УДК 629.735.05:621.3(045)

В. В. Уланский, д-р техн. наук
Университет Аль-Фатех
(Ливия, Триполи, E-mail: vladu11@mail.ru),
И. А. Мачалин, канд.техн.наук
Национальный авиационный университет
(Украина, 03058, Киев, пр-т Космонавта Комарова, 1,
тел.: (044) 4970162, E-mail: tks@nau.edu.ua)

Уточненная модель обслуживания одноблочной системы авионики

Рассмотрена модель обслуживания периодически контролируемой одноблочной системы авионики на конечном интервале времени. Получены соотношения для вычисления средней продолжительностей нахождения системы на различных этапах процесса эксплуатации при произвольном и экспоненциальном законах распределения наработки до отказа. В этих соотношениях учтены достоверность и периодичность контроля работоспособности, характеристики надежности и длительности операций обслуживания. Приведены формулы для расчета коэффициента готовности и среднего времени наработки системы на досрочный съем на конечном интервале времени.

Розглянуто модель обслуговування періодично контрольованої одноблокової системи авіоніки на кінцевому інтервалі часу. Отримано співвідношення для обчислення середньої тривалості знаходження системи на різних етапах процесу експлуатації при довільному і експоненціальному законах розподілу напрацювання до відмови. У цих співвідношеннях враховано достовірність і періодичність контролю працездатності, характеристики надійності і тривалості операцій обслуговування. Наведено формули для розрахунку коефіцієнта готовності і середнього часу напрацювання системи на дострокове знімання на кінцевому інтервалі часу.

К л ю ч е в ы е с л о в а : система авионики, модель обслуживания, достоверность и периодичность контроля, коэффициент готовности.

Системы современной авионики являются резервированными системами, состоящими из нескольких легкозаменяемых блоков (Line Replaceable Units (LRU)). Каждый LRU представляет собой функционально законченную одноблочную систему со встроенным средством контроля (ВСК), позволяющим проводить контроль работоспособности (КР) в полете и на стоянке воздушного судна (ВС). Легкозаменяемые блоки эксплуатируются до отказа, который регистрируется в полете или во время предполетного оперативного технического обслуживания (ТО). Такая стратегия называется стратегией ТО до безопасного отказа. Для оценки эффективности этой стратегии ТО необходимо иметь математическую модель, адекватно описывающую процесс эксплуатации LRU на конечном или бесконечном интервале времени. Выбор конечного или бесконечного интервала времени зависит от рассматриваемого этапа жизненного цикла ВС.

Одним из важнейших этапов жизненного цикла ВС является период действия гарантийных обязательств поставщика. Этот период четко определен по времени и по своей продолжительности соизмерим со средним временем наработки до отказа LRU. Поэтому математическая модель должна описывать процесс эксплуатации на конечном интервале времени. Таким образом, для оценки эффективности стратегии ТО LRU до безопасного отказа на конечном интервале времени необходимо разработать математическую модель, в которой учтены характеристики надежности LRU и достоверности ВСК, периодичность КР, длительности операций ТО и продолжительность гарантии поставщика. Решение этой проблемы непосредственно связано с программой ввода в эксплуатацию отечественных ВС нового поколения.

В известных моделях ТО одноблочных систем [1—7] не учитываются показатели достоверности КР. В работах [8, 9] показатели достоверности не учитывают особенности многоразового КР систем, состоящие в том, что условные вероятности правильных и ошибочных решений в данный момент КР зависят от результатов КР в предыдущие моменты. В моделях, описанных в работах [10—14], учтены особенности многоразового КР, но выражения выведены при допущении, что интервал планирования ТО является бесконечным.

В работах [1—11, 13, 14] исследованы основные показатели эффективности ТО, такие как коэффициент готовности $K_г$, коэффициент технического использования, ожидаемые издержки и другие, однако не рассмотрен такой важный показатель, как средняя наработка на досрочный съем системы с борта (mean time between unscheduled repairs/replacements — MTBUR). Показатель MTBUR используется практически всеми ведущими авиакомпаниями мира для оценки эффективности ТО. В работе [15], где стандартизирован этот показатель, он определяется как отношение наработки системы к числу внеплановых съемов за рассматриваемый период, т.е. для его расчета необходим определенный объем статистической информации. Естественно, что в гарантийный период такая информация отсутствует. Следует заметить, что до настоящего времени в опубликованных работах по надежности и ТО отсутствуют аналитические выражения для расчета MTBUR.

Таким образом, как показывает анализ литературы, в настоящее время отсутствуют математические модели ТО систем авионики, позволяющие одновременно учитывать показатели достоверности многоразового КР, периодичность КР, характеристики надежности системы и определять $K_г$ и MTBUR на конечном интервале времени.

