

В. В. НЕВЛЮДОВА

Украина, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

E-mail: tapr@khture.kharkov.ua

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

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

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

Технический ресурс радиоэлектронных средств (**РЭС**) — один из важнейших показателей долговечности, характеризующий наработку объекта от начала или возобновления эксплуатации до наступления предельного состояния, под которым понимают полную или частичную потерю изделием работоспособности вследствие ухода одного или нескольких параметров за пределы установленных норм. Исходя из этого, прогнозирование расходования технического ресурса является важной технической задачей и дает возможность повысить надежность работы РЭС.

В настоящее время для прогнозирования расходования технического ресурса РЭС предлагаются методы, основанные на интерполяции случайных реализаций временных функций, получаемых в процессе наблюдения за параметрами в начальной и последующих стадиях жизненного цикла РЭС [1]. Однако достоверность такого прогноза незначительна и не отвечает требованиям при решении практических задач обеспечения надежности РЭС.

Другие методы прогнозирования основаны на принципах распознавания, где может быть задействован человек, который наблюдает за процессом и оценивает состояние РЭС на основе этих наблюдений и анализа ситуации — лицо, принимающее решение (**ЛПР**). Этот подход принят в качестве основного для прогнозирования процессов, происходящих в сложных системах [2, 3]. Поведение ЛПР и его решения должны подчиняться представлениям о некоторой детерминированной модели процесса. Существует связь между детерминированностью и получением достоверного прогноза. Детерминированность в этом случае предполагает использование адекватной кинетической модели развития дефектов и отображение информации, которая должна со-

ответствовать модели процесса, т. е. отражать изменение состояния объекта [4, 5].

В настоящей работе исследуется возможность прогнозирования технического состояния РЭС на основе модели процесса расходования их ресурса, основанной на термодинамическом подходе к описанию деградационных процессов, порождающих случайную составляющую во временной зависимости изменения параметров РЭС. Эта составляющая и определяет точность прогнозирования.

Модель технического ресурса затрагивает существование 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.

Существование РЭС можно рассматривать как становление ресурса в процессе создания средства и расходование ресурса в процессе его эксплуатации. Кинетику расходования ресурса можно охарактеризовать функционалом от показателей надежности, в частности [6]

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

где t — время;

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

Z — мера расхода ресурса;

P — вероятность безотказной работы;

λ — интенсивность отказов как скорость расходования ресурса в статистическом смысле.

В реальной среде для конкретных типов материалов, узлов и изделий радиоэлектронное средство 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 наведенные тепловые и электрические поля оказывают влияние на развитие процессов переноса и на скорость химических реакций. Наведенные поля вызывают так называемые эффекты наложения, такие как эффект Пельтье, эффект, вызывающий поток тепла из-за градиента концентраций, электродиффузия и др. [7].

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, которое устанавливает поведение функции состояния системы, называемой энтропией S , и в соответствии с которым для изолированных систем справедлива запись $dS \geq 0$.

Процесс появления неоднородности структуры РЭС можно трактовать как нарушение равновесного состояния термодинамической системы, что приводит к изменению энтропии. Следовательно, с физической точки зрения процесс расходования ресурса и жизненный цикл РЭС можно рассматривать как процесс необратимого изменения (эволюции или деградации) термодинамического состояния объекта, т. е. как процесс производства энтропии dS/dt . Эта величина характеризует многообразные необратимые физико-химические процессы 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 и $\lambda(t, T)$.

На рисунке, где представлены возможные реализации dS/dt , линия T_1 соответствует экспоненциальному распределению вероятности безотказной работы, T_2 — закону распределения Вейбулла [8].

При описании процессов расходования ресурса представляется целесообразным использование термодинамического подхода, где в форме второго начала термодинамики постулируется характерная для рассматриваемых реакций необратимость энтропии как функция состояния системы, несимметричная относительно времени.

