

## К ВОПРОСУ ОБ АППАРАТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ИЗБЫТОЧНЫХ СТРУКТУР. ПОЭЛЕМЕНТНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ

---

**Abstract:** Questions of the element reservations electro-radio products are considered. It is shown, that the majority of products are products with symmetric refusals of type "breakage" and "short circuit". The account of refusals of type "short circuit" allows to specify estimations of reliability of real reserved structures of elements.

**Key words:** an element redundancy, symmetric refusals.

**Анотація:** Розглянуті питання поелементного резервування електрорадіовиробів. Показано, що більшість виробів є виробами з симетричними відмовами типу «обрив» і «коротке замикання». Облік відмов типу «коротке замикання» дозволяє уточнити оцінки надійності реальних резервованих структур елементів.

**Ключові слова:** поелементне резервування, симетричні відмови.

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы поэлементного резервирования электрорадиоизделий. Показано, что большинство изделий являются изделиями с симметричными отказами типа «обрыв» и «короткое замыкание». Учет отказов типа «короткое замыкание» позволяет уточнить оценки надежности реальных резервированных структур элементов.

**Ключевые слова:** поэлементное резервирование, симметричные отказы.

### 1. Введение

Высоконадежные информационные и управляющие системы строятся с применением структурной избыточности на уровне элементов, функциональных блоков, подсистем или системы в целом. На начальных этапах проектирования систем предварительная оценка надежности осуществляется по идеализированным структурным схемам надежности (ССН), которые не отражают специфики схемотехнической реализации избыточных структур (особенностей поэлементного резервирования, наличия восстанавливающего органа (ВО) и его принципиальной схемы и т.д.).

Такая идеализация ССН избыточных структур приводит к завышенным прогнозным оценкам надежности разрабатываемой системы и к дополнительным затратам времени и средств на доводку системы на этапе ее изготовления и испытаний. Причем эти усилия не гарантируют в конечном итоге построение системы с заданными характеристиками надежности. Целью данной работы является исследование некоторых аспектов технической реализации избыточных структур на элементном уровне.

### 2. Поэлементное введение избыточности

Рассмотрим методы поэлементного резервирования для различных типов электрорадиоизделий (ЭРИ). Допустим, необходимо повысить надежность резистора номиналом  $R$  Ом путем резервирования с кратностью 2 (дублирования).

#### 2.1. Классическая схема дублирования

Идеализированная ССН приведена на рис. 1.

Определим вероятность события, состоящего в том, что схема, представляющая собой параллельное в смысле надежности соединение двух резисторов, проработает безотказно в интервале времени  $(0, t)$ .

Схема проработает безотказно в интервале времени  $(0, t)$  при осуществлении одного из следующих несовместимых событий:

$A_1$  – за время  $t$  не откажет ни один резистор;

$A_2$  – за время  $t$  откажет резистор 2, а резистор 1 проработает безотказно;

$A_3$  – за время  $t$  откажет резистор 1, а резистор 2

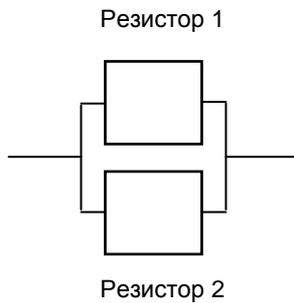


Рис. 1. Идеализированная ССН дублированного резистора

проработает безотказно.

**Примечание.** Таким образом, понятие «отказ резистора» в данном случае соответствует только физическому отказу резистора типа «обрыв», а отказы типа «короткое замыкание» к рассмотрению не принимаются.

Вероятность безотказной работы схемы за время  $t$  равна сумме вероятностей событий  $A_1, A_2, A_3$ .

Запишем выражение для вероятности безотказной работы по функции выхода  $X_1$ .

$$R_{X_1}(t) = R_{P_1}(t) + R_{P_2}(t) - R_{P_1}(t)R_{P_2}(t), \quad (1)$$

где  $R_{P_1}(t), R_{P_2}(t)$  – вероятность безотказной работы соответственно резисторов 1 и 2. При равенстве  $R_{P_1}(t) = R_{P_2}(t) = R_P(t)$  получим известное выражение

$$R_c = 2R_P(t) - R_P^2(t), \quad (2)$$

где  $R_P(t)$  – вероятность безотказной работы резистора на момент времени  $t$ .

Допустим,  $R_P(t) = 0,9$ . Тогда

$$R_c(t) = 2R_P(t) - R_P^2(t), \quad (3)$$

т.е. имеем ожидаемое увеличение надежности схемы по отношению к одиночному резистору.

