

В.В. УЛАНСКИЙ, И.А. МАЧАЛИН

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ АВИОНИКИ С КОМБИНИРОВАННЫМИ СТРУКТУРАМИ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Abstract: *In this paper a mathematical model for assessing the exploitation efficiency indexes of complex repairable avionics systems with combined redundancy structures is considered. The structural functions of different types of redundancy of avionics systems are developed. Mathematical expressions of exploitation efficiency indexes are derived with taking into account the characteristics of faultlessness, maintainability, checking trustworthiness, and spare part system sufficiency.*

Key words: *avionics systems, reliability, redundancy, structural function, exploitation efficiency indexes, imperfect checking, trustworthiness of checking.*

Аноація: *У статті розглядається математична модель для оцінки показників ефективності експлуатації складних відновлюваних систем авіоники з комбінованими структурами резервування. Розроблені структурні функції різних типів резервування систем авіоники. Виведені математичні вирази показників ефективності експлуатації з урахуванням характеристик безвідмовності, ремонтпригодності, достовірності контролю і достатності системи запасів.*

Ключові слова: *системи авіоники, надійність, резервування, структурна функція, показники ефективності експлуатації, контроль працездатності з помилками, достовірність контролю працездатності.*

Аноаация: *В статье рассматривается математическая модель для оценки показателей эффективности эксплуатации сложных восстанавливаемых систем авионики с комбинированными структурами резервирования. Разработаны структурные функции различных типов резервирования систем авионики. Выведены математические выражения показателей эффективности эксплуатации с учетом характеристик безотказности, ремонтпригодности, достоверности контроля и достаточности системы запасов.*

Ключевые слова: *системы авионики, надежность, резервирование, структурная функция, показатели эффективности эксплуатации, контроль работоспособности с ошибками, достоверность контроля работоспособности.*

1. Введение

Постановка проблемы. Обеспечение высокого уровня безопасности полетов воздушных судов (ВС) достигается путем резервирования бортовых систем авионики. Существуют различные структуры построения резервированных систем с точки зрения надежности. От типа такой структуры существенно зависят основные показатели эффективности эксплуатации ВС. Поэтому важнейшей проблемой в процессе проектирования ВС, а также в ходе разработки программ технического обслуживания и ремонта (ТОиР) является обоснование выбора этих показателей и их оценка для различных структур резервирования систем бортовой авионики. Правильный выбор структур резервирования позволит в дальнейшем существенно снизить затраты на эксплуатацию ВС.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам оценки безотказности резервированных систем авионики посвящено много работ отечественных и зарубежных авторов, например [1–6]. Однако в них недостаточно внимания уделено анализу надежности восстанавливаемых систем со сложной структурой резервирования. Как известно [7], современные пилотажно-навигационные комплексы, удовлетворяющие требованиям спецификации ARINC-700, включают системы со сложными структурами резервирования. Кроме того, известные показатели учитывают только характеристики безотказности систем и кратность резервирования. Как показывает анализ особенностей эксплуатации систем авионики, показатели эффективности должны, наряду с характеристиками безотказности, учитывать также характеристики достоверности эксплуатационного контроля работоспособности, ремонтпригодности,

достаточности системы обеспечения запасов и устанавливать аналитическую взаимосвязь с параметрами технологического процесса ТОиР.

Постановка задачи. Под комбинированным резервированием будем понимать такую структуру резервирования с точки зрения надежности, при которой резервируемые блоки могут включаться последовательно-параллельно, параллельно-последовательно либо по мажоритарному принципу “ h из m ”.

Для восстанавливаемых систем авионики, не влияющих на безопасность полетов, в качестве показателя технической эффективности эксплуатации будем использовать такой комплексный показатель надежности, как коэффициент готовности (КГ) [8]. Для восстанавливаемых систем авионики, влияющих на безопасность полетов, в качестве показателя технической эффективности эксплуатации будем использовать эксплуатационную вероятность безотказной работы (ЭВБР). Под ЭВБР будем понимать вероятность безотказной работы системы на интервале наработки (t_k, t) с учетом того, что в моменты t_1, \dots, t_k проводилось техническое обслуживание, включающее контроль и восстановление забракованных блоков системы.

