

УДК 681.5.09

DOI: 10.25559/SITITO.15.201901.124-132

## Учет существенных факторов и ограничений при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем летательных аппаратов с учетом допусков

В. М. Гришин\*, В. Ч. Туан

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

\* vyacheslav.grishin@gmail.com

### Аннотация

Актуальность данной статьи заключается в том, что проблема повышения безотказности подсистем авиационной и ракетно-космической техники при внезапных независимых отказах определяет одно из важных направлений научных исследований. Одним из способов повышения безотказности подсистем является пассивное или, как его еще называют, постоянное резервирование. А важной особенностью структур пассивного резервирования заключается в невозможности определения того, какие элементы являются основными, а какие – резервными, так как все элементы являются одинаковыми и работают в одних и те же условиях. Работа направлена на выявление и анализ специфических особенностей, которые необходимо учитывать при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем с учетом допусков при внезапных независимых отказах. В ходе исследования расчеты проводились при использовании методов вероятности, перебора, проводился анализ и синтез пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков. Показана необходимость учета назначаемых и реализуемых допусков, кратного и не кратного резервирования, дискретных шкал реализуемых допусков с различными уровнями значимости, критических вероятностей, определяющих диапазоны вероятностей элементов, где выгодно и невыгодно резервирование. Установлено, что пассивное резервирование с учетом реализуемых допусков обеспечивается двумя принципиально разными способами. Выявлена возможность реализации любого допуска при различных значениях ряда возрастающих индивидуальных кратностей. Показано, что подсистемы с некратным пассивным резервированием имеют значения вероятностей элементов, называемых критическими. Выявлен разный характер изменения критических вероятностей в зависимости от кратностей для различных значений реализуемых допусков.

**Ключевые слова:** внезапные отказы, допуски на выходные (входные) параметры связанных подсистем, кратность резервирования, критические вероятности, безотказность подсистем.

**Для цитирования:** Гришин В. М., Туан В. Ч. Учет существенных факторов и ограничений при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем летательных аппаратов с учетом допусков // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. Т. 15, № 1. С. 124-132. DOI: 10.25559/SITITO.15.201901.124-132

© Гришин В.М., Туан В.Ч., 2019



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



## **Consideration of Significant Factors and Limitations in the Study and Development of Passively Reserved Aircraft Subsystems, Taking into Account Tolerances**

**V. M. Grishin\*, V. T. Tuan**

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

\* vyacheslav.grishin@gmail.com

### **Abstract**

The relevance of this article is in the fact that the problem of increasing the reliability of the subsystems of aviation and rocket and space technology in case of sudden independent refusals determines one of the important areas of the scientific research. One of the ways to increase the reliability of subsystems is passive or, as it is also called, constant backup. And the important features of passive reservation structures are the impossibility of determining which elements are basic and which are redundant, since all elements are the same and work in the same conditions. The purpose of this work is to identify and analysis specific characteristics that must be considered to conduct research and develop subsystems of passive redundancy in consideration of fault tolerance. In the course of the study, calculations were carried out using the methods of probability, enumeration, analysis and synthesis of passively reserved aircraft subsystems were carried out taking into account tolerances. It is shown that it is necessary to take into account assigned and implemented tolerance, multiple and non-multiple redundancy, discrete scales of realized tolerances with different levels of significance, critical probabilities that determine the probability ranges of elements, where the redundancy is profitable or unprofitable. It has been established that passive redundancy taking into account the implemented tolerances is provided in two fundamentally different ways. The possibility of realizing any tolerance for different values of a number of increasing individual multiplicities is revealed. It is shown that the subsystems with non-multiple passive reservation have the probabilities of the elements, called critical. A different pattern of variation of critical probabilities is revealed depending on the multiplicities for different values of the tolerances to be realized.

**Keywords:** sudden failures, tolerances for output (input) parameters of related subsystems, multiplicity of redundancy, critical probability, reliability subsystems.

**For citation:** Grishin V.M., Tuan V.T. Consideration of Significant Factors and Limitations in the Study and Development of Passively Reserved Aircraft Subsystems, Taking into Account Tolerances. *Sovremennye informacionnye tehnologii i IT-obrazovanie* = Modern Information Technologies and IT-Education. 2019; 15(1):124-132. DOI: 10.25559/SITITO.15.201901.124-132



## Введение

Вопросы повышения безотказности подсистем авиационной и ракетно-космической техники при внезапных независимых отказах определяют одно из важных направлений научных исследований. Одним из способов повышения безотказности подсистем является пассивное или, как говорят, постоянное резервирование. Он связан с введением в систему избыточности и применяется для подсистем, не допускающих даже кратковременных перерывов в работе. При этом степень избыточности оценивается кратностью резервирования  $K$ , под которой в работе понимается отношение общего числа элементов резервированной подсистемы  $n$  к числу основных элементов  $m$ :

$$K = \frac{n}{m} \quad (1)$$

Важной особенностью структур пассивного резервирования является невозможность определения того, какие элементы являются основными, а какие – резервными, так как все элементы являются одинаковыми и работают в одинаковых условиях. Можно указать только их численности.

При пассивном резервировании подсистем без учета допусков резервированная подсистема считается исправной, если в ней имеется хотя бы один исправный элемент [1], т.е.  $m=1$ . Однако указанное утверждение справедливо при отсутствии влияния выходных характеристик резервированных подсистем на работоспособность связанных с ними подсистем. При наличии указанного влияния необходимо учитывать допуск на отклонение выходных параметров пассивно резервированных подсистем при отказах их элементов для обеспечения работоспособности связанных с ними подсистем. Учет допусков на изменение выходных параметров пассивно резервированной подсистемы может существенно повлиять на структуру ее резервирования и, в частности, на количество ее основных элементов, которое может быть существенно больше единицы.

