

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ПАССИВНО РЕЗЕРВИРОВАННЫХ ПОДСИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ДОПУСКОВ

Гришин В.М.¹, Ву Чонг Туан²

(Московский авиационный институт, Москва)

Работа посвящена исследованию безотказности пассивно резервированных подсистем летательных аппаратов с учетом допусков на уменьшение их выходных параметров при внезапных отказах элементов. Исследовано влияние величин безотказности элементов, допусков двух уровней и кратности резервирования на безотказность пассивно резервированных подсистем в целом. Показано, что минимальные кратности резервирования в интересах повышения безотказности рассматриваемых подсистем летательных аппаратов выгодно применять только при больших допусках и низких вероятностях безотказной работы их элементов.

Ключевые слова: безотказность подсистем; безотказность элементов; кратность резервирования; некрatное резервирование; критическая вероятность элементов; допуск на уменьшение выходных параметров подсистем.

1. Введение

Безотказность пассивно резервированных подсистем летательных аппаратов (ЛА) с учетом допусков при внезапных отказах не является широко обсуждаемой темой в теории надежности. Однако потребности практики требуют глубокого и всестороннего исследования данного вопроса. Предметом рассмотрения в данной работе являются пары подсистем, связанные между собой по выходному/входному параметру W .

Особенность первой подсистемы является недопустимость даже кратковременных перерывов в работе и не удовлетворение требованиям по ее безотказности. Это приводит к необходимости введения в нее избыточности методами кратного

¹ Гришин Вячеслав Михайлович, к.т.н., доцент (Vyacheslav.Grishin@gmail.com)

² Ву Чонг Туан, аспирант (giadinh5@gmail.com)

и некратного резервирования. Особенностью второй подсистемы является возможность отклонения ее входного параметра W в меньшую сторону в пределах допуска, определяемого конструкторско-технической документацией. Структура пассивного резервирования первой подсистемы (общее количество элементов n , количество основных элементов m и количество резервных элементов r) выбирается таким образом, чтобы при отказе всех ее резервных элементов обеспечивался требуемый уровень ее безотказности и при этом уменьшение ее выходного параметра W , поступающего на вход второй подсистемы не выходило за пределы допуска.

Примерами пар связанных подсистем являются: система питания топливом – двигатель ЛА [1], усилитель мощности – рулевой привод, рулевой привод – рулевое устройство контуров управления ЛА [14], система питания борта ЛА постоянным и переменным током – потребители электроэнергии [7] и т. п. В качестве выходного параметра могут выступать суммарная производительность топливных насосов системы питания топливом двигателя ЛА, суммарная выходная мощность синхронных генераторов системы обеспечения переменным током борта ЛА и т.д. Так система питания топливом, связанная с двигателем, при отказах допустимого количества топливных насосов должна обеспечивать работу двигателя на всех режимах. Аналогичная ситуация имеет место в связанных подсистемах: усилитель мощности контура управления – рулевой привод, рулевой привод – орган управления ЛА и т.д.

Целью работы является поиск способов повышения безотказности пассивно резервированных подсистем с учетом допусков путем исследования влияния на безотказность существенных факторов.

2. Постановка задачи

Обычно модель исследования составляют факторы, наиболее сильно влияющие на цель работы. Эти факторы называют существенными. Поиск путей повышения безотказности подсистем рассматриваемого класса

осуществляется для удовлетворения техническим требованиям [16]. Анализ множества видимых факторов, влияющих на безотказность этих подсистем показывает, что существенными являются три фактора: безотказность элементов резервированной подсистемы, кратность резервирования и величина допуска на отклонение ее выходного параметра.

