ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 62-192:52(031)

НАДЕЖНОСТЬ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ СО СМЕШАННЫМ ПО НАГРУЗКЕ РЕЗЕРВОМ И ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯМИ

Н. А. Смоляров, к.т.н., доцент кафедры ИИБМТ РГРТУ; iibmt@rsreu.ru

Рассматривается задача определения показателей надежности резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом и индивидуальными переключателями. ***Целью работы*** *является получение соотношений, позволяющих оценить среднюю наработку до отказа, вероятность безотказной работы и коэффициент готовности такой системы с кратностью резервирования m = 2 при учете ненадежности индивидуальных переключателей. Используется марковская модель системы. Граф переходов системы – «схема гибели и размножения». В результате решения задачи получены выражения для расчета перечисленных выше показателей надежности, оценки выигрышей в надежности по средней наработке до отказа, коэффициенту вынужденного простоя и вероятности отказа от применения рассматриваемой системы по сравнению с резервированной восстанавливаемой системой с нагруженным резервом. Эти выражения также применимы при любом другом виде резерва по нагрузке и выполнении принятых допущений.*

Ключевые слова: *надежность, резервированная восстанавливаемая система, смешанный по нагрузке резерв, индивидуальные переключатели, средняя наработка до отказа, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности, выигрыш в надежности по средней наработке до отказа, выигрыш в надежности по коэффициенту вынужденного простоя.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-149-154

Введение

Резервирование с восстановлением является высокоэффективным способом повышения надежности технических систем. При этом более надежной является система с ненагруженным резервом, чем система с нагруженным или облегченным резервом. Однако применение ненагруженного резерва не всегда возможно на практике. Это связано с тем, что для включения в работу резервных элементов (подсистем) необходимы предварительный прогрев или подготовка их к работе, например, в радиоэлектронных системах. При этом система должна непрерывно работать или допускаются кратковременные перерывы в ее работе на время переключения элементов при их отказе. В этом случае применяют нагруженный или облегченный резерв, однако эффективность от их использования может быть мала, так как все элементы расходуют свой ресурс с момента включения системы. Смешанный по нагрузке резерв позволяет уменьшить этот недостаток, а при одинаковой избыточности дает выигрыш в надежности. При этом резервные элементы имеют разную степень нагрузки: от нагруженного до ненагруженного резерва, причем при отказе любого из элементов каждый из последующих переходит в режим работы предыдущего элемента. Для выполнения этих действий используется переключатель, который может быть общим или индивидуальным для каждого из элементов. Очевидно, что надежность системы в значительной мере зависит от надежности переключателя. Поэтому при расчете надежности таких систем необходимо учитывать надежность этого устройства.

Оценка надежности резервированных восстанавливаемых систем со смешанным по нагрузке резервом приведена в работах [1 – 4]. Так, в [1] рассмотрена надежность восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке скользящим резервом с абсолютно надежным общим переключателем. В [2] дана оценка надежности восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом и абсолютно надежными индивидуальными переключателями.

В [3, 4] получены соотношения для оценки средней наработки до отказа, коэффициента готовности и вероятности безотказной работы восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом с учетом ненадежности общего переключателя.

Цель работы – получение соотношений для оценки средней наработки до отказа, вероятности безотказной работы и коэффициента готовности резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом с кратностью резервирования $m = 2$ при учете ненадежности индивидуальных переключателей.

Постановка задачи

Отказ любого переключателя приводит к отказу соответствующей подсистемы. Структурная схема надежности системы показана на рисунке 1, где 1 – основная подсистема; 2, 3 – первая и вторая резервные подсистемы соответственно; $П_1$, $П_2$, $П_3$ – переключатели. Интенсивности отказов основной, первой и второй резервных подсистем – λ_1, λ_2 и λ_3 соответственно.