Под количеством основных элементов пассивно резервированной подсистемы будем понимать то минимальное количество исправных элементов  $m$ , из общего числа  $n$ , при котором обеспечивается предельно допустимое отклонение ее выходного параметра при отказах всех резервных элементов ( $r=n-m$ ) и при этом сохраняется работоспособность смежной подсистемы.

Например, в системах питания топливом двигателей летательных аппаратов (ЛА) назначается допустимое предельное уменьшение от номинала суммарной производительности топливных насосов исходя из особенностей конструкции и требования обеспечения всех режимов работы двигателя, включая форсированные, в течение необходимого времени [2]. Аналогичная ситуация имеет место в системах питания борта ЛА постоянным и переменным током [3], рулевых приводах, усилителях мощности контуров управления ЛА [4] и т.д., когда уменьшение выходной мощности, крутящего момента (либо усилия) сверх допустимых пределов может привести к отказу техники.

Целью работы является выявление и анализ особенностей, которые надо учитывать при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков на отклонение их выходных параметров.

## Виды допусков и их характеристика

Существуют различные виды допусков. В первую очередь следует различать допуски назначаемые и допуски реализуемые. Назначаемый допуск задается на смежную подсистему, связанную конструктивно с пассивно резервированной подсистемой. Он определяет предельно допустимое отклонение от номинального значения (номинала) входного параметра смежной подсистемы (как правило в меньшую сторону), обеспечивающее ее нормальное функционирование. Назначаемый допуск определяется нормативно-технической документацией на рассматриваемый объект. Он задается на непрерывной шкале возможных допусков для данного вида подсистем. Например, в системах питания топливом двигателей ЛА он определяет минимальную суммарную производительность исправных топливных насосов, обеспечивающих работоспособность двигателя ЛА на всех режимах в течение необходимого времени. Реализуемый допуск обеспечивается пассивно резервированной подсистемой. Он носит дискретный характер, определяемый дискретной структурой пассивного резервирования, т.е. определяется дискретными величинами  $m$ ,  $r$  и  $n$ . Реализуемый допуск характеризуется величиной отклонения выходного параметра от номинала при отказе (выходе из строя) всех ее  $r=n-m$  резервных элементов. Назначаемый и реализуемый допуски могут не совпадать по своим значениям. В этом случае реализуемый при пассивном резервировании допуск должен быть «уже» назначенного.

Реализуемый и назначаемый допуски могут задаваться в абсолютных и относительных величинах. Более употребительными являются назначаемые и реализуемые допуски в относительном представлении.

Назначаемый допуск в относительных величинах определяется выражением:

$$dW_n = \frac{W_{nom} - W_m}{W_{nom}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $W_{nom}$  – номинальное значение входного параметра смежной подсистемы;

$W_m$  – минимальное значение входного параметра смежной подсистемы, обеспечивающее ее работоспособность на всех режимах.

Реализуемый допуск в относительном представлении определяется выражением:

$$dW_p = \frac{r \cdot W}{n \cdot W} \cdot 100\% = \frac{r}{n} \cdot 100\% = \frac{n-m}{n} \cdot 100\% \quad (3)$$

где,  $W$  – значение выходного параметра одного из  $n$  параллельно работающих элементов пассивно резервированной подсистемы.

Для реализуемых и назначаемых допусков должно выполняться условие:

$$dW_n \geq dW_p \quad (4)$$

Для практического использования интерес представляет дискретная сетка реализуемых допусков в относительном представлении. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только эти допуски. Составим таблицу реализуемых значений относительных допусков для различных структур пассивного



резервирования зависимости от параметров  $m$  и  $g$ . Каждый допуск может быть реализован при различных значениях кратностей резервирования. Представленные в таблице 1 допуски соответствуют минимальным значениям кратностей резервирования. Например, допуск 50% при  $g=1$  и  $m=1$  соот-

ветствует кратности  $K = \frac{2}{1} = 2$ , допуск 33.3% при  $g=1$  и  $m=2$  соответствует кратности  $K = \frac{3}{2}$  и т. д. Меньших значений кратностей при указанных допусках не существует.

Таблица 1. Значения реализуемых относительных допусков в процентах в зависимости от количества основных  $m$  и резервных  $g$  элементов  
Table 1. Values of realized relative tolerances in percentage depending on the number of basic  $m$  and reserve  $r$  elements

$g$	$m$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7	14.3	12.5	11.1	10.0
2	66.7	50.0	40.0	33.3	28.6	25.0	22.2	20.0	18.2
3	75.0	60.0	50.0	42.8	37.5	33.3	30.0	27.3	25.0
4	80.0	66.7	57.1	50.0	44.4	40.0	36.4	33.3	30.8
5	83.3	71.4	62.5	55.5	50.0	45.4	41.7	38.5	35.7
6	85.7	75.0	66.7	60.0	54.5	50.0	46.1	42.8	40.0
7	87.5	77.8	70.0	63.6	58.3	53.8	50.0	46.7	43.7
8	88.0	80.0	72.7	66.7	61.5	57.1	53.5	50.0	47.1
9	90.0	81.8	75.0	69.2	64.3	60.0	56.2	52.9	50.0
10	90.9	83.3	76.9	71.4	66.7	62.5	58.8	55.5	52.6
11	91.7	84.6	78.6	73.3	68.7	64.7	61.1	57.9	55.0