Постановка задачи. Будет рассматриваеть модель ТО системы авионики, состоящей из одного LRU, т. е. структура системы с точки зрения надежности не учитывается. Это связано с тем, что именно LRU является минимальной демонтируемой частью любой системы авионики. Процесс эксплуатации LRU рассматриваем на конечном интервале $(0, T)$ как последовательность смены различных состояний [10—12]. Поэтому поведение LRU на интервале $(0, T)$ описывается случайным процессом $L(t)$ с конечным пространством состояний $E = \bigcup_i E_i$. Процесс $L(t)$ изменяется только скачкообразно, причем каждый скачок обусловлен переходом LRU в одно из возможных состояний. Предполагаем, что $L(t)$ является регенерирующим случайным процессом, имеющим свойство всегда возвращаться в точку регенерации, начиная с которой дальнейшее развитие процесса не зависит от его поведения в прошлом и является вероятностной копией процесса $L(t)$, начавшегося в момент $t = 0$.

Пусть в момент $t = 0$ начинается эксплуатация LRU с нулевой наработкой и планируется проведение КР в моменты τ, 2τ, 3τ, ..., $N\tau$, где $N = (T / \tau) - 1$ представляет собой число КР LRU на интервале $(0, T)$. Предположим, что КР LRU выполняет ВСК перед каждым вылетом ВС из базового аэропорта. Определим случайный процесс $L(t)$.

В произвольный момент времени t LRU может находиться в одном из следующих состояний:

$L(t) = E_1$ если в момент t LRU использовался по назначению и находился в работоспособном состоянии;

$L(t) = E_2$, если в момент t LRU использовался по назначению и находился в неработоспособном состоянии (скрытый отказ);

$L(t) = E_3$, если в момент t LRU не использовался по назначению, так как проводился КР с помощью ВСК на стоянке ВС в базовом аэропорту;

$L(t) = E_4$, если в момент t проводилось «ложное восстановление» LRU;

$L(t) = E_5$, если в момент t проводилось «правильное восстановление» LRU.

Таким образом, построим математическую модель ТО одноблочной системы авионики для определения $K_г$ и MTBUR на конечном интервале времени.

Произвольный закон распределения наработки до отказа LRU. Выведем выражения для средних продолжительностей нахождения LRU в состояниях $\overline{E_1, E_5}$. Обозначим: S_i — случайное время нахождения LRU в состоянии E_i $(i = \overline{1,5})$ на случайном цикле регенерации S_0; MS_i — среднее значение S_i на среднем цикле регенерации MS_0. Поскольку $S_0 = \sum_{i=1}^{5} S_i$, согласно теореме сложения математических ожиданий $MS_0 = \sum_{i=1}^{5} MS_i$.

Определим MS_1. Обозначим через Ξ случайную наработку LRU до отказа. Пусть $\Xi = \xi$ для рассматриваемого LRU, причем $k\tau < \xi \le (k+1)\tau$ и отказ LRU можно обнаружить только при КР. Поскольку при КР возможны ошибочные решения, то работоспособный LRU проработает время $\nu\tau$ $(\nu = \overline{1, k})$, если при ν-м КР он будет ошибочно признан неработоспособным. Условная вероятность ложного отказа определяется как вероятность совместного наступления следующих событий: при КР в моменты $\overline{\tau, (\nu-1)\tau}$ LRU признан работоспособным, а при КР в момент $\nu\tau$ ложно забракован при условии, что $\Xi = \xi$ и $k\tau < \xi \le (k+1)\tau$. Таким образом,

$$P_{\text{л.о}}(\overline{\tau, (\nu-1)\tau}; \nu\tau|\xi) = P\left\{\bigcap_{i=1}^{\nu-1} \Xi_i^* > i\tau \bigcap \Xi_\nu^* \le \nu\tau | \Xi = \xi\right\}, \tag{1}$$

где Ξ_i^* — случайная оценка наработки LRU до отказа при КР в момент $i\tau$. Затем LRU может проработать время ξ, если при КР в моменты $\overline{\tau, k\tau}$ не было ложного отказа, т. е. LRU правильно признан работоспособным. Условная вероятность события «LRU правильно признан работоспособным» при условии, что $\Xi = \xi$ и $k\tau < \xi \le (k+1)\tau$ определяется по формуле

$$P_{\text{п.р}}(\overline{\tau, (k-1)\tau}; k\tau|\xi) = P\left\{\bigcap_{\nu=1}^{k} \Xi_\nu^* > \nu\tau | \Xi = \xi\right\}. \tag{2}$$

