

М. Б. РОЗЕНГАУЗ

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ АППАРАТУРЫ ЗИП

В статье приводится метод расчета надежности резервированных систем, учитывающий конечный состав аппаратуры ЗИП. Предложенный метод позволяет определить такой состав аппаратуры ЗИП, который обеспечивал бы заданный показатель надежности системы. Приводятся математические соотношения, позволяющие вычислять такой показатель надежности, как вероятность безотказной работы с учетом конечного состава аппаратуры ЗИП. Эффективность предлагаемого подхода подтверждена на примере расчета надежности одной из систем навигационного комплекса.

Введение

Влияние ЗИП на надежность системы существенным образом зависит от соотношения между временем замены отказавшего элемента и допустимым временем перерыва в работе системы. Если допустимое время перерыва в работе нерезервированной системы столь мало, что заменить за это время отказавший элемент на работоспособный невозможно, то ЗИП не может обеспечить повышение надежности системы. Для резервированных систем существует возможность повышения надежности с помощью аппаратуры ЗИП.

Согласно существующим в настоящее время нормативным документам [1,2,3], задача расчета показателя надежности (ПН) системы производится в условиях неограниченного ЗИП. Расчет комплекта ЗИП, обеспечивающего заданный показатель достаточности, производится отдельно. Этот подход обладает рядом недостатков, к которым можно отнести:

- 1) приближенное значение полученного ПН, причем знак погрешности заранее неизвестен;
- 2) непригодность такого подхода в случаях, когда комплект ЗИП выбирается с учетом необходимости выполнения всех заданных функций системы, а ПН рассчитываются с учетом только той части структуры, которая занята выполнением какой-либо конкретной операции.

Кроме этого, реальная аппаратура ЗИП всегда имеет ограниченный объем.

Для устранения указанных выше недостатков предлагается учесть аппаратуру ЗИП в схеме расчета показателей надежности резервированных систем. При этом ЗИП рассматривается как один из ресурсов, предназначенных для увеличения надежности НК. Следует отметить, что в работе рассматривается одиночный ЗИП с периодическим пополнением элементов. Согласно [4] в этом случае аппаратура, хранящаяся в ЗИП, представляется в виде ненагруженного резерва, т.е. такого резерва, элементы которого находятся в ненагруженном режиме до начала выполнения ими функций основного элемента.

Таким образом, задачу можно сформулировать следующим образом. Пусть

имеется система, состоящая из последовательно и (или) параллельно соединенных (в части схемы расчета надежности) подсистем, причем подсистемы, которые соединены последовательно, имеют внутреннее резервирование. При этом, рассматриваются только резервированные системы, поскольку для нерезервированных отказ любой составной части приводит к отказу всей системы и наличие ЗИП не повышает ее надежность.

Требуется определить показатель надежности системы, учитывая конечный состав ЗИП. В качестве ПН системы в статье рассматривается вероятность ее безотказной работы (ВБР) за время t . Предлагаемый подход может быть применен и при использовании других показателей надежности [5]: средней наработки на отказ, коэффициента использования и коэффициента оперативного использования.

Определение ВБР элемента с учетом ЗИП

Итак, основной целью работы является расчет ПН системы с учетом конечного состава аппаратуры ЗИП.

Любая система состоит из приборов, блоков, модулей, которые будем называть элементами. Для расчета ВБР системы необходимо знать, как рассчитываются ВБР ее составных частей, поэтому далее рассматривается определение ВБР (с учетом конечного состава ЗИП) для наиболее часто встречающихся соединений элементов.

В дальнейшем изложении будем называть:

- 1) элементы, находящиеся в составе системы, основными, а элементы, находящиеся в составе ЗИП, – *резервными*;
- 2) элементы, имеющие одинаковую надежность, *однородными*, а элементы, имеющие различную надежность – *неоднородными*.