Наиболее важной является шкала убывающих, то есть более жестких допусков. Поэтому будем рассматривать изменение допусков по строкам. Допуски первой строки таблицы 1 (при  $g=1$ ), образуют следующий ряд значений: 50%; 33.3%; 25%; 20%; 16.7%; 14.3%; 12.5%; 11.1%; 10%. Назовем их допусками первого уровня. Соответственно допуски, задаваемые второй, третьей и последующими строками будем называть допусками второго, третьего и последующих уровней. Как видно из таблицы 1 с изменением  $g$  и  $m$  допуски повторяются с определенной периодичностью. Так допуск 50% реализуется при  $g=1$  и  $m=1$ ,  $g=2$  и  $m=2$  и т.д., допуск 33.3% реализуется при  $g=1$  и  $m=2$ ,  $g=2$  и  $m=4$  и т.д.

С ростом уровня допуска резко усложняется структура резервирования, определяемая количеством основных  $m$  и резервных  $g$  элементов. Поэтому наиболее значимыми являются допуски первого и второго уровней, имеющие более простые структуры резервирования. Совместное использование допусков первого и второго уровней обеспечивает более частую сетку реализуемых допусков. Образованная ими сетка неповторяющихся относительных реализуемых допусков имеет вид: 66.7%; 50%; 40%; 33.3%; 28.6%; 25%; 22.2%; 20%; 18.2%; 16.7%; 14.3%; 12.5%; 11.1%; 10%. Такая сетка обеспечивает хорошее приближение к назначенным допускам. Однако надо иметь в виду, что допуски различных уровней плохо совмещаются друг с другом по показателям безотказности. Это обусловлено тем, что показатели безотказности наиболее сильно зависят от количества резервных элементов  $g$  в структуре резервирования, а это количество, как видно из таблицы 1, меняется при увеличении уровня допуска.

## Взаимосвязь кратности резервирования с допуском

Первый столбец таблицы 1 соответствует подсистемам с кратным резервированием. При  $g=1$  кратность равна 2, при  $g=2$  кратность равна 3, а при  $g=11$  кратность равна 12. Таким образом, первый столбец таблицы 1 реализует изменение кратности от дублирования до двенадцати кратного резервирования. Допуски правее первого столбца соответствуют структурам с некрatным резервированием [5]. Они определяют основной объем реализуемых допусков и представляют наибольший интерес для исследования.

Следует отметить, что кратность подсистем с некрatным резервированием всегда записывается в виде дроби даже, если крат-

ность представляет собой целочисленное отношение. Кроме того, подсистемы с некрatным резервированием обладают важным свойством – показатели безотказности (надежности) подсистем с некрatным резервированием всегда выше подсистем с кратным резервированием при одних и тех же численностях  $m$  и  $n$ . Однако, платой за это полезное свойство, как будет показано в дальнейшем, является наличие у подсистем с некрatным резервированием критических значений вероятностей элементов резервированных подсистем, аналогичных подсистемам с активным резервированием [6], в которых причиной наличия критических вероятностей является ненадежность переключателей.

Каждый допуск может быть реализован при различных значениях кратностей как кратного, так и некрatного резервирования. Причем для каждого допуска существует своя шкала (линейка) различных кратностей, начинающаяся с минимального значения. Как минимальные, так и другие кратности различных допусков существенно отличаются друг от друга. Таким образом, существует большое многообразие различных кратностей для различных значений допусков, влияющих на безотказность.

Для сопоставления показателей безотказности и других характеристик при разных допусках в зависимости от рядов возрастающих кратностей целесообразно эти различные возрастающие индивидуальные кратности как – то унифицировать. В качестве унифицирующего параметра выберем величину обобщенной кратности  $K_i$ , где  $i$  – порядковый номер кратности в последовательности их возрастающих отношений при любых значениях реализуемых допусков. Например, при допуске 50% возрастающий ряд обобщенных и индивидуальных кратностей имеет вид:  $K_1 = \frac{2}{1} = 2, K_2 = \frac{4}{2}, K_3 = \frac{6}{3}$  ... При допуске

33.3% возрастающий ряд кратностей имеет вид:  $K_1 = \frac{3}{2}, K_2 = \frac{6}{4}, K_3 = \frac{9}{6}$  ... При допуске 25% возрастающий ряд кратностей имеет вид:  $K_1 = \frac{4}{3}, K_2 = \frac{8}{6}, K_3 = \frac{12}{9}$  ....

В дальнейшем на ряду с индивидуальными значениями кратностей будем использовать обобщенные значения  $K_i$ . В таблице 2 в качестве примера представлены значения одиннадцати возрастающих кратностей, в индивидуальном и обобщенном представлении, составленных для четырех допусков первого уровня таблицы 1, а в таблице 3 аналогичный ряд кратностей для трех допусков второго уровня, неповторяющихся с допусками первого уровня.



