

Антонов А.В., Пляскин А.В., Татаев Х.Н.

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СТРУКТУР С УЧЕТОМ СТАРЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье рассматривается вопрос расчета показателей надежности резервированных структур с учетом старения элементов. Практика эксплуатации объектов на современных промышленных предприятиях такова, что как основные элементы, так и элементы из состава запасных, подвержены старению в процессе их функционирования. Отказавшие объекты подлежат восстановлению и после ремонта пополняют состав запасных элементов. При этом необходимо учесть, что при выполнении ремонта происходит, как правило, частичное восстановление работоспособности. Часть ресурса объект вырабатывает в процессе предыдущей эксплуатации и во время ремонта полного восстановления не происходит. Задача определения состава запасных изделий с учетом неполного (частичного) восстановления резервных элементов и выработки определенной части их ресурса решается методом имитационного моделирования.

Ключевые слова: безопасность, надежность, запасные изделия и приборы, резервирование, геометрический процесс, ресурс, граф переходов, неполное восстановление.

Введение

При организации эксплуатации промышленных объектов, особенно объектов повышенного риска, таких как ядерные энергетические установки (ЯЭУ), предъявляются высокие требования к обеспечению безопасности и надежности их функционирования. Одним из способов повышения уровня надежности является планирование профилактического обслуживания, контроль исправности функционирования объектов, создание комплектов запасных изделий для оперативной замены вышедшего из строя оборудования.

В данной работе рассмотрим вопросы расчета надежности восстанавливаемого оборудования с учетом наличия запасных элементов и приборов (ЗИП) и определения необходимого количества запасных изделий, гарантирующих обеспечение заданных показателей надежности.

Вопросы расчета надежности оборудования с учетом ЗИП и определения его оптимального состава рассматривались в работах как российских, так и зарубежных специалистов. Обзор литературы по данному вопросу можно найти, например, в работах [1, 2]. Здесь следует отметить, что вопросы расчета и оптимизации ЗИП представлены в соответствующих справочниках, ссылки на

которые можно также найти в работах [1, 2] и отражены в ГОСТ (ссылки см., например, в [3]). Однако следует заметить, что данный вопрос не потерял своей актуальности к настоящему времени и по-прежнему находится в поле зрения специалистов. Так, в журнале «Надежность» идет полемика по вопросу корректировки методики оценки ЗИП, представленной в соответствующих ГОСТ [4] и РД [5].

Отметим здесь одну особенность, которая характерна для большого количества оборудования, находящегося в эксплуатации в различных отраслях промышленности. Эта особенность заключается в том, что оборудование имеет большую наработку. Зачастую она превышает ресурс или срок службы, установленный для него в нормативных документах. Во многих отраслях промышленности функционируют объекты, которые были введены в эксплуатацию еще в советское время. Перевооружение осуществляется медленно. Следовательно, можно предполагать, что в данном оборудовании идут процессы старения, обусловленные износом материалов и деградиационными процессами, происходящими внутри изделий. В связи с этим встает задача расчета надежности оборудования, имеющего ЗИП, с учетом старения.

1. Процесс функционирования восстанавливаемых ремонтируемых изделий

Рассмотрим методику расчёта характеристик надёжности восстанавливаемого и ремонтируемого элемента, имеющего n запасных частей. Стратегия функционирования элемента следующая. В начальный момент времени элемент находится в исправном состоянии. С интенсивностью $\lambda(t)$ элемент отказывает. В случае отказа элемент заменяется на резервный. Интенсивность замены элемента $\mu(t)$. Неисправный элемент отправляется в ремонт. После ремонта элемент считается восстановившим работоспособность и переходит в резерв. Интенсивность ремонта $\nu(t)$. Если исправных элементов в резерве не осталось, наступает отказ. Описанная стратегия функционирования может быть представлена с помощью графа, приведённого на рисунке 1.

Необходимо оценить характеристики надёжности системы (коэффициент готовности, вероятность отказа системы из-за отсутствия запасных элементов) для рассмотренной стратегии и определить требуемое количество запасных изделий, обеспечивающих заданный уровень работоспособности системы.

Состояние объекта на графе будем обозначать двумя символами (k, i) , где первый символ означает количество запасных элементов, $k=0, \dots, n$, второй символ i – состояние основного элемента, находящегося под нагрузкой, $i=1$ – элемент работоспособен, $i=0$ – элемент неработоспособен.

