

УДК 537.32



Лусте О.Я.

Лусте О.Я. доктор физ.-мат. наук, профессор^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина,
e-mail: anatysh@gmail.com

²Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина

УСКОРЕННЫЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ

Традиционные методы тестирования являются дорогостоящими и неэффективными для прогнозирования надежности систем, которые, как ожидается, надежно будут функционировать в течение многих лет, таких как компоненты термоэлектрических систем космического назначения. Альтернативой традиционным испытаниям являются ускоренные методы. Они включают, в частности, ускоренное тестирование ресурса (ALT, HALT), ускоренное тестирование деградации (ADT), ускорение больших механических напряжений (HASS). В работе рассмотрена классификация ускоренных методов и варианты их взаимного согласования. Библи. 9, рис. 3.

Ключевые слова: методы испытаний надежности, наработка на отказ, прогноз надежности.

Введение

В работе представлено описание ускоренных методов испытаний для прогнозирования надежности сложных термоэлектрических систем при условии минимального объема выборки. Целью работы является классификация ускоренных методов и варианты их взаимного согласования.

Ускоренные методы испытаний

Теория надежности является математической дисциплиной, которая имеет две стороны – чисто теоретическую, как возвышенный отход от реальности, и прикладную, как страстное стремление к жизни. В нашей предыдущей работе по теории надежности [1] мы уже отмечали, что из двух крайностей – «математика без здравого смысла» и «здравый смысл без математики» – преимущество, несомненно, следует отдавать второй. Понятно, лучше, когда работает и то, и другое, когда математические расчеты все время проверяются «здоровым смыслом». Но так бывает далеко не всегда. Математический аппарат имеет некое гипнотическое свойство, в силу которого исследователи часто склонны безоговорочно верить своим расчетам, и тем более верить, чем более сложный математический аппарат применен.

Реальная практическая работа имеет целью указать на важность преодоления традиционных ошибок в использовании математических методов теории надежности. Для этого в [1] были рассмотрены две важные проблемы надежности термоэлектрических приборов

и систем – определение минимально допустимого объема выборки для испытаний и построение надежных сложных систем из ненадежных элементов.

Ко многим системам выдвигаются требования чрезвычайно высокой надежности в течение длительного периода эксплуатации или хранения. Космические приложения термоэлектрических изделий являются ярким примером. Кроме того, системы и компоненты часто должны быть разработаны в сроки значительно более короткие, чем сроки их надежной эксплуатации. Эти требования являются вызовом для традиционной методики проверки надежности, в рамках которой элементы проверяются на отказ в ожидаемых условиях эксплуатации, чтобы предусмотреть надежный срок службы системы. Когда время жизни измеряется годами или десятилетиями, этот подход невозможен.

Надежность может быть определена как способность элемента выполнять необходимую функцию при заданных условиях окружающей среды и эксплуатации и за определенный период времени [2]. Формально, если $F(t)$ - вероятность отказа в момент времени t или до времени t , функция надежности

$$R(t) = 1 - F(t)$$

дает вероятность того, что элемент все еще будет функционировать в момент времени t . Производные величины включают плотность вероятности отказа $f(t) = dF(t)/dt$ и степень риска $h(t) = f(t)/R(t)$. Скорость изменения этой величины дает частоту отказов в момент времени t , учитывая выживание системы до этого момента. Знать, увеличивается ли $h(t)$ с течением времени, уменьшается ли или является постоянной величиной, полезно при прогнозировании срока эксплуатации.

Стандартная теория надежности допускает, что среднюю наработку на отказ для сложной системы можно описать «корытообразной» кривой, как это показано на рис. 1. В начале, в так называемом инфантильном периоде, система может демонстрировать высокую частоту отказов вследствие дефектов производства или конструкционных недостатков. Ожидается, что эти проблемы закончатся и наступит время, когда частота отказов станет постоянной и относительно низкой. В конце же срока эксплуатации частота отказов растет в силу "старения", которое может быть связано с определенными компонентами системы или определенными физико-химическими процессами деградации.



Рис. 1. "Корытообразная" модель надежности.

