

Применение модифицированного уравнения Гиббса для задач исследования отказов изделий микросистемной техники

С.П. Тимошенко, В.Н. Горошко, Б.М. Симонов, В.З. Петрова

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

Application of Modified Gibbs Equation for Studies on Failures of Microsystem Technology Products

S.P. Timoshenkov, V.N. Goroshko, B.M. Simonov, V.Z. Petrova

National Research University of Electronic Technology, Moscow

С позиций статистической термодинамики проведен анализ механизмов отказов и процессов химической кинетики, определяющих надежность изделий микросистемной техники. Впервые предпринята попытка использовать модифицированное уравнение Гиббса в форме Семенченко для задач исследования механизмов отказов изделий.

Ключевые слова: уравнение Гиббса; критерий Гиббса; отказы; микросистемы.

In this work, a lot of attention has been paid to the study of the processes of degradation, failure mechanisms, analysis of the processes of chemical kinetics and its effective models for determining the reliability of products microsystem technology (MST) from the viewpoint of statistical thermodynamics. The first attempt to use a modified Gibbs equation in the form Semenchenko for the objectives of the study of mechanisms failures MST products has been made.

Keywords: Gibbs equation; Gibbs criterion; failures; microsystems.

Введение. Функционирование элементов и компонентов ИС, изделий МСТ (микросистемной техники), включая МЭМС (микроэлектромеханические приборы и системы), зависит, главным образом, от таких необратимых явлений, как электро- и теплопроводность, диффузия, окисление, т.е. определяется неравновесными процессами. Для исследования динамики их протекания во времени используют методы аппроксимации, поскольку компоненты являются сложными системами, состоящими из разных материалов. Множество неравновесных факторов может при определенных условиях влиять на природу и скорость изменения равновесных состояний системы. Следовательно, необходимо учитывать не только комбинации механизмов, меняющихся в зависимости от времени и нагрузки, но и изменения во времени самих механизмов [1, 2]. Это особенно актуально для таких изделий МСТ, как МЭМС-преобразователи. Рассмотрим эволюцию готового элемента МСТ от состояния «годен» до состояния «не годен». Такое превращение требует преодоления определенного энергетического барьера [1] (рис.1). Минимальный уровень энергии, необходимый для перехода элемента из состояния p_1 в состояние p , – энергия активации E_a процесса. Она может иметь механиче-

скую, тепловую, химическую, электрическую, магнитную или другую природу. В полупроводниковых твердотельных изделиях это зачастую тепловая энергия. Если состояние p_1 является минимально возможным уровнем энергии данной системы, а компонент соответствует состоянию «годен», то состояние p соответствует неустойчивому равновесию системы, а компонент – предотказовому состоянию; p_2 отвечает состоянию «отказ» компонента.

Допустим, что имеется один механизм отказа, в частности для торсионов (подвесов) чувствительных элементов микрогроскопов, микроакселерометров, микрозеркал и других изделий МЭМС (и МСТ в целом) характерным является механизм развития микротрещин под воздействием термомеханических напряжений, неизбежно возникающих в процессе функционирования. Состояние подобного изделия, рассматриваемого как физико-химическая система, можно охарактеризовать группой измеряемых макроскопических параметров. Изменение или дрейф этих параметров можно регистрировать как функцию времени и нагрузки. Однако необходимо убедиться в том, что принятая группа макропараметров не отражает частный случай микросостояния системы (плохой или хороший), признаком частного случая является отсутствие двух идентичных изделий с точки зрения их микросостояния. Тогда скорость деградации будет для них неодинакова, а сами механизмы могут быть различными в какой-то заданный промежуток времени. Значит, и отбраковочные испытания будут неэффективными. При идентичности микросостояний компонентов статистика отказов после их испытаний будет сходной.

Анализ процессов деградации. В простой системе из многих частиц рассмотрим ограниченное число частиц, активно участвующих в процессе, ведущем к деградации параметров компонента. Во многих случаях степень деградации пропорциональна числу активированных частиц [3]. Например, может происходить диссоциация молекул на составляющие их атомы или ионы. Скорость процесса химической диссоциации будет зависеть от числа диссоциирующих частиц и от их средней скорости прохождения через энергетический барьер.

Допустим, что измеримый параметр P изделия или функция этого параметра $f(P)$ изменяется пропорционально скорости химической диссоциации каких-то веществ в изделии, а сама диссоциация является главным механизмом деградации, приводящим к отказу изделия. В этом случае скорость изменения P или $f(P)$ во времени t можно выразить как [3]

$$\frac{dP}{dt} \sim N_a \langle v^* \rangle \kappa,$$

где N_a – число частиц, достигших уровня энергии, достаточного для преодоления энергетического барьера; $\langle v^* \rangle$ – средняя скорость движения активированных частиц через барьер; κ – коэффициент прозрачности барьера ($\kappa < 1$).

