $t_{M,t}$ и $t_{D,t}$ – соответственно средняя стоимость демонтажа и монтажа LRU на борт ВС в году t ; Ψ – индикаторная функция, принимающая следующие значения:

$$\Psi(F) = \begin{cases} 0, & t_C \geq [t_{KP} + t_D + \Delta t_{SP}(F) + t_M]; \\ 1, & t_C < [t_{KP} + t_D + \Delta t_{SP}(F) + t_M]. \end{cases}$$

Здесь $\Delta t_{SP}(F)$ – среднее время задержки в удовлетворении заявки на поставку запасного LRU на борт ВС; t_C – время стоянки ВС в базовом аэропорту.

Значение среднего времени ΔT определяется из выражения

$$\Delta T(F) = \psi[t_{KP} + t_D + \Delta t_{SP}(F) + t_M - t_C]. \quad (6)$$

Средние потери эксплуатанта вследствие нарушения регулярности полетов зависят от вероятности появления ситуации "aircraft on ground" P_{AG} .

Эта вероятность для LRU вычисляется по формуле

$$P_{AG}(F) = MS_5^{(i)}(F) / MS_0^{(i)}.$$

Среднее время нахождения LRU в состоянии MS_5 (состояние простоя ВС из-за отсутствия в ОФ запасного LRU) определяется из выражения

$$MS_5(F) = \Delta t_{SP}(F) + t_{KP} + t_D + t_M - t_C.$$

Значение среднего времени регенерации MS_0 определено в работах [8, 9].

Если запасные LRU были поставлены только в году t , то капитальные затраты эксплуатанта, приведенные к началу гарантийного срока эксплуатации, равны

$$\sum_{t=1}^{T_W} K_{w,t}(F)(1+\varepsilon)^{1-t} = C_{LRU}(F_t + MF_t)(1+\varepsilon)^{1-t},$$

где F_t – запланированное число запасных LRU в ОФ в году t ; MF_t – незапланированное число запасных LRU, которые будут поставлены с ЗИ для обеспечения регулярности полетов в году t ; C_{LRU} – стоимость LRU.

Если ОФ пополнялся каждый год в гарантийный период, то капитальные затраты эксплуатанта

$$\sum_{t=1}^{T_W} K_{w,t}(F)(1+\varepsilon)^{1-t} = C_{LRU}(F_1 + MF_1) + C_{LRU} \sum_{t=2}^{T_W} (\Delta F_t + \Delta MF_t)(1+\varepsilon)^{1-t}, \quad (7)$$

где F_1 – запланированное число запасных LRU в ОФ в первом году гарантийного срока эксплуатации; MF_1 – незапланированное число запасных LRU, которые предполагается поставить с ЗИ для обеспечения регулярности полетов в первом году гарантийного срока; ΔF_t – планируемое пополнение запаса LRU в ОФ в году t ; ΔMF_t – сверхплановое пополнение запаса LRU в ОФ в году t .

Подставив формулы (5) – (7) в выражение (3), получим целевую функцию оптимизации количества LRU в ОФ для варианта W1:

$$\begin{aligned} TLEC_{W1}(F) = m \left(\frac{T_0}{MTBUR_W} \right) \times \\ \times \left\{ \sum_{t=1}^{T_W} N_{WA,t} [P_{AG}(F)\psi\Delta T(F)A_{w,t} + C_{TO,t}(t_{KP,t} + t_{M,t} + t_{D,t}) + C_{TR,t}] (1+\varepsilon)^{1-t} \right\} + \\ + C_{LRU}(F_1 + MF_1) + C_{LRU} \sum_{t=2}^{T_W} (\Delta F_t + \Delta MF_t)(1+\varepsilon)^{1-t}. \end{aligned} \quad (8)$$

Численное значение вероятности P_{AG} полностью определяется количеством запасных LRUs (F). Если в ОФ иметь большое количество запасных LRUs, то можно добиться очень малых значений вероятности P_{AG} . Однако при этом резко увеличиваются затраты эксплуатанта на закупку запасных LRUs. При малом количестве запасных LRUs затраты на их покупку становятся меньше, но увеличивается значение вероятности P_{AG} , а, следовательно, возрастают потери эксплуатанта вследствие нарушения регулярности полетов. Поэтому существует оптимальное количество LRUs, обозначаемое в дальнейшем как F^* .