Предположим, что резервированная система состоит из m легкозаменяемых блоков (Line Replaceable Units – LRUs). Процесс эксплуатации представим как последовательность смены различных состояний (интервалов), в которых может находиться i -й LRU. Будем полагать, что этот процесс 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, начавшегося в момент $t = 0$. Точками регенерации являются моменты окончания восстановлений (“правильных” и “ложных”) LRU. В работах [9, 10] авторами были определены значения средних продолжительностей пребывания LRU в состояниях, существенно влияющих на эффективность эксплуатации систем авионики. В работе [9] разработаны математические выражения комплексных показателей эффективности эксплуатации восстанавливаемых многоблочных систем с последовательной и параллельной структурой. Эти результаты позволяют определять показатели эффективности и для комбинированных структур резервирования.

Таким образом, целью статьи является определение взаимосвязи между характеристиками безотказности, ремонтпригодности, достоверности эксплуатационного контроля и достаточности системы обеспечения запасов для различных комбинированных структур резервирования и разработка аналитических выражений для расчета показателей эффективности эксплуатации.

2. Структура резервирования “ h из m ”

Система, имеющая структуру “ h из m ”, работоспособна, если работоспособны по крайней мере h из m LRUs, входящих в систему. При $h > \frac{m}{2}$ структура “ h из m ” относится к классу мажоритарных структур и реализует логику большинства. По сравнению с другими способами резервирования мажоритарные структуры являются наиболее защищенными от случайных сбоев в каналах

передачи дискретной информации. Поэтому логика “ h из m ” используется в резервированных аналого-цифровых системах с целью повышения достоверности информации о параметрах положения и движения самолета, получаемой от систем датчиков информации.

Функционирование структуры “ h из m ” возможно только при наличии мажоритарного органа, в котором осуществляется сравнение входной информации от систем датчиков. Функции мажоритарного органа в бортовом комплексе пилотажно-навигационного оборудования выполняет вычислительная система управления полетом (ВСУП). С точки зрения надежности мажоритарный орган последовательно соединен со структурой “ h из m ”, поэтому его отказ приводит к отказу всей системы. Поскольку последовательно-параллельная структура будет рассмотрена ниже, здесь принимается допущение, что мажоритарный орган является безотказным. Структурная функция системы “ h из m ” имеет вид [1, 4]

$$\varphi[\vec{I}(t)] = \begin{cases} 1, \text{ если } \sum_{i=1}^m I_i(t) \geq h; \\ 0, \text{ если } \sum_{i=1}^m I_i(t) < h. \end{cases} \quad (1)$$

Подмножество работоспособных состояний структуры “ h из m ” состоит из векторов $\vec{I}(t)$, имеющих не менее h единичных элементов. Если структура типа “ h из m ” состоит из однотипных LRUs, то с учетом выражения (1) КГ определяется по формуле

$$K_G = \sum_{i=h}^m c_m^i (MS_1/MS_0)^i (1 - MS_1/MS_0)^{m-i},$$

где $c_m^i = \frac{m!}{i!(m-i)!}$ – число сочетаний; MS_1, MS_2 и MS_5 – математические ожидания

нахождения LRU в состояниях E_1, E_2 и E_5 соответственно. Здесь E_1 соответствует состоянию, при котором i -й LRU в момент t использовался по назначению и находился в работоспособном состоянии; E_2 соответствует состоянию, при котором i -й LRU в момент t использовался по назначению и находился в неработоспособном состоянии и E_5 - состоянию, при котором в момент t забракованный i -й LRU внепланово простаивал на борту ВС в базовом аэропорту из-за неудовлетворения заявки на запасной LRU из обменного фонда.