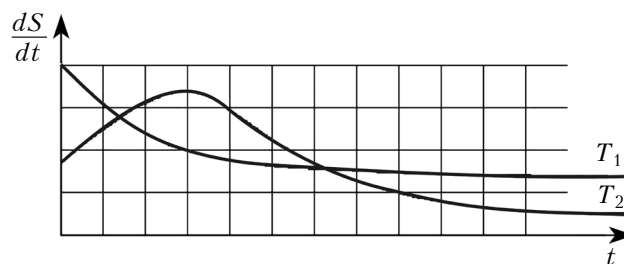


График изменения ресурса РЭС

Термодинамический подход, основанный на необратимости физических процессов, объединяет в себе уравнения баланса, классическую термодинамическую теорию устойчивости, флуктуационную и эволюционную теории. Такое обобщение 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. Согласно второму началу 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 масштабы существенно различаются, что является основанием для введения временной иерархии и, соответственно, понятия временной организации физических систем в общем и РЭС в частности.

Конечность значения производной энтропии по времени дает основание предположить, что процессы эволюции термодинамических систем носят монотонный релаксационный характер. Этот вывод совпадает с выводами, следующими из статистической теории. Уравнения Онзагера [9] 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;

τ_k — время 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 «деградационные процессы», учитывая закономерный, направленный характер необратимых процессов изменения термодинамического состояния РЭС.

В неравновесной термодинамике тождественно справедливы критерии эволюции. При этом подразумевается, что соотношения между потоками и силами справедливы вблизи как равновесных, так и 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.

Соответствие критериям эволюции свидетельствует о 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 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. Такая «самоорганизация» имеет непосредственное отношение к локальным отказовым процессам в РЭС, например к электрическому пробоя изолирующих слоев больших интегральных схем.

В соответствии с макроскопическим подходом затухание флуктуаций для устойчивых состояний термодинамических систем подчиняется релаксационным законам необратимых про-

цессов. При этом макроскопические неравновесные состояния и соответствующие им необратимые процессы интерпретируются как крупномасштабные флуктуации.

Масштабы флуктуационных процессов определяются микроскопичностью объектов и применимости феноменологических параметров и соотношений неравновесной термодинамики. Для объектов РЭС условия возникновения мелкомасштабных флуктуаций должны однозначно выполняться, поскольку функциональные процессы в 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 в процессах измерения, 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 увеличение влияния деградационных процессов существенно опережает увеличение влияния флуктуационных процессов [10, 11].

С термодинамической точки зрения процесс измерения имеет ряд особенностей. Во-первых, существует непосредственная взаимосвязь между энтропийными и информационными характеристиками процессов измерения, передачи и обработки информации. Пределы точности измерений определяются рассмотренными выше ограничениями — крупномасштабными термодинамическими (kT) и мелкомасштабными квантовыми ($h/\Delta t$). 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 — минимальное регистрируемое изменение y .

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

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

Таким образом, при отображении процессов развития производственных дефектов должен учитываться эволюционный и флуктуационный характер процессов. Релаксационный характер крупномасштабных процессов обусловлен свойствами неравновесных состояний физических систем. Существенную роль играет то, что экспоненциальная форма решений уравнения (2) не зависит от конкретного вида исходных уравнений Онзагера. Это означает инвариантность (в определенных пределах) типа и содержания РЭС, условий его взаимодействия со средой, вида и масштаба рассматриваемых процессов. Судя по времени релаксации, можно сделать вывод, что наблюдаемые эволюционные процессы в производстве и техническом обслуживании РЭС и соответствующие им модели имеют отношение к расходование 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 изменяющиеся с течением времени части непрореагировавшего и прореагировавшего вещества, при этом изменения происходят в соответствии с закономерностями протекания реальных реакций [12]. Часть непрореагировавшего вещества 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 изменение области контролируемых параметров, имеющее

прямой смысл для оценки технического состояния РЭС, появляется возможность отображения информации о расходовании ресурса и прогнозирования отказов РЭС. Изображаемая предельная область является подобием «тела» в реальной физической среде, в котором происходят реальные 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 изменения ресурса и объема прореагировавшего вещества, который в условиях нормировки области граничных значений параметров приближается к единице, можно увидеть аналогию между ресурсом и объемом, т. е. в поле зрения попадает изображение ресурса.

