

Для цитирования: Гришин В.М., Ву Чонг Туан. Учет существенных факторов и ограничений при исследовании и разработке пассивно резервированных подсистем летательных аппаратов с учетом допусков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(1): 113-122. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-113-122

For citation: Grishin V.M., Wu Chong Tuan. Consideration of significant factors and limitations in the study and development of passively reserved aircraft subsystems, taking into account tolerances. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 113-122. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-113-122

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.5.09

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-113-122

УЧЕТ СУЩЕСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ И ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И РАЗРАБОТКЕ ПАССИВНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ

Гришин В.М.¹, Ву Чонг Туан²

¹⁻²Московский авиационный институт

(Национальный исследовательский университет),

¹⁻²125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Россия,

¹e-mail: grishin.vyacheslav677@gmail.com, ²e-mail: vuchongtuan@rambler.ru

Резюме. Цель. 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. 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. **Метод.** В ходе исследования расчеты проводились при использовании методов вероятности, перебора. Показана необходимость учета назначаемых и реализуемых допусков, кратного и некратного резервирования, дискретных шкал реализуемых допусков с различными уровнями значимости, критических вероятностей, определяющих диапазоны вероятностей элементов, где выгодно и невыгодно резервирование. **Результат.** 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. 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 $p_{кр}$ практически не меняются в зависимости от кратностей K_i . **Вывод.** Выявлен разный характер изменения критических вероятностей $p_{кр}$ в зависимости от кратностей для различных значений реализуемых допусков. Так, при допусках первого уровня, больших 25% с ростом кратности величины $p_{кр}$ возрастают и меньших 25% с ростом кратности убывают. Аналогичный характер изменения величин $p_{кр}$ имеет местотносительно допуска 28.6% для реализуемых допусков второго уровня.

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

CONSIDERATION OF SIGNIFICANT FACTORS AND LIMITATIONS IN THE STUDY AND DEVELOPMENT OF PASSIVELY RESERVED AIRCRAFT SUBSYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT TOLERANCES

Vyacheslav M. Grishin¹, Wu Chong Tuan²

¹⁻²Moscow Aviation Institute (National Research University),

¹⁻²4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia,

¹e-mail: grishin.vyacheslav677@gmail.com, ²e-mail: vuchongtuan@rambler.ru

Abstract. Objectives The relevance of this article lies in the fact that the problem of increasing the reliability of subsystems of aviation and rocket and space technology in case of sudden independent refusals determines one of the important areas of scientific research. The work is aimed at identifying and analyzing specific features that must be considered when researching and developing passively redundant subsystems, taking into account tolerances in case of sudden independent failures. **Method** During the study, calculations were carried out using the methods of probability, search. The necessity of taking into account assigned and implemented tolerances, multiple and non-multiple reservation, discrete scales of realizable tolerances with different levels of significance, critical probabilities, determining the probability ranges of elements, where redundancy is profitable and unprofitable, is shown. **Result** The possibility of implementing any tolerance for different values of a number of increasing individual multiplicities is revealed, which allows for a given tolerance to pose the task of finding the optimal multiplicity and its corresponding optimal backup structure in the interests of ensuring maximum reliability of the redundant subsystems. Analysis of the presented dependencies for the implemented tolerances of the first and second levels shows that for each tolerance level there are equilibrium values dW_p at which the critical values of p_{kr} practically do not change depending on the multiplicities K_i . **Conclusion** A different nature of the change in the critical probabilities p_{kr} was found depending on the multiplicities for different values of the tolerances to be realized. So, with tolerances of the first level, larger than 25%, with increasing multiplicity, p_{kr} increases and smaller than 25% decreases with increasing multiplicity. The similar nature of the change in the p_{kr} values has a 28.6% tolerance for the implemented second-level tolerances.

Keywords: sudden failures, tolerances for output (input) parameters of related subsystems, redundancy ratio, critical probabilities, reliability of subsystems

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.

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

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.

Методы исследования. Составим таблицу реализуемых значений относительных допусков для различных структур пассивного резервирования зависимости от параметров m и r. Каждый допуск может быть реализован при различных значениях кратностей резервирования. Представленные в табл. 1 допуски соответствуют минимальным значениям кратностей резервирования.