Таблица 2. Величины кратностей, соответствующие значениям четырех реализуемых относительных допусков первого уровня  
Table 2. The magnitudes of multiplicities corresponding to the values of the four implemented first-level relative tolerances

dW %	Кратности резервирования $K_i$										
	$K_1$ r=1	$K_2$ r=2	$K_3$ r=3	$K_4$ r=4	$K_5$ r=5	$K_6$ r=6	$K_7$ r=7	$K_8$ r=8	$K_9$ r=9	$K_{10}$ r=10	$K_{11}$ r=11
50.0	2	$\frac{4}{2}$	$\frac{6}{3}$	$\frac{8}{4}$	$\frac{10}{5}$	$\frac{12}{6}$	$\frac{14}{7}$	$\frac{16}{8}$	$\frac{18}{9}$	$\frac{20}{10}$	$\frac{22}{11}$
33.3	$\frac{3}{2}$	$\frac{6}{4}$	$\frac{9}{6}$	$\frac{12}{8}$	$\frac{15}{10}$	$\frac{18}{12}$	$\frac{21}{14}$	$\frac{24}{16}$	$\frac{27}{18}$	$\frac{30}{20}$	$\frac{33}{22}$
25.0	$\frac{4}{3}$	$\frac{8}{6}$	$\frac{12}{9}$	$\frac{16}{12}$	$\frac{20}{15}$	$\frac{24}{18}$	$\frac{28}{21}$	$\frac{32}{24}$	$\frac{36}{27}$	$\frac{40}{30}$	$\frac{44}{33}$
20.0	$\frac{5}{4}$	$\frac{10}{8}$	$\frac{15}{12}$	$\frac{20}{16}$	$\frac{25}{20}$	$\frac{30}{24}$	$\frac{35}{28}$	$\frac{40}{32}$	$\frac{45}{36}$	$\frac{50}{40}$	$\frac{55}{44}$

Следует отметить, что у всех допусков первого уровня индекс  $i$  обобщенной кратности  $K_i$  совпадает с количеством резервных элементов в структуре пассивного резервирования. Для допусков других уровней такого совпадения нет, что видно из

таблицы 3. Первые клетка таблицы 2 при допуске 50% и таблицы 3 при допуске 66.7% соответствуют кратному резервированию, а остальные клетки двух указанных таблиц – некратному резервированию.

Таблица 3. Величины кратностей, соответствующие значениям реализуемых относительных допусков второго уровня  
Table 3. The magnitudes of multiplicities corresponding to the values of the implemented relative tolerances of the second level

dW %	Кратности резервирования $K_i$										
	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	$K_{11}$	
66.7	3	$\frac{6}{2}$	$\frac{9}{3}$	$\frac{12}{4}$	$\frac{15}{5}$	$\frac{18}{6}$	$\frac{21}{7}$	$\frac{24}{8}$	$\frac{27}{9}$	$\frac{30}{10}$	
40	$\frac{5}{3}$	$\frac{10}{6}$	$\frac{15}{9}$	$\frac{20}{12}$	$\frac{25}{15}$	$\frac{30}{18}$	$\frac{35}{21}$	$\frac{40}{24}$	$\frac{45}{27}$	$\frac{50}{30}$	
28.6	$\frac{7}{5}$	$\frac{14}{10}$	$\frac{21}{15}$	$\frac{28}{20}$	$\frac{35}{25}$	$\frac{42}{30}$	$\frac{49}{35}$	$\frac{56}{40}$	$\frac{63}{45}$	$\frac{70}{50}$	

Одной из важнейших особенностей структур пассивного резервирования подсистемы ЛА с учетом допусков является уменьшение масс-габаритных (и стоимостных) характеристик их элементов с ужесточением допусков и возрастанием кратностей по сравнению с аналогичными характеристиками нерезервированной подсистемы. Действительно, замена нерезервированной подсистемы из одного элемента с номинальным значением выходного параметра  $W_{nom}$  на пассивно резервированную подсистему из  $n$  параллельно работающих одинаковых элементов приводит к уменьшению в  $n$  раз их выходных параметров  $W$ :  $W = \frac{W_{nom}}{n}$  (5)

В связи со сказанным можно предположить, что замена нерезервированной подсистемы на резервированную из  $n$  элементов в интересах повышения ее безотказности не приведет к существенному увеличению стоимости и масс-габаритных характеристик резервированной подсистемы в целом.

## Анализ зависимости критических вероятностей от величин допусков и кратностей резервирования

Критические значения вероятностей элементов связаны с показателями безотказности нерезервированной и пассивно резервированной подсистем ЛА. В качестве показателей безотказности подсистем будем использовать вероятности их безотказной работы.

Пусть  $P_c(t_r) = P_c$  – вероятность безотказной работы пассивно резервированной подсистемы за время выполнения задания, а

$p(t_r) = p$  – вероятность безотказной работы нерезервированной подсистемы (элемента пассивно резервированной подсистемы) за время выполнения задания. Очевидно, функция безотказности пассивно резервированной подсистемы  $P_c$  зависит от структуры резервирования (параметров  $m$  и  $n$ ) и от безотказности ее элементов  $p$ :

$$P_c = P_c(p, n, m) \quad (6)$$

Среди множества вероятностных, логико-вероятностных и логических методов расчета функции (6) выберем вероятностный метод, основанный на биномиальном законе распределения [7, 8]. Согласно этому закону функция (6) определяется как вероятность безотказной работы не менее  $m$  элементов из общего числа  $n$ :

$$P_c = \sum_{i=m}^n C_n^i \cdot p^i \cdot (1-p)^{n-i} \quad (7)$$

Для подсистем со структурами кратного резервирования любой кратности (первый столбец таблицы 1) функция безотказности  $P_c$  всегда больше функции безотказности нерезервированной подсистемы на открытом интервале:  $0 < p < 1$ . Для любых структур некратного резервирования (второй и последующие столбцы допусков таблицы 1) выполняется соотношение [5, 9, 10]:  $P_c(p, n, m) < p$ , при  $p$ , близких к нулю и  $P_c(p, n, m) > p$ , при  $p$ , близких к единице. Причем, на открытом интервале  $(0 - 1)$  зависимости  $P_c(p, n, m)$  и  $p(p)$  имеют одну точку пересечения, а уравнение имеет один вещественный корень [11-19]. Значение вероятности, соответствующее этому корню, называют критическим значением и обозначают





$$p_{kr} : P_c(p, n, m) = p \tag{8}$$

Таким образом, при некротном пассивном резервировании существуют критические значения вероятностей элементов резервированных подсистем, которые разбивают интервал (0 – 1) на два подинтервала: докритический (0-  $p_{kr}$ ), где пассивное резервирование не выгодно и закритический ( $p_{kr}$  -1), где пас-

сивное резервирование выгодно [20-26].