Условная вероятность события «LRU правильно признан неработоспособным» определяется как вероятность наступления следующих событий: при КР в моменты $\overline{\tau, k\tau}$ LRU правильно признан работоспособным; при КР в моменты $\overline{(k+1)\tau, (j-1)\tau}$ LRU ошибочно признан работоспособным, а при КР в момент $j\tau$ $(j = \overline{k+1, N})$ LRU правильно признан неработоспособным при условии, что $k\tau < \xi \le (k+1)\tau$ и $\Xi = \xi$, т. е.

$$P_{\text{п. н}}(\overline{\tau, (j-1)\tau}; j\tau|\xi) = P\left\{\bigcap_{i=1}^{j-1} \Xi_i^* > i\tau \bigcap \Xi_j^* \le j\tau | \Xi = \xi\right\}, \tag{3}$$

Условная вероятность необнаруженного отказа представляет собой вероятность того, что при КР в моменты $\overline{\tau, k\tau}$ LRU правильно признан работоспособным, а при КР в моменты $\overline{(k+1)\tau, N\tau}$ — ошибочно признан работоспособным, т. е.

$$P_{\text{н.о}}(\overline{\tau,(N-1)\tau};\quad N\tau|\xi)=P\left\{\bigcap_{i=1}^{N}\Xi_i^*>i\tau \mid \Xi=\xi\right\}. \tag{4}$$

Теорема. Если $T<\infty$ и $t_k=k\tau$, то среднее время нахождения системы в состоянии E_1 имеет вид

$$MS_1=\sum_{k=0}^{N}\int_{k\tau}^{(k+1)\tau}\left[\sum_{\nu=1}^{k}\nu\tau P_{\text{л.о}}(\overline{\tau,(\nu-1)\tau};\,\nu\tau|\vartheta)+\vartheta P_{\text{п.р}}(\overline{\tau,(k-1)\tau};\,k\tau|\vartheta)\right]\omega(\vartheta)d\vartheta+$$

$$+\int_{T}^{\infty}\left[\sum_{k=1}^{N}k\tau P_{\text{л.о}}(\overline{\tau,(k-1)\tau};\,k\tau|\vartheta)+TP_{\text{п.р}}(\overline{\tau,(N-1)\tau};N\tau|\vartheta)\right]\omega(\vartheta)\,d\vartheta; \tag{5}$$

среднее время нахождения системы в состоянии E_2 —

$$MS_2=\sum_{k=0}^{N-1}\int_{k\tau}^{(k+1)\tau}\left[\sum_{j=k+1}^{N}(j\tau-\vartheta)\,P_{\text{п.н}}(\overline{\tau,(j-1)\tau};\,j\tau|\vartheta)+\right.$$

$$\left.+(T-\vartheta)P_{\text{н.о}}(\overline{\tau,(N-1)\tau};\quad N\tau|\vartheta)\right]\omega(\vartheta)\,d\vartheta+$$

$$+\int_{N\tau}^{T}(T-\vartheta)P_{\text{п.р}}(\overline{\tau,(N-1)\tau};\,N\tau|\vartheta)\;\omega(\vartheta)\,d\vartheta; \tag{6}$$

среднее время нахождения системы в состоянии E_3 —

$$MS_3=t_{\text{к.р}}\sum_{k=0}^{N-1}\int_{k\tau}^{(k+1)\tau}\left[\sum_{\nu=1}^{k}\nu P_{\text{л.о}}(\overline{\tau,(\nu-1)\tau};\,\nu\tau|\vartheta)+\sum_{j=k+1}^{N}jP_{\text{п.н}}(\overline{\tau,(j-1)\tau};\,j\tau|\vartheta)+\right.$$

$$\left.+NP_{\text{н.о}}(\overline{\tau,(N-1)\tau};\quad N\tau|\vartheta)\right]\omega(\vartheta)\,d\vartheta+t_{\text{к.р}}\int_{N\tau}^{\infty}\left[\sum_{k=1}^{N}kP_{\text{л.о}}(\overline{\tau,(k-1)\tau};\,k\tau|\vartheta)+\right.$$

$$\left.+NP_{\text{п.р}}(\overline{\tau,(N-1)\tau};\quad N\tau|\vartheta)\right]\omega(\vartheta)\,d\vartheta; \tag{7}$$

среднее время нахождения системы в состоянии E_4 —

$$MS_4=t_{\text{л.в}}\sum_{k=1}^{N-1}\int_{k\tau}^{(k+1)\tau}\left[\sum_{\nu=1}^{k}P_{\text{л.о}}(\overline{\tau,(\nu-1)\tau};\,\nu\tau|\vartheta)\right]\omega(\vartheta)\,d\vartheta+$$

$$+t_{\text{л.в}}\int_{N\tau}^{\infty}\left[\sum_{k=1}^{N}kP_{\text{л.о}}(\overline{\tau,(k-1)\tau};\,k\tau|\vartheta)\right]\omega(\vartheta)\,d\vartheta; \tag{8}$$

