

ОПТИМИЗАЦИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ ОДНОГО КЛАССА КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛА ПРИ АКТИВНОМ НАГРУЖЕННОМ РЕЗЕРВИРОВАНИИ

Вячеслав Михайлович ГРИШИН родился в 1940 г. в городе Москве. Доцент кафедры МАИ. Кандидат технических наук, доцент. Основные научные интересы - в области надежности и эффективности летательных аппаратов и их систем управления. Автор более 100 научных работ. E-mail: vnb36@mail.ru

Vyacheslav M. GRISHIN, Ph.D, was born in 1940, in Moscow. He is an Associate Professor at the MAI. His major research interests are in reliability and efficiency of flying vehicles and their control systems. He has published more than 100 technical papers. E-mail: vnb36@mail.ru

Пью Маунг Ко родился в 1979 г. в городе Янгоне (Союз Мьянмы). Аспирант МАИ. Основные научные интересы в области надежности летательных аппаратов, их систем управления, подсистем и элементов. Автор двух научных работ. E-mail: pmgko@mail.ru

Phyo Maung Ko, was born in 1979, in Yangon, Myanmar. He is a Postgraduate Student at the MAI. His research interests are in reliability and efficiency of flying vehicles and their control systems. He has published 2 technical papers. E-mail: pmgko@mail.ru

Одной из важных проблем, стоящих перед разработчиками систем управления летательными аппаратами (СУЛА), является проблема повышения их безотказности. В работе рассматриваются приближенный аналитический и точный численный методы оптимизации одного класса компонентов систем управления ЛА при активном нагруженном резервировании.

Reliability enhancement is one of important problems, which aircraft control system designers are needed to solve. An approximate analytical technique and a numerical one are suggested to optimize some class of aircraft control system units basing on the active redundancy approach.

Ключевые слова: безотказность систем управления, оптимизация, внезапный отказ, активное нагруженное резервирование, экстремум, блочное резервирование.

Key words: non-failure control systems, optimization, sudden failure, active redundancy, extremum, modular redundancy.

Введение

Как известно, активное горячее резервирование, так же как пассивное (постоянное) резервирование, при сопоставлении показателей безотказности резервированной и нерезервированной систем имеет критические значения безотказности и соответствующие им области, в которых безотказность резервированной системы хуже, чем нерезервированной (см., например, [2]). Однако причины наличия указанных областей, а также их свойства для указанных видов резервирования существенно различаются. Одним из свойств активного нагруженного резервирования является то, что раздельное подключение резервных элементов не является наилучшим с точки зрения безотказности по сравнению с блочным (групповым) резервированием. В настоящее время имеется достаточно много работ, посвященных оптимизации резервирования [1–3, 5–10, 12].

Наиболее близкая к рассматриваемому вопросу задача приведена в справочнике по расчету надежности [5]. В этой работе показано, что при возникновении в системе внезапных независимых отказов, если ее «разбить» на m равнонадежных участков, а безотказность каждого участка повысить активным нагруженным резервированием с одинаковой кратностью k (случай раздельного резервирования), существует максимум безотказности системы по количеству участков m .

В данной работе рассматривается более общий случай оптимизации безотказности при активном нагруженном резервировании.

Так как отказ любого элемента нерезервированной СУ ЛА приводит к отказу всей системы, то ее структурная схема расчета надежности представляет последовательное (основное) соединение элементов. Для повышения безотказности основное соединение можно разбить на блоки (участки) одинаковой

или различной длины и резервировать их с одинаковой кратностью. Возникает задача: как оптимально «разбить» систему на блоки по возможности одинаковой длины, чтобы обеспечить максимум безотказности резервированной системы (случай блочного резервирования).

Выбор данного способа резервирования обусловлен тем, что он хотя и требует расхода ресурса резервных элементов, аналогично пассивному резервированию, но в отличие от пассивного резервирования при активном нагруженном резервировании в случаях отказов основных или резервных элементов не меняются параметры системы. Выход параметров СУ ЛА за пределы допусков может привести не только к недопустимому изменению временных и частотных характеристик, но и к потере его устойчивости. Кроме того, при нагруженном резервировании обеспечивается постоянная готовность резервных элементов к работе, что также очень важно для работы СУ ЛА.

Авторами исследовались два случая: 1) нерезервированная система или ее компонент состоит из однотипных компонентов; 2) нерезервированная система или ее компонент состоит из разнотипных компонентов.