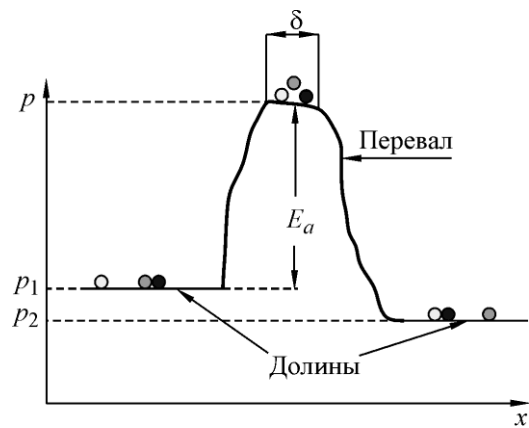


Рис.1. Энергетическая диаграмма переходного состояния: p_1 , p , p_2 – уровни энергии, характеризующие нормальное, активированное и отказовое состояния системы; δ – пространство неустойчивости системы; ●● – взаимодействующие частицы системы

Задача определения N_a из общего числа частиц в системе может быть решена при следующих допущениях: 1) только малая часть всех частиц системы всегда обладает энергией, необходимой для активации процесса деградации; 2) существует равновесие между числом активированных частиц и числом остальных частиц системы, т.е. скорость возникновения активированных частиц равна скорости их исчезновения:

$$\frac{dN_a}{dt} = 0.$$

Задачи такого типа являются предметом исследования статистической механики и связаны со статистиками Максвелла – Больцмана, Ферми – Дирака, Бозэ – Эйнштейна.

Смену законов (функций) распределения частиц по энергиям объясняют в [4] для медленных и быстрых скоростей частиц законами квантовой механики и, если использовать преобразования Гамильтона, для медленных – дорелятивистской, а для быстрых – релятивистской механикой.

Если применить статистику Максвелла – Больцмана, используемую как удовлетворительную аппроксимацию для частиц всех типов (все частицы различимы), то число частиц, которое будет находиться на одном и том же энергетическом уровне в равновесной системе из многих частиц, определяется выражением:

$$N_a \sim \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура. Здесь принято, что E_a не зависит от температуры, это справедливо для изменения температуры в небольшом диапазоне. Тогда

$$\frac{dP}{dt} \sim \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right).$$

В результате многолетних исследований кинетики реакций эмпирическим путем было установлено, что в большинстве химических реакций и некоторых физических процессах, протекающих в материалах элементов МСТ, имеет место аналогичная зависимость скорости реакции от убыли исходной концентрации вещества $C = C_0$, т.е.

$R' = \frac{dC}{dt}$, а также от температуры. А именно для термически активируемых химических реакций справедливо уравнение Аррениуса [4, 5] (А-модель):

$$R' = \frac{dC}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \sim \frac{dP}{dt} \sim \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (1)$$

где A – коэффициент пропорциональности.

Надежность изделий (в том числе элементов и компонентов ИС, МЭМС, МСТ) – это функция правильного понимания требований заказчика и их воплощения в конструкцию, технологию изготовления и эксплуатацию изделий.

Количество наблюдаемых отказов за общее количество часов в конце периода наблюдения носит название точечной оценки интенсивности отказов λ^* . Эта оценка получается из наблюдений за выборкой, например, испытываемых изделий. Оценка интенсивности отказов проводится с использованием χ^2 -распределения:

$$\lambda^* \leq \frac{\chi^2(\alpha, n')}{2nt},$$

где λ^* – интенсивность отказа; α – доверительный уровень значимости; $n' = 2r + 2$ – число степеней свободы; r – число отказов; n – число изделий; t – продолжительность испытаний. В таблице приведены рассчитанные значения функции χ^2 для 90%-ной доверительной вероятности.

Значения функций χ^2

r	n'	χ^2
0	2	4,60517
1	4	7,77944
2	6	10,64464
3	8	13,36157
4	10	15,98718
5	12	18,54935

Представляет интерес концепция надежности, принятая на фирме Motorola [6], а также и в России для массового производства полупроводниковых диодов, транзисторов и ИС. Для повышения доверительного уровня оценки требуемой наработки на отказ используется подход, основанный на определении интенсивности отказов компонентов в форме уравнения Аррениуса, т.е. А-модели:

$$\lambda = A \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \cdot \exp\left(-\frac{B}{HU}\right) \cdot \exp\left(-\frac{D}{E}\right), \quad (2)$$

где A, B, D – коэффициенты, определяемые по результатам испытаний; HU – относительная влажность; E – напряженность электрического поля.

