

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АВИОНИКИ С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕЖАЮЩИХСЯ ОТКАЗОВ

*Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

Анотація. У даний час вартість технічного обслуговування авіоники становить близько 30% від загальної вартості обслуговування повітряних суден. Великий вплив на вартість обслуговування авіоники справляє високий рівень переміжних відмов. У статті розроблено математичну модель для розрахунку коефіцієнта готовності і вартості обслуговування безперервно-контрольованих легкознімних блоків систем авіоники, схильних до постійних і переміжних відмов. Отримано математичні вирази для коефіцієнта готовності резервованих систем авіоники, що враховують кількість запасних легкознімних блоків в обмінному фонді авіакомпанії. Досліджено залежність коефіцієнта готовності від інтенсивності постійних і переміжних відмов.

Ключові слова: легкознімний блок, постійна відмова, переміжна відмова, коефіцієнт готовності, коефіцієнт простою, інтенсивність відмов, резервована система.

Аннотация. В настоящее время стоимость технического обслуживания авионики составляет около 30% от общей стоимости обслуживания воздушных судов. Большое влияние на стоимость обслуживания авионики оказывает высокий уровень перемежающихся отказов. В статье разработана математическая модель для расчета коэффициента готовности и стоимости обслуживания непрерывно-контролируемых легкоъемных блоков систем авионики, подверженных постоянным и перемежающимся отказам. Получены математические выражения для коэффициента готовности резервированных систем авионики, учитывающие количество запасных легкоъемных блоков в обменном фонде авиакомпании. Исследована зависимость коэффициента готовности от интенсивности постоянных и перемежающихся отказов.

Ключевые слова: легкоъемный блок, постоянный отказ, перемежающийся отказ, коэффициент готовности, коэффициент простою, интенсивность отказов, резервированная система.

Abstract. Currently, the cost of avionics maintenance is about 30% of the total cost of aircraft maintenance. A great impact on the cost of avionics maintenance is provided by a high level of intermittent failures. The mathematical model for the calculation of the average availability and maintenance cost of continuously tested avionics line replaceable units' subjected to permanent and intermittent failures is developed in this paper. Mathematical expressions are obtained for average availability of redundant avionics systems taking into account the number of spare line replaceable units in the airline's exchange fund. The dependence of average availability on the rate of permanent and intermittent failures is investigated.

Keywords: line replaceable unit, permanent failure, intermittent failure, availability, unavailability, failure rate, redundant system.

1. Введение

Как сообщается в [1], около 50% ситуаций, связанных с нахождением воздушных судов на земле, обусловлены отказами авиационной электроники. В настоящее время в самолетах семейства Boeing и Airbus используются цифровые системы авионики. Современная авионика представляет собой набор избыточных и легкоъемных блоков (ЛСБ). Каждый ЛСБ включает несколько съемных сборочных единиц (ССЕ) и имеет свою собственную встроенную систему контроля (ВСК), которая обеспечивает непрерывное тестирование. Модульная конструкция обеспечивает легкий доступ к цепям и компонентам для осмотра или обслуживания. ЛСБ работают до безопасных отказов (постоянных или перемежающихся), которые регистрируются во время полетов. Демонтированные ЛСБ могут быть повторно протестированы и, при необходимости, отремонтированы либо на заводе-изготовителе, либо в центре обслуживания в базовом аэропорту. В последнем случае необходимо иметь

наземную автоматизированную систему контроля (НАСК) для повторного тестирования каждого демонтированного ЛСБ и обнаружения неисправных ССЕ. Таким образом, безопасность полетов современных воздушных судов обеспечивается за счет использования резервированных систем авионики, а регулярность полетов обеспечивается за счет достаточного количества запасных ЛСБ. Однако описанная стратегия технического обслуживания может быть неэффективной в случае высокой интенсивности перемежающихся отказов, поскольку современные НАСК не в состоянии подтвердить факт наличия перемежающихся отказов, и те же перемежающиеся отказы могут повториться при следующих полетах. Как показано в [2–4], доля перемежающихся отказов для систем авионики составляет от 20% до 50%. Более того, некоторые авторы утверждают, что перемежающиеся отказы могут составлять более 85% от общего числа наблюдаемых отказов компонентов авионики [5]. Теоретические расчеты, приведенные в [6], показывают, что авиакомпания, имеющая налет 30 000 часов в год, может иметь потери из-за перемежающихся отказов до 500 000 фунтов стерлингов в год. Статистические данные, представленные в [7], показали, что 4500 событий, относящихся к перемежающимся отказам, стоили авиакомпаниям АТА 100 млн дол. в год. Влияние перемежающихся отказов на авиакомпании включает увеличение времени обслуживания, сокращение регулярности полетов и готовности воздушных судов, а также увеличение запасных ЛСБ, что в конечном итоге приводит к увеличению стоимости жизненного цикла систем авионики. Таким образом, при выборе оптимального варианта технического обслуживания необходимо учитывать влияние перемежающихся отказов на показатели эффективности обслуживания систем авионики.