Таким образом, оптимальное количество запасных LRUs F^* определяется из решения задачи

$$TLEC(F^*) = \min_F TLEC(F). \quad (9)$$

Затраты $TLEC_{W_2}(F)$ с учетом выражения можно представить в виде

$$TLEC_{W_2}(F) = m \left(\frac{T_0}{MTBUR_W} \right) \left\{ \sum_{t=1}^{t_0-1} N_{WA,t} ECC_{W_{11},t}(F)(1+\varepsilon)^{1-t} + \sum_{t=t_0}^{T_W} N_{WA,t} ECC_{W_{12},t}(F)(1+\varepsilon)^{1-t} \right\} + \frac{C_{HACK-L}}{M_{LRU}} (1+\varepsilon)^{1-t_0} + C_{LRU} (F_1 + MF_1) + C_{LRU} \sum_{t=2}^{T_W} (\Delta F_t + \Delta MF_t)(1+\varepsilon)^{1-t}. \quad (10)$$

Однако в данном варианте организации гарантийного обслуживания ожидаемые затраты эксплуатанта на одно восстановление LRU ($ECC_{W_2,t}$) и капитальные вложения эксплуатанта ($K_{W,t}$) будут зависеть от момента начала эксплуатации HACK. Так, если HACK был приобретен до начала гарантийного обслуживания, то

$$ECC_{W_2,t}(F) = P_{AG}(F) \psi \Delta T(F) A_{W,t} + C_{TO,t} (t_{KP,t} + t_{HACK-L,t} + t_{M,t} + t_{D,t}) + P_{ПН}^A C_{TR,t}; \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^{T_W} K_{W,t}(F)(1+\varepsilon)^{1-t} = \frac{C_{HACK}}{M_{LRU}} + C_{LRU} (F_1 + MF_1) + C_{LRU} \sum_{t=2}^{T_W} (\Delta F_t + \Delta MF_t)(1+\varepsilon)^{1-t}, \quad (12)$$

где $t_{HACK,t}$ – средняя продолжительность пере проверки демонтированного LRU с помощью HACK; $P_{ПН}^A$ – апостериорная вероятность того, что LRU, забракованный по результатам КР, действительно находится в неработоспособном состоянии; C_{HACK} – стоимость HACK; M_{LRU} – число различных типов LRUs, контролируемых с помощью HACK. Вероятность $P_{ПН}^A$ в общем случае вычисляется по формуле, приведенной в работе [7]:

$$P_{ПН}^A = \frac{MTBUR_W}{MTBF_W},$$

где $MTBF_W$ – средняя наработка LRU на отказ на интервале $(0, T_{PW})$, определяемая по формуле

$$MTBF_W = \frac{1}{\lambda} \left(1 - e^{-\lambda T_{PW}} \right).$$

Подставляя выражения (10)–(11) в формулу (9), получаем целевую функцию

$TLEC_{W_2}(F)$ для оптимизации количества LRUs в ОФ:

$$TLEC_{W_2}(F) = m \left(\frac{T_0}{MTBUR_W} \right) \left\{ \sum_{t=1}^{t_0-1} N_{WA,t} [P_{AG}(F)\psi\Delta T(F)A_{W,t} + C_{TO,t}(t_{KP,t} + t_{M,t} + t_{D,t}) + C_{TR,t}] (1+\varepsilon)^{1-t} \right\} +$$

$$\left\{ + \sum_{t=t_0}^{T_W} N_{WA,t} [P_{AG}(F)\psi\Delta T(F)A_{W,t} + C_{TO,t}(t_{KP,t} + t_{HACK-L,t} + t_{M,t} + t_{D,t}) + P_{ПН}^A C_{TR,t}] (1+\varepsilon)^{1-t} \right\}$$

$$+ \frac{C_{HACK-L}}{M_{LRU}} (1+\varepsilon)^{1-t_0} + C_{LRU} (F_1 + MF_1) + C_{LRU} \sum_{t=2}^{T_W} (\Delta F_t + \Delta MF_t) (1+\varepsilon)^{1-t}, \quad (13)$$

где t_0 – год ввода HACK в эксплуатацию.