Если в инфантильном периоде отказы диагностируются и их причины устраняются [2, 3], то надежность растет. Этот процесс нуждается в ускоренных методах испытаний, которые быстро выявляют отказы. Рис. 2 изображает данные испытаний, в ходе которых выбираются образцы изделий с небольшой выемкой, которые затем подвергаются многократному сгибанию

до образования трещин и их удлинения. Графики в верхней части рисунка являются расчетной плотностью вероятности отказов (циклов сгибания-разгибания) для достижения критической длины трещины. Эта плотность может быть использована для прогнозирования срока службы изделия до его замены [4].

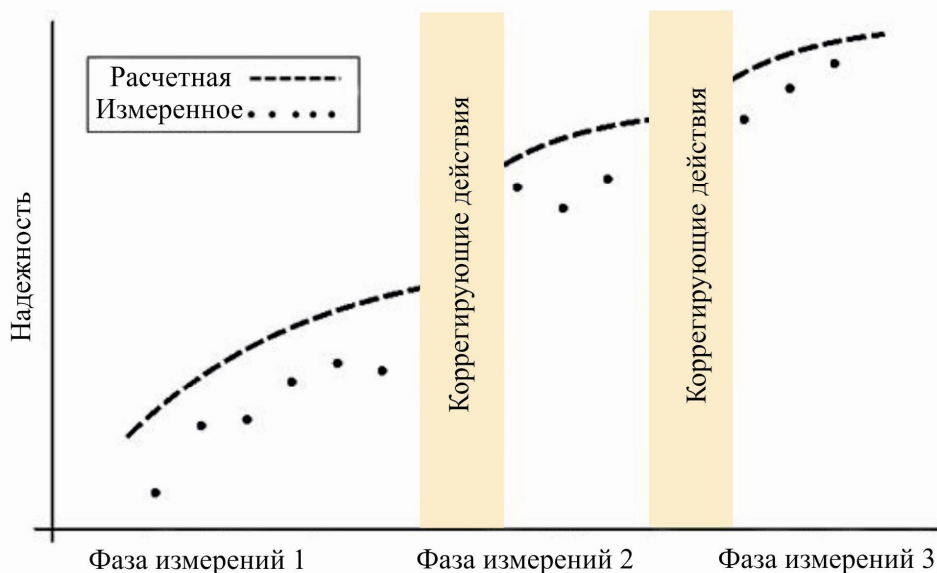


Рис. 2. Рост надежности.

Для высоконадежных компонентов и систем тестирование описанного типа не может быть завершено в течение приемлемого периода времени, если оно выполняется в нормальных условиях эксплуатации – сбор значительного количества отказов может занять годы. Подходы к преодолению этой проблемы – это ускоренное испытание ресурса (ALT) и ускоренное испытание на деградацию (ADT), где элементы испытываются в условиях повышенной температуры, механической нагрузки, вибрации и тому подобное, которые находятся вне нормального рабочего диапазона [5]. ALT может включать рост напряжений или приложение нескольких напряжений одновременно. LANL, ALT/ADT были применены для разных материалов [6, 7]. Целью ALT/ADT является ускорение отказов или деградации, которые могут возникнуть при обычном использовании. Для того, чтобы результаты ускоренных испытаний имели прогностическую ценность, экспериментатор должен уметь моделировать сокращение срока службы элемента в результате наложения нагрузки. При этом часто используется экспоненциальное распределение интенсивности отказов:

$$R(t) = \exp(-\lambda t),$$

где λ - средняя частота отказов. Модель Аррениуса для температурной зависимости скорости реакции используется для прогнозирования изменений надежности при увеличении температуры, устанавливая зависимость

$$\lambda = \lambda(T) = \lambda_0 \exp(-\Delta E / RT),$$

где экспериментально определяются λ_0 и ΔE .

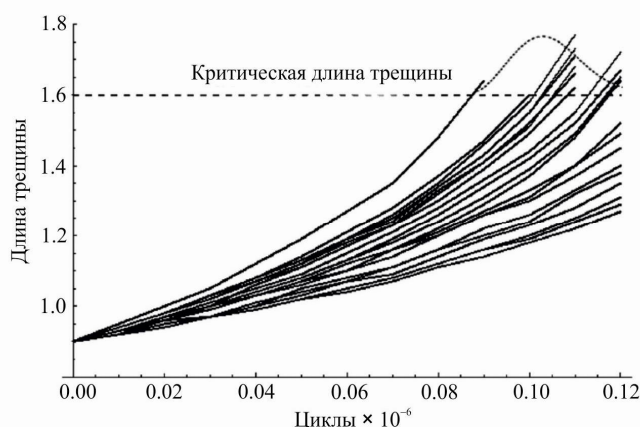


Рис 3. Зависимость длины трещины от количества циклов.

