УДК 629.735.05:621.3(045)

В.В. УЛАНСКИЙ[1], И.А. МАЧАЛИН[2]

[1]*Университет Аль-Фатех, Ливия*
[2]*Национальный авиационный университет, Украина*

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ОДНОБЛОЧНОЙ СИСТЕМЫ АВИОНИКИ ПРИ НАЛИЧИИ ЯВНЫХ И СКРЫТЫХ ОТКАЗОВ

Оценивается эксплуатационная надежность одноблочной системы авионики с учетом явных и скрытых отказов и достоверности многоразового контроля работоспособности. Получены математические уравнения для расчета эксплуатационной вероятности безотказной работы, вероятности восстановления отказавшей системы и не отказавшей системы, признанной отказавшей. Выведены уравнения для установившегося режима при экспоненциальном распределении времени наработки до отказа.

система авионики, явные и скрытые отказы, достоверность многоразового контроля работоспособности

Введение

В настоящее время воздушные суда (ВС) гражданской авиации используют авионику, удовлетворяющую требованиям ARINC 700 [1]. Авионика этих ВС представляет собой набор резервированных и легкозаменяемых блоков, называемых Line Replaceable Units (LRUs). Каждый LRU представляет собой одноблочную систему, состоящую из нескольких модулей (Shop Replaceable Units – SRUs), имеющую встроенное средство контроля (ВСК). Каждый LRU функционирует до безопасного отказа, который регистрируется в течение полета или в базовом аэропорту после приземления ВС. Забракованные LRUs заменяются в базовом аэропорту на запасные из обменного фонда, а затем восстанавливаются. Поскольку системы авионики являются резервированными, то отказ одного LRU не приводит к отказу соответствующей системы. Поэтому такая стратегия технического обслуживания (ТО) называется стратегией ТО до безопасного отказа. Для оценки эффективности этой стратегии ТО необходимо выбрать показатели эффективности, учитывающие конструктивное исполнение системы, ее назначение и условия эксплуатации. Оценка эффективности ТО систем авионики, влияющих на безопасность полетов, обычно производится по критерию “надежность – затраты” [2].

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [3 – 11] исследуются основные показатели эффективности ТО периодически контролируемых одноблочных систем, такие как коэффициент готовности, коэффициент технического использования, ожидаемые издержки и др., однако не рассматриваются показатели эффективности систем, влияющих на безопасность полетов. В работе [12] в качестве показателя безотказности используется апостериорная вероятность безотказной работы периодически контролируемой невосстанавливаемой одноблочной системы. В работе [2] рассматривается показатель безотказности восстанавливаемой одноблочной системы в виде эксплуатационной вероятности безотказной работы (ЭВБР). При этом под ЭВБР подразумевается вероятность безотказной работы на интервале (t_k, t) с учетом того, что в моменты $\overline{t_1, t_k}$ проводилось ТО, включающее контроль работоспособности (КР) и восстановление забракованных систем. Однако эта математическая модель учитывает только скрытые отказы системы и не учитывает явных отказов, которые также характерны для современных систем цифровой авионики.

Таким образом, ***целью статьи*** является разработка математической модели стратегии ТО с КР, позволяющей определить ЭВБР восстанавливаемой одноблочной системы авионики при наличии явных и скрытых отказов, а также с учетом достоверности многоразового КР.

Формулирование проблемы. Рассмотрим случай, когда система авионики является одноблочной, т.е. включает в себя один LRU. Пусть в момент $t=0$ начинает функционировать система, наработка которой до скрытого отказа Ξ распределена по закону $F(\xi)$. Скрытый отказ системы можно обнаружить только по результатам КР. В системе может также возникнуть явный отказ. Функция распределения наработки до явного отказа R известна и равна $\Phi(\rho)$. При появлении явного отказа система отключается. Предполагается, что явные и скрытые отказы являются статистически независимыми.

Устанавливается следующий порядок восстановительных работ. Если при использовании по назначению в системе произошел явный отказ, то система отключается, и после посадки ВС начинается ее восстановление. Если при очередном КР обнаруживается скрытый отказ, то проводится восстановление работоспособности правильно забракованной системы. Наконец, если при КР произошел "ложный отказ", то проводится восстановление работоспособной системы.

