УДК 629.735.05:621. 3(045)

**И.А. МАЧАЛИН**

***Национальный авиационный университет, Украина***

# ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ КРИТИЧЕСКИХ ОТКАЗОВ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ АВИОНИКИ

Рассмотрен методический подход к обоснованию и формированию перечня допустимых неисправностей (MMEL) резервированных систем авионики воздушных судов. Разработаны аналитические выражения для оценки вероятностей критических отказов резервированных систем. Полученные выражения позволяют учитывать возникновение статистически зависимых множественных отказов, которые существенно влияют на точность оценки вероятностных характеристик

**системы авионики, перечень допустимых неисправностей, дерево неисправностей, критические отказы, множественные отказы**

## Введение

**Постановка проблемы.** Летная годность воздушных судов (ВС) в эксплуатации может быть обеспечена только на основе эффективной программы технического обслуживания и ремонта (ТОиР), которая предупреждает катастрофические последствия отказов и при этом не приводит к излишним эксплуатационным затратам.

На ВС нового поколения устанавливаются сложные пилотажно-навигационные комплексы, состоящие из большого числа легкозаменяемых блоков (Line Replacement Units-LRUs). Причем, практически все системы являются резервированными, чем обеспечивается необходимый уровень безопасности полетов. Явные отказы резервированных систем обычно не влияют на безопасность полета, поэтому и могут рассматриваться аналогично скрытым отказам, т.е должны быть установлены работы по их выявлению и устранению, а периодичность этих работ может быть оптимизирована. Эти работы имеют ту же физическую природу, что и работы, включенные в программу ТОиР. Поэтому все современные разработчики ВС в целях минимизации эксплуатационных затрат и повышения регулярности полетов ведут работы по формированию для каждого типа ВС отдельного документа Master Minimum Equipment List (MMEL) – утвержденного минимального перечня оборудования и компонентов ВС, которые могут быть неработоспособны при выполнении полета в определенных условиях. В отечественной практике этот документ также называют перечнем допустимых неисправностей, который обычно является составной частью руководства по летной эксплуатации ВС.

Если LRU входит в MMEL, то разрешается вылет ВС из транзитного аэропорта с отказавшей системой. В противном случае вылет ВС возможен только после устранения неисправности или замены отказавшего компонента, что в транзитном аэропорту приводит к большим экономическим затратам. Очевидно, что от правильного формирования MMEL в значительной мере зависит безопасность полетов и эффективность эксплуатации ВС. Поэтому настоящая статья посвящена важнейшей проблеме – методическому обеспечению формирования MMEL

**Анализ последних публикаций.** Вопросам анализа различных видов неисправностей систем авионики посвящено ряд работ отечественных и зарубежных авторов. В работах [1 – 6] рассматривается подход к классификации всех типов отказов на яв-

ные и неявные, предлагается подход к эмпирической оценке их влияния на безопасность полетов. В работе [6] рассматриваются некоторые вопросы методологического обеспечения формирования MMEL. Однако известные результаты получены при предположениях о статистической независимости отказов, не учитывают показатели достоверности средств контроля и периодичность технического обслуживания.

**Цели статьи.** Процесс формирования MMEL является довольно сложным и трудоемким. Его можно разделить на следующие основные этапы:

– классификация видов отказов рассматриваемых систем;

– классификация ситуаций, к которым приводит возникновение тех или иных отказов;

– построение дерева неисправностей для каждой из систем;

– оценка вероятностных характеристик дерева неисправностей;

– принятие решений по полученным результатам.

Одними из сложнейших этапов являются процесс построения дерева неисправностей для каждой из систем и оценка вероятностей возникновения критических отказов. Предположение о статистической независимости различных отказов в одной системе позволяет упростить процесс расчетов, однако не позволяет получить достаточно объективную оценку результатов, тем более, что возникновение критических отказов может повлиять на безопасность полетов ВС. Кроме того, встроенные системы контроля (ВСК) имеют определенную инструментальную погрешность, что также влияет на соответствующие вероятностные характеристики.

