

УДК 621.7.073-52

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Д.т.н. И.Ш. Невлюдов, к.т.н. Н.Г. Стародубцев, Н.П. Демская, Харьковский национальный университет радиотехники

Рассматривается возможность использования законов неравновесной термодинамики для определения связи между контролируемыми параметрами РЭС и отображаемой среды, а так же построение детерминированной термодинамической модели процессов развития производственных дефектов. Предложена модель процесса расходования ресурса радиоэлектронных средств, основанная на термодинамическом подходе при описании деградационных процессов, которые ограничивают время работы аппаратуры.

Розглядається можливість використання законів нерівноважної термодинаміки для визначення зв'язку між контрольованими параметрами РЕЗ та відображаємого середовища, а так само побудова детермінованої термодинамічної моделі процесів розвитку виробничих дефектів. Запропоновано модель процесу витрачання ресурсу радіоелектронних засобів, засновану на термодинамічному підході при описі деградаційних процесів, які обмежують час роботи апаратури.

There is the possibility to use the laws of nonequilibrium thermodynamics to determine the relationship between controlled parameters and displayed RES environment, as well as the construction of a deterministic thermodynamic model development processes of production defects. A model of resource expenditure process electronic funds based on the thermodynamic approach in describing the degradation processes that limit the work equipment.

Ключевые слова: термодинамическая модель, процесс расходования ресурса, деградационные процессы.

Введение

Технический ресурс – показатель долговечности, характеризующий запас возможной наработки объекта.

Техническим ресурсом называют наработку объекта от начала или возобновления эксплуатации до наступления предельного состояния, под которым понимают чрезмерное снижение эффективности, делающее дальнейшую эксплуатацию экономически нецелесообразной или снижение показателей безопасности ниже предельно допустимого уровня.

Выбор необходимого технического ресурса (назначенного (планового) срока службы) – технико-экономическая задача, решаемая на этапе разработки проектного задания. При этом учитывается современное техническое состояние и темпы научно-технического прогресса в отрасли, принятые в данное время

нормативные значения коэффициентов эффективности капитальных вложений и др.

На стадии проектирования технический ресурс является заданной величиной. Задача конструктора и разработчиков подобрать материалы, конструктивные формы, размеры и технологические процессы так, чтобы обеспечить плановые значения показателя для проектируемого объекта. На стадии проектирования, когда объект еще не создан, его расчет, в том числе оценку технического ресурса, производят на основании нормативных документов, которые в свою очередь основаны на статистических данных о материалах, воздействиях и условиях эксплуатации аналогичных объектов. Таким образом, прогнозирование технического ресурса на стадии проектирования должно быть основано на моделях.

Модель технического ресурса затрагивает существование радиоэлектронных средств (РЭС) во времени и предполагает отображение процессов формирования качества при создании РЭС и изменение его при эксплуатации. Моделирование этих процессов позволяет выявить необходимые показатели, предложить методы их наблюдения и прогнозирования.

Материал и результаты исследований

Существование РЭС можно рассматривать как становление ресурса в процессе ее создания и расходование его в процессе эксплуатации. Кинетику расходования ресурса можно охарактеризовать функционалом от показателей надежности, в частности [1]

$$Z(t, T) = -\ln P(t, T) = \int_0^t \lambda(t, T) dt, \quad (1)$$

где $Z(t, T)$ – мера расхода ресурса;

T – характеристика взаимодействия объектов со средой (нагрузки) или характеристика внутренних факторов (в т.ч. дефектов);

$P(t, T)$ – вероятность безотказной работы;

$\lambda(t, T)$ – интенсивность отказов, как скорость расходования ресурса в статистическом смысле.

В реальной среде для конкретных типов материалов, узлов и изделий радиоэлектронные средства можно рассматривать как твердое тело, в котором имеется некоторое количество неравновесных состояний (дислокаций, дефектов, неравновесных фаз, градиентов концентрации примесей и т. п.). Наличие неравновесных состояний ведет к развитию процессов переноса вещества

и к химическим реакциям, имеющим место в объеме тела и наиболее активно протекающим на его поверхности. Если прибор (элемент) находится под электрической нагрузкой, то на развитие процессов переноса и на скорости химических реакций оказывают влияние наведенные тепловые и электрические поля. Наведенное поле вызывает так называемые эффекты наложения, такие, как эффект Пелтье, эффект, вызывающий поток тепла из-за градиента концентраций, электродиффузия и др [2].

Эти явления и взаимодействие с окружающей средой ведут к необратимому изменению физико-химических свойств материалов. Следствием этих изменений является изменение электрических параметров РЭС. При достижении одним или несколькими параметрами критических значений наступает параметрический отказ.