Проанализируем некоторые опубликованные работы, связанные с оценкой стоимости жизненного цикла систем авионики. В работе [8] рассматривается стохастическая модель затрат на жизненный цикл систем вертолетной авионики. Однако предложенная модель не оценивает влияние перемежающихся отказов на стоимость жизненного цикла вертолетной авионики. В работе [9] описана модель стоимости жизненного цикла аппаратуры авионики. Предлагаемая модель включает некоторые параметры, такие как тип технологии, процент нового дизайна, изменение графика разработки, вес, объем, надежность проектирования, аппаратная надежность, которые считаются драйверами стоимости жизненного цикла авионики. Перемежающиеся отказы не рассматриваются в предлагаемой модели. В работе [10] рассматривается модель оценки стоимости запасных частей для новых систем воздушных судов. Предлагаемая модель использует стоимость запасных частей для существующей системы воздушных судов и корректирует ее с помощью коэффициента сравнения, отражающего различия в стоимости системы, надежности, сложности оборудования и приспособленности к ремонту. В этой модели не рассматривается дифференциация отказов на постоянные и перемежающиеся. В работе [11] для перспективных воздушных судов рассматривается анализ затрат в течение жизненного цикла системы. Предлагаемая методология основана на моделировании дискретных событий, возникающих при эксплуатации и техническом обслуживании воздушных судов. В работе [12] дан подробный анализ стратегии обслуживания систем авионики до безопасного отказа. Разработана математическая модель обслуживания периодически контролируемого ЛСБ. Получены математические выражения для коэффициента готовности и ожидаемых затрат на обслуживание резервированных систем авионики. Однако предлагаемые модели не учитывают влияние перемежающихся отказов на эффективность технического обслуживания. В работе [13] рассматриваются функции затрат для стратегии обслуживания авионики до безопасного отказа. Предлагаемые аналитические выражения учитывают достоверность ВСК, периодичность тестирования, интенсивность постоянных отказов ЛСБ и стоимость различных операций технического обслуживания. В предложенных моделях обслуживания не учитываются перемежающиеся отказы.

Рассмотрим теперь ранее опубликованные математические модели, относящиеся к эксплуатационной надежности цифровых систем. Этот анализ важен для понимания предлагаемой модели эксплуатационной надежности ЛСБ систем авионики. В работе [14] анализируется политика дискретных во времени проверок перемежающихся отказов. Предполагается экспоненциальное распределение времени до постоянного и перемежающегося отказов. Следует отметить, что в современных системах авионики осуществляется практически непрерывное программное и аппаратурное тестирование. Поэтому данная модель не подходит для систем авионики. В работе [15] рассматривается система связи с перемежающимися отказами. Отказы имеют экспоненциальное распределение и по характеру проявления являются скрытыми. Отказы становятся явными, когда длительность нахождения в скрытом состоянии превышает верхнее предельное время. В работе [16] рассмотрена марковская модель для отказоустойчивых систем, которая учитывает влияние как постоянных, так и перемежающихся отказов. Анализируется надежность резервированных систем. В работе [17] проводится анализ надежности для оптимального периодического тестирования перемежающихся отказов, которая минимизирует стоимость тестирования. Марковская модель используется для вероятностного моделирования перемежающихся отказов. В работе [18] рассматривается модель для изучения надежности цифровых систем, подверженных как постоянным, так и перемежающимся отказам. Модель основана на марковской модели, содержащей три состояния. В работе [19] рассматривается модель эксплуатационной надежности телекоммуникационных систем, подверженных постоянным и перемежающимся отказам. Математические модели, предложенные в работах [18] и [19], не учитывают прерывистого режима эксплуатации авионики воздушных судов. В [20] рассмотрена модель обслуживания систем авионики с учетом постоянных и перемежающихся отказов. Однако для расчета показателей эффективности обслуживания требуется знание условной многомерной плотности распределения вероятностей (ПРВ) наработки до перемежающихся отказов, что существенно затрудняет использование этой модели.

Целью данной работы является разработка достаточно простой математической модели обслуживания ЛСБ систем авионики при наличии постоянных и перемежающихся отказов при произвольном законе распределения времени до каждого из отказов.

