В области остальных боковых лепестков величина флюктуаций практически равна нулю;

3) амплитудное распределение частичным экспоненциальным рядом не приводит к существенному увеличению коэффициента чувствительности к ошибкам АФАР по сравнению со случаем использования полного ряда. Потери составляют десятые доли дБ.

**Библиографические ссылки**

1. *Тяпкин В. Н., Дмитриев Д. Д., Мошкина Т. Г.* Потенциальная помехоустойчивость навигационной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем // Вестник СибГАУ. 2012. № 3 (43). С. 113–119.

2. *Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н.* Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС : монография : Сиб. федер. ун-т. Красноярск, 2012.

3. *Пистолькорс А. А., Литвинов О. С.* Введение в теорию адаптивных антенн. М. : Наука, 1991.



УДК 629.7/621.01

# МЕТОД РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ САМОЛЕТОВ

Е. А. Фурманова, О. Г. Бойко

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Россия, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31. E-mail: bouko1962@yandex.ru

*Рассмотрен метод расчета надежности систем с учетом восстановления. Показана структура формирования математической модели времени до совместного отказа в восстанавливаемой системе одновременно двух и трех агрегатов.*

*Ключевые слова: время до отказа, цикл восстановления, число циклов, вероятность отказа.*

# AIRPLANES FUNCTIONAL SYSTEMS RELIABILITY CALCULATION METHOD

E. A. Furmanova, O. G. Boyko

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31 “Krasnoyarskiy Rabochiy” prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: bouko1962@yandex.ru

*The authors consider a method for systems reliability calculation, with allowance for recovery, and show the structure of formation of mathematical model of time, until simultaneous failure of two and three aggregates in a recoverable system.*

*Key words: time until failure, recovery, number of cycles, failure probability.*

Расчету надежности систем самолетов без учета и с учетом восстановления посвящены работы [1–5]. Методы расчета систем в указанных работах основываются на методологическом подходе, в котором не используется теорема умножения вероятностей. Основу этого подхода составляет предположение о том, что вероятность отказа агрегата в системе определяется суммарным параметром потока отказов агрегатов $\omega_\Sigma$, составляющих систему, и наработкой.

Поскольку системы самолетов являются восстанавливаемыми системами, то при стационарном процессе эксплуатации наработка на отказ агрегатов стабилизируется, и в качестве математической модели вероятности отказов агрегатов может быть принято распределение равномерной плотности [6]:

$$q(t) = \omega t\,, \qquad (1)$$

где $0 \le t \le \dfrac{1}{\omega}$.

В соответствии с принятым методологическим подходом и уравнением (1), вероятность отказа первого агрегата $q_1(t)$ в невосстанавливаемой системе общего резервирования определится по выражению

$$q_1(t) = \omega_{\Sigma 1} t_1 = n \cdot m \cdot \omega \cdot t_1, \qquad (2)$$

где $n$ – количество последовательно соединенных агрегатов в подсистеме; $m$ – количество параллельно соединенных подсистем.

Рассмотрим систему общего резервирования при $n = 20$ и $m = 3$. Такая система будет подобна структуре гидросистемы самолета Ту-154М, содержащей три одинаковых подсистемы общего резервирования.

Положив в формуле (2) $q_1(t) = 1$, определим время до отказа первого агрегата в системе:

$$t_1 = \frac{1}{n \cdot m \cdot \omega}. \qquad (3)$$

Тогда, с учетом наработки $t_1$ и изменения количества исправных подсистем найдем вероятность отказа второго агрегата в системе:

$$q_2(t) = n(m-1)\omega(t_1 + \Delta t_2). \quad (4)$$

Положив в формуле (4) $q_2(t) = 1$, рассчитаем приращение времени между первым и вторым отказами в виде

$$\Delta t_2 = \frac{1 - n(m-1)\omega \cdot t_1}{n(m-1)\omega}. \quad (5)$$

Продолжая подобную процедуру, определим приращение времени между отказами второго и третьего агрегатов в системе:

$$\Delta t_3 = \frac{1 - n(m-2)\omega(t_1 + \Delta t_2)}{n(m-2)\omega}. \quad (6)$$

Значения времени $t_1$, $\Delta t_2$ и $\Delta t_3$ необходимы для последующего расчета надежности системы с учетом восстановления.