3. Показатели и критерии оптимизации ОФ в период послегарантийного обслуживания

С учетом выражения (3), полные эксплуатационные затраты в период послегарантийного обслуживания можно представить в следующем виде:

$$TLEC_{PW}(F) = m \left(\frac{T_0}{MTBUR} \right) \left\{ \sum_{t=1}^{\lceil T/T_0 \rceil} N_{PA,t} ECC_{PW,t}(F) (1+\varepsilon)^{1-t} \right\} + \sum_{t=1}^{\lceil T/T_0 \rceil} K_{PW,t}(F) (1+\varepsilon)^{1-t}, \quad (14)$$

где T – назначенный ресурс LRU; $ECC_{PW,t}(F)$ – ожидаемые затраты на одно восстановление (ложное или правильное) LRU в году t послегарантийного обслуживания; $\lceil T/T_0 \rceil$ – целое число лет эксплуатации LRU; $K_{PW,t}(F)$ – капитальные затраты в году t послегарантийного обслуживания; m – число однотипных LRUs в рассматриваемой РЭС; $N_{PA,t}$ – число эксплуатируемых ВС, не имеющих гарантии в году t послегарантийного обслуживания.

Тогда целевую функцию оптимизации количества LRUs в ОФ для варианта $PW1$ с учетом выражения (14) можно представить в следующем виде:

$$TLEC_{PW1}(F) = m \left(\frac{T_0}{MTBUR} \right) \left\{ \sum_{t=1}^{\lceil T/T_0 \rceil} N_{PA,t} ECC_{PW1,t}(F) (1+\varepsilon)^{1-t} \right\} + C_{LRU} \sum_{t=2}^{\lceil T/T_0 \rceil} (\Delta F_t + \Delta MF_t) (1+\varepsilon)^{1-t}. \quad (15)$$

Выражения для $MTBUR$ и $MTBF$ в этот период упрощаются, если $T \gg 1/\lambda$. Подставляя в формулу (4) $T_{WM} = \infty$, получаем

$$MTBUR \approx \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda[1 - (1 - \alpha)e^{-\lambda\tau}]}$$

Ожидаемые затраты $ECC_{PW1,t}(F)$ определяются из выражения

$$ECC_{PW1,t}(F) = P_{AG}(F)\psi\Delta T(F)A_{PW,t} + C_{TO,t}(t_{KP,t} + t_{M,t} + t_{D,t}) + C_{TR,t} + C_{R,t},$$

где $C_{R,t}$ – средняя стоимость восстановления LRU в году t на ЗИ; $A_{PW,t}$ – потери эксплуатанта в единицу времени в году t послегарантийного периода вследствие незапланированного простоя ВС.

С учетом формулы (15), для варианта $PW2$ целевая функция оптимизации количества LRUs в ОФ имеет вид

$$TLEC_{PW2}(F) = m \left(\frac{T_0}{MTBUR} \right) \left\{ \sum_{t=1}^{t_0-1} N_{PA,t} ECC_{PW1,t}(F) (1+\varepsilon)^{1-t} + \sum_{t=t_0}^{[T/T_0]} N_{PA,t} ECC_{PW2,t}(F) (1+\varepsilon)^{1-t} \right\} + \frac{C_{HACK}}{M_{LRU}} (1+\varepsilon)^{1-t_0} + C_{LRU} (F_1 + MF_1) + C_{LRU} \sum_{t=2}^{[T/T_0]} (\Delta F_t + \Delta MF_t) (1+\varepsilon)^{1-t}, \quad (16)$$

где $ECC_{PW2,t}(F) = P_{AG}(F) \psi \Delta T(F) A_{PW,t} + C_{TO,t} (t_{KP,t} + t_{HACK,t} + t_{M,t} + t_{D,t}) + P_{PH}^A (C_{TR,t} + C_{R,t})$.

Для вариантов $PW1$ и $PW2$ оптимальное количество LRUs в ОФ определяется из решения задачи (9).

