

К ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРА ФОРМЫ DN -РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНЫХ ОТКАЗОВ

Анотація. При апіорній оцінці коефіцієнта варіації процесів деградації об'єктів з метою оцінки параметра форми дифузійних розподілів слід приймати менші осмислені оцінки коефіцієнта варіації, що призводить до результату оцінки прогнозованих показників надійності з запасом.

Ключові слова: надійність, квантиль, розподіл напрацювання.

Аннотация. При априорной оценке коэффициента вариации процессов деградации объектов с целью оценки параметра формы диффузионных распределений следует принимать меньшие осмысленные оценки коэффициента вариации, что приводит к результату оценки прогнозируемых показателей надежности с запасом.

Ключевые слова: надежность, квантиль, распределение наработки до отказа (ресурса).

Abstract. In a prior estimation of the variation coefficient of the objects degradation process in order to access the shape parameter of the diffusion distributions less meaningful estimations of the variation coefficient, which leads to the result of evaluation of the reliability of the projected reserve indicators should be taken.

Keywords: reliability, quantile, lifetime distribution.

1. Введение

Существующие (гостированные) методики оценки показателей надежности по статистическим данным об отказах объектов требуют значительной статистики отказов, которой, как правило, не бывает. Исследователям необходимо производить оценки и прогнозировать показатели надежности объектов в условиях ограниченной статистики отказов. В этих условиях ориентация на статистические методы оценки показателей надежности объектов, к которым предъявляются высокие требования по надежности и безопасности, неприемлема.

В последние годы все большее распространение получают вероятностно-физические модели надежности [1, 2] (диффузионные распределения), вытекающие из анализа физических процессов деградации, приводящих к отказу. К настоящему времени проведены достаточно широкие исследования по сравнительному анализу существующих моделей надежности [1–3]. На основании выравнивания значительного количества данных отказов самых различных объектов показано, что диффузионные распределения (DM и DN) являются более гибкими функциями, лучше выравнивающими опытные данные, по сравнению с известными двухпараметрическими моделями (Вейбулла, логарифмически нормальным, гамма-распределением, альфа-распределением и др.). Диффузионные распределения как вероятностно-физические модели надежности имеют большое преимущество перед строго вероятностными моделями в том, что их параметры могут быть оценены как на основе статистики отказов (в этом случае они рассматриваются как строго вероятностные модели), так и на основании анализа статистических характеристик физического процесса, приводящего к отказу, а также при совместном использовании статистической информации обоих типов. Как известно, решение основных задач надежности (как при априорных, так и апостериорных методах) в конечном итоге сводится к оценке параметров распределения искомой величины (наработки до отказа, на отказ, ресурса и т.д.). Следует отметить, что важнейшим фактором, способствующим решению разнообразных задач надежности при использовании диффузионных распределений, является то, что параметр формы этих распределений представляет собой обобщенную характеристику изучаемых взаимнообратимых процессов (процесса разрушения и распределения наработки) – коэффи-

коэффициент вариации. А коэффициент вариации как обобщенная характеристика с достаточной для инженерной практики точностью может быть оценен априори на основании многочисленных (многодесятилетних) исследований как процессов разрушений (прочности, усталости, изнашивания и др.), так и статистических данных об отказах при испытаниях и эксплуатации изделий-аналогов.

2. Анализ существующих методов оценки надежности технических средств в условиях малой статистики отказов

Анализируя существующие методы оценивания надежности технических средств в условиях малой статистики отказов (малой выборки) [4], необходимо отметить следующее.

1) Использование в качестве дополнительной априорной информации расчетных оценок на этапе проектирования (линейные методы [4]) может отрицательно сказаться на корректировке экспериментальных данных по малой выборке, поскольку методические погрешности расчета надежности систем, например, лямбда-методом, имеют несколько порядков. Установлено, что расчет средней наработки до отказа систем может отличаться в \sqrt{n} раз, где n – число элементов (составляющих частей), соединенных последовательно в смысле надежности.

2) Практически все существующие методы (линейные и нелинейные методы), использующие предыдущие испытания (наблюдения), предполагают определение дисперсии искомого показателя надежности как при предыдущих испытаниях, так и при основных испытаниях малой выборки. Оценка дисперсии показателей надежности представляет собою еще большую проблему, поскольку для ее экспериментальной оценки требуется объем испытаний в 1,5–2 раза больший, чем при определении средних показателей надежности.

3) Известные байесовские методы оценивания [4] показателей надежности получены только при использовании в качестве теоретической - модели отказов нормального распределения. Известно, что нормальное распределение рекомендуется использовать, когда коэффициент вариации случайной наработки не более 0,25. Известно также и то, что коэффициент вариации наработок до отказа (на отказ) практически всех электротехнических систем имеет значения в диапазоне 0,5–1,2.