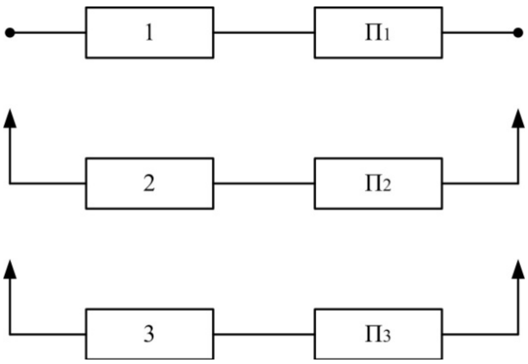

Рисунок 1 – Структурная схема надежности системы

Пусть все подсистемы одинаковые и равнонадежные при одном и том же режиме работы. Условия эксплуатации одинаковые для всех подсистем. В исходном состоянии в зависимости от режима работы резервных подсистем между их интенсивностями отказов и интенсивностью отказов основной подсистемы могут быть следующие соотношения:

1) $\lambda_1 = \lambda_2$, $\lambda_2 > \lambda_3$ – первая резервная подсистема находится в нагруженном, а вторая – в облегченном или ненагруженном резерве;

2) $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ – первая резервная подсистема находится в облегченном, а вторая – в ненагруженном резерве.

Считаем, что при отказе любой подсистемы происходит мгновенное переключение подсистем и их интенсивности отказов в момент замещения изменяются скачком. Например, если откажет основная подсистема, то $\lambda_2 = \lambda_1$ и $\lambda_3 = \lambda_2$, или, если откажет не основная, а первая резервная подсистема, то $\lambda_3 = \lambda_2$, т.е. у оставшихся работоспособных подсистем интенсивности отказов λ_1 и λ_2. Также считаем, что переключатели равнонадежные, интенсивность отказов одного переключателя – $\lambda_П$. После возникновения отказа любая подсистема или любой переключатель сразу начинают восстанавливаться. Интенсивность восстановления одной подсистемы – μ. После восстановления переключатель включается в работу, а подсистема – по мере необходимости. Потоки отказов и восстановлений простейшие, восстановление неограниченное. Необходимо определить среднюю наработку до отказа, вероятность безотказной работы за наработку t и коэффициент готовности рассматриваемой системы.

Решение задачи

Рассмотрим переключатели как элементы подсистем, интенсивности отказов которых следующие:

$$\lambda_{1П} = \lambda_1 + \lambda_П, \quad \lambda_{2П} = \lambda_2 + \lambda_П, \quad \lambda_{3П} = \lambda_3 + \lambda_П, \quad (1)$$

где $\lambda_{1П}$, $\lambda_{2П}$, $\lambda_{3П}$ – интенсивности отказов первой, второй, третьей подсистем с переключателями.

Полагаем, что интенсивность восстановления одной подсистемы с переключателем равна μ.

Так как потоки отказов и восстановлений простейшие, то процесс, протекающий в системе, представляет собой марковский случайный процесс. Граф переходов системы – «схема гибели и размножения» показан на рисунке 2.

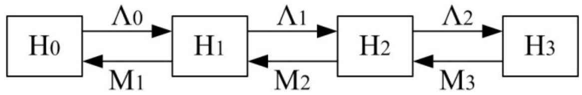

Рисунок 2 – Граф переходов системы

Здесь H_0, H_1, H_2, H_3 – состояния системы. H_0 – все подсистемы работоспособные; H_1 – отказала одна подсистема; H_2 – отказали две подсистемы; H_3 – отказали все подсистемы. Λ_0, Λ_1, Λ_2, M_1, M_2, M_3 – интенсивности переходов системы из одного состояния в другое, причем

$$\Lambda_0 = \lambda_{1П} + \lambda_{2П} + \lambda_{3П}, \quad \Lambda_1 = \lambda_{1П} + \lambda_{2П}, \quad \Lambda_2 = \lambda_{1П}. \quad (2)$$

При неограниченном восстановлении

$$M_1 = \mu, \quad M_2 = 2\mu, \quad M_3 = 3\mu. \quad (3)$$

Определим среднюю наработку до отказа и вероятность безотказной работы системы. В этом случае она представляет собой систему с поглощающим экраном, т.е. интенсивность перехода $M_3 = 0$. Граф переходов системы принимает вид, показанный на рисунке 3.

