Определение показателей надежности систем, обладающих вспомогательными элементами

Жаднов В.В., Полесский С.Н.

In article is considered question determination to system reliability, pledge-giving auxiliary element (the elements, which allow to change the moustache-caught usages). The broughted methods of the reception of the mathematical models main of the groups of the standby for don't restored and restored systems, as well as considered examples of the conclusion of the correlation, for most often meeting in practical person of the events.

Введение

В настоящее время нередки случаи, когда возникает необходимость эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) в диапазонах внешних воздействий, не отвечающих допустимым в техническом условии (ТУ) на РЭА диапазонам этих воздействий.

В таких случаях в РЭА вводятся вспомогательные (сервисные) устройства, приводящие диапазоны внешних воздействующих факторов (ВВФ) к диапазонам допустимым для нормального функционирования аппаратуры в соответствии с их классом [1].

Встречаются случаи, когда внезапный отказ вспомогательной аппаратуры приводит к изменению (обычно к увеличению) интенсивностей отказов основной аппаратуры. Тогда рассматриваемая система, относится уже к системам с последействиями отказов.

Очевидно, что если и в этом случае вспомогательный элемент (ВЭ) включить последовательно с основным элементом, то показатели надежности системы, такие как вероятность безотказной работы, средняя наработка на отказ и др., будут оценены снизу.

На практике при проведении расчетов надежности обычно так и приходиться поступать, т.к. справочники по расчету надежности невосстанавливаемой и восстанавливаемой РЭА (например [2]) не содержат точных решений этой задачи при сложных схем расчета надежности (СРН) основных элементов (ОЭ) системы, совокупность которых выполняет все возложенные на систему функции.

Поэтому необходимо решить задачу приближенного (для общего случая) определения показателей надежности системы с ВЭ в условиях, когда отказ ВЭ приводит к изменению интенсивности отказов (ИО) составных частей (СЧ) ОЭ.

Общий случай

Очевидно, что чем уже допустимые диапазоны воздействий для СЧ ОЭ, тем жестче требования к нормальному функционированию ВЭ. И при внезапном отказе вспомогательной аппаратуры в некоторый момент времени τ, приводит к немедленному отказу системы, составленной из ОЭ и ВЭ.

В этом случае вспомогательная аппаратура является элементом, соединенным последовательно с основным элементом и СРН системы представляет собой последовательное соединение двух элементов (см. рис. 1).

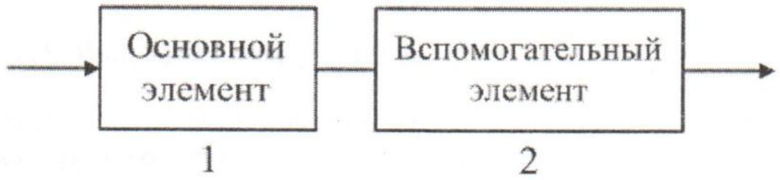

Рис. 1. СРН последовательной системы ОЭ-ВЭ

Рассмотрен ряд задач надежности при экспоненциальном распределении наработок до отказа компонентов, входящих в ОЭ и ВЭ.

Дана невосстанавливаемая система, состоящая из двух элементов: ОЭ и ВЭ. Каждый из этих элементов, в общем случае, может иметь свою структуру резервирования.

Рассмотрим перечень несовместных, успешных гипотез, сопутствующих успешному выполнению системой заданных функций на интервале времени (0, t), в предположении, что в момент времени t=0 оба элемента системы исправны полностью (т.е. включая аппаратурный резерв, устройства коммутации и т.п.).

Перечень этот невелик и содержит всего две успешные гипотезы:

1. Исправны оба элемента:

Вероятность $P_1(t)$ этой гипотезы равна:

$$P_1(t) = P_{ОЭ}(t) \cdot P_{ВЭ}(t), \tag{1}$$

где:

- $P_{ОЭ}(t)$ – вероятность безотказной работы (ВБР) основного элемента за время t, при условии, что вспомогательный элемент исправен время t (это значит, что значения параметров ОЭ соответствуют тем, которые должны иметь место при нормальной работе ВЭ);
- $P_{ВЭ}(t)$ – ВБР вспомогательного элемента за время t.

