

Получено выражение, позволяющее вычислять долевые участия составных процессов деградации для любого форсированного по температуре режима испытаний, которое положено в основу процедуры преобразования диаграммы Парето. Предложена уточненная оценка коэффициента вариации обобщенного процесса деградации.

© А.В. Федухин, 2003

УДК 621.382-192

А.В. ФЕДУХИН

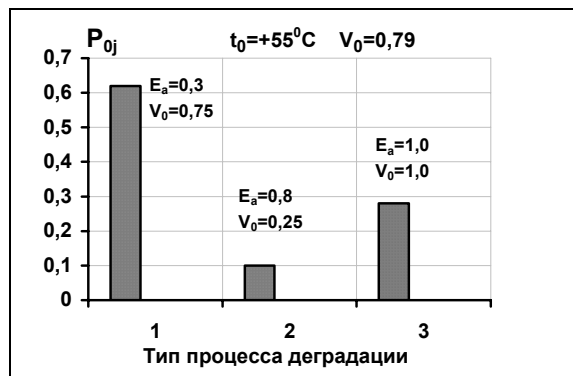
О ВЛИЯНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ХАРАКТЕР ДЕГРАДАЦИОННОЙ КАРТИНЫ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Введение. В работе [1] было предложено изображать деградационную картину изделия в виде диаграммы Парето. Преимущества такой визуализации деградационной картины проявляются для изделий, в которых протекает одновременно несколько составных процессов деградации с разными энергиями активации. Использование диаграммы Парето позволяет решать ряд важных задач в теории ускоренной оценки надежности изделий электронной техники (ИЭТ).

Постановка задачи. Наиболее интересными, с научной точки зрения, являются расчет и изображение на диаграмме перераспределения долевых частей составных процессов деградации при изменении термической нагрузки. Это явление называется преобразованием диаграммы Парето, а разработка процедуры такого преобразования является предметом данной статьи.

Диаграмма Парето. Большинство ИЭТ, имеют, как правило, сложный процесс деградации, состоящий из нескольких деградационных процессов с разными значениями энергий активации. Изобразим деградационную картину изделия в виде диаграммы Парето.

На рис. 1 в качестве примера изображена диаграмма Парето для изделия, в котором при $t_0 = 55^\circ\text{C}$ протекают три деградационных процесса с соответствующими характеристиками: $\{E_{a1} = 0,3; V_{01} = 0,75; p_{01} = 0,62\}$,
 $\{E_{a2} = 0,8; V_{02} = 0,25; p_{02} = 0,1\}$,
 $\{E_{a3} = 1,0; V_{03} = 1,0; p_{03} = 0,28\}$.



Априорную информацию, содержащуюся в диаграмме Парето, можно использовать не только для удобной визуализации процесса деградации, но и для оценки коэффициента вариации обобщенного процесса деградации в режиме применения.

РИС. 1. Исходная диаграмма Парето для $t_0=55\text{ }^\circ\text{C}$

$$V_0 = \left(\frac{\sum_{j=1}^m V_{0j}^2 p_{0j}^2}{\sum_{j=1}^m p_{0j}^2} \right)^{1/2} = 0,79. \quad (1)$$

Преобразование диаграммы Парето. Обозначим p_{1j} долю отказов по j -у процессу деградации в режиме испытаний, отличном от режима применения с T_0 . В связи с тем, что рассматриваемые процессы деградации имеют разные энергии активации, при переходе к режиму испытаний с повышенной температурой происходит перераспределение долей отказов по каждому процессу или так называемое преобразование диаграммы Парето. Решение задачи преобразования диаграммы Парето заключается в нахождении зависимости между p_{0j} и p_{1j} . Для этого воспользуемся отношением между скоростями деградации и долевыми участиями составных процессов деградации [1] и выпишем следующие выражения для режима применения:

$$\frac{a_{01}}{a_{02}} = \frac{p_{01}}{p_{02}}; \quad \frac{a_{01}}{a_{03}} = \frac{p_{01}}{p_{03}}; \quad \frac{a_{02}}{a_{03}} = \frac{p_{02}}{p_{03}}. \quad (2)$$

Выпишем аналогичные соотношения для режима испытаний:

$$\frac{a_{11}}{a_{12}} = \frac{p_{11}}{p_{12}}; \quad \frac{a_{11}}{a_{13}} = \frac{p_{11}}{p_{13}}; \quad \frac{a_{12}}{a_{13}} = \frac{p_{12}}{p_{13}}. \quad (3)$$

Связь между скоростями составных процессов деградации в режимах применения и испытаний определяется выражениями

$$a_{11} = a_{01}K_{\phi 11}; \quad a_{12} = a_{02}K_{\phi 12}; \quad a_{13} = a_{03}K_{\phi 13}, \quad (4)$$

где $K_{\phi 1j}$ – коэффициент форсирования скорости деградации j -го процесса при переходе от t_0 к t_1 .

