

Szkoła Główna
Politechniczna z siedzibą
w Nowym Sączu



**GENERAL AND COMPLEX PROBLEMS
OF TECHNICAL SCIENCES: EXPERIENCE
OF EU COUNTRIES AND IMPLEMENTATION
IN THE PRACTICE OF UKRAINE**

Collective monograph

Nowy Sącz, Poland
2019

*Recommended for publication
by the Academic Council of Polytechnic University
with headquarters in Nowy Sącz*

Responsible for release: prof. nadzw. dr inż. **Sameer Ayyoub**, rector,
Polytechnic University with headquarters in Nowy Sącz

General and complex problems of technical sciences: experience of EU countries and implementation in the practice of Ukraine : Collective monograph. Riga : Izdevniecība "Baltija Publishing", 2019. 384 p.

CONTENTS

Каталітичні властивості й утрати платиноїдів у процесі окиснення аміаку Авіна С. І.	1
Electronics and high-voltage pulse technique for preservation of foodstuffs, water disinfection and purification, and conversion of gas emissions of various productions Boyko M. I., Makogon A. V.	20
The method of translation the additive and multiplicative error of a torque measuring means in the instrumental component of measurement uncertainty Vasilevskyi O. M., Didych V. M.	40
Problems of computer modeling of nonlinear filtration processes of underground hydrodynamics Hladka O. M., Karpovych I. M.	58
Шкіряні натуральні матеріали поліфункціонального призначення Данилкович А. Г., Ліщук В. І.	77
Integrated approach to the modernization of preparation technology of bentonite solutions for trenchless communications Dmytriieva N. V., Agafonova I. P.	102
Formula development of the nutritional paste of a high biological value Kolesnichenko S. L., Dzyuba N. A.	120
Перспективні тенденції формування сучасних міських утворень на основі низьковуглецевої стратегії розвитку Крижановська Н. Я., Смірнова О. В.	135
Use of pea concentrate in mixed fodder's production Makarynska A. V., Turpurova T. M.	152
Анализ и выбор концептуальных моделей процессов развития производственных дефектов и отображения информации о техническом состоянии РЭА Невлюдова В. В., Моспан Д. В.	170
Математична модель віброагрегата з ланцюгово-розгалуженим способом з'єднання твердих тіл Нісонський В. П., Незамай Б. С.	189

Areas of application of extraction cake of oat germs and maize germs oil cake in order to increase the nutritional value of wheat bread Oliinyk S. H., Stepankova G. V.	206
Проект автомобіля з додатковим реактивним поштовхом у зоні плями контакту колісного рушія з опорною поверхнею Петров Л. М., Кішянус І. В., Скоріченко О. І.	229
Застосування положень хвильової механіки до моделювання динаміки канатних доріг Ракша С. В., Куроп'ятник О. С.	246
Analysis of approaches to simulation of mixing processes in equipment for polymer processing Sokolskiy O. L., Ivitskiy I. I.	264
Protecting of radio electronic facilities is from influence of powerful electromagnetic radiation Sotnikov O. M., Iasechko M. M.	283
Topological modeling in the technology of construction composite materials Trofimova L. E.	300
DSS controlling a machine manufacturing Havina I. P., Lymarenko V. V.	319
Technical characteristics of miscanthus biomass as raw materials of biofuels and biopolymers Kharytonov M. M., Martynova N. V.	338
Prospects of application of chia seeds in candy technology Shydakova-Kameniuka E. G., Shkliaiev O. M.	359

АНАЛИЗ И ВЫБОР КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ И ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ РЭА

Невлюдова В. В., Мосьпан Д. В.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе производства гибридных и интегральных структур функциональной электроники, интегральных микросхем и радиоэлектронных аппаратов (РЭА) возникает большое количество дефектов. Существует система мониторинга производственных дефектов, но, несмотря на большое количество методов и средств обнаружения дефектов, часть их остаётся невыявленной. Вместе с тем наличие этих средств и их большая информативность обеспечивают получение разнообразных сведений о параметрах РЭА, использование которых даёт возможность совершенствовать мониторинг и на этой основе корректировать технологию изготовления РЭА.

Возникающие при реализации технологических процессов дефекты в дальнейшем развиваются в соответствии с объективными закономерностями изменения микро и макроструктуры материальной среды, из которой состоят элементы и приборы РЭА. Рассматривая различные материалы РЭА и процессы развития производственных дефектов, анализируя и обобщая при этом механизм процессов, можно сделать вывод о наличии трёх основных видов вышеуказанных изменений: диффузия компонентов, коррозия (химическая, электрическая, электрохимическая), испарение. Кинетика процессов определяется неоднородностью внутренней и внешней материальной среды пребывания РЭА, обусловленной внутренней структурой и внешними условиями её производства и эксплуатации.

