

# Теоретичні основи розробки систем озброєння

УДК 621.37/39.029.3

А.А. Андрусевич<sup>1</sup>, И.Ш. Невлюдов<sup>2</sup>, И.В. Жарикова<sup>2</sup>, Р.Ю. Аллахверанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Криворожский колледж Национального авиационного университета, Кривой Рог*

<sup>2</sup> *Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков*

## МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСХОДОВАНИЯ РЕСУРСА РЭС В РАМКАХ МОНИТОРИНГА ЕГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

*В статье рассмотрен подход к разработке модели процесса расходования ресурса радиоэлектронного средства (РЭС), основанный на термодинамическом описании физико-химического механизма явлений массопереноса и структурных превращений в материалах, формирующих свойства РЭС и, в результате, значения информативных параметров РЭС. Представленная модель позволяет проводить оценку кинетики деградационных процессов и динамики ресурсных характеристик РЭС в процессе мониторинга жизненного цикла радиоэлектронного изделия на этапе его эксплуатации, а также может быть использована для поиска путей повышения надежности РЭС, в частности, его наработки на отказ.*

**Ключевые слова:** *жизненный цикл, мониторинг, технический ресурс, термодинамическая модель, РЭС.*

### Введение

В настоящее время при решении проблем повышения качества технических средств широко используется концепция жизненного цикла (ЖЦ) технических объектов. Концепция определяет основные принципы организации непрерывной информационной поддержки сложной наукоемкой продукции на всех этапах ее ЖЦ, базирующейся на электронном представлении данных [1].

Мониторинг ЖЦ, базирующийся на моделировании, электронном представлении и использовании информации для обеспечения ЖЦ, выполняет по своему определению функцию по надзору за состоянием объектов, предполагает сбор и обработку информации о ЖЦ и, следовательно, является частью технологий обеспечения качества и живучести РЭС.

К наиболее важным функциям мониторинга, реализуемым в настоящее время, относится контроль и прогнозирование состояния РЭС и процессов обеспечения их ЖЦ.

**Анализ предметной области.** Отличительной особенностью РЭС может являться наличие большого количества контролируемых параметров. Мониторинг, обеспечивающий возможность измерить и зафиксировать значения и скорости изменения параметров РЭС, может обладать дополнительными возможностями, дающими представление о состоянии РЭС при представлении множества параметров как статистического ансамбля.

В науке известен прием, когда описание поведения микроансамбля параметров частиц дает возможность определить макропараметры систем, из них состоящих, создать феноменологическую теорию и использовать для оценки и управления со-

стоянием таких систем. Примером может служить физическая среда, состоящая из атомов и молекул, макропараметрами здесь являются координаты и импульсы этих частиц, феноменологической теорией – термодинамика, макропараметрами – объем, давление, температура и т.п. [2].

**Постановка задачи.** Важной задачей для обеспечения мониторинга ЖЦ РЭС на этапе его эксплуатации является моделирование процесса расходования технического ресурса.

Использование концепции геометрического подхода к распознаванию образов при решении задачи отображения информации дает возможность с большой степенью наглядности наблюдать процесс изменения состояния системы. Здесь отображается признаковое пространство и области соответствующие граничным и реальным контролируемым значениям параметров системы, во время жизненного цикла системы 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 системы. Так, положение этой области относительно границ объекта характеризует состояние системы в части возможности появления отказов и дает возможность в рамках детерминированного представления принимать соответствующие решения.

### Модель процесса расходования ресурса РЭС

В предлагаемой модели процесса, представляется результативным использование концепции, которая предусматривает отображение информации в виде области признакового пространства. При этом

можно наблюдать, как в области, сформированной предельными значениями параметров, зафиксированная в момент наблюдения точка превращается в область, динамика, конфигурация и размеры которой определяются динамикой изменения состояния системы, и может характеризовать процесс расходования ресурса. Этим областям можно присвоить соответствующие названия – область имеющегося ресурса (ИР), область выработанного ресурса (ВР).

Аналогичное изображение можно получить при отображении реального физического процесса происходящего в реальной физической среде, здесь может идти речь о физическом объекте, в котором находятся части взаимно реагирующих веществ, объемы которых изменяются с течением времени, и эти изменения происходят в соответствии закономерностями протекания реальных реакций

Если рассматривать область образованную предельными значениями параметров как некоторую среду, в которой происходит процесс формирования другой среды, то такая аналогия делает возможным использовать известные модели эволюционных процессов, происходящих в среде, в которой имеется некоторое количество неравновесных состояний – дислокаций, градиентов концентраций и т.д. Наиболее подходящей здесь является наличие двух неравновесных фаз, имеющих общую границу, обуславливающую их взаимодействие. 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 системы. В реальной среде соответствующей конкретным типам материалов, элементов, частей системы можно прийти к рассмотрению твердого тела, 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 система находится «под нагрузкой», то на развитие процессов переноса и на скорости химических реакций оказывают влияние наведенные тепловые и электрические и другого типа поля.