В данной работе рассматривается первый случай, а именно оптимизация безотказности одного класса компонентов систем управления летательными аппаратами (СУ ЛА) при активном нагруженном резервировании. Особенности этого класса являются:

- 1) нерезервированная система представляет собой последовательное соединение элементов (основное соединение);
- 2) все элементы (основные и резервные) резервированной системы одинаковы по показателям безотказности;

3) компоненты элементов системы резервируются по блокам (по возможности одинакового размера);

4) возникающие отказы элементов являются внезапными и независимыми;

5) переключатели совмещены с измерителями и могут отказывать, т.е. не являются идеальными по показателям безотказности.

Примерами таких компонентов систем управления ЛА являются: многокаскадные усилители напряжения; многокаскадные усилители мощности; корректирующие устройства, представляющие последовательное соединение активных или пассивных четырёхполюсников; источники снабжения СУ (и борта в целом) постоянным током, состоящие из последовательно соединенных нескольких элементов электропитания; цепи усилителей постоянного тока операционных усилителей с очень большим коэффициентом усиления и т.п. Таким образом, имеется довольно большой класс элементов СУЛА электротехнического характера, обладающих указанными выше свойствами.

Отметим, что однотипность компонентов системы позволяет использовать более простые и наглядные приближенные аналитические подходы для выявления «экстремальных» свойств данного способа резервирования. Эти свойства имеют более общий характер, так как справедливы и для случая разнотипных элементов.

Постановка задачи

В соответствии с принятой в литературе терминологией будем называть схемы соединения компонентов резервированной и нерезервированной систем, используемые для расчета характеристик надежности, структурными схемами надежности [10]. На рис.1 представлена структурная схема надежности резервированного компонента системы.

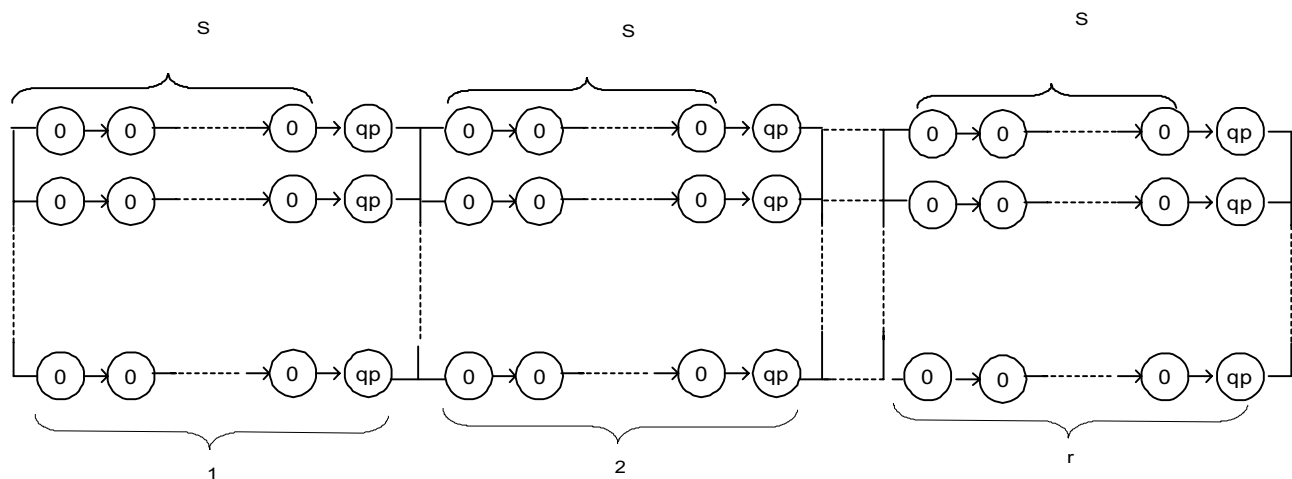


Рис. 1. Структурная схема надежности блочного активного резервирования

Введем следующие обозначения:

$Q_c(t_3) = Q_c$ — вероятность отказа резервированного компонента системы за время выполнения задания t_3 ;

$P_c(t_3) = P_c$ — вероятность безотказной работы компонента системы за время t_3 ;

$q(t_3) = q$ — вероятность отказа основных и резервных элементов системы;

$q_p(t_3) = q_p$ — вероятность отказа переключателей за время t_3 ;

0 — обозначения основных и резервных элементов компонента;

m — количество последовательно соединенных элементов компонента;

k — кратность резервирования;

s — размер блока;

r — количество блоков.