Для процессов, не имеющих термической составляющей, а также для случайных процессов, не связанных с физическими процессами (результатом протекания таких процессов являются отказы, классифицируемые как «прочие»), коэффициент $K_{\phi 1j}$ принимается равным единице. Для остальных термоактивируемых процессов $K_{\phi 1j}$ вычисляется по формуле

$$K_{\phi 1j} = \exp\left[\frac{E_{a j}}{k}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right]. \quad (5)$$

Подставив (4) в (3), получаем

$$\frac{a_{01}K_{\phi 11}}{a_{02}K_{\phi 12}} = \frac{p_{11}}{p_{12}}; \quad \frac{a_{01}K_{\phi 11}}{a_{03}K_{\phi 13}} = \frac{p_{11}}{p_{13}}; \quad \frac{a_{02}K_{\phi 12}}{a_{03}K_{\phi 13}} = \frac{p_{12}}{p_{13}}. \quad (6)$$

Заменим в (6) отношения скоростей составных процессов деградации на отношения их долевых участков (2):

$$\frac{p_{01}K_{\phi 11}}{p_{02}K_{\phi 12}} = \frac{p_{11}}{p_{12}}; \quad \frac{p_{01}K_{\phi 11}}{p_{03}K_{\phi 13}} = \frac{p_{11}}{p_{13}}; \quad \frac{p_{02}K_{\phi 12}}{p_{03}K_{\phi 13}} = \frac{p_{12}}{p_{13}}. \quad (7)$$

Введем следующие обозначения:

$$\frac{p_{01}K_{\phi 11}}{p_{02}K_{\phi 12}} = b_{12}; \quad \frac{a_{01}K_{\phi 11}}{a_{03}K_{\phi 13}} = b_{13}; \quad \frac{a_{02}K_{\phi 12}}{a_{03}K_{\phi 13}} = b_{23}. \quad (8)$$

Используя (7), запишем выражения для долевых участков первого и второго составных процессов деградации в режиме испытаний:

$$p_{11} = p_{13}b_{13}; \quad p_{12} = p_{13}b_{23}. \quad (9)$$

Выражение для p_{13} получим из уравнения

$$p_{11} + p_{12} + p_{13} = 1 \quad (10)$$

после подстановки в него (9)

$$p_{13}b_{13} + p_{13}b_{23} + p_{13} = 1, \quad (11)$$

откуда

$$p_{13} = \frac{1}{b_{13} + b_{23} + 1}. \quad (12)$$

Проведем обратную подстановку (8) в (9) и (12):

$$p_{11} = p_{13}b_{13} = \frac{p_{01}K_{\phi 11}}{\left(\frac{p_{01}K_{\phi 11}}{p_{03}K_{\phi 13}} + \frac{p_{01}K_{\phi 11}}{p_{03}K_{\phi 13}} + 1\right)p_{03}K_{\phi 13}} =$$

$$= \frac{p_{01}K_{\phi 11}}{p_{01}K_{\phi 11} + p_{02}K_{\phi 12} + p_{03}K_{\phi 13}} = \frac{p_{01}K_{\phi 11}}{\sum_{j=1}^m p_{0j}K_{\phi 1j}}; \quad (13)$$

$$p_{12} = p_{13}b_{23} = \frac{p_{02}K_{\phi 12}}{\sum_{j=1}^m p_{0j}K_{\phi 1j}}; \quad (14)$$

$$p_{13} = \frac{1}{b_{13} + b_{23} + 1} = \frac{p_{03}K_{\phi 13}}{\sum_{j=1}^m p_{0j}K_{\phi 1j}}. \quad (15)$$

В общем виде выражение для долевого участия составного процесса деградации в режиме испытаний можно записать следующим образом:

$$p_{1j} = \frac{p_{0j}K_{\phi 1j}}{\sum_{j=1}^m p_{0j}K_{\phi 1j}}. \quad (16)$$

На рис. 2 изображена преобразованная диаграмма Парето. Преобразование производилось на основании (16) от температуры применения $t_0 = +55^\circ\text{C}$ к температуре испытаний $t_1 = +125^\circ\text{C}$.

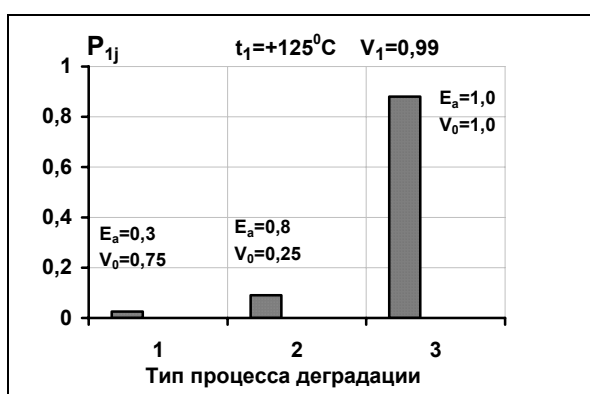


РИС. 2. Преобразованная диаграмма Парето к температуре испытаний $t_1 = +125^\circ\text{C}$

Нетрудно видеть, что при повышении температуры до $+125^{\circ}\text{C}$ происходит смена доминирования между первым и третьим процессами деградации. В режиме применения доминировал процесс с энергией активации $E_a = 0,3$ эВ, дающий 62% отказов. В режиме испытаний влияние первого процесса снизилось до 2,5%, в то время как влияние третьего процесса увеличилось до 88%.