Восстановление забракованной при КР отказавшей системы в пределах рассматриваемой модели будем называть “правильным”. Восстановление “ложно” забракованной при КР системы будем называть “ложным”. Восстановление после явного отказа назовем “внеплановым”. Считается, что любой из видов восстановления полностью обновляет систему, и моменты окончания восстановительных работ являются моментами регенерации.

Рассмотрим наиболее общий случай, при котором КР планируется проводить в моменты $0<t_1<t_2<\ldots<T_N<T$, если $T<\infty$ и в моменты $0<t_1<t_2<\ldots$, если $T=\infty$.

Под ЭВБР будем понимать вероятность безотказной работы LRU на интервале (t_k,t) с учетом того, что в моменты $\overline{t_1,t_k}$ проводилось ТО, включающее КР и восстановление забракованной системы (правильное или ложное), а после возникновения явных отказов проводилось внеплановое восстановление отказавшей системы. Требуется определить ЭВБР и вероятности различных типов восстановлений системы при произвольном и экспоненциальном законах распределения наработки до отказа.

Решение проблемы

Пусть $H(u)$ – функция восстановления процесса восстановления, образованного последовательностью интервалов времени между явными отказами системы. Введем следующие обозначения: $B_0(u)$ – событие, заключающееся во внеплановом восстановлении системы после явного отказа в момент u; $\bigcup\limits_{u\in(t_j,t_{j+1})}\Delta_u$ – событие, заключающееся в том, что из бесконечной последовательности событий Δ_u произойдет, по крайней мере, одно; $E_{ЛВ}(t_j)$ и $E_{ПВ}(t_j)$ – события, заключающиеся соответственно в “ложном” и “правильном” восстановлении системы в момент t_j; $P_{ЛВ}(t_j)$ и $P_{ПВ}(t_j)$ – соответственно вероятности событий $E_{ЛВ}(t_j)$ и $E_{ПВ}(t_j)$; $P_{ВВ}(t_j,t_{j+1})$ – вероятность внепланового восстановления системы на интервале (t_j,t_{j+1}); $P_Э(t_k,t)$ – ЭВБР на интервале (t_k,t).

Событие $E_{ЛВ}(t_j)$ или $E_{ПВ}(t_j)$ произойдет в том случае, если при КР в момент t_j система будет забракована. Обозначим через $E_B(t_j)$ событие, заключающееся в восстановлении системы в момент t_j. Очевидно, что

$$E_B(t_j) = E_{ЛВ}(t_j) \bigcup E_{ПВ}(t_j)\,.$$

Введем в рассмотрение следующие показатели достоверности многоразового КР:

$$P_{ЛО}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - t_\nu | \xi) =$$

$$= P\left\{ \bigcap_{i=\nu+1}^{j-1} \Xi_i^* > t_i - t_\nu \bigcap \Xi_j^* \le t_j - t_\nu | \Xi = \xi \right\}$$

– условная вероятность “ложного отказа”, определяемая как вероятность совместного наступления следующих событий: при КР в моменты $\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}$ $(\nu = \overline{0, j-1})$ система признавалась работоспособной, а при КР в момент $t_j - t_\nu$ была ложно забракована при условии, что $\Xi = \xi$ и $t_j < \xi$, где Ξ_i^* – случайная оценка наработки системы до отказа при КР в момент $t_i - t_\nu$; t_ν – момент последнего восстановления системы;

$$P_{ПР}(\overline{t_{j+1}-t_j, t_{k-1}-t_j}; t_k - t_j | \xi) =$$

$$= P\left\{ \bigcap_{i=j+1}^{k} \Xi_i^* > t_i - t_j | \Xi = \xi \right\}$$

– условная вероятность события “система правильно признана работоспособной” при КР в момент $t_k - t_j$ при условии, что $\Xi = \xi$ и $t_k - t_j < \xi$, где t_j – момент последнего восстановления системы;

$$P_{НО}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - t_\nu | \xi) =$$

$$= P\left\{ \bigcap_{i=\nu+1}^{j} \Xi_i^* > t_i - t_\nu | \Xi = \xi \right\}$$

– условная вероятность “необнаруженного отказа” при КР в момент $t_j - t_\nu$, представляющая собой вероятность того, что при КР в моменты $\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_j - t_\nu}$ система признавалась работоспособной при условии, что $\Xi = \xi$ и $\xi < t_j - t_\nu$, где t_ν – момент последнего восстановления системы.