Математические ожидания нахождения LRU в состояниях E_1, E_2 и E_5 при экспоненциальном законе наработки до отказа определяются из выражений [9, 10]

$$MS_1 = \frac{1 - e^{-\lambda t_n}}{\lambda(1 - (1 - \alpha) \cdot e^{-\lambda t_n})}; \quad (2)$$

$$MS_2 = \frac{1}{1 - (1 - \alpha) \cdot e^{-\lambda t_n}} \left[\frac{t_n(1 - \beta \cdot e^{-\lambda t_n})}{1 - \beta} - \frac{1 - e^{-\lambda t_n}}{\lambda} \right]; \quad (3)$$

$$MS_5 = \sigma(\Delta t_{зип} + t_{кр} + t_{\partial} + t_M - t_c); \quad (4)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0 & \text{при } t_c \geq (\Delta t_{зип} + t_{кр} + t_{\partial} + t_M) \\ 1 & \text{при } t_c < (\Delta t_{зип} + t_{кр} + t_{\partial} + t_M) \end{cases}$$

где $\Delta t_{зип}$ – среднее время задержки в удовлетворении требования на запасной LRU в базовом аэропорту [9]; t_c – средняя продолжительность стоянки ВС в базовом аэропорту (БА) при выполнении типового маршрута; $t_{кр}$ – средняя продолжительность контроля работоспособности LRU на борту ВС во время технического обслуживания; t_{∂} и t_M – средние продолжительности демонтажа и монтажа LRU на борту ВС; t_n – среднее время полета ВС; λ – интенсивность внезапных отказов i -го LRU; α и β – условные вероятности "ложного отказа" и "необнаруженного отказа" при контроле работоспособности i -го LRU с помощью встроенной системы контроля (ВСК) на стоянке в БА. Эксплуатационная вероятность безотказной работы определяется как математическое ожидание структурной функции (1):

$$P_{\mathcal{E}}^*(t_n) = \sum_{i=h}^m c_m^i [P_{\mathcal{E},0}^*(t_n)]^i [1 - P_{\mathcal{E},0}^*(t_n)]^{m-i}, \quad (5)$$

где $P_{\mathcal{E},0}^*(t_n)$ – установившееся значение ЭВБР любого из m LRU при внезапных отказах на интервале (kt_n, t) , которое определяется по формуле

$$P_{\mathcal{E},0}^*(t_n) = \lim_{k \rightarrow \infty} P_{\mathcal{E},0}[kt_n, (k+1)t_n] = (1 - \beta) \cdot e^{-\lambda t_n} / (1 - \beta \cdot e^{-\lambda t_n}), \quad (6)$$

где t_n – среднее время полета ВС; λ – интенсивность внезапных отказов i -го ($i = \overline{1, m}$) LRU; β – условная вероятность "необнаруженного отказа" при контроле работоспособности i -го LRU с помощью ВСК на стоянке ВС в БА.

Пример 1. Определим ЭВБР аппаратуры посадки ИЛС. На ВС, авионика которых удовлетворяет требованиям ARINC-700, устанавливается три комплекта этой аппаратуры, поскольку ее отказ влияет на безопасность полетов. Таким образом, аппаратура ИЛС включает в себя три блока радиоприемных (БРП) и антенно-фидерное устройство (АФУ), которое далее не рассматривается. Обобщенная структурная схема аппаратуры ИЛС в режиме автоматического захода на посадку показана на рис. 1.