В [3–5] разработан метод расчета надежности систем с учетом восстановления. В предлагаемой работе рассмотрена иная структура построения решения, с использованием той же методологии, обеспечивающей получение равных, полученных в [3–5], количественных оценок надежности. По нашему мнению, предлагаемая процедура обеспечивает более простое для понимания представление о ходе решения задачи.

Как и в упомянутых работах, решение задачи построено на использовании стационарной части решения Марковской задачи об определении вероятностей нахождения функциональной системы в различных состояниях [7]. Функциональная система может находились в исправном либо неисправном, но работоспособном состояниях с одним, либо с большим числом отказавших агрегатов. Вероятность нахождения системы в исправном состоянии в [3; 4] определена по выражению

$$P^{\text{испр}} = \frac{\mu}{\mu + \omega}, \quad (7)$$

где $\omega = a_{12}$ – интенсивность перехода системы из исправного состояния в неисправное, но работоспособное, либо в состояние отказа, определяемое в ходе решения задачи; $\mu$ – интенсивность восстановления – величина, обратная времени восстановления.
Для самолетов время восстановления $T_{\text{по}}$ принимается равным времени полета с отказом одного либо нескольких агрегатов в системе.

Интенсивность перехода системы из исправного состояния в состояние с одним отказавшим агрегатом определится временем до первого отказа $t_1$ агрегата в системе:

$$a_{12_1} = \frac{1}{t_1}. \quad (8)$$

Тогда формула вероятности нахождения системы в исправном состоянии, в соответствии с выражением (7), будет иметь вид

$$P_1^{\text{испр}} = \frac{\mu}{\mu + a_{12_1}}, \quad (9)$$

а вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии определится по выражению

$$P_1^{\text{раб}} = 1 - P_1^{\text{испр}}. \quad (10)$$

Второй отказ агрегата в системе, совместно с первым, может реализоваться только через некоторое число $k_2$ циклов отказов и восстановлений одного агрегата. Продолжительность каждого цикла $\tau$ является суммой времени $t_1$ и $T_{\text{по}}$:

$$\tau_2 = t_1 + T_{\text{по}}. \quad (11)$$

Число $k_2$ при стационарном процессе эксплуатации будет таким, чтобы сумма отрезков времени $T_{\text{по}}$ стана равной $\Delta t_2$. Тогда $k_2$ можно выразить как

$$k_2 = \frac{\Delta t_2}{T_{\text{по}}}. \quad (12)$$

Необходимо отметить, что, в соответствие с практикой, всегда существует вероятность реализации одновременно двух отказов до восстановления первого отказавшего агрегата. При этом время работы восстанавливаемой системы до момента одновременного отказа в ней двух агрегатов вычисляется по формуле

$$t_2^{\text{вос}} = (t_1 + T_{\text{по}})\frac{\Delta t_2}{T_{\text{по}}}. \quad (13)$$

Время $t_2^{\text{вос}}$ определит интенсивность перехода системы из исправного состояния в работоспособное с двумя одновременно отказавшими агрегатами:

$$a_{12_2} = \frac{1}{t_2^{\text{вост}}}. \quad (14)$$

Тогда вероятность нахождения системы в исправном состоянии будет выражено как

$$P_2^{\text{испр}} = \frac{\mu}{\mu + a_{12_2}}, \quad (15)$$

и вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии с двумя отказавшими агрегатами будет рассчитываться по уравнению

$$P_2^{\text{раб}} = 1 - P_2^{\text{испр}}. \quad (16)$$

Одновременный отказ в системе трех агрегатов может реализоваться через $k_3$ циклов отказов и восстановлений одного и одновременно двух агрегатов. Продолжительность одного такого цикла будет вычислена по формуле

$$\tau_3 = t_2^{\text{вос}} + T_{\text{по}}, \quad (17)$$

а число таких циклов будет найдено по выражению

$$k_3 = \frac{\Delta t_3}{T_{\text{по}}}. \quad (18)$$

Тогда определим время работы восстанавливаемой системы до момента одновременного отказа в ней трех агрегатов:

$$t_3^{\text{вос}} = [(t_1 + T_{\text{по}})\frac{\Delta t_2}{T_{\text{по}}} + T_{\text{по}}]\frac{\Delta t_3}{T_{\text{по}}}. \quad (19)$$