Общие выражения для расчета условных вероятностей

$$P_{ЛО}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - t_\nu | \xi)\,,$$

$$P_{ПР}(\overline{t_{j+1}-t_j, t_{k-1}-t_j}; t_k - t_j | \xi)\,,$$

$$P_{НО}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - t_\nu | \xi)$$

приведены в работах [13, 14].

Теорема. Справедливы выражения:

– для ЭВБР на интервале (t_k, t):

$$\begin{aligned} P_Э(t_k, t) = \sum_{j=0}^{k} P_B(t_j)[1-\Phi(t-t_j)] \times \\ \times \int_{t-t_j}^{\infty} P_{ПР}(\overline{t_{j+1}-t_j, t_{k-1}-t_j}; t_k - t_j | \vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta + \\ + \sum_{j=0}^{k-1} \int_{t_j}^{t_{j+1}} [1-\Phi(t-u)] \int_{t-u}^{\infty} P_{ПР}(\overline{t_{j+1}-u, t_{k-1}-u}; t_k - \\ - u|\vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta dH(u) + \\ + \int_{t_k}^{t} [1-\Phi(t-u)] \cdot [1-F(t-u)]dH(u); \end{aligned} \quad (1)$$

– для вероятности ложного восстановления в момент t_j:

$$\begin{aligned} P_{ЛВ}(t_j) = \sum_{\nu=0}^{j-1} \Big\{ P_B(t_\nu)[1-\Phi(t_j - t_\nu)] \times \\ \times \int_{t_j - t_\nu}^{\infty} P_{ЛО}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - t_\nu | \vartheta)\omega(\vartheta) \\ + \int_{t_\nu}^{t_{\nu+1}} [1-\Phi(t_j - u)] \int_{t_j - u}^{\infty} P_{ЛО}(\overline{t_{\nu+1}-u, t_{j-1}-u}; t_j - \\ - u|\vartheta)\omega(\vartheta)dH(u) \Big\}; \end{aligned} \quad (2)$$

– для вероятности правильного восстановления в момент t_j:

$$\begin{aligned} P_{ПВ}(t_j) = 1 - P_{ЛВ}(t_j) - \sum_{\nu=0}^{j-1} \{ P_B(t_\nu) \times \\ \times [1-\Phi(t_j - t_\nu)] \Bigg[\int_0^{t_j - t_\nu} P_{НО}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - \\ - t_\nu | \vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta + \int_{t_j - t_\nu}^{\infty} P_{ПР}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - \end{aligned} \quad (3)$$

$$-t_\nu|\vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta\Big]+\int\limits_{t_\nu}^{t_{\nu+1}}[1-\Phi(t_j-u)]\times$$

$$\times\Bigg[\int\limits_0^{t_j-u}P_{HO}(\overline{t_{\nu+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-u|\vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta\times$$

$$\times\int\limits_{t_j-u}^{\infty}P_{ПР}(\overline{t_{\nu+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-$$

$$-u|\vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta\Big]dH(u)\Big\};$$

– для вероятности внепланового восстановления на интервале (t_j,t_{j+1}):

$$P_{BB}(t_j,t_{j+1})=\sum_{\nu=0}^{j}\Big\{P_B(t_\nu)\Big[\Phi(t_{j+1}-t_\nu)-\Phi(t_j-t_\nu)\Big]\times$$

$$\times\Bigg[\sum_{i=\nu}^{j-1}\int\limits_{t_i-t_\nu}^{t_{i+1}-t_\nu}P_{HO}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu,t_{j-1}-t_\nu};t_j-t_\nu|\vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta+$$

$$+\int\limits_{t_j-t_\nu}^{\infty}P_{ПР}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu,t_{j-1}-t_\nu};t_j-t_\nu|\vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta\Bigg]+$$

$$+\int\limits_{t_\nu}^{t_{\nu+1}}[\Phi(t_{j+1}-u)-\Phi(t_j-u)]\times \qquad (4)$$

$$\times\Bigg[\int\limits_0^{t_{\nu+1}-u}P_{HO}(\overline{t_{\nu+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-u|\vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta+$$

$$+\sum_{i=\nu+1}^{j-1}\int\limits_{t_i-u}^{t_{i+1}-u}P_{HO}(\overline{t_{\nu+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-u|\vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta+$$

$$+\int\limits_{t_j-u}^{\infty}P_{ПР}(\overline{t_{\nu+1}-u,t_{j-1}-u};t_j-u|\vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta\Bigg]dH(u)\Big\};$$