Величина допуска на отклонение выходного параметра является дискретной величиной, определяемой структурой резервирования, т.е. параметрами n , m и r :

$$n = m + r \quad (1)$$

Структуру резервирования удобно задавать параметрами n и m , так как они одновременно определяют не только структуру, но и кратность резервирования [13]:

$$K = \frac{n}{m} \quad (2)$$

Допуск, задаваемый структурой резервирования, является реализуемым допуском. Его удобно задавать в относительном представлении, выраженном в процентах как отношение количества резервных элементов к общему количеству элементов:

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

Этот допуск определяет величину допустимого отклонения выходного параметра пассивно резервированной подсистемы в относительном представлении, выраженном в процентах:

$$dW_p = \frac{r \cdot W}{n \cdot W} \cdot 100\% \quad (4)$$

где, W – значение выходного параметра одного элемента пассивно резервированной подсистемы.

При разработке пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков реализуемый допуск dW_p должен быть не больше допуск dW_n , назначенного на смежную подсистему в соответствии с нормативно технической документацией, т.е.

$$dW_n \geq dW_p \quad (5)$$

Введем следующие обозначения. В соответствии с [4] примем в качестве критерия $P_c(t_3) = P_c$ -вероятность безотказной работы пассивно резервированной подсистемы за время выполнения задания, а в качестве показателя безотказности элемента пассивно резервированной подсистемы $p(t_3) = p$ - вероятность его безотказной работы за время выполнения задания.

Одной из важных особенностей исследования и разработки пассивно резервированных подсистем с учетом допусков, описанных в [21], является то, что подавляющее количество реализуемых допусков обеспечивается методами некрatного резервирования и лишь очень небольшое количество реализуемых допусков обеспечивается методами кратного резервирования. Системы с некрatным резервированием характеризуются наличием, так называемых, критических вероятностей p_{kr} , аналогичных некоторым видам активного резервирования [6]. Значение p_{kr} определяет закритическую область $(p_{kr}-1)$, в которой безотказность резервированной подсистемы выше безотказности нерезервированной и докритическую область $(0-p_{kr})$, где данный вид резервирования не выгоден. Критическая вероятность является еще одним, не сразу видимым, существенным фактором, влияющим на безотказность пассивно резервированной подсистемы.

Таким образом, зависимость критерия от существенных факторов имеет вид: $P_c = P_c(p, m, n, dW_n, dW_p, p_{kr})$

Для достижения цели, поставленной в работе, необходимо исследовать зависимость критерия от существенных параметров с учетом накладываемых ограничений. В связи с этим возникает необходимость решения задачи, которая в формализованном виде выглядит следующим образом:

$$P_c = P_c(p, m, n, dW_n, dW_p, p_{kr}) \quad (6)$$

при ограничениях:

$$dW_n \geq dW_p \quad (7)$$

$$p > p_{kr} \quad (8)$$

$$m, n > 0, \text{ целые.} \quad (9)$$

3. Методика решения задачи

Расчет показателя (6) будем проводить по формуле биномиального закона распределения [9,10], которая справедлива как для подсистем с кратным, так и некратным резервированием [3, 17, 19].

$$P_C = \sum_{i=m}^n C_n^i p^i \cdot (1-p)^{n-i} \quad (10)$$

Учет ограничения (7) очевиден, а для учета ограничения (8) необходимо определить правую границу (ПГ) и левую границу (ЛГ) интервала изменения вероятностей элементов пассивно резервированной подсистемы. Правая граница зависит от допуска и определяется теми значениями вероятностей элементов, при которых показатели безотказности элементов достигают значений, близких 0,99.

Левая граница определяется критической вероятностью, зависящей от величины допуска и кратности резервирования, которые взаимосвязаны друг с другом. Исследуем эту взаимосвязь, та как от нее зависят результаты решения задачи.

Рассмотрим дискретный ряд реализуемых допусков, образуемых при $\Gamma=1$ и варьировании m от 1 до 9. Он имеет вид: 50,0%; 33,3%; 25,0%; 20,0%; 16,7%; 14,3%; 12,5%; 11,1%; 10,0%. Назовем этот ряд допусками первого уровня. Аналогичный ряд дискретных реализуемых допусков при $\Gamma=2$ имеет вид: 66,7%; 50,0%; 40,0%; 33,3%; 28,6%; 25,0%; 22,2%; 20,0%; 18,2%. Назовем этот ряд допусками второго уровня. Рассмотренные ряды образуют основную сетку допусков, ибо соответствуют наименьшим структурам резервирования, так как с ростом Γ резко возрастает общее количество элементов n .