Резервированная группа из двух элементов, в ЗИП m элементов

Ненагруженный резерв однородных основных элементов. Схема расчета надежности в этом случае имеет вид, изображенный на рис. 1:

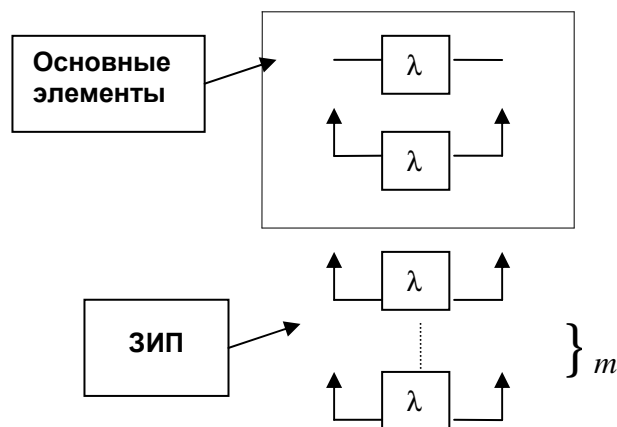


Рис. 1. Схема расчета надежности группы из двух однородных основных элементов, один из которых находится в ненагруженном резерве

Такая структура будет работоспособной до тех пор, пока не произойдут отказы основного и резервного элементов, а также m отказов элементов, находящихся в ЗИП. ВБР в этом случае вычисляется по формуле [8]:

$$P(t) = \text{EXP}\{-\lambda t\} \sum_{i=0}^{m+1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}. \quad (1)$$

Эта формула верна в случае, когда среднее время на замену отказавшего элемента запасными τ_B мало по сравнению с наработкой на отказ T_0 элемента, т.е. при выполнении соотношения [4]:

$$\alpha = \frac{\tau_B}{T_0} < 0,01. \quad (2)$$

Нагруженный резерв однородных основных элементов. В этом случае оба основных элемента находятся в одинаковом режиме. Схема расчета надежности для этого случая представлена на рис. 2.

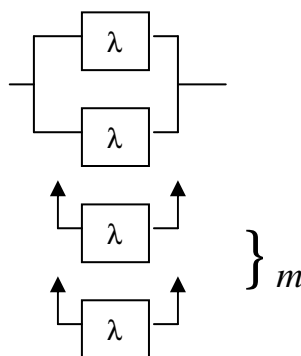


Рис. 2. Схема расчета надежности группы из 2 однородных основных элементов, находящихся в нагруженном резерве

Критерий работоспособности этой структуры такой же, как и выше. Можно показать, что при выполнении условия $\alpha < 0,01$, ВБР для этого случая определяется по формуле [8]:

$$P(t) = \text{EXP}\{-2\lambda t\} \sum_{i=0}^m \frac{(2\lambda t)^i}{i!} + 2^{m+1} \text{EXP}\{-\lambda t\} \sum_{i=m+1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!}. \quad (3)$$

Нагруженный резерв неоднородных основных элементов. «Простая» резервированная группа. Основные элементы, работающие по схеме нагруженного резервирования, имеют различные интенсивности отказов λ_1 и λ_2 соответственно. В ЗИП находится m_1 элементов 1-го типа с интенсивностью отказов λ_1 и m_2 – 2-го с интенсивностью отказов λ_2 . Схема расчета надежности такой структуры может быть представлена в следующем виде (рис. 3):

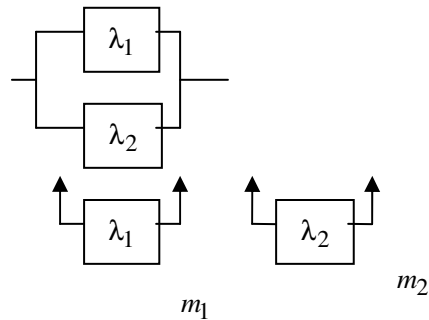


Рис. 3. Схема расчета надежности группы из двух неоднородных основных элементов, находящихся в нагруженном резерве.

