УДК 621.391

СТАТИСТИКО-ФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Гродзенский С.Я., д.т.н., профессор, E-mail: grodzensky44@mail.ru
Гродзенский Я.С., к.т.н., доцент, E-mail: 3606754@mail.ru
Володина М.В., аспирант, E-mail: volodina.mariya@mail.ru
Лаврентьева О.А., магистрант, E-mail: olya@searu.com,
МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. По значению параметров статистического распределения моментов отказов высказывается предположение о причинах неисправности технического изделия. Приводятся примеры статистико-физического анализа надежности на основе распределения Вейбулла и смеси распределений экспоненциального и Вейбулла.
Ключевые слова: надежность; интенсивность отказов; распределение Вейбулла; смесь распределений.

STATISTICAL AND PHYSICAL ANALYSIS OF PRODUCTS RELIABILITY

Grodzensky Sergey Ya., D. Eng. Sc., Professor, E-mail: grodzensky44@mail.ru
Grodzensky Yakov S., Cand. Eng. Sc., Associated Professor, E-mail: 3606754@mail.ru
Volodina Maria V., postgraduate, E-mail: volodina.mariya @mail.ru
Lavrenteva Olga A., undergraduate, E-mail: olya@searu.com,
MSTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. The assumption about the failure causes for technical products are made using the parameters points of the statistical failure distribution. The examples of statistical and physical reliability analysis based on Weibull distribution and mixture of exponential and Weibull distributions are given.
Keywords: reliability; failure rate; Weibull distribution; mixture of distributions.

Основным показателем надежности многих видов промышленной продукции (в частности, изделий радиоэлектроники) является интенсивность отказов, или условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Интенсивность отказов – отношение их частоты к вероятности безотказной работы – выражается формулой

$$\lambda(t) = f(t) / P(t) = f(t) / [1 - F(t)]$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность отказов; $f(t)$ – частота отказов (плотность распределения случайной величины времени t, физически определяет «скорость» падения надежности); $P(t)$ – вероятность безотказной работы в течение времени t.

Для описания надежности изделия в качестве простой функции служила двухпараметрическая функция распределения Вейбулла, предложенная в работе [1]

$$F(t) = 1 - \exp[-(t/T)^S],$$

где T, s, –параметры масштаба и формы.

На рис. 1 приведена характерная зависимость интенсивности отказов от времени. Очевидно, что вейбулловское распределение достаточно универсально, чтобы описывать интенсивность отказов отдельно на любом из характерных периодов. Для изделий, имеющих скрытые дефекты, интенсивность отказов имеет наибольшее значение в начальный период I («детские болезни»), а потом быстро падает. Функция надежности для такого изделия описывается законом Вейбулла с параметром s <1. В период II нормальной эксплуатации s = 1 получается экспоненциальное распределение, при котором интенсивность отказов постоянна. В период III старения функция надежности описывается законом Вейбулла (s >1), что соответствует возрастанию интенсивности отказов.

Это приводит к мысли о возможности связать значение параметра формы, оцененное по статистическим данным, с видом отказа: при s < 1 отказ характеризует период приработки; при s = 1 – нормальную эксплуатацию, а при s > 1 – износ. Высказав предположение о характера отказов, можно дать обоснованные рекомендации по их предотвращению и в конечном счете повысить качество выпускаемой продукции. Примеры такого статистико-физического анализа для нескольких типов электронных СВЧ-приборов приводятся в учебном пособии [2].

На практике часто имеют место цензурированные выборки, элементами которых являются полные наработки (наработки от начала эксплуатации до отказа) и наработки до цензурирования (наработки от начала эксплуатации до момента времени, когда неотказавшее изделие снимается с эксплуатации).