2. В произвольный момент времени τ отказывает ВЭ, а ОЭ будучи исправным до момента τ проработает безотказно время $(t-\tau)$, сменив параметры на новые значения (параметрами являются интенсивности отказов в выражении для ОЭ).

Вероятность этой гипотезы определяется усреднением по τ условной ВБР $P_{ОЭ}(\tau,t)$ по формуле:

$$P_2(t) = \int_0^t P_{ОЭ}(\tau,t) d(Q_{ВЭ}(t)), \tag{2}$$

где:

- $P_{ОЭ}(\tau,t)$ – вероятность того, что ОЭ отработав исправно время $\underline{\tau}$ при исходных параметрах, отвечающих исправному состоянию ВЭ, отработает исправно еще и время $(t-\tau)$, но уже с измененными, скачкообразно, параметрами.
- $d(Q_{ВЭ}(t)) = -d(P_{ВЭ}(t)) = -P'_{ВЭ}(t) \cdot d\tau$ - это вероятность того, что ВЭ проработает исправно время τ и откажет на малом промежутке времени $d\tau$ примыкающем к τ справа (плотность $W_{ВЭ}(\tau)$ распределения времени безотказной работы ВЭ умноженная на $d\tau$).

При экспоненциальном распределении новые параметры, естественно рассматривая влияние момента отказа τ на потоки отказов всех составных частей ОЭ на интервалах времени (0; τ) и (τ; t).

Таким образом, получаем при суммировании двух несовместных, успешных гипотез следующее выражение:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) = P_{ОЭ}(t) \cdot P_{ВЭ}(t) + \int_0^t P_{ОЭ}(\tau,t) d(Q_{ВЭ}(t)), \tag{3}$$

Среднее время наработки до отказа системы может быть определено, используя соотношения (3) для определения вида $P(t)$ с помощью известного интегрального соотношения приведенного в [2]:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t)dt, \tag{4}$$

Отметим, что последействие может быть полным (общим), когда оно воздействует на все составные части ОЭ (т.е. как рабочие, так и резервные), либо неполным (частичным), когда последействию подвергаются лишь некоторая часть составных частей (СЧ) ОЭ или некоторые элементы этих СЧ.

Уровень влияния последействия на некоторый параметр может быть оценен коэффициентом влияния равным:

$$K_B = \frac{\text{Уровень 2 параметра (после момента } \tau)}{\text{Уровень 1 параметра (до момента } \tau)}.$$

Если, например, параметром является интенсивность отказов (λ), то имеем:

$$K_B = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}. \tag{5}$$

Для общего случая в ОЭ каждой СЧ должно быть определено индивидуально значение K_B. При близости их значений они могут быть усреднены и это единое приближенное усредненное значение может быть использовано для приближенного расчета ВБР $P(t)$.

Как можно увидеть ниже, сложность задачи заключается в определении вида функции $P_{OЭ}(\tau,t)$. Интегрирование же может быть достаточно просто выполнено численно с помощью любой из известных прикладных математических программ (*Mathcad*, *Matlab*, *Maple* и др.).

Ниже рассмотрим ряд примеров, наиболее часто встречающихся в практике при априорной оценки надежности РЭА. Это даст возможность получить в результате достаточно простой прием для приближенного определения условной функции ВБР $P(\tau, t)$.

Математические модели определения показателей надежности систем ОЭ-ВЭ для некоторых групп резервирования

Система составлена из нерезервированных ОЭ и ВЭ

В этом случае (см. рис. 1) имеем:

$$P_{BЭ}(t) = e^{-\lambda_{BЭ}\cdot t},$$

$$P_{OЭ}(t) = e^{-\lambda_{OЭ}\cdot t},$$

$$P_1(t) = P_{BЭ}(t)\cdot P_{OЭ}(t) = e^{-(\lambda_{BЭ}+\lambda_{OЭ})\cdot t},$$

где:

- $\lambda_{BЭ}$ – интенсивность отказов (ИО) вспомогательного элемента в режиме работы;
- $\lambda_{OЭ}$ – ИО основного элемента (без привязки к ВЭ), в режиме работы.