среднее время нахождения системы в состоянии E_5 —

$$MS_5 = t_{\text{п.в}} \sum_{k=0}^{N} \int_{k\tau}^{(k+1)\tau} \sum_{j=k+1}^{N} P_{\text{п.н}}(\overline{\tau,(j-1)\tau}; j\tau|\vartheta)\,\omega(\vartheta)\,d\vartheta, \tag{9}$$

где $\omega(t)$ — плотность распределения вероятностей (ПРВ) наработки до отказа LRU; $t_{\text{КР}}$ — средняя продолжительность КР; $t_{\text{л.в}}$ — средняя продолжительность ложного восстановления LRU на заводе-изготовителе; $t_{\text{п.в}}$ — средняя продолжительность правильного восстановления LRU на заводе-изготовителе.

Д о к а з а т е л ь с т в о. Для краткости изложения докажем только соотношение (5), поскольку соотношения (1)—(5) доказываются аналогично.

При определении времени нахождения LRU в состояниях $\overline{E_1, E_5}$ использована формула условного математического ожидания дискретной случайной величины. С учетом принятых обозначений эта формула принимает вид

$$M[S_i|\xi] = \sum_{\nu=1}^{\Delta} S_{i,\nu} P\{S_i = S_{i,\nu}|\xi\}, \tag{10}$$

где $S_{i,\nu}$ $(\nu = \overline{1,\Delta})$ — множество дискретных значений, которые может принять случайная величина S_i. Для условных вероятностей, входящих в (10), выполняется условие нормировки

$$\sum_{\nu=1}^{\Delta} P\{S_i = S_{i,\nu}|\xi\} = 1.$$

Условное математическое ожидание времени нахождения LRU в состоянии S_i при $\Xi = \xi$ имеет вид

$$M[S_i|\xi] = \begin{cases} \xi \quad \text{при} \quad 0 < \xi \le \tau; \\ \sum_{\nu=1}^{k} \nu\tau\, P_{\text{л.о}}(\overline{\tau,(k-1)\tau};\ \nu\tau|\xi) + \xi\, P_{\text{п.р}}(\overline{\tau,(k-1)\tau};\ k\tau|\xi), \\ \text{если} \ \ k\tau < \xi \le (k+1)\tau,\ (k = \overline{1,N}); \\ \sum_{k=1}^{N} k\tau\, P_{\text{л.о}}(\overline{\tau,(k-1)\tau};\ \nu\tau|\vartheta) + TP_{\text{п.р}}(\overline{\tau,(N-1)\tau};\ N\tau|\vartheta), \ \text{если} \ \ \xi > T. \end{cases} \tag{11}$$

Математическое ожидание времени нахождения LRU в состоянии E_1 при условии, что отказ произойдет на интервале $[k\tau, (k+1)\tau]$, определим по формуле условного математического ожидания непрерывной случайной величины

$$M\,[S_1|k\tau<\Xi\le(k+1)\tau]=\frac{1}{F\,((k+1)\tau)-F\,(k\tau)}\int\limits_{k\tau}^{(k+1)\tau}M\,[S_1|\xi]\,dF\,(\xi), \qquad (12)$$

где $F\,(t)$ — функция распределения наработки до отказа LRU.

Для определения среднего времени нахождения LRU в состоянии E_1 воспользуемся формулой полного математического ожидания непрерывной случайной величины, которая с учетом выражений (11) и (12) преобразуется к следующему виду:

$$MS_1=\sum_{k=0}^{N}M\,[S_1|\xi]\,\omega(\xi)\,d\xi+\int\limits_{T}^{\infty}M\,[S_1|\xi]\,\omega(\xi)\,d\xi. \qquad (13)$$

Подставив выражение (11) в формулу (13), получим соотношение (1). Теорема доказана.

Экспоненциальный закон распределения наработки до отказа LRU. При распределении наработки до отказа LRU по экспоненциальному закону

$$\omega(t)=\lambda e^{-\lambda t}, \qquad (14)$$

где λ — интенсивность внезапных отказов LRU. При этом условные вероятности (1) — (4) принимают следующий вид:

$$P_{\text{л.о}}(\overline{\tau,(\nu-1)\tau};\ \nu\tau|\xi)=\alpha(1-\alpha)^{\nu-1},\ \nu=\overline{1,k};$$

$$P_{\text{п.р}}(\overline{\tau,(\nu-1)\tau};\ k\tau|\xi)=(1-\alpha)^{k},\ k=0,1,2,...,N;$$

$$P_{\text{п.н}}(\overline{\tau,(j-1)\tau};\ j\tau|\xi)=(1-\alpha)^{k}\beta^{j-k-1}(1-\beta),\ j=\overline{k+1,N};$$

$$P_{\text{н.о}}(\overline{\tau,(\nu-1)\tau};\ N\tau|\xi)=(1-\alpha)^{k}\beta^{N-k},\ N=1,2,..., \qquad (15)$$

где α — условная вероятность ложного отказа при КР LRU на стоянке ВС в базовом аэропорту; β — условная вероятность необнаруженного отказа при КР LRU на стоянке ВС в базовом аэропорту.