2. Постановка задачи

При разработке математической модели обслуживания ЛСБ предполагается, что процесс обслуживания рассматривается на бесконечном интервале времени. Таким интервалом можно считать, например, период послегарантийного обслуживания, который значительно превосходит среднее время до незапланированного снятия ЛСБ с борта воздушного судна. Предполагается, что ЛСБ непрерывно тестируется ВСК в течение полета продолжительностью τ и, в случае постоянного отказа, ЛСБ оключается бортовым компьютером. В случае перемежающегося отказа ЛСБ обычно не отключается во время полета. Однако информация о перемежающихся отказах, которые произошли во время полета, регистрируется бортовым компьютером. Если в полете произошел постоянный или перемежающийся отказ, после посадки воздушного судна в базовом аэропорту ЛСБ демонтируется и направляется на ремонт. Предполагается, что после любого ремонта ЛСБ становится, как новый.

Поведение ЛСБ в интервале времени $(0, \infty)$ описывается случайным процессом $E(t)$ с конечным числом состояний. Процесс $E(t)$ изменяется скачкообразно. Каждый скачок $E(t)$ обусловлен переходом ЛСБ в одно из возможных состояний. Поскольку после восстановления состояние ЛСБ обновляется, то процесс $E(t)$ является регенерирующим случайным процессом. Случайный процесс $E(t)$ определяется следующим образом: $E(t) = S_1$, если в момент t ЛСБ находится в работоспособном состоянии; $E(t) = S_2$, если в момент t ЛСБ находится в неработоспособном состоянии из-за обнаруженного постоянно-

го отказа, возникшего во время полета; $E(t) = S_3$, если в момент времени t ЛСБ не используется и демонтируется или монтируется на борту воздушного судна; $E(t) = S_4$, если в момент времени t ЛСБ не используется, ожидая на борту ВС замены запасным ЛСБ со склада; $E(t) = S_5$, если в момент t ЛСБ восстанавливается из-за возникшего в полете перемежающегося отказа; $E(t) = S_6$, если в момент t ЛСБ восстанавливается из-за возникшего в полете постоянного отказа.

Требуется определить средние продолжительности пребывания ЛСБ в каждом из возможных состояний, коэффициент готовности (КГ) и средние издержки при эксплуатации ЛСБ.

3. Определение средних продолжительностей нахождения ЛСБ в различных состояниях

Обозначим через TS_i время, проведенное ЛСБ в состоянии $S_i (i = \overline{1,6})$. Очевидно, что TS_i является случайной величиной со средним временем $M[TS_i]$. Пусть Ξ – случайное время до постоянного отказа с ПРВ $\omega(\xi)$. Аналогично определяем случайную величину η как время до перемежающегося отказа с ПРВ $f(\eta)$.

Средняя продолжительность цикла регенерации ЛСБ определяется по формуле математического ожидания суммы случайных величин:

$$M[TS_0] = \sum_{i=1}^6 M[TS_i]. \quad (1)$$

Предположим, что в течение одного полета может возникнуть только один тип отказа ЛСБ (постоянный или перемежающийся). Данное допущение выполняется на практике с высокой степенью вероятности, поскольку время полета в сотни раз меньше среднего времени до постоянного или перемежающегося отказа ЛСБ. Далее, пусть постоянный отказ ЛСБ происходит в момент времени ξ , где $k\tau < \xi \leq (k+1)\tau$, ($k = 1, 2, \dots$). Тогда условное математическое ожидание времени, проведенного ЛСБ в состоянии S_1 при условии, что $\Xi = \xi$, равно

$$M[TS_1 | \xi] = \int_0^{k\tau} xf(x)dx + \xi [1 - F(k\tau)], \quad (2)$$

где $F(\eta)$ – функция распределения случайной величины η .

Для определения среднего времени нахождения ЛСБ в состоянии S_1 применяем к выражению (2) теорему математического ожидания непрерывной случайной величины Ξ . В результате получаем следующую формулу:

$$M[TS_1] = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{k\tau}^{(k+1)\tau} \left\{ \int_0^{k\tau} xf(x)dx + \vartheta [1 - F(k\tau)] \right\} \omega(\vartheta) d\vartheta. \quad (3)$$

Условное математическое ожидание времени, проведенного ЛСБ в состоянии S_2 при условии, что $\Xi = \xi$, определяется как

$$M[TS_2 | \xi] = [(k+1)\tau - \xi][1 - F(k\tau)]. \quad (4)$$

Применяя к выражению (4) теорему математического ожидания непрерывной случайной величины Ξ , получаем

$$M[TS_2] = \sum_{k=0}^{\infty} [1 - F(k\tau)] \int_{k\tau}^{(k+1)\tau} [(k+1)\tau - \vartheta] \omega(\vartheta) d\vartheta. \quad (5)$$

Среднее время нахождения ЛСБ в состоянии S_3 на интервале регенерации равно [21]

$$M[TS_3] = t_M + t_D, \quad (6)$$

где t_M и t_D – среднее время монтажа и демонтажа LRU на борту воздушного судна, соответственно.