Для своевременности корректировки технологии, направленной на предупреждение параметрических отказов РЭА, выполняют прогнозирование отказов. Широко используемый при проведении испытаний и техническом обслуживании РЭА метод прогнозирования, основанный на анализе случайных реализаций временных функций, получаемых в процессе наблюдения за параметрами, не учитывает механизм процессов, приводящих к изменению состояния. Поэтому достоверность такого анализа информации в ряде случаев не может отвечать требованиям при решении практических задач обеспечения качества РЭА. Другой метод, основанный на участии ЛПР, обладает достоинствами, связанными с возможностями принятия гарантированного решения и верификации прогноза.

Основное направление принятых в работе исследований заключается в раскрытии механизма процесса развития производственных дефектов РЭА и решения задачи отображения информации в соответствии с принципами работы ЛПР. Поведение ЛПР и его решения должны подчиняться представлениям о некоторой детерминированной модели наблюдаемого процесса. Общая методика исследований определяется основными требованиями по реализации мониторинга производственных дефектов, в том числе наглядного, соответствующего принципам образного анализа, отображения информации, детерминированной модели процесса, гарантированного решения о техническом состоянии РЭА.

1. Анализ и выбор методов отображения информации о техническом состоянии РЭА

Поведение ЛПР и его решения должны подчиняться представлениям о некоторой детерминированной модели наблюдаемого процесса. Существует связь между детерминированностью и получением гарантированного решения, что в этом случае предполагает использование детерминированной модели процессов, приводящих к изменению технического состояния РЭА. Немаловажным при этом является отображение информации в соответствии с принципами наглядности, с учётом особенностей ЛПР. Здесь должны отражаться существенные стороны модели процесса, т.е. изменения, происходящие в объекте, и обеспечение возможности принятия решения о состоянии РЭА. Это решение должно обеспечивать предсказание параметрических отказов. Таким образом, общая методика исследований определяется основными требованиями по реализации этого подхода, в том числе наглядного, соответствующего принципам образного анализа, отображения информации, детерминированной модели процесса, гарантированного решения о техническом состоянии РЭА.

Для отображения информации представляется перспективным использование концепции образного анализа, решающего задачи поиска информативных признаков и построения сложных высокоразвитых структур экспериментальных данных. В его основе – нетрадиционное разделение функций между человеком и ЭВМ, при котором машина используется в основном для формирования различных звуковых, контурных и цветоярких полутонных представлений данных, а человек визуально или на слух выявляет и описывает информативные признаки и целостные образы классов, подбирая в диалоге с ЭВМ представление, обеспечивающее решение задачи. Принципиальное отличие такого подхода от более распространённых автоматических методов – в применении ЭВМ для

замены человека, для эффективного использования его уникальных возможностей распознавания и описания образов. Как показала практика, а также экспериментальные и теоретические исследования, образные методы существенно расширяют круг реально разрешаемых задач анализа экспериментальных данных и заметно снижают стоимость их решения.

Для поиска сходств и различий классов наиболее широко применялись и применяются различные их представления в виде кривых в прямоугольных координатах аргумент-функция: осциллограмм, спектров, корреллограмм. По таким кривым можно увидеть лишь сравнительно простые отличия классов, сводящиеся к небольшому набору легко наблюдаемых признаков типа существенных отличий их динамики, явных периодичностей, отдельных выбросов и т. п. Основным критерий выбора способа отображения – степень применимости к данному представлению классов в словесно-образной иерархии описаний человеком изображений реального мира. Это критерий – прямое следствие уже упоминавшегося требования: в случае априорно-неизвестных и равновероятных информативных признаков обеспечивать ЛПР возможность визуального сравнения как можно большего числа характеристик признаков по каждому их представлению. Чем больше привычных образов содержит отображение, тем легче выполнить это требование.

Осциллограммы и другие кривые в прямоугольных координатах с точки зрения этого критерия – далеко не лучший способ представления классов. Действительно, в силу своей однозначности они образуют одномерно упорядоченную вдоль оси абсцисс последовательность экстремумов, перегибов и других простых локальных признаков. Такое расположение даже достаточно разнообразных локальных признаков не позволяет ассоциировать их группы с большинством образов реального мира. Неприменимость естественной образной иерархии к кривым и практически неприемлемая сложность визуального сравнения большого количества кривых по множеству локальных признаков заставляет переходить к сравнению различных усреднённых характеристик этих кривых (огнибающих, динамики, дисперсии и т.п.). Такие характеристики практически не связаны с исходными локальными признаками, т.е. игнорируют большую часть исходной информации. Для решения сложных задач необходимо представление сигналов, позволяющее применить верхние уровни иерархии естественных образов для их описания и оперативного восприятия. Так как подавляющее большинство объектов обычно целиком уместается в поле зрения, в психологии давно экспериментально установлен факт сложности визуального опознавания даже известного изображения, представляемого последовательной сменой его частей. В нашем случае ЛПР

необходимо в результате сравнительного анализа выявить различие целых классов изображений. Так как сравнивать по памяти незнакомые образы весьма сложно, необходимо в поле зрения одновременно представлять целостные образы некоторого набора признаков, по крайней мере, из двух классов.