В таблице 4 представлены результаты расчетов методом перебора с шагом 0.001 критических значений вероятностей элементов  $p_{kr}$  для реализуемых допусков первого уровня и возрастающих кратностей в каждом из них, а в таблице 5 – аналогичные результаты для допусков второго уровня.

Таблица 4. Критические значения вероятностей  $p_{kr}$  для 11 возрастающих кратностей, соответствующих 9 реализуемым допускам первого уровня

Table 4. Critical values of probabilities  $P_{kr}$  for 11 increasing multiplicities, corresponding to 9 realizable first-level tolerances

$K_i$	dW%								
	50.0	33.3	25.0	20.0	16.7	14.3	12.5	11.1	10.0
$K_1$	-	0.500	0.768	0.869	0.917	0.943	0.958	0.968	0.975
$K_2$	0.233	0.653	0.803	0.871	0.908	0.930	0.945	0.955	0.963
$K_3$	0.348	0.679	0.804	0.865	0.900	0.921	0.936	0.947	0.955
$K_4$	0.396	0.687	0.801	0.859	0.893	0.015	0.930	0.941	0.950
$K_5$	0.422	0.690	0.799	0.855	0.889	0.910	0.926	0.937	0.946
$K_6$	0.438	0.691	0.796	0.851	0.885	0.907	0.922	0.934	0.943
$K_7$	0.449	0.691	0.794	0.848	0.882	0.904	0.919	0.931	0.940
$K_8$	0.456	0.691	0.792	0.846	0.879	0.901	0.917	0.929	0.938
$K_9$	0.462	0.691	0.790	0.844	0.877	0.899	0.915	0.927	0.936
$K_{10}$	0.467	0.691	0.789	0.842	0.875	0.897	0.913	0.925	0.934
$K_{11}$	0.470	0.691	0.787	0.840	0.873	0.896	0.912	0.924	0.933

Таблица 5. Критические значения вероятностей  $p_{kr}$  для 9 возрастающих кратностей, соответствующих 5 реализуемым допускам второго уровня

Table 5. Critical values of probabilities  $P_{kr}$  for 9 increasing multiplicities corresponding to 5 realizable second-level tolerances

$K_i$	dW%			
	66.7	40.0	28.6	22.2
$K_2$	-	0.500	0.745	0.843
$K_3$	0.084	0.579	0.755	0.835
$K_4$	0.158	0.596	0.753	0.828
$K_5$	0.197	0.602	0.750	0.823
$K_6$	0.221	0.605	0.748	0.819
$K_7$	0.237	0.607	0.746	0.816
$K_8$	0.248	0.608	0.745	0.814
$K_9$	0.257	0.608	0.743	0.812
$K_{10}$	0.263	0.609	0.742	0.810

Для иллюстрации результатов, представленных в таблицах 4 и 5, на рисунке 1 показаны зависимости критических вероятностей  $p_{kr}$  от кратностей  $K_i$  для допусков первого уровня, а на рисунке 2 показаны зависимости  $p_{kr}$  от кратностей  $K_i$  для допусков второго уровня.

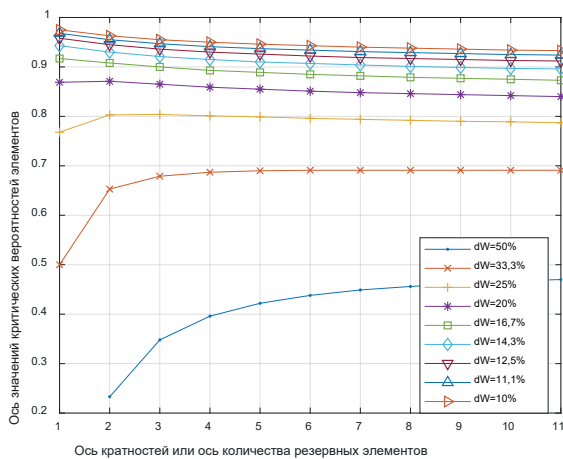


Рис. 1. Зависимости  $p_{kr}$  от  $K_i$  для допусков первого уровня  
Fig. 1. Dependencies  $p_{kr}$  on  $K_i$  for first level tolerances

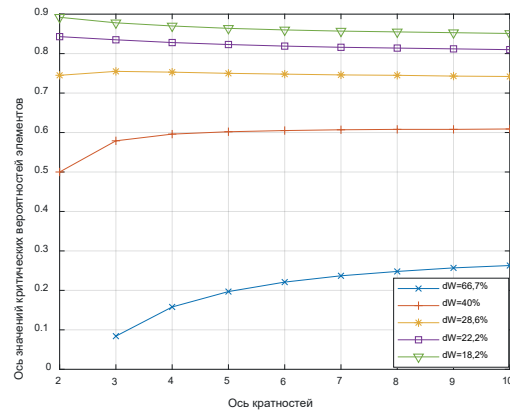


Рис. 2. Зависимости  $p_{kr}$  от  $K_i$  для допусков второго уровня

Fig. 2. Dependencies  $p_{kr}$  on  $K_i$  for second level tolerances

Анализ представленных зависимостей для реализуемых допусков первого и второго уровней показывает, что для каждого уровня допусков существуют равновесные значения  $dW_p$ , при которых критические значения  $p_{kr}$  практически не меняются в зависимости от кратностей  $K_i$ .