Задача ставится следующим образом: при заданных параметрах компонента q, q_p, m, k найти размер блока s (количество блоков r), обеспечивающий максимум показателя P_c (минимум показателя Q_c).

Нетрудно убедиться, что вероятность безотказной работы и вероятность отказа компонента системы, выраженные через параметры q, q_p, k, s, r, m , имеют вид

$$P_c = \left\{ 1 - \left[1 - (1 - q)^s \cdot (1 - q_p) \right]^k \right\}^r; \quad (1)$$

$$Q_c = 1 - \left\{ 1 - \left[1 - (1 - q)^s \cdot (1 - q_p) \right]^k \right\}^r. \quad (2)$$

Так как $m = r \cdot s$, сделав в выражениях (1) и (2) соответствующую замену параметров r и s , получим

$$P_c = \left\{ 1 - \left[1 - (1 - q)^s \cdot (1 - q_p) \right]^k \right\}^{\frac{m}{s}}; \quad (3)$$

$$Q_c = 1 - \left\{ 1 - \left[1 - (1 - q)^{\frac{m}{r}} \cdot (1 - q_p) \right]^k \right\}^r. \quad (4)$$

Из рис. 1 и выражений (1)–(4) видно, что при $s = 1 (r = m)$ имеет место отдельное резервирование:

$$P_c^{раз} = \left\{ 1 - \left[1 - (1 - q) \cdot (1 - q_p) \right]^k \right\}^m, \quad (5)$$

а при $s = m (r = 1)$ блочное резервирование трансформируется в общее:

$$P_c^{общ} = 1 - \left[1 - (1 - q)^m \cdot (1 - q_p) \right]^k. \quad (6)$$

Анализ выражений (3) и (4) позволяет сделать предположение, что показатели безотказности, определяемые этими выражениями, могут иметь экстремум по параметрам s и r . Проведем проверку сделанного предположения в непрерывном представлении параметров s и r с последующим использованием и проверкой полученных результатов в дискретном варианте. Другими словами, ограничение целочисленности s и r будет учтено позднее.

Методика решения задачи

Найдем стационарную точку выражения (3), приравняв производную по переменной s к нулю. Однако получить в аналитических функциях значение для стационарной точки не удастся ввиду трансцендентности получаемого выражения. Рассмотрим приближенный подход. Разложим выражение $(1 - q)^s$ в биномиальный ряд, который сходится при $|q| \leq 1$ [3]. Возьмем два первых члена разложения:

$$(1 - q)^s \cong 1 - q \cdot s.$$

Перемножая выражения в круглых скобках $(1 - s \cdot q) \cdot (1 - q_p)$, пренебрегая членом $s \cdot q \cdot q_p$ ввиду малости (q и q_p лежат в диапазонах 0.005–0.05), получаем:

$$P_c \cong \left\{ 1 - \left[q_p + q \cdot s \right]^k \right\}^{\frac{m}{s}}.$$

Повторно используем разложение фигурных скобок в биномиальный ряд, беря два первых члена:

$$P_c \cong 1 - \frac{m}{s} \left[q_p + q \cdot s \right]^k. \quad (7)$$

Дифференцируем полученное упрощенное выражение по s :

$$\frac{dP_c}{ds} \cong \frac{m}{s^2} \left[q_p + q \cdot s \right]^k - \frac{q \cdot m \cdot k}{s} \left[q_p + q \cdot s \right]^{k-1}. \quad (8)$$

Вынесем первое слагаемое за скобки для получения результата в виде произведения и получим

$$\frac{dP_c}{ds} \cong \frac{m}{s^2} [q_p + q \cdot s] \cdot \left\{ \frac{q_p + q \cdot s - q \cdot k \cdot s}{[q_p + q \cdot s]} \right\}. \quad (9)$$

Приравняем выражение (9) к нулю:

$$\frac{dP_c}{ds} \cong \frac{m}{s^2} [q_p + q \cdot s] \cdot \left\{ \frac{q_p + q \cdot s \cdot (1-k)}{[q_p + q \cdot s]} \right\} = 0.$$

