

ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ АВИАЦИОННЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Abstract: *The basic parameters of an estimation of efficiency of exploitation of aviation radio-electronic systems are considered. Structural functions are developed for consecutive and parallel reservation. Mathematical expressions for calculation of complex parameters of reliability and expenses with taking into account the type of reservation are resulted.*

Key words: *aviation systems, reservation, structural function, parameters of efficiency.*

Анотація: *Розглянуті основні показники оцінки ефективності експлуатації авіаційних радіоелектронних систем. Розроблені структурні функції для послідовного та паралельного резервування. Наведені математичні вирази для розрахунку комплексних показників надійності та витрат з урахуванням типу резервування.*

Ключові слова: *авіаційні системи, резервування, структурна функція, показники ефективності.*

Аннотация: *Рассмотрены основные показатели оценки эффективности эксплуатации авиационных радиоэлектронных систем. Разработаны структурные функции для последовательного и параллельного резервирования. Приведены математические выражения для расчета комплексных показателей надежности и затрат с учетом типа резервирования.*

Ключевые слова: *авиационные системы, резервирование, структурная функция, показатели эффективности.*

1. Введение

Постановка проблемы. В процессе формирования программ технического обслуживания и ремонта (ТОиР) воздушных судов (ВС) гражданской авиации важнейшей проблемой является выбор оптимальной стратегии эксплуатации авиационных радиоэлектронных систем (АРЭС). Для ее решения необходимо разработать показатели эффективности эксплуатации АРЭС, которые в полной мере должны отражать особенности процесса ТОиР и позволять производить оценку как надежностных, так и стоимостных характеристик. Высокий уровень безопасности полетов достигается путем резервирования большинства систем на борту ВС. При этом тип и кратность резервирования оказывают существенное влияние на организацию системы ТОиР. Поэтому разработка комплексных показателей эффективности АРЭС с учетом перечисленных особенностей эксплуатации является важным направлением в процессе обоснования программ ТОиР ВС нового поколения.

Анализ литературных источников. Вопросам оценки эффективности эксплуатации резервированных систем посвящено достаточно много работ [1–3]. Однако разработанные в них показатели позволяют учитывать только кратность резервирования и тип резервирования с точки зрения надежности. Как показывает анализ особенностей эксплуатации АРЭС, показатели, наряду с этими характеристиками, должны учитывать достоверность контроля и особенности технологического процесса ТОиР. Кроме того, полученные выражения должны быть чувствительны к такой важнейшей характеристике процесса эксплуатации, как объем запасных систем в обменном фонде базового аэропорта либо центра ТОиР.

Постановка задачи. Различные показатели эффективности ТОиР необходимо использовать в зависимости от типа систем и их влияния на безопасность и регулярность полетов. В случае, когда последствия отказа можно оценить экономически, в качестве показателей эффективности эксплуатации необходимо использовать экономические показатели в виде

усредненных средних затрат (УСЗ) или усредненных средних издержек (УСИ), приходящихся на единицу времени использования системы. Экономическая оценка последствий отказа возможна только для систем, не влияющих на безопасность полетов. Если материальный ущерб от отказа системы по каким-то причинам не удастся оценить количественно, то в качестве показателей эффективности эксплуатации следует использовать комплексные показатели надежности, а именно коэффициент готовности (КГ) [4].

В качестве показателя безотказности для восстанавливаемых систем (какими в основном являются АРЭС) 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 обслуживание, включающее контроль и восстановление забракованных систем.

Радиоэлектронные системы, входящие в состав комплекса пилотажно-навигационного оборудования, могут иметь следующие виды структур с точки зрения надежности: последовательную; параллельную; последовательно-параллельную и параллельно-последовательную. При этом, как правило, применяется постоянное резервирование, при котором все легкоъемные блоки (ЛСБ) находятся в рабочем режиме и выполняют одни и те же функции. Контроль состояния блоков в полете осуществляет встроенная система контроля (ВСК). Предположим, что резервированная АРЭС состоит из m легкоъемных блоков. Процесс эксплуатации представляется как последовательность смены различных состояний (интервалов) процесса, в которых может находиться i -й ЛСБ. Поэтому поведение ЛСБ на интервале эксплуатации $(0, \infty)$ можно описать случайным процессом $L_i(t), (i = \overline{1, m}), (t \geq 0)$ с конечным пространством состояний $E = \vee E_i$. Процесс $L_i(t)$ изменяется только скачкообразно, причем каждый скачок обусловлен переходом ЛСБ в одно из возможных состояний. При построении математических моделей предполагается, что $L_i(t)$ – регенерирующий случайный процесс, имеющий свойство всегда возвращаться в точку регенерации, начиная с которой дальнейшее развитие процесса не зависит от его поведения в прошлом и является вероятностной копией процесса $L_i(t)$, начавшегося в момент $t = 0$. Точками регенерации являются моменты окончания восстановлений (“правильных” и “ложных”) ЛСБ [1].