3. Оценка параметра формы DN -распределения

Априорная оценка параметра формы DN -распределения (коэффициента вариации процесса деградации объекта) требует знания физических процессов, приводящих к отказу объекта, условий нагружения, поскольку значение коэффициента вариации зависит от условий нагружения. В ряде нормативных и методических документов [2, 3] приведены таблицы значений коэффициентов вариации для различных технических средств.

Для объектов, не включенных в приведенные таблицы, априори определяют коэффициент вариации наработки на основании анализа процессов деградации, приводящих к отказам, используя установленные соотношения о долевых вкладах процессов деградации и значения коэффициентов вариации основных типовых процессов деградации [2], приведенные в табл. 1.

Учитывая объем и число рассмотренных данных (многих десятков выборок), на основании которых определены вышеуказанные диапазоны коэффициентов вариации, можно утверждать, что доверительная вероятность указанных интервалов существенно выше 0,9. Следует также отметить, что коэффициент вариации – это обобщенная характеристика процессов деградации объектов и в меньшей мере зависит от конструктивных тонкостей (размеров, типа конструкции и др.).

Таблица 1. Значения коэффициентов вариации основных процессов деградации (разрушения)

Вид разрушения (процесс деградации)	Коэффициент вариации процесса разрушения
Статическое разрушение	0,05 – 0,15
Усталость:	0,15 – 0,40
Малоцикловая	0,40 – 1,00
Многоцикловая	0,40 – 1,20
Контактная	
Износ:	0,20 – 0,50
Механо-химический	0,40 – 0,70
Абразивный	
Старение	0,40 – 1,00
Электрические процессы (электролиз, миграция зарядов, электро- диффузия)	0,70 – 1,50

Принятие численного значения коэффициента вариации из указанных диапазонов вышеприведенной таблицы в каждом конкретном случае диктуется соображениями общего характера: увеличение отношения нагрузки к пределу выносливости (прочности) относительно среднего статистического приводит к уменьшению коэффициента вариации и наоборот, уменьшение отношения нагрузки к пределу выносливости приводит к увеличению коэффициента вариации.

Значение коэффициента вариации наработки на отказ (между отказами) объекта остается тем же самым, если не меняется структура объекта (системы), поскольку коэффициент вариации наработки определяется элементами, обуславливающими деградацию и отказ этих элементов.

Оценка коэффициента вариации наработки до отказа (на отказ) с учетом установленных процессов разрушения

Если установлены превалирующие процессы разрушения и их доля (проценты) в формировании отказов, то ожидаемое среднее значение коэффициента вариации определяются по формуле [2]:

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^k p_i^2}},$$

где v_i, p_i – соответственно среднее значение коэффициента вариации и долевого вклад i -го процесса разрушения (объемная усталость, контактная усталость, механический износ и др., $i = 1, 2, \dots, k$). При этом $\sum_{i=1}^k p_i = 1$.

Пример. На основании предшествующих испытаний магнитофонов (модели 1970–80 гг.) [2] определено, что основными процессами разрушения, приводящими к отказам, являются износ (магнитные головки), контактная усталость (подшипники скольжения), объемная усталость (отказы элементов электродвигателей), а также электрические явления (отказы электронных элементов и радиоэлементов). При этом установлено следующее долевое распределение отказов:

- механический износ – $p_1 = 0,35$ (35%), $v_1 = 0,4$;
- контактная усталость – $p_3 = 0,25$ (25%), $v_3 = 0,7$;

- объемная усталость – $p_2 = 0,20$ (20%), $v_2 = 0,6$;
- электрические явления – $p_4 = 0,20$ (20%), $v_4 = 1,0$.

Исходя из вышеприведенных рекомендаций и учитывая относительный вклад процессов деградации, принимают следующую оценку коэффициента вариации указанных магнитофонов:

$$v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 v_i^2 p_i^2}{\sum_{i=1}^4 p_i^2}} = 0,63.$$

Оценка параметра масштаба DN -распределения

Если получена оценка параметра формы v DN -распределения на основании априорных данных (таблиц коэффициентов вариации процессов разрушения или коэффициентов вариации наработки аналогов), параметр масштаба μ DN -распределения вычисляют по статистике единичных отказов (наработок до отказа t_j) методом квантилей, если испытания (наблюдения) ведутся с начала испытаний (эксплуатации):

$$\tilde{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mu_j = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_j \left[x\left(\frac{j}{N}; v\right) \right]^{-1},$$

где t_j -ая наработка до отказа ($j = 1, 2, \dots, m$), μ_j – оценка параметра μ по значению t_j , $x\left(\frac{j}{N}, v\right) = \frac{t_j}{\mu_j} = x_j$ – относительная наработка определяется из таблиц DN -распределения

по значениям $F_j = \frac{j}{N}$ и v или решая уравнение

$$F_j = \frac{j}{N} = \Phi\left(\frac{x_j - 1}{v\sqrt{x_j}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{x_j + 1}{v\sqrt{x_j}}\right).$$

$\Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$ – функция нормированного нормального распределения.