Характерной особенностью физических процессов является их направленность во времени, в соответствии со вторым началом термодинамики. Второй закон устанавливает поведение функции состояния системы, называемой энтропией S . Классическая запись второго закона для изолированных систем $dS \geq 0$.

Процесс появления неоднородной структуры РЭС можно трактовать как нарушение равновесного состояния термодинамической системы. Появление неравновесного состояния термодинамической системы приводит к изменению S . Следовательно, с физической точки зрения процесс расходования ресурса РЭС можно рассматривать как процесс необратимого изменения (эволюции или деградации) термодинамического состояния объекта, т.е. процессом производства энтропии dS/dt , который характеризует многообразие необратимых физико-химических процессов при влиянии внешних и внутренних факторов T , и выступает, таким образом, в качестве интегральной скорости расходования ресурса, которая может иметь такой же характер временной зависимости как $\lambda(t, T)$.

На рис. 1 представлены возможные реализации dS/dt . T_1 соответствует экспоненциальному распределению вероятности безотказной работы, T_2 соответствует закону распределения Вейбулла [3].

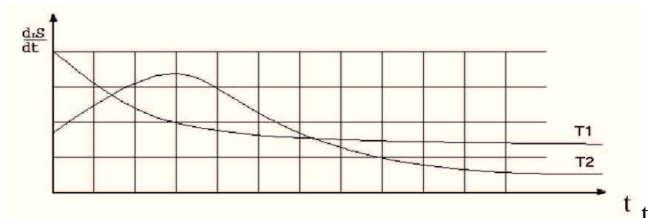


Рис. 1. График изменения ресурса РЭС

При описании процессов расходования ресурса представляется целесообразным использование термодинамического подхода, где постулируется, характерная для рассматриваемых реакций необратимость энтропии, как несимметричной относительно времени функции состояния системы, в

форме второго начала термодинамики. Термодинамический подход, основанный на необратимости физических процессов, объединяет различные точки зрения: уравнения баланса, классическую термодинамическую теорию устойчивости, флуктуационную и эволюционную теории. Такое обобщение термодинамики имеет существенное методологическое значение с точки зрения единства макроскопического процессуального описания сложных объектов различной физической природы.

Физическую основу эволюционных процессов составляют неравновесные состояния системы и соответствующие им необратимые процессы. На основании второго начала термодинамики эволюция термодинамических систем происходит в направлении перехода системы из неравновесного состояния $\delta(S) > 0$ в стационарное $\delta(S) = \min$ и далее в состояние полного термодинамического равновесия $\delta(S) = 0$. Эти соотношения можно рассматривать как критерии характера эволюции, представленные в общем виде. Подобный характер эволюционных процессов предполагает существование двух масштабов времени релаксации системы: время релаксации неравновесного состояния и время релаксации стационарного состояния. Эти времена релаксации существенно различны, что является основанием введения временной иерархии и соответственно понятия временной организации физических систем в общем и РЭС в частности.

Конечное значение производной энтропии по времени дает основание предположить, что процессы эволюции термодинамических систем носят монотонный релаксационный характер. Этот вывод совпадает с выводами, наблюдаемыми статистической теорией. Уравнения Онзагера [4] при определенных допущениях, в частности при условии стабилизации термодинамических сил, могут быть представлены как линейные дифференциальные уравнения во временной области относительно экстенсивных параметров y_j с постоянными коэффициентами L_{jk} , решения которых записываются в виде

$$y_j(t) - y_j(0) = \sum_k [L_{jk} \exp(-t/\tau_k)], \quad (2)$$

где $y_j(0)$ – неравновесные или стационарные значения соответствующих параметров системы в зависимости от рассматриваемого масштаба эволюции;

L_{jk} – кинетические коэффициенты;

τ_k – времена релаксации соответствующих необратимых процессов в системе.

Примерами подобной формы эволюционных или релаксационных процессов являются решения во временной области феноменологических уравнений диффузии, теплопроводности, линейных химических реакций. В виде суперпозиции экспоненциальных

функций можно представить интегральный процесс эволюции (релаксации) системы по производству энтропии $d_i S/dt$. Применительно к РЭС эволюционные процессы можно интерпретировать как энтропийные, интегральные процессы приближения к отказовым ситуациям, потери работоспособности или расходования ресурса. Этим обусловлена их значимость в задачах интегральной диагностики РЭС. Термин «эволюционные процессы» можно использовать в качестве обобщения понятия «деградационных процессов», учитывая закономерный, направленный характер необратимых процессов изменения термодинамического состояния РЭС.