Геометрическая интерпретация удовлетворяет этому критерию. Практически любой анализируемый параметр может быть с любой имеющей смысл точностью описан конечным (хотя может быть и очень большим) набором чисел. Выбрав какую-либо систему описания и откладывая значения каждого параметра по соответствующей ему оси многомерного пространства нужной размерности, ставится в соответствие любому сигналу определённая точка в этом пространстве, а каждому классу сигналов – некоторая область этого пространства. В результате задачу можно будет интерпретировать как задачу поиска некоторой разделяющей поверхности с заданным качеством разделяющей области разных классов. Далее почти всегда рассматривают задачу разделения на два класса, или, как её ещё называют, задачу дихотомии. Это не сужает общности рассмотрения, поскольку любая задача классификации на много классов легко сводится к последовательности дихотомий.

Геометрическая интерпретация задачи позволяет дать следующую иллюстрацию (рис. 1). Области 0 и 1 – классы сигналов, которые необходимо различать, но о которых имеется информация в виде конечной обучающей выборки сигналов, заведомо принадлежащих классу 0 (точки) и классу 1 (крестики).

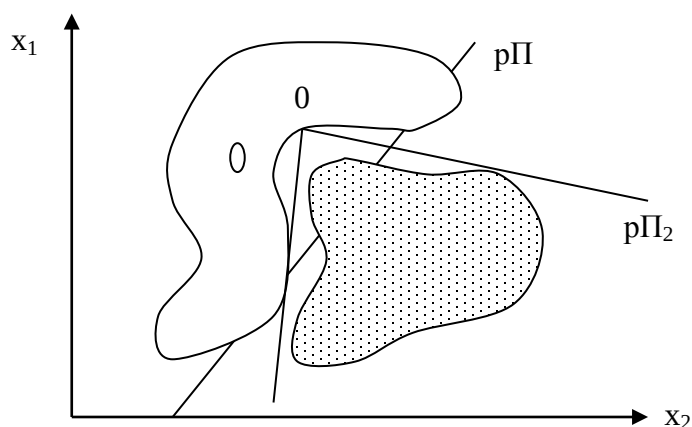


Рис. 1. Геометрическая интерпретация задачи распознавания образов

Подобным образом отображается ситуация, возникающая при граничных испытаниях. В этом случае область допустимых значений параметров

(q -мерный прямоугольник, ограниченный гиперплоскостями, уравнения которых имеют вид $y_i = \text{const}$) соответствует предельному состоянию (образу) РЭА. Упомянутые гиперплоскости соответствуют разделяющей функции, используемой для разделения признакового пространства. В результате изменения параметров можно отображать множество точек, положение которых в признаковом пространстве определяется значениями параметров в заданные моменты времени. Наблюдение за РЭА даёт возможность получать значения y_i^j в моменты времени t_i . Область, занимаемая этими точками, воспринимаемая как фактическое состояние (образ) РЭА, ограничена гиперплоскостями, положение которых определяется в соответствии с принятой моделью процесса изменения состояния РЭА.

Очевидно, наблюдая динамику развития этой области за время δt_p , можно извлекать полезную информацию об изменении состояния РЭА. Так, положение этой области относительно границ объекта характеризует состояние РЭА в части возможности появления её отказов и даёт возможность в рамках детерминированного представления принимать соответствующие решения.

Решение задачи распознавания здесь включает следующие положения. Пусть множество A объектов ω состоит из двух групп объектов $A = A_1 \cup A_2$, причём $A_1 \cap A_2$ в общем случае не пусто. Объект ω имеет описание $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$. Тогда система распознавания, осуществляющая заданную классификацию, может быть представлена в виде модели, блок-схема которой изображена на рис. 2.

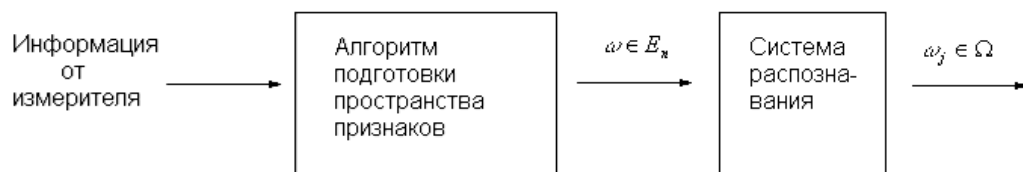


Рис. 2. Блок-схема модели системы распознавания

Входное устройство вырабатывает описание объекта ω по некоторому алгоритму подготовки пространства признаков, а затем алгоритм, реализующий процедуру принятия решения, определяет, к какому классу ω_j принадлежит исследуемый объект.