Например, допуск 50% при r=1 и m=1 соответствует кратности $K = \frac{2}{1} = 2$, допуск 33.3% при r=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 r элементов
Table 1. Values of realized relative tolerances in percent depending on the number of basic m and reserve r elements

r	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 табл.1 (при r=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 табл.1 с изменением r и m допуски повторяются с определенной периодичностью. Так допуск 50% реализуется при r=1 и m=1, r=2 и m=2 и т.д., допуск 33.3% реализуется при r=1 и m=2, r=2 и m=4 и т.д.

С ростом уровня допуска резко усложняется структура резервирования, определяемая количеством основных m и резервных r 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. Образующая 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 r в структуре резервирования, а это количество, как видно из табл. 1, меняется при увеличении уровня допуска.

Взаимосвязь кратности резервирования с допуском. Первый столбец таблицы 1 соответствует подсистемам с кратным резервированием. При $r=1$ кратность равна 2, при $r=2$ кратность равна 3, а при $r=11$ кратность равна 12. Таким образом, первый столбец таблицы 1 реализует изменение кратности от дублирования до двенадцатикратного 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 кратность 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 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: $K_1 = \frac{2}{1} = 2, K_2 = \frac{4}{2}, K_3 = \frac{6}{3} \dots$

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

В дальнейшем наряду с индивидуальными значениями кратностей будем использовать обобщенные значения K_i .

В табл. 2 в качестве примера представлены значения одиннадцати возрастающих кратностей, в индивидуальном и обобщенном представлении, составленных для четырех допусков первого уровня табл.1, а в табл.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 Redundancy ratio										
	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 табл.3.

Первая клетка табл.2 при допуске 50% и табл. 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 Redundancy ratio									
	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 :

$$W = \frac{W_{nom}}{n} \quad (5)$$

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.

Обсуждение результатов. 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 $P_c(t_3) = P_c$ – вероятность безотказной работы пассивно резервированной подсистемы за время выполнения задания, а $p(t_3) = p$ 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 табл.1. функция безотказности P_c всегда больше функции безотказности нерезервированной подсистемы на открытом интервале: $0 < p < 1$.

Для любых структур некрatного резервирования (второй и последующие столбцы допусков табл.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. Значение вероятности, соответствующее этому корню, называют критическим значением и обозначают p_{kr} :

$$P_c(p, n, m) = p \quad (8)$$

Таким образом, при некрatном 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 пассивное резервирование выгодно.

Таблица 4. Критические значения вероятностей p_{kr} для 11 возрастающих кратностей, соответствующих 9 реализуемым допускам первого уровня
Table 4. Critical values of the probabilities p_{kr} for 11 ascending multiplicities corresponding to 9 realized 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	0.915	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

В табл. 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 табл. 5 – аналогичные результаты для допусков второго уровня.

Таблица 5. Критические значения вероятностей p_{kr} для 9 возрастающих кратностей, соответствующих 5 реализуемым допускам второго уровня
Table 5. Critical values of the probabilities p_{kr} for 9 increasing multiplicities corresponding to the 5 second-level tolerable tolerances

K_i	dW%				
	66.7	40.0	28.6	22.2	18.2
K_2	-	0.500	0.745	0.843	0.892
K_3	0.084	0.579	0.755	0.835	0.878
K_4	0.158	0.596	0.753	0.828	0.870
K_5	0.197	0.602	0.750	0.823	0.864
K_6	0.221	0.605	0.748	0.819	0.860
K_7	0.237	0.607	0.746	0.816	0.857
K_8	0.248	0.608	0.745	0.814	0.855
K_9	0.257	0.608	0.743	0.812	0.853
K_{10}	0.263	0.609	0.742	0.810	0.851