– для вероятности восстановления в момент t_j:

$$P_B(t_j)=P_{ЛВ}(t_j)+P_{ПВ}(t_j). \qquad (5)$$

Доказательство. По определению

$$P_Э(t_k,t)=P\Bigg\{\bigcup_{j=0}^{k-1}\Big\{\Big[B(t_j)\cap R>t-t_j\cap$$

$$\cap\,\Xi>t_i-t_j\cap\Big(\bigcap_{i=j+1}^{k}\Xi_i^*>t_i-t_j\Big)\Big]\cup$$

$$\cup\Bigg[\bigcup_{u\in(t_j,t_{j+1})}(B_0(u)\cap R>t-u\cap$$

$$\cap\,\Xi>t-u\cap\Big(\bigcap_{i=j+1}^{k}\Xi_i^*>t_i-u\Big)\Big)\Bigg]\Big\}\cup$$

$$\cup\Big[B(t_k)\cap R>t-t_k\cap\Xi>t-t_k\Big]\cup$$

$$\cup\Bigg\{\bigcup_{u\in(t_k,t)}\Big[B_0(u)\cap R>t-u\cap\Xi>t-u)\Big]\Bigg\}\Bigg\}.$$

Поскольку явные и скрытые отказы предполагаются статистически независимыми, то для нахождения вероятности $P_Э(t_k,t)$ по формуле (1) достаточно показать, как определяется вероятность события

$$\bigcup_{u\in(t_j,t_{j+1})}\Delta_u\,,$$

где

$$\Delta_u=B_0(u)\cap R>t-u\cap$$

$$\cap\,\Xi>t-u\cap\Bigg(\bigcap_{i=j+1}^{k}\Xi_i^*>t_i-u\Bigg).$$

Событие Δ_u заключается в том, что в момент u произошел последний явный отказ, и после внепланового восстановления система больше не отказывала, а при КР в моменты $\overline{t_{j+1}-u,t_k-u}$ признавалась работоспособной.

Поскольку поток явных отказов образует процесс восстановления с функцией восстановления $H(u)$, то в соответствии с теорией восстановления и теоремой умножения вероятностей можно записать

$$P(\Delta_u)=[1-\Phi(t-u)]\times$$

$$\times\Big[\int\limits_{t-u}^{\infty}P_{ПР}(\overline{t_{j+1}-u,t_{k-1}-u};t_k-$$

$$-u|\vartheta)\omega(\vartheta)d\vartheta dH(u).$$

Интегрируя по всем возможным $u(t_j\le u\le t_{j+1})$, находим

$$P(\bigcup_{u\in(t_j,t_{j+1})}\Delta_u)=\int\limits_{t_j}^{t_{j+1}}[1-\Phi(t-u)]\times$$

$$\times\int\limits_{t-u}^{\infty}P_{ПР}(\overline{t_{j+1}-u,t_{k-1}-u};t_k- \qquad (6)$$

$$-u|\vartheta)\omega(\vartheta)dH(u).$$

Далее, применяя к выражению (6) теоремы сложения и умножения вероятностей, получаем утверждение 1. Остальные утверждения доказываются аналогично.