Рассмотренная сетка допусков соответствует минимальным кратностям резервирования. Дело в том, что каждый реализуемый допуск может быть представлен возрастающим

рядом индивидуальных кратностей, начиная с минимальной. Например, допуск 50,0% первого уровня реализуется индивидуальными кратностями: $K_1=2/1$, $K_2=4/2$, $K_3=6/3$ и т.д. Допуск 33,3% первого уровня реализуется индивидуальными кратностями резервирования: $K_1=3/2$, $K_2=6/4$, $K_3=9/6$ и т.д. Допуск 40,0% второго уровня реализуется индивидуальными кратностями: $K_1=5/3$, $K_2=10/6$, $K_3=15/9$ и т.д.

Это обстоятельство позволяет проводить расчеты показателя (6) для каждого допуска при различных индивидуальных кратностях, свойственных данному допуску и, следовательно, при различных структурах пассивного резервирования, выявляя степень влияния структуры резервирования на принятый показатель.

Следует отметить, что величина $K_1=2/1=2$ при допуске 50,0% соответствует случаю кратного резервирования. Поэтому она записана в виде целого значения. Остальные величины кратностей соответствуют некрatному резервированию. Поэтому они записаны в виде дробных значений. Повторяющиеся (с допусками первого уровня) допуски второго уровня соответствуют вторым элементам возрастающих рядов индивидуальных кратностей допусков первого уровня. Поэтому в дальнейшем исключим их из рассмотрения.

В связи с необходимостью проведения исследований в диапазоне вероятностей $p > p_{kr}$, а p_{kr} , как показано в [21], зависит от кратностей резервирования и величин реализуемых допусков, то сначала для каждого допуска необходимо определить максимальное значение критической вероятности

$$p_{krm} = \max_i p_{kr}(K_i) \quad (11)$$

Величина p_{krm} определяет начальные значения варьируемых вероятностей в диапазоне (p_{krm} - ПГ). Как показали предварительные расчеты, правая граница диапазона меняется в зависимости от допуска от 0,750 до 0,970. В этом диапазоне для каждого допуска будем задавать 7 примерно

равномерно распределенных вероятностей элементов пассивно резервированной подсистемы для анализа поведения P_c .

4. Результаты решения поставленной задачи

В соответствие с изложенной методикой проведем исследование показателя безотказности пассивно резервированной подсистемы. Результаты подготовки исходных данных и расчеты по ним показателя P_c для допусков первого уровня представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от кратности K_b , безотказности элементов p и реализуемых допусков первого уровня dW_p

dW_p %	Индивид. кратности	Вероятности элементов p						
		0.470	0.500	0.550	0.600	0.650	0.700	0.750
50,0	$K_1=2$	0.719	0.750	0.797	0.840	0.877	0.910	0.937
	$K_3=6/3$	0.598	0.656	0.745	0.821	0.883	0.929	0.962
	$K_5=10/5$	0.547	0.623	0.738	0.834	0.905	0.953	0.980
	$K_7=14/7$	0.515	0.605	0.741	0.850	0.925	0.968	0.990
	$K_9=18/9$	0.491	0.593	0.747	0.865	0.940	0.979	0.995
33,3	Индивид. кратности	Вероятности элементов p						
		0.691	0.725	0.750	0.775	0.800	0.825	0.850
	$K_1=3/2$	0.773	0.815	0.844	0.871	0.896	0.919	0.939
	$K_3=9/6$	0.709	0.785	0.834	0.878	0.914	0.944	0.966
	$K_5=15/10$	0.695	0.791	0.852	0.901	0.939	0.966	0.983
	$K_7=21/14$	0.691	0.803	0.870	0.921	0.957	0.979	0.992
	$K_9=27/18$	0.692	0.816	0.887	0.937	0.970	0.987	0.996
25,0	Индивид. кратности	Вероятности элементов p						
		0.796	0.815	0.830	0.845	0.860	0.875	0.890
	$K_1=4/3$	0.813	0.842	0.863	0.884	0.903	0.921	0.938
	$K_3=12/9$	0.784	0.833	0.868	0.898	0.925	0.947	0.965
	$K_5=20/15$	0.791	0.850	0.890	0.923	0.949	0.969	0.982
	$K_7=28/21$	0.803	0.869	0.911	0.943	0.966	0.982	0.991
	$K_9=36/27$	0.816	0.886	0.927	0.957	0.977	0.989	0.996
	Индивид.	Вероятности элементов p						

