

## ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 621.3.019

### РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ БЕЗ ВОССТАНОВЛЕНИЯ\*

Б.И. ФИЛИПPOB<sup>1</sup>, Т.Б. ТРУШ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доцент, кандидат технических наук. E-mail: filiprov-boris@rambler.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет. E-mail: tanuza95@mail.ru

В работе показан расчет надежности радиотехнических систем (РТС) без восстановления. При этом рассматриваются все возможные варианты резервирования РТС: резервирование РТС с горячим резервом; РТС с резервированием последовательно соединенных блоков; резервирование РТС с горячим (нагруженным) резервом при замещении; скользящее резервирование; скользящее резервирование РТС, работающих автономно, и резервирование РТС с холодным резервом при замещении. Показано, что даже при низкой вероятности безотказной работы отдельных элементов (0,5 и менее) можно получить сколь угодно высокую надежность системы в целом за счет параллельного резервирования. Расчеты показывают, что при горячем резерве поэлементное резервирование всегда выгоднее резервирования в целом. Показано, что если число основных блоков велико, то ненадежность переключателей может оказаться решающей и поэлементное резервирование может оказаться хуже резервирования в целом. При этом надо учитывать, что в случае поэлементного резерва переключатели стоят в каждом элементе, а резервирование в целом *требует* только одного переключателя. Один же переключатель можно сделать сколь угодно надежным. Поэтому этот вопрос требует дополнительного изучения. В общем случае, когда число резервных блоков больше двух, можно определить требования к переключателям системы с поэлементным резервированием, когда эта система оказывается надежнее резервирования в целом. Показано, что разбиение скользящего резерва на группы дает проигрыш по сравнению с общим использованием резерва.

**Ключевые слова:** основные блоки, резервные блоки, надежность отдельных элементов, надежность системы в целом, надежность переключателей, интенсивность отказов, резервирование радиотехнических систем с холодным резервом, резервирование радиотехнических систем с горячим резервом, скользящее резервирование

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-1-47-68

---

\* Статья получена 27 ноября 2015 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие радиоэлектронной промышленности приводит к быстрому росту функциональности выпускаемых изделий и усложнению структуры РТС при одновременном повышении требований к их надежности. Используемые модели имеют ряд недостатков, главным из которых является то, что они позволяют получить точную оценку показателей безотказности только в отдельных (частных) случаях [1–12]. Такая оценка пригодна для подтверждения требований технического задания, но не дает возможности провести сравнительный анализ различных вариантов реализации РТС по уровню безотказности.

Поэтому актуальной задачей является разработка общих методов исследования надежности РТС, позволяющих учесть различные алгоритмы конфигурации и резервирования.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЕ

### РТС без резервирования

Структурная схема надежности системы имеет вид, показанный на рис. 1. На этой схеме  $n$  – число блоков в системе;  $p_1(t)$ ,  $p_2(t)$ ,  $p_i(t)$ , ...,  $p_n(t)$  – вероятности безотказной работы соответствующих блоков [13].

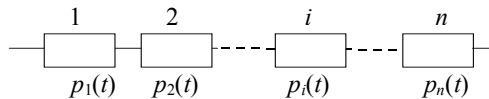


Рис. 1. Структурная схема надежности РТС без резервирования

Определим вероятность безотказной работы всей системы. Обозначим  $A_i$  – событие безотказной работы блоков (подсистем) за время  $t$ .

Вероятность безотказной работы РТС будет равна вероятности совместного появления (пересечения)  $n$  событий  $A_i$ :

$$P_{1n}(t) = P \left\{ \bigcap_{i=1}^n A_i \right\}.$$

Если отказы блоков независимы (что довольно часто имеет место на практике), то

$$P_{1n}(t) = \prod_1^n P \{ A_i \} = \prod_{i=1}^n p_i(t).$$

Если, кроме того,  $p_1(t) = p_2(t) = p_i(t) = p(t)$ , то

$$P_{1n}(t) = p^n(t). \tag{1}$$

Тогда требования надежности для каждого блока при заданной надежности всей системы можно определить следующим образом:

$$p(t) = \sqrt[n]{P_n(t)}. \tag{2}$$

**Пример 1.** При  $P_{1n}(t) = 0,99$  и  $n = 1000$  вероятность безотказной работы каждого элемента в соответствии с выражением (2) равна

$p(t) = \sqrt[1000]{0,99} = 0,999995$ , но такое требование зачастую является невозможным. Для других  $n$  результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Вероятности безотказной работы системы из однотипных основных элементов**

$p(t)$	Значения $P_n(t)$ при $n$			
	10	50	100	1000
0,85	0,196	0,000	0,000	0,000
0,95	0,600	0,077	0,006	0,000
0,99	0,905	0,603	0,303	0,000
0,999	0,990	0,955	0,906	0,366

**РТС с резервированием (горячий резерв),  $n = 1$**

Структурная схема надежности системы имеет вид, показанный на рис. 2.