На практике техническая реализация дублирования резистора сталкивается с рядом трудностей. Во-первых, известно, что большинство ЭРИ имеют два типа отказов: «обрыв» и «короткое замыкание», вероятности появления которых близки друг к другу [1]. Поэтому исключение из рассмотрения этих событий приводит к ошибке в оценке вероятности безотказной работы дублированной схемы в целом. Во-вторых, при параллельном или последовательно-параллельном соединении резисторов и отказе одного из них меняется общее сопротивление резервированной схемы, что в ряде случаев классифицируется как параметрический отказ. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании реальных электронных устройств.

В [2] введены понятия активной неисправности, т.е. оказывающей влияние на резервированную схему в целом, и пассивной неисправности, приводящей к отказу только одного элемента резервированной группы. При этом утверждается, что если исправность и неисправность двух типов для каждого элемента суть события взаимно исключающие, то для любого момента времени  $t$  справедливо соотношение:

$$P_{(t)} + q_{1(t)} + q_{2(t)} = 1, \quad (4)$$

где  $p_{(t)}$  – вероятность того, что элемент исправен к моменту времени  $t$ ,  $q_{1(t)}$  – вероятность появления активной неисправности к моменту времени  $t$ ,  $q_{2(t)}$  – вероятность появления пассивной неисправности к моменту времени  $t$ .

На этом основании вероятность безотказной работы резервированной схемы, состоящей из одного основного и  $x$  резервных элементов, вычисляется по формуле [2]

$$R_c(t) = \sum_{i=0}^x \binom{x+1}{i} p_{(t)}^{x+1-i} q_{2(t)}^i. \quad (5)$$

Если предположить, что в  $\beta$  случаев возникают пассивные неисправности, а в  $\alpha$  случаев – активные ( $\alpha + \beta = 1$ ), то

$$q_{2(t)} = \beta q_{(t)}, \quad (6)$$

где  $q_{(t)}$  – вероятность того, что элемент не исправен к моменту времени  $t$  ( $q_{(t)} = q_{1(t)} + q_{2(t)}$ ).

Рассмотрим классическую схему дублирования и вычислим вероятность безотказной работы в предположении существования двух типов неисправностей.

Исходные данные:  $x = 1$ ;  $p_{(t)} = 0,9$ ;  $\alpha = \beta = 0,5$ .

$$R_c(t) = p_{(t)}^2 q_{2(t)}^0 + 2 p_{(t)} q_{2(t)} = p_{(t)}^2 + 2 p_{(t)} q_{2(t)} = p_{(t)}^2 + 2 p_{(t)} [\beta(1 - p_{(t)})] = 0,9.$$

Не трудно видеть, что наличие двух типов неисправностей приводит к снижению вероятности безотказной работы схемы с  $R_c(t) = 0,99$  (3) до  $R_c(t) = 0,9$  (5).

Выражение (5) не учитывает ситуации, когда при отказе одного из элементов схемы резервированная структура продолжает функционирование, но такое состояние схемы классифицируется как параметрический отказ.

Рассмотрим два случая использования дублированного резистора: в аналоговых и цифровых устройствах.

## 2.2. Дублирование в аналоговых устройствах

Если по схемотехническим требованиям нам необходимо иметь сопротивление  $P_c = P$ , то при использовании схемы дублирования, изображенной на рис. 1, необходимо либо применять резисторы двойного номинала ( $2P$ ) (рис. 2), либо последовательно двум дублированным резисторам необходимо включить еще такую же дублированную пару (рис. 3).

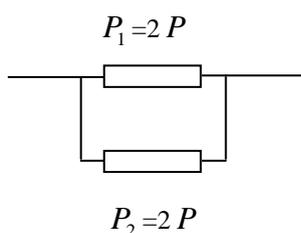


Рис. 2. Принципиальная схема дублированного резистора

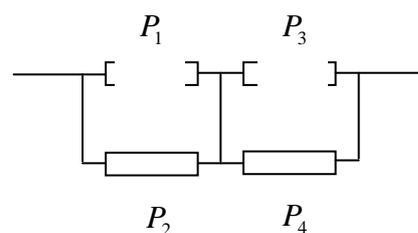


Рис. 3. Принципиальная схема дублированного резистора

Проанализируем, выполняют ли схемы на рис. 2, 3 требования по повышению надежности резистора. Для этого введем следующие допущения.