Следствие 1. Если $T<\infty$ и выполняется условие (14), то

$$MS_1=\frac{\tau}{\alpha}[1-(1-\alpha)^{N}e^{-(N+1)\lambda\tau}]+\left[(1-e^{-\lambda\tau})\left(\frac{1}{\lambda}-\frac{\tau}{\alpha}\right)-\tau e^{-\lambda\tau}\right]\times$$

$$\times\frac{1-(1-\alpha)^{N+1}e^{-(N+1)\lambda\tau}}{1-(1-\alpha)\,e^{-\lambda\tau}}+\tau\,(1-\alpha)^{N}e^{-(N+1)\lambda\tau}; \qquad (16)$$

$$MS_2 = \left[\frac{\tau(1-\beta e^{-\lambda\tau})}{1-\beta} - \frac{(1-e^{-\lambda\tau})}{\lambda}\right]\left[\frac{1-(1-\alpha)^N e^{-N\lambda\tau}}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}}\right] - \frac{\beta\tau(1-e^{-\lambda\tau})}{1-\beta}\times$$

$$\times\left[\frac{\beta^N-(1-\alpha)^N e^{-N\lambda\tau})}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}/\beta}\right] - (1-\alpha)^N e^{-N\lambda\tau}\left(\frac{1-e^{-\lambda\tau}}{\lambda} - \tau\right); \qquad (17)$$

$$MS_3 = t_{\text{КР}}\left\{\left(\frac{1-e^{-\lambda\tau}}{\alpha}\right)\left[\frac{1-e^{-N\lambda\tau}}{1-e^{-\lambda\tau}} - \frac{1-(1-\alpha)^N e^{-N\lambda\tau}}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}}\right] + \frac{(1-e^{-\lambda\tau})}{1-\beta}\times\right.$$

$$\left.\times\left[\frac{1-(1-\alpha)^N e^{-N\lambda\tau}}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}} - \frac{\beta^N-(1-\alpha)^N e^{-N\lambda\tau}}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}/\beta}\right] + \frac{e^{-N\lambda\tau}}{\alpha}[1-(1-\alpha)^N]\right\}; \qquad (18)$$

$$MS_4 = t_{\text{л.в}}\{(1-e^{-\lambda\tau})\left[\frac{e^{-\lambda\tau}-e^{-N\lambda\tau}}{1-e^{-\lambda\tau}} - \frac{(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}-(1-\alpha)^N e^{-N\lambda\tau}}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}}\right] +$$

$$+[1-(1-\alpha)^N]e^{-N\lambda\tau}\}; \qquad (19)$$

$$MS_5 = t_{\text{п.в}}\{(1-e^{-\lambda\tau})\left[\frac{1-(1-\alpha)^N e^{-N\lambda\tau}}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}} - \frac{\beta^N-(1-\alpha)^N e^{-N\lambda\tau})}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}/\beta}\right] +$$

$$+(1-\alpha)^N e^{-N\lambda\tau}\}. \qquad (20)$$

Для доказательства соотношений (16)—(20) достаточно в выражения (5)—(9) подставить ПРВ (14) и условные вероятности (15), а затем выполнить элементарные преобразования.

Следствие 2. Если $T=\infty$ и выполняется условие (14), то

$$MS_1 = \frac{1-e^{-\lambda\tau}}{\lambda[1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}]};\; MS_2 = \frac{1}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}}\left[\frac{\tau(1-\beta e^{-\lambda\tau})}{1-\beta} - \frac{(1-e^{-\lambda\tau})}{\lambda}\right];$$

$$MS_3 = \frac{t_{\text{КР}}(1-\beta e^{-\lambda\tau})}{(1-\beta)[1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}]};\; MS_4 = \frac{t_{\text{л.в}}\alpha e^{-\lambda\tau}}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}};\; MS_5 = \frac{t_{\text{п.в}}(1-e^{-\lambda\tau})}{1-(1-\alpha)e^{-\lambda\tau}}. \qquad (21)$$

Выражения (21) [10] получаем из соотношений (16)—(20) при подстановке $N=\infty$.

