УДК 629.7

Way of Detection of Refusals at Economic Reservation of the Onboard Equipment of a Unmanned Aerial Vehicle

**Michael F. Volobuyev, Alexander M. Maltsev*,
Sergey B. Mihajlenko and Vladimir A. Ufaev**

*Military Educational and Scientific Centre
of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A Gagarin Air Force Academy
54a Starykh Bolshevikov, Voronezh, 394064, Russia*

Received 29.07.2016, received in revised form 15.09.2016, accepted 30.10.2016

A method of detection the occurrence of progressive failure in dual-redundant system is proposed. The design procedure of likelihood characteristics of a way is developed and the estimation of its efficiency on a concrete example is spent. Recommendations for choice parameters of a way which minimize acceptance of erroneous decisions on system refusal are offered.

Keywords: dual-redundant system, gradual refusal, a threshold of detection of refusal.

Citation: Volobuyev M.F., Maltsev A.M., Mihajlenko S.B., Ufaev V.A. Way of detection of refusals at economic reservation of the onboard equipment of a unmanned aerial vehicle, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(7), 1059-1067. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-1059-1067.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: max_alex_67@mail.ru

Способ обнаружения отказов при экономичном резервировании бортового оборудования беспилотного летательного аппарата

**М.Ф. Волобуев, А.М. Мальцев,
С.Б. Михайленко, В.А. Уфаев**

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»
Россия, 394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а*

Предложен способ обнаружения факта наступления постепенного отказа в двухканальной резервированной системе. Разработана методика расчета вероятностных характеристик способа и проведена оценка его эффективности на конкретном примере. Предложены рекомендации по выбору параметров способа, которые минимизируют принятие ошибочных решений об отказе системы.

Ключевые слова: двухканальная резервированная система, постепенный отказ, порог обнаружения отказа.

Введение

Резервирование наиболее ответственных, жизненно важных блоков и узлов является эффективным способом повышения безотказности любой технической системы, что объясняет его широкое применение в авиационной технике. С другой стороны, жесткие массогабаритные ограничения, налагаемые на бортовое оборудование летательных аппаратов, не всегда позволяют наращивать число резервных каналов для достижения требуемого уровня безотказности. Наиболее жесткие массогабаритные, а также стоимостные ограничения характерны для беспилотных летательных аппаратов. Поэтому для них весьма актуальна задача разработки схем экономичного резервирования бортового оборудования, при котором число дублирующих каналов минимально [1]. Предельный случай экономичного резервирования – двухканальная схема резервирования, при которой резервированная система содержит один дублирующий канал. При реализации таких систем в общем случае невозможно определить место отказа по результатам сравнительного анализа сигналов в двух каналах. Однако при определенных условиях достаточно установить сам факт наступления отказа без определения его локализации. Например, факт наступления отказа может быть использован для подключения к двухканальной резервированной системе дополнительного, более грубого третьего канала, математической модели канала или других устройств, позволяющих определить отказавший канал. Для реализации процедуры обнаружения факта отказа в двухканальной резервированной системе должен быть определен пороговый уровень обнаружения отказа с учетом характера его влияния на вероятности принятия правильных и ошибочных решений о состоянии системы.

Наиболее просто реализуем способ обнаружения мгновенных отказов, основанный на контроле по пороговой величине. В [2-5] описаны устройства обнаружения отказов, управления и восстановления работоспособности резервированных систем с использованием контроля по пороговой величине. Данные устройства позволяют непрерывно функционировать двухканальной системе при следующих отказах в одном из каналов: скачки выходных параметров вверх (типа короткого замыкания) или вниз (типа обрыв соединения), а также плавное изменение до максимального или минимального значения, возможного в данной системе. Принципиальным недостатком способа контроля по пороговой величине выступает невозможность обнаружения постепенных отказов.

Цель статьи – разработка способа обнаружения факта наступления постепенного отказа в двухканальной резервированной системе и определение его вероятностных характеристик.

Способ обнаружения факта наступления постепенного отказа

Рассмотрим двухканальную резервированную систему, в которой сигналы с выходов каналов являются случайными некоррелированными процессами. Будем считать, что случайные величины X и Y , наблюдаемые на выходе каналов в текущий момент времени, характеризуются одинаковыми вероятностными распределениями с параметрами: $M[X] = M[Y] = m$; $M[(X - m)^2] = M[(Y - m)^2] = \sigma^2$. Для сигналов X и Y определим диапазон всех физически возможных значений β и диапазон рабочих (номинальных) значений α . Диапазон α располагается внутри диапазона β ($\alpha < \beta$) и разбивает его на три поддиапазона: A_1 – соответствует рабочему диапазону α ; A_2 – расположен ниже диапазона α ; A_3 – расположен выше диапазона α .