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

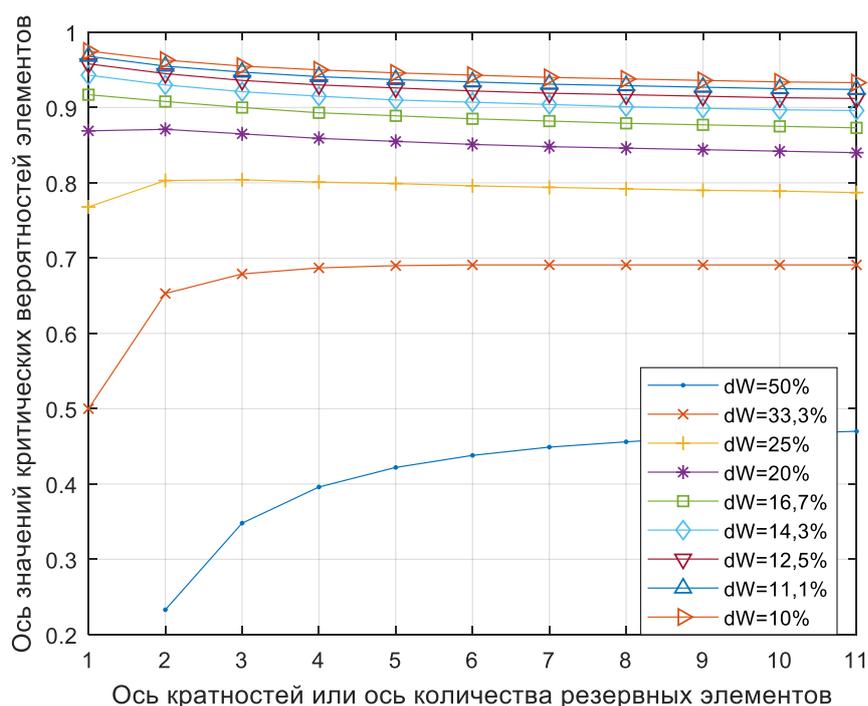


Рис.1. Зависимости p_{kr} от K_i для допусков первого уровня
Fig.1. P_{kr} versus K_i for first level tolerances

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 .

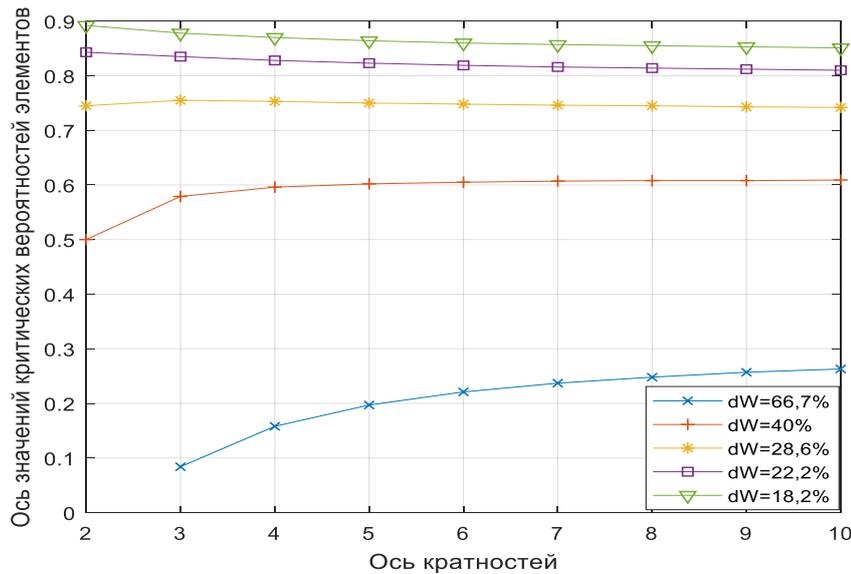


Рис. 2. Зависимость p_{kr} от K_i для допусков второго уровня
Fig.1. P_{kr} versus K_i for second level tolerances

Вывод. 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 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.

Библиографический список:

1. Герасимова Д.С., Палухин А.А. Резервирование элементов как способ повышения надежности системы пожаротушения самолета ТУ-204. Решетневские чтения, 2017, 21(1), 431-433.
2. Анцелиович Л.Л. Надежность, безотказность и живучесть самолета. Москва: Машиностроение, 1985.
3. Дедков В.К., Татуев А.И. Обеспечение надежности технических объектов по стадиям их жизненного цикла. Москва: Машиностроение. Полет, 2010.

4. Редько П.Г. Повышение безотказности и улучшение характеристик электрогидравлических следящих приводов. Москва: Издательский центр МГТУ “Станкин”, 2002.
5. Епифанов А.Д. Надежность систем управления. Москва: Машиностроение, 1975.
6. Гришин В.М., Пью Маунг Ко. Оптимизация безотказности систем управления ЛА при активном нагруженном резервировании. Вестник МАИ, 2009, 16(5), 52-59.
7. Бессонов А.А., Мороз А.В. Надежность систем автоматического регулирования. Ленинград: Энергоатомиздат, 1984.
8. Милёхин Ю.М., Берсон А.Ю., Кавицкая В.К., Еренбург Э.И. Надежность ракетных двигателей на твердом топливе. Москва: ООО Эврика, 2005.
9. Половко А.М., Гуров С.И. Основы теории надежности. Санкт-Петербург: БХВ Петербург, 2006.
10. Черкасова Н.Г., Крылова О.К. Повышение эффективности очистки выбросов электролизного производства внедрением горелочного устройства при конструировании летательных аппаратов. Решетневские чтения, 2017, 21(2), 121-122.