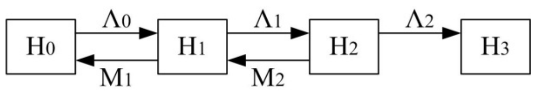

Рисунок 3 – Граф переходов системы с поглощающим экраном

Так как состояние H_3 является неблагоприятным, а состояния H_0, H_1, H_2 – несовместными благоприятными, то вероятность безотказной работы системы за наработку t

$$P_C(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_2(t),$$

где $P_0(t), P_1(t), P_2(t)$ – вероятности состояний системы H_0, H_1, H_2 соответственно в момент времени t.

Средняя наработка до отказа системы

$$T_{\text{СР.С}} = \int_0^\infty P_C(t)dt = \int_0^\infty P_0(t)dt + \int_0^\infty P_1(t)dt + \int_0^\infty P_2(t)dt = \\ = T_{\text{СР.0}} + T_{\text{СР.1}} + T_{\text{СР.2}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{СР.0}}, T_{\text{СР.1}}, T_{\text{СР.2}}$ – среднее время нахождения системы в состоянии H_0, H_1, H_2 соответственно.

Для оценки средней наработки до отказа и вероятности безотказной работы необходимо составить и решить следующие дифференциальные уравнения Колмогорова для вероятностей состояний системы:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -\Lambda_0 P_0(t) + \mathrm{M}_1 P_1(t), \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\Lambda_1 + \mathrm{M}_1) P_1(t) + \Lambda_0 P_0(t) + \mathrm{M}_2 P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= -(\Lambda_2 + \mathrm{M}_2) P_2(t) + \Lambda_1 P_1(t). \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Считаем, что начальные условия следующие: $P_0(0) = 1$ и $P_1(0) = P_2(0) = 0$ (вероятность состояния системы H_3 при $t = 0$ $P_3(0)$ тоже равна нулю).

При определении средней наработки до отказа систему уравнений (5) можно не решать, а воспользоваться готовыми результатами, приведенными в [2], так как граф переходов систем один и тот же. Тогда имеем следующие выражения:

$$T_{\text{СР.0}} = \frac{\Lambda_1\Lambda_2 + (\Lambda_2 + \mathrm{M}_2)\mathrm{M}_1}{\Lambda_0\Lambda_1\Lambda_2}, \quad (6)$$

$$T_{\text{СР.1}} = \frac{\Lambda_2 + \mathrm{M}_2}{\Lambda_1\Lambda_2}, \quad (7)$$

$$T_{\text{СР.2}} = \frac{1}{\Lambda_2}. \quad (8)$$

Формулы (6) – (8) также можно получить, если воспользоваться результатами [3], приняв в них интенсивности переходов $\Lambda_{0\Pi}$, $\Lambda_{1\Pi}$ и $\Lambda_{2\Pi}$ равными нулю (граф переходов системы с общим переключателем сведется к графу, показанному на рисунке 3) и выполнив алгебраические преобразования.

Подставляя соотношения (6) – (8) в выражение (4), определяем среднюю наработку до отказа резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом через интенсивности переходов:

$$T_{\text{СР.С}} = \frac{\Lambda_1(\Lambda_0 + \Lambda_2) + (\Lambda_0 + \mathrm{M}_1)(\Lambda_2 + \mathrm{M}_2)}{\Lambda_0\Lambda_1\Lambda_2}. \quad (9)$$

С учетом выражений (2), (1) и (3) получаем в окончательном виде соотношение для оценки средней наработки до отказа рассматриваемой системы при неограниченном восстановлении:

$$T_{\text{СР.С}} = \left[(\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_\Pi)(2\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 4\lambda_\Pi) + \\ + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 3\lambda_\Pi + \mu)(\lambda_1 + \lambda_\Pi + 2\mu)\right] \times \\ \times \left[(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 3\lambda_\Pi)(\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_\Pi) \times \\ \times (\lambda_1 + \lambda_\Pi)\right]^{-1}. \quad (10)$$