Далее определим для ВЭ плотность распределения времени безотказной работы, а для ОЭ функцию $P(\tau, t)$:

- плотность:

$$W_{BЭ}(t) = -P'_{BЭ}(t) = \lambda_{BЭ}\cdot e^{-\lambda_{BЭ}\cdot t},$$

- точный вид функции условной вероятности $P_{OЭ}(\tau,t)$ имеет следующий вид:

$$P_{OЭ}(\tau,t)=e^{-\int_0^t \lambda_{OЭ}(\tau)d\tau}=e^{-\left(\int_0^\tau \lambda_{OЭ1}(\tau)d\tau+\int_\tau^t \lambda_{OЭ2}(\tau)d\tau\right)}=e^{-(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau))},$$

где $(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau))$ представляет собой поток отказов за время t, зависящий от промежутка времени τ. Он может быть, при необходимости, представлен как:

$$\lambda_{OЭ1}\cdot(\tau+K_B\cdot(t-\tau)) \text{ или } \lambda_{OЭ1}\cdot t\cdot K_B-\lambda_{OЭ1}\cdot(K_B-1)\cdot\tau,$$

но преимущества этих представлений в рассматриваемых примерах не очевидны.

В формулах введены следующие сокращения:

- $\lambda_{OЭ1}$ и $\lambda_{OЭ2}$ - ИО основного элемента в режиме работы соответственно до и после момента τ отказа вспомогательного элемента (т.е. уже с привязкой к совместной с ВЭ работе).

Рассматривая условную ВБР $P_{OЭ}(\tau,t)$ можно видеть, что если отказ ВЭ произойдет в начальный момент времени τ=0 интервала *(0; t)*, то $P_{OЭ}(\tau,t)$ переходит на оставшемся интервале длиной t в функцию:

$$P_{OЭ}(\tau,t)=e^{-\lambda_{OЭ2}\cdot t}$$

Если же отказ ВЭ произойдет в момент t в конце интервала *(0;t)*, то:

$$P_{OЭ}(\tau,t)=e^{-\lambda_{OЭ1}\cdot t}.$$

В рассмотренных двух крайних случаях это, по смыслу влияния последействия.

Таким образом, получаем:

$$P_2(t)=\int_0^t \lambda_{BЭ}\, e^{-\lambda_{BЭ}\cdot\tau}\cdot e^{-(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau))}d\tau=\lambda_{BЭ}e^{-\lambda_{OЭ2}\cdot t}\cdot\int_0^t e^{-(\lambda_{BЭ}+\lambda_{OЭ1}-\lambda_{OЭ2})\cdot\tau}d\tau=$$

$$=\left(\frac{\lambda_{BЭ}}{\lambda_{BЭ}+\lambda_{OЭ1}-\lambda_{OЭ2}}\right)\cdot e^{-\lambda_{OЭ2}\cdot t}\cdot\left(1-e^{-(\lambda_{BЭ}+\lambda_{OЭ1}-\lambda_{OЭ2})\cdot t}\right)$$

Тогда получаем соотношение для $P(t)$:

$$P(t)=P_1(t)+P_2(t)=e^{-(\lambda_{BЭ}+\lambda_{OЭ2})\cdot t}+\left(\frac{\lambda_{BЭ}}{\lambda_{BЭ}+\lambda_{OЭ1}-\lambda_{OЭ2}}\right)\cdot e^{-\lambda_{OЭ2}\cdot t}\cdot\left(1-e^{-(\lambda_{BЭ}+\lambda_{OЭ1}-\lambda_{OЭ2})\cdot t}\right) \quad (6)$$

Отметим, что при отсутствии последействия разность $\lambda_{OЭ1}-\lambda_{OЭ2}=0$ и, полученное выражение (6) приводится к виду:

$$P(t)=e^{-\lambda_{OЭ1}\cdot t}=e^{-\lambda_{OЭ}\cdot t},$$

что и следовало ожидать, т.к. теперь система - это уже просто ОЭ и безразлично исправен или отказал элемент ВЭ на интервале времени *(0; t)*. В этом случае ВЭ может быть просто изъят из СРН системы (см. рис. 1), если он не выполняет еще каких-либо других функций.