Так как вероятность не может быть отрицательной, то выражения в квадратных скобках не равны нулю, отсюда

$$q_p + q \cdot s \cdot (1-k) = 0$$

или

$$s = \frac{q_p}{q \cdot (k-1)}. \quad (10)$$

Нетрудно убедиться, что выражение (10) определяет максимум приближенной формулы (7), т. е.

$$s^* \cong \frac{q_p}{q \cdot (k-1)}. \quad (11)$$

Найдем этот максимум, подставляя (11) в (7):

$$P_c^* \cong 1 - \frac{m \cdot q \cdot (k-1)}{q_p} \left[q_p + \frac{q_p}{k-1} \right]^k.$$

Вынося q_p за квадратные скобки, после несложных преобразований окончательно получим

$$P_c^* \cong 1 - \frac{m \cdot q \cdot q_p^{k-1} \cdot k^k}{(k-1)^{k-1}}. \quad (12)$$

Проведем теперь аналогичные преобразования формулы (4), определяющей зависимость вероятности отказа системы Q_c от количества блоков резервирования r . Для этого в формуле (4) сделаем замену $(1-q)^{\frac{m}{r}} \cong 1 - \frac{m \cdot q}{r}$ и, перемножив выражения в круглых скобках, получим:

$$Q_c \cong 1 - \left\{ 1 - \left[q_p + \frac{m \cdot q}{r} - \frac{m \cdot q \cdot q_p}{r} \right]^k \right\}^r. \quad (13)$$

Пренебрегая ввиду малости последним членом в квадратных скобках и беря два первых члена разложения фигурных скобок (13) в биномиальный

ряд, который сходится, так как $\left| q_p + \frac{q \cdot m}{r} \right| < 1$ для реальных исходных данных, получим

$$Q_c \cong r \cdot \left[q_p + \frac{q \cdot m}{r} \right]^k. \quad (14)$$

Для нахождения стационарной точки определим

производную $\frac{dQ_c}{dr}$ приближенного выражения (14), рассматривая r ($1 \leq r \leq m$) как непрерывный аргумент:

$$\frac{dQ_c}{dr} \cong \left[q_p + \frac{q \cdot m}{r} \right]^k - \frac{k \cdot q \cdot m}{r} \left[q_p + \frac{q \cdot m}{r} \right]^{k-1}. \quad (15)$$

Вынесем первое слагаемое выражения (15) за скобки и приравняем производную нулю:

$$\frac{dQ_c}{dr} \cong \left[q_p + \frac{q \cdot m}{r} \right]^k \cdot \left\{ \frac{q_p \cdot r + q \cdot m - k \cdot q \cdot m}{[q_p \cdot r + q \cdot m]} \right\} = 0. \quad (16)$$

В формуле (16) выражения в квадратных скобках не равны нулю, так как вероятность не может быть отрицательной, поэтому

$$q_p \cdot r + q \cdot m - k \cdot q \cdot m = 0,$$

откуда

$$r^* \cong \frac{q \cdot m}{q_p} \cdot (k-1). \quad (17)$$

Нетрудно убедиться, что выражение (17) определяет минимум функции (14). Найдем его, подставляя (17) в (14):

$$Q_c^* \cong \frac{q \cdot m}{q_p} \cdot (k-1) \cdot \left[q_p + \frac{q_p}{(k-1)} \right]^k.$$

Вынося q_p за квадратные скобки, после ряда преобразований окончательно имеем

$$Q_c^* \cong \frac{q \cdot m \cdot q_p^{k-1} \cdot k^k}{(k-1)^{k-1}}. \quad (18)$$

Сравнивая найденные из формул (3) и (4) приближенные значения P_c^* и Q_c^* убеждаемся, что

$$P_c^* + Q_c^* = 1.$$

Полученные приближенные аналитические зависимости (11) и (17) позволяют установить соотношения, определяющие границы возможного существования экстремумов при блочном активном нагруженном резервировании. Действительно, экстремум может существовать в границах:

1) $s^* \geq 1$, отсюда из (11) имеем

$$\frac{q_p}{q \cdot (k-1)} \geq 1 \text{ или } q \leq \frac{q_p}{(k-1)}; \quad (19)$$

2) $r^* \geq 1$, отсюда из (17) имеем

$$\frac{q \cdot m}{q_p} \cdot (k-1) \geq 1 \text{ или } q \geq \frac{q_p}{m \cdot (k-1)}. \quad (20)$$

Объединяя (19) и (20), имеем

$$\frac{q_p}{m \cdot (k-1)} \leq q \leq \frac{q_p}{(k-1)}. \quad (21)$$

Заметим, что полученные приближенные зависимости (11), (12), (17), (18) и условие (21) отражают лишь возможность существования экстремумов функций P_c и Q_c , определяемых формулами (3) и (4) в зависимости от дискретных аргументов s и r . Экстремумы указанных функций действительно могут иметь место, если вычисленные приближенные значения s^* и r^* , округленные до ближайшего целого, кратны m .