Рассмотрим функционирование объекта с запасными элементами более подробно. В начале работы элемент находится с вероятностью 1 в состоянии $(n, 1)$ (в наличии имеется n запасных элементов, объект работоспособен). В случайный момент времени с интенсивностью отказа $\lambda(t)$ элемент переходит в состояние $(n, 0)$ (n запасных элементов, объект в состоянии отказа, начинается замена элемента). С интенсивностью восстановления $\mu(t)$ объект переходит в состояние $(n-1, 1)$ ($n-1$ запасной элемент, объект работоспособен); из этого состояния возможны переходы в состояние $(n, 1)$ с интенсивностью восстановления $\nu(t)$ (ремонт окончен, в резерве опять n элементов) или в состояние $(n-1, 0)$ с интенсивностью $\lambda(t)$ (ремонт не закончен до наступления следующего отказа) и так далее. При попадании в состояние $(0, 0)$ объект прекращает работу и находится в состоянии отказа до момента пополнения ЗИП.

В данной задаче интерес представляет расчет вероятности нахождения в каждом из промежуточных состояний $P_{i,j}(t)$, где $i=1, n, j=0, 1$. Особую важность имеет задача определения веро-

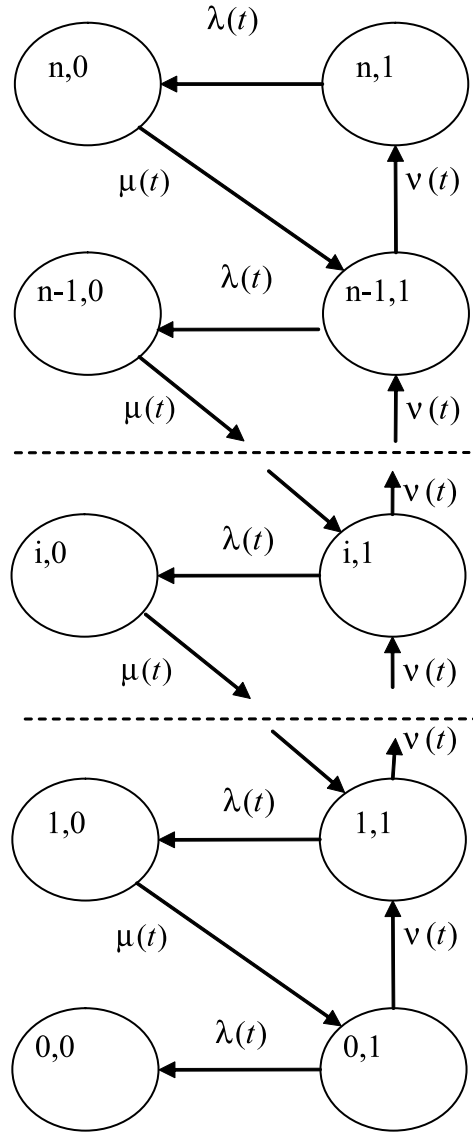


Рис. 1. Граф переходов восстанавливаемого ремонтируемого элемента

ятности попадания в состояние $P_{0,0}(t)$, характеризующееся тем, что отказал рабочий элемент и отсутствуют запасные элементы.

Рассмотренная стратегия функционирования может быть описана нестационарным марковским процессом и представлена в виде системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
 dP_{n,1}(t)/dt &= -\lambda(t)P_{n,1}(t) + v(t)P_{n-1,1}(t) \\
 dP_{n,0}(t)/dt &= -\mu(t)P_{n,0}(t) + \lambda(t)P_{n,1}(t) \\
 &\text{-----} \\
 dP_{i,1}(t)/dt &= \mu(t)P_{i+1,0}(t) + v(t)P_{i-1,1}(t) - (\lambda(t) + v(t))P_{i,1}(t) \\
 dP_{i,0}(t)/dt &= \lambda(t)P_{i,1}(t) - \mu(t)P_{i,0}(t) \\
 &\text{-----} \\
 dP_{0,1}(t)/dt &= \mu(t)P_{1,0}(t) - (\lambda(t) + v(t))P_{0,1}(t) \\
 dP_{0,0}(t)/dt &= \lambda(t)P_{0,1}(t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Однако аналитическое решение данной задачи представляет значительные трудности. В данной работе поставленную задачу будем решать методами имитационного моделирования.

Для описания зависимости интенсивности отказов элементов будем использовать модель геометрического процесса.

2. Геометрические процессы

Приведем модель, применяемую для описания изменения характеристик надежности объектов и учитывающую старение объектов в процессе эксплуатации или неполное восстановление работоспособности после отказа [6].