## Заключение

Данная работа представляет собой первую часть исследования, посвященного анализу и синтезу пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков. В работе получены следующие результаты:

- 1) Показана необходимость учета двух видов допусков на уменьшение выходных (входных) параметров связанных подсистем – назначаемых, задаваемых на непрерывной шкале величин и реализуемых, определяемых дискретной структурой резервирования, причем реализуемый допуск всегда должен быть не больше назначенного;
- 2) Установлено, что пассивное резервирование с учетом реализуемых допусков обеспечивается двумя принципиально разными способами – кратным и некратным резервированием, причем, наиболее значимыми для практики по количеству, разнообразию величин и значениям показателей безотказности являются реализуемые допуски, обеспечиваемые методами некратного резервирования;
- 3) Выявлена возможность реализации любого допуска при различных значениях ряда возрастающих индивидуальных кратностей, что позволяет для заданного допуска ставить задачу поиска оптимальной кратности и соответствующей ей оптимальной структуры резервирования в интересах обеспечения максимальной безотказности резервированных подсистем;
- 4) Показано, что подсистемы с некратным пассивным резервированием имеют значения вероятностей элементов, называемых критическими  $p_{kr}$ , которые определяют существование областей  $(0 - p_{kr})$ , где данный вид резервирования не выгоден;
- 5) Показано, что при любом уровне допуска и любой кратности резервирования с уменьшением (ужесточением) величин допусков критические значения вероятностей  $p_{kr}$  монотонно возрастают;
- 6) Выявлен разный характер изменения критических вероятностей  $p_{kr}$  в зависимости от кратностей для различных значений реализуемых допусков. Так, при допусках первого уровня, больших 25% с ростом кратности величины  $p_{kr}$  возрастают и меньших 25% с ростом кратности – убывают. Аналогичный характер изменения величин  $p_{kr}$  имеет место относительно допуска 28.6% для реализуемых допусков второго уровня.

## Список использованных источников

- [1] Герасимова Д.С., Палухин А.А. Резервирование элементов как способ повышения надежности системы пожаротушения самолета Ту-204 // Решетневские чтения. 2017. Т. 21, № 1. С. 431-433. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32290874> (дата обращения: 13.01.2019).
- [2] Wang J., Zhang T., Zhou H., Wang S. Inverse design of aircraft cabin environment using computational fluid dynamics-based proper orthogonal decomposition method // Indoor and Built Environment. 2018. Vol. 27, Issue 10. Pp. 1379-1391. DOI: 10.1177/1420326X17718053
- [3] Дедков В.К., Татуев А.И. Обеспечение надежности технических объектов по стадиям их жизненного цикла. М.: Машиностроение-Полет, 2010. 214 с.
- [4] Ouadine A.Y., Mjahed M., Ayad H., El Kari A. Aircraft Air Compressor Bearing Diagnosis Using Discriminant Analysis and Cooperative Genetic Algorithm and Neural Network Approaches // Applied Sciences. 2018. Vol. 8, Issue 11. Pp. 2243. DOI: 10.3390/app8112243
- [5] Debeljkovic D.L.J., Buzurovic I.M., Simeunovic G.V. Consistency and Lyapunov stability of linear singular time delay systems: A geometric approach // Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2018. Vol. 11, Issue 4. Pp. 123-135. DOI: 10.14529/mmp180409
- [6] Гришин В.М., Ко П.М. Оптимизация безотказности систем управления ЛА при активном нагруженном резервировании // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16, № 5. С. 52-59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12830704> (дата обращения: 13.01.2019).
- [7] Mandal K.K., Kuar A.S., Mitra S. Experimental investigation on laser micro-machining of Al 7075 Al // Optics and Laser Technology. 2018. Vol. 107. Pp. 260-267. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.05.017
- [8] Holford W.D. An agential realist perspective on the construction and flow of knowledge: the case of dynamic entanglement and “cuts” within an aircraft engine manufacturing workplace // Journal of Knowledge Management. 2018. Vol. 22, Issue 7. Pp. 1442-1470. DOI: 10.1108/JKM-08-2017-0342
- [9] Yang X., Yang J., Zhang Z., Ma J., Sun Y., Liu H. A review of civil aircraft arresting system for runway overruns // Progress in Aerospace Sciences. 2018. Vol. 102. Pp. 99-121. DOI: 10.1016/j.paerosci.2018.07.006
- [10] Черкасова Н.Г., Крылова О.К. Повышение эффективности очистки выбросов электролизного производства внедрением горелочного устройства при конструировании летательных аппаратов // Решетневские чтения. 2017. Т. 21, № 2. С. 121-122. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32291013> (дата обращения: 13.01.2019).
- [11] Rodrigues F.F., Pascoa J.C., Trancossi M. Experimental Analysis of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators Thermal Characteristics under External Flow Influence // Journal of Heat Transfer. 2018. Vol. 140, Issue 10. Pp. 102801. DOI: 10.1115/1.4040152
- [12] Dancila B.D., Botez R.M. Vertical flight path segments sets for aircraft flight plan prediction and optimization // Aeronautical Journal. 2018. Vol. 122, Issue 1255. Pp. 1371-1424. DOI: 10.1017/aer.2018.67
- [13] Meyer R.D., Tan G. Use of proper orthogonal decomposition and linear stochastic estimation technique to investigate real-time detailed airflows for building ventilation // Indoor and Built Environment. 2016. Vol. 25, Issue 2. Pp. 378-389. DOI: 10.1177/1420326X14556845
- [14] Yang X., Zhang Z., Yang J., Sun Y. Fluid-structure interaction analysis of the drop impact test for helicopter fuel tank // SpringerPlus. 2016. Vol. 5, issue 1. Pp. 1573. DOI: 10.1186/s40064-016-3040-5
- [15] Wei Y., Zhang T., Wang S. Prompt design of the air-supply opening size for a commercial airplane based on the proper orthogonal decomposition of flows // Building and Environment. 2016. Vol. 96. Pp. 131-141. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.11.020
- [16] Yaqub M.F., Loparo K.A. An automated approach for bearing damage detection // JVC/Journal of Vibration and Control. 2016. Vol. 22, Issue 14. Pp. 3253-3266. DOI: 10.1177/1077546314562621
- [17] Gupta P., Pradhan M.K. Fault detection analysis in rolling element bearing: A review // Materials Today: Proceedings. 2017. Vol. 4, Issue 2. Part A. Pp. 2085-2094. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.054



