

УДК 621.3.019.3

## НАДЕЖНОСТЬ ВОССТАНАВЛИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ СО СМЕШАННЫМ ПО НАГРУЗКЕ РЕЗЕРВОМ

**Н. А. Смоляров**, к.т.н., доцент кафедры ИИБМТ РГРТУ, Рязань, Россия;  
orcid.org/0000-0003-1799-7639, e-mail: v.smolyaro@yandex.ru

*Рассматривается задача определения средней наработки на отказ резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом с общим и индивидуальными переключателями. Целью работы является получение соотношений, позволяющих оценить среднюю наработку на отказ такой системы с кратностью резервирования  $m = 2$  при учете ненадежности переключателей. Используется марковская модель надежности системы. В результате решения задачи получены выражения для расчета средней наработки на отказ и оценка выигрыша в надежности по ней 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, общий и индивидуальные переключатели, средняя наработка на отказ, выигрыш в надежности по средней наработке на отказ.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2022-80-181-188

### 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.

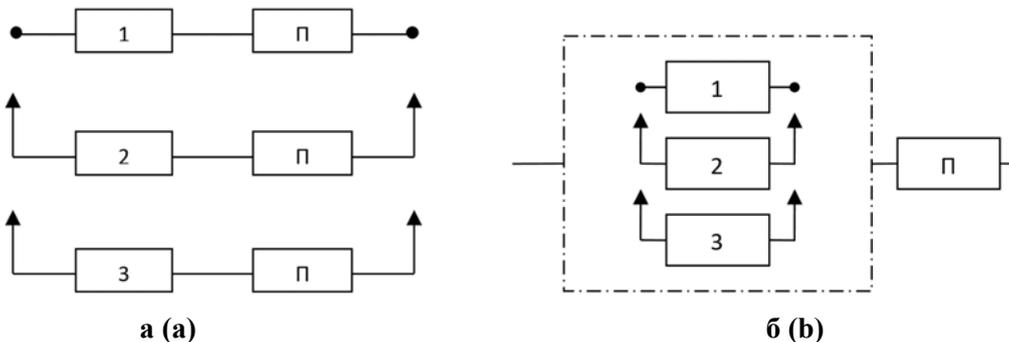
Оценка надежности резервированных восстанавливаемых систем со смешанным по нагрузке резервом приведена в работах [1-5]. Так, в [1] рассмотрена надежность восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке скользящим резервом с абсолютно надежным общим переключателем. В [2] дана оценка надежности восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом и абсолютно надежными индивидуальными переключателями.

В [3-5] получены соотношения для оценки средней наработки до отказа, коэффициента готовности и вероятности безотказной работы восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом с учетом ненадежности переключателей.

*Цель работы* – получение соотношений для оценки средней наработки на отказ резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом с кратностью резервирования  $m = 2$  при учете ненадежности переключателей.

### Постановка задачи

Структурные схемы надежности системы с индивидуальными и общим переключателями показаны на рисунке 1, где 1 – основная подсистема; 2, 3 – первая и вторая резервные подсистемы соответственно; П – переключатели. Отказ любого переключателя приводит к отказу соответствующей подсистемы (рисунок 1, а) или отказ общего переключателя – к отказу всей системы (рисунок 1, б).



**Рисунок 1 – Структурная схема надежности системы:**

**а – с индивидуальными переключателями; б – с общим переключателем**

**Figure 1 – Block diagram of system reliability: а – with individual switches; б – with common switch**

Пусть все подсистемы одинаковые и равнонадежные при одном и том же режиме работы. Условия эксплуатации одинаковые для всех подсистем. Интенсивности отказов основной, первой и второй резервных подсистем –  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  соответственно. 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 –  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Также считаем, что переключатели равнонадежные, интенсивность отказов одного переключателя –  $\lambda_{П}$ . После возникновения отказа любая подсистема или любой переключатель сразу начинают восстанавливаться. После восстановления переключатель включается в работу, а подсистема – по мере необходимости. Потоки отказов и восстановлений простейшие, восстановление неограниченное. Необходимо определить среднюю наработку на отказ рассматриваемой системы.