Для определения вероятности безотказной работы систему уравнений (5) также можно не решать, а использовать результаты [4], приняв в них $\Lambda_{0\Pi} = \Lambda_{1\Pi} = \Lambda_{2\Pi} = 0$. Тогда имеем:

$$P_C(t) = \sum_{k=1}^{3} \frac{s_k^2 + b's_k + c'}{3s_k^2 + 2bs_k + c} e^{s_k t}. \quad (11)$$

Здесь b', c', b, c – коэффициенты, которые находятся следующим образом:

$$b' = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \mathrm{M}_1 + \mathrm{M}_2, \quad (12)$$

$$c' = \Lambda_1\Lambda_2 + \Lambda_2\mathrm{M}_1 + \mathrm{M}_1\mathrm{M}_2, \quad (13)$$

$$b = \Lambda_0 + \Lambda_1 + \Lambda_2 + \mathrm{M}_1 + \mathrm{M}_2, \quad (14)$$

$$c = \Lambda_0(\Lambda_1 + \Lambda_2 + \mathrm{M}_2) + \\ + \Lambda_2(\Lambda_1 + \mathrm{M}_1) + \mathrm{M}_1\mathrm{M}_2; \quad (15)$$

$s_k, k = \overline{1,3},$ – корни кубического уравнения в канонической форме

$$as^3 + bs^2 + cs + d = 0, \quad (16)$$

где $a = 1$;

$$d = \Lambda_0\Lambda_1\Lambda_2. \quad (17)$$

Для нахождения корней уравнения (16) введем вместо s новую переменную

$$y = s + \frac{b}{3}. \quad (18)$$

Уравнение (16) примет вид:

$$y^3 + 3py + 2q = 0, \quad (19)$$

где

$$q = \frac{b(2b^2 - 9c) + 27d}{54}, \quad (20)$$

$$p = \frac{3c - b^2}{9}. \quad (21)$$

Для решения уравнения (19) необходимо

определить знак дискриминанта

$$D = q^2 + p^3.$$

Так как $\lambda_1 << \mu$, то анализ дискриминанта D показал, что он является отрицательной величиной, т.е. уравнение (19) имеет три действительных различных корня. При этом $q > 0$, $p < 0$. С учетом сказанного корни уравнения (19) можно представить через вспомогательные величины r и φ:

$$y_1 = -2r\cos\frac{\varphi}{3}, \qquad (22)$$

$$y_2 = 2r\cos\left(60° - \frac{\varphi}{3}\right), \qquad (23)$$

$$y_3 = 2r\cos\left(60° + \frac{\varphi}{3}\right), \qquad (24)$$

где

$$\varphi = \arccos\frac{q}{r^3}, \qquad (25)$$

$$r = \sqrt{|\,p\,|}. \qquad (26)$$

Здесь квадратный корень взят со знаком плюс, так как знак r должен совпадать со знаком q.

Для проверки правильности решения уравнения (19) необходимо использовать свойство корней:

$$y_1 + y_2 + y_3 = 0. \qquad (27)$$

Из выражения (18) следует, что корни уравнения (16) имеют вид:

$$s_1 = y_1 - \frac{b}{3}, \qquad (28)$$

$$s_2 = y_2 - \frac{b}{3}, \qquad (29)$$

$$s_3 = y_3 - \frac{b}{3}. \qquad (30)$$

Таким образом, методика оценки вероятности безотказной работы рассматриваемой системы состоит в следующем:

– определяем интенсивности всех переходов графа, показанного на рисунке 3, по формулам (2), (1) и (3);

– рассчитываем коэффициенты b', c', b, c, d, q, p, используя соотношения (12) – (15), (17), (20), (21);

– вычисляем вспомогательные величины r и φ по выражениям (26) и (25);

– определяем корни уравнения (19) по формулам (22) – (24), проверив правильность решения этого уравнения с помощью равенства (27);

– находим корни уравнения (16), используя выражения (28) – (30);

– вычисляем вероятность безотказной работы системы за наработку t по формуле (11).