Описанию объекта ω в n -мерном евклидовом пространстве E_n соответствует точка $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ или вектор $\omega = \omega_1 e_1 + \omega_2 e_2 + \dots + \omega_n e_n$. Работу

классификатора при $n = 2$ заключается в следующем. Система, реализующая классификатор, должна по описанию объекта $\omega(\omega_1, \omega_2)$ определить, к какому классу он относится. Тем самым классификатор должен реализовать отображение исходного пространства признаков, определённого на множестве A , в производство решений Ω . Необходимо найти некоторую поверхность (нелинейную, многомерную в общем случае), которая отделяет друг от друга подмножества множества A , она называется разделяющей поверхностью. В нашей задаче эта поверхность будет ограничивать область изменения параметров РЭА. Получившиеся в $E_2 \supset \omega$ подобласти R_1 и R_2 соответствуют областям решений. При оптимальном (в определённом смысле) проведении разделяющей поверхности область решения R_1 включает в себя все точки («большинство» точек) первого класса (A_1) и в ней отсутствуют точки (находится «минимум» точек) второго класса.

Существуют различные методы определения разделяющей поверхности, один из них – метод дискриминантных функций, когда для определения разделяющей поверхности вводится понятие функции принадлежности к классу, или дискриминантной функции. Функции принадлежности $g_j\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ к классам $A_j (j = 1, 2, \dots, J)$ обладают свойством:

$$g_j(\omega) < g_i(\omega), \quad (1)$$

если $\omega \in A_i (j = 1, \dots, J, j \neq i, \forall i \in \{J\})$.

В нашей задаче эти функции отражают ресурсные характеристики РЭА. Тогда уравнение поверхности, разделяющей i -й и j -й классы, имеет вид $G_{ij}(\omega) = g_i(\omega) - g_j(\omega) = 0$ или $G_{ij}(\omega) = 0$.

Разделяющая функция $G_{ij}(\omega)$ отрицательна в области решений j -го класса и положительна в области решений i -го класса. Точки, в которых $G(\omega) = 0$, будем считать не принадлежащими ни первому, ни второму классу.

Если для решения задачи отображения информации о процессе развития производственных дефектов РЭА использовать метод геометрической интерпретации процессов распознавания образов и классификации, то можно с большой степенью наглядности наблюдать состояние РЭА. Здесь отображается признаковое пространство и области соответствующие граничным и реальным контролируемым значениям параметров РЭА, во время производства и эксплуатации РЭА изменяется конфигурация области, имеет место изменение размеров и очертаний этой области, а также движение её в определённом направлении¹.

¹ Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. Москва : Наука, 1988. 87 с.

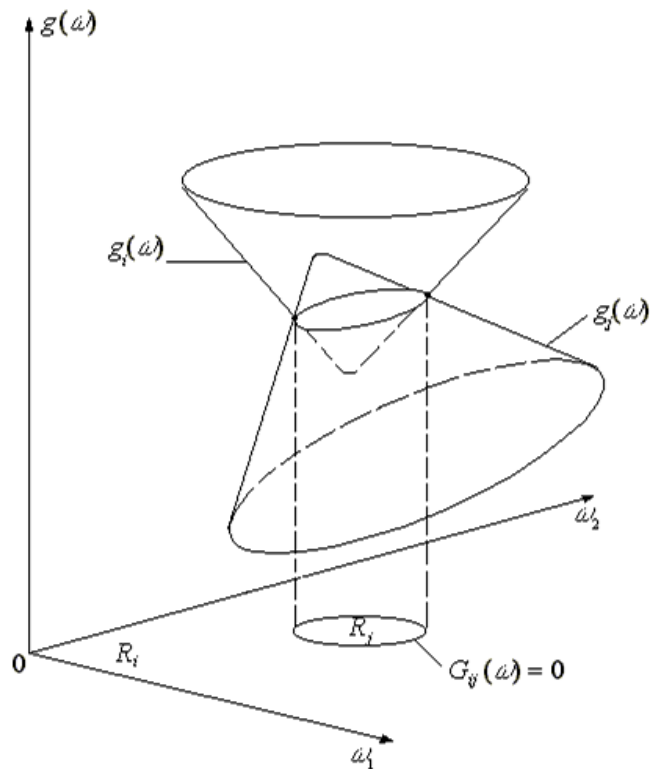


Рис. 3. Вид уравнения поверхности, разделяющей i -й и j -й классы

На экране монитора наиболее наглядным является отображение двухмерного пространства. Возникает задача отображения многомерного пространства признаков в двухмерное и наблюдение последнего на экране монитора. Эта задача решается путём линейного отображения q -мерного вектора параметров Y с компонентами y^β , $\beta = 1 \dots q$ в непосредственно наблюдаемый двухмерный вектор X с компонентами x^i , $i = 1, 2$

$$x^i = a_\beta^i y^\beta, \quad (2)$$

где a_β^i – компоненты матрицы весовых коэффициентов.