В неравновесной термодинамике тождественно выполняются критерии эволюции. При этом подразумевается, что соотношения между потоками и силами вида справедливы как вблизи равновесных, так и вблизи стационарных состояний. Нелинейные соотношения между потоками и силами могут проявляться вдали от равновесных или стационарных состояний. В нелинейной области эволюция системы может иметь существенно более сложный характер – могут возникать новые состояния и новые типы организации. Типичными примерами подобных процессов являются фазовые переходы. Для учета подобных эффектов представляется возможным использование теории флуктуаций, которая является связующим звеном между теорией термодинамического равновесия и теорией необратимых процессов.

Выполнение критериев эволюции соответствует условиям термодинамической устойчивости, когда флуктуации являются быстро затухающими и влияют только на характеристики шумов РЭС, но не на общие закономерности эволюции состояния системы. Положение существенно меняется, когда возникает неустойчивость вдали от равновесных или стационарных состояний при нелинейных соотношениях – например, в области фазовых переходов. Тогда флуктуации возрастают и в конечном итоге определяют новое устойчивое макроскопическое состояние системы. Таким образом, новые макроскопические состояния и структуры в смысле временной и пространственной организации могут быть результатом неустойчивости системы и возникают из флуктуации. Известно, что такая «самоорганизация» имеет непосредственное отношение к локальным отказовым процессам РЭС, например процессам электрического пробоя изолирующих слоев больших интегральных схем (БИС).

В соответствии с макроскопическим подходом затухание флуктуаций для устойчивых состояний термодинамических систем подчиняется релаксационным законам необратимых процессов. При этом макроскопические неравновесные состояния и соответствующие им необратимые процессы интерпретируются в качестве крупномасштабных флуктуаций.

Масштабы флуктуационных процессов определяются микроскопичностью объектов и применимостью феноменологических параметров и соотношений неравновесной термодинамики. Для объектов РЭС условия возникновения мелкомасштабных флуктуаций должны однозначно выполняться, поскольку функциональные процессы РЭС являются процессами микроскопического порядка. Тенденции развития РЭС определяются стремлением к предельным характеристикам по степени интеграции, быстродействию, потребляемой мощности, информационной, функциональной и физической сложности. В этих условиях мелкомасштабные флуктуации приобретают практический смысл принципиальных физических ограничений на процессы измерений, хранения, передачи и обработки информации в РЭС, учитываются при проектировании и не привлекаются к анализу отказовых ситуаций РЭС, вызванных производственными дефектами. По мере увеличения физической сложности РЭС за счет возрастания степени неравновесности структуры объектов, рост влияния деградационных процессов значительно опережает рост влияния флуктуационных процессов [5,6].

С термодинамической точки зрения процесс измерений имеет ряд особенностей. Во-первых, существует непосредственная взаимосвязь между энтропийными и информационными характеристиками процессов измерений, передачи и обработки информации. Пределы точности измерений определяются рассмотренными выше термодинамическими (kT) – крупномасштабными и квантовыми, ($h/\Delta t$) – мелкомасштабными ограничениями. Во-вторых, необратимый характер процессов измерения как процессов взаимодействия измерительного прибора и объекта обуславливает определенную взаимосвязь (предельные соотношения) между термодинамическими характеристиками (энергия, энтропия) и информационными (точность, количество информации).

Для флуктуаций, вызванных наблюдениями, существует понятие характерного интервала или минимального масштаба времени, которое определяет масштаб флуктуации

$$\tau = \frac{\Delta y}{\partial y / \partial t}, \quad (3)$$

где y – макроскопический параметр системы;

Δy – минимально-регистрируемое изменение y .

Из этого выражения видно, что этот масштаб может изменяться в больших пределах и измерение является частью отображаемых эволюционных и флуктуационных процессов.

Для крупномасштабных эволюционных процессов время релаксации составляет: для тепловых процессов $\tau = 10^{-1} \dots 10^3 \text{ с}$, процессов изменения физической структуры $\tau = 10 \dots 10^3 \text{ ч}$, процессов расходования ресурса $\tau = 10^4 \dots 10^6 \text{ ч}$.

Таким образом, при отображении процессов развития производственных дефектов должен учитываться эволюционный и флуктуационный характер процессов. Релаксационный характер крупномасштабных эволюционных и флуктуационных процессов обусловлен свойствами неравновесных состояний физических систем. Представляется существенным, что экспоненциальная форма решений (2) не зависит от конкретного вида исходных уравнений Онзагера. Такая независимость означает инвариантность в определенных пределах типа и содержания РЭС, условий ее взаимодействия со средой, вида и масштаба рассматриваемых процессов. По времени релаксации, наблюдаемые эволюционные процессы в производстве и техническом обслуживании РЭС и соответствующие им модели имеют отношение к расходованию ресурса и изменению физической структуры РЭС.