В примере 2.1 выражение для ВБР имеет не сложную формулу (6), поэтому среднее время наработки до отказа системы определяется по соотношению:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t)dt = \left(\frac{1}{\lambda_{ВЭ} + \lambda_{ОЭ1}} \right) + \left(\frac{\lambda_{ВЭ}}{(\lambda_{ВЭ} + \lambda_{ОЭ1} - \lambda_{ОЭ2}) \cdot \lambda_{ОЭ1}} \right) - \left(\frac{\lambda_{ВЭ}}{(\lambda_{ВЭ} + \lambda_{ОЭ1} - \lambda_{ОЭ2}) \cdot (\lambda_{ВЭ} - \lambda_{ОЭ1})} \right) =$$

$$= \left(\frac{1}{\lambda_{ВЭ} + \lambda_{ОЭ1}} \right) + \left(\frac{\lambda_{ВЭ}}{(\lambda_{ВЭ} + \lambda_{ОЭ1} - \lambda_{ОЭ2}) \cdot \left((1/\lambda_{ОЭ1}) - (1/\lambda_{ВЭ} + \lambda_{ОЭ1}) \right)} \right)$$

Теперь рассмотрим систему, в которой ВЭ резервирован однократно и постоянно, а ОЭ нерезервирован

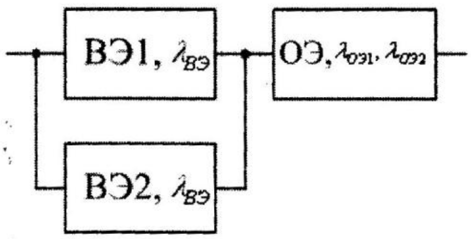

Рис. 2. Система ВЭ-ОЭ (ВЭ однократно резервирован)

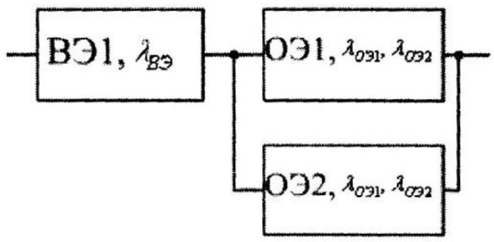

Рис. 3. Система ВЭ-ОЭ (ОЭ однократно резервирован)

Тогда для системы (см. рис. 2) функция ВБР ВЭ имеет следующий вид [2]:

$$P_{ВЭ}(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda_{ВЭ} t}\right)^2,$$

и плотность $W_{ВЭ}(t)$ для ВЭ составит:

$$W_{ВЭ}(t) = -P'_{ВЭ}(t) = 2 \cdot \lambda_{ВЭ} \cdot e^{-\lambda_{ВЭ} \cdot t} \cdot \left(1 - e^{-\lambda_{ВЭ} \cdot t}\right),$$

$$\text{а } P_2(t) = \int_0^t W_{ВЭ}(\tau) \cdot e^{-(\lambda_{ОЭ1} \cdot \tau + \lambda_{ОЭ2} \cdot (t - \tau))} d\tau .$$

Отсюда получаем $P_1(t)$:

$$P_1(t) = P_{ВЭ}(t) \cdot e^{-\lambda_{ОЭ1} \cdot t} .$$

И для всей системы соотношение ВБР аналогично общему виду см. формулу (3).

Система состоит из нерезервированного ВЭ и однократно резервированного ОЭ. Резерв нагруженный

Для системы представленной на рис. 3 получаем (с учетом одинакового влияния последействие на рабочий и резервный элементы в ОЭ):

$$P_{ВЭ}(t) = e^{-\lambda_{ВЭ} \cdot t},$$

Кроме того, при построении модели надежности системы, введем следующую характеристику: $p_{ОЭ}(t) = e^{-\lambda_{ОЭ} \cdot t}$ - это вероятность безотказной работы для нерезервированного одного основного элемента.