### Решение задачи

а) Рассмотрим систему с индивидуальными переключателями (рисунок 1, а). Считаем переключатели элементами подсистем, интенсивности отказов которых следующие:

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

где  $\lambda_{1П}$ ,  $\lambda_{2П}$ ,  $\lambda_{3П}$  – интенсивности отказов основной подсистемы, первой и второй резервных подсистем с переключателями соответственно.

Полагаем, что интенсивность восстановления одной подсистемы с переключателем равна  $\mu$ . Решим поставленную задачу двумя способами.

Первый способ основан на анализе потока отказов системы. Так как потоки отказов простейшие, то поток отказов системы будет ординарным и без последствия. Что касается его стационарности, то надо исходить из следующего. При быстром восстановлении, когда среднее время восстановления элемента значительно меньше его средней наработки до отказа (в нашем случае это имеет место:  $\lambda_{iII} \ll \mu$ , где  $\lambda_{iII}$  – интенсивность отказов  $i$ -й подсистемы с переключателем), можно использовать приближенную формулу для вероятности безотказной работы системы за наработку  $t$  [6]:

$$P_c(t) \approx \exp(-t / T_{CP.C}), \tag{2}$$

где  $T_{CP.C}$  – средняя наработка до отказа системы.

Выражения для средней наработки до отказа рассматриваемой системы получены в [5] через интенсивности переходов и через интенсивности отказов и восстановления:

$$T_{CP.C} = \frac{\Lambda_1(\Lambda_0 + \Lambda_2) + (\Lambda_0 + M_1)(\Lambda_2 + M_2)}{\Lambda_0\Lambda_1\Lambda_2}, \tag{3}$$

где  $\Lambda_0, \Lambda_1, \Lambda_2, M_1, M_2$  – интенсивности переходов системы из одного состояния в другое, причем

$$\Lambda_0 = \lambda_{1II} + \lambda_{2II} + \lambda_{3II}, \Lambda_1 = \lambda_{1II} + \lambda_{2II}, \Lambda_2 = \lambda_{1II}, \tag{4}$$

при неограниченном восстановлении

$$M_1 = \mu, M_2 = 2\mu; \tag{5}$$

$$T_{CP.C} = [(\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_{II})(2\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 4\lambda_{II}) + (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 3\lambda_{II} + \mu)(\lambda_1 + \lambda_{II} + 2\mu)] \times \\ \times [(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 3\lambda_{II})(\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_{II})(\lambda_1 + \lambda_{II})]^{-1}. \tag{6}$$

Из соотношения (2) следует, что интенсивность отказов системы  $\Lambda_C(t) \approx const$  и поток отказов её можно считать стационарным и в целом простейшим.

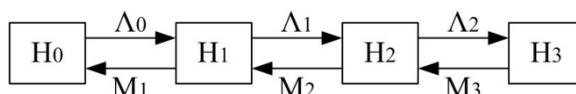
Тогда средняя наработка на отказ рассматриваемой системы с индивидуальными переключателями

$$T_{O.C} \approx T_{CP.C}, \tag{7}$$

где величина  $T_{CP.C}$  этой системы определяется из выражения (6).

Второй способ основан на марковской модели надежности системы.

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 с индивидуальными переключателями**  
**Figure 2 – System passages graph with individual switches**

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;  $\Lambda_0, \Lambda_1, \Lambda_2, M_1, M_2, M_3$  – интенсивности переходов системы из одного состояния в другое, которые определяются с помощью соотношений (4), (5), а

$$M_3 = 3\mu \tag{8}$$

(восстановление неограниченное).

Для оценки средней наработки на отказ рассмотрим систему с отражающим экраном ( $M_3 \neq 0$ ). Коэффициент готовности системы

$$K_{Г.С} = \frac{T_{О.С}}{T_{О.С} + T_{СР.В.С}},$$

где  $T_{СР.В.С}$  – среднее время восстановления системы.