Название компонентов матрицы – весовые коэффициенты – отражает их физическую сущность, так как их значение соответствует вкладу соответствующего параметра в отображаемый вектор X . Выбор этих коэффициентов определяет эффективность отображения ситуации и основу решения задачи отображения многомерного пространства признаков в двухмерное.

Так как при граничном значении параметра y_{cp}^j конец вектора X должен находиться на границе области работоспособности, необходимо чтобы выполнялось равенство:

$$x_{zp}^i = a_j^i y_{zp}^j. \quad (3)$$

Основные рекомендации по выбору вектора X заключаются в том, что его компоненты должны отличаться высокой информативностью по отношению к типовым дефектам РЭА и отражать ситуацию, приближающуюся к критической.

Можно предположить, что дополнительным критерием для выбора может служить коэффициент корреляции r_{ij} между параметрами. Так как минимальный коэффициент корреляции обеспечивает максимальное количество информации:

$$J(y^j) = H(y^j) - H(y^j / y^i), \quad (4)$$

получаемой при измерении параметра y^j . Здесь $H(y^j)$ – начальная неопределённость (информационная энтропия); $H(y^j / y^i)$ – условная энтропия объекта после измерения параметра y^i . Использование бинарных корреляционных алгоритмов² даёт возможность при участии ЛПР формализовать и автоматизировать процессы ввода, обработки и распознавания получаемого изображения.

Кроме формальных, можно предложить эвристические методы выбора параметров, включая:

- выбор контрольных точек для цифровой РЭА на основе использования прототипов базовых логических элементов³;
- выбор контролируемых параметров на основе информационных приоритетов⁴;
- ввод информации на основе приоритета диагностических признаков⁵.

Таким образом, использование геометрического подхода к распознаванию образов при решении задачи отображения информации о процессе развития производственных дефектов даёт возможность с большой степенью наглядности наблюдать состояние РЭА. Здесь отображается признаковое

² Чернов В.М. Арифметические методы синтеза быстрых алгоритмов дискретных ортогональных преобразований. Москва : Физматлит, 2017. 264 с.

³ Шостак Б.А., Письменецкий В.А., Теслюк С.И. Диагностирование аналоговых модулей радиоэлектронных систем. *Технология приборостроения*. 2017. № 1. С. 16–19.

⁴ Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Москва : Финансы и статистика, 1983. 453 с.

⁵ Мосьпан Д.В., Невлюдова В.В. Моделювання вибору інформативних ознак при аналізі процесів, що характеризують життєвий цикл виробів електроніки. *Modern methods, innovations, and experience of practical applications in the field of technical science: International research and practice conference* (Random, 27–28 December, 2017). Random, Republic of Poland, 2017. P. 40–44.

пространство и области, соответствующие граничным и реальным контролируемым значениям параметров РЭА, во время производства и эксплуатации РЭА изменяется конфигурация области, имеет место изменение размеров и очертаний этой области, а также движение её в определённом направлении. Наблюдая динамику развития этой области, можно извлекать полезную информацию об изменении параметров РЭА. Так, положение этой области относительно границ объекта характеризует состояние РЭА в части возможности появления отказов и даёт возможность в рамках детерминированного представления принимать соответствующие решения о корректировке технологических процессов. На экране монитора наиболее наглядным является отображение двумерного пространства. Возникает задача отображения многомерного пространства признаков в двумерное и наблюдение последнего на экране монитора. Определены рекомендации по выбору двумерного вектора контролируемых параметров РЭА.

2. Обоснование концептуальной модели процесса развития производственных дефектов РЭА

В предлагаемой модели процесса развития производственных дефектов представляется результативным использование концепции, которая предусматривает отображение информации в виде области признакового пространства. Предельная область является подобной реальной физической средой (телом), 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 среде, в которой имеется некоторое количество неравновесных состояний – дислокаций, градиентов концентраций и т. д. Наиболее подходящей здесь является наличие двух неравновесных фаз, которые имеют границу, соответствующую области реальных параметров. Наличие неравновесных состояний ведёт к развитию процессов переноса вещества (диффузия, электромиграция и др.) и к химическим реакциям, протекающим в объёме и на поверхности материальной среды РЭА. Очевидно, можно использовать представление об отображаемой области как об объекте, в котором находятся части не прореагировавшего вещества (НВ) и прореагировавшего вещества (ПВ), которые изменяются с течением времени, и эти изменения происходят в соответствии с закономерностями протекания реальных реакций. Наблюдается при этом, имеющее прямой смысл для оценки технического состояния РЭА, изменение области контролируемых параметров, появляется возможность отображения информации о расходовании ресурса и прогнозировании отказов РЭА.

