

УДК 621.7.073-52

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

А. А. Андрусевич, Н. Г. Стародубцев, Д. В. Мосьпан, В. В. Невлюдова
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
просп. Ленина, 14, г. Харьков, 61166, Украина. E-mail: tapr@kture.kharkov.ua

Рассматривается возможность использования законов неравновесной термодинамики для определения связи между контролируемыми параметрами радиоэлектронных средств и отображаемой среды, а также построение детерминированной термодинамической модели процессов развития производственных дефектов. Эта возможность основана на наблюдаемых закономерностях изменения объема отображаемой области в соответствии с принципами поведения термодинамических параметров, характеризующих состояние реальной среды, например: энтропии, количества теплоты и т.д. Предложены уравнение эволюции технического состояния радиоэлектронных средств, основанное на детерминированной кинетической модели процессов, происходящих в многокомпонентной среде, и модель процесса расходования ресурса радиоэлектронных средств, основанная на термодинамическом подходе при описании деградационных процессов, которые ограничивают время работы аппаратуры.

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

ТЕРМОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ВИРОБНИЧИХ ДЕФЕКТІВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

А. О. Андрусевич, М. Г. Стародубцев, Д. В. Мосьпан, В. В. Невлюдова
Харківський національний університет радіоелектроніки
просп. Леніна, 14, м. Харків, 61166, Україна. E-mail: tapr@kture.kharkov.ua

Розглядається можливість використання законів нерівноважної термодинаміки для визначення зв'язку між контрольованими параметрами радіоелектронних засобів і середовища, що відображається, а також побудова детермінованої термодинамічної моделі процесів розвитку виробничих дефектів. Ця можливість заснована на спостережуваних закономірностях зміни обсягу відображуваної області відповідно до принципів поведінки термодинамічних параметрів, що характеризують стан реального середовища, наприклад: ентропії, кількості теплоти й т.ін. Запропоновано рівняння еволюції технічного стану радіоелектронних засобів, що ґрунтується на детермінованій кінетичній моделі процесів, які відбуваються в багатокомпонентному середовищі, та модель процесу витрачання ресурсу радіоелектронних засобів, заснована на термодинамічному підході при описанні деградаційних процесів, які обмежують час роботи апаратури.

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

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время для всеобъемлющей характеристики возможностей технических объектов, в том числе радиоэлектронных средств (РЭС), находит применение понятие жизненного цикла (ЖЦ) [1–3]. Начало и конец ЖЦ РЭС сопровождается становлением ее качественных показателей на стадии создания, а затем моральным и физическим старением на стадии эксплуатации. Процессы становления и старения РЭС носят объективный характер, являются проявлением закономерностей научно-технического прогресса и физических процессов.

Модель ЖЦ РЭС 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, что может составить содержательную сторону мониторинга ЖЦ РЭС.

Целью работы является исследование возможности использования законов неравновесной термодинамики для определения связи между контролируемыми параметрами РЭС и отображаемой сре-

ды, а также построение детерминированной термодинамической модели процессов развития производственных дефектов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Существование РЭС по отношению к ЖЦ 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 [4],

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

где $Z(t, T)$ – мера расхода ресурса; T – характеристика взаимодействия объектов со средой (нагрузки) или характеристика внутренних факторов (в том числе 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 Пельтье, эффект, вызывающий поток тепла из-за градиента концентраций, электродиффузия и т.д.

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 и жизненный цикл РЭС можно рассматривать как интегральный процесс необратимого изменения (эволюции или деградации) термодинамического состояния объекта, т.е. процесс 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 – закону распределения Вейбулла.

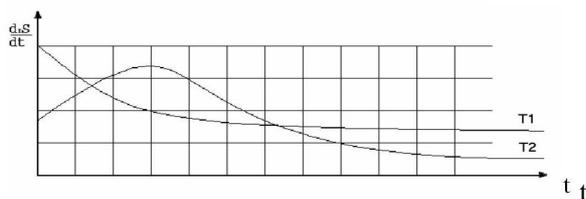


Рисунок 1 – График изменения ресурса РЭС

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 макро-скопического 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 вообще 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 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. 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 применимости 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.

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, а также ($h / \Delta t$) – 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:

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

где y – макроскопический параметр системы; Δy – минимально-регистрируемое изменение y .