Ожидаемое среднее время, проведенное ЛСБ в состоянии S_4 , определяется таким же образом, как и в [21]:

$$M[TS_4] = \sigma(\Delta t_{SP} + t_M + t_D - t_S), \quad (7)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0 & \text{если } t_S \geq (\Delta t_{SP} + t_D + t_M), \\ 1 & \text{если } t_S < (\Delta t_{SP} + t_D + t_M), \end{cases}$$

где Δt_{SP} – среднее время ожидания запасного ЛСБ со склада, а t_S – запланированное время остановки воздушного судна в базовом аэропорту.

Условное математическое ожидание времени, проведенного ЛСБ в состоянии S_5 , при условии, что $\Xi = \xi$ задается формулой

$$M[TS_5 | \xi] = t_{IR} [1 - \Omega(v\tau)] f(\eta) d\eta, \quad v\tau < \eta \leq (v+1)\tau, \quad \eta < \xi, \quad v = \overline{1, k-1}, \quad (8)$$

где $\Omega(\xi)$ – функция распределения случайной величины Ξ , t_{IR} – среднее время восстановления ЛСБ по причине перемежающегося отказа.

Применяя к выражению (8) теорему математического ожидания непрерывной случайной величины Ξ , получаем

$$M[TS_5] = t_{IR} \sum_{v=0}^{\infty} [1 - \Omega(v\tau)] \int_{v\tau}^{(v+1)\tau} f(\vartheta) d\vartheta. \quad (9)$$

Условное математическое ожидание времени, проведенного ЛСБ в состоянии S_6 , при условии, что $\Xi = \xi$, определяется по формуле

$$M[TS_6 | \xi] = t_{PR} [1 - F(k\tau)] \omega(\xi) d\xi, \quad k\tau < \xi \leq (k+1)\tau, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

Применяя к выражению (10) теорему математического ожидания непрерывной случайной величины Ξ , получаем

$$M[TS_6] = t_{PR} \sum_{k=0}^{\infty} [1 - F(k\tau)] \int_{k\tau}^{(k+1)\tau} \omega(\vartheta) d\vartheta, \quad (11)$$

где t_{PR} – среднее время восстановления ЛСБ по причине постоянного отказа.

Как указано в работе [22], экспоненциальное распределение является подходящим распределением для постоянных отказов сложных систем. Согласно работе [23], система управления полетами (flight control system) состоит из 460 цифровых интегральных схем (ИС), 97 линейных ИС, 34 ИС памяти, 25 специализированных ИС и 7 процессоров. Такие системы имеют большое количество электронных компонентов. Для этих компонентов внешние и собственные механизмы отказов могут привести к отказу какого-либо из ком-

понентов. Различные режимы отказов комбинируются, формируя постоянную интенсивность отказов ЛСБ. Поэтому экспоненциальное распределение времени до постоянного отказа подходит для большинства современных ЛСБ систем авионики [23].

Предположим, что распределение времени до перемежающегося отказа также является экспоненциальным. Тогда средняя продолжительность нахождения ЛСБ в состоянии S_1 принимает следующий вид:

$$M[TS_1] = \frac{1}{\theta} - \frac{1}{1 - e^{-(\lambda+\theta)\tau}} \left[(1 - e^{-\lambda\tau}) \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{\lambda} \right) + \tau e^{-\lambda\tau} \right], \quad (12)$$

где λ – интенсивность постоянных отказов ЛСБ, θ – интенсивность перемежающихся отказов ЛСБ.