Можно показать, что ВБР этой структуры определяется по формуле (как и в предыдущих случаях при $\alpha < 0,01$) [7]:

$$P(t) = \text{EXP}\{-\lambda_1 t\} \sum_{i=0}^{m_1} \frac{(\lambda_1 t)^i}{i!} \times \text{EXP}\{-\lambda_2 t\} \sum_{i=0}^{m_2} \frac{(\lambda_2 t)^i}{i!} +$$

$$+ \frac{1}{m_1} \text{EXP}\{-(\lambda_1 + \lambda_2)t\} \sum_{i=0}^{m_2} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^i \frac{(m_1 + i)!}{i!} \times$$

$$\sum_{j=m_1+i+1}^{\infty} \frac{(\lambda_1 t)^j}{j!} + \frac{1}{m_2} \text{EXP}\{-(\lambda_1 + \lambda_2)t\} \sum_{i=0}^{m_1} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^i \frac{(m_2 + i)!}{i!} \sum_{j=m_2+i+1}^{\infty} \frac{(\lambda_2 t)^j}{j!}. \quad (4)$$

«Сложная» резервированная группа. Группа состоит из двух резервированных цепочек, каждая из которых включает в себя n элементов с интенсивностью отказов λ_i , $i = 1, 2, \dots, n$. В ЗИП находятся элементы каждого типа. Схема расчета надежности в этом случае может быть представлена в виде, показанном на рис. 4:

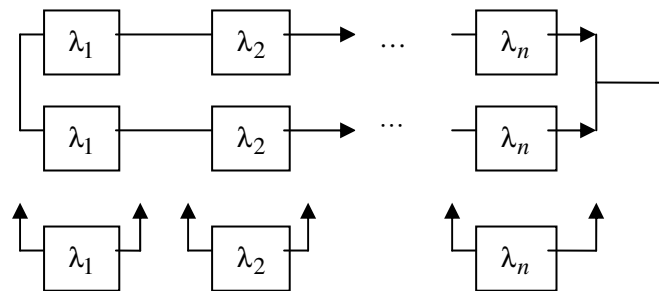


Рис. 4. Схема расчета надежности «сложной» резервированной группы.

Обозначим: n – количество типов элементов в последовательном соединении; m – количество элементов каждого типа в ЗИП, при этом ($m = 1, \dots, n$).

Получить формулу для расчета ВБР при произвольных значениях n и m не представляется возможным, поэтому ниже приводятся выражения для некоторых частных случаев, которые наиболее часто встречаются в навигационных

комплексах (НК); при этом предполагается, что $\lambda = \sum_{i=0}^n \lambda_i$. Вывод этих формул приведен в приложении.

С л у ч а й 1. При $n=2$; $m_1=1$; $m_2=0$.

$$P(t) = \text{EXP}\{-2\lambda t\} + \frac{2\lambda_2}{\lambda} \text{EXP}\{-\lambda t\}(1 - \text{EXP}\{-\lambda t\}) + 2\lambda_1 t \text{EXP}\{-2\lambda t\} + 4\lambda_1 \lambda_2 \text{EXP}\{-\lambda t\} [1 - (1 + \lambda t) \text{EXP}\{-\lambda t\}] \quad (5)$$

С л у ч а й 2. При $n=2$; $m_1=1$; $m_2=1$.

$$P(t) = \text{EXP}\{-2\lambda t\} + 2\lambda t \text{EXP}\{-2\lambda t\} + 4\lambda_1 \lambda_2 t^2 \text{EXP}\{-2\lambda t\} + \frac{(2\lambda_1)^2}{\lambda^2} \text{EXP}\{-\lambda t\} [1 - (1 + \lambda t) \text{EXP}\{-\lambda t\}] + \frac{(2\lambda_2)^2}{\lambda^2} \text{EXP}\{-\lambda t\} [1 - (1 + \lambda t) \text{EXP}\{-\lambda t\}] + \frac{16\lambda_1 \lambda_2}{\lambda^2} \text{EXP}\{-\lambda t\} \left[1 - \left(1 + \lambda t + \frac{\lambda^2 t^2}{2!} \right) \text{EXP}\{-\lambda t\} \right] \quad (6)$$