Выводы

Таким образом, исследования подтвердили возможность использования термодинамического подхода при описании деградиационных процессов, что основано на аналогии в поведении энтропии, термодинамических параметров среды и реальных параметров РЭС.

Предложенная детерминированная термодинамическая модель процессов расходования технического ресурса РЭС учитывает ошибки, вызванные нестабильностью внешних воздействий, и погрешности измерений и дает возможность наблюдать и учитывать изменение технического ресурса при проектировании РЭС.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. — Москва: Радио и связь, 1991.
2. Стрельников В. П., Федухин А. В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов систем. — Киев: Логос, 2002.
3. Андрусевич А. А., Невлюдов И. Ш., Роздоловский Ю. М., Второв Е. П., Сотник С. В. Оценивание свойств материалов, образующих монтажные соединения электронной техники // Технология приборостроения. — 2005. — № 2. — С. 51—59.
4. Андрусевич А. А., Невлюдов И. Ш., Омаров М. А., Второв Е. П. Методы термодинамики при моделировании процесса расходования ресурса электронной аппаратуры // Технология приборостроения. — 2007. — № 2. — С. 10—12.
5. Андрусевич А. А., Невлюдов И. Ш. Алгоритм работы системы мониторинга расходования ресурса радиоэлектронных средств // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. — 2012. — № 1. — С. 7—10.
6. Чаплыгин Д. Ю., Абрамов П. Б., Цветков В. В. Имитационная модель динамики отказов и восстановления работоспособности сложных радиоэлектронных систем // В сбор. науч. трудов: Математическое моделирование систем обработки информации и управления. — Воронеж: ин-т МВД России. — 2001. — С. 14—19.
7. Черняев В. Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. — Москва: Высш. шк., 1987.
8. Невлюдов И. Ш., Роздоловский Ю. М., Андрусевич А. А. Гетерогенные модели развития производственных дефектов // Авиационно-космическая техника и технология. — Харьков: ХАИ. — 2003. — № 38. — С. 114—119.
9. Невлюдов И. Ш., Второв Е. П., Роздоловский Ю. М. Кинетические модели развития дефектов, возникающих в производстве электронной техники // Авиационно-

космическая техника и технология. — Харьков: ХАИ. — 2003. — № 39. — С. 76–81.

10. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. — Москва: Высш. шк., 1970.

11. Огарков М. А. Методы статистического оценивания параметров случайных процессов. — Москва: Энергоатомиздат, 1990.

12. Невлюдов И. Ш., Роздоловский Ю. М. Отображение процессов проявления технологической наследственности электронной техники // Науч.-техн. сб. «Радиотехника». — Харьков: ХНУРЕ. — 2003. — № 133. — С. 218–221.

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.04 2014 г.

В. В. НЕВЛЮДОВА

Україна, Харківський національний університет радіоелектроніки

E-mail: tapr@khture.kharkov.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО РЕСУРСУ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

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

Ключові слова: термодинамічна модель, процес витрачання ресурсу, деградаційні процеси.

DOI: 10.15222/TKEA2014.4.03

UDC 621.7.073-52

V. V. NEVLYUDOVA

Ukraine, Kharkov national university of radio electronics

E-mail: tapr@khture.kharkov.ua

MODELING OF USEFUL OPERATING LIFE OF RADIOELECTRONICS

The author considers the possibility of using the laws of nonequilibrium thermodynamics to determine the relationship between controlled parameters of radioelectronics and the displayed environment, as well as the construction of a deterministic model of the processes of manufacturing defects development. This possibility is based on the observed patterns of change in the amount of content area, in accordance with the principles of behavior of the thermodynamic parameters characterizing the state of the real environment (entropy, the quantity of heat, etc.). The equation for the evolution of the technical state of radioelectronics is based on the deterministic kinetic model of the processes occurring in the multi-component environment, and on the observation model, which takes into account the errors caused by external influences instability and uncertainty.