Средняя продолжительность нахождения ЛСБ в состоянии S_2 равна

$$M[TS_2] = \frac{1}{1 - e^{-(\lambda+\theta)\tau}} \left(\tau - \frac{1 - e^{-\lambda\tau}}{\lambda} \right). \quad (13)$$

Средняя продолжительность нахождения ЛСБ в состоянии S_5 определяется как

$$M[TS_5] = \frac{t_{IR}(1 - e^{-\theta\tau})}{1 - e^{-(\lambda+\theta)\tau}}. \quad (14)$$

И, наконец, средняя продолжительность нахождения ЛСБ в состоянии S_6 равна

$$M[TS_6] = \frac{t_{PR}(1 - e^{-\lambda\tau})}{1 - e^{-(\lambda+\theta)\tau}}. \quad (15)$$

На рис. 1 показан график зависимости среднего времени нахождения ЛСБ в состоянии S_1 от интенсивностей постоянных (λ) и перемежающихся (θ) отказов при $\tau = 4$ ч. Как видно из рис. 1, среднее время нахождения ЛСБ в работоспособном состоянии сильно зависит от интенсивностей обоих типов отказов.

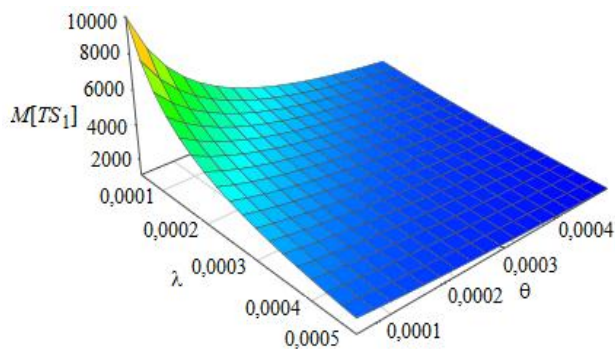


Рис. 1. График зависимости среднего времени нахождения ЛСБ в состоянии S_1 от интенсивностей постоянных (λ) и перемежающихся (θ) отказов

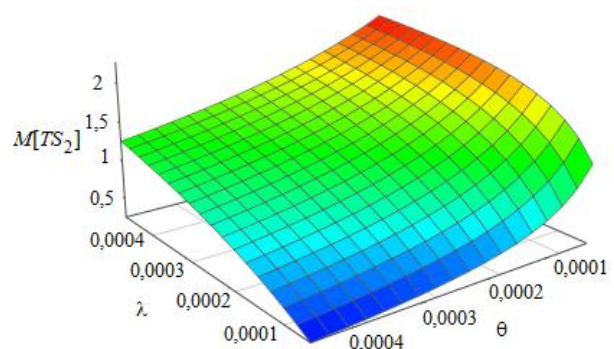


Рис. 2. График зависимости среднего времени нахождения ЛСБ в состоянии S_2 от интенсивностей постоянных (λ) и перемежающихся (θ) отказов

На рис. 2 показан график зависимости $M[TS_2]$ от интенсивностей λ и θ при $\tau = 4$ ч. Как видно из рис. 2, среднее время нахождения ЛСБ в неработоспособном состоянии по-разному зависит от интенсивностей λ и θ . При увеличении интенсивности постоянных отказов $M[TS_2]$ растет, а при увеличении интенсивности перемежающихся отказов

$M[TS_2]$ уменьшается. Последнее связано с уменьшением вероятности возникновения постоянного отказа в полете. При этом, естественно, уменьшается ожидаемое время нахождения ЛСБ в неработоспособном состоянии.

На рис. 3 показан график зависимости среднего времени нахождения ЛСБ в состоянии S_5 от интенсивностей постоянных и перемежающихся отказов при $t_{IR} = 1ч$ и $\tau = 4ч$. Как видно из рис. 3, среднее время нахождения ЛСБ в состоянии восстановления по причине перемежающегося отказа возрастает с увеличением интенсивности θ и уменьшается при увеличении интенсивности λ .

На рис. 4 показан график зависимости среднего времени нахождения ЛСБ в состоянии S_6 от интенсивностей постоянных и перемежающихся отказов при $t_{PR} = 1ч$ и $\tau = 4ч$. Из рис. 4 следует, что среднее время нахождения ЛСБ в состоянии восстановления по причине постоянного отказа возрастает с увеличением интенсивности λ и уменьшается при увеличении интенсивности θ . Таким образом, влияние интенсивностей λ и θ на средние продолжительности нахождения ЛСБ в состояниях S_5 и S_6 является противоположным на интервале регенерации ЛСБ. Это связано с тем, что при увеличении одной из интенсивностей отказов соответственно увеличивается вероятность восстановления ЛСБ по причине возникновения данного типа отказа.