Часть НВ может служить мерой ресурса РЭА. Процесс изменения наблюдаемого изображения можно представить как физическую основу моделей расходования ресурса РЭА. Определение расходования ресурса можно определить как функционал от показателей надёжности, в частности⁶:

$$Z(t, T) = -\ln P(t, T) = \int_0^t \lambda(t, T) dt, \quad (5)$$

где $Z(t, T)$ – мера расхода ресурса; T – характеристика взаимодействия объектов со средой (нагрузки) или характеристика внутренних факторов (дефектов); $P(t, T)$ – вероятность безотказной работы; $\lambda(t, T)$ – интенсивность отказов как скорость расходования ресурса в статистическом смысле даёт возможности его отображения в принятой концепции.

В реальной среде конкретных типов материалов, узлов и изделий РЭА можно рассматривать как твёрдое тело, в котором имеется некоторое количество неравновесных состояний (дислокаций, дефектов, неравновесных фаз, градиентов концентрации примесей и т. п.).

Наличие неравновесных состояний ведёт к развитию процессов переноса вещества и к химическим реакциям, имеющим место в объёме 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 наведённые тепловые и электрические поля. Наведённое поле вызывает так называемые эффекты наложения, такие как эффект Пелтье, эффект, вызывающий поток тепла из-за градиента концентраций, электродиффузию и др.

Эти явления и взаимодействие с окружающей средой ведут к необратимому изменению физико-химических свойств материалов. Следствием этих изменений является изменение электрических параметров РЭА. 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 основан на существовании функции состояния системы, называемой энтропией S . Классическая запись второго закона для изолированных систем $dS \geq 0$.

Развитие производственного дефекта можно трактовать как нарушение равновесного состояния термодинамической системы. Появление неравновесного состояния термодинамической системы приводит к изменению S .

⁶ Воробьев В.Л. Термодинамические основы диагностики и надёжности микроэлектронных устройств. Москва : Наука, 1989. 160 с.

Следовательно, с физической точки зрения процесс расходования ресурса, вызванный производственными дефектами, можно рассматривать как интегральный процесс необратимого изменения (эволюции или деградации) термодинамического состояния объекта, т. е. процессом производства энтропии dS/dt , который характеризует многообразие необратимых физико-химических процессов в рамках 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. 4 представлены возможные реализации dS/dt . T_1 соответствует закону распределения Вейбулла, T_2 соответствует экспоненциальному распределению вероятности безотказной работы. Очевидно, сопоставляя динамику ресурса и объёма ПВ, который в условиях нормировки области граничных значений параметров приближается к единичному значению, можно увидеть аналогию между ресурсом и объёмом, т. е. в поле зрения ЛПР попадает изображение ресурса.

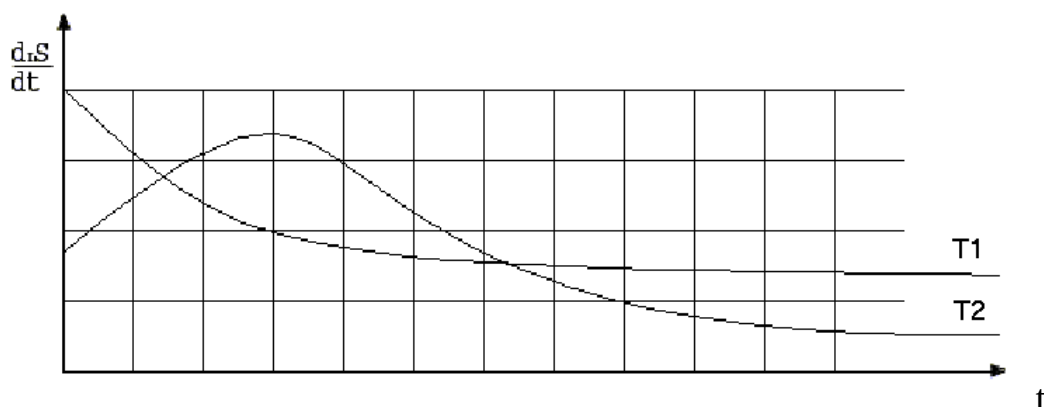


Рис. 4. График изменения ресурса РЭА

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 теорию. Такое обобщение термодинамики имеет существенное методологическое значение с точки зрения единства макроскопического процессуального описания сложных объектов различной физической природы.

Термодинамический и образный подходы 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 даёт возможность универсальным образом описать изменение параметров РЭА с использованием вероятностных оценок их поведения.

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. Это соответствие можно продемонстрировать табл. 1.

Таблица 1

Соответствие между моделями процессов изменения состояния РЭА

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

Принятое в концепции отображение реальной среды, изменение которой приводит к изменению параметров РЭА, даёт возможность наблюдать процесс развития производственных дефектов и принимать решения в соответствии с принципами работы ЛПР.