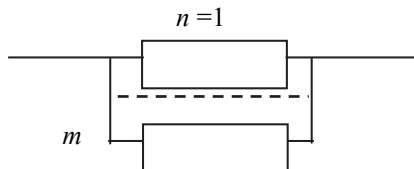


Рис. 2. Структурная схема надежности РТС с резервированием

На этой схеме  $n = 1$  – основной рабочий блок,  $m$  – общее число блоков в системе вместе с резервом ( $m = 2, 3, \dots$ );  $p_1(t) = p_2(t) = p_i(t) = p(t)$  – вероятности безотказной работы соответствующих блоков.

Определим вероятность безотказной работы всей системы  $P_{m1}(t)$ . Обозначим  $B_i$  – событие безотказной работы блоков (подсистем) за время  $t$ . Вероятность безотказной работы РТС будет равна вероятности хотя бы одного события из  $m$  событий  $B_i$  [14]:

$$P_{m1}(t) = P\left\{\bigcup_1^m B_i\right\}.$$

События  $B_i$  совместны. Поэтому событие безотказной работы всей системы  $B = \bigcup_1^m B_i$ , а противоположное событие  $\bar{B} = \bigcap_1^m \bar{B}_i$  – это отказ.

Тогда  $P\{B\} = 1 - P\{\bar{B}\}$ . Следовательно,

$$\begin{aligned} P_{m1}(t) &= 1 - P\left\{\bigcap_1^m \bar{B}_i\right\} = 1 - \prod_1^m P\{\bar{B}_i\} = 1 - \prod_1^m [1 - P(B_i)] = \\ &= 1 - \prod_1^m [1 - p_i(t)] = 1 - [1 - p(t)]^m. \end{aligned} \quad (3)$$

Выражение (3) указывает на принцип построения надежной системы из ненадежных элементов.

**Пример 2.** При  $P_{m1}(t) = 0,875$  и  $m = 3$  вероятность безотказной работы каждого элемента равна

$$p(t) = 1 - [1 - P_{m1}(t)]^{1/m} = 1 - [1 - 0,875]^{1/3} = 0,5.$$

То есть даже при вероятности безотказной работы каждого элемента 0,5 вероятность безотказной работы системы параллельных элементов достаточно высока. Для других случаев результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Вероятности безотказной работы системы при параллельном включении элементов**

$p(t)$	Значения $P_m(t)$ при $m$		
	2	3	4
0,5	0,750	0,875	0,9375
0,95	0,9975	0,9999	0,99999
0,99	0,9999	0,999999	0,99999999

**РТС с резервирование последовательно соединенных блоков**

Структурная схема надежности системы имеет вид, показанный на рис. 3. На этой схеме  $n > 1$  – основные рабочие блоки,  $r$  – число последовательно соединенных блоков в одной группе,  $m$  – общее число параллельно соединенных блоков в группе (вместе с резервом);  $p_1(t) = p_2(t) = p_i(t) = p(t)$  – вероятности безотказной работы соответствующих блоков. Число групп в системе  $s = n / r$ .

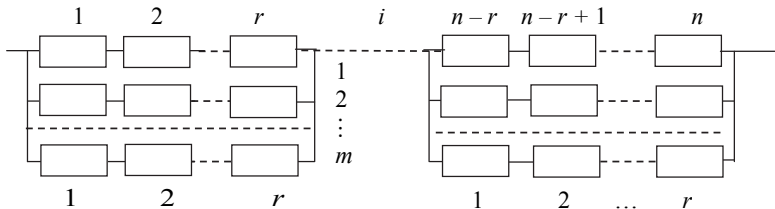


Рис. 3. Структурная схема надежности РТС с резервированием последовательно соединенных блоков

Определим вероятность безотказной работы всей системы  $P_{mn}^{(r)}(t)$ .

Для  $r$  последовательно соединенных блоков в группе (без резерва) можно записать вероятность безотказной работы за время  $t$  на основании (1).

$$P_{1r}(t) = p^r(t).$$

Та же вероятность, но для группы с резервированием, равна

$$P_{mr}(t) = 1 - [1 - p^r(t)]^m.$$

Тогда вероятность безотказной работы всей системы, состоящей из  $s$  групп, равна

$$P_{mn}^{(r)}(t) = \left\{ 1 - [1 - p^r(t)]^m \right\}^s.$$

Из этого следует:

1) при резервировании в целом  $s = 1$ ,  $r = n$

$$P_{mn}^{(n)} = 1 - [1 - p^n(t)]^m; \quad (4)$$

2) поэлементное резервирование  $s = n$ ,  $r = 1$

$$P_{mn}^{(1)} = \left\{ 1 - [1 - p(t)]^m \right\}^n; \quad (5)$$

3) из выражений (4) и (5) видно, что  $P_{mn}^{(1)}(t) > P_{mn}^{(n)}(t)$ , хотя общее число подсистем одинаково и равно  $m \times n$ . Следовательно, поэлементное резервирование при горячем резервировании выгоднее.

Найдем общее число блоков при поэлементном резервировании и резервировании в целом, когда вероятность безотказной работы систем одинакова и равна  $P_{mn}(t)$ .

При резервировании в целом

$$m_{ц} = \frac{\ln[1 - P_{mn}(t)]}{\ln[1 - p^n(t)]},$$

тогда общее число блоков равно  $n \times m_{ц}$ .

При поэлементном резервировании

$$m_3 = \frac{\ln[1 - P_{mn}^{1/n}(t)]}{\ln[1 - p(t)]},$$

тогда общее число блоков равно  $n \times m_3$ .

