

## АЛГОРИТМ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ВАРИАНТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2007 В. М. Антимиров, В. Н. Ачкасов

Воронежская государственная лесотехническая академия

Рассмотрен алгоритм и проведена сравнительная оценка двух вариантов вычислительных комплексов для бортовых систем управления космических аппаратов.

В статье приведена сравнительная оценка двух вариантов вычислительных комплексов (ВК) для бортовых систем управления (СУ), включающих пять вычислителей, из которых два используются только для решения задач по обработке информации подсистемы спутниковой навигации (ПСН). Во втором варианте предусмотрено включение в ВК четырех вычислителей, которые могут использоваться для решения всех задач (в том числе и спутниковой навигации).

Первый ВК (рис. 1) состоит из трех параллельно соединенных блоков ВМ1, ВМ2, ВМ3 и двух блоков ПСН1 и ПСН2. Интенсивность отказов блоков одинаковая и равна  $L$ . Этот ВК отказывает, если отказывают все блоки ВМ1-ВМ3 до времени  $T$  (момента завершения основной задачи) или если отказывают оба блока ПСН1 и ПСН2 до времени  $T_c$  (момента завершения обработки информации канала спутниковой навигации).

Во втором варианте построения ВК он отказывает, если отказывают все 4 блока до момента времени  $T$  или если отказывают два блока, решающие основные вычислительные

задачи, и один блок спутниковой навигации до момента времени  $T_c$ .

Сравнительная оценка надежности систем проведена с использованием аналитического расчета и методов имитационного моделирования на интервале работы систем  $T$ .

Система рассматривается как единое целое в интервале работы  $T$ . Вычисляется вероятность возникновения отказа в любом из ее блоков  $q$ . Статистически определяется момент отказа  $t_o$  и место отказа. В модели формируется реакция системы и новые состояния. Момент отказа  $t_o$  вычисляется по формуле

$$t_o = -\frac{\ln(nq + (1-q))}{L_c}, \quad (1)$$

где  $n$  – равномерно распределенное случайное число в интервале от 0 до 1,  $L_c$  – суммарная интенсивность отказов,  $q = 1 - e^{-L_c T}$ .

Вычисляется новый интервал  $T = T - t_o$ , и процесс повторяется. Система обязательно переводится в нерабочее состояние.

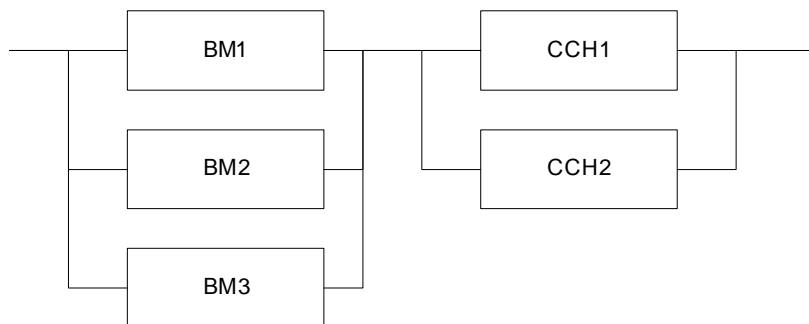


Рис. 1. Структурная схема определения надежности ВК

Общая вероятность отказа в рассматриваемом интервале  $T$  определяется по выражению

$$Q = \prod_{i=1}^n q_i . \quad (2)$$

Составлен алгоритм получения вероятности отказа, который приведен на рис. 2 для первого варианта ВК. Аналогично строится алгоритм для другого ВК.