20,0	кратности	0.871	0.880	0.890	0.900	0.910	0.920	0.930
	$K_1=5/4$	0.873	0.888	0.903	0.919	0.933	0.946	0.958
	$K_3=15/12$	0.882	0.904	0.926	0.944	0.960	0.973	0.982
	$K_5=25/20$	0.906	0.929	0.950	0.967	0.979	0.988	0.993
	$K_7=35/28$	0.926	0.948	0.967	0.980	0.989	0.994	0.998
	$K_9=45/36$	0.942	0.962	0.978	0.988	0.994	0.997	0.999
16,8	Индивид. кратности	Вероятности элементов p						
		0.917	0.925	0.930	0.935	0.940	0.945	0.950
	$K_1=6/5$	0.917	0.931	0.939	0.947	0.954	0.961	0.967
	$K_3=18/15$	0.943	0.959	0.967	0.974	0.980	0.985	0.989
	$K_5=30/25$	0.966	0.978	0.984	0.988	0.992	0.995	0.997
	$K_7=42/35$	0.979	0.988	0.992	0.995	0.997	0.998	0.999
	$K_9=54/45$	0.987	0.994	0.996	0.998	0.999	0.999	1.000
14,3	Индивид. кратности	Вероятности элементов p						
		0.943	0.947	0.951	0.955	0.959	0.963	0.967
	$K_1=7/6$	0.944	0.951	0.957	0.963	0.969	0.975	0.980
	$K_3=21/18$	0.971	0.977	0.982	0.987	0.990	0.993	0.995
	$K_5=35/30$	0.987	0.990	0.993	0.996	0.997	0.998	0.999
	$K_7=49/42$	0.994	0.996	0.998	0.999	0.999	1.000	1.000
	$K_9=63/54$	0.997	0.998	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000
12,5	Индивид. кратности	Вероятности элементов p						
		0.958	0.960	0.962	0.964	0.966	0.968	0.970
	$K_1=8/7$	0.958	0.962	0.965	0.969	0.972	0.975	0.978
	$K_3=24/21$	0.983	0.968	0.988	0.990	0.992	0.993	0.995
	$K_5=40/35$	0.994	0.995	0.996	0.997	0.998	0.998	0.999
	$K_7=56/49$	0.998	0.998	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000
	$K_9=72/63$	0.999	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Таблица 2. Значения безотказности P_c подсистем в зависимости от кратности K_i , безотказности элементов p и реализуемых допусков второго уровня dW_p

dW_p %	Индивид. кратности	Вероятности элементов p						
		0.610	0.650	0.690	0.730	0.770	0.810	0.850
	$K_2=5/3$	0.700	0.765	0.823	0.874	0.916	0.949	0.973
	$K_4=15/9$	0.640	0.755	0.849	0.918	0.963	0.986	0.996
	$K_6=25/15$	0.626	0.771	0.881	0.950	0.984	0.996	0.999