**Допущение 1.** Резистор является элементом с симметричными отказами типа «обрыв» и «короткое замыкание» [1].

**Допущение 2.** Любое изменение общего сопротивления схемы при отказе ее элемента является параметрическим отказом.

**Допущение 3.** Изменение общего сопротивления схемы при отказе ее элемента до нуля является параметрическим отказом.

Любой отказ резисторов типа «обрыв» или «короткое замыкание» в схеме на рис. 2 приводит к параметрическому отказу в соответствии с допущением 2 или 3.

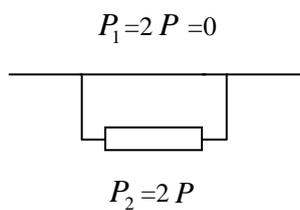


Рис. 4. Принципиальная схема в состоянии неисправности – «короткое замыкание» резистора

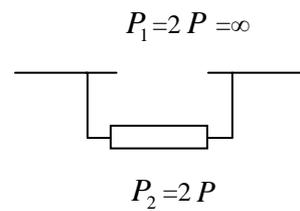


Рис. 5. Принципиальная схема в состоянии неисправности – «обрыв» резистора

В этом случае сопротивление схемы становится равным либо  $P_c = 0$  (рис. 4), либо  $P_c = 2P$  (рис. 5). Следовательно, отказоустойчивость схемы теряется и она сохраняет работоспособность только тогда, когда исправны оба резистора и ее ССН превращается в последовательную ССН из двух резисторов. Если вероятность безотказной работы резистора относительно обоих типов отказов  $R_p(t) = 0,9$ , то вероятность безотказной работы схемы в этом случае равна

$$R_c(t) = R_p(t)R_p(t) = 0,81. \quad (7)$$

Ожидаемое увеличение надежности схемы за счет резервирования не достигнуто.

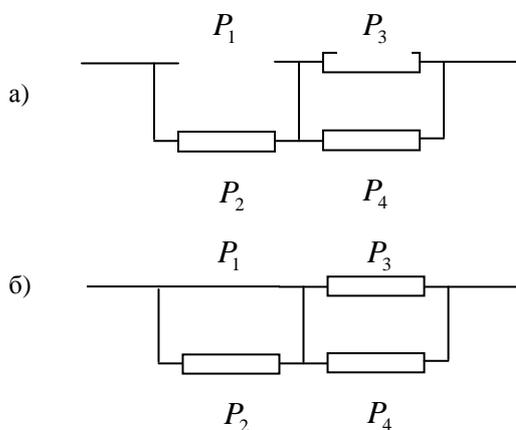


Рис. 6. Принципиальная схема в состоянии неисправности: а) «обрыв» резистора; б) «короткое замыкание» резистора

Рассмотрим влияние различных типов отказов резисторов на работоспособность схемы (рис. 6).

На рис. 6а изображена схема при обрыве первого резистора. В этом случае сопротивление схемы становится равным

$$P_c = \frac{3}{2}P.$$

На рис. 6б изображена схема при коротком замыкании того же резистора. В этом случае сопротивление схемы становится

$$\text{равным } P_c = \frac{P}{2}.$$

В соответствии с допущением 2 обе эти ситуации классифицируются как параметрический отказ.

Вычислим вероятность безотказной работы схемы, приведенной на рис. 3. Принимая во внимание допущения 2, схема, изображенная на рис. 3, теряет свойства отказоустойчивости, она исправна только тогда, когда исправны все ее элементы и ее ССН превращается в последовательную ССН из четырех резисторов.

Откуда

$$R_c(t) = R_p^4(t) = 0,6561. \quad (8)$$

Следовательно, ожидаемое увеличение надежности также не достигнуто.

Таким образом, реальные схемы резервирования резистора оказываются менее надежными, чем идеализированная ССН. Такая же ситуация наблюдается и с резервированием конденсаторов [1].

### 2.3. Дублирование в цифровых устройствах

При проектировании цифровых устройств в ряде случаев изменение сопротивления резервированной схемы вследствие отказов элементов является не очень критичным, поэтому для повышения надежности возможно использование идеализированной схемы резервирования (рис. 1), при которой схемотехнические решения допускают изменение сопротивления схемы при неисправностях резисторов от  $P$  до  $\frac{P}{2}$ .

В отличие от [2], предлагается другой подход к вычислению вероятности безотказной работы дублированной схемы для изделий с симметричными отказами.