С л у ч а й 3. При $n=3$; $m_1=1$; $m_2=0$; $m_3=0$.

$$P(t) = \text{EXP}\{-2\lambda t\} + \frac{2(\lambda_2 + \lambda_3)}{\lambda} \text{EXP}\{-\lambda t\}(1 - \text{EXP}\{-\lambda t\}) + 2\lambda_1 t \text{EXP}\{-2\lambda t\} + \frac{4\lambda_1}{\lambda} \text{EXP}\{-\lambda t\} [1 - (1 + \lambda t) \text{EXP}\{-\lambda t\}] \quad (7)$$

С л у ч а й 4. При $n=3$; $m_1=1$; $m_2=1$; $m_3=0$.

$$P(t) = \text{EXP}\{-2\lambda t\} + \frac{2\lambda_3}{\lambda} \text{EXP}\{-\lambda t\} + 2(\lambda_1 + \lambda_2)t + \left[\frac{4\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_3) + 4\lambda_2(\lambda_2 + \lambda_3)}{\lambda^2} \right] \text{EXP}\{-\lambda t\} \times [1 - (1 + \lambda t) \text{EXP}\{-\lambda t\}] + 4\lambda_1 \lambda_2 t^2 \text{EXP}\{-2\lambda t\} + \frac{8\lambda_1 \lambda_2}{\lambda^2} \text{EXP}\{-\lambda t\} \left[1 - \left(1 + \lambda t + \frac{\lambda^2 t^2}{2!} \right) \text{EXP}\{-\lambda t\} \right] \quad (8)$$

Оценка показателя надежности системы

Применение предлагаемого метода рассмотрим на примере НК. При этом отметим следующие обстоятельства:

1) если в состав системы входят неоднородные элементы или в ней имеются зависимые по восстановлению элементы, то формулы для вычисления ВБР в некоторых частных случаях приведены в [6, 7]. В общем случае эта задача достаточно сложная и требует своего решения для каждой конкретной структуры;

2) полученные формулы (5) – (8) являются достаточными в большинстве практических случаев при расчете ПН НК.

Итак, рассмотрим изделие «Сумматор-11430», входящее в состав НК «Ладога-11430». Схема расчета надежности изделия, представленная на рис. 5, и интенсивности отказов составных частей взяты из отчетов «Расчет надежности приборов изделия «Сумматор-11430» и «Расчет надежности изделия «Сумматор-11430», 2005 г.

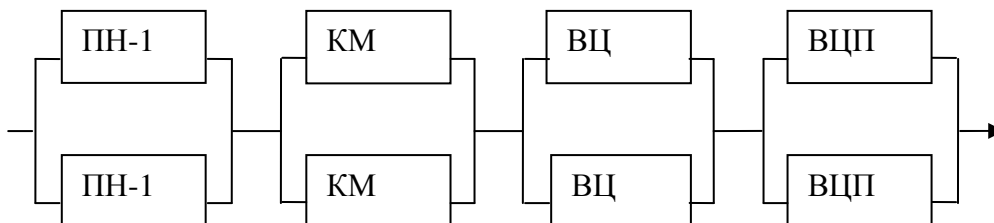


Рис. 5. Схема расчета надежности изделия «Сумматор-11430»: КМ – контроллер магистрали, ВЦ – вычислитель цифровой, ВЦП – вычислитель цифровой пультовой, ПН-1 – преобразователь напряжения

К изделию предъявляется следующее требование по надежности: вероятность его безотказной работы за 5000 ч должна быть не менее 0,999.

Интенсивности отказов составляющих изделия имеют следующие значения: $\lambda_{\text{КМ}} = 43,64 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_{\text{ВЦ}} = 63,3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_{\text{ВЦП}} = 43,3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$; $\lambda_{\text{ПН-1}} = 0,26 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$. При этом прибор ПН-1 имеет сложную резервированную структуру. Время восстановления изделия $\tau_{\text{в}} = 12 \text{ мин} = 0,2 \text{ ч}$.