**Пример 3.** Пусть, например,  $P_{mn}(t) = 0,99$ ;  $p(t) = 0,9$ ;  $n = 100$ .

Тогда  $m_{ц} = 10^5 \rightarrow m_{ц} \times n = 10^7$ ,

$m_{з} = 7 \rightarrow m_{з} \times n = 700$  блоков.

Следовательно, при горячем резерве поэлементное резервирование всегда выгоднее резервирования в целом.

**Пример 4.** РТС дублирована горячим (нагруженным) резервом.

Структурная схема надежности изображена на рис. 4.

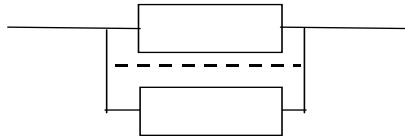


Рис. 4. Дублирование ( $n = 1, m = 2, 3, \dots$ )

Плотность вероятности отказов соответствует модели в период нормальной эксплуатации  $w(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ , а вероятность безотказной работы равна

$$p(t) = -\int_0^t w(t) dt = e^{-\lambda t}.$$

Определим вероятность безотказной работы всей системы  $P_{mn}(t)$ .

Согласно выражению (3), при  $m = 2$

$$\begin{aligned} P_{21}(t) &= 1 - [1 - p(t)]^2 = 1 - [1 - e^{-\lambda t}]^2 = \\ &= 1 - 1 + 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} = e^{-\lambda t} [2 - e^{-\lambda t}] = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}. \end{aligned}$$

Среднее время безотказной работы  $t^*$ :

$$\begin{aligned} t_2^* &= \int_0^{\infty} p(t) dt = \int_0^{\infty} (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}) dt = -\int_0^{\infty} \frac{2e^{-\lambda t}}{\lambda} dt + \frac{1}{2\lambda} \int_0^{\infty} e^{-2\lambda t} dt = \\ &= \frac{2}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} = t^* \left[ \frac{3}{2} \right] = \frac{1,5}{\lambda}, \end{aligned}$$

т. е. на 50 % больше, чем без резерва.

Согласно выражению (3), при  $m = 3$





Среднее значение интенсивности отказов для полупроводниковой ИМС составляет  $\lambda = 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ , следовательно, при  $m = 2$  среднее время безотказной работы  $t^*$  равно

$$t_2^* = \frac{1,5}{\lambda} = \frac{1,5}{0,45 \cdot 10^{-6}} = 3,33(3) \cdot 10^6 \text{ ч},$$

при  $m = 3$

$$t_3^* = \frac{1,83}{\lambda} = \frac{1,83}{0,45 \cdot 10^{-6}} = 4,067 \cdot 10^6 \text{ ч}.$$

В общем случае с увеличением  $m$  среднее время безотказной работы всей системы увеличивается в соответствии с выражением

$$t_m^* = t^* \sum_{k=1}^m \frac{1}{k}.$$

Следовательно, горячий резерв выгоден при большом  $m$ .

### РТС с горячим (нагруженным) резервом при замещении

Структурная схема надежности системы имеет вид, показанный на рис. 6.

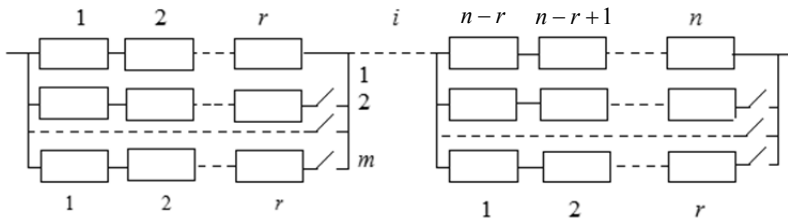


Рис. 6. Структурная схема надежности РТС при резервировании с замещением (—/— — переключатель)

На этой схеме  $n > 1$  – основные рабочие блоки;  $r$  – число последовательно соединенных блоков в одной группе;  $m$  – общее число параллельно соединенных блоков в группе (вместе с резервом);  $p_1(t) = p_2(t) = p_i(t) = p(t)$  – вероятности безотказной работы соответствующих блоков;  $p_n(t)$  – вероятности безотказной работы переключателя. При отказе основного или резервного блока очередной резервный блок подключается к нагрузке группы с помощью пере-

ключателя. Число групп в системе  $s = \frac{n}{r}$ , число переключателей в каждой группе равно  $m - 1$ . Переключатель может быть один для всей группы, но в схеме надежности он должен учитываться с каждой ветвью.

Определим вероятность безотказной работы всей системы  $P_{mn}^{(r)}(t)$ .

Вероятность безотказной работы рабочей ветви в одной группе на основании выражения (3) равна  $p^r(t)$ . Вероятность безотказной работы ветви с переключателем, соответственно, равна  $p_{\Pi}(t)p^r(t)$ .