Вид функция ВБР для ОЭ с учетом СРН имеет следующий вид [2]:

$$P_{\text{ОЭ}}(t)=1-\left(1-p_{\text{ОЭ}}(t)\right)^2=2\cdot p_{\text{ОЭ}}(t)-p_{\text{ОЭ}}(t)^2=2\cdot e^{-\lambda_{\text{ОЭ}}\cdot t}+e^{-2\lambda_{\text{ОЭ}}\cdot t}.$$

По условию, оба элемента в ОЭ подвергаются одинаковому последействию, тогда можно записать:

$$P_{\text{ОЭ}}(\tau,t)=2\cdot e^{-\left(\lambda_{\text{ОЭ1}}\cdot\tau+\lambda_{\text{ОЭ2}}\cdot(t-\tau)\right)}+e^{-2\cdot\left(\lambda_{\text{ОЭ1}}\cdot\tau+\lambda_{\text{ОЭ2}}\cdot(t-\tau)\right)},$$

$$P_1(t)=P_{\text{ВЭ}}(t)\cdot P_{\text{ОЭ}}(t)=e^{-\lambda_{\text{ВЭ}}\cdot t}\cdot\left(2\cdot e^{-\lambda_{\text{ОЭ1}}\cdot t}+e^{-2\cdot\lambda_{\text{ОЭ1}}\cdot t}\right),$$

$$P_2(t)=\int_0^t\lambda_{\text{ВЭ}}\cdot e^{-\lambda_{\text{ВЭ}}\cdot\tau}\cdot P(\tau,t)d\tau,$$

$$P_2(t)=2\cdot\int_0^t\lambda_{\text{ВЭ}}\cdot e^{-\lambda_{\text{ВЭ}}\cdot\tau}\cdot e^{-\left(\lambda_{\text{ОЭ1}}\cdot\tau+\lambda_{\text{ОЭ2}}\cdot(t-\tau)\right)}d\tau+\int_0^t\lambda_{\text{ВЭ}}\cdot e^{-\lambda_{\text{ВЭ}}\cdot\tau}\cdot e^{-2\cdot\left(\lambda_{\text{ОЭ1}}\cdot\tau+\lambda_{\text{ОЭ2}}\cdot(t-\tau)\right)}d\tau=$$

$$=2\cdot\lambda_{\text{ВЭ}}\cdot e^{-\lambda_{\text{ОЭ2}}\cdot t}\cdot\int_0^t e^{-\left(\lambda_{\text{ВЭ}}+\lambda_{\text{ОЭ1}}-\lambda_{\text{ОЭ2}}\right)\cdot\tau}d\tau+\lambda_{\text{ВЭ}}\cdot e^{-\lambda_{\text{ОЭ2}}\cdot t}\cdot\int_0^t e^{-2\cdot\left(\lambda_{\text{ВЭ}}+\lambda_{\text{ОЭ1}}-\lambda_{\text{ОЭ2}}\right)\cdot\tau}d\tau=\left(\frac{2\cdot\lambda_{\text{ВЭ}}}{\lambda_{\text{ВЭ}}+\lambda_{\text{ОЭ1}}-\lambda_{\text{ОЭ2}}}\right)\cdot$$

$$\cdot e^{-\lambda_{\text{ОЭ2}}\cdot\tau}\cdot\left(1-e^{-\left(\lambda_{\text{ВЭ}}+\lambda_{\text{ОЭ1}}-\lambda_{\text{ОЭ2}}\right)\cdot t}\right)+\left(\frac{\lambda_{\text{ВЭ}}}{2\cdot\left(\lambda_{\text{ВЭ}}+\lambda_{\text{ОЭ1}}-\lambda_{\text{ОЭ2}}\right)}\right)\cdot e^{-\lambda_{\text{ОЭ2}}\cdot\tau}\cdot\left(1-e^{-2\left(\lambda_{\text{ВЭ}}+\lambda_{\text{ОЭ1}}-\lambda_{\text{ОЭ2}}\right)\cdot t}\right)$$

В результате суммирования двух успешных несовместных гипотез (см. формулу (3)) получаем соотношение расчета ВБР системы, как можно модель системы имеем сложную структуру.

Характеристика T_0 может быть также определена путем интегрирования полученной функции надежности (см. формулу (4)), но это достаточно громоздко. Проще для этого воспользоваться имеющимися программными средствами (например, *MathCad*).