ВБР такой структуры при неограниченном ЗИП определяются по формуле [2]

$$P(t) = \text{EXP}\{-2\lambda_{\Sigma}^2 \tau_{\text{в}} t\}, \quad (9)$$

где $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\text{ПН-1}} + \lambda_{\text{КМ}} + \lambda_{\text{ВЦ}} + \lambda_{\text{ВЦП}}$. Подставляя указанные выше значения в формулу (9), получим: $P(5000) = 0,9999547$. Для получения такой ВБР, которая значительно выше требуемой, в соответствии с [3] требуется ЗИП в количестве 33 модулей. Рассмотрим, какой комплект ЗИП обеспечивает заданный показатель надежности? Если в ЗИП находится 18 модулей (по одному модулю каждого типа из находящихся в ЗИП), то в соответствии с формулой (3), получаем:

$$P_{\text{КМ}}(5000) = 0,999945; P_{\text{ВЦ}}(5000) = 0,99987; P_{\text{ВЦП}}(5000) = 0,999951; \\ P_{\text{ПН-1}}(5000) = 0,999945$$

$$\text{Окончательно } P(t) = \prod_{i=1}^4 P_i(t) = 0,999636.$$

Таким образом, видно, что обеспечение заданного показателя надежности достигается и в том случае, когда аппаратура ЗИП состоит не из 33 модулей, а всего из 18.

Заключение

Предлагаемый в работе подход к расчету надежности НК, учитывающий реальный состав комплекта ЗИП, дает более точную оценку надежности по сравнению с официальными методиками, которые используются в настоящее время.

Он является универсальным и пригоден для подавляющего большинства схем расчета надежности НК. Для практического применения предлагаемого подхода необходимо создать соответствующее программное обеспечение, включающее в себя библиотеку расчета ПН с учетом конечного состава ЗИП для типовых схем расчета надежности.