Рассмотрим следующую стратегию функционирования объекта. Объект исправно работает в течение случайного времени. После отказа он восстанавливается. Подразумевается, что восстановление производится не полностью. Неполнота восстановления характеризуется коэффициентом деградации γ . Будем считать, что восстановление объекта происходит за время пренебрежимо малое по сравнению с наработками между отказами (практически мгновенно). В результате неполного восстановления наработка ξ восстановленного объекта уменьшена (по вероятности) в γ раз по сравнению с предыдущим этапом эксплуатации:

$$\xi_2 = \gamma \xi_1, \dots, \xi_n = \gamma^{n-1} \xi_1, 0 < \gamma \leq 1.$$

Другими словами можно сказать, что наработка между отказами восстановленного объекта за рассматриваемый промежуток времени относительно нового объекта уменьшится по вероятности пропорционально некоторому коэффициенту. Математически зависимость между функциями распределения наработки между отказами восстановленного объекта, с учетом неполного восстановления, можно записать следующим образом

$$F_{\xi_2}(t) = F_{\xi_1}\left(\frac{t}{\gamma}\right), \dots, F_{\xi_n}(t) = F_{\xi_1}\left(\frac{t}{\gamma^{n-1}}\right),$$

где $F_{\xi_i}(t)$ – функция распределения наработки между отказами $(i-1)$ раз восстановленного объекта, γ – коэффициент неполноты восстановления, коэффициент деградации или износа. Соответствующие плотности распределения связаны соотношением

$$f_{\xi_n}(t) = \frac{1}{\gamma^{n-1}} f_{\xi_1}\left(\frac{t}{\gamma^{n-1}}\right).$$

Смысл коэффициента деградации состоит в следующем: γ – это усредненная величина, отражающая процесс накопления повреждений, дефектов, косвенно характеризующая процесс постепенной усталости материала, процесс физического старения, изнашиваемости, охрупчивания, коррозии и т.п. В ряде случаев под γ можно понимать коэффициент, отражающий увеличение нагрузки на объект из-за переменных режимов эксплуатации.

Определение. Пусть $\{\xi_i\}, i \geq 1$ последовательность независимых случайных переменных, представляющих собой наработки между отказами объекта с соответствующими функциями распределения $F_{\xi_i}(t)$, порождаемыми распределением $F(t)$, выглядит следующим образом

$$F_{\xi_i}(t) = F\left(\frac{t}{\gamma^{i-1}}\right), i=1,2,\dots,$$

где γ – положительная константа. Тогда последовательность $\{\xi_i\}, i \geq 1$ называется геометрическим процессом.

Приведем выражение, связывающее интенсивность отказа на начальном этапе функционирования и интенсивность после $(n-1)$ -го отказа. По определению интенсивность отказа равна отношению

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)}.$$

Запишем выражение для интенсивности отказа $(n-1)$ раз восстановленного объекта

$$\lambda_{\xi_n}(t) = \frac{f_{\xi_n}(t)}{1-F_{\xi_n}(t)} = \frac{\frac{1}{\gamma^{n-1}} f_{\xi_1}\left(\frac{t}{\gamma^{n-1}}\right)}{1-F_{\xi_1}\left(\frac{t}{\gamma^{n-1}}\right)} = \frac{1}{\gamma^{n-1}} \lambda_{\xi_1}\left(\frac{t}{\gamma^{n-1}}\right). \quad (2)$$

Таким образом, интенсивность отказа после каждого восстановления становится в $\frac{1}{\gamma}$ раз больше, чем интенсивность на предыдущем временном интервале, при этом также меняется шкала времени, на котором определен процесс.

3. Решение задачи

Процесс моделирования организован в соответствии с описанием, представленным в разделе 1. В начальный момент времени объект исправен. Далее в случайный момент времени происходит отказ объекта. Отказавший элемент снимается с эксплуатации, отправляется в ремонт, а на его место ставят элемент из состава запасных. После ремонта объект возвращается в состав запасных элементов, причем ставится в конец очереди на использование. То есть в следующий раз он будет установлен в систему только после того, как отработают до отказа все запасные элементы, находящиеся впереди него. Точно так же организован процесс установки в систему, отказа, ремонта и возвращения в состав ЗИП для всех других элементов. Отметим, что в первый цикл использования объекты имеют интенсивность отказа $\lambda_{\xi_1}(t)$, после первого отказа интенсивность изменяется в соответствии с выражением (2) и равна $\lambda_{\xi_2}(t)$, после i -того отказа она будет иметь значение $\lambda_{\xi_{i+1}}(t)$.

Представим результаты тестовых расчетов, проведенных по описанной методике. В качестве исходных данных для расчета использовались следующие величины:

- интенсивность отказа элемента $\lambda(t) = 0.001$ 1/час,
- интенсивность замены элемента $\mu(t) = 1$ 1/час,
- интенсивность ремонта $\nu(t) = 0,1$ 1/час.

Количество реализаций метода имитационного моделирования $N=10^5$. Время работы резервированной структуры будем считать равным 16000 часов.

На первом этапе проведем расчеты изменения среднего времени работы элемента в зависимости от количества восстановлений. При этом будем изменять коэффициент деградации. При проведении расчетов рассматривалась структура с одним основным элементом и тремя запасными. На рисунке 2 приведены графики поведения среднего времени работы элемента до отказа в зависимости от времени функционирования структуры для различных значений коэффициента деградации. WT = время работы, RC = количество восстановлений, α = коэффициент деградации.