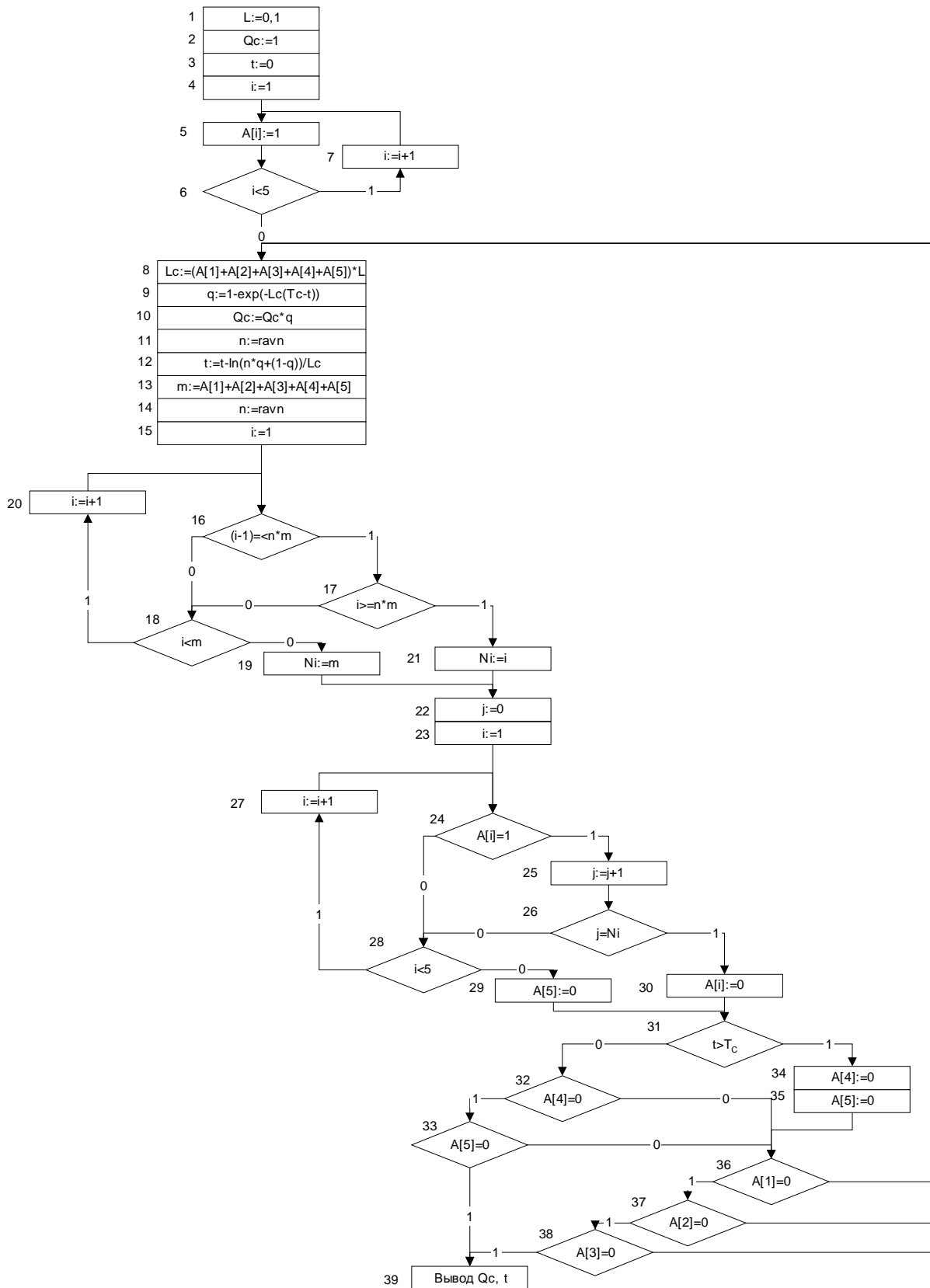


Рис. 2. Блок-схема алгоритма получения вероятности отказа первого варианта ВК

Переменные:

$L$  – интенсивность отказов одного блока;

$Q_c$  – вероятность отказа ВК на интервале работы  $T$ ;

$t$  – время последнего отказа системы;

$A[1..5]$  – массив флагов отказа блоков ( $A[1]$  – ВМ1,  $A[2]$  – ВМ2,  $A[3]$  – ВМ3,  $A[4]$  – ПСН1,  $A[5]$  – ПСН2), 1 – блок исправен, 0 – блок отказал;

$q$  – вероятность возникновения отказа в любом из блоков;

$L_c$  – суммарная интенсивность отказов;

$n$  – равномерно распределенное случайное число в интервале от 0 до 1;

$m$  – количество исправных блоков;

$N_i$  – номер отказавшего блока (из исправных).