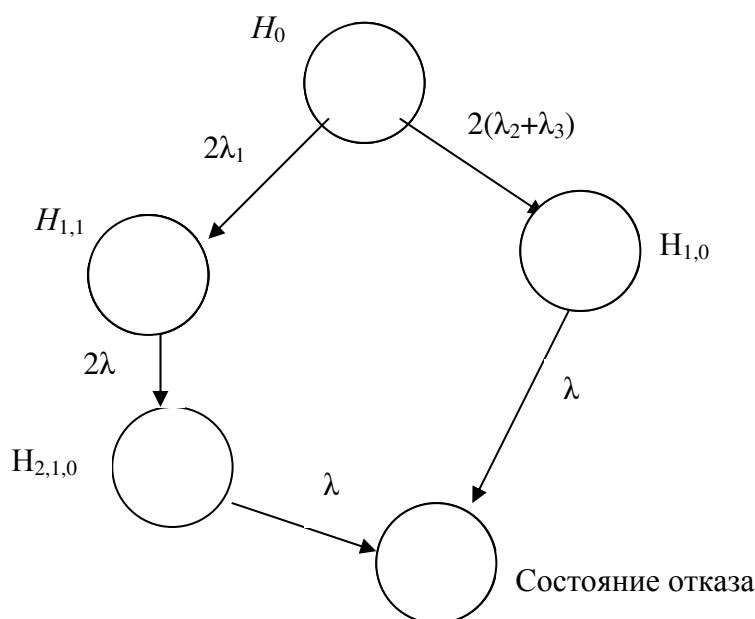
ЛИТЕРАТУРА

1. **РД В5.8677-83** «Изделия судового приборостроения. Методы расчета показателей безотказности на стадиях разработки».
2. **СТП ДННН 2.77-2006** «Система менеджмента качества. Надежность изделий. Требования по надежности и методические указатели по расчету».
3. **ГОСТ РВ 27.3.03-2005** «Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП».
4. **Черкесов, Г.Н.** Надежность аппаратно-программных комплексов. – СПб.: Питер, 2005, 480 с.
5. **ГОСТ РВ 20.39.303-98** «Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства военного назначения. Требования к надежности. Состав и порядок задания».
6. **Черкесов, Г.Н.** О прямом учете состава комплекта ЗИП при оценке надежности однородных восстанавливаемых систем. //Надежность №3(22). – 2007. – С. 32-44.
7. **Черкесов, Г.Н.** О прямом учете состава комплекта ЗИП при оценке надежности неоднородных восстанавливаемых систем. //Надежность №4 (23). – 2007. – С. 3-18.
8. **Справочник** Надежность технических систем / Под ред. И.А.Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 606 с.

Приложение

Вывод формул (5) – (8) покажем на примере вывода формулы (7). Вывод остальных формул аналогичен приведенному.

Составим граф возможных состояний системы. Для рассматриваемого случая он представлен на рисунке.



На рисунке приняты следующие обозначения: H_0 – состояние, когда все элементы

системы исправны, $H_{1,1}$ – состояние, возникающее в случае, когда на интервале времени $(0, t)$ откажет элемент, имеющийся в ЗИП (1-й), система остается резервированной и за оставшееся до момента t время отказов больше не будет, $H_{1,0}$ – состояние, возникающее в случае, когда на интервале времени $(0, t)$ откажет элемент, отсутствующий в ЗИП (2-й или 3-й), система станет нерезервированной, но за оставшееся до момента t время отказов больше не будет, $H_{2,1,0}$ – состояние, возникающее в случае, когда на интервале времени $(0, t)$ вначале откажет элемент, имеющийся в ЗИП, затем откажет элемент, отсутствующий в ЗИП, система станет нерезервированной, но за оставшееся до момента t время отказов больше не будет, H_3 – состояние отказа системы, λ_1, λ_2 и λ_3 – интенсивности отказов 1-, 2- и 3-го элементов, $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$.

Исходя из графа состояния, ВБР рассматриваемой системы можно определить по формуле по формуле

$$P(t) = P_0(t) + P_{1,0}(t) + P_{1,1}(t) + P_{2,1,0}(t). \quad (\text{П1})$$

где $P_0(t) = \text{EXP}\{-2\lambda t\}$ – вероятность того, что за время t не было ни одного отказа;

$$P_{1,0}(t) = \frac{2(\lambda_2 + \lambda_3)}{\lambda} \text{EXP}\{-\lambda t\}(1 - \text{EXP}\{-\lambda t\})$$
 – вероятность того, что на интервале

$(0, t)$ откажет элемент, отсутствующий в ЗИП, система станет нерезервированной, но за оставшееся до момента времени t отказов больше не будет; $P_{1,1}(t) = 2\lambda_1 t \text{EXP}\{-2\lambda t\}$ –

вероятность того, что на интервале $(0, t)$ откажет элемент, имеющийся в ЗИП, система останется резервированной и за оставшееся до момента времени t отказов больше не

будет; $P_{2,1,0} = \frac{4\lambda_1}{\lambda} \text{EXP}\{-\lambda t\}[1 - (1 + \lambda t) \text{EXP}\{-\lambda t\}]$ – вероятность того, что на интервале

$(0, t)$ вначале откажет элемент, имеющийся в ЗИП, потом откажет элемент, отсутствующий в ЗИП, система станет нерезервированной, но за оставшееся до момента времени t отказов больше не будет.

Сложив приведенные выше выражения, получим формулу (7).

Abstract. The paper deals with solving the problem of reliability calculation for redundant systems with consideration for the final composition of SPTA set equipment. The formulas for calculating probability of no-failure operation of typical element connecting circuits are suggested with due regard for the SPTA set final composition. The proposed approach gives a more accurate reliability evaluation in comparison with the techniques used at present time, and provides the reliability goal using a much smaller SPTA set.

Материал поступил 13.03.10