

УДК 629.735.083

А.Г. КУЧЕР, МУСТАФА А.С. МУСТАФА

Национальный авиационный университет (НАУ). Киев, Украина

МАКСИМИЗАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ВЫБОРА РЕЗЕРВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ АВИАКОМПАНИИ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ СУММЕ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Рассмотрены вопросы технологического процесса снабжения запасными частями, инструментами, принадлежностями и материалами системы технического обслуживания и ремонта парка воздушных судов авиакомпании на основе расчетного метода с целью определения количественного состава ЗИП на заданный период эксплуатации при ограниченной сумме финансирования.

система технического обслуживания и ремонта, летная годность, материально-техническое снабжение, авиационно-техническое имущество, вероятность безотказной работы, резервные элементы

Введение

Поломки случаются на самых современных авиапредприятиях, на супернадёжной авиационной технике, опирающейся на новейшие технологии. Какова бы ни была причина отказа, для эксплуатантов очень важен коэффициент готовности системы, зависящий от возможности замены отказавшего узла. Ведь большой ущерб может быть причинен даже за малый срок. Так, недельный простой самолета из-за отсутствия запасной части оценивается в 10 тыс. долл. [1]. Ключевым элементом поддержания готовности сложных технических систем является ЗИП.

ЗИПом обычно называют комплект запасных элементов, предназначенных для поддержания техники в работоспособном состоянии в течение расчетного срока ее эксплуатации. В ЗИП часто включают специальный инструмент, принадлежности и нестандартные материалы, необходимые для технического обслуживания и ремонта, скомплектованные в зависимости от назначения и особенностей использования.

1. Назначение и структура системы материально-технического снабжения

Основным назначением системы ТОиР является сохранение летной годности ЛА в процессе дли-

тельной эксплуатации, обеспечение исправности самолетного парка и условий для его эффективного использования по назначению [2].

Исходя из решаемых в системе ТОиР воздушных судов (ВС) задач обеспечения надежной, безопасной и эффективной эксплуатации ВС, она не может осуществляться без эффективной системы материально-технического снабжения (МТС). Техническая эксплуатация (ТЭ) необходимыми материально-техническими средствами: документацией, исполнителями, оборудованием, запчастями, технологическими средствами ТОиР или информацией, необходимой для организации и управления такими процессами, необходима.

Таким образом, при формировании системы ТОиР ВС состав, организация и процессы МТС эксплуатации ВС определяют эффективность реализации ТЭ ВС в целом в ожидаемых условиях с ожидаемыми результатами.

Опыт формирования систем ТОиР ВС, включая основные принципы МТС в системе ТОиР, отработанные на таких авиафирмах как *Boeing* и *Airbus*, позволяет определить общие положения МТС в системе ТОиР ВС, необходимые для организации и выполнения ТОиР ВС в процессе технической эксплуатации (ТЭ), включая рекомендуемые формы

документального, материального и технического обеспечения в системе ТОиР данного типа ВС и расчетные нормы и условия такого обеспечения [3].

В общем случае МТС в системе ТОиР ВС включает модули, изображенные на схеме, представленной на рис. 1:

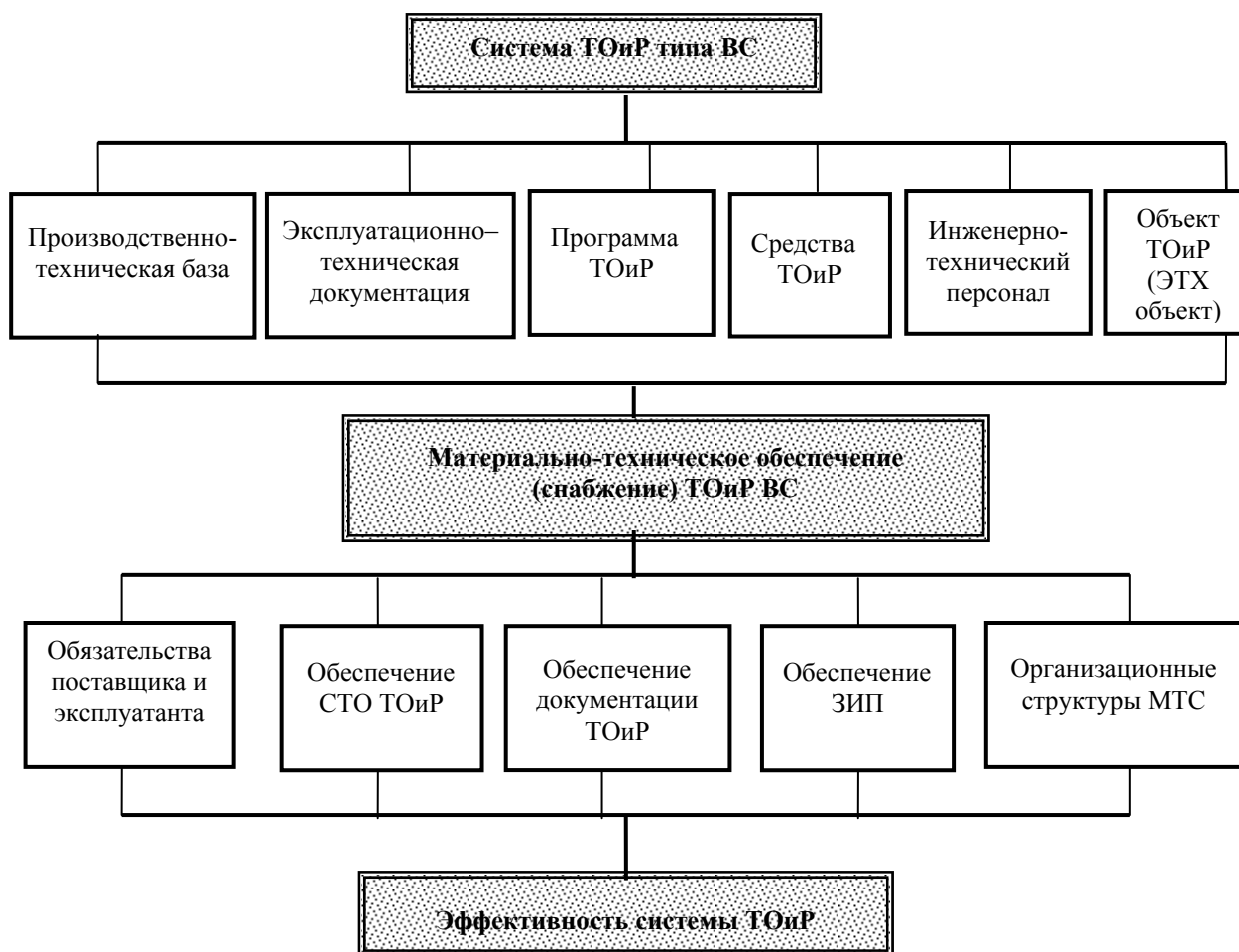


Рис. 1. Структура МТС в системе ТОиР

- обязательства поставщика и эксплуатанта;
- обеспечение эксплуатанта средствами технического обслуживания (СТО), в состав которых входят: средства наземного обслуживания (СНО) и контрольно-поверочная аппаратура (КПА), инструменты и средства эксплуатационного ремонта (СЭР) для ТОиР;
- обеспечение эксплуатанта запасными частями и материалами, необходимыми для технического обслуживания и ремонта (ЗИП). Одиночный комплект ЗИП предназначен для текущего ремонта аппаратуры путем замены неисправных элементов, а также для проведения профилактических работ и настройки аппаратуры в эксплуатационных услови-

ях. Одиночный ЗИП придается одному определенному изделию. Групповой комплект ЗИП служит для пополнения одиночного ЗИПа и обеспечения техники теми элементами, которых нет в одиночном ЗИПе [4];

- обеспечение документацией для ТОиР;
- организационные формы обеспечения материально-техническое снабжение.

2. Задача материально-технического обеспечения в ТОиР

Задача материально-технического обеспечения заключается в бесперебойном обеспечении технологических процессов ТОиР двигателями, запасными

частями, материалами, средствами ТОиР в требуемых для надежного функционирования системы количествах.

Материально-техническое обеспечение, как составная часть инфраструктуры системы ТОиР, представляет собой совокупность взаимосвязанных операций создания, хранения и рационального использования потребных запасов запасных частей, расходных материалов, средств технического оснащения и другого авиационно-технического имущества (АТИ) в процессе технической эксплуатации летательных аппаратов [2].