Таким образом, целью настоящей статьи является разработка аналитических выражений для оценки вероятностей возникновения критических отказов с учетом показателей достоверности контроля, периодичности технического обслуживания и условий статистической зависимости множественных отказов.

## 1. Принцип построения дерева неисправностей

Построение дерева неисправностей позволяет выявить всю совокупность отказов устройств и систем, приводящих к невыполнению той или иной ответственной функции бортовых систем авионики.

Процедура построения дерева неисправностей включает следующие этапы:

1. Определение нежелательного (завершающего) события в рассматриваемых системах.

2. Тщательное изучение возможного поведения и предполагаемого режима работы систем и их компонентов.

3. Определение функциональных свойств событий более высокого уровня для выявления причин тех или иных неисправностей систем.

4. Построение дерева неисправностей для логически связанных событий на входе.

Основные логические схемы дерева неисправностей следующие.

– схема “И” (схема совпадения): выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно;

– схема “ИЛИ” (схема объединения): выходное событие происходит, если случается любое из входных событий;

– схема ПРИОРИТЕТНОЕ “И”: эквивалентна логической схеме "И" с дополнительным требованием того, чтобы события на входе происходили в определенном порядке. Событие на выходе появляется, если события на входе происходят в определенной последовательности (слева направо). Появление события на входе в другом порядке не вызывает события на выходе;

– схема ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ “ИЛИ”: выходное событие происходит, если случается одно (но не оба) из входных событий;

–схема “$h$ из $m$” (голосования или выборки): выходное событие происходит, если случается “$h$ из $m$” входных событий;

– схема “ЗАПРЕТА”: наличие входа вызывает появление выхода тогда, когда происходит условное событие.

Поскольку перечисленные схемы частично описаны в литературе [2], на их графических изображениях останавливаться не будем.

На дереве неисправностей обозначается также ряд событий:

– событие, означающее первичный отказ (или неисправность элемента);

– неполное событие: неисправность, причины которой выявлены не полностью;

– ожидаемое событие: событие, которое может случаться или не случаться;

– результирующее событие: наступает в результате конкретной комбинации неисправностей на входе логической схемы.

Конечной целью построения дерева неисправностей является вычисление вероятности появления завершающего события. На рис. 1 показан типичный пример построения дерева неисправностей с использованием логической схемы “ИЛИ” с двумя входами.

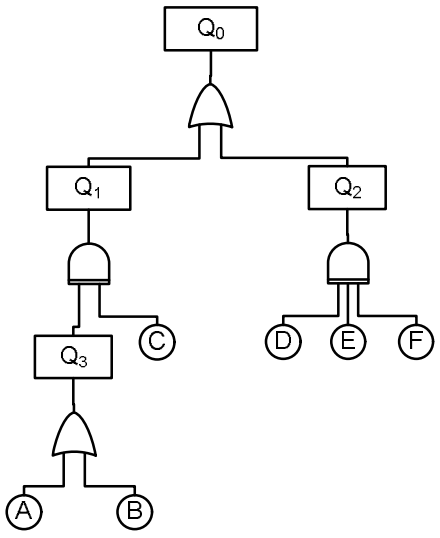


Рис. 1. Пример дерева неисправностей

## 2. Вероятностная оценка отказов

**Случай статистически независимых отказов**. Вычислим вероятность завершающего событий для дерева неисправностей, показанного на рис. 1. Считая отказы статистически независимыми, получаем следующие количественные результаты для вероятностей появления промежуточных событий и завершающего события:

$P(A) = P(B) = P(C) = P(D) = P(E) = P(F) = 1/5$;

$P(Q_3) = P(A) + P(B) - P(A)P(B) = 9/25$;

$P(Q_2) = P(D)P(E)P(F) = 1/125$;

$P(Q_1) = P(Q_3)P(C) = 9/125$;

$P(Q_0) = P(Q_1) + P(Q_2) - P(Q_1)P(Q_2) = 0,08$.