	$K_8=35/21$	0.620	0.789	0.907	0.969	0.993	0.999	0.999
	$K_{10}=45/27$	0.618	0.806	0.926	0.980	0.997	0.999	0.999
28,6	Индивид. кратности	Вероятности элементов p						
		0.691	0.725	0.750	0.775	0.800	0.825	0.850
	$K_2=7/5$	0.746	0.816	0.869	0.913	0.949	0.974	0.990
	$K_4=21/15$	0.723	0.840	0.913	0.961	0.986	0.997	1.000
	$K_6=35/25$	0.736	0.872	0.945	0.983	0.996	1.000	1.000
	$K_8=49/35$	0.749	0.897	0.965	0.992	0.999	1.000	1.000
	$K_{10}=63/45$	0.763	0.918	0.978	0.996	1.000	1.000	1.000
22,2	Индивид. кратности	Вероятности элементов p						
		0.796	0.815	0.830	0.845	0.860	0.875	0.890
	$K_2=9/7$	0.844	0.880	0.917	0.947	0.970	0.986	0.992
	$K_4=27/21$	0.881	0.927	0.964	0.985	0.996	0.999	1.000
	$K_6=45/35$	0.915	0.957	0.985	0.996	0.999	1.000	1.000
	$K_8=63/49$	0.939	0.975	0.993	0.999	1.000	1.000	1.000
	$K_{10}=81/63$	0.956	0.985	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000
18,2	Индивид. кратности	Вероятности элементов p						
		0.871	0.880	0.890	0.900	0.910	0.920	0.930
	$K_2=11/9$	0.893	0.910	0.931	0.948	0.963	0.975	0.985
	$K_4=33/27$	0.941	0.958	0.975	0.986	0.993	0.997	0.999
	$K_6=55/45$	0.969	0.981	0.991	0.996	0.999	1.000	1.000
	$K_8=77/63$	0.983	0.991	0.997	0.999	1.000	1.000	1.000
	$K_{10}=99/81$	0.991	0.996	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000

Из таблиц 1 и 2 видно, что с уменьшением (“ужесточением”) реализуемых допусков одного уровня показатель пассивно резервированной подсистемы P_c падает при одинаковой безотказности элементов p и минимальных кратностях резервирования K_i . Например, при $dW_p=50\%$, $K_1=2$ и $p=0,750$ - $P_c=0,937$, а при $dW_p=33,3\%$, $K_1=3/2$ и $p=0,750$ - $P_c=0,844$. Аналогично, при $dW_p=25,0\%$, $K_1=4/3$ и $p=0,890$ - $P_c=0,938$, а при $dW_p=20,0\%$, $K_1=5/4$ и $p=0,890$ - $P_c=0,903$. Такая же ситуация имеет место и для реализуемых допусков второго уровня. Это объясняется тем, что при уменьшении реализуемых допусков одного уровня (при постоянном r), величины n и m

растут, приближаясь друг к другу и, уменьшая тем самым, кратность резервирования.

Проиллюстрируем в виде графиков некоторые результаты, представленные в таблицах 1 и 2.