Организация материально-технического обеспечения в современных условиях связана с переходом от плановой системы поставок и централизованного распределения запасных частей и оборудования между авиапредприятиями к работе авиапредприятий непосредственно с заводами-изготовителями на поставку запасных частей и оборудования на основе контрактов.

Представляется целесообразным рассматривать различные варианты организации материально-технического обеспечения:

1) работу на основе контрактов авиапредприятий с заводами-изготовителями на поставку запасных частей проводить в сочетании с установлением кооперации между авиапредприятиями: либо путем создания совместных зональных и транзитных складов, либо по взаимному обеспечению простаивающих самолетов авиапредприятий со своих складов в определенных зонах;

2) укрепление связей через посредническую организацию, выполняющую роль демпфера, что предполагает установление двух типов договорных связей: "завод-изготовитель – посредническая организация" и "посредническая организация – предприятие-потребитель" запасных частей.

3. Обеспечение количественного состава запасных частей, инструментов и материалов (ЗИП) в ТОиР

При решении задач надежности необходимо обеспечить заданные показатели надежности с наименьшими затратами. В качестве основных показателей надежности системы, которые требуется улучшить путем использования ЗИП, могут быть взяты: вероятность безотказной работы (ВБР); коэффициент готовности, среднее время работы на отказ, гамма-процентный срок эксплуатации.

Общая постановка задачи по обеспечению запасными элементами может быть сформулирована следующим образом: необходимо определить количественный состав ЗИП для того, чтобы техническая система с вероятностью α безотказно функционировала в течение времени t .

Рассмотрим эту задачу на примере системы, состоящей из n различных элементов. Пусть R_i – число отказов i -го элемента, который в системе работает в течение времени t_i ($t_i \leq t$). Учитывая, что количество запасных частей должно быть не меньше количества отказов, определение количества запасных элементов сводится к нахождению наименьшего из возможных чисел N при условии [5]:

$$P(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \leq N) \geq \alpha.$$

При экспоненциальном распределении вероятности безотказности работы элементов

$$G(t) = 1 - e^{-\Lambda t}$$

сумма $R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$ будет случайной величиной с Пуассоновским распределением, у которого параметр определяется как

$$\Lambda = \lambda \sum_{i=1}^n t_i.$$

В этом случае

$$P(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \leq N) \geq \sum_{i=0}^n \frac{\Lambda^i e^{-\Lambda}}{i!},$$

т.е. вероятность того, что за время t системе требуется точно m запасных элементов, определится по формуле Пуассона

$$P_m(t) = \frac{(\Lambda t)^m}{m!} e^{-\Lambda t}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Среднее число расходуемых запасных элементов m_{cp} за время эксплуатации t определится как

$$m_{\bar{m}\delta} = M\{m\} = \sum_{m=1}^{\infty} m P_m(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\Lambda(t)^m}{m!} = \Lambda t.$$

При заданной вероятности работоспособности системы основой для расчета числа запасных элементов m_p является следующее соотношение

$$P(m_p) = e^{-\Lambda t} \sum_{i=0}^{m_p} \frac{(\Lambda t)^i}{i!} = e^{-m_{\bar{m}\delta}} \sum_{i=0}^{m_p} \frac{(m_{\bar{m}\delta})^i}{i!} \quad (1)$$

Число запасных элементов можно также определить следующей приближенной формулой [4]:

$$m_p = \lambda t + U_r \sqrt{t\lambda},$$

где λ – интенсивность отказов; t – заданное время функционирования объекта; U_r – квантиль функции нормального распределения для вероятности γ .

При обслуживании по состоянию технической системы число запасных элементов можно определить, используя соотношение для нормального распределения времени между отказами [5]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P \left\{ \frac{v(t) - \frac{t}{T}}{\sqrt{\frac{\sigma^2 t}{T^3}}} < x \right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau = F(x)$$

где T – средняя наработка на отказ элемента; σ^2 – дисперсия наработки на отказ; t – суммарная наработка.

Из условия

$$P[v(t) \leq m_p] = 1 - \alpha,$$

где α – малое число, получаем

$$m_p = \frac{t}{T} + U_{1-\alpha} \sqrt{\frac{\sigma^2 t}{T^3}}, \quad (2)$$

где $U_{1-\alpha}$ – квантиль нормального распределения для вероятности, равной $(1 - \alpha)$.