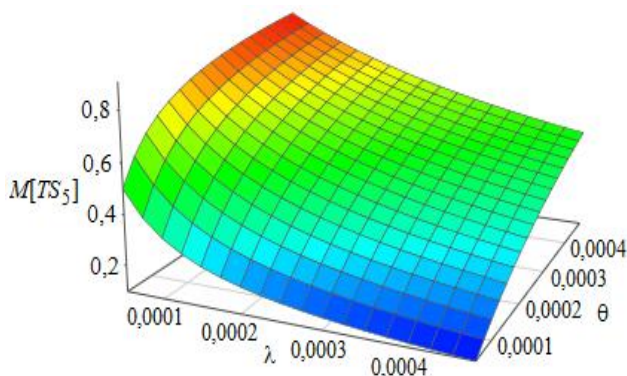


Рис. 3. График зависимости среднего времени нахождения ЛСБ в состоянии S_5 от интенсивностей постоянных (λ) и перемежающихся (θ) отказов

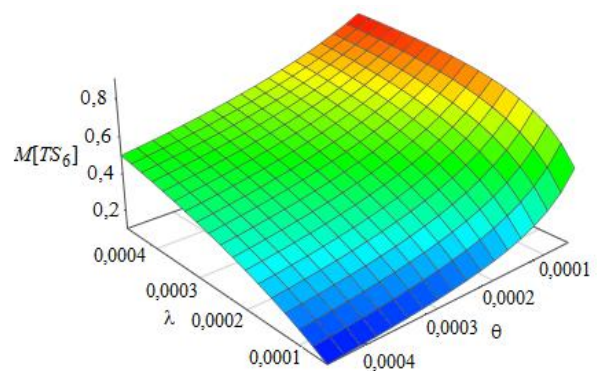


Рис. 4. График зависимости среднего времени нахождения ЛСБ в состоянии S_6 от интенсивностей постоянных (λ) и перемежающихся (θ) отказов

4. Коэффициент готовности ЛСБ

Поскольку процесс смены состояний ЛСБ является регенерирующим, то КГ определяется как отношение среднего времени нахождения ЛСБ в состоянии S_1 за цикл регенерации к средней продолжительности этого цикла, то есть

$$A = M[TS_1]/M[TS_0]. \quad (16)$$

Зависимость КГ ЛСБ от интенсивностей постоянных и перемежающихся отказов при $\tau = 4ч$, $t_{IR} = 5ч$, $t_{PR} = 15ч$ и $M[TS_4] = 0$ показана на рис. 5. Как видно из рис. 5, КГ убывает с ростом как интенсивности постоянных отказов, так и с ростом интенсивности перемежающихся отказов. Однако степень влияния интенсивности постоянных отказов значительно больше, чем перемежающихся, поскольку $t_{PR} = 3t_{IR}$.

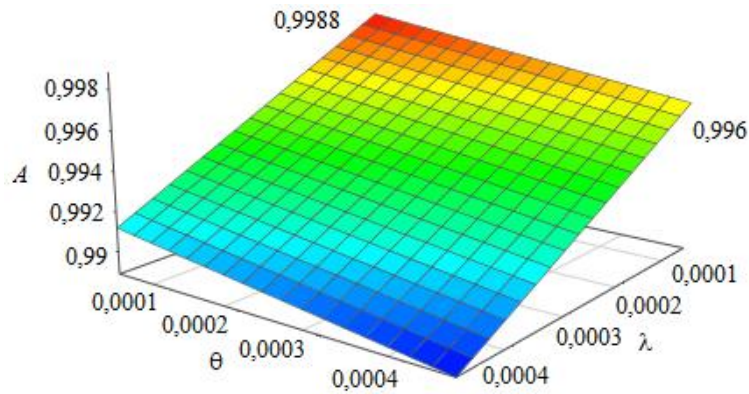


Рис. 5. Зависимость КГ ЛСБ от интенсивностей постоянных (λ) и перемежающихся (θ) отказов при $M[TS_4] = 0$

5. Средние издержки при эксплуатации ЛСБ

Средние издержки в единицу времени при эксплуатации ЛСБ определяются по следующей формуле:

$$M[C] = \frac{1}{M[T_0]} \sum_{i=2}^6 C_i M[TS_i], \quad (17)$$

где C_i – потери или затраты в единицу времени из-за нахождения системы в состоянии S_i .

Средние издержки при эксплуатации совокупности однотипных ЛСБ в течение времени T определяются так:

$$M[C_T] = nNTM[C], \quad (18)$$

где n – количество однотипных ЛСБ в резервированной системе авионики, N – количество воздушных судов в авиакомпании.

6. Коэффициент готовности резервированной системы авионики

Современные системы авионики являются резервированными системами. Обычно используется постоянное резервирование [21]. Воспользовавшись результатами работы [21], определяем, что при параллельном с точки зрения надежности резервировании системы авионики КГ вычисляется по следующей формуле:

$$A = 1 - \{1 - M(TS_1) / [M(TS_1) + M(TS_2) + M(TS_4)]\}^n. \quad (19)$$

В формуле (19) не учитываются средние продолжительности нахождения ЛСБ в состояниях S_3 , S_5 и S_6 поскольку при нахождении в этих состояниях ЛСБ не используется.