Операторы 1-7 выполняют начальную инициализацию переменных.

Операторы 8-12 вычисляют момент отказа следующего блока. Оператор 8 вычисляет суммарную интенсивность отказов  $L_c$ , исходя из количества исправных блоков на данный момент. Оператор 9 вычисляет вероятность возникновения отказа в любом из блоков  $q$ . Оператор 10 вычисляет промежуточное значение вероятности отказа системы  $Q_c$  на интервале работы. Оператор 11 вызывает подпрограмму для получения случайного числа  $n$ . Оператор 12 вычисляет момент следующего отказа системы  $t$ .

Операторы 13-30 определяют, какой блок отказал. Для определения отказа конкретного блока интервал от 0 до 1 делим на одинаковые отрезки по числу исправных блоков. Каждому блоку ставим в соответствие свой отрезок. Получаем случайное число и в зависимости от того, в какой отрезок попало это число, соответствующий блок считаем отказавшим.

Операторы 13-21 определяют номер отказавшего блока среди исправных. Оператор 13 вычисляет количество исправных блоков  $m$ . Оператор 14 вызывает подпрограмму для получения случайного числа  $n$ . Оператор 15 выполняет установку начального значения счетчика отрезков  $i$ . Операторы 18, 20 выполняют последовательный переход от отрезка к отрезку. Операторы 16, 17 проверяют попадание числа  $n$  в текущий отрезок. При выполнении условий этих двух операторов но-

меру отказавшего блока  $N_i$  присваивается номер текущего отрезка (оператор 21). После проверки всех отрезков отказавшим считается последний блок (оператор 19).

Операторы 22-30 осуществляют установку флага отказа у отказавшего блока. Операторы 22, 23 выполняют установку начальных значений счетчиков:  $i$  – счетчик блоков,  $j$  – счетчик исправных блоков. Операторы 27, 28 выполняют последовательный переход к следующему блоку. Оператор 24 проверяет, исправен ли текущий блок: если нет, то осуществляется переход к следующему блоку, если да, то увеличивается на 1 счетчик исправных блоков  $j$  (оператор 25) и проверяется, равен ли счетчик исправных блоков номеру отказавшего блока  $N_i$  (оператор 26). Если нет, то осуществляется переход к следующему блоку, если да, то устанавливается флаг отказа для соответствующего блока в массиве флагов отказов (оператор 30). После проверки всех блоков устанавливается флаг отказа для последнего блока в массиве флагов отказов (оператор 29).

Операторы 31-39 проверяют условие отказа системы. Оператор 31 проверяет, окончила ли работу ПСН до момента отказа ( $t > T_c$ ). Если  $t \leq T_c$ , то проверяется условие отказа второй части системы (операторы 32, 33 проверяют наличие флагов отказа у двух блоков ПСН). При отказе 2 блоков моделирование оканчивается и вычисляется вероятность отказа системы  $Q_c$  и время отказа системы  $t$  (оператор 39). Если исправен хотя бы один блок ПСН, то проверяется условие отказа первой части системы. Если  $t > T_c$ , то блоки ПСН больше не рассматриваются (им присваиваются флаги отказа операторами 34, 35). Затем проверяется условие отказа первой части системы (операторы 36-38). Проверяется наличие флагов отказа у трех блоков ВМ. Если хотя бы один исправен, то осуществляется переход к следующему шагу моделирования (переход к оператору 8). Если все имеют флаги отказа, то моделирование оканчивается и вычисляется вероятность отказа системы  $Q_c$  и время отказа системы  $t$  (оператор 39).