Результаты расчетов

Для проверки указанного обстоятельства проведем точные расчеты показателя P_c по формуле (3), когда s меняется дискретно от 1 до m . В этом случае очевидно справедливы разные расчетные формулы:

— когда варьируемые целочисленные значения s кратны m , используется формула (3), т. е.

$$P_c = \left\{ 1 - \left[1 - (1-q)^s \cdot (1-q_p) \right]^k \right\}^{\frac{m}{s}};$$

— когда варьируемые целочисленные значения s не кратны m , используются формулы для вычисления и оптимизации перебором различных способов резервирования остатка m_o от деления m на s , $m_o = \text{mod}(m/s)$, т. е.

$$P_c = \left\{ 1 - \left[1 - (1-q)^s \cdot (1-q_p) \right]^k \right\}^{r_u} \cdot P_o^*,$$

где r_u — целая часть отношения m/s ; P_o^* в общем случае имеет вид:

$$P_o^* = \left\{ 1 - \left[1 - (1-q)^{i_1} \cdot (1-q_p) \right]^k \right\}^{j_1} \times \dots \times \left\{ 1 - \left[1 - (1-q)^{i_n} \right]^k \right\}^{j_n}. \quad (22)$$

Оптимум выражения (22) ищется при ограничении

$$i_1 \cdot j_1 + i_2 \cdot j_2 + \dots + i_n \cdot j_n = m_o. \quad (23)$$

Приведем результаты расчетов по точным формулам (3) и (22) при ограничении (23). На рис. 2 представлены графики вероятности безотказной

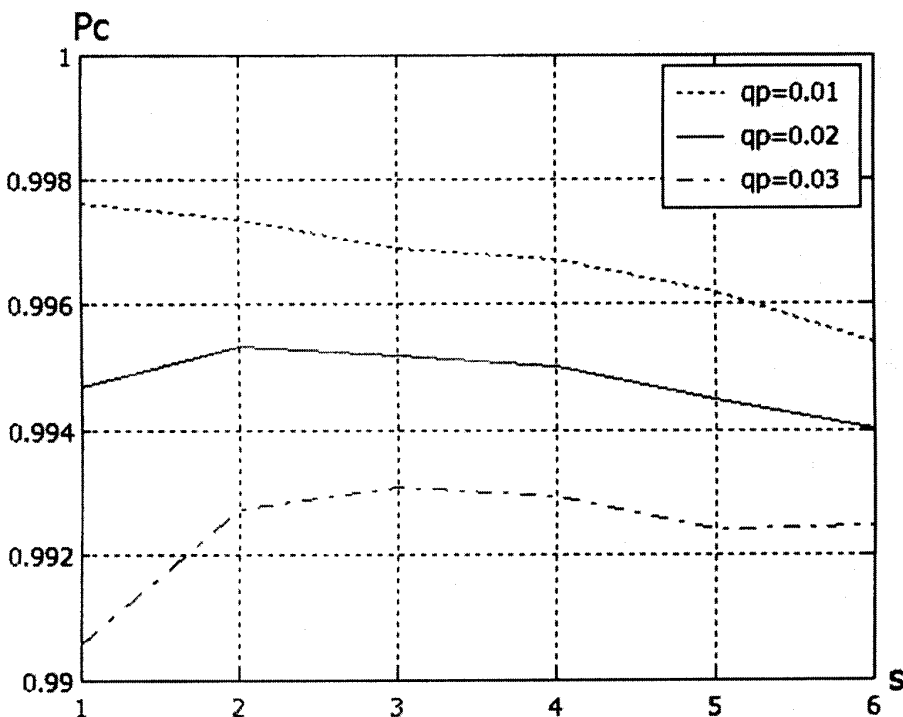


Рис. 2. Графики зависимостей P_c от s для $k=2$; $m=6$; $q=0,01$; $q_p=0,01+0,03$

работы P_c в зависимости от целочисленного параметра s для исходных данных, удовлетворяющих условию существования экстремума (21), а в табл. 1 приведены числовые результаты расчетов.