Процедура обнаружения факта наступления отказа в двухканальной системе может быть реализована с помощью схемы, представленной на рис. 1.

Обнаружение факта наступления отказа осуществляется в соответствии с критерием

$$\begin{aligned} \Delta > \Delta^* & - \text{отказ в системе,} \\ \Delta \leq \Delta^* & - \text{система исправна,} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta = |X - Y|$, Δ^* – пороговый уровень обнаружения отказа, $\Delta \leq \alpha^*$.

Методика расчета вероятностных характеристик способа обнаружения факта наступления постепенного отказа

Принятие решения об отказе системы в соответствии с критерием (1) носит вероятностный характер. При этом возможны следующие варианты (исходы), составляющие полную группу несовместных событий:

Рис. 1. Схема обнаружения факта наступления отказа в двухканальной резервированной системе

1) выходные сигналы X и Y находятся в диапазоне значений A_1 (отказа нет), а модуль их разности Δ не превысил порог Δ^* (правильное решение об исправности системы);

2) выходные сигналы X и Y находятся в диапазоне значений A_1 (отказа нет), а модуль их разности Δ превысил порог (ложное решение об отказе системы);

3) один или оба сигнала X , Y находятся в диапазоне значений A_2 или A_3 (отказ одного или обоих каналов), а модуль разности сигналов Δ превысил порог (правильное решение об отказе системы);

4) один или оба сигнала X , Y находятся в диапазоне значений A_2 или A_3 (отказ одного или обоих каналов), а модуль разности сигналов Δ не превысил порог (ложное решение об исправности системы).

Граф состояний системы с возможными исходами процедуры обнаружения отказа представлен на рис. 2, где приняты следующие обозначения: НС – начальное состояние системы; Отк – отказ системы; Исп – исправность системы; ПРО – правильное решение об отказе системы; ЛРИ – ложное решение об исправности системы; ПРИ – правильное решение об исправности системы; ЛРО – ложное решение об отказе системы; $P_{\text{отк}}$ – вероятность отказа системы; $P_{\text{исп}}$ – вероятность исправности системы; $P_{\text{пшотк}}$ – вероятность превышения порога в случае отказа системы; $P_{\text{нпшотк}}$ – вероятность не превышения порога в случае отказа системы; $P_{\text{ппшисп}}$ – вероятность превышения порога в случае исправности системы; $P_{\text{нппшисп}}$ – вероятность не превышения порога в случае исправности системы; $P_{\text{прос}}$ – вероятность правильного решения об отказе системы; $P_{\text{лрис}}$ – вероятность ложного решения об исправности системы; $P_{\text{прис}}$ – вероятность правильного решения об исправности системы; $P_{\text{лрос}}$ – вероятность ложного решения об отказе системы.

Введем описание исправного $S_{\text{исп}}$ и неисправных состояний системы $S_{\text{отк}}(i, j)$:

$$\begin{aligned} S_{\text{исп}} &= X \in A_1 \wedge Y \in A_1, \\ S_{\text{отк}}(i, j) &= X \in A_i \wedge Y \in A_j, i, j = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (2)$$

Причем $S_{\text{отк}}(1, 1) = \emptyset$, так как этот случай соответствует исправному состоянию $S_{\text{исп}}$.

Вероятности введенных состояний равны:

$$P_{\text{исп}} = \int_{A_1} \omega_X(X) \cdot \int_{A_1} \omega_Y(Y) dY dX,$$

Рис. 2. Граф состояний двухканальной резервированной системы

$$P_{\text{отк}}(i, j) = \int_{A_i} \omega_X(X) \cdot \int_{A_j} \omega_Y(Y) dY dX, \quad i, j = \overline{1, 3}, \quad (3)$$

где $\omega_X(X)$, $\omega_Y(Y)$ – плотности вероятности случайных величин X и Y .