Тогда

$$T_{О.С} = \frac{K_{Г.С} T_{СР.В.С}}{1 - K_{Г.С}}. \quad (9)$$

Коэффициент готовности рассматриваемой системы определяется по формулам, приведенным в [5]:

$$K_{Г.С} = \left(1 + \frac{\Lambda_0}{M_1} + \frac{\Lambda_0 \Lambda_1}{M_1 M_2}\right) \left(1 + \frac{\Lambda_0}{M_1} + \frac{\Lambda_0 \Lambda_1}{M_1 M_2} + \frac{\Lambda_0 \Lambda_1 \Lambda_2}{M_1 M_2 M_3}\right)^{-1}, \quad (10)$$

$$K_{Г.С} = 3\mu [(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 3\lambda_{П})(\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_{П} + 2\mu) + 2\mu^2] \{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 3\lambda_{П})[(\lambda_1 + \lambda_2 + 2\lambda_{П})(\lambda_1 + \lambda_{П} + 3\mu) + 6\mu^2] + 6\mu^3\}^{-1}. \quad (11)$$

Среднее время восстановления системы

$$T_{СР.В.С} = \frac{1}{3\mu}. \quad (12)$$

Таким образом, используя выражения (9), (11), (12), можно рассчитать среднюю наработку на отказ рассматриваемой системы с индивидуальными переключателями, значения которой будут более точными, чем при применении первого способа.

Следует заметить, что предложенные способы определения средней наработки на отказ восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом с индивидуальными переключателями могут быть использованы для расчета этого показателя надежности восстанавливаемой системы при любом другом виде резерва по нагрузке. При этом применяя выражения (3) и (10), надо учитывать следующее. Для системы с нагруженным резервом интенсивности переходов будут иметь вид:

$$\Lambda_0 = 3(\lambda_1 + \lambda_{П}), \Lambda_1 = 2(\lambda_1 + \lambda_{П}), \Lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_{П}; \quad (13)$$

для системы с облегченным резервом

$$\Lambda_0 = \lambda_1 + 2\lambda_0 + 3\lambda_{П}, \Lambda_1 = \lambda_1 + \lambda_0 + 2\lambda_{П}, \Lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_{П},$$

где  $\lambda_0$  – интенсивность отказов резервной подсистемы.

Для системы с ненагруженным резервом

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

Остальные интенсивности переходов определяются по формулам (5) и (8).

б) Рассмотрим систему с общим переключателем (рисунок 1, б).

Считаем, что интенсивность восстановления переключателя –  $\mu_{П}$ . В остальном постановка задачи аналогична вышеприведенной. Решим поставленную задачу теми же двумя способами.

Используя первый способ, надо учитывать следующее. Должны выполняться условия:  $\lambda_i \ll \mu$ ,  $\lambda_{П} \ll \mu_{П}$ , где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$ -й подсистемы.

Согласно [3] средняя наработка до отказа рассматриваемой системы

$$T_{СР.С} = T_{СР.0} + T_{СР.1} + T_{СР.2}, \quad (14)$$

где  $T_{СР.j}$  – среднее время нахождения системы в благоприятном состоянии  $H_j$ ,  $j = \overline{0, 2}$  (рисунок 3);

$$T_{СР.0} = \left[ \Lambda_1 \Lambda_2 + (\Lambda_2 + M_2)(M_1 + \Lambda_{1П}) + (\Lambda_1 + M_1 + \Lambda_{1П}) \Lambda_{2П} \right] \left\{ \Lambda_1 (\Lambda_2 + \Lambda_{2П}) \times \right. \\ \left. \times (\Lambda_0 + \Lambda_{0П}) + (\Lambda_2 + M_2 + \Lambda_{2П}) [\Lambda_0 \Lambda_{1П} + \Lambda_{0П} (M_1 + \Lambda_{1П})] \right\}^{-1}; \quad (15)$$

$$T_{CP.1} = \frac{(\Lambda_0 + \Lambda_{0П})T_{CP.0} - 1}{M_1}; \tag{16}$$

$$T_{CP.2} = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2 + M_2 + \Lambda_{2П}} T_{CP.1}. \tag{17}$$

Здесь интенсивности переходов системы определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \Lambda_0 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, \Lambda_1 = \lambda_1 + \lambda_2, \Lambda_2 = \lambda_1, \Lambda_{0П} = \Lambda_{1П} = \Lambda_{2П} = \lambda_{П}, \\ M_{0П} = M_{1П} = M_{2П} = \mu_{П}; \end{aligned} \right\} \tag{18}$$