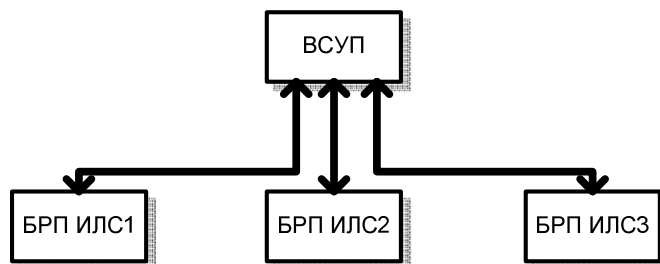


Рис. 1. Обобщенная структурная схема аппаратуры ИЛС в режиме захода на посадку
Информация об отклонениях самолета от равносигнальных зон курса и глиссады поступает

одновременно и независимо от трех БРП ИЛС в ВСУП, которая осуществляет контроль входной информации с логикой обработки "2 из 3". При отказе одного из БРП ИЛС система посадки продолжает надежно функционировать. С точки зрения надежности аппаратура посадки ИЛС относится к классу мажоритарных структур типа "2 из 3". Структурная схема надежности аппаратуры ИЛС показана на рис. 2.

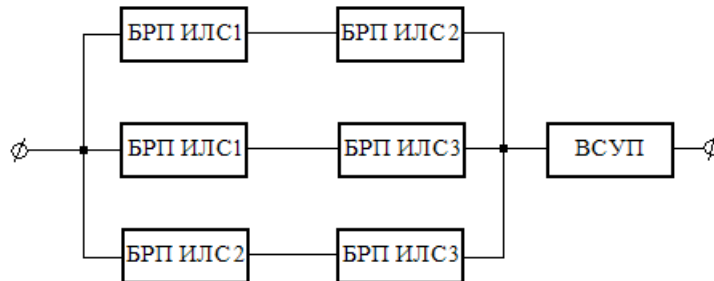


Рис. 2. Структурная схема надежности аппаратуры посадки ИЛС

Как отмечалось выше, функционирование системы ИЛС влияет на безопасность полетов. Экономическая оценка последствий отказа невозможна. Вычислим установившееся значение ЭВБР системы ИЛС при $m = 3$; $h = 2$; $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-4} / \text{ч}$; $t_n = 4\text{ч}$; $\beta = 0,001$. Порядок расчета заключается в следующем:

– определяем установившееся значение ЭВБР одного БРП ИЛС по формуле (6)

$$P_{\text{Э},0}^*(t_n) = 0,999;$$

– определяем установившееся значение ЭВБР троированного БРП ИЛС по формуле (5), которая при $m = 3$ и $h = 2$ преобразуется к виду

$$P_{\text{Э}}^*(t_n) = [P_{\text{Э},0}^*(t_n)]^3 + 3[P_{\text{Э},0}^*(t_n)]^2 [1 - P_{\text{Э},0}^*(t_n)] = 0,99999.$$

Как видно из полученных результатов, мажоритарное резервирование позволяет значительно повысить ЭВБР.

3. Последовательно-параллельная структура

Пусть система состоит из Δ последовательно соединенных с точки зрения надежности подсистем. Причем подсистема с номером $\delta (\delta = \overline{1, \Delta})$ представляет собой параллельную структуру с m_δ LRU. Отказ системы наступает при отказе хотя бы одной из подсистем. Предположим, что δ -я подсистема состоит из однотипных LRU. Структурная функция последовательно-параллельной структуры резервирования имеет вид

$$\varphi[\tilde{I}(t)] = \prod_{\delta=1}^{\Delta} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^{m_\delta} [1 - I_{\delta,i}(t)] \right\}, \quad (7)$$

где $I_{\delta,i}(t)$ – случайный индикаторный процесс для i -го LRU δ -й подсистемы.

Показатели эффективности системы ТОиР последовательно-параллельной системы определяются на основании структурной функции (7). При этом установившееся значение ЭВБР

$$P_{\mathcal{E}}^*(t_n) = \prod_{\delta=1}^{\Delta} \left\{ 1 - [1 - P_{\mathcal{E},\delta}^*(t_n)]^{m\delta} \right\},$$

где $P_{\mathcal{E},\delta}^*(t_n)$ – установившееся значение ЭВБР для любого из LRU δ -й подсистемы.