Keywords: thermodynamic model, the process of spending resource, degradation processes.

REFERENCES

1. Davydov P.S. *Tekhnicheskaya diagnostika radioelektronnykh ustroystv i sistem*. [Technical diagnostics of electronic devices and systems]. Moscow, Radio and communication, 1991, 256 p. (in Russian)

2. Strel'nikov V.P., Fedukhin A.V. *Otsenka i prognozirovaniye nadezhnosti elektronnykh elementov sistem* [Evaluation and prediction of reliability of electronic systems elements]. Kiev, Logos, 2002, 486 p. (in Russian)

3. Andrushevich A. A., Nevlyudov I. Sh., Rozdolvskii Yu. M., Vtorov E. P., Sotneyk S. V. [Estimating properties of the materials forming wirings of electronic equipment]. *Tekhnologiya priborostroeniya*. 2005, no 2, pp. 51–59. (in Russian)

4. Andrushevich A. A., Nevlyudov I. Sh., Omarov M. A., Vtorov E. P. [Thermodynamics methods in modeling the process of spending life electronic equipment]. *Tekhnologiya priborostroeniya*. 2007, no 2, pp. 10–12. (in Russian)

5. Andrushevich A. A., Nevlyudov I. Sh. [How the system will monitor the resource consumption of electronic equipment]. *Radioelektronni i komp'yuterni sistemi*. 2012, no 1, pp. 7–10. (in Russian)

6. Chaplygin D. Yu., Abramov P. B., Tsvetkov V. V. [Simulation model of the dynamics of failure and disaster recovery of complex electronic systems]. *Matematicheskoe modelirovaniye sistem obrabotki informatsii i upravleniya: Sbornik nauchnykh trudov*. Voronezh. in-t MVD Rossii. 2001, pp. 14–19. (in Russian)

7. Chernyaev V.N. *Fiziko-khimicheskie protsessy v tekhnologii REA* [Physico-chemical processes in the technology of electronic equipment]. Moscow, Higher School, 1987, 376 p. (in Russian)

8. Nevlyudov I.Sh., Rozdolvskii Yu.M., Andrushevich A.A. [Heterogeneous model of development production of defects]. *Nauch.-tekhn. zhurnal. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. Khar'kov: «KHAI». 2003, no 38, pp. 114–119. (in Russian)

9. Nevlyudov I.Sh., Vtorov E.P., Rozdolvskii Yu.M. [Kinetic models of development defects arising in the manufacture of electronic equipment]. *Nauch.-tekhn. zhurnal. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. Khar'kov: «KHAI». 2003, no 39, pp. 76–81. (in Russian)

10. Sotnikov B.S. *Osnovy teorii i rascheta nadezhnosti elementov i ustroystv avtomatiki i vychislitel'noi tekhniki*. [Fundamentals of the theory and calculation of reliability of the components and devices of automation and computing]. Moscow, Vissaya shkola, 1970, 270 p. (in Russian)

11. Ogarkov M.A. *Metody statisticheskogo otsenivaniya parametrov sluchainykh protsessov* [Statistical methods for estimating the parameters of stochastic processes]. Moscow, Energoatomizdat, 1990, 208 p. (in Russian)

12. Nevlyudov I. Sh., Rosdolvsky Y. M. [Mapping processes of manifestations technological heredity electronic equipment]. *Nauch.-tekhn. sb. «Radiotekhnika»*. Khar'kov, KHNURE, 2003, no 133, pp. 218–221. (in Russian)