при неограниченном восстановлении

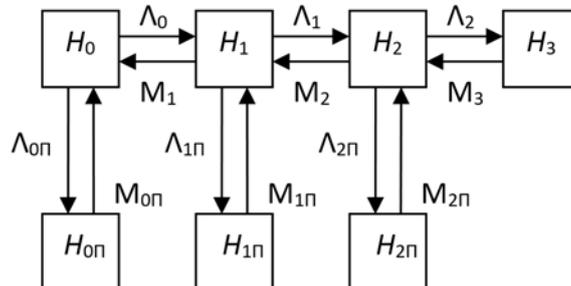
$$M_j = j\mu, j = \overline{1,3}. \tag{19}$$

С учетом выражений (18), (19)

$$\begin{aligned} T_{CP.0} &= \left[ \lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2) + (\lambda_1 + 2\mu)(\mu + \lambda_{П}) + \lambda_{П}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{П} + \mu) \right] \left[ (\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_{П}) \times \right. \\ &\quad \left. \times (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_{П}) + \lambda_{П}(\lambda_1 + \lambda_{П} + 2\mu)(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_{П} + \mu) \right]^{-1}, \\ T_{CP.1} &= \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_{П})T_{CP.0} - 1}{\mu}, \\ T_{CP.2} &= \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_{П} + 2\mu} T_{CP.1}. \end{aligned}$$

В остальном все остается прежним в этом способе.

Применяя второй способ, надо иметь в виду, что граф переходов системы (рисунок 2) изменится и будет иметь вид, показанный на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Граф переходов системы с общим переключателем**  
**Figure 3 – System passages graph with common switch**

Здесь  $H_0, H_1, H_2, H_3, H_{0П}, H_{1П}, H_{2П}$  – состояния системы;  $H_0$  – все подсистемы и переключатель работоспособны;  $H_1$  – отказала одна подсистема;  $H_2$  – отказали две подсистемы;  $H_3$  – отказали все подсистемы;  $H_{0П}$  – все подсистемы работоспособны, отказал переключатель;  $H_{1П}$  – отказали одна подсистема и переключатель;  $H_{2П}$  – отказали две подсистемы и переключатель;  $\Lambda_0, \Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_{0П}, \Lambda_{1П}, \Lambda_{2П}, M_1, M_2, M_3, M_{0П}, M_{1П}, M_{2П}$  – интенсивности переходов системы из одного состояния в другое.

Для оценки средней наработки на отказ рассмотрим систему с отражающим экраном ( $M_3, M_{0П}, M_{1П}, M_{2П}$  не равны нулю).

Среднюю наработку на отказ системы определим по формуле (9). В ней коэффициент готовности системы оценивается с помощью выражений, полученных в [3], через интенсивности переходов и через интенсивности отказов и восстановления:

$$K_{г.с} = \left( 1 + \frac{\Lambda_0}{M_1} + \frac{\Lambda_0 \Lambda_1}{M_1 M_2} \right) \left( 1 + \frac{\Lambda_0}{M_1} + \frac{\Lambda_0 \Lambda_1}{M_1 M_2} + \frac{\Lambda_0 \Lambda_1 \Lambda_2}{M_1 M_2 M_3} + \frac{\Lambda_{0П}}{M_{0П}} + \frac{\Lambda_{1П} \Lambda_0}{M_{1П} M_1} + \frac{\Lambda_{2П} \Lambda_0 \Lambda_1}{M_{2П} M_1 M_2} \right)^{-1}, \tag{20}$$

$$K_{Г.С} = \left[ 1 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{\mu} + \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)(\lambda_1 + \lambda_2)}{2\mu^2} \right] \left[ 1 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}{\mu} + \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)(\lambda_1 + \lambda_2)}{2\mu^2} + \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)(\lambda_1 + \lambda_2)\lambda_1}{6\mu^3} + \frac{\lambda_{II}}{\mu_{II}} + \frac{\lambda_{II}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)}{\mu_{II}\mu} + \frac{\lambda_{II}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)(\lambda_1 + \lambda_2)}{2\mu_{II}\mu^2} \right]^{-1}. \quad (21)$$

