

ПОВЫШЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

Г.С. Ранченко, канд. техн. наук, Е.В. Бондаренко, канд. техн. наук, КБ «Элемент», г. Одесса, Украина

Общая постановка проблемы. В связи с тенденцией повышения требований к параметрам надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) возрос интерес разработчиков и пользователей этой аппаратуры к ее параметрической надежности, в частности, к долговременной стабильности параметров элементов электронной техники.

Обзор публикаций. К сожалению, далеко не всегда в публикациях по данному вопросу и в технической документации на элементы электронной техники приведена характеристика их долговременной стабильности, позволяющая прогнозировать изменение со временем основных параметров и предусматривающая возможность их компенсации.

Анализ «дерева отказов» любого изделия, проведенный с достаточной степенью глубины, наглядно показывает, как незапланированное изменение параметров комплектующего элемента может привести, переходя «от ветки к ветке», к верхнему главному отказу – потере работоспособности изделия. Поэтому не вызывает сомнения, что любая возможность повышения надежности бортовой РЭА должна находиться в поле зрения разработчиков комплектующих изделий авиационной техники (КИАТ), начиная с самых ранних стадий его проектирования.

Особенно неблагоприятными являются индивидуальность и непредсказуемость этих процессов, что не позволяет заранее предвосхитить их вредные последствия, приводящие к потере работоспособности изделия.

Цель исследований. Целью настоящего аналитического и экспериментального исследования является разработка методов искусственной стабилизации элементов электронной техники, а также методов ускоренной оценки, их долговременной стабильности.

Прежде всего следует отметить, что условия применения КИАТ, особенно РЭА, работающих в непосредственной близости к двигателю, являются весьма неблаго-

приятными, с точки зрения стабильности, практически для всех элементов электронной техники. Высокая температура двигателя в сочетании с вибрацией, значительной концентрацией паров масла и металлических паров, повышенная влажность, резкие смены температуры и другие дестабилизирующие факторы весьма способствуют процессам всех видов диффузии, в том числе «короткозамкнутой» диффузии, процессов окисления и других видов химического взаимодействия. Все эти явления могут привести к изменению параметров КИАТ.

Наиболее рациональным способом их устранения является предварительная искусственная стабилизация элементов до их установки в проектируемое изделие.

Результаты. Алгоритм разработки конкретных методов искусственной стабилизации сводится к следующим этапам:

- разработка физико-химической модели механизма изменения основных параметров (старения) элемента;
- установление расчетных соотношений на базе модели старения, позволяющих выбрать режим и длительность искусственной стабилизации конкретной группы элементов;
- разработка технологической инструкции искусственной стабилизации;
- реализация технологического процесса искусственной стабилизации выбранной группы элементов;
- метрологическая оценка результатов искусственной стабилизации.

Наиболее важным и ответственным этапом искусственной стабилизации является правильный выбор физико-химической модели механизма изменения параметров, т.к. от этого зависит корректность установления расчетных соотношений при разработке конкретной технологической инструкции искусственной стабилизации выбранной группы элементов, а значит, и ее эффективность.

В основе физико-химической модели старения элементов электронной техники лежат их структурные

изменения на базе изменения химического состава. Величина и скорость этих изменений определяются, в основном, константой действия процессов диффузии, связанной с физико-химическими свойствами диффундирующих частиц и вещества, в котором происходит диффузия, а также константой химического взаимодействия, происходящего в результате диффузии. Эти процессы приводят к некоторым изменениям структуры, особенно в поверхностном слое элементов и в местах контактов, а следовательно, к изменению параметров элементов.

Константы действия как процесса диффузии, так и химического взаимодействия зависят от температуры окружающей среды согласно закону Аррениуса:

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1)$$

где D – константа действия процесса диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$;

D_0 – предельное значение константы действия, $\text{см}^2/\text{с}$;

E – энергия активации процесса диффузии, $\text{кал}/\text{моль}$;

R – универсальная газовая постоянная, $\text{кал}/\text{моль}\cdot\text{град}$;

T – температура, К .

Аналогична формула для процесса химического взаимодействия диффундирующих частиц с основным веществом [1 - 3]:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (2)$$

где k – значение константы химического взаимодействия, $\text{см}^2/\text{с}$;

k_0 – предельное значение константы химического взаимодействия, $\text{см}^2/\text{сек}$;

Q – энергия активации химического взаимодействия, $\text{кал}/\text{моль}$;

R – универсальная газовая постоянная, $\text{кал}/\text{моль}\cdot\text{град}$;

T – температура, К .