Определение статистического значения математического ожидания  $m_x^*$  и среднеквад-

ратического отклонения  $S_x^*$  осуществляется по формулам

$$m_x^* = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}; s_x^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} - (m_x^*)^2}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество экспериментов,  $x_i$  – результат  $i$ -того эксперимента.

Структурная схема для определения надежности ВК с пятью ВМ представлена на рисунке 1.

Время возникновения отказов каждого блока подчиняется экспоненциальному закону распределения. Вероятность безотказной работы  $P(t)$ :

$$P(t) = e^{-Lt}, \quad (4)$$

где  $L$  – интенсивность отказов.

Вероятность отказа  $Q(t)$ :

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-Lt}. \quad (5)$$

При параллельном соединении элементов система отказывает при отказе всех элементов:

$$Q_c(t) = \prod_i Q_i(t). \quad (6)$$

При последовательном соединении система отказывает при отказе одного элемента:

$$P_c(t) = \prod_i P_i(t). \quad (7)$$

Вероятность отказа первой части системы  $Q_1(t)$  и вероятность безотказной работы  $P_1(t)$ :

$$Q_1(t) = Q(t)^3 = (1 - e^{-Lt})^3, \quad (8)$$

$$P_1(t) = 1 - Q_1(t) = 1 - Q(t)^3 = 1 - (1 - e^{-Lt})^3. \quad (9)$$

Вероятность отказа второй части системы  $Q_2(t)$  и вероятность безотказной работы  $P_2(t)$ :

$$Q_2(t) = Q(t)^2 = (1 - e^{-Lt})^2; \quad (10)$$

$$P_2(t) = 1 - Q_2(t) = 1 - Q(t)^2 = 1 - (1 - e^{-Lt})^2. \quad (11)$$

Вероятность безотказной работы всей системы  $P_c(t)$  и вероятность отказа  $Q_c(t)$ :

$$\begin{aligned} P_c(t) &= P_1(t) * P_2(t) = (1 - Q_1(t)) * (1 - Q_2(t)) = \\ &= (1 - Q(t)^3) * (1 - Q(t)^2) = \\ &= (1 - (1 - e^{-Lt})^3) * (1 - (1 - e^{-Lt})^2); \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Q_c(t) &= 1 - P_c(t) = 1 - P_1(t) * P_2(t) = \\ &= 1 - (1 - Q_1(t)) * (1 - Q_2(t)) = 1 - (1 - Q(t)^3) * (1 - Q(t)^2) = \\ &= 1 - (1 - (1 - e^{-Lt})^3) * (1 - (1 - e^{-Lt})^2). \end{aligned} \quad (13)$$

Так как время работы первой части  $T$ , а второй -  $T_c$ , то получаем

$$Q_c(t) = 1 - (1 - (1 - e^{-LT})^3) * (1 - (1 - e^{-LT_c})^2). \quad (14)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Для системы с четырьмя ВМ время возникновения отказов каждого блока подчиняется экспоненциальному закону распределения. Вероятность безотказной работы  $P(t)$ :

$$P(t) = e^{-Lt}, \quad (15)$$

где  $L$  – интенсивность отказов.

Таблица 1

$T_c$	$L=0,1$	$L=0,09$	$L=0,08$	$L=0,07$	$L=0,06$	$L=0,05$	$L=0,04$	$L=0,03$	$L=0,02$	$L=0,01$
0,9	0,00826	0,00669	0,00528	0,00404	0,00296	0,00205	0,00131	0,00074	0,00033	8E-05
0,8	0,00677	0,00546	0,00430	0,00327	0,00239	0,00165	0,00105	0,00059	0,00026	6E-05
0,7	0,00543	0,00436	0,00342	0,00259	0,00189	0,00130	0,00082	0,00046	0,00020	5E-05
0,6	0,00425	0,00340	0,00265	0,00200	0,00145	0,00099	0,00062	0,00034	0,00015	4E-05
0,5	0,00324	0,00257	0,00199	0,00149	0,00107	0,00073	0,00045	0,00025	0,00011	3E-05