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 использовать известные модели 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.

3. Разработка методологии моделирования процесса развития производственных дефектов в рамках термодинамического подхода

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 второму закону термодинамики определяется энтропией, значение которой можно принять за параметр состояний.

Термодинамический подход позволяет учесть влияние производственных дефектов на деградиационные 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 входить «внутренний источник», обеспечивающий её производство.

Плотность этого источника определяется выражением⁷:

$$\sigma = \sum_{i=1}^m J_i F_i. \quad (6)$$

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 (6).

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, даёт основание использованию уравнений Онзагера при определении зависимости между силами и возникающими за счёт этих сил потоками в линейном приближении:

$$J_i = \sum_{k=1}^m M_{ik} F_k, \quad (7)$$

где J_i – поток составляющих термодинамической среды (скорость изменения параметров, характеризующих состояние среды, вещества,

⁷ Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. Москва : Мир, 1974. 304 с.

зарядов, тепла и т. д.), который в конечном итоге определяет скорость изменения параметров РЭА; 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; l – концентрация частиц;

– аналогично 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 (7) для всех видов параметров, характеризующих состояние среды. В разрабатываемой модели процесса в качестве параметра V , характеризующего состояние среды, предлагается использовать часть ПВ, которая характеризуется объёмом в многомерном или площадью (двухмерным объёмом) в двухмерном пространствах.

Скорость изменения части ПВ 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.

Неравновесная термодинамика допускает рассматривать переход системы из возбуждённого состояния в равновесное как релаксацию, а время и

скорость этого перехода характеризовать временем и скоростью релаксации. При этом неотъемлемой частью перехода является флуктуация параметров системы.

Для учёта 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 её 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, обуславливает необходимость обеспечения гарантий принимаемых решений о техническом состоянии РЭА. Для определения случайной составляющей рассматриваемой модели можно использовать алгоритм оценивания и предсказания процесса эволюции на основе методов оптимальной фильтрации⁸.

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

Полное уравнение эволюции и модель наблюдения должны учитывать распределение термодинамических параметров в соответствии с законами статистической физики, а также ошибки, вызванные нестабильностью

⁸ Огарков М.А. Методы статистического оценивания параметров случайных процессов. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 208 с.

Терлецкий Я.П. Статистическая физика : учебное пособие. 3-е изд., испр. и доп. Москва : Высшая школа, 1994. 352 с.

внешних воздействий, и неточностями измерений. Это приводит к появлению случайной составляющей модели и к случайным ошибкам при решении задач предсказания, обуславливает необходимость обеспечения гарантией принимаемых решений о техническом состоянии РЭА.

ВЫВОДЫ

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

На экране монитора наиболее наглядным является отображение двумерного пространства. Возникает задача отображения многомерного пространства признаков в двумерное и наблюдение последнего на экране монитора. Определены рекомендации по выбору двумерного вектора контролируемых параметров РЭА, так как его компоненты должны отличаться высокой информативностью по отношению к типовым дефектам РЭА и отражать ситуацию, приближающуюся к критической.

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 позволяет использовать известные модели 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 параметрах РЭА.

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, обуславливает не обходимость обеспечения гарантий принимаемых решений о техническом состоянии РЭА.

АННОТАЦИЯ

Практика эксплуатации радиоэлектронных аппаратов (РЭА) показывает, что развитие дефектов, возникающих при их изготовлении, является одной из основных причин отказов. В настоящее время существует большое количество методов и средств, позволяющих выявлять производственные дефекты, однако возможности этих методов ограничены. Операции контроля и испытаний, входящие в структуру современных технологических процессов, не могут дать полной гарантии отсутствия указанных дефектов в производстве приборов, гибридных и интегральных структур функциональной электроники, при сборке, монтаже и герметизации интегральных микросхем и приборов РЭА.

В этой связи возникает задача мониторинга технического состояния РЭА, которое оценивается с помощью контроля изменяющихся со временем параметров, получаемая при этом информация отражает развитие производственных дефектов. Усовершенствование метода отображения информации обеспечивает возможность наблюдения изменения технического состояния РЭА. Адекватные модели процесса развития производственных дефектов РЭА позволят принимать решения о гарантированном предсказании параметрических отказов.