Наличие предельных значений констант действия диффузии и химического взаимодействия при каждой конкретной температуре свидетельствует о конечности процесса старения элементов, т. е. о его затухании со скоростью, зависящей от температуры окружающей среды, в конечном итоге приводящем к стабилизации параметров элемента.

Таким образом, в основе процесса искусственной

стабилизации элементов электронной техники лежит преднамеренное ускорение процессов их старения (искусственное старение), что приводит к достижению предельно возможного изменения параметров в подконтрольный период жизни элемента до начала его работы в проектируемом изделии.

При установке такого элемента в изделие закономерное изменение его параметров со временем теоретически отсутствует, а практически – пренебрежимо мало.

Подход к выбору конкретных режимов искусственной стабилизации элементов принципиально таков же, как и к выбору режимов при ускоренных испытаниях на безотказность готовых изделий, в частности, выбору режимов эквивалентно-циклических испытаний на безотказность. Он основан на использовании экстремальных допустимых режимов применения испытываемых изделий в целях скорейшего проявления их потенциальных отказов.

Общность этих методов и состоит в том, что оба они направлены на сокращение времени решения определенных задач, связанных с надежностью КИАТ:

- задачей эквивалентно-циклических испытаний является выявление полных отказов готовых изделий до их поступления в эксплуатацию за достаточно короткий промежуток времени и на приемлемом количестве образцов;

- задачей искусственной стабилизации элементной базы, выбранной для использования в проектируемой РЭА авиационного назначения, является улучшение ее долговременной стабильности (параметрической надежности) до установки в проектируемое изделие.

Результатом решения и той, и другой задачи является повышение надежностных характеристик КИАТ, допущенных к эксплуатации.

В качестве ускоряющих воздействий в обоих методах используется наиболее жесткие, но допустимые режимы применения. Существенная разница состоит в том, что механизм процесса искусственной стабилизации элементной базы РЭА легче поддается физико-химическому моделированию, чем процесс ускоренного выявления потенциальных отказов у готовых достаточно сложных КИАТ.

Однако следует отметить, что в основе формул для

расчета коэффициентов ускорения (K_y) того и другого процессов лежит закон Аррениуса.

Так, для расчета K_y эквивалентно-циклических испытаний [4] предлагается следующая формула:

$$K_y^{\text{исп}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n B^i \exp \left[-\frac{E}{R} \left(\frac{T_{\text{и}}^i - T_{\text{э}}^i}{T_{\text{и}}^i \cdot T_{\text{э}}^i} \right) \right]}, \quad (3)$$

где B^i – доля наработки КИАТ в i -м режиме эксплуатации от наработки в полете;

E – усредненная энергия активации действующего фактора, определенная экспериментально или аналитически;

R – универсальная газовая постоянная;

$T_{\text{и}}^i$ – температура во время i -го режима испытаний;

$T_{\text{э}}^i$ – температура в i -м режиме эксплуатации.

Коэффициент ускорения в методе искусственной стабилизации рассчитывается из условия совпадения эффективностей ускоренного и нормального старения элементов РЭА (автомодельности этих процессов).

Признаком автомодельности является равенство так называемых коэффициентов неустойчивости за время ускоренного старения τ_y при температуре T_y и τ_n при нормальной температуре T_n .

Из этого условия путем несложных математических преобразований можно получить выражение, позволяющее рассчитать время τ_y ускоренного старения при температуре T_y , автомодельного нормальному старению элементов электронной техники за значительно больший промежуток времени τ_n при температуре T_n , а также выражение для расчета коэффициента ускорения процесса стабилизации:

$$k_y^c = \frac{\tau_y}{\tau_n}; \quad (4)$$

$$\tau_y = \frac{-\ln \left\{ 1 - \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T_n} \right) \right] \right\}}{k_0 \cdot \exp \left(-\frac{Q}{RT_y} \right)} \cdot \frac{\left\{ 1 - \exp \left[-k_0 \cdot \tau_n \exp \left(-\frac{Q}{RT_n} \right) \right] \right\}}{k_0 \cdot \exp \left(-\frac{Q}{RT_y} \right)}. \quad (5)$$

Ряд методов искусственной стабилизации экспериментально опробованы и дали положительные результаты. Экспериментальные данные, приведенные в работе [5], свидетельствуют о существенном уменьшении изменения со временем основных информационных параметров элементов электронной техники после их искусственной стабилизации (в 3 - 5 раз).

Перспективы. На основе проведенных экспериментальных исследований считаем целесообразным дать некоторые практические рекомендации.

1. Экспериментальные данные по ускоренной искусственной стабилизации элементной базы бортовой РЭА позволяют уточнить значения коэффициентов ускорения и для эквивалентно-циклических испытаний на безотказность готовых изделий, в которых использована исследованная и стабилизированная элементная база, что представляет определенный практический интерес в связи со сложностью накопления достаточного объема экспериментальных данных для расчета соответствующего коэффициента ускорения при проведении эквивалентно-циклических испытаний бортовой РЭА.