Резко ускоренное тестирование ресурса (HALT), которое использует комбинации факторов на значительно высших уровнях, хотя и внешне похоже на ALT, но оно направлено лишь на поиск и исправление дефектов проекта во время разработки [8]. Ускоренный скрининг нагрузок (HASS) является родственным методом, который применяется для устранения дефектных элементов из производственного процесса [9]. HALT является эффективным для ускорения роста надежности, но достаточно часто требования к демонстрируемому уровню надежности могут предусматривать статистически ориентированные методы, такие как ALT. Это создает определенный конфликт и может привести к неоптимальному распределению ограниченных вариантов испытаний. В работах [2 – 9] найдены пути преодоления этого конфликта.

Выводы

Создана классификация ускоренных методов определения надежности сложных термоэлектрических систем и определены варианты взаимного согласования этих методов.

Литература

1. Анатычук Л.И., Лусте О. Я. Влияние деградации на ресурсные свойства термоэлектрических материалов, *Термоэлектричество* – 2017. – № 5.
2. ISO 8402, *Quality Vocabulary*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (1986).
3. MIL-HDBK-189C, *Reliability Growth Management*, US Department of Defense, Washington, DC (2011).
4. Duane, J.T., *IEEE Trans Aerosp* **2**, 563 (1964).
5. Lu, C.J. and W.Q. Meeker, *Technometrics* **35**, 161 (1993).
6. Nelson, W.B., *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ (1990).
7. Labouriau, A., and T.S. Stephens, “Report on Assessment of Aging in Polymers,” LANL Technical Report LA-UR-08-6800 (2008).
8. Martz, J.C., and A.J. Schwartz, *J Miner Met Mater Soc* **55**, 19 (2003).
9. Hobbs, G.K., *Accelerated Reliability Engineering: HALT and PCMH*, John Wiley & Sons, Chichester, UK (2000).

Поступила в редакцию 20.08.18

Luste O.J.^{1,2}, *Doctor Phys.-math. science*

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str, Chernivtsi, 58029, Ukraine, *e-mail: anatykh@gmail.com*

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine,

ACCELERATED TESTING METHODS FOR RELIABILITY PREDICTION

Traditional testing methods are expensive and ineffective to predict the reliability of systems that are expected to function reliably over the years, such as components of space-purpose thermoelectric systems. An alternative to traditional testing are accelerated methods. These include, in particular, accelerated life testing (ALT, HALT)), accelerated degradation testing (ADT), highly accelerated stress screening (HASS).

The paper considers the classification of accelerated methods and options for their mutual harmonization. Bibl. 9, Fig. 3.

Key words: reliability testing methods, time to failure, prediction of reliability.

References

1. Anatykhuk L.I., Luste O.J. (2017). The effect of degradation on the service life properties of thermoelectric materials. *J. Thermoelectricity*, 5.
2. ISO 8402 (1986). *Quality vocabulary*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
3. MIL-HDBK-189C (2011). *Reliability growth management*. US Department of Defense, Washington, DC.
4. Duane, J.T. (1964). *IEEE Trans Aerosp* 2, 563.
5. Lu, C.J. and W.Q. Meeker (1993). *Technometrics* 35, 161.
6. Nelson, W.B. (1990). *Accelerated testing: statistical models, test plans, and data analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons .
7. Labouriau, A. and Stephens T.S. (2008). Report on assessment of aging in polymers. *LANL Technical Report LA-UR-08-6800*.
8. Martz, J.C. and Schwartz A.J. (2003). *J. Miner Met Mater Soc* 55, 19.
9. Hobbs, G.K. (2000). *Accelerated reliability engineering: HALT and PTCMH*. Chichester, UK : John Wiley & Sons.

Submitted 20.08.18