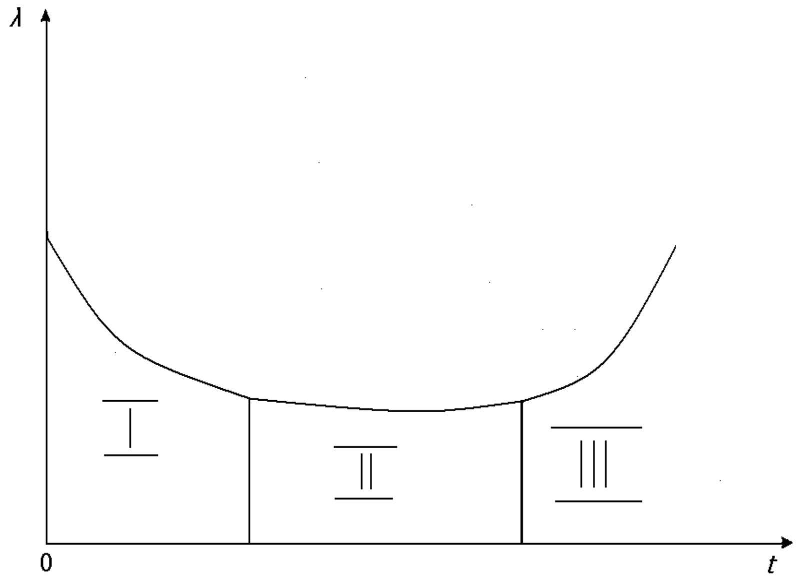

Рис. 1. Характерная временная зависимость интенсивности отказов: I, II, III – периоды соответственно начальной эксплуатации, нормальной эксплуатации, старения изделия

Ниже приведен статистико-физический анализ надежности на основе распределения Вейбулла для систем кондиционирования воздуха самолетов ИЛ-62. Исходные статистические данные взяты из пособия [3], в котором приведены результаты эксплуатации в виде цензурированных данных. Расчеты средней наработки и параметров распределения Вейбулла рассчитывались в двух вариантах: по данным об отказах и с учетом цензурирования. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Исходя из статистико-физического подхода, можно сделать вывод, что функциональная система самолета переживает период приработки и для устранения отказов необходимо принять меры по совершенствованию производственного процесса, а заслонка и воздухо-воздушный радиатор отказывают вследствие естественного старения. Поэтому для повышения их ресурса необходимо вносить конструктивно-технологические изменения.

Таблица 1

Статистико-физический анализ надежности систем кондиционирования воздуха самолета ИЛ-62

Наименование изделия/системы	Параметры распределения					
	По данным об отказах			По цензурированным выборкам		
	$T_{ср}$., ч.	T	s	$T_{ср}$., ч.	T	s
Функциональная система самолета	4856	5582	0,9	58766	53307	0,6
Заслонка 2574Т	1535	580	2,9	8025	9010	1,8
Воздухо-воздушный радиатор 2217 АТ	1411	312	5,2	2830	3165	3,1

Вместе с тем, распределением Вейбулла нельзя описать модель надежности, при которой интенсивность отказов изделий в начале эксплуатации убывает, а затем возрастает. В [4] для описания ресурса хрупких материалов использован класс функций, обобщающих традиционный закон Вейбулла:

$$F(t) = 1 - \exp[-\alpha G(t)],$$

где α – параметр, определяющий вид функции; $G(t)$ – неотрицательная, монотонно возрастающая функция, зависящая от времени t.

Если $G(t)$ является степенной функцией, выражение сведется к традиционному вейбулловскому распределению. В работе [7] предложена трехпараметрическая модель обобщенного распределения Вейбулла, согласно которой вероятность безотказной работы и интенсивность отказов имеют соответственно вид:

$$P(t, \alpha, \lambda, \gamma) = exp[1-(1+(\lambda t)^{\alpha})^{\frac{1}{\gamma}}],\ (\alpha, \lambda, \gamma > 0),\ t > 0$$

$$\lambda\left(t, \alpha,\ \lambda,\ \gamma\right) = \frac{\alpha\lambda^{\alpha}}{\gamma} t^{\alpha-1}\left(1+\left(\lambda t\right)^{\alpha}\right)^{\frac{1}{\gamma}-1}$$

В зависимости от значений параметров функция интенсивности отказов может изменяться различным образом. Для нашей задачи интерес представляет случай $0 < \gamma < \alpha < 1$, интенсивность отказов соответствует зависимости, представленной на рис. 1. В учебном пособии [6, с. 159] указывается на предложенную в 1988 г. Б. Эфроном трехпараметрическую модель экспоненциального Вейбулла, которая имеет вид:

$$P\left(t, \alpha,\ \lambda,\ \gamma\right) = 1-\left\{1-\exp\left(-\left(\lambda t\right)^{\alpha}\right)\right\}^{\frac{1}{\gamma}},\ \left(\alpha, \lambda, \gamma\ >\ 0\right),\ t >\ 0$$

Варьируя значения параметров, удается подобрать функцию интенсивности отказов, соответствующую рис. 1. Детальное изучение модифицированных распределений Вейбулла с точки зрения применимости их для статистико-физического исследования является предметом самостоятельного исследования.