По аналогии с (8), (14) и (15), найдем

$$a_{12_3} = \frac{1}{t_3^{\text{вос}}}; \quad (20)$$

$$P_3^{\text{испр}} = \frac{\mu}{\mu + a_{12_3}}. \quad (21)$$

Но рассматриваемая система, после отказа в ней одновременно трех агрегатов, перейдет в состояние отказа с вероятностью

$$Q(t_3^{\text{вос}}) = 1 - P_3^{\text{исп}}. \quad (22)$$

При этом вероятность отказа системы за 1 час полета рассчитаем в соответствии с (19) и (22):

$$Q(1) = \frac{Q(t_3^{\text{вос}})}{t_3^{\text{вос}}}. \quad (23)$$

Из выражения (13) и и (19) следует, что первоначальный цикл восстановления одного отказавшего агрегата ($t_1 + T_{\text{по}}$) с момента $t_1$ до момента одновременного отказа двух агрегатов повторится $k_2$ раз. С момента $t_1$ до одновременного отказа трех агрегатов этот цикл ($t_1 + T_{\text{по}}$) повторится $(k_2 k_3)$ раз. Кроме того, из выражения (19) очевидно, что при мгновенном восстановлении отказывающих агрегатов $T_{\text{по}} = 0$, следует, что $t_3^{\text{вос}} = \infty$, $a_{12_3} = 0$ и $P^{\text{исп}} = 1$, т. е. система становится безотказной. Напротив, с увеличением $T_{\text{по}}$ надежность системы интенсивно убывает.

Например, для рассматриваемой системы – аналога гидросистемы самолета Ту-154М – при $n = 20$, $m = 3$, $\omega = 1 \cdot 10^{-4}$ ч$^{-1}$, без учета восстановления, получены следующие значения: время полета до отказа первого агрегата $t_1 = 166{,}6$ ч, приращения времени $\Delta t_2 = 83$ ч и $\Delta t_3 = 250$ ч. При учете восстановления и $T_{\text{по}} = 1$, число циклов восстановления будет $k_2 = 83$ и $k_3 = 250$. Время до отказа одновременно двух агрегатов, при вероятности такого события, вычисленного по выражению (16), составит $t_2^{\text{вос}} = 13911$ ч. Время до одновременного отказа трех агрегатов с вероятностью, определенной по (22), $t_3^{\text{вос}} = 3477700$ ч.

Таким образом, предлагаемый метод дает возможность наглядно представить изменения вероятностей отказа одного и более агрегатов и время до их отказов в восстанавливаемой системе.

### Библиографические ссылки

1. *Бойко О. Г.* Надежность функциональных систем самолетов гражданской авиации: монография. РАН. М., 2009.

2. *Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г.* Методологические основы и методы подтверждения соответствия сертификационным требованиям к надежности функциональных систем самолетов // Авиационные и ракетно-космические технологии «АКТО-2012» : материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Т. 4 (Казань, 14–17 августа 2012 г.) Казань : Изд-во Казан. национ. иссл. техн. ун-та, 2012. С. 389–399.

3. *Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г.* Новый подход в оценке надежности функциональных систем самолетов гражданской авиации // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем Казань : Казань–Дайтона Бич. 2012. № 2 (35). Т. 17. С. 21–27.

4. *Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г., Фурманова Е. А.* Метод расчета надежности восстанавливаемых систем с общим резервированием // Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники : материалы VII Всерос. науч. конф., посвящ. памяти главного конструктора ПО «Полет» А. С. Клинышкова. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. С. 223–227.

5. *Бойко О. Г., Шаймарданов Л. Г.* Исследование методологических подходов к расчету надежности систем с позиций фундаментальных представлений статистической физики // Безопасность и живучесть технических систем : материалы IV Всерос. конф. Т. 1. Красноярск : ИФ СО РАН. 2012. С. 229–234.

6. *Венцель Е. С.* Теория вероятностей. М. : Физматлит, М. : 1962.

7. *Емелин Н. М.* Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов / Н. М. Емелин. М. : Машиностроение, 1995.