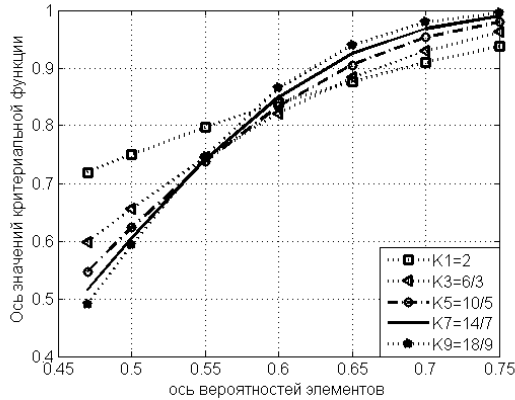


Рис. 1. Графики зависимостей показателя P_c от p ,
для $dW_p = 50\%$

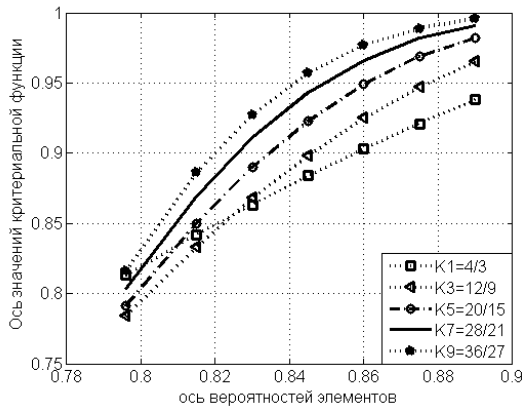


Рис. 2. Графики зависимостей показателя P_c от p ,
для $dW_p = 25\%$

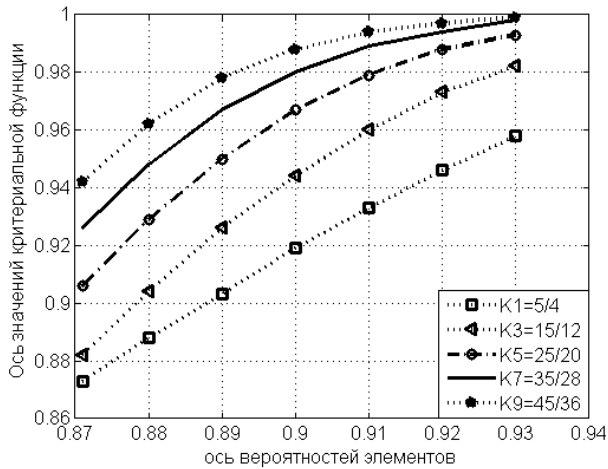


Рис. 3. Графики зависимостей показателя P_c от r ,
для $dW_p = 20\%$

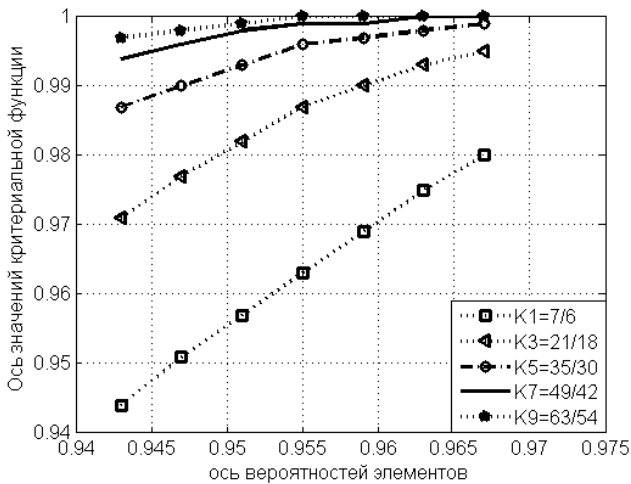


Рис. 4. Графики зависимостей показателя P_c от r ,
для $dW_p = 14,3\%$

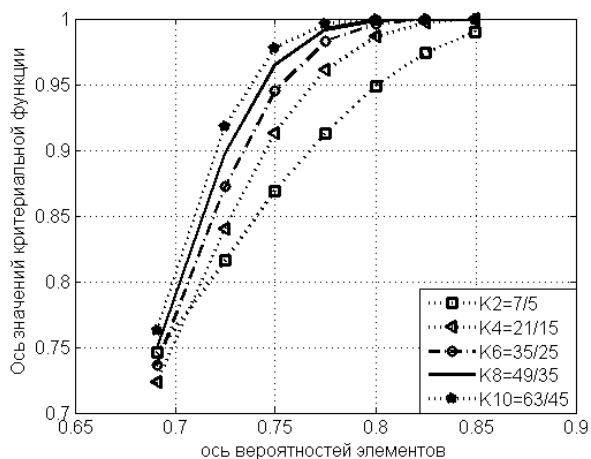


Рис. 5. Графики зависимостей показателя P_c от p ,
для $dW_p = 28,6\%$

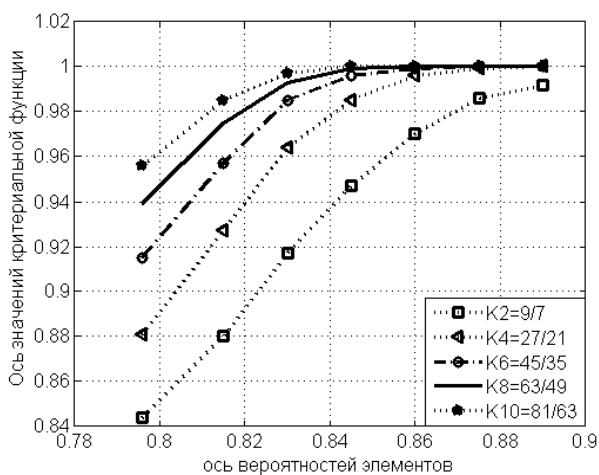


Рис. 6. Графики зависимостей показателя P_c от p ,
для $dW_p = 22,2\%$

На рисунках 1, 2, 3 и 4 представлены некоторые характерные зависимости показателя P_c от p для допусков первого уровня, а на рисунках 5 и 6 аналогичные зависимости для допусков второго уровня. Из представленных таблиц и графиков видно как меняется характер зависимостей показателя P_c от безотказности элементов и кратностей резервирования при допусках первого и второго уровня, превышающих 25% и меньших этой величины.

Зависимости показателя P_c от безотказности элементов p имеют нелинейный строго вогнутый характер при любых допусках и кратностях резервирования. Это говорит о существовании экстремума разности ($P_c - p$) что позволяет ставить задачу разработки высоконадежных пассивно резервированных подсистем ЛА с учетом допусков из малонадежных элементов.

5. Заключение

На основании проведенных расчетов можно сделать следующие выводы.

1) Наряду с безотказностью элементов важнейшей характеристикой, позволяющей повысить безотказность пассивно резервированных подсистем ЛА при заданном назначенном допуске является кратность резервирования.

2) На характер зависимости показателя P_c от кратности резервирования существенное влияние оказывают величины реализуемых допусков и безотказность элементов.

3) При реализуемых допусках менее 25% зависимость показателя P_c от кратности всегда имеет возрастающий характер, поэтому кратность резервирования является основным средством повышения безотказности пассивно резервированных подсистем рассматриваемого класса при “жестких” допусках.