Следствие 3. Справедливы следующие неравенства:

$$0 < MS_1 < \min\left\{\frac{\tau}{\alpha}[1-(1-\alpha)^N] + \tau(1-a)^N;\; \frac{1}{\lambda}(1-e^{-\lambda\tau})\right\}; \qquad (22)$$

$$0 < MS_2 < \min\left\{\frac{\tau}{1-\beta}[1-(1-\beta^{N+1})];\; T-\frac{1}{\lambda}(1-e^{-\lambda T})\right\}; \qquad (23)$$

$$\min\left\{\begin{array}{l}\dfrac{t_{\text{КР}}}{\alpha}[1-(1-\alpha)^N],\\ \dfrac{t_{\text{КР}}}{1-\beta}(1-\beta^N)\end{array}\right\} < MS_3 < \max\left\{\begin{array}{l}\dfrac{t_{\text{КР}}}{\alpha}[1-(1-\alpha)^N],\\ \dfrac{t_{\text{КР}}}{1-\beta}(1-\beta^N)\end{array}\right\}; \qquad (24)$$

$$0 < MS_4 < t_{\text{л.в}}[1-(1-\alpha)^N]; \qquad (25)$$

$$0 < MS_5 < \min[t_{\text{п.в}}(1-\alpha)^N;\ t_{\text{п.в}}(1-\beta^N)]. \qquad (26)$$

Доказательство неравенств (22) — (26) следует из анализа таблицы, в которой приведены предельные значения $\overline{MS_1, MS_5}$.

Следствие 4. Если $T=\infty$ и ошибки при КР LRU с помощью ВСК отсутствуют, т.е. $\alpha=\beta=0$, то справедливы следующие выражения:

$$MS_1 = \frac{1-e^{-(N+1)\lambda\tau}}{\lambda};\ MS_2 = \left(\frac{\tau}{1-e^{-\lambda\tau}} - \frac{1}{\lambda}\right)[1-e^{-(N+1)\lambda\tau}];$$

$$MS_3 = \frac{t_{\text{КР}}(1-e^{-N\lambda\tau})}{1-e^{-\lambda\tau}};\ MS_4 = 0;\ MS_5 = t_{\text{п.в}}.$$

Эти выражения вытекают из формул (16)—(20) после подстановки в них значений $\alpha=\beta=0$.

Средняя наработка на досрочный съем LRU с борта ВС. Из описания случайного процесса $L(t)$ следует, что LRU используется по назначению только при нахождении в состоянии E_1 или E_2. Состояния E_3, E_4 и E_5 не связаны с использованием LRU по назначению. Поэтому MTBUR определяется так: MTBUR $= MS_1 + MS_2$.

$\overline{MS_1, MS_5}$	$0<\tau<T$		$0<\lambda<\infty$	
	$\lambda=0$	$\lambda=\infty$	$\tau=0\ (N=\infty)$	$\tau=T\ (N=0)$
MS_1	$\dfrac{\tau}{\alpha}[1-(1-\alpha)^N]+\tau(1-\alpha)^N$	0	0	$\dfrac{1-e^{-\lambda\tau}}{\lambda}$
MS_2	0	$\dfrac{\tau}{1-\beta}(1-\beta^{N+1})$	0	$T-\dfrac{1}{\lambda}(1-e^{-\lambda\tau})$
MS_3	$\dfrac{t_{\text{КР}}}{\alpha}[1-(1-\alpha)^N]$	$\dfrac{t_{\text{КР}}}{1-\beta}(1-\beta^N)$	$\dfrac{t_{\text{КР}}}{\alpha}$	0
MS_4	$t_{\text{л.в}}[1-(1-\alpha)^N]$	0	$t_{\text{л.в}}$	0
MS_5	$t_{\text{п.в}}(1-\alpha)^N$	$t_{\text{п.в}}(1-\beta^N)$	0	$t_{\text{п.в}}$

В случае экспоненциального распределения наработки до отказа LRU и $\frac{T}{\tau} >> 1$ значение MS_2 становится пренебрежимо малым по сравнению с MS_1 и MTBUR можно рассчитывать по следующей формуле:

$$\text{MTBUR} \approx MS_1 = \frac{\tau}{\alpha}[1-(1-\alpha)^N e^{-(N+1)\lambda\tau}] + \left[(1-e^{-\lambda\tau})\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{\tau}{\alpha}\right) - \tau e^{-\lambda\tau}\right] \times$$

$$\times \frac{1-(1-\alpha)^{N+1} e^{-(N+1)\lambda\tau}}{1-(1-\alpha) e^{-\lambda\tau}} + \tau (1-\alpha)^N e^{-(N+1)\lambda\tau}. \qquad (27)$$

Пример 1. Определим оценку сверху для MTBUR, если среднее время безотказной работы LRU $M[\Xi] = 1/\lambda = 10000$ ч, гарантийный ресурс $T = 5000$ч и средняя продолжительность между вылетом и посадкой ВС (среднее время между КР) $\tau = 2{,}5$ ч. Условные вероятности ложного отказа и необнаруженного отказа при КР LRU с помощью ВСК составляют $\alpha = \beta = 0{,}005$.