Вероятность отказа  $Q(t)$ :

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-t}. \quad (16)$$

Вероятность безотказной работы системы равна

$$P_c(T) = (P^4(T_2) + 4P^3(T_2)Q(T_2) + 6P^2(T_2)Q^2(T_2) + 4P(T_2)Q^3(T_2))P^4(T_c) + (P^3(T_2) + 3P^2(T_2)Q(T_2) + 3P(T_2)Q^2(T_2))(4P^3(T_c)Q(T_c)) + (P^2(T_2) +$$

$$+ 2P(T_2)Q(T_2))(5P^2(T_c)Q^2(T_c)). \quad (17)$$

Вероятность отказа  $Q_c(t)$ :

$$Q_c(t) = 1 - P_c(t). \quad (18)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Результаты имитационного моделирования для  $L=0,1$ ,  $L=0,05$  и  $L=0,02$  и 1000000 циклов представлены на рис. 3-5.

Таблица 2

$T_c$	$L=0,1$	$L=0,09$	$L=0,08$	$L=0,07$	$L=0,06$	$L=0,05$	$L=0,04$	$L=0,03$	$L=0,02$	$L=0,01$
0,9	0,00858	0,00692	0,00545	0,00416	0,00304	0,00210	0,00134	0,00075	0,00033	8E-05
0,8	0,00676	0,00546	0,00430	0,00328	0,00239	0,00165	0,00105	0,00059	0,00026	6E-05
0,7	0,00518	0,00417	0,00328	0,00250	0,00183	0,00126	0,00080	0,00045	0,00020	5E-05
0,6	0,00381	0,00307	0,00241	0,00184	0,00134	0,00093	0,00059	0,00033	0,00015	4E-05
0,5	0,00267	0,00214	0,00168	0,00128	0,00093	0,00064	0,00041	0,00023	0,00010	3E-05