Нерезервированный ВЭ и резервированный по схеме 2 из 3-х ОЭ

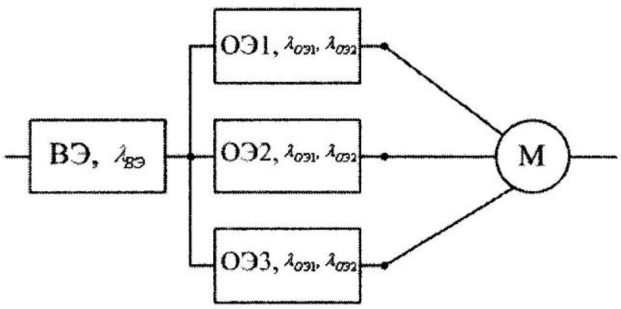

Рис. 4. Система ВЭ-ОЭ (ОЭ резервирован по схеме 2 из 3-х)

Для системы, когда ОЭ резервирован по схеме мажорирования (см. рис. 4) получаем:

$$P_{\text{ВЭ}}(t)=e^{-\lambda_{\text{ВЭ}}\cdot t}.$$

Аналогично, как в п. 3 вводится в рассмотрение ВБР нерезервированного основного элемента:

$$p_{\text{ОЭ}}(t)=e^{-\lambda_{\text{ОЭ}}\cdot t}.$$

А для мажоритарной системы имеем [2]:

$$P_{OЭ}(t)=p_{OЭ}(t)^3+3\cdot p_{OЭ}(t)^2\cdot\left(1-p_{OЭ}(t)\right)=e^{-3\cdot\lambda_{OЭ}\cdot t}+3\cdot e^{-2\cdot\lambda_{OЭ}\cdot t}\cdot\left(1-e^{-\lambda_{OЭ}\cdot t}\right),$$

$$P_{OЭ}(\tau,t)=e^{-3\cdot(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau))}+3\cdot e^{-2\cdot(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau))}\cdot\left(1-e^{-(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau))}\right)=$$

$$=3\cdot e^{-2\cdot(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau))}-2\cdot e^{-3\cdot(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau))}.$$

Для двух несовместных успешных гипотез получим:

$$P_1(t)=P_{ВЭ}(t)\cdot P_{OЭ}(t)=e^{-\lambda_{ВЭ}\cdot t}\cdot\left(e^{-3\cdot\lambda_{OЭ}\cdot t}+3\cdot e^{-2\cdot\lambda_{OЭ}\cdot t}\cdot\left(1-e^{-\lambda_{OЭ}\cdot t}\right)\right),$$

$$P_2(t)=3\cdot\int_0^t\lambda_{ВЭ}\cdot e^{-\lambda_{ВЭ}\cdot\tau}\cdot e^{-2\cdot(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau))}d\tau-2\cdot\int_0^t\lambda_{ВЭ}\cdot e^{-\lambda_{ВЭ}\cdot\tau}\cdot e^{-3\cdot(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau))}d\tau=$$

$$=3\cdot\left(\lambda_{ВЭ}/\left(\lambda_{ВЭ}+2\cdot\left(\lambda_{OЭ1}-\lambda_{OЭ2}\right)\right)\right)\cdot e^{-2\cdot\lambda_{OЭ2}\cdot t}\cdot\left(1-e^{-(\lambda_{ВЭ}+2\cdot(\lambda_{OЭ1}-\lambda_{OЭ2}))\cdot t}\right)-$$

$$-2\cdot\left(\lambda_{ВЭ}/\left(\lambda_{ВЭ}+3\cdot\left(\lambda_{OЭ1}-\lambda_{OЭ2}\right)\right)\right)\cdot e^{-3\cdot\lambda_{OЭ2}\cdot t}\cdot\left(1-e^{-(\lambda_{ВЭ}+3\cdot(\lambda_{OЭ1}-\lambda_{OЭ2}))\cdot t}\right).$$

Для получения итоговой модели расчета ВБР системы, используется формула (3), а для получения средней наработки до отказа формула (4).

Определение ВБР для системы образованной ВЭ и ОЭ восстанавливаемым

Представляет интерес определение условной функции $P_{OЭ}(\tau,t)$ в случае, когда ОЭ восстанавливаемый.

Решение задачи в важном для практики случае, когда ВЭ нерезервирован или резервирован, но по каким-либо причинам не содержится в ЗИП. Это приводит к неопределенно долгому нахождению ОЭ в состоянии 2 (см. п. 2) с завышенными ИО его составных частей.