Для регенерирующих случайных процессов доля времени, которую проводит ЛСБ в любом из состояний, равна отношению среднего времени, проведенного в этом состоянии за цикл между точками регенерации, к средней длительности этого цикла. Поэтому для определения любого из показателей эффективности требуется знание средних продолжительностей пребывания АРЭС в состояниях, существенно влияющих на эффективность системы ТОиР.

Таким образом, целью настоящей статьи является разработка структурных функций для последовательного и параллельного резервирования и получение математических выражений для определения надежностных и стоимостных показателей эффективности эксплуатации АРЭС.

2. Структурная функция резервированной системы

Каждый из ЛСБ многоблочной АРЭС может находиться в одном из следующих состояний случайного процесса $L_i(t)$ [6]: $E_1^{(i)}$ – если в момент t ЛСБ использовался по назначению и находился в работоспособном состоянии; $E_2^{(i)}$ – если в момент t ЛСБ использовался по назначению и находился в неработоспособном состоянии; $E_3^{(i)}$ – если в момент t ЛСБ не использовался по назначению и проводился контроль его работоспособности с помощью бортовой встроенной системы контроля (ВСК) на стоянке ВС в базовом аэропорту; $L_i(t) = E_4^{(i)}$ – если в момент t ЛСБ не использовался по назначению и проводился его демонтаж или монтаж на борту ВС; $E_5^{(i)}$ – если в момент t забракованный ЛСБ внепланово простаивал на борту ВС в базовом аэропорту из-за неудовлетворения заявки на запасной ЛСБ из обменного фонда; $E_6^{(i)}$ – если в момент t проводилось “ложное восстановление” ЛСБ на заводе-изготовителе или в центре ТОиР; $E_7^{(i)}$ – если в момент t проводилось “правильное” восстановление ЛСБ на заводе-изготовителе или в центре ТОиР.

Бортовые АРЭС используются в прерывистом временном режиме, который обусловлен чередующимися участками полетов ВС и ожидания полетов на стоянке. Нахождение ЛСБ в состояниях $E_3^{(i)}$, $E_4^{(i)}$, $E_6^{(i)}$ и $E_7^{(i)}$ связано со стоимостными затратами и учитываются в средних удельных затратах, поэтому для определения вероятностных показателей необходимо исключить из цикла регенерации интервалы, соответствующие этим состояниям. Введем новую ось времени, которая в идеальном случае (т.е. при отсутствии отказов ЛСБ в полете и “ложных отказов” при контроле ЛСБ на стоянке с помощью ВСК) связана только с использованием ЛСБ по назначению. На новой оси времени i -й ($i = \overline{1, m}$) ЛСБ может находиться в состояниях $E_1^{(i)}$, $E_2^{(i)}$ и $E_5^{(i)}$. При этом средний цикл регенерации MS_0 определяется по формуле [5, 6]

$$MS_0 = MS_1 + MS_2 + MS_5, \quad (1)$$

где MS_1, MS_2 и MS_5 математические ожидания нахождения ЛСБ в состояниях $E_1^{(i)}$, $E_2^{(i)}$ и $E_5^{(i)}$ соответственно.

Для обозначения состояния i -го ЛСБ на новой оси времени введем случайный индикаторный процесс:

$$I_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } L_i(t) = E_1^{(i)} \\ 2, & \text{если } L_i(t) = E_2^{(i)} \vee E_5^{(i)}. \end{cases}$$

Обозначим m – мерный вектор, характеризующий состояние АРЭС в момент времени t , через $\bar{I}(t) = \|\overline{I_1(t), I_m(t)}\|$, а через X – подмножество векторов с двоичными компонентами,

соответствующее состояниям работоспособности АРЭС.