Для варианта $PW3$ целевая функция оптимизации количества LRUs и SRUs в ОФ с учетом выражения (14) имеет вид

$$TLEC_{PW3}(F, F_{SRU}) = m \left(\frac{T_0}{MTBUR} \right) \times \left\{ \sum_{t=1}^{t_0-1} N_{PA,t} ECC_{PW1,t}(F, F_{SRU}) (1+\varepsilon)^{1-t} + \sum_{t=t_0}^{[T/T_0]} N_{PA,t} ECC_{PW2,t}(F, F_{SRU}) (1+\varepsilon)^{1-t} \right\} + \left(\frac{C_{HACK-S}}{M_{LRU}} + \sum_{j=1}^n C_{SRU,j} F_{SRU,j} \right) (1+\varepsilon)^{1-t_0} + C_{LRU} (F_1 + MF_1) + C_{LRU} \sum_{t=2}^{[T/T_0]} (\Delta F_t + \Delta MF_t) (1+\varepsilon)^{1-t}, \quad (17)$$

где C_{HACK-S} – стоимость HACK-S.

Составляющая затрат $ECC_{PW3,t}(F, F_{SRU})$ определяется по формуле математического ожидания дискретной случайной величины:

$$ECC_{PW3,t}(F, F_{SRU}) = P_{AG}(F, F_{SRU}) \Delta T(F, F_{SRU}) A_{PW,t} + C_{TO,t} (t_{KP,t} + t_{HACK-S,t} + t_{M,t} + t_{D,t}) + P_{PH}^A [C_{TRM,t} + C_{RM,t} + C_{TOS,t} (t_{F,t} + t_{CD,t})],$$

где $C_{RM,t}$ – средние затраты на восстановление SRU на ЗИ.

Оптимальное количество запасных LRUs и SRUs F_{SRU}^* определяется из решения двухуровневой задачи целочисленной оптимизации:

$$TLEC_{PW3}(F^*, F_{SRU}^*) = \min_{F_{SRU}} \left[\min_F TLEC_{W3}(F, F_{SRU}) \right]. \quad (18)$$

Пример. Рассчитаем оптимальное количество однотипных запасных LRUs в ОФ БА при следующих исходных данных: $m = 3$; $\alpha = \beta = 0,05$; $\lambda = 3,07 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$; $t_{KP} = 0,25 \text{ ч}$; $t_C = 1 \text{ ч}$; $C_{R,t} = 500 \text{ у.е.}$; $A_{PW} = 1000 \text{ у.е./ч}$; $T_W = 3 \text{ года}$; $T_0 = 5000 \text{ ч}$; $m = 2$; $\lambda = 1/10000 \text{ ч}^{-1}$; $C_{TR} = 50 \text{ у.е.}$; $\varepsilon = 0,15$; $C_{TO} = 7 \text{ у.е.}$; $t_M = t_D = 0,25 \text{ ч}$. На рис. 1 приведена зависимость оптимального количества запасных LRUs в ОФ базового аэропорта (F^*) от числа приписных ВС N_{PA} при различных значениях интервала между КР ВСК (τ).

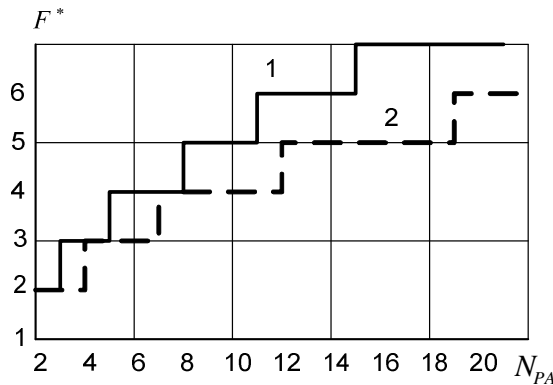


Рис. 1. Зависимость оптимального количества запасных LRUs в ОФ от числа приписных ВС: 1 – $\tau = 4y$; 2 – $\tau = 8y$

Анализ рис. 1 позволяет сделать следующие выводы. Зависимость $F^*(N_{PA})$ не является линейной, так, например, при $N_{PA} = 10$ для обеспечения регулярности полетов приписного парка ВС требуется $F^* = 4$ запасных LRUs, а при $N_{PA} = 16$ требуется $F^* = 5$ запасных LRUs (кривая 2). При уменьшении периодичности КР наблюдается увеличение необходимого количества запасных LRUs, что объясняется возрастающим влиянием “ложных отказов” ВСК.

Учет нелинейного характера зависимости $F^*(N_{PA})$ позволяет существенно сократить капитальные вложения в одноуровневую СУЗ, так как в настоящее время количество запасных LRUs в авиакомпаниях, как правило, рассчитывается пропорционально количеству приписных ВС.