Вероятность безотказной работы одной группы с резервом

$$p^{(r)}(t) = \left\{ 1 - [1 - p^r(t)] [1 - p_{\Pi}(t)p^r(t)]^{m-1} \right\}.$$

Тогда для всей системы (всех  $s$  групп)

$$P_{mn}^{(r)}(t) = \left\{ 1 - [1 - p^r(t)] [1 - p_{\Pi}(t)p^r(t)]^{m-1} \right\}^{\frac{n}{r}}.$$

Из этого следуют частные случаи:

1) при резервировании в целом

$$P_{mn}^{(n)}(t) = 1 - [1 - p^n(t)] [1 - p_{\Pi}(t)p^n(t)]^{m-1}.$$

2) при резервировании по элементам  $s = n$ ,  $r = 1$

$$P_{mn}^{(1)}(t) = \left\{ 1 - [1 - p(t)] [1 - p_{\Pi}(t)p(t)]^{m-1} \right\}^n.$$

Общее число элементов (блоков) при резервировании в целом равно  $nm + (m - 1)$ ; при резервировании по элементам —  $nm + n(m - 1)$ .

Если  $n$  велико, то ненадежность переключателей может оказаться решающей и поэлементное резервирование может оказаться хуже резервирования в целом. Рассмотрим этот вопрос более подробно на частном примере.

Пусть имеется система с дублированием ( $m = 2$ ) и замещением. Тогда при резервировании в целом вероятность безотказной работы системы будет равна

$$P_{2n}^{(n)} = 1 - (1 - p^n)(1 - p_{\Pi}p^n);$$

при поэлементном резервировании

$$P_{2n}^{(1)} = [1 - (1-p)(1-p_{\Pi}p)]^n.$$

Покажем, что  $P_{2n}^{(1)} > P_{2n}^{(n)}$ , т. е. лучше поэлементное замещение, когда  $0 < p < 1$ ;  $0 < p_{\Pi} < 1$ .

Преобразуем неравенство  $P_{2n}^{(1)} > P_{2n}^{(n)}$  к явному виду:

$$(p + p_{\Pi}p - p_{\Pi}p^2)^n > p^n + p_{\Pi}p^n - p_{\Pi}p^{2n};$$

$$(1 + p_{\Pi} - p_{\Pi}p)^n > (1 + p_{\Pi} - p_{\Pi}p^n);$$

$$\frac{(1 + p_{\Pi} - p_{\Pi}p)^n - 1}{p_{\Pi}(1-p)} > \frac{(1-p^n)}{1-p};$$

$$\frac{(1 + p_{\Pi} - p_{\Pi}p)^n - 1}{(1 + p_{\Pi} - p_{\Pi}p) - 1} > \frac{1-p^n}{1-p}.$$

Последнее неравенство можно записать в виде ряда

$$\sum_{k=0}^{n-1} (1 + p_{\Pi} - p_{\Pi}p)^k - \sum_{k=0}^{n-1} p^k > 0 \quad \text{или} \quad \sum_{k=0}^{n-1} [(1 + p_{\Pi} - p_{\Pi}p)^k - p^k] > 0.$$

Так как все члены ряда имеют одинаковый знак, то

$$1 + p_{\Pi} - p_{\Pi}p - p = (1-p)(1+p_{\Pi}) > 0, \text{ что очевидно.}$$

Следовательно, неравенство справедливо, и резервирование по элементам с замещением лучше резервирования в целом при одинаковой надежности переключателей.

Однако при этом надо учитывать, что в случае поэлементного резерва переключатели стоят в каждом элементе (всего элементов  $3n$ ), а резервирование в целом *требует* одного переключателя (всего элементов  $2n + 1$ ). Один переключатель можно сделать очень надежным, тогда  $P_{\Pi}^{(n)} > P_{\Pi}^{(1)}$ .

Поэтому этот вопрос требует дополнительного изучения.

Пусть  $p_{\Pi}^{(n)} = 1$ , а  $p_{\Pi}^{(1)} < 1$ . Очевидно, что в этом случае существует область значений  $P_{\Pi} = p_{\Pi}^{(1)} < 1$ , где резервирование по элементам все-таки лучше резервирования в целом:

$$(1 + p_{\Pi} - p_{\Pi}p)^n > 1 - p^n;$$

$$(1 + p_{\Pi} - p_{\Pi}p) > (1 - p^n)^{\frac{1}{n}};$$

$$p_{\Pi} [1 - p] > (1 - p^n)^{\frac{1}{n}} - 1;$$

$$p_{\Pi} > \frac{(1 - p^n)^{\frac{1}{n}} - 1}{1 - p}.$$

В общем случае, когда  $m > 2$ , также можно определить требования к переключателям системы с поэлементным резервированием, когда эта система оказывается надежнее резервирования в целом:

$$1 - (1 - p)(1 - p_{\Pi}p)^{m-1} > \left[ 1 - (1 - p^n)^m \right]^{\frac{1}{n}};$$

$$(1 - p_{\Pi}p)^{m-1} < \frac{1 - \left[ 1 - (1 - p^n)^m \right]^{\frac{1}{n}}}{1 - p};$$

$$(1 - p)(1 - p_{\Pi}p)^{m-1} < 1 - \left[ 1 - (1 - p^n)^m \right]^{\frac{1}{n}};$$

$$p_{\Pi} > \frac{1}{p} \left\{ 1 - \left( \frac{\left[ 1 - (1 - p^n)^m \right]^{\frac{1}{n}}}{1 - p} \right)^{m-1} \right\}.$$

### Скольльзящее резервирование

Скольльзящее резервирование применяется в том случае, когда блоки системы одинаковы. Закрепленный резерв может быть невыгоден экономически. Отказавший блок замещается из общего резерва (рис. 7).