В случае исправной системы (состояние $S_{\text{исп}}$) возможно правильное решение об её исправности или ложное решение об её отказе, вероятности которых $P_{\text{прис}}$, $P_{\text{лрос}}$ равны:

$$P_{\text{прис}} = P_{\text{исп}} \cdot P_{\text{нписп}}, \quad P_{\text{лрос}} = P_{\text{исп}} \cdot P_{\text{пписп}}, \quad (4)$$

где $P_{\text{пписп}}$, $P_{\text{нписп}}$ – вероятности превышения и неперевышения величиной Δ порога Δ^* в случае исправности системы;

$$P_{\text{нписп}} = \int_0^{\Delta^*} \omega_{\Delta}(\Delta / A_i, A_i) d\Delta, \quad P_{\text{пписп}} = \int_{\Delta^*}^{\alpha} \omega_{\Delta}(\Delta / A_i, A_i) d\Delta, \quad (5)$$

где $\omega_{\Delta}(\Delta / A_i, A_i)$ – условная плотность вероятности величины Δ при попадании X и Y в диапазон A_i .

В случае неисправной системы (состояния $S_{\text{отк}}(i, j), i, j = \overline{1, 3}$) возможны правильные решения об её отказе или ложные решения об её исправности, вероятности которых $P_{\text{прис}}(i, j)$, $P_{\text{лрос}}(i, j)$ равны:

$$P_{\text{прис}}(i, j) = P_{\text{отк}}(i, j) \cdot P_{\text{пнотк}}(i, j), \quad P_{\text{лрос}}(i, j) = P_{\text{отк}}(i, j) \cdot P_{\text{ннотк}}(i, j), \quad i, j = \overline{1, 3} \quad (6)$$

где $P_{\text{пнотк}}(i, j)$, $P_{\text{ннотк}}(i, j)$ вероятности превышения и неперевышения величиной Δ порога Δ^* в случае отказа системы;

$$P_{\text{пнотк}}(i, j) = \int_{\Delta^*}^{\Delta_{\text{max}}(i, j)} \omega_{\Delta}(\Delta / A_i, A_j) d\Delta, \quad P_{\text{ннотк}}(i, j) = \int_{\Delta_{\text{min}}(i, j)}^{\Delta^*} \omega_{\Delta}(\Delta / A_i, A_j) d\Delta, \quad i, j = \overline{1, 3} \quad (7)$$

где $\omega_{\Delta}(\Delta / A_i, A_j)$ – условная плотность вероятности величины Δ при попадании X и Y в диапазон A_i и A_j соответственно, а $\Delta_{\text{min}}(i, j)$, $\Delta_{\text{max}}(i, j)$ – минимальные и максимальные значения величины Δ в ситуации $S_{\text{отк}}$. С учетом всех состояний отказа системы получаем вероятности правильного решения об отказе $P_{\text{лрос}}$ и ложного решения об исправности $P_{\text{прис}}$:

$$P_{\text{лрос}} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 P_{\text{прис}}(i, j); \quad P_{\text{прис}} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 P_{\text{лрос}}(i, j). \quad (8)$$

Исходы, соответствующие правильным и ложным решениям о состоянии системы, могут быть объединены в благоприятный и неблагоприятный исходы с соответствующими вероятностями правильного $P_{\text{ПР}}$ и ложного $P_{\text{ЛР}}$ решений:

$$P_{\text{ПР}} = P_{\text{прис}} + P_{\text{лрос}}, \quad P_{\text{ЛР}} = P_{\text{лрос}} + P_{\text{прис}}. \quad (9)$$

Поскольку благоприятные и неблагоприятные исходы являются противоположными событиями, то их вероятности связаны соотношением

$$P_{\text{ПР}} + P_{\text{ЛР}} = 1. \quad (10)$$

Выбор порога Δ^* следует осуществлять, исходя из минимизации $P_{\text{ЛР}}$ и максимизации $P_{\text{ПР}}$.

$$\Delta_{opt}^* = \underset{\Delta^* \in [0, \alpha]}{\operatorname{Arg\,max}} P_{\text{лр}}(\Delta^*) = \underset{\Delta^* \in [0, \alpha]}{\operatorname{Arg\,min}} P_{\text{лр}}(\Delta^*). \quad (11)$$

Пример расчета вероятностных характеристик способа обнаружения факта наступления постепенного отказа

Рассмотрим случай, когда случайные величины X и Y распределены по равномерному закону в диапазоне возможных значений β , причем зона α расположена симметрично относительно математических ожиданий X и Y . При этом значения β выбираем, исходя из заданной веро-

ятности безотказной работы каждого из каналов P_k в соответствии с выражением $P_k = \frac{\alpha}{\beta}$, что

обусловлено равномерным законом распределения выходных величин X и Y . Для определения

конечных исходов необходимо знать условные плотности вероятностей $\omega_\Delta(\Delta / A_i, A_j)$ $i, j = \overline{1, 3}$, которые могут быть определены по методике, предложенной в [6]. Для расчетов по методике [6] требуются условные плотности вероятностей случайных величин X и Y при условии их нахождения в диапазоне $A_i, i = \overline{1, 3}$. Очевидно, что это будут равномерные плотности вероятностей и их определение тривиально.