Зависимость затрат $TLEC_{PW1}(F)$ от количества запасных LRUs приведена на рис. 2.

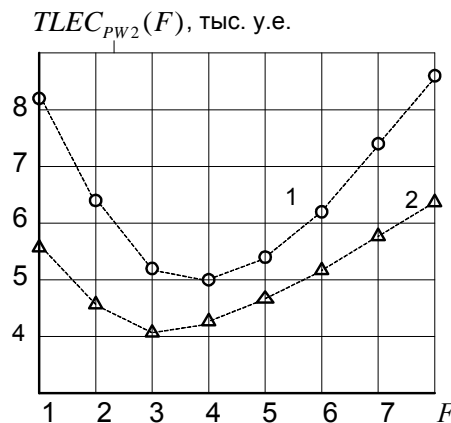


Рис. 2. Зависимость затрат $TLEC_{PW2}(F)$ от количества запасных LRUs:

1 – $\alpha = 0,01$; 2 – $\alpha = 0,005$

Как видно из рис. 2, с повышением достоверности контроля, а именно, с уменьшением вероятности “ложного отказа” ВСК, оптимальное количество LRUs в ОФ уменьшается. Уменьшается также минимальное значение эксплуатационных затрат.

4. Выводы

Разработаны показатели и критерии оптимизации количества LRUs в ОФ для периодов гарантийного и послегарантийного обслуживания ВС. Данные показатели, в отличие от известных,

позволяют произвести оптимизацию ОФ с учетом не только стоимостных составляющих эксплуатационных затрат, но и показателей надежности, периодичности и достоверности КР, глубины восстановления РЭС. Кроме того, эти показатели чувствительны к среднему времени наработки на досрочный съем LRUs с борта ВС (MTBUR). Показано, что зависимость между количеством ВС, входящих в СУЗ, и количеством запасных LRUs носит явно выраженный нелинейный характер. Причем показатели достоверности КР ВСК существенно влияют на объем ОФ. Для случая наличия у эксплуатанта HACC-S, позволяющего производить контроль работоспособности и поиск места отказов с глубиной до SRUs, сформулирована многоуровневая задача оптимизации количества LRUs и SRUs в ОФ. Дальнейшим развитием полученных результатов является оптимизация многоуровневых систем управления запасами. Данные результаты позволят существенно снизить расходы на эксплуатацию и повысить эффективность использования ВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.700 Series ARINC. Characteristics, Aeronautical Radio, Inc., USA. – <http://www.arinc.com>.
2. Statistical Management and Modeling for Demand of Spare Parts / E. Ferrari, A. Pareschi, A. Regattieri et al // Springer Handbook of Engineering Statistics: Springer. – London, 2006. – P. 905 – 929.
3. Moiseev V.S. Optimization of amount of spare elements for aircraft equipment articles / V.S. Moiseev, A.V. Butuzova, A.V. Meiko // Russian Aeronautics (Izv.VUZ). – 2007. – Vol. 50, N 1. – P. 72 – 78.
4. Dasi T.K., Sarkar S. Optimal preventive maintenance in a production inventory system // IIE Transactions. – 1999. – Vol. 31, № 6. – P. 537 – 551.
5. Ковтуненко О.П. Основы теории восстановления эксплуатационных свойств технических систем. Монография / О.П. Ковтуненко, М.О. Шишанов, В.В. Зубарев. – К.: Книжное изд-во НАУ, 2007. – 296 с.
6. Уланский В.В. Организация системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного комплекса Ту-204: Учебное пособие / В.В. Уланский, Г.Ф. Конахович, И.А. Мачалин. – К.: КИИГА, 1992. – 103 с.
7. Уланский В.В., Мачалин И.А. Обобщенные функции стоимости обслуживания до безопасного отказа легкозаменяемых блоков систем авионики // Електроніка та системи управління. – 2008. – № 1(15). – С. 73 – 84.
8. Уланский В.В., Мачалин И.А. Математическая модель процесса эксплуатации легкозаменяемых блоков систем авионики // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2006. – № 6 (32). – С. 74 – 80.
9. Уланский В.В., Мачалин И.А. Стратегия обслуживания одноблочной системы авионики при наличии явных и скрытых отказов // Математичні машини і системи. – 2007. – № 3, 4. – С. 245 – 256.

Стаття надійшла до редакції 18.08.2007