4) В диапазоне реализуемых допусков не менее 25% в каждом допуске существуют значения безотказности элементов p , меняющих характер зависимости показателя P_c от кратности: так при допуске $dW_p = 50\%$ и безотказности

элементов $p \geq 0,65$ зависимость показателя P_c от кратности всегда имеет возрастающий характер, а при $p < 0,65$ зависимость показателя P_c от кратности может как монотонно убывать, так и иметь немонотонный (сначала убывающий, а затем возрастающий) характер.

5) Минимальные величины кратностей резервирования обеспечивают наилучшие значения безотказности пассивно резервированных подсистем ЛА данного класса только при малонадежных элементах ($p < 0,6-0,7$) и больших реализуемых допусках (не менее 25,0%). Таким образом, не существует допусков, при которых всегда выгодно применять минимальную кратность резервирования (независимо от безотказности элементов) как это утверждается в [8].

6) Повышение кратности резервирования является основным средством достижения высоких величин показателя P_c при “жестких” реализуемых допусках (менее 25,0%) и любых значениях безотказности элементов p , а также при больших допусках (не менее 25%) и безотказности элементов более 0,65.

Литература

1. АНЦЕЛИОВИЧ Л.Л. *Надежность, безотказность и живучесть самолета*. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 98.
2. БОГАЧЕВ А.П., ПОПОВ И.Л. *Проектирование технической системы связи по заданным показателям надежности: Учебно-методическое пособие*. – М.: РУТ (МИИТ), 2017. – 23 с.
3. ВИКТОРОВА В.С., СТЕПАНЯНЦ А.С. *Модели и методы расчета надежности технических систем*. – М.: Ленанд, 2014. – С. 33.
4. ГОСТ 27.002-2015. *Надежность в технике. Термины и определения*. – М.: Стандартиформ, 2016. – 28 с.
5. ГРИГОРЬЯН С. Г. *Техническая диагностика и надёжность систем управления*. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2017. – 51 с.
6. ГРИШИН В.М., ПЬО МАУНГ КО. *Оптимизация безотказности систем управления ЛА при активном*