Коэффициент готовности

$$K_G = \prod_{\delta=1}^{\Delta} \left[1 - (1 - MS_{1,\delta} / MS_{0,\delta})^{m\delta} \right], \quad (8)$$

где $MS_{0,\delta}$ – средний цикл регенерации любого из LRU δ -й подсистемы; $MS_{1,\delta}$ – среднее время нахождения любого из LRU δ -й подсистемы в состоянии E_1 за средний цикл регенерации.

Пример 2. Определим КГ радиотехнической системы ближней навигации (РСБН) и автоматического радиокompаса (АРК). Аппаратура РСБН включает в себя два приемо-передающих устройства (ППУ), а аппаратура АРК – два приемных устройства (ПУ). Структурная схема надежности последовательного соединения дублированных ППУ и ПУ показана на рис. 3.

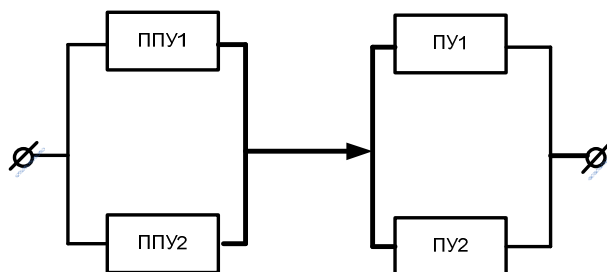


Рис. 3. Структурная схема надежности LRU систем РСБН и АРК

Исходные данные следующие: $m_i = 2$ ($i = 1, 2$); $\alpha_i = \beta_i = 0,001$; $t_{кр,i} = t_{м,i} = t_{д,i} = 0,25ч$; $\Delta t_{эип,i} = 2ч$; $t_n = 4ч$; $t_c = 0,75ч$; $\lambda_1 = 2,4 \cdot 10^{-4} ч^{-1}$; $\lambda_2 = 1,59 \cdot 10^{-4} ч^{-1}$. Результаты расчётов по формулам (2) – (4) приведены в табл.1. Используя табл.1 и воспользовавшись формулой (8), находим $K_G = 0,999998$. Как видно из табл. 1, вследствие “ложных отказов”, средняя продолжительность нахождения LRU в работоспособном состоянии, $MS_{1,j}$, более чем в два раза меньше среднего времени безотказной работы LRU – $1/\lambda_j$.

Таблица 1. Средние продолжительности нахождения LRU системы в различных состояниях

Тип LRU	Среднее время безотказной работы LRU, час	Средняя продолжительность нахождения LRU в различных состояниях эксплуатации, час			
		$MS_{1,j}$	$MS_{2,j}$	$MS_{5,j}$	$MS_{0,j}$
j	$1/\lambda_j$				
$j=1$ ППУ	4167	2042	≈ 0	2	2044
$j=2$ ПУ	6289	2462	≈ 0	2	20464

Этот факт подтверждается статистическими данными, приведенными в работе [11].

4. Параллельно-последовательная структура

Пусть в каждой последовательной цепи имеется m LRU, а таких цепей всего Γ . Отказ системы наступает при отказе всех идентичных цепей. Структурная функция такой системы имеет вид

$$\phi[\vec{I}(t)] = 1 - \prod_{\gamma=1}^{\Gamma} \left[1 - \prod_{j=1}^m I_{\gamma,j}(t) \right],$$

где $I_{\gamma,j}(t)$ – случайный индикаторный процесс для j -го LRU γ -й цепи.

Установившееся значение ЭВБР параллельно-последовательной системы:

$$P_{\mathcal{O}}^*(t_n) = 1 - \left[1 - \prod_{j=1}^m P_{\mathcal{O},j}^*(t_n) \right]^{\Gamma},$$

где $P_{\mathcal{O},j}^*(t_n)$ – установившееся значение ЭВБР для j -го LRU любой последовательной цепи.