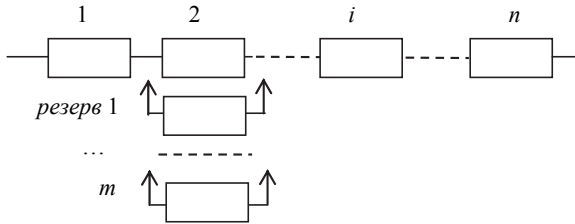


Рис. 7. Структурная схема надежности при скольльзящем резервировании

На этой схеме  $n > 1$  – основные рабочие блоки;  $m$  – число резервных блоков;  $p(t) = p$  – вероятность безотказной работы каждого блока.

Найдем вероятность безотказной работы РТС из  $n$  рабочих блоков (элементов) с  $m$ -кратным скольльзящим резервом  $P_{mn}^{(c)}(t)$ .

Всего элементов  $n + m$ , при  $(m + 1)$ -м отказе блока уже не будет резерва и произойдет отказ всей системы.

Тогда можно записать [14]:

$$P_{mn}^{(c)}(t) = \sum_{k=n}^{n+m} C_{n+m}^k p^k (1-p)^{n+m-k}, \quad (6)$$

где  $k$  – число исправных блоков;  $C_{n+m}^k = n!/[k!(n + m - k)!]$ ,

или  $P_{mn}^{(c)}(t) = \sum_{k=n}^{n+m} C_{n+m}^k p^k (1-p)^{n+m-k}$ , когда  $p$  не зависит от времени.

### Частные случаи

1. Скольльзящий резерв,  $n = 1$ :

$$P_{m,1}^{(c)}(t) = \sum_{k=1}^{m+1} C_{m+1}^k p^k [1-p]^{m+1-k} =$$

$$= \sum_0^{m+1} C_{m+1}^k p^k [1-p]^{m+1-k} - (1-p)^{m+1} = 1 - [1-p]^{m+1},$$

получим известный результат (3).

2. Скользящий резерв,  $n = 2, m = 1$ :

Согласно выражению (6), при скользящем резерве

$$P_{12}^{(c)} = C_3^2 p^2 [1 - p] + p^3 = 3p^2(1 - p) + p^3 = 3p^2 - 2p^3,$$

при резервировании в целом, согласно выражению (4)

$$p_{22}^{(2)} = 1 - [1 - p^2]^2 = 2p^2 - p^4.$$

Покажем, что скользящий резерв обеспечивает более высокую надежность, то есть

$$2p^2 - p^4 < 3p^2 - 2p^3;$$

$$p^2 - 2p^3 + p^4 > 0, \quad p^2(1 - 2p + p^2) > 0, \quad p^2(1 - p)^2 > 0,$$

что очевидно.

3. При поэлементном резервировании (5)

$$P_{22}^{(1)} = [1 - (1 - p)^2]^2 = (2p - p^2)^2 = p^2(4 - 4p + p^2).$$

Покажем, что  $P_{22}^{(1)} > P_{12}^{(c)}$ :

$$4 - 4p + p^2 > 3 - 2p, \quad (1 - p)^2 > 0, \quad \text{что очевидно.}$$

4. Скользящий резерв,  $n = 2, m = 2$ :

$$\begin{aligned} P_{22}^{(c)} &= C_4^2 p^2 (1 - p)^2 + C_4^3 p^3 (1 - p) + C_4^4 p^4 = \\ &= 6p^2 - 12p^3 + 6p^4 + 4p^3 - 4p^4 + p^4 = p^2(3p^2 - 8p + 6). \end{aligned}$$

Покажем, что  $P_{22}^{(c)} > P_{22}^{(1)}$ :

$$3p^2 - 8p + 6 > p^2 - 4p + 4,$$

$$2p^2 - 4p + 2 > 0, \quad 2(1 - p)^2 > 0, \quad \text{что очевидно.}$$

Следовательно, разбиение скользящего резерва на группы дает проигрыш по сравнению с общим использованием резерва.

**Скользящее резервирование РТС, работающих автономно**

Структурная схема надежности системы имеет вид, показанный на рис. 8. На этой схеме  $n$  – число РТС, работающих автономно;  $m$  – число резервных систем. Резерв заменяет основную систему в случае отказа последней.

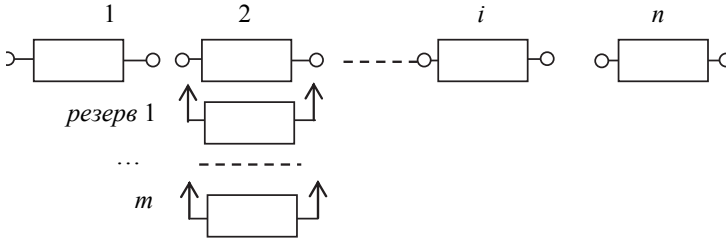


Рис. 8. Структурная схема надежности РТС, работающих автономно при скользящем резерве

Здесь представляет интерес определение вероятности безотказной работы каждой системы  $P_c(t)$ .