При оценке вероятностей критических отказов систем авионики необходимо учитывать не только интенсивности отказов компонентов, но и основные параметры, характеризующие режим эксплуатации и структуру резервирования систем. К таким параметрам относятся периодичность выполнения различных форм технического обслуживания, достоверность результатов эксплуатационного контроля, кратность резервирования и тип надёжностной структуры резервирования системы. Ниже приводятся выражения для расчета вероятностей отказа основных логических схем, учитывающие параметры режима эксплуатации. Формулы выведены для случая наличия в каждом из блоков ВСК, достоверность результатов которого характеризуется условными вероятностями "ложного отказа" $\alpha$ и "необнаруженного отказа" $\beta$ [7].

Вероятность отказа одного блока в течение полета равна

$$Q(t_П) = \frac{1 - e^{-\lambda t_П}}{1 - \beta e^{\lambda t_П}}, \qquad (1)$$

где $t_П$ – продолжительность полета ВС; $\lambda$ – интенсивность внезапных отказов блока.

Из формулы (1) следует, что при $\beta = 0$:

$$Q(t_П) = 1 - e^{-\lambda t_П}, \quad (2)$$

а при $\beta = 1$ имеем

$$Q(t_П) = 1. \quad (3)$$

Результат (3) становится понятным, если учесть, что при предполетном контроле с помощью ВСК неработоспособный блок может быть ошибочно признан работоспособным.

Логическая схема “ИЛИ” соответствует системе с $m$ последовательно соединенными блоками (элементами) разного типа. Вероятность отказа на выходе схемы “ИЛИ” определяется по формуле:

$$Q_S(t_П) = 1 - \prod_{i=1}^{m} [1 - Q_i(t_П)], \quad (4)$$

где $Q_i(t_П)$ – вероятность отказа $i$-го блока (компонента) за время $t_П$, вычисляемая по формуле (1).

Логическая схема “И” соответствует системе с параллельным соединением m блоков (компонентов). Вероятность отказа на выходе схемы “И” определяется по формуле:

$$\mathrm{Q_S(t_П)} = \prod_{\mathrm{i=1}}^{\mathrm{m}} \mathrm{Q_i(t_П)}. \quad (5)$$

В случае логической схемы “$h$ из $m$” ($h$ исправных блоков из $m$ одинаковых) вероятность отказа вычисляется по формуле:

$$Q_S(t_П) = \prod_{i=h}^{m} \binom{h}{i} [Q(t_П)]^i [1 - Q(t_П)]^{h-1}. \quad (6)$$

**Случай множественных отказов.** Практика эксплуатации показывает, что допущение о статистической независимости отказов блоков резервированных систем часто нарушается. Поэтому в теории надежности введено такое понятие, как множественный отказ [3, 4]. Этот вид отказов соответствует случаю, когда несколько элементов выходят из строя по одной и той же причине. К числу причин возникновения множественных отказов относятся следующие:

– конструкторские недоработки систем: дефекты, не выявленные на стадии проектирования и приводящие к отказам вследствие взаимной зависимости между электрическими подсистемами или элементами избыточной системы;

– ошибки эксплуатации и технического обслуживания: неправильная регулировка, калибровка, неправильное обращение и т.п.;

– воздействие окружающей среды: вибрация, пыль, грязь, перепады температуры и давления;

– общий внешний источник питания: общий источник питания для основного и резервного оборудования, резервируемых подсистем или элементов.

Для учета множественных отказов систем авионики введем параметр $x$. Этот параметр может быть определен на основе опыта эксплуатации резервированных систем и представляет собой долю отказов, вызываемых общей причиной. Другими словами, параметр $x$ можно рассматривать как точечную оценку вероятности того, что отказ некоторого блока (компонента) относится к числу множественных отказов.

При этом интенсивность отказов блока определяется как

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2, \quad (7)$$

где $\lambda_1$ – интенсивность статистически независимых отказов; $\lambda_2$ – интенсивность множественных отказов блока. Поскольку $x = \lambda_2 / \lambda$, то и $\lambda_2 = x\lambda$ и $\lambda_2 = (1 - x)\lambda$.