Коэффициент готовности

$$K_G = 1 - \left(1 - \prod_{j=1}^m MS_{1,j} / MS_{0,j} \right)^{\Gamma}, \quad (9)$$

где $MS_{0,j}$ – средний цикл регенерации j -го LRU любой последовательной цепи; $MS_{1,j}$ – среднее время нахождения j -го LRU любой последовательной цепи в состоянии E_1 за средний цикл регенерации.

Пример 3. Вычислим КГ резервированной системы РСБН, которая состоит из двух ППУ и двух АФУ при $\lambda_2 = 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$ и остальных исходных данных, таких же, как и в примере 2. Структурная схема надежности дублированной РСБН показана на рис. 4. Воспользовавшись формулой (9), находим $K_G = 0,999997$.

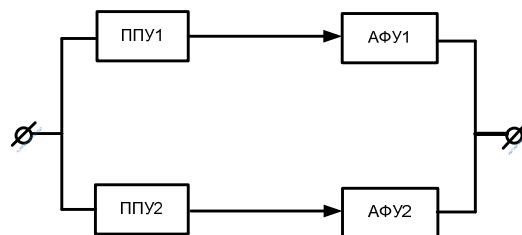


Рис. 4. Структурная схема надежности дублированной РСБН

5. Выводы

В статье разработаны аналитические выражения для расчета показателей эффективности эксплуатации систем авионики для комбинированных структур резервирования. Эти показатели учитывают основные особенности процесса эксплуатации, показатели безотказности, ремонтпригодности, достоверности эксплуатационного контроля и достаточности системы обеспечения запасов, а также структуру резервирования системы с точки зрения надежности. Получены выражения для коэффициента готовности и эксплуатационной вероятности безотказной работы для мажоритарной структуры резервирования типа “ h из m ”, последовательно-

параллельной и параллельно-последовательной структур резервирования. Приведены примеры расчета показателей. Показано, что применение комбинированных структур резервирования существенно повышает надежность функционирования систем авионики. Полученные результаты позволяют на этапе проектирования произвести выбор оптимальных структур резервирования систем авионики, а на этапе эксплуатации – оценить эффективность принятых решений с целью возможной коррекции для повышения безопасности и регулярности полетов воздушных судов. Дальнейшим развитием данных результатов являются обобщенная оценка надежности всего комплекса пилотажно-навигационного оборудования ВС и оптимизация управления запасами изделий в базовых аэропортах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barlow R., Proschan F. Mathematical theory of reliability. – 2nd edition. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996. – 258 p.
2. Давыдов П.С., Иванов П.А. Эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования: Справочник. – М.: Транспорт, 1990. – 240 с.
3. Wang H., Pham H. Reliability and optimal maintenance. – New York: Springer, 2006. – 360 p.
4. Rausand M., Hoyland A. System reliability theory: models, statistical methods and applications. – 2nd edition. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2004. – 458 p.
5. Lewis E.E. Introduction to reliability engineering. – 2nd edition. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996. – 271 p.
6. Blischke W. R., Murthy Prabhaker D.N. Reliability: modeling, prediction and optimization. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000. – 812 p.
7. ARINC Report 700. Test Equipment Guidance. – 1985. – 124 p.
8. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Киев: Держстандарт України. – 1995. – 111 с.
9. Уланский В.В., Мачалин И.А. Показатели эффективности эксплуатации восстанавливаемых систем авионики // Математичні машини і системи. – 2006. – № 4. – С. 155 – 163.
10. Ulansky V., Machalin I. Modern avionics breakdown maintenance strategy and total lifetime operating costs // Матеріали VI МНТК “Авіа-2004”. – Київ. – 2004. – Т. 2. – С. 27–30.
11. Qin J., Huang B., Walter J., Bernstein B. Reliability analysis in the commercial aerospace industry // The Journal of the Reliability Analysis Center. – Department of Defense of the USA. – 2005. – P. 1 – 5.