Обозначим: событие А – одна система отказала; событие В – нет резерва.

Тогда событие  $A \cap B$  – полный отказ данной РТС (отказ и нет резерва), а вероятность безотказной работы каждой РТС равна

$$P_c(t) = 1 - P\{A \cap B\}.$$

Так как события А и В можно считать независимыми, то

$$P\{A \cap B\} = P\{A\}P\{B\},$$

где  $P\{A\} = 1 - p(t)$ .

Не будет резерва, когда откажут  $k = m, m + 1, \dots, m + n - 1$  систем до отказа данной системы. Тогда  $P\{B\} = \sum_{k=m}^{n+m-1} C_{n+m-1}^k (1-p)^k P^{n+m-1-k}$ , а вероятность безотказной работа одной основной системы равна

$$P_c(t) = 1 - (1-p) \sum_{k=m}^{n+m-1} C_{n+m-1}^k (1-p)^k P^{n+m-1-k}.$$

Частный случай  $n=1$  соответствует закрепленному резерву

$$P_c(t) = 1 - (1-p)(1-p)^m p^0 = 1 - (1-p)^{m+1},$$

как и было получено в выражении (5) с учетом того, что в число  $m$  в данном случае основной блок не входит.

### РТС с холодным резервом при замещении

Структурная схема надежности системы имеет вид, показанный на рис. 9. На этой схеме  $n = 1$  – основной рабочий блок;  $m = 1$  – число блоков резерва;  $p_1(t)$  и  $p_2(t)$  – вероятности безотказной работы соответствующих блоков (основного и резервного);  $p_n(t)$  – вероятности безотказной работы переключателя.

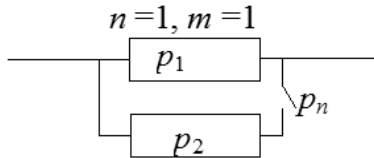


Рис. 9. Структурная схема надежности РТС с холодным резервом при замещении

Найдем вероятность безотказной работы РТС при  $n = 1$  рабочих блоках (элементов) с  $m$ -кратным холодным резервом  $P_{11}^{(x)}(t)$ .

С учетом того, что рабочий блок может отказать в любой момент времени с плотностью вероятности  $w_1(\tau)$ , вероятность безотказной работы системы равна

$$P_{11}^{(x)}(t) = p_1(t) + \int_0^t w_1(\tau) p_2(t - \tau) d\tau,$$

где  $\tau$  – момент времени отказа рабочего блока;  $(t - \tau)$  – длительность работы резервного блока.

Например, пусть

$$w_1(t) = w_2(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad p_1(t) = p_2(t) = p(t) = e^{-\lambda t}.$$



1. Переключатель абсолютно надежен,  $p_{\Pi}(t) = 1$ :

$$P_{11}^{(x)}(t) = p_1(t) + \int_0^t w_1(\tau) p_2(t - \tau) d\tau = e^{-\lambda t} + \int_0^t \lambda e^{-\lambda \tau} e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau = e^{-\lambda t} + \lambda e^{-\lambda t} t = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t). \quad (7)$$

2. Вероятность  $p_{\Pi}(t) = e^{-\lambda_{\Pi} t} < 1$ .

С учетом того, что переключатель расположен во второй ветви, выражение (7) принимает вид

$$P_{11}^{(x)}(t) = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t e^{-\lambda_{\Pi} t}),$$

где  $\lambda_{\Pi}$  – интенсивность отказов переключателя;

$$P_C(t) = P_1(t) + P_{\Pi}(t) \int_0^t w_1(\tau) P_2(t - \tau) d\tau = e^{-\lambda t} + e^{-\lambda_{\Pi} t} \int_0^t \lambda e^{-\lambda \tau} e^{-\lambda(t-\tau)} d\tau = e^{-\lambda t} + e^{-\lambda_{\Pi} t} \lambda e^{-\lambda t} t = e^{-\lambda t} [1 + \lambda t e^{-\lambda_{\Pi} t}].$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При горячем резерве поэлементное резервирование всегда выгоднее резервирования в целом.

2. Горячий резерв выгоден при большом  $m$ .

3. В общем случае, когда  $m > 2$ , можно определить требования к переключателям системы с поэлементным резервированием, когда система оказывается надежнее резервирования в целом.

4. Разбиение скользящего резерва на группы дает проигрыш по сравнению с общим использованием резерва.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаднов В.В., Полесский С.Н. Проектная оценка надежности радиотехнических систем // Надежность и качество: труды международного симпозиума: в 2 т. / под ред. Н.К. Юркова. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – Т. 1. – С. 24–29.

2. Жаднов В.В., Сарафанов А.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 464 с.

3. Артюхова М.А., Жаднов В.В., Полесский С.Н. Метод учета влияния системы менеджмента надежности предприятия при расчетной оценке показателей надежности электронных средств // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2013. – № 2. – С. 48–53.

4. Филиппов Б.И., Малахова Е.А. Расчет надежности донной части аппаратуры гидроакустического канала связи // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 3 (81). – С. 79–97.

5. Филиппов Б.И., Малахова Е.А. Расчет надежности аппаратуры гидроакустического канала связи // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (82). – С. 67–91.