Симметричность отказов резисторов предполагает, что вероятности появления обрывов и коротких замыканий одинаковы, т.е.  $R_o(t) = R_{кз}(t)$ .

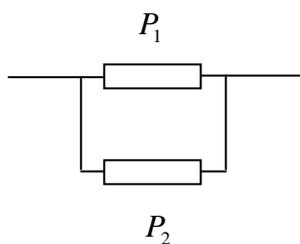


Рис. 7. Принципиальная схема дублированного резистора

Если вероятность безотказной работы резистора относительно обоих типов отказов  $R_p(t) = 0,9$ , то вероятности  $R_o(t)$  и  $R_{кз}(t)$ , как взаимоисключающие события, можно вычислить путем решения уравнения

$$R_p(t) = R_o(t)R_{кз}(t) = 0,9, \quad (9)$$

откуда  $R_o(t) = R_{кз}(t) = 0,949$ .

Вычислим вероятность безотказной работы схемы (рис. 7) относительно отказов типа «обрыв». Анализ показывает, что в этом случае  $R_c(t)$  вычисляется по формуле (2)

$$R_{c_o}(t) = 2R_o(t) - R_o^2(t) = 0,997. \quad (10)$$

Анализ влияния отказов типа «короткое замыкание» показывает, что в случае возникновения такого типа отказа общее сопротивление схемы падает до нуля (происходит

шунтирование параллельной ветви с исправным резистором) (рис. 6), что является параметрическим отказом (допущение 3).

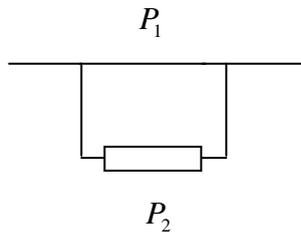


Рис. 8. Принципиальная схема в состоянии неисправности – «короткое замыкание» резистора

В этом случае вероятность безотказной работы схемы относительно отказов типа «короткое замыкание» равна вероятности появления такого отказа (для двух резисторов) или

$$R_{ck3}(t) = R_{K3}(t)R_{K3}(t) = 0,9. \quad (11)$$

Так как отказы типа «обрыв» и «короткое замыкание» являются несовместимыми событиями, то вероятность безотказной работы схемы относительно двух типов отказов вычисляется по формуле

$$R_c(t) = R_{co}(t)R_{ck3}(t) = 0,997 \cdot 0,949 = 0,946. \quad (12)$$

Наличие отказов типа «короткое замыкание» приводит к резкому снижению надежности реальной дублированной схемы (12)  $R_c(t) = 0,946$  по отношению к идеализированной ССН (3)  $R_c(t) = 0,99$ .

Сравнивая оценки, полученные по формулам (5) и (12), не трудно видеть, что оценка по (12) является несколько более оптимистичной, чем по (5). Для рассмотренного примера  $R_c(t) = 0,946$  против  $R_c(t) = 0,9$ .

Резервирование по схеме на рис. 3, состоящей из двух дублированных подсхем, включенных последовательно, приводит к еще большему проигрышу по надежности.

$$R_c(t) = [R_{co}(t)R_{ck3}(t)][R_{co}(t)R_{ck3}(t)] = 0,897 \cdot 0,897 = 0,805. \quad (13)$$

Аналогичное влияние на надежность оказывают отказы типа «короткое замыкание» при резервировании конденсаторов, полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, вентилях микросхем и т.п.) и других ЭРИ, для которых величиной вероятности появления отказа типа «короткое замыкание» нельзя пренебречь [1], т.е для элементов с симметричными отказами.

### 3. Выводы

Использование идеализированных ССН при прогнозировании надежности электронных схем с поэлементным резервированием приводит к завышению величины вероятности безотказной работы схемы, так как, во-первых, схемотехническая реализация резервированных структур вносит существенные различия между идеализированной ССН и ССН, составленной для реальной принципиальной схемы, и, во-вторых, в связи с тем, что подавляющее большинство ЭРИ являются элементами с симметричными отказами, то при анализе принципиальных схем и разработке ССН необходимо учитывать два типа отказов: «обрыв» и «короткое замыкание». Учет параметрических отказов и отказов типа «короткое замыкание» при анализе надежности реальных принципиальных схем приводит к резкому снижению величины прогнозируемой вероятности безотказной работы по отношению к идеализированной ССН.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
2. Райкин А.Л. Вероятностные модели функционирования резервированных устройств. – М.: Наука, 1971. – 216 с.

*Стаття надійшла до редакції 17.06.2009*