Следствие 1. Если

$$\omega(\xi) = \lambda e^{-\lambda\xi}, \Phi(\rho) = \lambda_0 e^{-\lambda_0\rho}, \qquad (7)$$

то справедливы соотношения:

$$P_Э(t_k, t) = \sum_{j=0}^{k} P_B(t_j)\, e^{-(\lambda+\lambda_0)(t-t_j)} (1-\alpha)^{k-j} +$$
$$+\frac{\lambda_0}{(\lambda+\lambda_0)} \sum_{j=0}^{k-1}\left[e^{-(\lambda+\lambda_0)(t-t_{j+1})} - e^{-(\lambda+\lambda_0)(t-t_j)}\right]\times \qquad (8)$$
$$\times (1-\alpha)^{k-j} + \frac{\lambda_0}{(\lambda+\lambda_0)}\left[1 - e^{-(\lambda+\lambda_0)(t-t_k)}\right];$$

$$P_{ЛВ}(t_j) = \alpha \sum_{\nu=0}^{j-1}\{\ P_B(t_\nu)\, e^{-(\lambda+\lambda_0)(t_j-t_\nu)} +$$
$$+\frac{\lambda_0}{(\lambda+\lambda_0)}\left\{\ e^{-(\lambda+\lambda_0)(t_j-t_{\nu+1})} - e^{-(\lambda+\lambda_0)(t_j-t_\nu)}\right\}\times \qquad (9)$$
$$\times(1-\alpha)^{j-\nu-1};$$

$$P_{ПВ}(j\tau) = (1-\beta)\left[1 - P_{ЛВ}(j\tau)/\alpha\right]. \qquad (10)$$

Доказательство. При экспоненциальном законе распределения наработки до скрытого отказа системы условные вероятности

$$P_{ЛО}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - t_\nu|\xi),$$
$$P_{ПР}(\overline{t_{j+1}-t_j, t_{k-1}-t_j}; t_k - t_j|\xi),$$
$$P_{НО}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - t_\nu|\xi)$$

определяются по следующим формулам [10]:

$$P_{ЛО}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - t_\nu|\xi) =$$
$$= \alpha(1-\alpha)^{j-\nu-1}\quad, j=\overline{1,k}, \nu=\overline{1, j-1}; \qquad (11)$$

$$P_{ПР}(\overline{t_{j+1}-t_j, t_{k-1}-t_j}; t_k - t_j|\xi) =$$
$$= (1-\alpha)^{k-j}\quad, k = 1,2,...; \qquad (12)$$

$$P_{НО}(\overline{t_{\nu+1}-t_\nu, t_{j-1}-t_\nu}; t_j - t_\nu|\xi) = (1-\alpha)^{i-\nu}\beta^{j-i},$$
$$i = \overline{\nu, j-1}, t_i - t_\nu < \xi \le t_{i+1} - t_\nu, \qquad (13)$$

где α — условная вероятность "ложного отказа" при КР системы с помощью ВСК;

β – условная вероятность "необнаруженного отказа" при КР системы с помощью ВСК.

Далее, как известно [15], при экспоненциальном законе распределения наработки до явного отказа системы функция восстановления

$$H(t) = \lambda_0 t. \qquad (14)$$

Для доказательства утверждений (8) – (10) достаточно подставить в выражения (1) – (4) плотности (7), условные вероятности (11) – (13) и функцию восстановления (14), и провести несложные преобразования.

Следствие 2. Если $t_k = k\tau$, где τ – периодичность КР, и выполняются условия (7), то справедливы соотношения:

$$P_Э(k\tau, t) = \sum_{j=0}^{k} P_B(j\tau) e^{-(\lambda+\lambda_0)(t-j\tau)}(1-\alpha)^{k-j} +$$
$$+\frac{\lambda_0}{\lambda+\lambda_0}\left[e^{(\lambda+\lambda_0)\tau} - 1\right]\sum_{j=0}^{k-1} e^{-(\lambda+\lambda_0)(t-j\tau)}(1-\alpha)^{k-j} \qquad (15)$$
$$+\frac{\lambda_0}{\lambda+\lambda_0}\left[1 - e^{-(\lambda+\lambda_0)(t-k\tau)}\right];$$

$$P_{ЛВ}(j\tau) = \alpha\sum_{\nu=0}^{j-1}\left\{P_B(\nu\tau) + \frac{\lambda_0}{\lambda+\lambda_0}(1 - e^{-(\lambda+\lambda_0)\tau})\right\}\times$$
$$\times e^{-(\lambda+\lambda_0)(j-\nu-1)\tau}(1-\alpha)^{j-\nu-1}; \qquad (16)$$

$$P_{ПВ}(j\tau) = \left[1 - P_{ЛВ}(j\tau)/\alpha\right]\cdot(1-\beta), \qquad (17)$$

где $k\tau < t < (k+1)\tau$.