Похоже, однако, до настоящего времени не найдено единого выражения, позволяющего одной формулой описать зависимость интенсивности отказов от времени, аналогичную представленной на рис. 1. Поэтому целесообразно использовать для этой цели смеси распределений. В работе [5] обоснована модель расходования ресурса, которая может быть описана смесью распределений экспоненциального и Вейбулла с вероятностью безотказной работы, задаваемой выражением

$$P\left(t\right) = Cexp\left(-t/T_1\right)+\left(1\ - C\right)exp\left[-\ \left(t/T_2\right)^{s}\ \right],$$

где C – удельный вес экспоненциальной компоненты (коэффициент нормировки); T_1 – масштабный параметр экспоненциальной составляющей, T_2, s – параметры масштаба и формы вейбулловской компоненты; при этом $T_2 > T_1$, $0 \le C \le 1,\ s \ge 1$.

Начальное значение интенсивности отказов (при $t = 0$) равно $\lambda\left(0\right) = C/T_1$. Легко устанавливаются частные случаи приведенного выражения: при $C = 1$ она совпадает с вероятностью при экспоненциальном распределении, при $C = 0$ – с распределением Вейбулла. При $s = 1$ – частный случай вероятности при смеси двух экспоненциальных распределений (физически это означает, что старение отсутствует). Очевидно, что периоды приработки и нормальной эксплуатации описываются смесью двух экспонент.

При этом параметрам распределения можно придать физический смысл: T_1 характеризует скорость приработки (чем ниже значение T_1, тем быстрее устанавливается нормальная эксплуатация); T_2 определяет значение интенсивности отказов в период нормальной эксплуатации; s – скорость процесса износа (чем больше s, тем сильнее выражены процессы старения и износа); C определяет начальное значение интенсивности отказов ($t = 0$) и долю внезапных отказов.

В табл. 2 приведены результаты расчета средней наработки до отказа и параметров смеси распределений для нескольких типов приборов СВЧ.

Таблица 2

Параметры смеси распределений экспоненциального и распределения Вейбулла для изделий электронной техники различных классов

Наименование изделия	$T_{ср}$,ч.	Параметры смеси распределений			
		C	T_1	T_2	s
Лампа бегущей волны № 1	1503	0,03	511	10931	1,64
Лампа бегущей волны № 2	2596	0,05	300	3008	1,50
Магнетрон № 1	5642	0,28	1907	7670	1,29
Магнетрон № 2	9860	0,20	2019	12557	1,20
Усилительный клистрон № 1	789	0,75	716	1007	1,00
Усилительный клистрон № 2	7116	0,08	776	8438	1,43
Усилительный клистрон № 3	1009	0,14	275	1250	1,49

Малое значение C для ламп бегущей волны № 1 и № 2 объясняется результатами целенаправленной работы по сопряжению приборов с аппаратурой, а также тем, что эти приборы эксплуатируются на единственном объекте эксплуатации. Надежность усилительного клистрона № 1 описывается смесью двух экспонент, что говорит об отсутствии износовых отказов.

Средняя наработка до отказа, вызванного естественным старением, рассчитывается с использованием T_2 и s и примерно составляет 20000 ч. Средняя наработка в случае распределения Вейбулла вычисляется по формуле

$$T_{ср} = T\,\Gamma(1+1/s),$$

где Г- знак гамма-функции.

Результат статистико-физического анализа согласуется с данными технического анализа причин и характера отказов, что свидетельствует о работоспособности метода.

Известно, что отказы в эксплуатации приборов часто фиксируются по внешнему проявлению, а природа выходов из строя может быть разной. В этом случае результаты статистико-физического анализа позволят наметить обоснованные меры по устранению отказов.

Срисок литературы:

1. Weibull W. A statistical distribution function if wide applicability // J.Appl.Mechanics. 1951. V.18, P. 293 – 297.

2. Марин В.П., Гродзенский С.Я. Надежность и испытания изделий радиоэлектроники: Учебное пособие. М.: МИРЭА, 2009. – 136 с.

3. Ицхоки А.А., Файнбург И.А. Пособие по выполнению контрольной работы по дисциплине «Надежность авиационной техники», М.: МГТУГА, 2006. – 96 с.

4. Gurvich M.R., Dibenedetto A.T., Rande S.V. A new statistical distribution for characterizing the random strength of britte materials // Materials Sci. 1997. V. 32. P. 2559 – 2564.

5. Гродзенский С.Я. Об универсальном законе распределения отказов изделий электронной техники // Научный вестник МИРЭА, 2010, № 1, с. 34-38.

6. Антонов А.В., Никулин М.С. Статистические модели в теории надежности: Учебное пособие. М.: Абрис, 2012. – 389 с.

7. Bagdonavicius V., Nikulin M. Accelerated life models: modeling and statistical analysis. – Boca Raton: Chapman and Hall. – 2002. – 348 p.