Определим коэффициент готовности системы. В этом случае она является системой с отражающим экраном, т.е. интенсивность перехода $\mathrm{M}_3 \neq 0$. Граф переходов такой системы показан на рисунке 2.

Для оценки коэффициента готовности необходимо составить систему уравнений Колмогорова; найти предельные вероятности состояний системы P_0, P_1, P_2, P_3 для ее установившегося режима с использованием нормировочного условия:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1;$$

определить коэффициент готовности системы:

$$K_{\text{Г.С}} = P_0 + P_1 + P_2.$$

Однако решение подобной задачи приведено в работе [2] для резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом с кратностью резервирования $m = 2$ и абсолютно надежными индивидуальными переключателями (граф переходов систем один и тот же). С учетом этого имеем следующее выражение для оценки коэффициента готовности рассматриваемой системы через интенсивности переходов:

$$K_{\text{Г.С}} = \left(1 + \frac{\Lambda_0}{\mathrm{M}_1} + \frac{\Lambda_0\Lambda_1}{\mathrm{M}_1\mathrm{M}_2}\right)\times$$
$$\times\left(1 + \frac{\Lambda_0}{\mathrm{M}_1} + \frac{\Lambda_0\Lambda_1}{\mathrm{M}_1\mathrm{M}_2} + \frac{\Lambda_0\Lambda_1\Lambda_2}{\mathrm{M}_1\mathrm{M}_2\mathrm{M}_3}\right)^{-1}. \qquad (31)$$

Используя соотношения (2), (1) и (3), получаем в окончательном виде выражение для расчета коэффициента готовности рассматриваемой системы с неограниченным восстановлением:

$$K_{\text{Г.С}} = 3\mu\ [(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 3\lambda_{\text{П}})(\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_{\text{П}} +$$
$$+ 2\mu) + 2\mu^2]\{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 3\lambda_{\text{П}})[(\lambda_1 + \lambda_2 +$$
$$+ 2\lambda_{\text{П}})(\lambda_1 + \lambda_{\text{П}} + 3\mu) + 6\mu^2] + 6\mu^3\}^{-1}. \qquad (32)$$

Итак, для определения коэффициента готовности, вероятности безотказной работы и средней наработки до отказа резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом и индивидуальными переключателями необходимо знать интенсивности отказов подсистем, переключателей и интенсивность восстановления одной подсистемы.

Из анализа формул (9), (11) и (31) с учетом равенств (2), (1) и (3) следует, что повышение надежности рассматриваемой системы обеспечивается уменьшением λ_1, λ_2, λ_3, $\lambda_{\text{П}}$ и увеличением μ.

Следует заметить, что выражения (9), (11) и

(31) справедливы при любом другом виде резерва по нагрузке, если выполняются принятые допущения. При этом для системы с нагруженным резервом интенсивности переходов следующие:

$$\left.\begin{aligned}\Lambda_0 = 3(\lambda_1 + \lambda_{\Pi}), \quad \Lambda_1 = 2(\lambda_1 + \lambda_{\Pi}),\\ \Lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_{\Pi};\end{aligned}\right\} \quad (33)$$

для системы с облегченным резервом

$$\Lambda_0 = \lambda_1 + 2\lambda_{\text{O}} + 3\lambda_{\Pi}, \quad \Lambda_1 = \lambda_1 + \lambda_{\text{O}} + 2\lambda_{\Pi},$$
$$\Lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_{\Pi},$$

где λ_{O} – интенсивность отказов резервной подсистемы;
для системы с ненагруженным резервом

$$\Lambda_0 = \lambda_1 + 3\lambda_{\Pi}, \quad \Lambda_1 = \lambda_1 + 2\lambda_{\Pi}, \quad \Lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_{\Pi}.$$

Остальные интенсивности переходов определяются по формулам (3).