Наведенное поле вызывает так называемые эффекты наложения, такие, как эффект Пелтье, эффект, вызывающий поток тепла из-за градиента концентраций, электродиффузия и др. Внутренние процессы и взаимодействие с окружающей средой ведут к необратимому изменению физико-химических свойств материалов. Следствием этих изменений является изменение параметров систем. При достижении одним или несколькими параметрами критических значений наступает отказ.

Можно сделать предположение о возможности использования представления об отображаемой области, как об объекте, в котором находятся части реагирующих веществ, имеющих разные физические свойства, которые изменяются с течением времени, и эти изменения происходят в соответствии закономерностями протекания реальных реакций. Наблюдается при этом, имеющее прямой смысл для оценки технического состояния, изменение области контролируемых параметров систем. Объем вещества, соответствующего разности объемов ИР и ВР может служить мерой ресурса системы. Процесс изменения ВР можно представить как физическую основу модели расходования ресурса системы.

Очевидно, описание всех физико-химических реакций происходящих в материальной среде существования системы может послужить хорошей основой для создания эффективной модели процесса расходования ресурса. Однако для сложных систем такое описание является нереальным. Ситуация соответствует микроскопическому состоянию микромоделей вещества при описании его поведения методами статистической физики. Здесь приходят к макроскопическому описанию состояния системы с помощью макроскопических термодинамических параметров.

Для описания процесса расходования ресурса технических систем представляется возможным использование термодинамического подхода [3-4], 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 теорию. Такое обобщение термодинамики имеет существенное методологическое значение с точки зрения единства макроскопического процессуального описания сложных объектов различной физической природы.

Определение ресурса как функционала от показателей надежности, в частности

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

где  $Z(t, T)$  – ресурс объектов;  $T$  – характеристика взаимодействия объектов со средой (нагрузка);  $P(t, T)$  – вероятность безотказной работы;  $\lambda(t, T)$  – интенсивность отказов как скорость расходования ресурса в статистическом смысле, не противоречит его отображению в принятой концепции.

С физической точки зрения процесс расходования ресурса является интегральным процессом необратимого изменения (эволюции или деградации)

термодинамического состояния каждого объекта, т.е. процессом производства энтропии. Учитывая термодинамический характер феноменологических моделей надежности РЭС, производство энтропии  $dS/dt$  характеризует все многообразие необратимых физико-химических процессов для реальных условий  $T$  взаимодействия каждого объекта со средой и выступает, таким образом, в качестве интегральной скорости расходования ресурса и может иметь такой же характер как  $\lambda(t, T)$ .

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.

Таким образом, основанием для использования предлагаемой концепции является соответствие реакций, происходящих в реальной и отображаемых средах, а так же методов их описания с помощью феноменологических теорий: термодинамической, эволюционных процессов и распознавания образов. Это соответствие можно продемонстрировать табл. 1.

Таблица 1  
Соответствие между моделями процессов изменения состояния РЭС

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

Принятое в концепции отображение изменяющейся, в соответствии с законами термодинамики среды, дает возможность наблюдать процесс расходования ресурса систем и принимать решения в соответствии с принципами работы лица, принимающего решение.

В течение всего времени жизни прибора (элемента) его компоненты необратимо стремятся к состоянию термодинамического равновесия, совершая некоторую работу по перестройке его структуры.

Работа по перестройке структуры тела согласно первому закону термодинамики определяется эн-

тропией, значение которой можно принять за параметр состояний.

Термодинамический подход в принципе позволяет учесть влияние всех деградиционных процессов, участвующих в формировании разных механизмов отказов и осуществлять полный и достоверный прогноз технического состояния контролируемого объекта.

С позиции термодинамического подхода для описания процессов, происходящих в отображаемой среде, сопровождаемых изменением ее внутренних параметров  $V_j$ , характеризующих состояние среды, можно использовать обобщенное уравнение Онзагера [5]

$$I_j = \frac{dV_j}{dt} = \sum_{k=1}^m M_k F_{kj}, \quad (2)$$

где  $I_j$  – поток составляющих термодинамической среды (скорость изменения параметров, характеризующих состояние среды, вещества, зарядов, тепла и т.д.), который определяет скорость изменения параметров  $V_j$ ;  $F_{kj}$  – термодинамические силы (градиенты плотности, напряжений, температуры и т.д.);  $M_k$  – линейные феноменологические коэффициенты.

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

Частными случаями уравнений Онзагера для невзаимодействующих потоков являются известные феноменологические зависимости:

- $\vec{I} \sim \text{grad } P_k$  – закон Фика, описывающий диффузию вещества;
- $\vec{I}_a \sim \text{grad } T$  – закон Фурье для потока тепла;
- $\vec{I}_e \sim \text{grad } \phi$  – закон Ома для потока электронов.

Фундаментальным принципом термодинамического подхода является справедливость выражения (2) для всех видов параметров, характеризующих состояние среды (энтропии, количества теплоты и т.д.).