Из выражения (3) 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 $\tau = 10^{-1} - 10^3 \text{ н}$; процессы изменения физической структуры $\tau = 10^{-10^3} \div$; процессы расходования ресурса $\tau = 10^4 - 10^6 \div$.

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 Озагера. 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 подходы не противоречат часто используемой на практике статистической теории эволюционных процессов. Здесь временная зависимость параметров среды, в которой они происходят, 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. 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 подобным 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.

Это соответствие можно продемонстрировать данными, приведенными в табл. 1.

Таблица 1 – Соответствие между моделями процессов изменения состояния РЭС

Среда и процессы	Реальная среда	Отображаемая среда	Термодинамическая среда	Эволюционный процесс	Распознавание образов
Реакции и их описание	Гомогенные реакции	Изменение части НВ	Эволюция	Детерминированная составляющая	Изменение образа
	Гетерогенные реакции	Возникновение части ПВ	Флуктуации	Случайная составляющая	Базовая точка образа

В течение всего времени жизни РЭС его компоненты необратимо стремятся к состоянию термодинамического равновесия, совершая некоторую работу по перестройке его структуры. Работа по

перестройке структуры тела, согласно второму закону термодинамики, определяется энтропией, значение которой можно принять за параметр состояния.

Термодинамический подход позволяет учесть влияние производственных дефектов на деградационные процессы, участвующие в формировании разных механизмов отказов, и осуществлять достоверный прогноз технического состояния контролируемого объекта.

В соответствии с принципами неравновесной термодинамики, в уравнение баланса энтропии

$$\frac{\partial \rho s}{\partial t} + \nabla \vec{J}_s = \sigma,$$

где ρ – плотность массы; s – удельная энтропия; \vec{J}_s – вектор удельной плотности потока энтропии; σ – плотность источника энтропии, может войти „внутренний источник”, обеспечивающий ее производство.

Плотность этого источника определяется выражением [5]

$$\sigma = \sum_{i=1}^m J_i F_i. \quad (4)$$

Плотность источника энтропии, так же как и связанное с этим рассеяние энергии $T\sigma$, определяются набором термодинамических потоков J_i и соответствующих термодинамических сил F_i , согласно билинейной форме (4).

Одновременное превращение в нуль независимых потоков и сил при переходе системы в равновесное состояние, для которого $\sigma = 0$, и условия второго закона термодинамики ($\sigma \geq 0$) для неравновесных систем, дает основание к использованию уравнений Онзагера при определении зависимости между силами и возникающими за счет этих сил потоками в линейном приближении:

$$J_i = \sum_{k=1}^m M_{ik} F_k, \quad (5)$$

где J_i – поток составляющих термодинамической среды (скорость изменения параметров, характеризующих состояние среды, вещества, зарядов, тепла и т.д.), который в конечном итоге определяет скорость изменения параметров ЭТ; F_k – термодинамические силы (градиенты концентраций, напряжений, температуры и т.д.); M_{ik} – линейные феноменологические коэффициенты.

Примерами феноменологических коэффициентов могут служить коэффициенты диффузии, теплопроводности и т.п.

Частными случаями уравнений Онзагера и результатов их применения являются известные феноменологические зависимости, например:

– перенос количества движения mv в направлении оси x характеризуется потоком \vec{J}_{mv} и термодинамической силой $\frac{\partial v}{\partial x}$:

$$\vec{J}_{mv} = -lvCm \frac{\partial v}{\partial x},$$

где l – длина свободного пробега; C – концентрация частиц;

– перенос теплоты (закон Фурье):

$$\vec{J}_q = -\lambda \nabla T,$$

где \vec{J}_q – плотность теплового потока; λ – коэффициент теплопроводности;

– перенос частиц в среде, или диффузия (закон Фика):

$$\vec{J}_c = -D \frac{\partial C}{\partial x},$$

где D – коэффициент диффузии, равный lv ;

– перенос электрического заряда (закон Ома):

$$\vec{J}_e = -\sigma \frac{\partial U}{\partial x},$$

где U – потенциал электрического поля; σ – коэффициент электропроводности, равный $lv_e C_e$.

Фундаментальным принципом термодинамического подхода является справедливость выражения (5) для всех видов параметров, характеризующих состояние среды. В разрабатываемой модели процесса в качестве параметра V , характеризующего состояние среды, предлагается использовать часть ПВ, которая характеризуется объемом в многомерном или площадью (двухмерным объемом) в двухмерном пространствах.