References:

1. Gerasimova D.S., Palukhin A.A. Rezervirovaniye elementov kak sposob povysheniya nadezhnosti sistemy pozharotusheniya samoleta TU-204. Reshetnevskiy chteniye, 2017, 21(1), 431-433. [Gerasimova, D.S., Palukhin, A.A. Reservation of elements as a way to improve the reliability of the fire extinguishing system of the TU-204. Reshetnev Readings, 2017, 21(1), 431-433. (In Russ)]
2. Antseliovich L.L. Nadezhnost', bezotkaznost' i zhivuchest' samoleta. Moskva: Mashinostroyeniye, 1985 [Anceliovich, L.L. Reliability, reliability and survivability of the aircraft. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985. (In Russ)]
3. Dedkov V.K., Tatuyev A.I. Obespecheniye nadezhnosti tekhnicheskikh ob"yektov po stadiyam ikh zhiznennogo tsikla. Moskva: Mashinostroyeniye Polet, 2010. [Dedkov V.K., Tatuyev, A.I. Ensuring the reliability of technical objects in stages of their life cycle. Moscow: MashinostroyeniyePolet, 2010. (In Russ)]
4. Red'ko P.G. Povysheniye bezotkaznosti i uluchsheniye kharakteristik elektrogidravlicheskikh sledya-shchikh privodov. Moskva: Izdatel'skiy tsentr MGTU “Stankin”, 2002 [Redko P.G. Improving reliability and improving the characteristics of electro-hydraulic servo drives. Moscow: Publishing Center MSTU “Stankin”, 2002. (In Russ)]
5. Yepifanov A.D. Nadezhnost' sistem upravleniya. Moskva: Mashinostroyeniye, 1975. [Epifanov A.D. Reliability of control systems. Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. (In Russ)]
6. Grishin V.M., P'o Maung Ko. Optimizatsiya bezotkaznosti sistem upravleniya LA pri aktivnom nagruzhennom rezervirovanii. Vestnik MAI, 2009, 16(5), 52-59. [Grishin V.M., Pyo, Maung Ko. Optimization of the reliability of aircraft control systems with active load redundancy. Vestnik MAI, 2009, 16(5), 52-59. (In Russ)]
7. Bessonov A.A., Moroz A.V. Nadezhnost' sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. Leningrad: Energoatomizdat, 1984. [Bessonov A.A., Moroz, A.V. Reliability of automatic control systems. Leningrad: Energoatomizdat, 1984. (In Russ)]
8. Milokhin YU.M., Berson A.YU., Kavitskaya V.K., Yerenburg E.I. Nadezhnost' raketnykh dvigateley na tverdom toplive. Moskva: ООО Evrika, 2005. [Milekhi Yu.M., Berson, A.Yu., Kavitskaya, V.K., Erenburg, E.I. Reliability of solid-fuel rocket engines. Moscow: LLC Evrika, 2005. (In Russ)]
9. Polovko A.M., Gurov S.I. Osnovy teorii nadezhnosti. Sankt-Peterburg: BKHV Peterburg, 2006. [Polovko A.M., Gurov, S.I. Fundamentals of the theory of reliability. Saint Petersburg: BKHV Peterburg, 2006, p. 247. (In Russ)]
10. Cherkasova N.G., Krylova O.K. Povysheniye effektivnosti ochistki vybrosov elektroliznogo proiz-vodstva vnedreniyem gorelochnogo ustroystva pri konstruirovanii letatel'nykh apparatov. Reshetnev-skiye chteniye, 2017, 21(2), 121-122. [Cherkasova N.G., Krylova, O.K. Improving the efficiency of cleaning emissions of electrolysis production by the introduction of a burner device in the design of aircraft. Reshetnev Readings, 2017, 21(2), 121-122. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Гришин Вячеслав Михайлович - кандидат технических наук, доцент, кафедра системного анализа и управления.

Ву Чонг Туан – аспирант, кафедра системного анализа и управления.

Information about the authors:

Vyacheslav M. Grishin - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Department of Systems Analysis and Management.

Wu Chong Tuan - Graduate student, Department of Systems Analysis and Management.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.02.2019.

Принята в печать 22.03.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.02.2019.

Accepted for publication 22.03.2019.