Среднее время восстановления системы найдем, используя относительную частоту появления её неблагоприятных состояний  $H_{0II}, H_{1II}, H_{2II}, H_3$ :

$$T_{СР.В.С} = \frac{3\Lambda_{0II}}{3\Lambda_{0II} + \Lambda_2} \cdot \frac{1}{M_{0II}} + \frac{\Lambda_2}{3\Lambda_{0II} + \Lambda_2} \cdot \frac{1}{M_3},$$

или

$$T_{СР.В.С} = \frac{1}{3\lambda_{II} + \lambda_1} \left( \frac{3\lambda_{II}}{\mu_{II}} + \frac{\lambda_1}{3\mu} \right). \quad (22)$$

Итак, используя соотношения (9), (21), (22), можно оценить среднюю наработку на отказ рассматриваемой системы с общим переключателем, значения которой будут более точными, чем при применении первого способа.

Надо заметить, что рассмотренные способы определения средней наработки на отказ восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом с общим переключателем могут быть применены для оценки этого показателя надежности восстанавливаемой системы при любом другом виде резерва по нагрузке. При этом, используя соотношения (14) – (17) и (20), необходимо учитывать следующее. Для системы с нагруженным резервом интенсивности переходов  $\Lambda_0 = 3\lambda_1, \Lambda_1 = 2\lambda_1$  а остальные интенсивности переходов находятся с помощью формул (18), (19). Для системы с облегченным резервом  $\Lambda_0 = \lambda_1 + 2\lambda_o$  где  $\lambda_o$  – интенсивность отказов резервной подсистемы;  $\Lambda_1 = \lambda_1 + \lambda_o$ , а остальные интенсивности переходов определяются из выражений (18), (19). Для системы с ненагруженным резервом  $\Lambda_0 = \Lambda_1 = \lambda_1$ , а остальные интенсивности переходов получаются из формул (18), (19).

Рассмотрим пример использования полученных соотношений для оценки выигрыша в надежности по средней наработке на отказ  $G_T$  от применения резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом по сравнению с резервированной восстанавливаемой системой с нагруженным резервом ( $m = 2$ ) и индивидуальными переключателями 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,  $\lambda_3 = 0$ . С учетом того, что в ряде случаев используются высоконадежные переключатели [1, 6], считаем переключатели такими.

Определим выигрыш в надежности по средней наработке на отказ. На основании выражений (7) и (6) оценим среднюю наработку на отказ системы со смешанным по нагрузке резервом

$$T_{o.c} \approx \frac{6\lambda_1^2 + (2\lambda_1 + \mu)(\lambda_1 + 2\mu)}{4\lambda_1^3}. \quad (23)$$

Так как  $\lambda_1 \ll \mu$  соотношение (23) примет вид:

$$T_{o.c} \approx \frac{\mu^2}{2\lambda_1^3}.$$

Для системы с нагруженным резервом интенсивности отказов всех подсистем одинаковые,  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$ . Тогда согласно формулам (7), (3), (13), (5) и (8) получим:

$$T_{o.c} \approx \frac{8\lambda_1^2 + (3\lambda_1 + \mu)(\lambda_1 + 2\mu)}{6\lambda_1^3} \approx \frac{\mu^2}{3\lambda_1^3}.$$

В результате выигрыш в надежности по средней наработке на отказ от использования смешанного по нагрузке резерва  $G_T \approx 1,5$ . Такой же результат получится для рассматриваемой системы с общим высоконадежным переключателем.

Очевидно, если в резервированной восстанавливаемой системе со смешанным по нагрузке резервом  $\lambda_2 = \lambda_1$ , а  $0 < \lambda_3 < \lambda_2$  т.е. вторая резервная подсистема находится в облегченном резерве ( $\lambda_3 = \lambda_0$ ), то значения выигрыша в надежности по средней наработке на отказ от применения такой системы по сравнению с резервированной восстанавливаемой системой с нагруженным резервом будет находиться в интервале приблизительно от 1 до 1,5. Значения величины  $G_T$  будут зависеть от отношения  $\lambda_0 / \lambda_1$ . Чем оно меньше, тем больше выигрыш в надежности.