Доказательство. Подставляя в выражения (8) – (10) $t_k = k\tau$, после несложных преобразований получаем утверждения (15) – (17).

Следствие 3. Если $t_k = k\tau$ и

$$\omega(\xi) = \lambda e^{-\lambda\xi},\ \Phi(\rho) = 0,$$

т. е. в системе возможны только скрытые отказы, то

$$P_Э(k\tau, t) = \sum_{j=0}^{k-1} P_B(j\tau) e^{-\lambda(t-j\tau)}(1-\alpha)^{k-j} +$$
$$+ P_B(k\tau) e^{-\lambda(t-j\tau)}; \qquad (18)$$

$$P_{ЛВ}(j\tau) = \alpha\sum_{\nu=0}^{j-1} P_B(\nu\tau) e^{-(j-\nu)\lambda\tau}(1-\alpha)^{j-\nu-1}, \qquad (19)$$

а вероятность $P_{ПВ}(j\tau)$ определяется из выражения (17).

Доказательство. Подставляя в выражения (15) и (16) значение $\lambda_0 = 0$, после несложных преобразований получаем формулы (18) и (19).

Пример 1. Построить зависимость ЭВБР от наработки при $\lambda = 2 \times 10^{-4}$ ч$^{-1}$, $\tau = 5$ч, $\alpha = \beta = 0{,}01$. Зависимость ЭВБР от наработки системы показана на рис. 1.

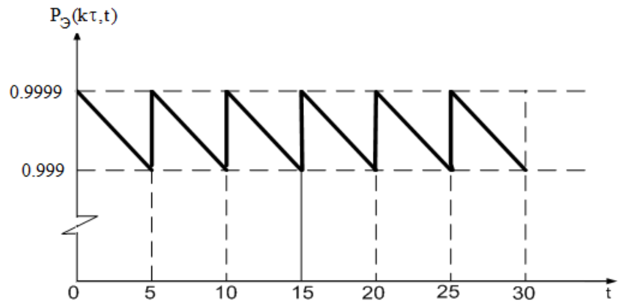

Рис. 1. Зависимость ЭВБР от наработки системы

При длительной эксплуатации системы целесообразно использовать установившиеся значения показателей (17) – (19), определяемые следующим образом:

$$P_Э^*(\tau) = \lim_{k\to\infty} P_Э\left[k\tau, (k+1)\tau\right] = \frac{(1-\beta)e^{-\lambda\tau}}{1-\beta e^{-\lambda\tau}}; \quad (20)$$

$$P_B^*(\tau) = \lim_{j\to\infty} P_B(j\tau) = \frac{(1-\beta)\left[1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}\right]}{1-\beta e^{-\lambda\tau}}; \quad (21)$$

$$P_{ЛВ}^*(\tau) = \lim_{j\to\infty} P_{ЛВ}(j\tau) = \frac{\alpha(1-\beta)e^{-\lambda\tau}}{1-\beta e^{-\lambda\tau}}; \quad (22)$$

$$P_{ПВ}^*(\tau) = \lim_{j\to\infty} P_{ПВ}(j\tau) = \frac{(1-\beta)\left(1-e^{-\lambda\tau}\right)}{1-\beta e^{-\lambda\tau}}. \quad (23)$$

Пример 2. Вычислить установившиеся значения вероятностей (20) – (23) при следующих значениях параметров: $\lambda = 10^{-4}$ ч$^{-1}$, $\alpha = 0{,}005$, $\beta = 0{,}005$ и $\tau = 5$ч.

Подставляя исходные данные в выражения (20) – (23), получаем $P_Э^*(\tau) = 0{,}9995$, $P_B^*(\tau) = 0{,}0055$, $P_{ЛВ}^*(\tau) = 0{,}005$, $P_{ПВ}^*(\tau) = 0{,}0005$.

Как видно из примера 2, вероятность восстановления ложно забракованной системы на порядок выше вероятности восстановления отказавшей системы. Полученный результат хорошо согласуется со статистическими данными зарубежных авиакомпаний, согласно которым от 40 до 85% демонтированных LRUs систем авионики на самом деле являются работоспособными [16, 17]. Это приводит к большим потерям авиакомпаний из-за так называемых неподтвержденных дефектов (*No Fault Found* – NFF).