С каждой реализацией вектора $\vec{I}(t)$ можно связать структурную функцию $\Phi[\vec{I}(t)]$, которая принимает значение единицы, если АРЭС работоспособна, и ноль - в противном случае, т.е.

$$\Phi[\vec{I}(t)] = \begin{cases} 1 & \text{если } \vec{I}(t) \in X \\ 0 & \text{если } \vec{I}(t) \notin X \end{cases}.$$

Таким образом, вероятностные показатели эффективности системы ТОиР можно определить как математическое ожидание структурной функции:

$$P\{\Phi[\vec{I}(t)] = 1\} = M\{\Phi[\vec{I}(t)]\}. \quad (2)$$

3. Последовательная структура

В этом случае АРЭС состоит из m последовательно соединенных (с точки зрения надежности) ЛСБ. Предполагается, что определяющие параметры всех ЛСБ статистически взаимно независимы. При этом структурная функция РЭС имеет вид

$$\Phi[\vec{I}(t)] = \prod_{i=1}^m I_i(t). \quad (3)$$

Очевидно, что $X = \{\vec{I}\}$, где $\vec{I}(t) = \|\overline{I_1(t), I_m(t)}\|$.

Рассмотрим порядок определения КГ для последовательной структуры. Воспользовавшись соотношениями (2) и (3), запишем выражение для нестационарного коэффициента готовности:

$$K_{\Gamma}(t) = M \left[\prod_{i=1}^m I_i(t) \right].$$

По теореме умножения математических ожиданий независимых случайных величин имеем

$$M \left[\prod_{i=1}^m I_i(t) \right] = \prod_{i=1}^m M[I_i(t)].$$

Тогда коэффициент готовности будет определяться как предел нестационарного КГ при $t \rightarrow \infty$:

$$K_{\Gamma} = \lim_{t \rightarrow \infty} K_{\Gamma}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \prod_{i=1}^m M[I_i(t)]. \quad (4)$$

Учитывая, что предел произведения функций равен произведению пределов функций, соотношение (4) представим в виде

$$K_{\Gamma} = \prod_{i=1}^m \lim_{t \rightarrow \infty} M[I_i(t)]. \quad (5)$$

В соответствии с выражением (2) величина $M[I_i(t)]$ представляет собой вероятность нахождения i -го ЛСБ в работоспособном состоянии в момент времени t . Поскольку случайный процесс $L_i(t)$ предполагается регенерирующим, то в силу свойства регенерирующих процессов [1] имеем

$$\lim_{t \rightarrow \infty} M[I_i(t)] = MS_{1,i} / MS_{0,i}. \quad (6)$$

Подставив значения предела (6) в формулу (5), получим искомое выражение для расчета коэффициента готовности последовательной структуры

$$K_{\Gamma} = \prod_{i=1}^m MS_{1,i} / MS_{0,i}. \quad (7)$$

Установившееся значение ЭВБР i -го ЛСБ можно определить из выражения

$$P_{\vartheta}^*(t_n) = \prod_{i=1}^m P_{\vartheta,i}^*(t_n), \quad (8)$$

где $P_{\vartheta,i}^*(t_n)$ – установившееся значение ЭВБР при внезапных отказах на интервале (kt_n, t) , которое определяется по формуле

$$P_{\vartheta}^*(t_n) = \lim_{t \rightarrow \infty} P_{\vartheta}[kt_n, (k+1)t_n] = (1 - \beta) \cdot e^{-\lambda t_n} / (1 - \beta \cdot e^{-\lambda t_n}),$$

где t_n – среднее время полета ВС; λ_i – интенсивность внезапных отказов i -го ЛСБ.

Обозначим: P_2 – вероятность того, что m – блочная РЭС не находится в состоянии $E_2^{(i)}$; P_5 – вероятность того, что ни один из m ЛСБ не находится в состоянии $E_5^{(i)}$.