Если для резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом выполняются следующие условия:  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ ,  $\lambda_2 = \lambda_0$ ,  $\lambda_3 = 0$ , то значения величины  $G_T$  от использования такой системы по сравнению с резервированной восстанавливаемой системой с облегченным резервом также будут находиться в интервале приблизительно от 1 до 1,5. Чем больше отношение  $\lambda_0 / \lambda_1$ , тем больше выигрыш в надежности.

### Заключение

Итак, чтобы выигрыш в надежности по средней наработке на отказ от использования резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом, при  $\lambda_1 = \lambda_2$ ,  $\lambda_3 = 0$ , по сравнению с резервированной восстанавливаемой системой с нагруженным резервом ( $m = 2$ ) был близок к 1,5, необходимо иметь в системе высоконадежные переключатели. Аналогичный вывод можно сделать для рассматриваемой системы со смешанным по нагрузке резервом при других соотношениях между интенсивностями отказов  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , но необходимо, чтобы отношение  $\lambda_0 / \lambda_1$  было близко к нулю при  $\lambda_2 = \lambda_1$ ,  $\lambda_3 = \lambda_0$ , и это отношение было близко к единице при  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ ,  $\lambda_2 = \lambda_0$ ,  $\lambda_3 = 0$ .

Таким образом, получены двумя способами соотношения для оценки средней наработки на отказ резервированной восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом и кратностью резервирования  $m = 2$  с учетом ненадежности переключателей, причем более точный результат даёт второй способ, а первый можно использовать при ориентировочной оценке надежности рассматриваемой системы. Эти соотношения, с учетом приведенных уточнений для интенсивностей переходов системы, 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., Аксенов И. Н.** Расчет надежности восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 48. С. 87-91.

5. **Смоляров Н. А.** Надежность восстанавливаемой системы со смешанным по нагрузке резервом и индивидуальными переключателями // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. № 56. С. 149-154.

6. **Черкесов Г. Н.** Надежность аппаратно-программных комплексов: учеб. пособие. – СПб.: Питер, 2005. 479 с.

UDC 621.3.019.3

## RELIABILITY OF RESTORABLE SYSTEM WITH LOAD-MIXED RESERVE

**N. A. Smolyarov**, Ph.D. (Tech.), associate professor, RSREU, Ryazan, Russia;  
orcid.org/0000-0003-1799-7639, e-mail: v.smolyaro@yandex.ru

*Finding problem of mean operating time between failures of restorable system with load-mixed reserve, common and individual switches is considered. **The aim of the article** is to obtain correlations allowing to estimate mean operating time between failures of this system with redundancy ratio  $m = 2$  taking into account switches unreliability. Markovian model of system reliability is used. As a result of problem solution the expressions for calculating mean operating time between failures, estimation of reliability gain to it from considering system application as compared with restorable system with loaded reserve are obtained. These expressions may be used with any type of reserve on a load and with the execution of the assumptions received.*

**Key words:** reliability, redundant restorable system, load-mixed reserve, common and individual switches, mean operating time between failures, reliability gain to mean operating time between failures.

**DOI:** 10.21667/1995-4565-2022-80-181-188

### References

1. *Nadezhnost' tehnikeskikh sistem* (Technical systems reliability): справочник Ed. by **I. A. Ushakov**. Moscow: Radio i svjaz', 1985. 608 p. (in Russian).
2. **Smolyarov A. M.** *Nadezhnost' funkcionirovaniya avtomatizirovannykh 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 pereklyuchatelem. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2012, no. 41, pp. 36-40. (in Russian).
4. **Smolyarov N. A., Aksernov I. N.** Raschet nadezhnosti vosstanavlivaemoj sistemy so smeshannym po nagruzke rezervom. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2014, no. 48, pp. 87-91. (in Russian).
5. **Smolyarov N. A.** Nadezhnost' vosstanavlivaemoj sistemy so smeshannym po nagruzke rezervom i individual'nymi pereklyuchatelyami. *Vestnik Rjazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2016, no. 56, pp. 149-154. (in Russian).
6. **Cherkesov G. N.** *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov* (Reliability of apparatus-programme complexes): ucheb. posobie. SPb: Piter. 2005, 479 p. (in Russian).