Скорость изменения части ПВ dV/dt можно рассматривать как поток. Так как источником прореагировавшего вещества является среда, содержащая непрореагировавшее вещество, термодинамическая сила будет зависеть от V ; так, при $V = 0$ процесс прекращается.

Неравновесная термодинамика допускает рассмотрение перехода системы из возбужденного состояния в равновесное как релаксацию, а время и скорость этого перехода – как характеристику времени и скорости релаксации. При этом неотъемлемой частью перехода является флуктуация параметров системы.

Для учета релаксационного и флуктуационного характера реакций, происходящих в термодинамической среде, в рамках детерминированного подхода можно принять комбинированную термодинамическую модель, когда возникающая в соответствии с гетерогенной моделью точка становится центром элементарной области прореагировавшего вещества (ЭОПВ), развивающейся в соответствии с гомогенной моделью. Площадь ЭОПВ должна зависеть от приращения параметров δx^i , а ее форма определяется детерминированной и корреляционной связью между параметрами (x^i и x^j в двумерном случае), в конечном итоге можно предположить – формой граничной области. Так как при выборе параметров предлагается ориентироваться

на отсутствие корреляционной связи, то эта форма чаще всего будет прямоугольной. Множество отображаемых в различные моменты времени наблюдения областей можно рассматривать как общий объем (площадь) ПВ, образованный соответствующими ЭОПВ, результирующая форма всей области ПВ будет в виде многоугольника, образованного объединением большого количества ЭОПВ.

Полное уравнение эволюции и модель наблюдения должны учитывать распределение термодинамических параметров в соответствии с законами статистической физики, а также ошибки, вызванные нестабильностью внешних воздействий и неточностями измерений. Это приводит к появлению случайной составляющей модели и к случайным ошибкам при решении задач предсказания и обуславливает необходимость обеспечения гарантией принимаемых решений о техническом состоянии РЭС. Для определения случайной составляющей рассматриваемой модели можно использовать алгоритм оценивания и предсказания процесса эволюции на основе методов оптимальной фильтрации [7].

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

ВЫВОДЫ. Использование принципов образного анализа при решении задачи отображения информации о процессе развития производственных дефектов дает возможность с большой степенью наглядности наблюдать состояние РЭС. Здесь отображаются признаковое пространство и области, соответствующие граничным и реальным контролируемым значениям параметров РЭС, во время производства и эксплуатации РЭС изменяется конфигурация области, имеет место изменение размеров и очертаний этой области, а также движение ее в определенном направлении. Наблюдая динамику развития этой области, можно извлекать полезную информацию об изменении параметров РЭС. Так, положение этой области относительно границ объекта характеризует состояние РЭС в части возможности появления отказов и дает возможность в рамках детерминированного представления принимать соответствующие решения о корректировке технологических процессов.

В предлагаемой модели процесса развития производственных дефектов представляется результативным использование концепции, которая предусматривает отображение информации в виде области признакового пространства. Предельная область подобна реальной физической среде, в которой происходят подобные реальным физические процессы. Область, соответствующая реальным параметрам, имеет отличные от окружающей среды свойства. Такая аналогия делает возможным использование известных моделей эволюционных процессов, происходящих в неравновесной среде.

Предлагается использовать представление об отображаемой области как об объекте, в котором находятся части НВ и ПВ, которые изменяются с течением времени, и эти изменения происходят в соответствии с закономерностями протекания реальных реакций.

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

Полное уравнение эволюции и модель наблюдения должны учитывать флуктуации термодинамических параметров, а также ошибки, вызванные нестабильностью внешних воздействий и неточностями измерений. Это приводит к появлению случайной составляющей модели и к случайным ошибкам при решении задач предсказания и обуславливает необходимость обеспечения гарантией принимаемых решений о техническом состоянии РЭС.