Для последовательной структуры, в силу статистической независимости ЛСБ вероятности P_2 и P_5 , определяем по формулам

$$P_2 = \prod_{i=1}^m (MS_{1,i} + MS_{5,i}) / MS_{0,i}; \quad (9)$$

$$P_5 = \prod_{i=1}^m (MS_{1,i} + MS_{2,i}) / MS_{0,i}. \quad (10)$$

Математические ожидания нахождения ЛСБ в состояниях $E_1^{(i)}$, $E_2^{(i)}$ и $E_5^{(i)}$ при внезапных отказах определяются из выражений [6]

$$MS_1 = \frac{1 - e^{-\lambda t_n}}{\lambda(1 - (1 - \alpha) \cdot e^{-\lambda t_n})}; \quad (11)$$

$$MS_2 = \frac{1}{1 - (1 - \alpha) \cdot e^{-\lambda t_n}} \left[\frac{t_n (1 - \beta \cdot e^{-\lambda t_n})}{1 - \beta} - \frac{1 - e^{-\lambda t_n}}{\lambda} \right]; \quad (12)$$

$$MS_5 = \sigma (\Delta t_{зип} + t_{кр} + t_{\partial} + t_M - t_c); \quad (13)$$

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

где $\Delta t_{зип}$ – среднее время задержки в удовлетворении требования на запасной ЛСБ в базовом аэропорту [5]; t_c – средняя продолжительность стоянки самолета в базовом аэропорту при выполнении типового маршрута; $t_{кр}$ – средняя продолжительность контроля работоспособности ЛСБ на борту ВС во время ТО; t_{∂} и t_M – средние продолжительности демонтажа и монтажа ЛСБ на борту ВС.

Удельные средние издержки и удельные средние затраты m – блочной РЭС имеют вид

$$V_m = C_2(1 - P_2) + C_5(1 - P_5) + \sum_{i=1}^m Z_{1,i};$$

$$Z_m = C_5(1 - P_5) + \sum_{i=1}^m Z_{1,i},$$

где C_2, C_5 – при нахождении ЛСБ в состояниях $E_2^{(i)}$ и $E_5^{(i)}$; $Z_{1,i}$ – удельные средние затраты на контроль с помощью ВСК, монтаж, демонтаж и восстановление i -го ЛСБ, определяемые по формуле

$$Z_{1,i} = \sum_{\substack{j=3 \\ j \neq 5}}^7 C_j MS_j / MS_0.$$

Пример определения показателей эффективности для последовательной структуры.

Определим коэффициент готовности комплекта бортовой аппаратуры радиотехнической системы ближней навигации (РСБН), состоящей из приемопередающего устройства (ППУ) и антенно-фидерного устройства (АФУ). Интенсивность внезапных отказов ППУ $\lambda_1 = 2.4 \cdot 10^{-4} 1/ч$, а АФУ – $\lambda_2 = 1.72 \cdot 10^{-4} 1/ч$.

С точки зрения надежности, ПУ и АФУ соединены последовательно, так как отказ любого из них приводит к отказу одного комплекта РСБН. Примем, что $MS_{5,1} = 0$, $MS_{5,2} = 1ч$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 0,01$, $t_n = 4ч$, $m = 2$. Порядок расчета коэффициента готовности заключается в следующем:

– определяем среднее время нахождения ППУ и АФУ в работоспособном состоянии за средний цикл регенерации по формуле (11)

$$MS_{1,1} = 365,1ч; \quad MS_{1,2} = 374,4ч;$$

– определяем среднее время нахождения ППУ и АФУ в состоянии скрытого отказа за средний цикл регенерации по формуле (12)

$$MS_{2,1} = 0,18ч; MS_{2,2} = 0,13ч;$$

– определяем средний цикл регенерации ППУ и АФУ по формуле (1)

$$MS_{0,1} = 365,3ч; MS_{0,2} = 375,5ч;$$

– определяем КГ одного комплекта аппаратуры РСБН по формуле (7)

$$K_{\Gamma} = \prod_{i=1}^m MS_{1,i} / MS_{0,i} = 0,996.$$

4. Параллельная структура

Система с параллельным с точки зрения надежности включением ЛСБ работоспособна тогда и только тогда, когда работоспособен по крайней мере один из ЛСБ. Структурная функция имеет вид:

$$\Phi[\vec{I}(t)] = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - I_i(t)].$$

Подмножество X состоит из векторов $\vec{I}(t)$, имеющих хотя бы один единичный элемент.

Если параллельная структура состоит из m однотипных ЛСБ, то имеют место соотношения:

$$K_{\Gamma} = 1 - (1 - MS_1 / MS_0)^m; \quad (14)$$

$$P_{\vartheta}^*(t_n) = 1 - [1 - P_{\vartheta,0}^*(t_n)]^m; \quad (15)$$

$$V_m = C_2(1 - P_2) + C_5(1 - P_5) + mZ_1; \quad (16)$$

$$Z_m = C_5(1 - P_5) + mZ_1, \quad (17)$$

где $P_{\vartheta,0}^*(t_n)$ – установившееся значение ЭВБР любого из m ЛСБ.