- [18] Siti I., Mjahed M., Ayad H., El Kari A. New designing approaches for quadcopter pid controllers using reference model and genetic algorithm techniques // *International Review of Automatic Control*. 2017. Vol. 10, Issue 3. Pp. 240-248. DOI: 10.15866/ireaco.v10i3.12115
- [19] Antar M., Chantzis D., Marimuthu S., Hayward P. High Speed EDM and Laser Drilling of Aerospace Alloys // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 42. Pp. 526-531. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.245
- [20] Hu D., Song B., Wang D., Chen Z. Experiment and numerical simulation of a full-scale helicopter composite cockpit structure subject to a bird strike // *Composite Structures*. 2016. Vol. 149. Pp. 385-397. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.04.035
- [21] Yang X., Zhang Z., Xing Y., Yang J., Sun Y. A new theoretical model of aircraft arresting system based on polymeric foam material // *Aerospace Science and Technology*. 2017. Vol. 66. Pp. 284-293. DOI: 10.1016/j.ast.2017.03.019
- [22] Baranowski P., Malachowski J., Mazurkiewicz L. Numerical and experimental testing of vehicle tyre under impulse loading conditions // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016. Vol. 106. Pp. 346-356. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2015.12.028
- [23] Yao S., Yue Z.F., Geng X., Wang P. Finite element analysis of aircraft tire for safety assessment with CV and CPM methods // *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2017. Vol. 13, Issue 3. Pp. 501-518. DOI: 10.1108/MMMS-04-2017-0024
- [24] Hong-Yu Y., Xiang-Jun K., Ya-Jie S., Xian-Bo X., Ning-Ning L. Aircraft test of engineered material arresting system // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2018. Vol. 90, Issue 1. Pp. 229-236. DOI: 10.1108/AEAT-05-2016-0082
- [25] Li M.Z., Suh D.Y., Ryerson M.S. Visualizing aviation impacts: Modeling current and future flight trajectories with publicly available flight data // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. Vol. 63. Pp. 769-785. DOI: 10.1016/j.trd.2018.07.009
- [26] Kumar B.R. Investigation on buckling response of the aircraft's wing using finite-element method // *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2018. Pp. 1-10. DOI: 10.1080/14484846.2018.1483467

Поступила 13.01.2019; принята к публикации 20.02.2019;  
опубликована онлайн 19.04.2019.

#### Об авторах:

**Гришин Вячеслав Михайлович**, доцент, кафедра системного анализа и управления, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (125993, Россия, Волоколамское шоссе, д. 4), кандидат технических наук, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3002-8819>, vyacheslav.grishin@gmail.com

**Тюан Ву Чонг**, аспирант, кафедра системного анализа и управления, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет) (125993, Россия, Волоколамское шоссе, д. 4), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2738-4836>, Giadinh5@gmail.com