6. Маркин А.В., Полесский С.Н., Жаднов В.В. Методы оценки надежности элементов механики и электромеханики электронных средств на ранних этапах проектирования // Надежность. – 2010. – № 2 (33). – С. 63–70.

7. Жаднов В.В., Лазарев Д.В. Параметры показателей характеристик надежности и их определение // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электротехники и связи имени А.С. Попова. Серия: Научная сессия, посвященная Дню радио. – М.: Инсвязьиздат, 2005. – Вып. 60-1. – С. 205–207.

8. Лазарев Д.В., Жаднов В.В. Практическое использование характеристик надежности при оценке РЭА // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов / под ред. А.И. Громыко, А.В. Сафонова. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2005. – С. 558–564.

9. Кофанов Ю.Н., Жаднов В.В. Анализ постепенных отказов при обеспечении живучести РЭА // Теоретические основы живучести информационно-вычислительных и управляющих систем: тезисы докладов второй всесоюзной научно-технической конференции «Живучесть и реконфигурация информационно-вычислительных и управляющих систем». – М.: ВИНТИ., 1988. – Вып. 1. – С. 56.

10. Жаднов В.В., Савосин В.В., Коваленко Г.Л. Анализ и обеспечение безотказности ИВЭП при проектировании // Проблемы конструирования, производства и обеспечения качества интегральных радиоэлектронных устройств: материалы семинара. – М.: МДНТП, 1989. – С. 132–135.

11. Борковский А.В., Жаднов В.В., Коноплев Я.И. Автоматизация анализа отказов ИЭТ // Современные методы обеспечения качества и надежности электронных приборов: материалы семинара. – М.: МДНТП, 1990. – С. 123–125.

12. *Жаднов В.В.* Обеспечение высоких показателей качества и надежности ИВЭП // Системный анализ и принятие решения в задачах автоматизированного обеспечения качества и надежности изделий приборостроения и радиоэлектроники: тезисы докладов Российской научно-технической конференции. – Махачкала: ДПИ, 1991. – С. 112.

13. *Левин Б.Р.* Теория надежности радиотехнических систем. – М.: Советское радио, 1978. – 264 с.

14. *Филиппов Б.И.* Априорный анализ надежности радиотехнических систем без восстановления // Известия ВолгГТУ. Серия Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Вып. 12. – 2015. – № 11 (176). – С. 97–103.

15. *Килибаева Ж.К.* Анализ отказов и надежности полупроводниковых приборов и интегральных микросхем // Молодой ученый. – 2014. – № 8.1. – С. 13–16.

**Филиппов Борис Иванович**, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – радиотехника и связь. Опубликовано 33 статьи, два учебных пособия и монография. E-mail: [filippov-boris@mail.ru](mailto:filippov-boris@mail.ru)

**Труш Татьяна Борисовна**, студент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. E-mail: [tanuza95@mail.ru](mailto:tanuza95@mail.ru)

## Calculation of reliability of radio systems without recovery\*

**B.I. Filippov<sup>1</sup>, T.B. Trush<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> 630073, Russian Federation, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk state technical university, associate professor, candidate of technical science. E-mail: [filippov-boris@rambler.ru](mailto:filippov-boris@rambler.ru)

<sup>2</sup> 630073, Russian Federation, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk state technical university. E-mail: [tanuza95@mail.ru](mailto:tanuza95@mail.ru)

The calculation of reliability of radio systems (RTS) without recovery was shown in the work. Herewith all possible options for the RTS reservation are considered: reservation RTS with hot reserve; RTS with reservation of series-connected blocks; reservation RTS with hot (load-

---

\* Received 27 November 2015.

ed) reserve by substituting; sliding reservation; sliding reservation RTS, working autonomously and reservation RTS with cold reserve by substituting. It has been shown that even with a low fail safe performance probability of individual elements (0.5 or less), reliability of the whole system can be arbitrarily high due to parallel reservation. Calculations show that the hot exploded reservation is always better than backup in general. It's shown that if the number of basic blocks is large, the unreliability of the switches can be decisive and exploded reservation can be worse than backup in general. It should be borne in mind that in the case of element wise reserve, switches stand in each element, while reservation generally requires only one switch. And one switch can be made arbitrarily reliable. Therefore, this question requires additional study. In general, when the number of reserve blocks is more than two, we can determine requirements for switches system with element wise reservation when this system turns out more reliable than backup in general. It is shown that the sliding partition reserve for groups gives a loss compared to the general use of the reserve.

**Keywords:** basic blocks, standby units, reliability of separate elements, reliability of the entire system, reliability of switching, failure rate, reservation radio systems with cold reserve, reservation radio systems with hot reserve, sliding reservation.