Приведем формулы для вероятностей отказа резервированных систем в случае множественных отказов. На рис. 2 приведена модифицированная структурная схема надежности с параллельным соединением элементов.

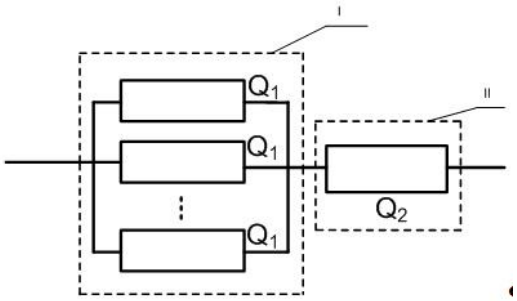


Рис. 2. Модифицированная структурная схема надежности с параллельным соединением элементов

Параллельная часть (I) схемы, изображенной на рис. 2, изображает независимые отказы в любом из $m$ элементов, а последовательно соединенный элемент (II) – все множественные отказы системы.

Гипотетический элемент, характеризуемый определенной вероятностью появления множественного отказа, последовательно соединен с элементами, которые характеризуются независимыми отказами. Отказ гипотетического элемента (т.е. множественный отказ) приводит к отказу всей системы.

Вероятность отказа структуры, изображенной на рис. 2, определяется по формуле:

$$Q_S(t_П) = 1-[1-Q_2(t_П)]\{1-[Q_1(t_П)]^m\}. \qquad (8)$$

С учетом соотношения (7) формула (8) преобразуется к виду:

$$Q_S(t_П) = 1-e^{-x\lambda t_П}\left[1-\left(\frac{1-e^{-(1-x)\lambda t_П}}{1-\beta e^{-(1-x)\lambda t_П}}\right)^m\right]. \qquad (9)$$

Параметр $x$ в формуле (9) принимает значения от 0 до 1. При $x=0$ модифицированная параллельная структура ведет себя как обычная параллельная структура, а при $x=1$ она действует как один элемент, т.е. все отказы являются множественными.

**Пример**. Пусть требуется определить вероятность отказа системы VOR, состоящей из двух одинаковых параллельно соединенных приемников, если: $\lambda = 180\times10^{-6}$ ч$^{-1}$; $t_П = 5$ ч; $\beta = 0{,}1$. При $x=0$ имеем $Q_S(t_П) = 8{,}1\times10^{-7}$. При $x=0{,}2$ по формуле (9) находим $Q_S(t_П) = 8{,}1\times10^{-4}$.

Как видно из примера, учет множественных отказов позволяет получить гораздо более объективные оценки вероятностей критических отказов систем.

На рис. 3 приведена модифицированная структурная схема надежности системы "$h$ из $m$" ($h=2$, $m=3$).

Согласно рис. 3, мажоритарная структура с $h$ исправными блоками из $m$ одинаковых блоков включает в себя гипотетический элемент, соответствующий множественным отказам и соединенный последовательно с обычной системой типа "$h$ из $m$", для которой характерны статистически независимые отказы.

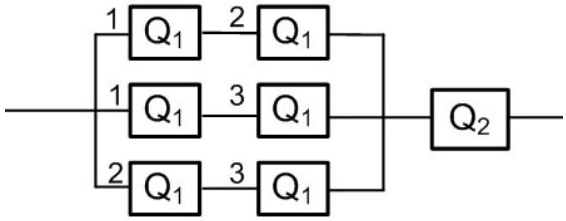


Рис. 3 . Модифицированная структурная схема надежности системы "$h$ из $m$"

Отказ гипотетического элемента приводит к отказу всей системы. Вероятность отказа модифицированной структуры

$$Q_S(t_П) = 1-\left\{\sum_{i=h}^{m}\binom{h}{i}[Q_1(t_П)]^i[1-Q_1(t_П)]^{h-1}\right\}\times \times\left[1-Q_2(t_П)\right]. \qquad (10)$$