Если процедура испытаний (наблюдений) при эксплуатации осуществляется по планам [NMT] или [NM r], то вычисляют суммарную наработку всех объектов по формуле

$S = \sum_{i=1}^N T_i$, где T_i – общая наработка i -го образца за время испытаний (наблюдений). Вы-

числяют оценку параметра масштаба DN -распределения наработки на отказ по формуле

$\tilde{\mu} = \frac{S}{m}$ (здесь m – число зафиксированных отказов).

4. Анализ влияния неточности определения параметра формы на оценки прогнозируемых показателей надежности

На основе использования известных экспериментальных данных исследовалась зависимость оценок параметра масштаба (среднего значения наработки до отказа) в зависимости от принятого (априори) значения параметра формы.

В качестве первого примера была взята выборка №5 [3] данных отказов элементов индикации (ламп накаливания СМН-9): объем выборки $N = 504$; среднее выборочное значение $S = 212626$ циклов; коэффициент вариации наработки $v = 0,73$. В качестве второго примера использовалась выборка №9 [3] данных отказов радиоаппаратуры: объем выборки

$N = 96$; среднее выборочное значение $S = 1833$ часа; коэффициент вариации наработки $\nu = 1,08$. Результаты оценки параметров и прогнозирования средней наработки до отказа приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения параметров формы ν , продолжительности испытаний t_u , вероятности отказа F и прогнозируемых значений средней наработки T_0

Номер вы-борки	ν	F	t_u	T_0	$\Delta\nu$	ΔT_0
№5	$\nu_0 = 0,73$	0,2	95680	212626	–	–
	$\nu_H = 0,5$	0,2	95680	159470	–30%	–25%
	$\nu_B = 1,0$	0,2	95680	287333	+25%	+26%
№9	$\nu_0 = 1,08$	0,2	610	1833	–	–
	$\nu_H = 0,75$	0,2	610	1370	–25%	–25%
	$\nu_B = 1,25$	0,2	610	2392	+20%	+23%

Как вытекает из результатов оценки параметра формы (коэффициента вариации) и последующих оценок показателей надежности:

1) Занижение (ошибочное) коэффициента вариации процесса деградации или коэффициента вариации наработки аналога, например, до 25–30 %, приводит к занижению параметра масштаба (средней наработки до отказа) также порядка на 25%.

2) Завышение (ошибочное) оценки параметра формы порядка на 20–25% приводит к завышению прогнозируемых оценок средней наработки (параметра масштаба) также порядка на 25%.

Следует отметить, что это достаточно высокая точность оценки параметра формы и показателей надежности на основе использования априорных оценок коэффициентов вариации процессов деградации или аналогов изделий. Заметим, что для получения с такой же достоверностью оценки коэффициента вариации необходимо было бы по плану [NUN] испытать следующее количество образцов (для $q = 0,9$, $\delta = 0,25$, $\nu = 1$) [2]:

$$N = \frac{(1 + 2\nu^2)U_q^2}{4\delta^2} \left(1 + \sqrt{1 + \delta^2}\right) = \frac{3 \cdot 1,282^2}{4 \cdot 0,0625} \left(1 + \sqrt{1 + 0,0625}\right) \cong 40.$$

5. Заключение

При априорной оценке коэффициента вариации процессов деградации объектов с целью оценки параметра формы диффузионных распределений следует принимать меньшие осмысленные оценки коэффициента вариации. Это приводит к результату оценки прогнозируемых показателей надежности с запасом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погребинский С.Б. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ / С.Б. Погребинский, В.П. Стрельников. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
2. Стрельников В.П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем / В.П. Стрельников, А.В. Федухин. – К.: Логос, 2002. – 486 с.
3. ГОСТ 27.005-97. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. – Введ. 01.01.99. – К.: изд. Госстандарта Украины, 1999. – 45 с.
4. ГОСТ 27.201-81. Оценка показателей надежности при малом числе наблюдений с использованием дополнительной информации. – Введ. 01.01.82. – М.: изд. стандартов, 1982. – 32 с.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2012