DOI: 10.17212/2307-6879-2016-1-47-68

## REFERENCES

1. Zhadnov V.V., Polesskii S.N. [Project evaluation of reliability of radio systems]. *Nadezhnost' i kachestvo: trudy mezhdunarodnogo simpoziuma: v 2 t.* [Reliability and quality. Proceedings of the International Symposium: in 2 vol.]. Penza, Penza State University Publ., 2006, vol. 1, pp. 24–29.
2. Zhadnov V.V., Sarafanov A.V. *Upravlenie kachestvom pri proektirovanii teplonagruzennykh radioelektronnykh sredstv* [Quality management in the design of heat-loaded radio-electronic means]. Moscow, Solon-Press Publ., 2004. 464 p.
3. Artyukhova M.A., Zhadnov V.V., Polesskii S.N. Metod ucheta vliyaniya sistemy menedzhmenta nadezhnosti predpriyatiya pri raschetnoi otsenke pokazatelei nadezhnosti elektronnykh sredstv [The method of accounting the influence of enterprise grade management system with the assessment of the estimated indicators of reliability of electronic means]. *Radioelektronika, informatika, upravlinnya – Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2013, no. 2, pp. 48–53.
4. Filippov B.I., Malakhova E.A. Raschet nadezhnosti donnoi chasti apparatury gidroakusticheskogo kanala svyazi [Calculation of reliability of ground part of the equipment hydroacoustic communication channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 3 (81), pp. 79–97.
5. Filippov B.I., Malakhova E.A. Raschet nadezhnosti apparatury gidroakusticheskogo kanala svyazi [Calculation of reliability of the equipment hydroacoustic communication channel]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstven-*

*nogo tekhnicheskogo universiteta – Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 4 (82), pp. 67–91.

6. Markin A.V., Poleskii S.N., Zhadnov V.V. *Metody otsenki nadezhnosti elementov mekhaniki i elektromekhaniki elektronnykh sredstv na rannikh etapakh proektirovaniya* [Methods of assessing the reliability of mechanical and electromechanical components of electronic means in the early stages of design]. *Nadezhnost' – Dependability*, 2010, no. 2 (33), pp. 63–70.

7. Zhadnov V.V., Lazarev D.V. [Parameters indicators of reliability characteristics and their definition]. *Trudy Rossiiskogo nauchno-tekhnicheskogo obshchestva radiotekhniki, elektrotekhniki i svyazi imeni A.S. Popova. Seriya: Nauchnaya sessiya, posvyashchennaya Dnyu radio* [Proceedings of the Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electrical Engineering and Communication named after AS Popova. Series: Scientific session dedicated to the Day of radio], 2005, iss. 60-1, pp. 205–207. (In Russian)

8. Lazarev D.V., Zhadnov V.V. [Practical use of the reliability characteristics when evaluating REA]. *Sovremennyye problemy radioelektroniki: sbornik nauchnykh trudov* [Modern Problems of Radio Electronics: collection of scientific papers], 2005, pp. 558–564. (In Russian)

9. Kofanov Yu.N., Zhadnov V.V. [Analysis of gradual failures in ensuring the survivability of REA]. *Teoreticheskie osnovy zhivuchesti informatsionno-vychislitel'nykh i upravlyayushchikh sistem: tezisy dokladov Vtoroi Vsesoyuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Zhivuchest' i rekonfiguratsiya informatsionno-vychislitel'nykh i upravlyayushchikh system"* [Theoretical bases of survivability information computing and control systems. Proceedings Second All-Union Scientific-Technical Conference "Vitality and reconfiguration of data-processing and control systems"]. Moscow, 1988, vol. 1, p. 56. (In Russian)

10. Zhadnov V.V., Savosin V.V., Kovalenko G.L. [Analysis and maintenance of reliability in design IWEP]. *Problemy konstruirovaniya, proizvodstva i obespecheniya kachestva integral'nykh radioelektronnykh utroistv: materialy seminar* [Problems of design, production and quality assurance of integrated radio electronic devices. Materials of the seminar]. Moscow, 1989, pp. 132–135.

11. Borkovskii A.V., Zhadnov V.V., Konoplev Ya.I. [Automating the analysis of failures of electronic devices]. *Sovremennyye metody obespecheniya kachestva i nadezhnosti elektronnykh priborov: materily seminar* [Modern methods of quality assurance and reliability of electronic devices. Materials of the seminar]. Moscow, 1990, pp. 123–125.

12. Zhadnov V.V. [Ensuring high quality performance and reliability IWEP]. *Sistemnyi analiz i prinyatie resheniya v zadachakh avtomatizirovannogo obespecheniya kachestva i nadezhnosti izdelii priborostroeniya i radioelektroniki: tezisy dokladov Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [System analysis and deci-

sion-making in the problems of the automated ensuring software quality and reliability of the articles of instrumentation and radio electronics. Proceedings Russian scientific and technical conference]. Makhachkala, 1991, pp. 112.

13. Levin B.R. *Teoriya nadezhnosti radiotekhnicheskikh sistem* [Reliability theory of radio systems]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1978, pp. 264.

14. Filippov B.I. Apriornyi analiz nadezhnosti radiotekhnicheskikh sistem bez vosstanovleniya [Apriori reliability analysis of radio systems without restoration]. *Izvestiya VolgGTU. Izvestiya VolgGTU. Seriya Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz'*. Vyp. 12 – *News of Volgograd state technical University. Series Electronics, measuring equipment, radio and telecommunications*. Iss. 12, 2015, no. 11 (176), pp. 97–103.

15. Kilibaeva Zh.K. Analiz otkazov i nadezhnosti poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem [Failure analysis and reliability of semiconductor devices and integrated circuits]. *Molodoi uchenyi – Young Scientist*, 2014, no. 8.1, pp. 13–16.