- нагруженном резервировании. // Вестник МАИ. – 2009. – №5. – С. 52–59.
7. ДЕДКОВ В.К., ТАТУЕВ А.И. *Обеспечение надежности технических объектов по стадиям их жизненного цикла.* – М.: Машиностроение – Полёт, 2010. – С.76.
 8. ЕПИФАНОВ А.Д. *Надежность систем управления.* – М.: Машиностроение, 1975. – С.50.
 9. КАТАЛЬНИКОВ В. В., ШАПАРЬ Ю. В. *Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие.* – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – С. 22.
 10. КИНДЕЕВ Е.А. *Учебное пособие к курсу лекций по дисциплине «Надежность технических систем и техногенный риск».* – Владимир: Владимирский государственный университет. 2016. – С. 40.
 11. МОЖАЕВА И.А., НОЗИК А.А., СТРУКОВ А.В. *Алгоритмы автоматизированного структурно - логического моделирования надежности и безопасности структурно-сложных систем // Труды международной научной школы МАБР.* – 2016. – С. 26.
 12. ОВЧАРЕНКО В.Л. *Надёжность технических систем и техногенный риск.* – Донецк, Дон НТУ, 2015. – С. 69.
 13. ПОЛОВКО А.М., ГУРОВ С.И. *Основы теории надежности.* – СПб.: “БХВ – Петербург”, 2006. – С.247.
 14. РЕДЬКО П.Г. *Повышение безотказности и улучшение характеристик электрогидравлических следящих приводов.* Магнитогорск: Издательский центр МГТУ “Станкин” “Янус – К”, 2002. – С.59.
 15. СЛЫШАЛОВ В.К. *Основы расчета надежности систем электроснабжения.* – Иваново, 2012. – 80 с.
 16. *Справочник по надежности и эффективности в технике/* [под ред. В.И. Патрушева и А.И. Рембезы]. – М.: Машиностроение, 1988. – С.38.
 17. ТРЕТЬЯКОВ А.М. *Основы теории надежности.* – Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. университета, 2016. – С. 83.
 18. ТРИФАНОВ И. В., ЖИРНОВА Е. А. *Надежность технических систем.* – Красноярск, 2018. – 68 с.

19. ЦЕЛИЩЕВ В.А. *Основы теории надежности*. – Иркутск, 2015. – С. 43.
20. ЦКЛЯР В.Н. *Надёжность систем управления*. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 126 с.
21. VYACHESLAV M. GRISHIN, VU TRONG TUAN. *Specific features of research and development of the passive redundant subsystems of the aircraft with due consideration of tolerances*. // Journal of Mechanical Engineering Research & developments (JMERD). – 2018. – № 41(4). – С.82–87.

RESEARCH WAYS TO IMPROVE RELIABILITY OF THE PASSIVE REDUNDANT SUBSYSTEMS OF THE AIRCRAFT WITH DUE CONSIDERATION OF TOLERANCES.

Grishin Vyacheslav Mikhailovich, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, (Vyacheslav.Grishin@gmail.com).

Vu Trong Tuan, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, graduate student, (giadinh5@gmail.com).

Abstract: The work is consecrated to research reliability of passively redundant subsystems of the aircraft with due considerations of tolerances for decrease of their output parameters in case of sudden failures of elements. The influence of the values of reliability of elements, tolerances of two levels and the multiplicity of redundancy on the reliability of passively redundant subsystems as a whole is investigated. It is shown that the minimum multiple redundancy in the interests of increasing the reliability of the considered LA subsystems is advantageous to use only at high tolerances and low probabilities of the failure-free operation of their elements.

Key words: reliability of subsystems, reliability of elements, multiple of redundancy, aliquant redundancy, critical probability, tolerance of decrease of the output parameters of subsystems.

УДК 519.873

ББК 30н

Анализ и синтез систем управления

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии*

Поступила в редакцию

Опубликована