В случае мажоритарного резервирования КГ определяется так:

$$A = \sum_{i=h}^n \binom{n}{i} \left[\frac{M(TS_1)}{M(TS_1) + M(TS_2) + M(TS_4)} \right]^i \left[1 - \frac{M(TS_1)}{M(TS_1) + M(TS_2) + M(TS_4)} \right]^{n-i}. \quad (20)$$

На рис. 6 показана зависимость коэффициента простоя (КП) от интенсивности постоянных отказов дублированной системы авионики при $\tau = 4\tau$, $\theta = 10^{-4}\tau^{-1}$ и $M[TS_4] = 0$. Как видно из рис. 6, КП начинает существенно увеличиваться при $\lambda > 10^{-3}\tau^{-1}$.

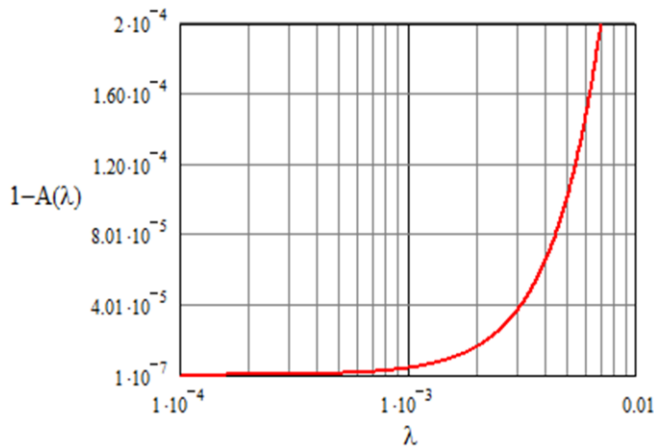


Рис. 6. Зависимость КП дублированной системы от интенсивности постоянных отказов при $M[TS_4] = 0$

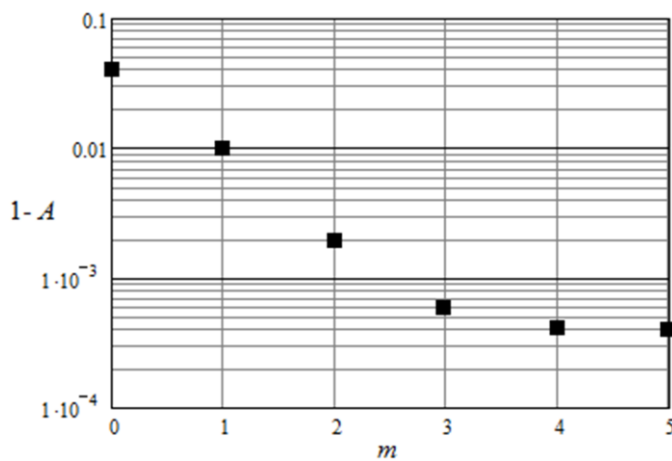


Рис. 7. Зависимость КП троированной системы авионики от количества запасных ЛСБ

стояниях в процессе эксплуатации при произвольном распределении наработки до постоянного или перемежающегося отказа на бесконечном интервале эксплуатации. На примере экспоненциального распределения показано, что средняя продолжительность нахождения ЛСБ в работоспособном состоянии практически одинаково зависит от интенсивностей постоянных и перемежающихся отказов. Средняя продолжительность нахождения ЛСБ в неработоспособном состоянии в основном зависит от интенсивности постоянных отказов, а средние продолжительности нахождения ЛСБ в состояниях восстановления в значительной мере определяются интенсивностями соответствующих типов отказов. Также показано, что КГ ЛСБ в большей степени зависит от интенсивности того типа отказа, который приводит к большей продолжительности восстановления. Предложены аналитические выражения для расчета КГ параллельной и мажоритарной структур систем авионики. Показано, что КП дублированной системы авионики начинает зависеть от интенсивности постоянных отказов, если последняя превышает уровень $5 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$. Исследована зависимость КП троированной системы авионики от числа запасных ЛСБ в обменном фонде авиапредприятия, в результате которой показано, что КП уменьшается на два порядка при увеличении числа запасных ЛСБ от 0 до 4.