2. Наиболее простым и дешевым методом искусственной стабилизации является так называемый высокотемпературный метод, из названия которого ясно, что ускоренная стабилизация (достижение предельного значения деградации основного информационного параметра элемента) происходит под воздействием максимально допустимой температуры в течение времени, установленного экспериментальным или расчетным путем.

3. После реализации технологического процесса искусственной стабилизации (в соответствии с Технологической инструкцией для конкретного ряда элементов электронной техники) следует провести метрологическую оценку ее результатов для дальнейшего использования в ряде инженерных расчетов, сравнительного анализа и т.д.

4. Следует отметить, что в литературе и в технической документации на элементы электронной техники отсутствует однозначно установленный параметр, характеризующий долговременную стабильность (неустойчивость) элементов, даже в тех редких случаях, когда этот параметр вообще как-то характеризуется.

На основе опыта работы по экспериментальной оценке долговременной стабильности и разработке методов искусственной стабилизации элементной базы РЭА считаем целесообразным использовать в качестве критерия долговременной стабильности термин “коэффициент годичной нестабильности”, характеризующий относительное изменение основного информационного параметра элемента за 1 год работы или хранения в нормальных климатических условиях с размерностью %/год.

5. Экспериментальная оценка этого параметра проводится ускоренным методом с учетом коэффициента ускорения K_y , соответствующего выбранному режиму ускоряющего воздействия.

6. Необходимо учитывать, что при оценке долговременной стабильности элементов электронной техники погрешность измерения контролируемого параметра должна быть сведена к минимуму так же, как и погрешность воспроизведения условий измерения информационного параметра до и после контрольного ускоряющего воздействия T_y в течение времени τ_y , автомобильного году естественного старения (T_n в течение $\tau_n=1$ год). Формула для оценки коэффициента годичной нестабильности:

$$B_T = \frac{P_1^И - P_2^И}{P_1^И} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где $P_1^И$ – значение информационного параметра до контрольного ускоряющего воздействия;

$P_2^И$ – значение информационного параметра после ускоряющего воздействия, автомобильного одному году естественного старения.

Как видно из формулы (6), оценка коэффициента годичной нестабильности проводится путем сравнения двух измерений, поэтому измерения должны проводиться в условиях, предельно близких друг к другу, т.к. в противном случае задача оценки значения B_T становится неоднозначной.

7. Уровень требований к погрешности измерений, а также к погрешности воспроизведения условий этих измерений определяется в зависимости от требований, предъявляемых к стабильности контролируемой группы элементов.

К перспективам дальнейших исследований следует отнести расширение группы элементов, подлежащих искусственной стабилизации и оценке долговременной стабильности, а также разработку соответствующей аппаратуры и измерительных стендов высокой точности для реализации этих технологических процессов.

Выводы

1. Разработан способ повышения параметрической надежности элементной базы бортовой РЭА с помощью искусственной стабилизации параметров элементов электронной техники, который позволяет улучшить надежность характеристики ряда КИАТ.

2. Аналитическое исследование механизма физико-химических процессов, приводящих к изменению параметров элементов, позволяет глубже проникнуть в суть явлений, приводящих к параметрическим отказам как отдельных элементов, так и готовых изделий.

Литература

1. Бондаренко Е.В., Глазов В.М. Кинетика процесса старения полупроводниковых приборов и материалов: Сб. тр.- М.: МИЭТ, 1991.- Вып. 21.– 152 с. (Тр. МИЭТ).
2. Кроуфорд О. Окислительные процессы в материаловедении.- М.: Мир, 1995.– 49 с.
3. Аналитические методы исследования материалов и изделий микроэлектроники: Тез. Докл. конф. Сер. 3. Микроэлектроника.- Вып. 1, (297).- М.: ЦНИИ Электроника, 1989.
4. Методические указания МУ 150-95. Надежность изделий авиационной техники. Эквивалентно-циклические испытания на безотказность эквивалентного бортового оборудования.- 1994.– 39 с.
5. Бондаренко Е.В., Кисляков В.П. Исследование долговременной стабильности элементов электронной техники // Электронная техника. Сер. 6. Материалы.- 1991.- Вып. 3 (206).– 68 с.

Поступила в редакцию 01.06.03

Рецензенты: ученый секретарь научно-технического совета Н.П. Волошина, КБ «Элемент», г. Одесса; канд. техн. наук, нач. отд. В.И. Ефремов, НИИ «Шторм», г. Одесса.