Вычисляем среднее время безотказной работы LRU на интервале (0, T) по формуле

$$M[\Xi]_T = \frac{1-e^{-\lambda T}}{\lambda} = 3935 \text{ ч}.$$

Определяем число КР в течение гарантийного периода: $N = T/\tau - 1 = 1999$. Используя неравенства (22) и (23), находим оценку сверху для MTBUR:

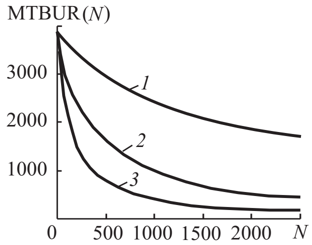
$$\text{MTBUR} < \min\left\{\frac{\tau}{\alpha}[1-(1-\alpha)^N] + \tau(1-\alpha)^N;\ \frac{1}{\lambda}(1-e^{-\lambda T})\right\} +$$

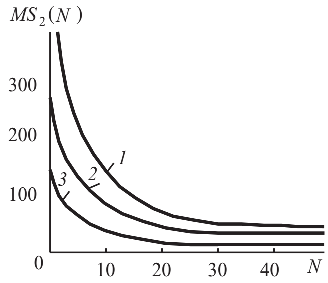
$$+ \min\left\{\frac{\tau}{1-\beta}[1-(1-\beta^{N+1})];\ T - \frac{1}{\lambda}(1-e^{-\lambda T})\right\} =$$

$$= \min\{500; 3935\} + \min\{2{,}5; 1065\} = 502{,}5 \text{ ч}.$$

Из данного примера видно, что вследствие высокой вероятности ложных отказов ВСК оценка сверху для MTBUR почти в восемь раз меньше среднего времени безотказной работы LRU на интервале (0, 5000 ч). Следует заметить, что эта оценка сверху приближается к расчетному значению MTBUR = 476 ч, вычисленному по формуле (27).

Из рис. 1 видно, что с увеличением числа КР средняя наработка на досрочный съем LRU с борта ВС существенно уменьшается, причем скорость уменьшения тем больше, чем больше вероятность ложных отказов ВСК.





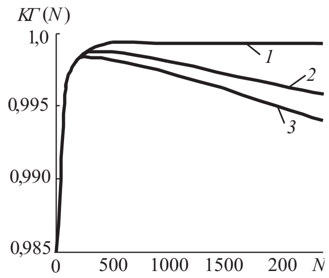


Рис. 1. Зависимость MTBUR от числа КР на конечном интервале времени: *1* — $\alpha = 0{,}001$; *2* — $\alpha = 0{,}005$; *3* — $\alpha = 0{,}01$

Рис. 2. Зависимость MS_2 от числа КР на конечном интервале времени: *1*— $\lambda = 1{,}0 \cdot 10^{-4}$ 1/ч; *2* — $\lambda = 5{,}0 \cdot 10^{-5}$ 1/ч; *3* — $\lambda = 1{,}0 \cdot 10^{-5}$ 1/ч

Рис. 3. Зависимость K_Γ от числа КР на конечном интервале времени: *1* — $\alpha = 0{,}001$; *2* — $\alpha = 0{,}005$; *3* — $\alpha = 0{,}01$

На рис. 2 приведена зависимость среднего времени MS_2 от числа КР на конечном интервале времени при различных значениях интенсивности отказов λ. Как видно из рис. 2, с увеличением числа КР среднее время нахождения LRU в состоянии скрытого отказа уменьшается. Чем выше надежность LRU, тем меньше среднее время MS_2.

Коэффициент готовности. Для нахождения коэффициента готовности K_Γ необходимо исключить из рассмотрения плановое ТО, в течение которого использование LRU не предусматривается. Если КР является плановым ТО, тогда

$$K_\Gamma = MS_1 / (MS_1 + MS_2 + MS_4 + MS_5). \tag{28}$$

Пример 2. Вычислим значение K_Γ при тех же исходных данных, что и в примере 1. Подставив выражения (16)—(20) в формулу (28) и выполнив необходимые вычисления, получим $K_\Gamma = 0{,}9977$.

Зависимость K_Γ от числа КР на конечном интервале времени при различных значениях α приведена на рис. 3, из которого видно, что чем меньше условная вероятность ложного отказа ВСК, тем больше K_Γ. При малых значениях вероятности α, например при $\alpha = 0{,}001$, величина K_Γ достигает некоторого установившегося значения и в дальнейшем практически не изменяется. При больших значениях α значение K_Γ уменьшается с увеличением числа КР. Это объясняется тем, что с увеличением числа N, величина MS_1 уменьшается быстрее, чем MS_2.