В силу симметрии рассматриваемого случая справедливы следующие соотношения:

$$\omega_\Delta(\Delta / A_1, A_2) = \omega_\Delta(\Delta / A_1, A_3) = \omega_\Delta(\Delta / A_2, A_1) = \omega_\Delta(\Delta / A_3, A_1), \quad (12)$$

$$\omega_\Delta(\Delta / A_2, A_2) = \omega_\Delta(\Delta / A_3, A_3), \omega_\Delta(\Delta / A_2, A_3) = \omega_\Delta(\Delta / A_3, A_2). \quad (13)$$

Кроме того, нет необходимости определять условные плотности вероятностей $\omega_\Delta(\Delta / A_2, A_3)$ и $\omega_\Delta(\Delta / A_3, A_2)$, так как при одновременном попадании случайных величин X и Y в диапазоны A_2 и A_3 (A_3 и A_2) соответственно величина Δ всегда будет больше порога $\Delta^* \leq \alpha$, т. е. справедливо

$$P_{\text{нпотк}}(2, 3) = P_{\text{нпотк}}(3, 2) = 0, \quad P_{\text{нпотк}}(2, 3) = P_{\text{нпотк}}(3, 2) = 1. \quad (14)$$

Таким образом, достаточно определить три условные плотности вероятностей $\omega_\Delta(\Delta / A_i, A_j)$:

$$\omega_\Delta(\Delta / A_1, A_1) = \begin{cases} 0 & \Delta < 0 \\ \frac{2(\alpha - \Delta)}{\alpha^2} & 0 \leq \Delta \leq \alpha \\ 0 & \Delta > \alpha \end{cases}, \quad \omega_\Delta(\Delta / A_2, A_2) = \begin{cases} 0 & \Delta < 0 \\ \frac{4(\beta - \alpha - 2 \cdot \Delta)}{(\beta - \alpha)^2} & 0 \leq \Delta \leq \frac{\beta - \alpha}{2} \\ 0 & \Delta > \frac{\beta - \alpha}{2} \end{cases},$$

$$\omega_\Delta(\Delta / A_1, A_2) = \begin{cases} 0 & \Delta < 0 \\ \frac{2 \cdot \Delta}{\beta \cdot \alpha - \alpha^2} & 0 \leq \Delta < \frac{\alpha}{2} \\ \frac{\beta \cdot \alpha - \alpha^2}{\beta + \alpha - 2 \cdot \Delta} & \frac{\alpha}{2} \leq \Delta < \frac{\beta + \alpha}{2} \\ \frac{\beta \cdot \alpha - \alpha^2}{\beta \cdot \alpha - \alpha^2} & \alpha \leq \Delta < \frac{\beta + \alpha}{2} \\ 0 & \Delta \geq \frac{\beta + \alpha}{2} \end{cases} \quad (15)$$

В результате расчетов с использованием выражений (3)-(8), (12)-(15) определены аналитические выражения для вероятностей конечных исходов:

$$P_{\text{прис}} = \begin{cases} \frac{2 \cdot \alpha \cdot \Delta^* - \Delta^{*2}}{\beta^2} & 0 < \Delta^* < \alpha \\ \frac{\alpha^2}{\beta^2} & \Delta^* = \alpha \end{cases}, P_{\text{лрос}} = \begin{cases} \frac{\alpha^2 - 2 \cdot \alpha \cdot \Delta^* + \Delta^{*2}}{\beta^2} & 0 < \Delta^* < \alpha \\ 0 & \Delta^* = \alpha \end{cases} \quad (16)$$

$$P_{\text{лрос}} = \frac{\beta^2 - \alpha^2 - 2 \cdot \beta \cdot \Delta^* + 2 \cdot \alpha \cdot \Delta^*}{\beta^2}, P_{\text{лрис}} = \frac{2 \cdot \beta \cdot \Delta^* - 2 \cdot \alpha \cdot \Delta^*}{\beta^2} \quad (17)$$

$0 < \Delta^* < \alpha$ $0 < \Delta^* < \alpha$

С использованием выражений (16), (17) получены графические зависимости вероятностей ложных и правильных решений, от отношения порога к рабочему диапазону Δ^*/α и фиксированного значения $P_k = \frac{\alpha}{\beta}$, представленные на рис. 3, 4.