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## References

- [1] Gerasimova D.S., Palukhin A.A. Element redundancy as the method of improving reliability of fire-fighting system of TU-204 aircraft. *Reshetnev Readings*. 2017; 21(1):431-433. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32290874> (accessed 13.01.2019). (In Russ.)
- [2] Wang J., Zhang T., Zhou H., Wang S. Inverse design of aircraft cabin environment using computational fluid dynamics-based proper orthogonal decomposition method. *Indoor and Built Environment*. 2018; 27(10):1379-1391. (In Eng.) DOI: 10.1177/1420326X17718053
- [3] Dedkov V.K., Tatuyev A.I. Ensuring the reliability of technical objects in stages of their life cycle. M.: Mashinostroyeniye – Polet, 2010. (In Russ.)
- [4] Ouadine A.Y., Mjahed M., Ayad H., El Kari A. Aircraft Air Compressor Bearing Diagnosis Using Discriminant Analysis and Cooperative Genetic Algorithm and Neural Network Approaches. *Applied Sciences*. 2018; 8(11):2243. (In Eng.) DOI: 10.3390/app8112243
- [5] Debeljkovic D.L.J., Buzurovic I.M., Simeunovic G.V. Consistency and Lyapunov stability of linear singular time delay systems: A geometric approach. *Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*. 2018; 11(4):123-135. (In Eng.) DOI: 10.14529/mmp180409
- [6] Grishin V.M., Ko P.M. Optimization of reliability of aircraft control systems with active load redundancy. *Vestnik Moskovskogo Aviacionnogo Instituta = Aerospace MAI Journal*. 2009; 16(5):52-59. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12830704> (accessed 13.01.2019). (In Russ.)
- [7] Mandal K.K., Kuar A.S., Mitra S. Experimental investigation on laser micro-machining of Al 7075 Al. *Optics and Laser Technology*. 2018; 107:260-267. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.05.017
- [8] Holford W.D. An agential realist perspective on the construction and flow of knowledge: the case of dynamic entanglement and “cuts” within an aircraft engine manufacturing workplace. *Journal of Knowledge Management*. 2018; 22(7):1442-1470. (In Eng.) DOI: 10.1108/JKM-08-2017-0342
- [9] Yang X., Yang J., Zhang Z., Ma J., Sun Y., Liu H. A review of civil aircraft arresting system for runway overruns. *Progress in Aerospace Sciences*. 2018; 102:99-121. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.paerosci.2018.07.006
- [10] Cherkasova N.G., Krylova O.K. Improving the efficiency of electrolysis production purification by the introduction of burners in the design of aircraft. *Reshetnev Readings*. 2017; 21(2):121-122. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32291013> (accessed 13.01.2019). (In Russ.)
- [11] Rodrigues F.F., Pascoa J.C., Trancossi M. Experimental Analysis of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators Thermal Characteristics under External Flow Influence. *Journal of Heat Transfer*. 2018; 140(10):102801. (In Eng.) DOI: 10.1115/1.4040152
- [12] Dancila B.D., Botez R.M. Vertical flight path segments sets for aircraft flight plan prediction and optimization. *Aeronautical Journal*. 2018; 122(1255):Pp. 1371-1424. (In Eng.) DOI: 10.1017/aer.2018.67
- [13] Meyer R.D., Tan G. Use of proper orthogonal decomposition





- and linear stochastic estimation technique to investigate real-time detailed airflows for building ventilation. *Indoor and Built Environment*. 2016; 25(2):378-389. (In Eng.) DOI: 10.1177/1420326X14556845
- [14] Yang X., Zhang Z., Yang J., Sun Y. Fluid-structure interaction analysis of the drop impact test for helicopter fuel tank. *SpringerPlus*. 2016; 5(1):1573. (In Eng.) DOI: 10.1186/s40064-016-3040-5
- [15] Wei Y., Zhang T., Wang S. Prompt design of the air-supply opening size for a commercial airplane based on the proper orthogonal decomposition of flows. *Building and Environment*. 2016; 96:131-141. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.11.020
- [16] Yaqub M.F., Loparo K.A. An automated approach for bearing damage detection. *JVC/Journal of Vibration and Control*. 2016; 22(14):3253-3266. (In Eng.) DOI: 10.1177/1077546314562621
- [17] Gupta P., Pradhan M.K. Fault detection analysis in rolling element bearing: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2017; 4(2-A):2085-2094. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.054
- [18] Siti I., Mjahed M., Ayad H., El Kari A. New designing approaches for quadcopter pid controllers using reference model and genetic algorithm techniques. *International Review of Automatic Control*. 2017; 10(3):240-248. (In Eng.) DOI: 10.15866/ireaco.v10i3.12115
- [19] Antar M., Chantzis D., Marimuthu S., Hayward P. High Speed EDM and Laser Drilling of Aerospace Alloys. *Procedia CIRP*. 2016; 42:526-531. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.245
- [20] Hu D., Song B., Wang D., Chen Z. Experiment and numerical simulation of a full-scale helicopter composite cockpit structure subject to a bird strike. *Composite Structures*. 2016; 149:385-397. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.04.035
- [21] Yang X., Zhang Z., Xing Y., Yang J., Sun Y. A new theoretical model of aircraft arresting system based on polymeric foam material. *Aerospace Science and Technology*. 2017; 66:284-293. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.ast.2017.03.019
- [22] Baranowski P., Malachowski J., Mazurkiewicz L. Numerical and experimental testing of vehicle tyre under impulse loading conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016; 106:346-356. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.ijmecs.2015.12.028
- [23] Yao S., Yue Z.F., Geng X., Wang P. Finite element analysis of aircraft tire for safety assessment with CV and CPM methods. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2017; 13(3):501-518. (In Eng.) DOI: 10.1108/MMMS-04-2017-0024
- [24] Hong-Yu Y., Xiang-Jun K., Ya-Jie S., Xian-Bo X., Ning-Ning L. Aircraft test of engineered material arresting system. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2018; 90(1):229-236. (In Eng.) DOI: 10.1108/AEAT-05-2016-0082
- [25] Li M.Z., Suh D.Y., Ryerson M.S. Visualizing aviation impacts: Modeling current and future flight trajectories with publicly available flight data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018; 63:769-785. (In Eng.) DOI: 10.1016/j.trd.2018.07.009
- [26] Kumar B.R. Investigation on buckling response of the aircraft's wing using finite-element method. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2018; 1-10. (In Eng.) DOI: 10.1080/14484846.2018.1483467
- Submitted 13.01.2019; revised 20.02.2019; published online 19.04.2019.

#### About the authors:

**Vyacheslav M. Grishin**, Associate Professor, Associate Professor of the Department of System Analysis and Management, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia), Ph.D. (Engineering), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3002-8819>, [vyacheslav.grishin@gmail.com](mailto:vyacheslav.grishin@gmail.com)

**Vu Trong Tuan**, Postgraduate student, Department of System Analysis and Management, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2738-4836>, [Giadinh5@gmail.com](mailto:Giadinh5@gmail.com)

*All authors have read and approved the final manuscript.*