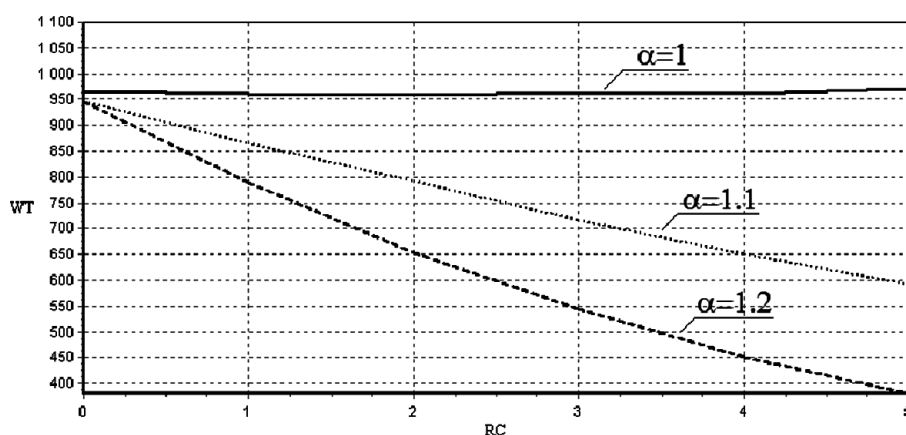


Рис. 2. Изменение среднего времени наработки между отказами в зависимости от номера восстановления

Из приведенных графиков видно, что для элементов без учета старения среднее время наработки до отказа не изменяется и равно 1000 час. Для всех остальных графиков имеет место ситуация, характерная тем, что чем меньше коэффициент деградации, тем быстрее убывает среднее время наработки до отказа. Для данного примера с введенными значениями параметров проведены расчеты коэффициента готовности. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значение параметра γ	1	1/1,05	1/1	1/1,15	1/1,2
Коэффициент готовности	0,999	0,9989	0,9988	0,9986	0,9979

Результаты расчетов показывают, что коэффициент готовности уменьшается с увеличением коэффициента деградации.

Предлагаемая математическая модель может быть использована для решения вопроса о расчете необходимого количества запасных элементов, которые гарантируют достижение заданных параметров надежности на рассматриваемом временном интервале функционирования структуры. Зададим в качестве показателя надежности коэффициент готовности. Пусть необходимо обеспе-

читать значение коэффициента готовности не менее 0,99 за время работы 16000 час. Результаты проведенных расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значение параметра γ	1	1/1,05	1/1,1	1/1,15	1/1,2
Количество запасных элементов обеспечивающих заданные требования	2	2	2	2	3
Коэффициент готовности	0,9964	0,9974	0,9943	0,9928	0,9979

Как видно из таблицы 2, заданным требованиям на коэффициент готовности удовлетворяет структура с одним основным и двумя запасными элементами для коэффициентов деградации $\gamma = 1 \div 1/1,15$, и тремя запасными элементами для $\gamma = 1/1,2$.

Заключение

Таким образом, можно констатировать, что в предлагаемой работе представлена модель расчета надежности резервированной структуры с учетом старения элементов. В ней сделано предположение о том, что в процессе функционирования системы как основной элемент, так и запасные расходуют часть своего ресурса. В результате происходит частичное восстановление работоспособности системы. Проведены исследования поведения параметров системы в зависимости от значения коэффициента деградации на тестовых примерах. Показано, что разработанная модель может быть использована для расчета необходимого количества запасных элементов, которые гарантируют достижение заданных параметров надежности на рассматриваемом временном интервале функционирования структуры.

Литература

1. Антонов А.В., Пляскин А.В., Чепурко В.А. Оптимизация числа запасных элементов оборудования, важного для безопасности АЭС. Методы менеджмента качества. №8. 2001. с. 27-30.
2. Антонов А.В., Пляскин А.В. Определение оптимального количества запасных элементов системы с учётом ограничений на стоимость //Надёжность.– 2003. – №4. – с. 9-16.
3. Жаднов В.В., Авдеев Д.К., Тихменев А.Н. Проблема расчета показателей достаточности и оптимизации запасов в системах ЗИП // Надёжность, – №3(38)-2011, с. 53-60.
4. ГОСТ Р В 27.3.03-2005. Надёжность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП.
5. РД В 319.01.19-98. Радиоэлектронные системы военного назначения. Методика оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП.
6. Антонов А.В., Поляков А.А., Чепурко В.А. Модель анализа надежности объектов с неполным восстановлением // Надёжность, -№3(38)-2011, с. 33-41.