Таблица 1

Значения P_c для $s=1,2,3,4,5,6$;
 $q_p = 0.01-0.03$; $q = 0.01$; $m=6$

q_p	s					
	1	2	3	4	5	6
0,01	0,99763	0,99736	0,99690	0,99672	0,99618	0,99538
0,02	0,99468	0,99533	0,99518	0,99501	0,99449	0,99402
0,03	0,99058	0,99273	0,99309	0,99293	0,99242	0,99247

В табл. 1 жирным шрифтом выделены максимальные значения оптимизируемого показателя P_c , вычисленные по точному методу. Из нее видно, что при принятых исходных данных: для $q_p = 0,01$ $s = 1$ и $P_c^* = 0,99763$; для $q_p = 0,02$ $s = 2$ и $P_c^* = 0,99533$; для $q_p = 0,03$ $s = 3$ и $P_c^* = 0,99309$. Рас-

четы по приближенным формулам (11) и (12) при тех же исходных данных дают следующие результаты: для $q_p = 0,01$ $s = 1$ и $P_c^* = 0,9976$; для $q_p = 0,02$ $s = 2$ и $P_c^* = 0,9952$; для $q_p = 0,03$ $s = 3$ и $P_c^* = 0,9928$. Сравнение полученных результатов показывает их совпадение по аргументам и близость по оптимальным значениям вероятностей безотказной работы.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости показателя P_c от целочисленного параметра s для исходных данных, выходящих за правую и левую границы условия (21) существования экстремума.

В соответствии с (21) для принятых исходных данных условием существования экстремума является $0,00166 \leq q \leq 0,03$. Как видно из рис. 3 и 4 при выходе вероятности отказа элемента за правую и левую границы экстремум вырождается.

В табл. 2 представлены результаты расчетов вероятности безотказной работы резервированной системы для следующих исходных данных: $m = 8$; $k = 2$; $q = 0,01$; $q_p = (0,01; 0,02; 0,03; 0,04)$, а на рис. 5

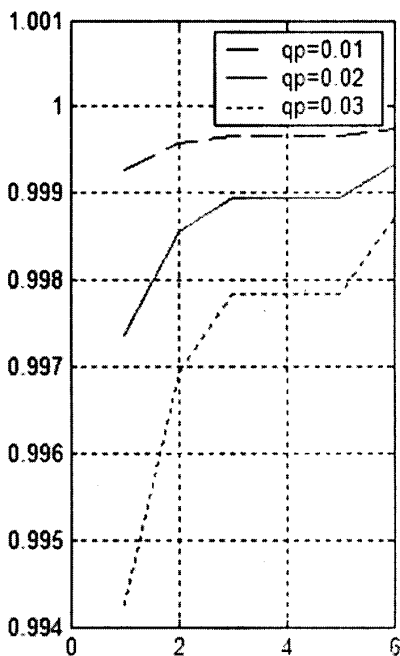


Рис. 3. Графики зависимостей P_c от s для $k = 2$; $m = 6$; $q = 0,001$; $q_p = 0,01-0,03$

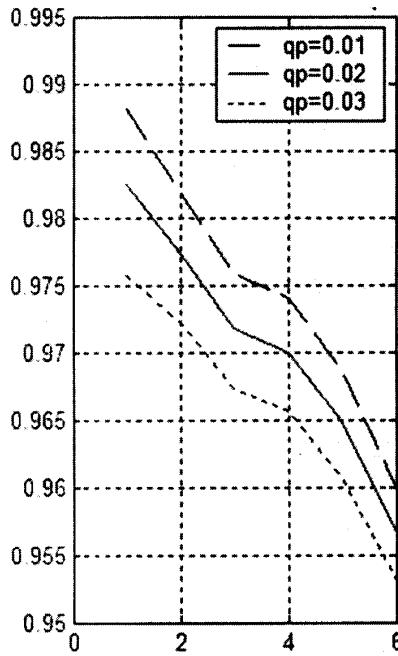


Рис. 4. Графики зависимостей P_c от s для $k = 2$; $m = 6$; $q = 0,035$; $q_p = 0,01-0,03$