Величины T и σ^2 находятся, используя теорию поглощающих цепей Маркова. Причем, способы их определения зависят от вида случайного процесса, описывающего изменения технического состояния во времени. В отдельных случаях эти характеристики могут быть определены аналитически, в более сложных случаях – на основе статистического моделирования. Заметим, что статистическим моделированием можно построить функцию распределения числа запасных элементов, из которой определяются все необходимые параметры числа запасных элементов для заданного срока эксплуатации.

При статистическом определении этих параметров можно воспользоваться формулами

$$T = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (t_{i+1} - t_i) \quad \text{или} \quad T = \frac{t_s}{n};$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^{n-1} [(t_{i+1} - t_i) - T]^2, \quad (3)$$

где t_i – наработка на момент i -го отказа элемента; n – число отказов элемента ($n = m_p$); t_s – суммарная наработка за время функционирования элемента.

На рис. 2 приводятся зависимости количества запасных элементов от наработки для разных вероятностей нормального распределения

$$p = 1 - \alpha = (0,5; 0,9; 0,95; 0,975; \text{ и } 0,99)$$

при математическом ожидании и среднем квадратичном отклонении времени между отказами равных $T = 750$, $\sigma = 250$.

Если накладываются ограничения на стоимость затрат, связанных с запасными элементами, то возникает задача определения оптимального количества

ва запасных элементов, которая формулируется следующим образом.

Полагаем, что структурная схема надежности системы представлена в виде n последовательно соединенных элементов и надежность каждого элемента известна.

Количество запасных элементов определяется с учетом ограничения

$$\sum_{i=1}^k c_i m_i \leq C, \quad (4)$$

где m_i – число запасных элементов i -го типа; c_i – стоимость одного элемента i -го типа; C – выделенное количество средств для закупки запасных элементов.

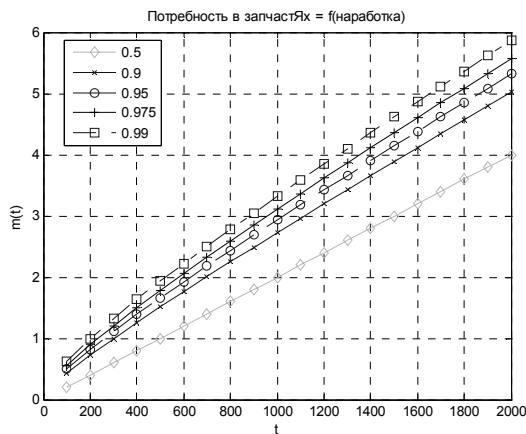


Рис. 2. Зависимость от наработки необходимого числа изделий взамен отказавших, гарантирующих заданную вероятность замен

Под стоимостью элемента c_i здесь понимается стоимость восстановления его работоспособности, т.е. среднестатистическая сумма всех средств, затраченных на закупку, ремонт, восстановление рабочего состояния на борту и другие затраты.

Ставится задача максимизации вероятности безотказной работы на заданном интервале времени t с помощью рационального выбора резервных элементов по типам.

Иначе говоря, требуется найти

$$\min Q(t) = \min \left[1 - \prod_{j=1}^k (1 - Q_j(t)) \right],$$

где Q_j – вероятность отказа j -го элемента; k – число разнотипных элементов.

Наиболее простым, но и в то же время трудоемким методом решения данной задачи является перебор вариантов распределения запасных элементов. Для больших значений k и C эффективным методом решения данной задачи является метод динамического программирования.

При направленном переборе определение числа элементов каждого вида для максимизации вероятности безотказной работы в случае нормального закона задача решается проще, так как число элементов линейно зависит от квантиля распределения (2). При этом формулу для оптимизации можно представить в виде

$$\sum_{j=1}^k \left(\frac{t}{T_j} + U_{1-\alpha} \sqrt{\frac{\sigma_j^2 t}{T_j^3}} \right) c_j \leq C, \quad (5)$$

где требуется найти такое максимальное значение квантиля распределения $U_{1-\alpha}$ (и следовательно, ВБР), при котором удовлетворяется неравенство. Следует отметить, что минимальное количество средств, выделяемых для закупки запасных элементов, должно быть не меньше стоимости среднего числа элементов, отказавших за указанный период t , т.е.

$$C > \sum_{j=1}^k \left(\frac{t}{T_j} \right) c_j.$$

Для решения задачи по обеспечению запчастями при Пуассоновском распределении (1) рациональная процедура максимизации вероятности безотказной работы состоит из трех этапов:

1 – задать начальное приближение к распределению элементов, для построения которого можно воспользоваться формулой (5), определив дисперсию распределения в виде (3) либо $\sigma_j^2 = 1/\lambda^2 = T_j^2$;

2 – построить таблицы для зависимостей вероятности безотказной работы j -го элемента от числа

запасных элементов $P_j(m_p)$ по формуле (1);

3 – путем последовательного перебора всех элементов (в таблице) находить элемент с минимальной текущей вероятностью $P_j(m_p)$ и, увеличивая число запасных элементов этого типа на 1, определять новую суммарную стоимость C_s за счет стоимости добавленного элемента. Если $C_s < C$, то процесс поиска продолжить, в противном случае поиск заканчивается, и за основу берется предпоследнее распределение запасных элементов.

В качестве примера проведен расчет количества запасных частей для $k=100$ разнотипных элементов при нормальном и Пуассоновском распределениях вероятности безотказной работы. Исходными данными здесь являются: среднее число расходующих запасных элементов m_{cpj} за время эксплуатации t ; средняя наработка и дисперсия наработки на отказ; стоимости всех запасных элементов; а также располагаемая сумма финансирования $C=190000$ у.е. и время между поставками запасных частей $t=1000$ ч (или 167 суток при 6 ч. налета в сутки).

На рис. 3, рис. 4 приводятся зависимости ВБР от числа запчастей для десяти первых элементов при нормальном и экспоненциальном распределениях.

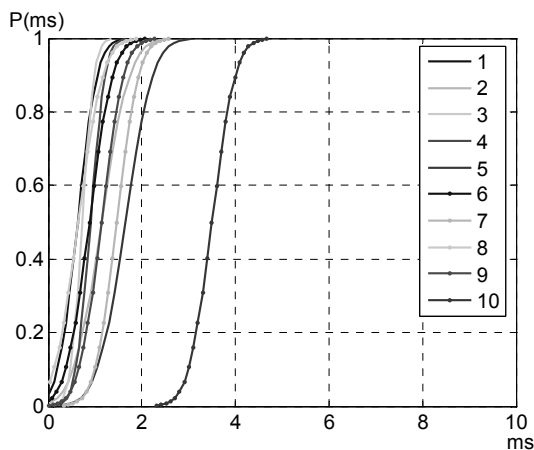


Рис. 3. К расчету числа запасных элементов n_p по формуле нормального закона распределения вероятности безотказной работы

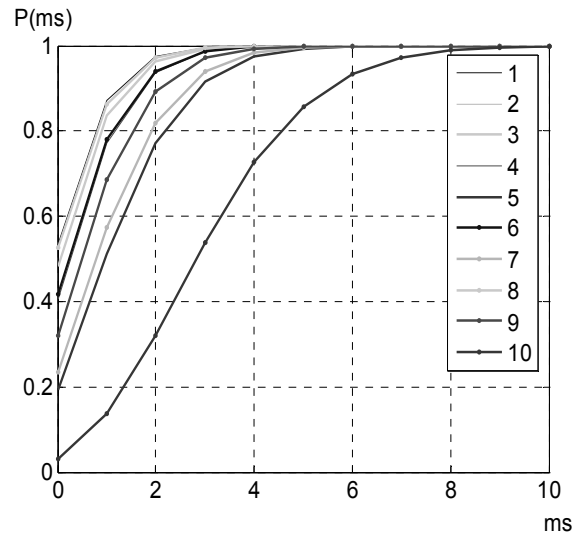


Рис. 4. К расчету числа запасных элементов n_p по формуле Пуассона

На рис. 5 и рис. 6 приводятся оптимальное количество элементов каждого типа; максимально возможные вероятности безотказной работы этих элементов и суммарные стоимости комплектов однотипных запасных частей для нормального распределения ($P_{ij} > 0,889$) и Пуассоновского потока отказов ($P_{pj} > 0,905$).