Проведя вычисления благоприятных и неблагоприятных решений с использованием выражения (9), получим графические зависимости, представленные на рис. 5.

Из приведенных на рис. 5 зависимостей видно, что существует оптимальное значение порога $\Delta^* = \Delta^*_{\text{opt}}$, которому соответствует максимальное значение вероятности правильных решений и минимальное значение ложных решений. Причем значения Δ^*_{opt} , $P_{\text{лпр}}(\Delta^*_{\text{opt}})$, $P_{\text{лпр}}(\Delta^*_{\text{opt}})$ зависят от соотношения $\frac{\alpha}{\beta}$:

$$\Delta^*_{\text{opt}} \left(\frac{\alpha}{\beta} \right) = \underset{\Delta^* \in [0, \alpha]}{\text{Arg max}} P_{\text{лпр}} \left(\Delta^*, \frac{\alpha}{\beta} \right) = \underset{\Delta^* \in [0, \alpha]}{\text{Arg min}} P_{\text{лпр}} \left(\Delta^*, \frac{\alpha}{\beta} \right). \quad (18)$$

Заключение

В классических резервированных системах выбор оптимального значения порога Δ^* осуществляется из условия равенства вероятности ложного решения об отказе системы нулю

Рис. 3. Зависимости вероятности правильного решения об исправности системы (а) и вероятности ложного решения об отказе системы (б) от отношения Δ^*/α при фиксированных P_k

Рис. 4. Зависимости вероятности правильного решения об отказе системы (а) и вероятности ложного решения об исправности системы (б) от отношения Δ^*/α при фиксированных P_k

Рис. 5. Зависимости вероятностей ложных решений (а) и правильных решений (б) от отношения Δ^*/α при фиксированных P_k

($\Delta^* = \alpha$), так как в многоканальных резервированных системах (число каналов 3 и более) ложное решение об отказе системы приводит к исключению из дальнейшей работы исправного канала. В двухканальных резервированных системах, где факт обнаружения отказа является сигналом для подключения других устройств проверки, необходимо оптимизировать порог Δ^* таким образом, чтобы минимизировать вероятность принятия ложного решения об исправности системы при фиксированном максимально допустимом значении вероятности принятия ложного решения об отказе системы.

Выбор значения порога Δ^* в двухканальных резервированных системах следует с учетом отношения $\frac{\alpha}{\beta}$, что обеспечит максимум вероятности правильных решений и минимум вероятности ложных решений о состоянии резервированной системы.

Список литературы

- [1] Волобуев М.Ф., Замыслов М.А., Соколов И.В. Способ экономического резервирования бортовых систем БЛА на основе нечеткой логики. Сб. статей II Всероссийской НПК «Академические Жуковские чтения» «Современные проблемы и перспективы развития комплексов авиационного оборудования». Воронеж: ВУНЦ BBC «БВА», 2015, 39-43 [Volobuyev M.F., Zamislov M.A., Sokolov I.V. The method of economic onboard UAV reservation on the basis of indistinct logic. Art. Col. Of the second SPC «Zhukovsky academical readings» «*Development of aviation equipment complexes modern problems and prospects*». Voronezh, MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», 2015, 39-43 (in Russian)].
- [2] Шевцов Г.А., Шеремет Е.М. *Логическое резервирование*. Львов: Изд-во Львов. ун-та. 1973, 136 с. [Shevtsov A.G., Sheremet E.M. *Logical reservation* Lvov, Lvov university edition, 1973, 136 p. (in Russian)].
- [3] Устройство управления резервированной с помощью мажоритарных элементов системой. Патент ФИПС РФ № 2451995 от 02.12.2011 г. [Reserved by majority elements system control device. Patent the Russian Federation № 2451995 since 02.12.2011 (in Russian)].
- [4] Устройство обнаружения отказов в резервированной системе. Патент ФИПС РФ №2487389 от 20.06.2012 г. [Refusal detection device in the reserved system. Patent the Russian Federation №2487389 since 20.06.2012 (in Russian)].
- [5] Устройство восстановления работоспособности системы резервированной с помощью мажоритарных элементов. Патент ФИПС РФ № 2493586 от 15.08.2012 г. [Reserved by majority elements system workability restoration device. Patent the Russian Federation № 2493586 since 15.08.2012 (in Russian)].
- [6] Венцель Е.С., Овчаров Л.А. *Прикладные задачи теории вероятностей*. М.: Радио и связь. 1983, 416 с. [Ventsel E.S., Ovcharov L.A. *Probability theory applied tasks* Moscow, Radio i sviaz, 1983, 416 p. (in Russian)].