С учетом соотношения (1) формула (10) преобразуется к виду:

$$Q_S(t_П) = 1-\left\{\sum_{i=h}^{m}\binom{h}{i}\left[\frac{(1-\beta)e^{-(1-x)\lambda t_П}}{1-\beta e^{-(1-x)\lambda t_П}}\right]\times \times\left[1-\frac{e^{-(1-x)\lambda t_П}}{1-\beta e^{-(1-x)\lambda t_П}}\right]^{h-i} e^{-x\lambda t_П}. \qquad (11)$$

Структура с параллельно-последовательным соединением элементов соответствует системе, состоящей из $n$ одинаковых цепей, в каждой из которых содержится по $m$ последовательно соединенных элементов. К этой структуре последовательно подключается гипотетический элемент, отождествляющий множественные отказы системы.

Структурная схема надежности такой структуры показана на рис. 4.

Вероятность отказа модифицированной последовательно-параллельной структуры определяется по формуле:

$$Q_S(t_П) = 1-\left\{1-\left[1-\prod_{i=1}^{m}\left(1-Q_{1,i}(t_П)\right)\right]^n\right\}\times \times\left[1-Q_2(t_П)\right], \qquad (12)$$

где $Q_{1,i}(t_П)$ – вероятность отказа $i$-го элемента любой последовательной цепи.

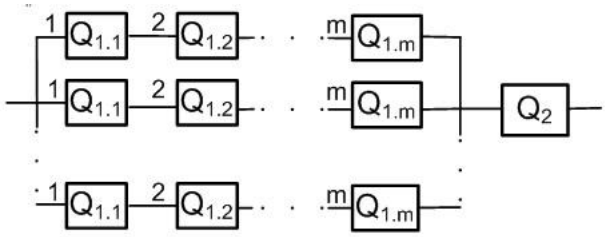


Рис. 4. Модифицированная структурная схема надежности с параллельно-последовательным соединением элементов

Вероятность $Q_{1,i}(t_П)$ определяется по формуле:

$$Q_{1,i}(t_П) = \frac{1 - e^{-(1-x)\lambda_i t_П}}{1 - \beta e^{-(1-x)\lambda_i t_П}}, \qquad (13)$$

где $\lambda_i$ – интенсивность внезапных отказов $i$-го элемента любой последовательной цепи.

## Заключение

Предложен подход к построению дерева неисправностей резервированных систем авионики. Разработаны аналитические выражения для вероятностной оценки критических отказов по дереву неисправностей. Формулы выведены для случаев статистически независимых отказов и множественных отказов.

На конкретном примере показано, что учет множественных отказов позволяет получить гораздо более объективные оценки вероятностей критических отказов систем.

Данные результаты позволяют произвести научно-обоснованное формирование MMEL. Использование данных результатов целесообразно как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации воздушных судов.

Дальнейшим развитием полученных результатов является разработка комплексной экспертной системы, позволяющей принимать на основе статистических расчетов обоснованное решение о включении систем в MMEL.

## Литература

1. Майоров А.В., Мусин С.М., Янковский Б.Ф. Выявление причин отказов авиационного оборудования: Справочник. – М.: Транспорт, 1996. – 286 с.

2. MIL-HDBK -338B. Electronic reliability design handbook // Air Force Research Laboratory Information. – Fort Belvoir, Virginia, 1991. – 1046 p.

3. Rausand M., Hoyland A. System reliability theory: models, statistical methods and applications. – 2nd edition. – New York: John Wiley & Sons, Inc. – 2004. – 458 p.

4. Lewis E.E. Introduction to reliability engineering. – 2nd edition. – New York: John Willey & Sons, Inc. – 1996. – 271 p.

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

6. Петров А.Н. Развитие методов формирования программ технического обслуживания воздушных судов по условиям безопасности и экономичности эксплуатации // Материалы авиасалона МАКС-2001. – М.: ЛИИ им. М.М. Громова, 2001. – С. 132-143.

7. Уланский В.В., Мачалин И.А. Показатели эффективности эксплуатации резервированных авиационных радиоэлектронных систем // Математические машины и системы. – 2006. – № 4. – С. 155-163.

*Поступила в редакцию 6.03.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Г. Корченко, Национальный авиационный университет, Киев.