В разрабатываемой модели процесса в качестве параметра  $V$ , характеризующего состояние среды, предлагается использовать ВР, который характеризуется объемом в многомерном или площадью в двухмерном пространствах.

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

Для учета релаксационного и флуктуационного характера реакций, происходящих в термодинамической среде в рамках детерминированного подхода можно принять комбинированную термодинамиче-

скую модель, когда, возникающая в соответствии с гетерогенной моделью, точка становится началом элементарной области ВР (ЭОВР), развивающейся в соответствии с гомогенной моделью. Площадь ЭОВР должна зависеть от приращения параметров  $\delta x^i$ , а ее форма определяется формой граничной области. Очевидно форма ЭОВР в случае, если площадь её значительно меньше единицы, что в свою очередь имеет место, когда  $\delta x^i$  изменяется незначительно ( $\delta x^i \ll 1$ ) в течении интервала времени  $\delta t$  между соседними наблюдениями, может отличаться от прямоугольной, но это не может привести к существенному искажению при наблюдении процесса, так как результирующая форма всей области ВР, будет в виде многоугольника, образованного объединением большого количества ЭОВР.

Полное уравнение эволюции и модель наблюдения должны учитывать распределение термодинамических параметров в соответствии с законами статистической физики, а так же 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 предложен метод оценивания и предсказания процесса эволюции на основе фильтра Калмана.

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

## Выводы

Предложенная модель процесса изменения технического ресурса на стадии эксплуатации РЭС характеризуется использованием термодинамического описания физико-химического механизма явлений массопереноса и структурных преобразований в материалах, формирующих свойства РЭС и значения информативных параметров РЭС. Это дает возможность проводить оценку кинетики деградационных процессов и динамики ресурсных характеристик РЭС в ходе мониторинга его жизненного цикла. Данный подход может быть использован для разработки методов повышения надежности РЭС, в частности, увеличения времени их наработки на отказ.

## Список литературы

1. Андрусевич, А.А. *Методология решения комплекса функциональных задач мониторинга ЖЦ РЭС: монография* / А.А. Андрусевич. – Киев: КНАУ, 2010. – 164 с.
2. Андрусевич, А.А. *Мониторинг процессов проектирования, производства и эксплуатации жизненного цикла электронной аппаратуры: монография* / А.А. Андрусевич, И.Ш. Невлюдов. – Харьков: ФЛП Цуварев А.Ф., 2009. – 272 с.
3. Андрусевич, А.А. *Алгоритм работы системы мониторинга расходования ресурса радиоэлектронных средств* / А.А. Андрусевич, И.Ш. Невлюдов // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2012. – № 1. – С. 7-10.
4. Андрусевич, А.А. *Методы термодинамики при моделировании процесса расходования ресурса электронной аппаратуры* / А.А. Андрусевич, И.Ш. Невлюдов, М.А. Омаров, Е.П. Второв // *Технология приборостроения*. – 2007. – № 2. – С. 10-12.
5. Пригожин, И. *Введение в термодинамику необратимых процессов* / И. Пригожин. – М.: РХД, 2001. – 160 с.

Поступила в редколлегию 20.08.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.И. Филипенко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## МЕТОДОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИТРАЧАННЯ РЕСУРСУ РЕЗ У РАМКАХ МОНІТОРИНГУ ЙОГО ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

А.О. Андрусевич, І.Ш. Невлюдов, І.В. Жарікова, Р.Ю. Аллахверанов

*У статті розглянуто підхід до розробки моделі процесу витрачання ресурсу радіоелектронного засобу (РЕЗ), що заснований на термодинамічному описі фізико-хімічного механізму явищ масоперенесення та структурних перетворень у матеріалах, що формують властивості РЕЗ і, у результаті, значення інформативних параметрів РЕЗ. Представлена модель дозволяє проводити оцінку кінетики деградаційних процесів і динаміки ресурсних характеристик РЕЗ у процесі моніторингу життєвого циклу радіоелектронного виробу на етапі його експлуатації, а також може бути використана для пошуку шляхів підвищення надійності РЕЗ, зокрема, його напрацювання на відмову.*

**Ключові слова:** життєвий цикл, моніторинг, технічний ресурс, термодинамічна модель, РЕЗ.

## MODELING METHODOLOGY OF RADIOELECTRONIC DEVICES EXPENSE RESOURCE PROCESS FOR ITS LIFE CYCLE MONITORING

A.A. Andrusovich, I.Sh. Nevlyudov, I.V. Zharikova, R.Yu. Allakhveranov

*The development of radioelectronic devices expense resource process model is considered in this article. The model is based on thermodynamics description of physical and chemical mechanism of the phenomena of mass transmission and structural transformations in materials that form device properties and, as a result, values of informing device parameters. The presented model allows conducting the estimation of degradation processes kinetics and dynamics of resource descriptions of device during life cycle monitoring process on the stage of its exploitation, and also can be used for searching of devices reliability increase methods.*

**Keywords:** life cycle, monitoring, technical resource, thermodynamics model, radioelectronic devices.