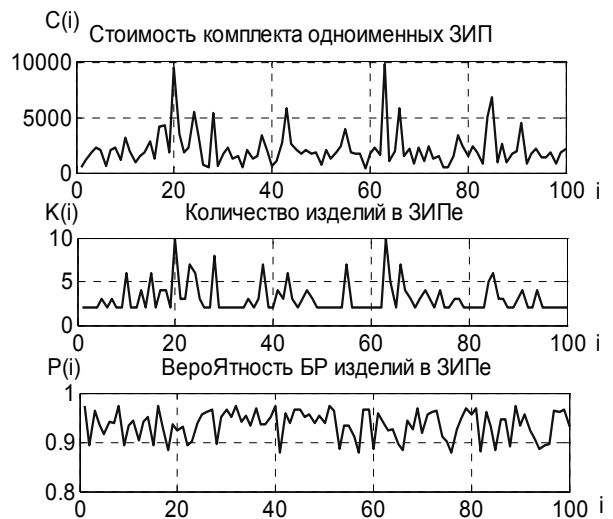


Рис. 5. Максимизация вероятности безотказной работы ВС с помощью рационального выбора резервных элементов при ограниченной сумме финансирования для нормального распределения времени до отказа

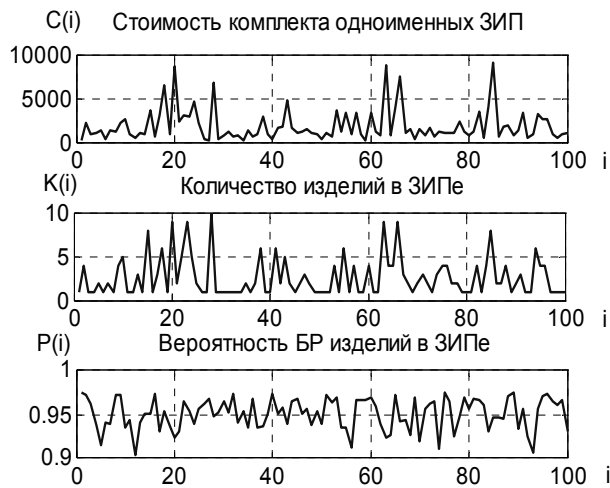


Рис. 6. Максимизация вероятности безотказной работы ВС с помощью рационального выбора резервных элементов при ограниченной сумме финансирования для Пуассоновского потока отказов

На рис. 7 приведены интегральные зависимости общей стоимости комплекта ЗИП от времени между поставками для заданных вероятностей безотказной работы при Пуассоновском распределении.

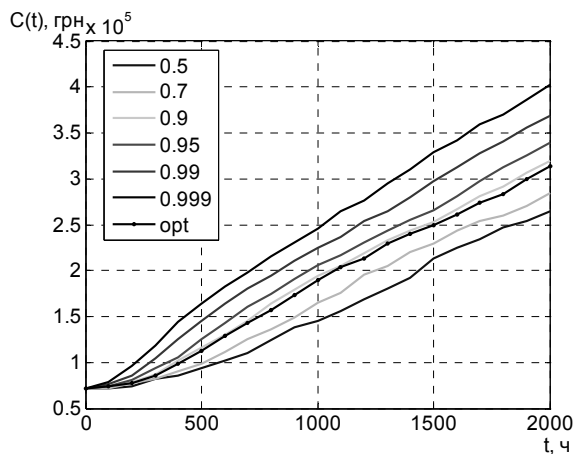


Рис. 7. Зависимости общей стоимости комплекта ЗИП по критерию максимизации вероятности безотказной работы от наработки (в часах) между поставками

Кривые можно использовать для приближенного определения необходимых средств $C(t)$ для задан-

ной вероятности безотказной работы или, при выделенной сумме финансирования, для определения максимально достижимой вероятности безотказной работы для заданного времени между поставками ЗИП (наработки в часах или сутках).

Заключение

Разработана модель поставок запасных элементов при ограниченной сумме финансирования на основе максимизации вероятности безотказной работы при нормальном распределении времени между отказами и Пуассоновском потоке отказов.

Литература

1. Рыжиков Ю.И. Теория очередей и управление запасами. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
2. Смирнов Н.Н. Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов. Ч. 1. Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2001. – 100 с.
3. Техническая эксплуатация самолетов за рубежом: Учебное пособие / Под общ. ред. Н.Н. Смирнова. – М.: МИИГА, 1992. – 112 с.
4. Остренковский В.А. Теория надежности: Учебн. для вузов. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
5. Надежность технических систем: Монография / Е. Переверзев, А. Алпато, Ю. Даниев, П. Новак. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 396 с.

Поступила в редакцию 25.12.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Панин, Национальный авиационный университет, Киев.