Таким образом, моделирование и отображение процессов развития производственных дефектов РЭА для предсказания параметрических отказов, изменения и корректировки технологических процессов производства РЭА дали возможность подтвердить эффективность образного анализа в некоторых областях и разработать его основные положения, которые можно использовать для решения актуальных задач мониторинга производства и эксплуатации РЭА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. Москва : Наука, 1988. 87 с.
2. Чернов В.М. Арифметические методы синтеза быстрых алгоритмов дискретных ортогональных преобразований. Москва : Физматлит, 2017. 264 с.
3. Шостак Б.А., Письменецкий В.А., Теслюк С.И. Диагностирование аналоговых модулей радиоэлектронных систем. *Технология приборостроения*. 2017. № 1. С. 16–19.
4. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. Москва : Финансы и статистика, 1983. 453 с.
5. Мосьпан Д.В., Невлюдова В.В. Моделювання вибору інформативних ознак при аналізі процесів, що характеризують життєвий цикл виробів електроніки. *Modern methods, innovations, and experience of practical applications in the field of technical science: International research and practice conference* (Random, 27–28 December, 2017). Random, Republic of Poland, 2017. P. 40–44.
6. Воробьев В.Л. Термодинамические основы диагностики и надёжности микроэлектронных устройств. Москва : Наука, 1989. 160 с.
7. Дьярмати И. Неравновесная термодинамика. Теория поля и вариационные принципы. Москва : Мир, 1974. 304 с.
8. Огарков М.А. Методы статистического оценивания параметров случайных процессов. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 208 с.
9. Терлецкий Я.П. Статистическая физика : учебное пособие. 3-е изд., испр. и доп. Москва : Высшая школа, 1994. 352 с.
10. Невлюдов И.Ш., Роздоловский Ю.М. Отображение процессов проявления технологической наследственности электронной техники. *Радиотехника*. 2003. № 133. С. 218–221.
11. Nevliudov I.S. et al. MEMS Multiprobe Contact Devices for Electrical Testing of Printed Circuit Boards and BGA Components. *Engineering Science, Taylor & Francis*, 2017. T. 9. №. 3 (2). С. 462–468.
12. Nevliudov I.S. et al. Improved reliability of interconnects of electronics components. Paper presented at the 2nd International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics, *UkrMiCo*, 2017. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095396.
13. Nevliudov I., Ponomaryova G., Bortnikova V., Maksymova S., Kolesnyk K. MEMS accelerometer in hexapod intellectual control. Paper presented at the 14th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, *MEMSTECH*, 2018. DOI: 10.1109/MEMSTECH.2018.8365721. P. 146–150.

14. Palagin V., Razumov-Fryziuk I., Botsman I., Nevliudova V. Development of multi-probe connecting devices on flexible polyimide base for MEMS components testing. Paper presented at the 14th International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, *MEMSTECH*, 2018. DOI: 10.1109/MEMSTECH.2018.8365740.

15. Nevlyudov I., Palagin V., Botsman I. The general principles of electromagnetic compatibility improving with microsystem technology using. Paper presented at the 2016 3rd International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, *PIC S and T*, 2016. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905393.

Information about authors:

Nevliudova V. V.,

Candidate of Engineering Science, Associate Professor,
Associate Professor of Department of Computer-Integrating Technologies,
Automation and Mechanics
Kharkiv National University of Radio Electronics
14, Nauky Ave., Kharkiv, 61166, Ukraine

Mospan D. V.,

Candidate of Engineering Science, Associate Professor,
Associate Professor of Department of Electronic devices
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20, Pershotravneva str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine

The project was implemented with the support of



CENTER
for Ukrainian and European
Scientific Cooperation

The Center for Ukrainian and European Scientific Cooperation is a non-governmental organization, which was established in 2010 with a view to ensuring the development of international science and education in Ukraine by organizing different scientific events for Ukrainian academic community.

The priority guidelines of the Center for Ukrainian and European Scientific Cooperation

1. International scientific events in the EU

Assistance to Ukrainian scientists in participating in international scientific events that take place within the territory of the EU countries, in particular, participation in academic conferences and internships, elaboration of collective monographs.

2. Scientific analytical research

Implementation of scientific analytical research aimed at studying best practices of higher education establishments, research institutions, and subjects of public administration in the sphere of education and science of the EU countries towards the organization of educational process and scientific activities, as well as the state certification of academic staff.

3. International institutions study visits

The organisation of institutional visits for domestic students, postgraduates, young lecturers and scientists to international and European institutes, government authorities of the European Union countries.

4. International scientific events in Ukraine with the involvement of EU speakers

The organisation of academic conferences, trainings, workshops, and round tables in picturesque Ukrainian cities for domestic scholars with the involvement of leading scholars, coaches, government leaders of domestic and neighbouring EU countries as main speakers.

Contacts:

Head Office of the Center for Ukrainian and European Scientific Cooperation:
88017, Uzhhorod, 7, Malovnycha Str., Office 2
+38 (066) 421 55 76
info@cuesc.org.ua

www.cuesc.org.ua

Izdevniecība “Baltija Publishing”
Valdeķu iela 62 – 156, Rīga, LV-1058

Iespiests tipogrāfijā SIA “Izdevniecība “Baltija Publishing”
Parakstīts iespiešanai: 2019. gada 2. maijs
Tirāža 150 eks.