Рассмотрим пример использования полученных соотношений для оценки выигрышей в надежности по средней наработке до отказа и коэффициенту вынужденного простоя – G_T и G_K соответственно от применения резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом по сравнению с резервированной восстанавливаемой системой с нагруженным резервом (m = 2) при неограниченном восстановлении. При этом степень нагрузки первых резервных подсистем в данных системах одинакова – обе являются нагруженными резервными подсистемами, $\lambda_2 = \lambda_1$. Вторая резервная подсистема в системе со смешанным по нагрузке резервом находится в ненагруженном резерве, $\lambda_3 = 0$. Индивидуальные переключатели высоконадежные, $\lambda_{\Pi} << \lambda_1$.

Определим выигрыш в надежности по средней наработке до отказа. На основании выражения (10) оценим среднюю наработку до отказа системы со смешанным по нагрузке резервом

$$T_{\text{СР.С}} \approx \frac{6\lambda_1^2 + (2\lambda_1 + \mu)(\lambda_1 + 2\mu)}{4\lambda_1^3}. \quad (34)$$

При $\lambda_1 << \mu$ соотношение (34) примет вид:

$$T_{\text{СР.С}} \approx \frac{\mu^2}{2\lambda_1^3}.$$

Для системы с нагруженным резервом интенсивности отказов всех подсистем одинаковые, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$. Тогда согласно формулам (9), (33) и (3) получим:

$$T_{\text{СР.С}} \approx \frac{8\lambda_1^2 + (3\lambda_1 + \mu)(\lambda_1 + 2\mu)}{6\lambda_1^3} \approx \frac{\mu^2}{3\lambda_1^3}.$$

В результате выигрыш в надежности по средней наработке до отказа от использования смешанного по нагрузке резерва $G_T \approx 1{,}5$.

Найдем выигрыш в надежности по коэффициенту вынужденного простоя. Коэффициент вынужденного простоя системы

$$K_{\text{В.П.С}} = 1 - K_{\text{Г.С}}.$$

С учетом выражения (31) приходим к следующему равенству:

$$K_{\text{В.П.С}} = \frac{\Lambda_0\Lambda_1\Lambda_2}{\mathrm{M}_1\mathrm{M}_2\mathrm{M}_3} \times$$
$$\times \left(1 + \frac{\Lambda_0}{\mathrm{M}_1} + \frac{\Lambda_0\Lambda_1}{\mathrm{M}_1\mathrm{M}_2} + \frac{\Lambda_0\Lambda_1\Lambda_2}{\mathrm{M}_1\mathrm{M}_2\mathrm{M}_3}\right)^{-1}. \quad (35)$$

На основе формулы (35) получим: коэффициент вынужденного простоя системы со смешанным по нагрузке резервом

$$K_{\text{В.П.С}} \approx \frac{2\lambda_1^3}{3\mu^3}\left(1 + \frac{2\lambda_1}{\mu} + \frac{2\lambda_1^2}{\mu^2} + \frac{2\lambda_1^3}{3\mu^3}\right)^{-1} \approx \frac{2\lambda_1^3}{3\mu^3};$$

коэффициент вынужденного простоя системы с нагруженным резервом

$$K_{\text{В.П.С}} \approx \frac{\lambda_1^3}{\mu^3}\left(1 + \frac{3\lambda_1}{\mu} + \frac{3\lambda_1^2}{\mu^2} + \frac{\lambda_1^3}{\mu^3}\right)^{-1} \approx \frac{\lambda_1^3}{\mu^3}.$$

В результате выигрыш в надежности по коэффициенту вынужденного простоя от применения смешанного по нагрузке резерва $G_K \approx 1{,}5$.

Что касается выигрыша в надежности по вероятности отказа G_Q, то проведенные расчеты с использованием пакета MathCAD Prime 2.0 показали, что $G_Q \approx 1{,}5$.