На рис. 7 показана зависимость КП троированной системы авионики от количества запасных ЛСБ (m) в обменном фонде авиакомпании, включающей 15 воздушных судов при $\tau = 4 \text{ ч}$ и $\lambda = \theta = 2 \times 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$. Из рис. 7 видно, что КП уменьшается в 100 раз при увеличении количества запасных ЛСБ от 0 до 5 и при $m > 4$ КП практически не меняется. Поэтому дальнейшее увеличение количества запасных ЛСБ нецелесообразно.

Следует также отметить, что КП практически не зависит от интенсивности перемежающихся отказов. Это связано с тем, что при возникновении перемежающегося отказа ЛСБ не отключается в полете, а демонтируется с борта воздушного судна после посадки в аэропорту приписки.

6. Заключение

В работе решена актуальная задача оценки влияния постоянных и перемежающихся отказов на КГ и стоимость эксплуатации цифровой авионики. Предложена новая математическая модель для оценки средних продолжительностей пребывания ЛСБ системы авионики в различных со-

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Avionics integrity. Seeking solutions for avionics AOG angst [Электронный ресурс] / P. Seideman, D. Spanovich. – Penton: Aviation week network, 2011. – 9 p. – Режим доступа: <http://aviationweek.com/awin/avionics-integrity>.
2. Roadmap to self-serving assets in civil aerospace / A.M. Brintrup, D.C. Ranasinghe, S. Kwan [et al.] // The 1st CIRP industrial product-service systems (IPS2) conference, (1 – 2 April 2009, Cranfield, UK). – Cranfield: Cranfield university press, 2009. – P. 323 – 331.
3. Soderholm P. A system view of the no fault found (nff) phenomenon / P. Soderholm // Reliability engineering and system safety. – 2007. – Vol. 92, N 1. – P. 1 – 14.
4. Murray A. No fault found: a platform integrators view of the problem / A. Murray // The 1st annual symposium in no fault found, (18 March 2013, Cranfield, UK). – Cranfield: Cranfield university press, 2013. – P. 1 – 8.
5. An investigation of “cannot duplicate” failures / R. Williams, J. Banner, I. Knowles [et al.] // Quality and reliability engineering international. – 1998. – Vol. 14, N 5. – P. 331 – 337.
6. No fault found events in maintenance engineering Part 1: Current trends, implications and organizational practices / S. Khan, P. Phillips, I. Jennions [et al.] // Reliability engineering and system safety. – 2014. – Vol. 123. – P. 183 – 195.
7. Beniaminy I. Reducing the «no fault found» problem: contributions from expert-system methods / I. Beniaminy, D. Joseph // IEEE aerospace conference, (9 – 16 March, 2002, Big Sky, Montana, USA). – Montana, 2002. – Vol. 6. – P. 2971 – 2973.
8. Life cycle cost impact of using prognostic health management (PHM) for helicopter avionics / P. Sandborn, K.L. Feldman, S. Ghelam [et al.] // Microelectronics reliability. – 2007. – Vol. 47, N 12. – P. 1857 – 1864.
9. Curry E.E. FALCON-H: Functional avionics life cycle model for hardware / E.E. Curry // IEEE national aerospace and electronics conference (NAECON 1993), (24 – 28 May, 1993, Dayton, OH, USA). – Dayton, 1993. – Vol. 2. – P. 950 – 953.
10. Dhillon B.S. Life cycle costing for engineers: monograph / Dhillon B.S. – London: CRC Press, 2010. – 204 p.
11. Hölzel N.B. An aircraft lifecycle approach for the cost-benefit analysis of prognostics and condition-based maintenance based on discrete-event simulation / N.B. Hölzel, T. Schilling, V. Gollnick // IEEE annual conference of the prognostics and health management society, (29 September – 2 October 2014, Fort Worth, Texas, USA). – Texas, USA, 2014. – P. 1 – 16.
12. Ulansky V.V. Optimization of post warranty maintenance of avionics systems / V.V. Ulansky, I.A. Machalin // International conference on aeronautical science and air transportation (ICASAT 2007), (23 – 25 April, 2007, Tripoli). – Tripoli, Libya, 2007. – P. 619 – 628.
13. Уланский В.В. Обобщенные функции стоимости обслуживания до безопасного отказа легкозаменяемых блоков систем авионики / В.В. Уланский, И.А. Мачалин // Електроніка та системи управління. – 2008. – № 1 (15). – С. 73 – 84.
14. Nakagava T. Maintenance theory of reliability: monograph / Nakagava T. – London: Springer, 2005. – 269 p.
15. Nakagava T. Advanced reliability models and maintenance policies: monograph / Nakagava T. – London: Springer, 2008. – 234 p.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2017