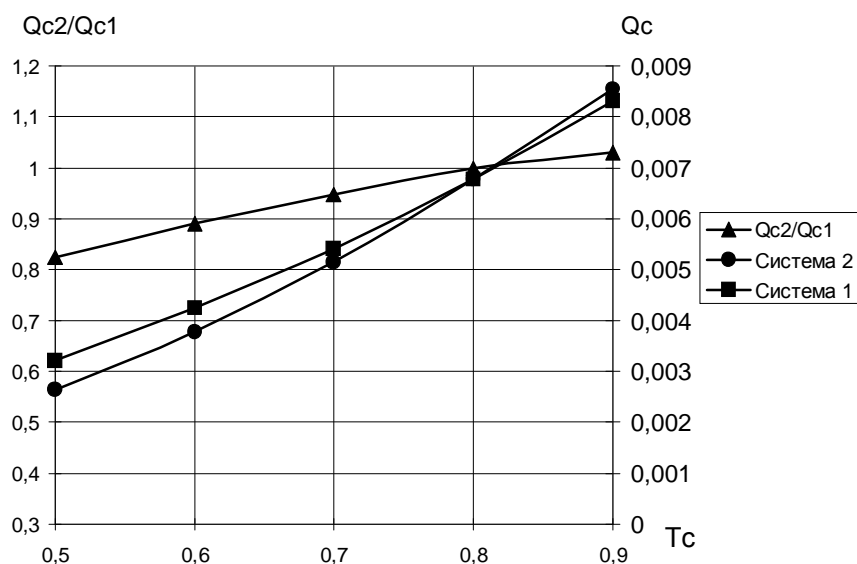


Рис. 3. Вероятность отказа ВК при  $L=0,1$

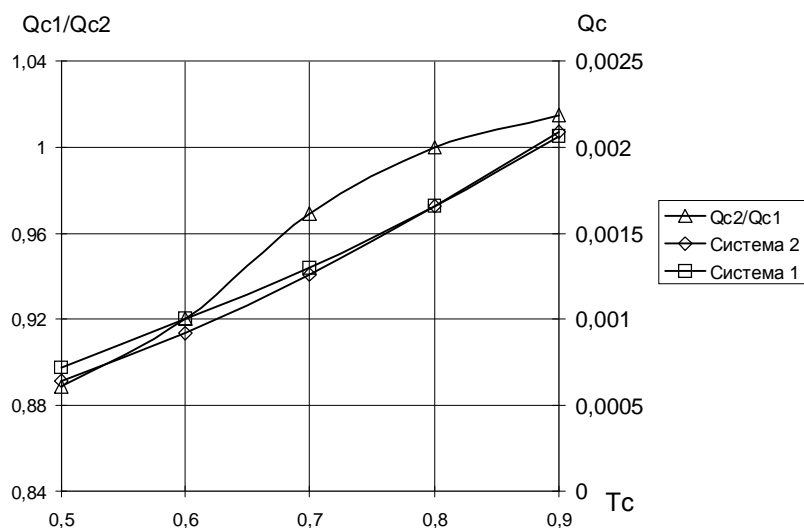


Рис. 4. Вероятность отказа ВК при  $L=0,05$

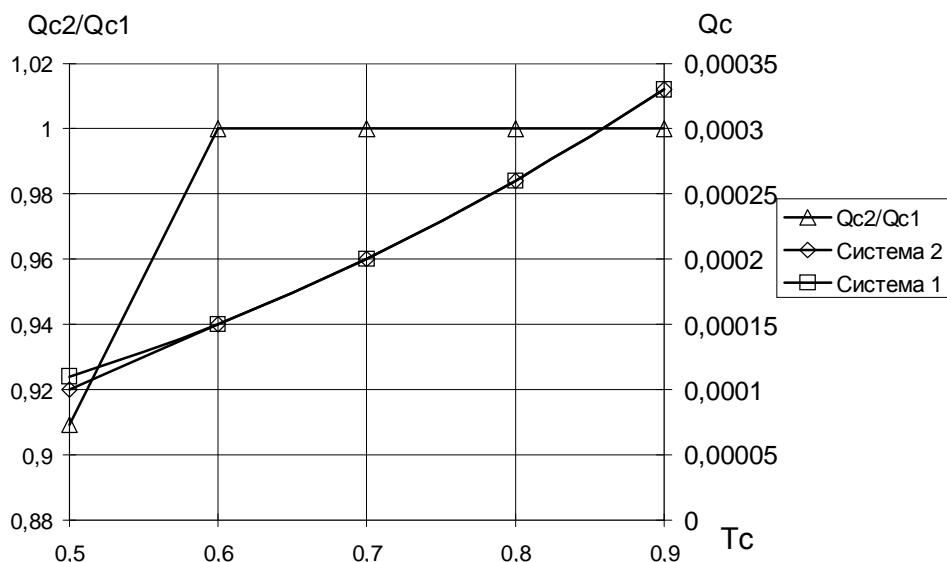


Рис. 5. Вероятность отказа ВК при  $L=0,02$

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

При окончании работы ПСН в пределах 0,7-0,9 от общего времени работы ВК вероятность отказа всего ВК примерно одинакова для обоих вариантов ВК. При уменьшении времени окончания работы ПСН менее 0,7 от общего времени работы вероятность отказа варианта ВК с четырьмя ВМ становится меньше.

Соотношение вероятностей отказа ВК не зависит от интенсивности отказа блоков.

С точки зрения надежности использование варианта с пятью вычислительными модулями преимуществ не имеет.

Если учесть длительный этап хранения и снятия ВК для ремонта в случае возникновения отказа резервных модулей, то вариант ВК с пятью вычислительными модулями существенно проигрывает, так как суммарная интенсивность отказов вычислителей на хранении по сравнению с четырехмодульным вариантом возрастает на 25 %.

Необходимо учесть, что исключение пятого вычислителя сокращает объемно-массовые характеристики, энергопотребление и тепловыделение. При этом существенно сокращается стоимость аппаратуры и трудоемкость изготовления.