Преобразование диаграммы Парето позволяет оценить величину коэффициента вариации обобщенного процесса деградации для любого форсированного режима испытаний. Для вышерассмотренного примера перераспределение долей отказов между составными процессами деградации приводит к изменению коэффициента вариации обобщенного процесса деградации в режиме испытаний. Принимая гипотезу о равенстве коэффициентов вариации составных процессов деградации в режиме применения и режиме испытаний

$$V_{1j} = V_{0j}, \quad (17)$$

имеем

$$V_1 = \left(\frac{\sum_{j=1}^m V_{1j}^2 p_{1j}^2}{\sum_{j=1}^m p_{1j}^2} \right)^{1/2} = \left(\frac{\sum_{j=1}^m V_{0j}^2 p_{1j}^2}{\sum_{j=1}^m p_{1j}^2} \right)^{1/2} = 0,99. \quad (18)$$

Расчеты показали, что коэффициент вариации в режиме испытаний (форсированном по температуре) оказался выше, чем в режиме применения. Это противоречит действительности, так как исследованиями установлено [2,3], что с ростом нагрузки коэффициенты вариации как наработки до отказа изделия, так и обобщенного процесса деградации, уменьшаются. Данное явление вызвано тем, что коэффициенты вариации элементарных составных процессов деградации, протекающих в изделии и приводящих его в состояние отказа, также уменьшаются. Поэтому гипотезу (17) можно использовать для небольшого диапазона изменения термических нагрузок от t_0 к t_1 .

Для получения более точной оценки V_1 необходимо в (18) заменить V_{0j} на V_{1j} . Экспериментальных зависимостей, устанавливающих связь коэффициента вариации составного процесса деградации с уровнем нагрузки, не имеется, поэтому для уточнения оценки V_1 предлагается зависимость

$$V_{1j} = (1 - p_{1j})^{1/4} V_{0j}. \quad (19)$$

Иными словами, чем более подвержен влиянию термической нагрузки составной процесс деградации, тем выше значение его долевого участия в режиме испытаний и тем меньше величина V_{1j} по отношению к V_{0j} .

Вид функции (19) изображен на графике рис. 3.

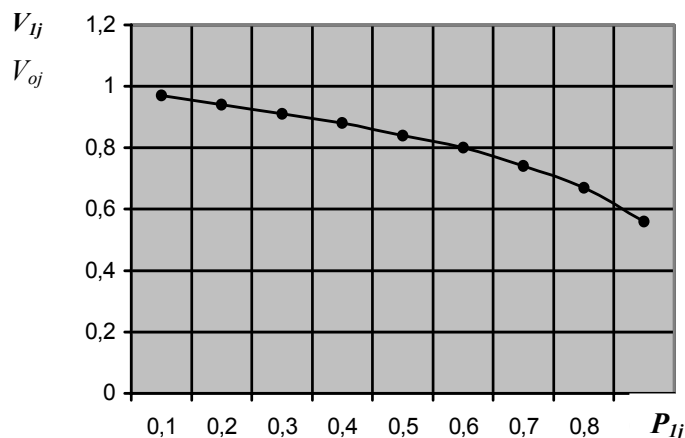


РИС.3

Подставив в (18) зависимость (19), получаем уточненную оценку V_1 :

$$V_1 = \left(\frac{\sum_{j=1}^m V_{1j}^2 p_{1j}^2}{\sum_{j=1}^m p_{1j}^2} \right)^{1/2} = \left(\frac{\sum_{j=1}^m (1-p_{1j})^{1/2} V_{0j}^2 p_{1j}^2}{\sum_{j=1}^m p_{1j}^2} \right)^{1/2} = 0,58. \quad (20)$$

Выводы. При изменении термической нагрузки может иметь место явление смены доминирования между процессами деградации с разными энергиями активации, выражающееся в резком изменении величин долевых участков составных процессов деградации в обобщенном процессе деградации.

В работе получено выражение, позволяющее вычислять долевые участки составных процессов деградации для любого форсированного по температуре режима испытаний, положенного в основу преобразования диаграммы Парето.

Предложено выражение для вычисления уточненной оценки коэффициента вариации обобщенного процесса деградации для любого режима испытаний с учетом изменения величин коэффициентов вариации составных процессов деградации.

1. Федухин А.В., Бутенко Е.В. Ускоренная оценка надежности изделий электронной техники // Математические машины и системы. – 1997. – № 2. – С.84 – 93.
2. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.
3. Стрельников В.П. Новая технология исследования надежности // Математические машины и системы. – 1997. – № 2. – С.78–83.

Получено 30. 05. 2003