Очевидно, если для рассматриваемой системы со смешанным по нагрузке резервом выполняются следующие условия: $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$, $\lambda_2 = \lambda_{\text{O}}$, $\lambda_3 = 0$, то значения выигрышей в надежности по средней наработке до отказа, коэффициенту вынужденного простоя и вероятности отказа от использования такой системы по сравнению с резервированной восстанавливаемой системой с облегченным резервом будут находиться в интервале приближенно от 1 до 1,5. Значения выигрышей в надежности будут зависеть от отношения $\lambda_{\text{O}} / \lambda_1$. Чем оно больше, тем больше выигрыши в надежности.

Выводы

Итак, чтобы выигрыши в надежности по средней наработке до отказа, коэффициенту вынужденного простоя и вероятности отказа от использования резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом по сравнению с резервированной восстанавливаемой системой с нагруженным резервом были близки к 1,5, необходимо иметь в системе высоконадежные индивидуальные переключатели. Аналогичный вывод можно сделать для рассматриваемой системы со смешанным по нагрузке резервом при других соотношениях между интенсивностями отказов λ_1, λ_2 и λ_3, но необходимо, чтобы отношение λ_O / λ_1 было близко к единице.

Таким образом, получены соотношения для оценки надежности резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом и кратностью резервирования m = 2 с учетом ненадежности индивидуальных переключателей. Эти соотношения также применимы при любом другом виде резерва по нагрузке и выполнении принятых допущений.

Библиографический список

1. Надежность технических систем: справочник/ под ред. **И. А. Ушакова**. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.

2. **Смоляров А. М.** Надежность функционирования автоматизированных систем: учеб. пособие. Рязан. гос. радиотехн. акад. Рязань, 1996. Ч. 2. 68 с.

3. **Смоляров Н. А.** Оценка надежности резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом и общим переключателем // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 41. С. 36 – 40.

4. **Смоляров Н. А.** Расчет надежности восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 48. С. 87 – 91.

UDC 62-192:52(031)

RELIABILITY OF RESTORABLE SYSTEM WITH LOAD-MIXED RESERVE AND INDIVIDUAL SWITCHES

N. A. Smolyarov, PhD (technical sciences), associate professor, RSREU, Ryazan; iibmt@rsreu.ru

Finding problem of the reliability measures of the restorable system with load-mixed reserve and individual switches is considered. The aim of the article is the receiption of the correlations allowing to estimate the mean operating time to failure, reliability function and availability function of this system with redundancy ratio m = 2 and individual switches unreliability account. Markovian model of the system is used. System passages graph – "diagram of birth and death". As the result of problem solution the expressions for calculating above-mentioned reliability measures, estimations of the reliability gains to mean operating time to failure, failure probability and downtime rate from considering system application are obtained. This expressions may be used with any type of a reserve on a load and the execution of received assumptions.

Key words: *reliability, redundant restorable system, load-mixed reserve, individual switches, mean operating time to failure, reliability function, availability function, reliability gain to mean operating time to failure, reliability gain to downtime rate.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-149-154

References

1. *Nadezhnost' tehnicheskih sistem* (Technical systems reliability): spravochnik / Ed. by **I. A. Ushakov**. Moscow: Radio i svjaz', 1985, 608 p. (in Russian).

2. **Smolyarov A. M.** *Nadezhnost' funkcionirovanija avtomatizirovannyh sistem* (Function reliability of automatic systems): ucheb. posobie. Rjazan. gos. radiotehn. akad. Rjazan', 1996, vol. 2, 68 p. (in Russian).

3. **Smolyarov N. A.** Ocenka nadezhnosti rezervirovannoj vosstanavlivaemoj sistemy so smeshannym po nagruzke rezervom i obshim perekljuchatelem. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2012, no. 41, pp. 36 – 40 (in Russian).

4. **Smolyarov N. A.** Raschet nadezhnosti vosstanavlivaemoj sistemy so smeshannym po nagruzke rezervom. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotehnicheskogo universiteta*. 2014, no. 48, pp. 87 – 91 (in Russian).