Например, такая модель может быть, в случае если показатель ВБР задан на суточном интервале времени и заранее известно, что в течение суток замена отказавшего ВЭ по каким-либо причинам невозможна.

Тогда определение $P_{OЭ}(\tau,t)$ может быть приближенно выполнено в такой же последовательности как это было осуществлено выше. При этом необходимо воспользоваться функциями для ВБР приведенными в [2] для резервированной восстанавливаемой РЭА.

Определение T_0 может быть выполнено в этом случае также по формуле (4).

При определении ВБР и T_0 вводится допущение (как это делается на практике), что интенсивность восстановления μ не зависит от момента времени τ отказа вспомогательного элемента.

В этом случае приближенное определение $K_Г$ может быть осуществлено в последовательности:

- задается вид функции $K_Г(\lambda,\mu)$ для ОЭ;
- во всех позициях λ в $K_Г$ осуществляется замена λ на $\left(\lambda_{OЭ1}\cdot\tau+\lambda_{OЭ2}\cdot(t-\tau)\right)/t$, т.е. определяется функция $K_Г(\tau,t)$;
- определяется $K_{Г1}$ в предположении, что ВЭ невосстанавливаемый;

- определяется $K_{Г2}$ путем интегрирования по τ в пределах *(0; t)*, как это делалось выше (см. п. 2);
- вычисляется сумма $K_{Г1}+K_{Г2}$ в ряде точек *t*, включая предельную (например, время гарантийной эксплуатации и т.п.);
- среди ниспадающих вычисленных значений суммы находится минимальное, которое и принимается за нижнюю оценку $K_Г$ системы на рассмотренном интервале времени.

В случае высоких $\mu \cdot t$ и $\mu \gg \lambda$ в качестве исходной функции $K_Г$ может быть взят стационарный $K_Г$.

Рассмотрим, простейших пример, случай, когда нерезервированны ВЭ и ОЭ, тогда получаем:

$$K_{Г0} = \frac{\mu}{\mu+\lambda},\ K_Г(\tau,t) = \frac{\mu}{\left(\mu + \left(\left(\lambda_{ОЭ1}\cdot\tau + \lambda_{ОЭ2}\cdot(t-\tau)\right)/t\right)\right)},$$

$$K_{Г1}(t) = e^{-\lambda_{ВЭ}\cdot t}\cdot K_{Г0},\ K_{Г2}(t) = \int_0^t \lambda_{ВЭ}\cdot e^{-\lambda_{ВЭ}\cdot t}\cdot K_Г(\tau,t)d\tau .$$

Для получения общей модели расчета коэффициента готовности восстанавливаемой системы необходимо просуммировать:

$$K_Г(t) = K_{Г1}(t) + K_{Г2}(t).$$

Вывод

Рассмотренная задача возникает на ряде предприятиях. Все полученные математические модели расчета ВБР и коэффициента готовности были опробованы, а в последствии подтверждены при испытаниях и эксплуатации сложных наземных комплексов систем связи и передачи информации. Первый опыт применения этих моделей был проведен в Федеральном Государственном предприятии «научно-исследовательском институте точных приборов», при расчете и обеспечении надежности центральной станции многофункциональной спутниковой персональной системы связи (МСПСС) «Гонец-Д1М», входящей в состав наземного комплекса управления (НКУ) орбитальной группировкой (ОГ) космических аппаратов, которая включает в себя систему, состоящую из кондиционера (вспомогательный элемент отсутствующий в ЗИП) и охлаждаемые им две серверные стойки, образующие основной элемент (в каждой стойке имеется резерв СЧ скользящий ненагруженный вида 3 из 8).

В перспективе планируется проработка математических моделей для более сложно-функциональных групп резервирования, их адаптация и подтверждения на испытаниях. Кроме того, осуществляется работа по их включению в программный комплекс АСОНИКА-К.

Литература

1. ГОСТ Р В 20.39.304-98. Комплексная система общих требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.
2. Надежность технических систем: Справочник /Под редакцией И.А.Ушакова. М.~: Изд-во «Радио и связь», 1985. – 608 с.
3. Жаднов В.В., Сарафанов А.В. Управление качеством при проектировании теплонагруженных радиоэлектронных средств, изд. «СОЛОН-Пресс», 2004г.