Таким образом, основанием для использования предлагаемой концепции является соответствие реакций, происходящих в реальной и отображаемых средах, а также методов их описания с помощью феноменологических теорий: термодинамической, эволюционных процессов и распознавания образов. Принятая концепция отображения реальной среды, изменение которой приводит к изменению параметров РЭС, дает возможность наблюдать изменение ресурса РЭС на всех стадиях ЖЦ РЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касьян К.Н., Касьян Н.Н. Программная и информационная поддержка диагностирования на этапе сопровождения радиоэлектронных средств // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – 2014. – Вып. 2/2014 (68), часть 2. – С. 29–33.
2. Андрусевич А.А., Второв Е.П. Мониторинг живучести радиоэлектронных средств при эксплуатации // Прикладная радиоэлектроника. – 2012. – Т. 11. – Вып. 1. – С. 95–99.
3. Сидорин А.В., Сидорин В.В., Покровская М.В. Проектирование и разработка радиоэлектронных средств в научно-производственно-образовательном кластере // Мир науки: научный интернет-журнал. – 2014. – Вып. 3. – С. 1–17. – Режим доступа: <http://mir-nauki.com/PDF/11EMN314.pdf>
4. Чаплыгин Д.Ю., Абрамов П.Б., Цветков В.В. Имитационная модель динамики отказов и восстановления работоспособности сложных радиоэлектронных систем // Математическое моделирование систем обработки информации и управления: сборник научных трудов. – Воронеж: ин-т МВД России, 2001. – С. 14–19.
5. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. – М.: Изд-во «Мир», 1974. – 304 с.

6. Андрусевич А.А., Невлюдов И.Ш., Роздоловский Ю.М. и др. Оценивание свойств материалов, образующих монтажные соединения электронной техники // Технология приборостроения.

– 2005. – Вып. 2. – С. 51–59.

7. Огарков М.А. Методы статистического оценивания параметров случайных процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.

THERMODYNAMIC MODEL OF PRODUCTION PROCESSES DEFECTS RADIO-ELECTRONIC MEANS

A. Andrushevich, N. Starodubtsev, D. Mospan, V. Nevlyudova

Kharkov National University of Radioelectronics

prosp. Lenina, 14, Kharkov, 61166, Ukraine. E-mail: tapr@kture.kharkov.ua

There is the possibility to use the laws of nonequilibrium thermodynamics to determine the relationship between controlled parameters and displayed electronic warfare environment, as well as the construction of a deterministic thermodynamic model development processes of manufacturing defects. This possibility is based on observed patterns of change in the amount of content area, in accordance with the principles of the behavior of the thermodynamic parameters characterizing the state of the real environment, example entropy, the quantity of heat, etc. An equation for the evolution of the technical state of radio electronic means is based on a deterministic kinetic model of the processes occurring in a multicomponent environment and resource consumption of the process model of radio electronic means, is based on the thermodynamic approach in describing the degradation processes that limit the work equipment.

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

REFERENCES

1. Kasyan, K.N. and Kasyan, N.N. (2014), "Software and information support to the diagnosis phase tracking radio-electronic means", *Vostochnoevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, Vol. 2, no. 68, pp. 29–33. (in Russian)

2. Andrushevich, A.A. and Vtorov, E.P. (2012), "Monitoring of the survivability of radio electronic facilities in operation", *Prikladnaya radioelektronika*, Vol. 11, no. 1, pp. 95–99. (in Russian)

3. Sidorin, A.V., Sidorin, V.V. and Pokrovskaya, M.V. (2014), "Design and development of radio-electronic means in scientific production and educational clusters", *Mir nauki: nauchnyy internet-zhurnal*, Vol. 3, pp. 1–17, available at: <http://mir-nauki.com/PDF/11EMN314.pdf> (accessed September 15, 2014)

4. Chaplygin, D.Ju., Abramov, P.B., and Tsvetkov, V.V. (2001), "Simulation model of the dynamics of failure and disaster recovery of complex electronic systems", *Matematicheskoe modelirovanie sistem obrabotki informatsii i upravleniya: sbornik nauchnyh trudov, Voronezh. in-t MVD Rossii*, pp. 14–19. (in Russian)

5. Dyarmati, I. (1974), *Neravnovesnaya termodinamika. Teoriya polya i variatsionnye printsipy* [Nonequilibrium thermodynamics. Field theory and variational principles], Mir, Moscow. (in Russian)

6. Andrushevich, A.A., Nevlyudov, I.Sh., Rosdolovsky, Y.M., Vtorov, E.P. and Sotnik, S.V. (2012), "Estimating properties of the materials forming the compound mounting electronic equipment", *Tehnologiya priborostroeniya*, no. 2, pp. 51–59. (in Russian)

7. Ogarkov, M.A. (1990), *Metody statisticheskogo otsenivaniya parametrov sluchaynykh processov* [Methods of statistical estimation of parameters of stochastic processes], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)

Стаття надійшла 18.10.2014.