Следует заметить, что результаты расчетов хорошо согласуются со статистическими данными зарубежных авиакомпаний, согласно которым от 40 до 85% демонтированных LRU систем авионики на самом деле являются работоспособными [16, 17]. Это приводит к большим потерям авиакомпаний вследствие так называемых неподтвержденных дефектов.

Выводы. Доказанная теорема позволила получить обобщенные математические выражения для средних продолжительностей нахождения LRU системы авионики в различных состояниях процесса эксплуатации при произвольном законе распределения времени безотказной работы на конечном интервале времени. Следствия этой теоремы, позволяют при экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы LRU определить значения этих продолжительностей, а также их нижние и верхние границы. С помощью полученных выражений установлена связь между показателями достоверности ВСК, периодичности КР и интенсивностью отказов LRU. Впервые получено аналитическое выражение для расчета среднего времени наработки LRU на досрочный съем с борта ВС на конечном интервале времени. Установлено, что достоверность ВСК существенно влияет на показатели эффективности ТО систем авионики. Например, вследствие ложных отказов ВСК средняя наработка на досрочный съем блока с борта ВС может быть в восемь раз меньше его средней наработки на отказ.

Данные результаты позволяют обосновать требования к достоверности ВСК и оценить эффективность ТО LRU системы авионики в период их гарантийного обслуживания. Полученные результаты целесообразно использовать как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации ВС. Дальнейшим развитием этих результатов является разработка математических моделей для выбора оптимального варианта стратегии ТО систем авионики.

A maintenance model of periodically checked one-unit avionic system is considered for a finite. time interval. The analytical expressions are obtained for computing the mean times of staying the system in different states of exploitation for a general and an exponential distributions of time to failure. These expressions take into account the trustworthiness and periodicity of checking, reliability characteristics, and duration of maintenance operations. The expressions for computing the availability factor and mean time between unscheduled repairs are derived for a finite time interval.

1. *Gertsbakh I.* Reliability theory with applications to preventive maintenance. — N.Y. : Springer Verlag. — 2006. — 219 p.
2. *Nakagava T.* Maintenance theory of reliability. — N.Y. : Springer Verlag. — 2005. — 258 p.
3. *Nakagava T., Mizutani S., Igaki N.* Optimal inspection policies for a finite interval// The Second Euro — Japan Workshop on Stochastic Risk Modeling. — N.Y. : Production and Reliability. — 2002. — P. 334 — 339.
4. *Finkelshtein A., Herer Y. T., Raz T., Ben-Gal I.* Economic optimization of off-line inspection in a process subject to failure and recovery // IEEE Transactions. — 2005. — Vol. 37, № 11. — P. 995—1009.

5. *Newby M., Dagg R.* Optimal Inspection and Perfect Repair // Journal of Management Mathematics. — 2004. — **2**, № 15. — 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., Конахович Г. Ф., Мачалин И. А.* Организация системы технического обслуживания и ремонта радиоэлектронного комплекса Ту-204: Учеб. пособие. — Киев : КИИГА, 1992. — 103 с.
11. *Уланский В. В., Мачалин И. А.* Математическая модель процесса эксплуатации легкозаменяемых блоков систем авионики // Авіаційно-космічна техніка і технологія. — 2006. — **32**, № 6. — С. 74 — 80.
12. *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.
13. *Уланский В. В., Мачалин И. А.* Математические модели многопараметрического контроля систем авионики // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. — 2006. — **4**, № 4, — С. 289 —297.
14. *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.
15. *MIL-HDBK- 338B.* Electronic reliability design handbook// Air Force Research Laboratory Information. — Virginia : Fort Belvoir, 1991. — 1046 p.
16. *William R., Banner J., Knowles I., Dube M., Natishan M. and 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. and Pecht M.* The «trouble not identified» phenomenon in automotive electronics // Microelectronics Reliability. — 2002. — **42**, № 4. — P. 641—651.

Поступила 12.09.07

УЛАНСКИЙ Владимир Васильевич, д-р техн. наук, профессор кафедры электроники университета Аль—Фатех (г. Триполи, Ливия). В 1975 г. окончил Киевский ин-т инженеров гражданской авиации. Область научных исследований — математическое моделирование и разработка эксплуатационного обеспечения воздушных судов, проектирование систем контроля и диагностики, микроэлектроника и схемотехника.

МАЧАЛИН Игорь Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем Национального авиационного университета (г. Киев). В 1980 г. окончил Киевский ин-т инженеров гражданской авиации. Область научных исследований — математическое моделирование и разработка эксплуатационного обеспечения воздушных судов, проектирование систем контроля и диагностики, эксплуатация телекоммуникационных систем.