Значения P_c для $m = 8$; $k = 2$; $q = 0,01$; $q_p = (0,01; 0,02; 0,03; 0,04)$

q_p	s							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,01	0,99684	0,99648	0,99602	0,9952	0,99503	0,99451	0,99314	0,99252
0,02	0,99292	0,99377	0,99363	0,99314	0,99297	0,99247	0,99162	0,99084
0,03	0,98746	0,99031	0,99068	0,99071	0,99055	0,99006	0,98924	0,98899

Таблица 2

представлены графики, иллюстрирующие табличные данные.

Из табл. 2 видно, что при указанных исходных данных для $q_p = 0,01$ $s^* = 1$ и $P_c^* = 0,99684$; для

Сравнение результатов показывает, что для $q_p = 0,03$ значения аргумента s^* при точном и приближенном расчетах различаются на 1. Это обусловлено не кратностью значения $s = 3$ величине $m = 8$, когда блочное резервирование точно не реализуется.

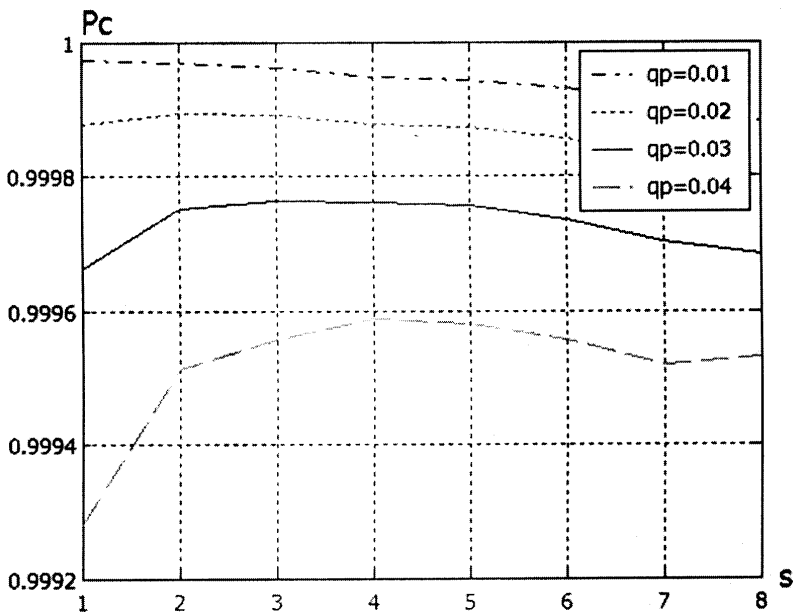


Рис. 5. Графики зависимостей P_c от s для $k = 2$; $m = 8$; $q = 0,01$; $q_p = 0,01-0,04$

$q_p = 0,02$ $s^* = 2$ и $P_c^* = 0,99377$; для $q_p = 0,03$ $s^* = 4$ и $P_c^* = 0,99071$; для $q_p = 0,04$ $s^* = 4$ и $P_c^* = 0,98792$. Расчеты по приближенным формулам (11) и (12) при тех же исходных данных дают следующие результаты: для $q_p = 0,01$ $s^* = 1$ и $P_c^* = 0,9968$; для $q_p = 0,02$ $s^* = 2$ и $P_c^* = 0,9936$; для $q_p = 0,03$ $s^* = 3$ и $P_c^* = 0,9904$; для $q_p = 0,04$ $s^* = 4$ и $P_c^* = 0,9872$.

Однако значения оптимизируемого показателя P_c^* при точных и приближенных расчетах даже в этом случае совпадают до третьего знака после запятой, что обусловлено пологостью кривой P_c^* в зависимости от s (третья кривая сверху).