Заключение

Получены обобщенные математические выражения для расчета эксплуатационной вероятности безотказной работы и вероятностей различных восстановлений одноблочной системы авионики при произвольном и экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы и наличии явных и скрытых отказов, учитывающие также достоверность многоразового контроля работоспособности в процессе эксплуатации. При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы выведены формулы для установившихся значений этих вероятностей, позволившие установить связь между показателями достоверности, периодичностью контроля и интенсивностью скрытых отказов одноблочной системы. Показано на числовом примере, что для восстанавливаемых одноблочных систем авионики при малой периодичности проверок вероятность восстановления ложно забракованной системы может быть на порядок выше вероятности восстановления отказавшей системы, что подтверждается статистическими данными зарубежных авиакомпаний. Данные результаты позволяют оценить эффективность обслуживания ответственных систем авионики и обосновать требования к достоверности встроенных средств контроля. Их использование целесообразно как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации ВС.

Литература

1. 700 Series ARINC Characteristics, Aeronautical Radio, Inc., USA [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://www.arinc.com.

2. Уланский В.В., Конахович Г.Ф., Мачалин И.А. Организация системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного комплекса Ту-204: Учебн. пос. – К.: КИИГА, 1992. – 103 с.

3. Nakagava T. Maintenance theory of reliability. – N.Y.: Springer Verlag. – 2005. – 258 p.

4. Nakagava T., Mizutani S., Igaki N. Optimal inspection policies for a finite interval // The Second Euro – Japan Workshop on Stochastic Risk Modeling, Insurance, Production and Reliability. – 2002. – P. 334-339.

5. Newby M., Dagg R. Optimal inspection and perfect repair // Journal of Management Mathematics. – 2004. – № 15 (2). – P.175-192.

6. Rausand M., Hoyland A. System reliability theory: models, statistical methods and applications. – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc. – 2004. – 458 p.

7. Blischke W.R., Murthy Prabhaker D.N. Reliability: modeling, prediction, and optimization. – N.Y.: John Wiley & Sons, Inc. – 2000. – 812 p.

8. Yale T.H., Tzvi R. Further results in the optimal policy for imperfect inspection in discrete time // Production Planning & Control. – 1997. – Vol. 8, №4. – P. 377-384.

9. Kaio N., Osaki S. Optimal inspection policy with two types of imperfect inspection probabilities // Microelectronic Reliability. – 1986. – Vol. 26. – P. 935-942.

10. Уланский В.В., Мачалин И.А. Математическая модель процесса эксплуатации легкозаменяемых блоков систем авионики // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 6(32). – С. 74-80.

11. Ulansky V.V., Machalin I.O. Optimization of post warranty maintenance of avionics systems // International Conference on Aeronautical Science and Air Transportation (ICASAT2007). – Tripoli, Libya. – 2007. – P. 619-628.

12. Уланский В.В. Оценка апостериорной надежности дискретно контролируемых технических систем // Проблемы повышения эффективности эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования воздушных судов гражданской авиации: Сб. науч. тр. – Киев: КИИГА, 1987. – С. 19-31.

13. Уланский В.В. Достоверность многоразового контроля работоспособности невосстанавливаемых радиоэлектронных систем // Ресурсосберегающие технологии обслуживания и ремонта авиационного и радиоэлектронного оборудования воздушных судов гражданской авиации. Сб. науч. тр. – К.: КИИГА. – 1992. – С.14-25.

14. Уланский В.В., Мачалин И.А. Математические модели многопараметрического контроля систем авионики // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2006. – № 4, Том 4. – С.289-297.

15. Cox D. R. Renewal theory. – London: Methuen. – 1960. – 247 p.

16. William R., Banner J., Knowles I., Dube M., Natishan M., Pecht M. An investigation of “cannot duplicate” failures // Quality and Reliability Engineering International. – 1998. – Vol. 14. – P. 331-337.

17. Thomas D.A., Ayers K., Pecht M. The “trouble not identified” phenomenon in automotive electronics // Microelectronics Reliability. – 2002. – Vol. 42. – № 4. – P. 641-651.

Поступила в редакцию 5.10.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Ф. Конахович, Национальный авиационный университет, Киев.