Термодинамический и образный подход не противоречат часто используемой на практике статистической теории эволюционных процессов. Здесь временная зависимость параметров среды, в которой происходят эти процессы имеет детерминированную и случайную составляющие, что дает возможность универсальным образом описать изменение параметров РЭС с использованием вероятностных оценок их поведения.

В рамках термодинамического подхода становится возможным использование известных моделей эволюционных процессов, происходящих в среде, в которой имеется некоторое количество неравновесных состояний – дислокаций, градиентов концентраций и т.д. В первую очередь здесь можно увидеть наличие двух неравновесных фаз, которые имеют границу, изменяющуюся со временем. Наличие неравновесных состояний ведет к развитию процессов переноса вещества (диффузия, электромиграция и др.), и к химическим реакциям, протекающим в объеме и на поверхности материальной среды РЭС. Очевидно, можно использовать представление о среде существования РЭС как об объекте, в котором находятся части непрореагировавшего вещества (НВ) и прореагировавшего вещества (ПВ), которые изменяются с течением времени, и эти изменения происходят в соответствии с закономерностями протекания реальных реакций [7]. Часть НВ может служить мерой ресурса РЭС.

При отображении предлагаемой модели представляется результативным использование концепции, которая предусматривает отображение информации в виде области признакового пространства. При этом наблюдается, имеющее прямой смысл для оценки технического состояния РЭС, изменение области контролируемых параметров, появляется возможность отображения информации о расходовании ресурса и прогнозировании отказов РЭС. Изображаемая предельная область является подобной реальной физической среде

“телом”, в которой происходят подобные реальным физические процессы. Область, соответствующая реальным параметрам, имеет отличные от окружающей среды свойства. Тогда процесс изменения наблюдаемого изображения дает представление о расходовании ресурса РЭС. Очевидно, сопоставляя динамику ресурса и объема ПВ, который в условиях нормировки области граничных значений параметров приближается к единичному значению, можно увидеть аналогию между ресурсом и объемом, т. е. в поле зрения попадает изображение ресурса.

Таким образом, целесообразность использования термодинамического подхода при описании наблюдаемых процессов, основана на аналогии в поведении энтропии, термодинамических параметрах среды и реальных параметров РЭС.

Выводы

Рассмотрено использование законов неравновесной термодинамики для определения связи между контролируемыми параметрами РЭС и отображаемой среды, а так же построение детерминированной термодинамической модели процессов расходования технического ресурса РЭС. Данная модель основана на наблюдаемых закономерностях изменения объема отображаемой области, в соответствии с принципами поведения термодинамических параметров, характеризующих состояние реальной среды (энтропии, количества теплоты и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Чаплыгин, Д.Ю. Имитационная модель динамики отказов и восстановления работоспособности сложных радиоэлектронных систем [Текст] / Д.Ю. Чаплыгин, П.Б. Абрамов, В.В. Цветков // Математическое моделирование систем обработки информации и управления: Сборник научных трудов. Воронеж. ин-т МВД России.– 2001. – С. 14–19.
2. Черняев, В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА [Текст] / В.Н. Черняев. – М.: Высш. Шк., 1987. – 376 с.
3. Андрусевич, А.А. Основы теории и практика мониторинга жизненного цикла радиоэлектронных средств на этапах проектирования, производства и эксплуатации: монография [Текст] / А.А. Андрусевич, И.Ш. Невлюдов. – Харьков: Коллегиум, 2011 – 292 с.
4. Андрусевич, А.А. Алгоритм работы системы мониторинга расходования ресурса радиоэлектронных средств / А.А. Андрусевич, И.Ш. Невлюдов // «Радиоелектронні і комп'ютерні системи». – 2012. – № 1. – С. 7–10.
5. Сотсков, Б.С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники [Текст] / Б.С. Сотсков. - М.: Высш. шк., 1970. - 270 с.
6. Огарков, М.А. Методы статистического оценивания параметров случайных процессов [Текст] / М.А. Огарков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
7. Андрусевич, А.А. Мониторинг живучести радиоэлектронных средств при эксплуатации / А.А. Андрусевич, Е.П. Второв // Прикладная радиоэлектроника: науч.–техн. журнал. – 2012. – № 1. – С. 95–99.