На рис. 6 представлены графики зависимостей вероятности безотказной работы P_c^* при увеличен-

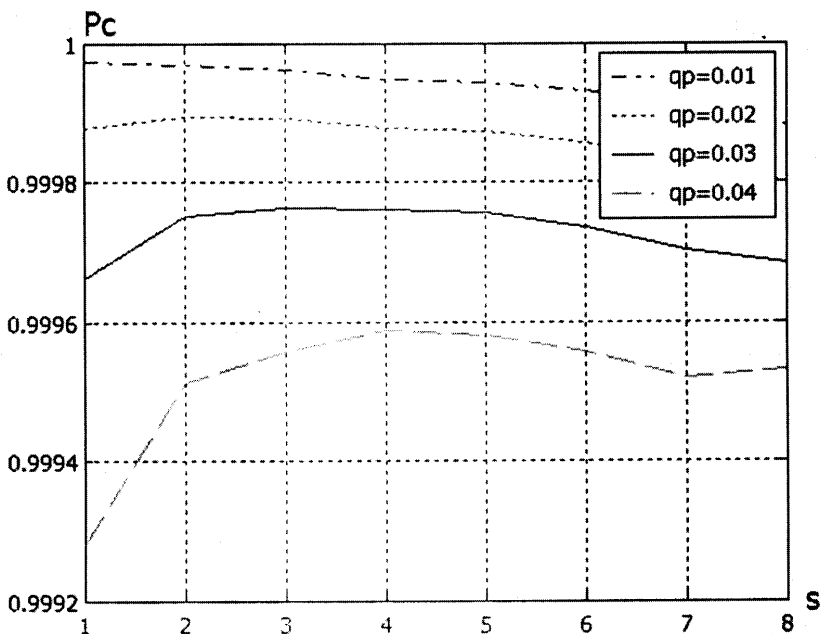


Рис. 6. Графики зависимостей P_c от s для $k = 3$; $m = 8$; $q = 0,005$; $q_p = 0,01-0,05$

ной кратности резервирования: $k = 3$; $m = 8$; $q_p = (0,01; 0,02; 0,03; 0,04)$.

Для выполнения условия (21) в расчетах принята вероятность $q = 0,005$. Сравнение расчетов по точным и приближенным формулам и в этом случае дает совпадение оптимизируемого показателя до трех—четырёх знаков после запятой.

Анализ представленных результатов показывает, что выбор оптимального размера блока при принятом способе резервирования может увеличить вероятность безотказной работы по сравнению, например, с часто используемым поэлементным (раздельным) резервированием «как наиболее эффективным».

Выводы

В работе предложены приближенная и точная методики оптимизации вероятности безотказной работы одного класса компонентов систем управления летательными аппаратами при блочном активном нагруженном резервировании. Определены граничные условия, налагаемые на параметры компонентов для существования экстремума при данном виде резервирования. Вне установленных границ экстремум имеет место либо при раздельном, либо при общем резервировании. Показано, что при исходных данных, близких к реальным, приближенная методика дает оптимальные значения показателя безотказности, совпадающие до трех знаков после запятой с расчетами, сделанными по точной методике. Выбор оптимальной блочной структуры резервирования позволяет увеличить вероятность безотказной работы компонентов системы, не меняя их параметров.

Библиографический список

1. Брозгуль Л.И., Зайцев А.В. Состояние и перспективы развития инерциальных навигационных систем для высокоточного оружия средней и большой дальности ударных авиационных комплексов. // Управление и информатика в авиакосмических системах. 2006. №3. С. 2-7.
2. Епифанов А.Д. Надежность систем управления. — М.: Машиностроение, 1975.
3. Ермаков С.А., Константинов С.В., Редько П.Г. Резервирование систем рулевых приводов летательных аппаратов: Учебное пособие. — М.: Изд-во МАИ, 2002.
4. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия и определения. — М.: Изд. стандартов, 1990.

5. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. — М.: Советское радио, 1975.

6. Конев В.В. Об оптимальном включении резервных элементов // Техническая кибернетика. 1984. № 4. С. 77-83.

7. Лобоцкий Ю.Г. О задаче оптимального резервирования со стоимостными потерями // Надежность и контроль качества. 1990. № 5. С. 26-31.

8. Нурутдинов А.Р., Фрид А.И. Способ резервирования цифровой вычислительной системы управления авиационным двигателем на основе многоуровневой модели // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 11. С. 21-25.

9. Половко А.М. Принципы построения абсолютно надежных технических устройств. — Л.: Знание, 1993.

10. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. — СПб.: БХВ Петербург, 2006.

11. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике. Полный курс. — М.: Айрис пресс, 2007.

12. Gurov S.V., Utkin L.V. Reliability and optimization of system with periodic modifications in the probability and possibility contexts, Microelectron. Reliab. Vol. 37, No. 5, pp. 801-808, 1997.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 3.02.2008