Вероятности P_2 и P_5 , входящие в выражения (16) и (17), определяются по формулам:

$$P_2 = 1 - (MS_2 / MS_0)^m; \quad (18)$$

$$P_5 = [(MS_1 + MS_2) / MS_0]^m. \quad (19)$$

Пример определения показателей эффективности для параллельной структуры.

Определим показатели эффективности автоматического радиокompаса (АРК). В состав пилотажно-навигационного комплекса входят два радиоприемного блока (РПУ) аппаратуры АРК. С точки зрения надежности, РПУ соединены параллельно.

Выберем показатели эффективности системы ТОиР для АРК. Функционирование АРК не влияет на безопасность полетов, поскольку при его отказе необходимая навигационная

информация также может быть получена от других систем. Последствия отказа связаны с простоем ВС при использовании системы по назначению и с возможным простоем ВС в базовом аэропорту из-за неудовлетворения заявки на запасное РПУ. Экономическая оценка простоя из-за отказа системы в полете неизвестна. Следовательно, показателями эффективности являются КГ и удельные средние затраты.

Вычислим значения КГ и УСЗ при следующих исходных данных: $m = 2$; $\lambda_1 = 1.59 \cdot 10^{-4} 1/ч$; $t_m = t_d = 0,25ч$; $t_{кр} = 0,2ч$; $t_n = 4ч$; $t_c = 1ч$; $C_2 = 200 у.е.$; $C_3 = C_4 = 2,5 у.е.$; $C_6 = C_7 = 0$. Примем допущение о том, что ВС не простаивает из-за отсутствия запасных блоков в обменном фонде базового аэропорта, т.е. $MS_5 = 0$. Результаты расчетов приведены в табл.1 при трех значениях α - условной вероятности "ложного отказа" ВСК.

Таблица 1. Результаты расчета показателей эффективности

Показатель эффективности	$\alpha = 0$	$\alpha = 0,005$	$\alpha = 0,01$
$KГ$	0,99999	0,99999	0,99999
$Z_m, у.е./ч$	$1,21 \cdot 10^{-2}$	$1,71 \cdot 10^{-2}$	$2,23 \cdot 10^{-2}$

Из табл.1 видно, что увеличение вероятности α приводит к значительному росту УСЗ. Это связано с тем, что увеличиваются затраты на "ложное восстановление" АРК, а также на демонтаж и монтаж системы на борту ВС. При этом коэффициент готовности не будет зависеть от показателей достоверности ВСК, поскольку принято допущение о неисчерпаемости обменного фонда запасных изделий, т.е. $MS_5 = 0$. Следовательно, объем обменного фонда будет существенно влиять на вероятностные показатели эффективности эксплуатации.

5. Выводы

В статье разработаны аналитические выражения для расчета вероятностных и стоимостных показателей эффективности эксплуатации АРЭС. Эти показатели учитывают основные особенности процесса эксплуатации, показатели достоверности систем контроля, а также структуру резервирования систем с точки зрения надежности. Предложены структурные функции последовательной и параллельной структуры резервирования, на основании которых получены выражения для коэффициентов готовности и эксплуатационной вероятности безотказной работы каждой структуры. Доказано, что вероятностные показатели эффективности можно определить как математическое ожидание соответствующей структурной функции. Приведены примеры расчета показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984. – 329 с.
2. Давыдов П.С., Иванов П.А. Эксплуатация авиационного радиоэлектронного оборудования: Справочник. – М.: Транспорт, 1990. – 240 с.
3. Смирнов Н.Н. Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов: Учеб. пособие. – М.: МГТУ ГА, 2001. – 100 с.

4. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 111 с.
5. Мачалин И.А. Математические модели стратегий технического обслуживания современной авионики // Математичні машини і системи. – 2005. – № 2. – С.130–138.
6. Ulanskyi V., Machalin I. Modern avionics breakdown maintenance strategy and total lifetime operating costs // Материали VI МНТК “Авіа-2004”. – Київ. – 2004. – Т. 2. – С. 27–30.