Большинство ускоренных испытаний ИС, МЭМС, МСТ основано на использовании уравнения Аррениуса, которое широко применяется, хотя зачастую и не вполне точно, для анализа процессов деградации и для прогнозирования надежности изделий. Преимущество подхода, основанного на уравнении Аррениуса, – возможность прогнозирования параметрических отказов изделий микро- и нанoeлектроники на основе ускоренных испытаний. Его недостаток – отсутствие учета конструкторско-технологических параметров испытываемых элементов и компонентов. Поэтапная процедура определения параметров А-модели для анализа данных испытаний по температурной зависимости деградации ИС, МЭМС, МСТ следующая:

- строится график зависимости показателя назначения изделия (измеримого параметра) $\ln P$ от $\ln t$ для каждого заданного уровня температуры T ;

- если точки графика располагаются на прямой линии, то модель Аррениуса справедлива. Тогда по углу наклона прямой линии, но в координатах $\ln P = f\left(\frac{1}{T}\right)$ (надо построить и такой график) определяется энергия активации E_a , а из ее пересечения с осью ординат – величина предэкспоненциального множителя A .

Множитель A в (2) должен быть рассчитан с учетом средней скорости преодоления частицами энергетического барьера и функции распределения частиц по энергиям в системе.

Уравнение Эйринга для скорости процесса деградации, учитывающее требования к множителю A (Э-модель), имеет вид [7]

$$R' = \kappa \frac{f^*}{f_n} \langle v^* \rangle \delta^{-1} C_n \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3)$$

где f^* и f_n – функции распределения активированных и нормальных частиц; δ – длина пути реакции; C_n – концентрация нормальных частиц. С учетом поступательной, вращательной и вибрационной составляющих энергий частиц выражение (3) записывается в виде, пригодном для использования в физике отказов [3]:

$$\frac{dP}{dt} = A' \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \cong \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{RT}\right) = \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{\Delta S^*}{R}\right) \exp\left(-\frac{\Delta H^*}{RT}\right), \quad (4)$$

здесь $A' = \exp\left(\frac{\Delta S^*}{R}\right)$ – коэффициент Аррениуса; h – постоянная Планка;

ΔG^* , ΔS^* , ΔH^* , R – соответственно стандартная энергия активации Гиббса, энтропия и энтальпия активации, универсальная газовая постоянная.

Важность уменьшения энтропии в изделиях (ИС, МЭМС, МСТ), рассматриваемых как физико-химические системы, состоящие из многих частиц, заключается в замедлении скорости деградации параметров изделия в связи с возрастанием упорядоченности системы. На практике это означает применение отбраковочных испытаний «для выживания дефектов» (burn-in) и достижения однородности изделий с целью повышения надежности и обеспечения заданной категории качества (без приемки, коммерческий уровень качества, приемка ОТК, приемка заказчика (ПЗ), ПЗ с повышенным уровнем надежности). Это означает уменьшение интенсивности отказов, а соответственно, увеличение наработки до отказа, что очевидно после интегрирования уравнения (4):

$$\int_{P_0}^{P_f} dP = A' \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \int_0^{t_f} dt \cong \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{RT}\right) \int_0^{t_f} dt = \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{\Delta S^*}{R}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H^*}{RT}\right) \int_0^{t_f} dt.$$

Для количественной оценки свойства безотказности изделий (ИС, МЭМС, МСТ) принято согласно ГОСТ 27.002 использовать термин «наработка до отказа» t_f .

Выражение для времени достижения элементом (компонентом) отказового состояния t_f , определяемого по времени перехода от начального (номинально-допустимого) значения параметра P_0 до отказового значения параметра P_f , после интегрирования, подстановки пределов и логарифмирования примет вид

$$\ln t_f = \ln\left(\frac{P_f - P_0}{A}\right) - \frac{\Delta S^*}{R} + \frac{\Delta H^*}{RT},$$

где $A = \frac{A'T}{h}$; коэффициент A' определяется в процессе испытаний на надежность и отражает предотказовое, т.е. энергетически активированное, состояние компонента (или элемента).

Если под t_f понимать среднюю наработку на отказ, то для экспоненциального закона распределения отказов интенсивность отказов λ можно определить как

$$\lambda = \left(\frac{P_0 - P_f}{A} \right) \cdot \exp \left(\frac{\Delta S^*}{R} - \frac{\Delta H^*}{RT} \right).$$

Рассмотренный подход позволяет при теоретическом анализе надежности ИС, МЭМС, МСТ делать только качественные и полуколичественные выводы в силу как многофазности и гетерогенности многокомпонентной системы, которой является рассматриваемое изделие (даже элемент в составе компонента), так и вида получаемых в эксперименте временных моделей деградации.

Сравнение моделей деградации. Временные модели деградации не всегда следуют логарифмической зависимости; на практике могут быть и степенные зависимости. Это обусловлено сменой типа распределения микрочастиц по энергиям в процессе деградации и связанным с ним изменением соответствующего временного закона процесса деградации параметров изделия, что наблюдается, например, при окислении металлов на воздухе. Тем не менее А- и Э-модели активно применяются для оценки показателей надежности при допущении температурной зависимости механизмов отказов. Они являются основой для определения интенсивностей отказов изделий микроэлектроники (ИС) и МСТ, приведенных в справочной литературе, базах данных программ расчета показателей надежности.

В условиях широкого применения зарубежной электронной техники, показатели надежности которой неизвестны, использование А- и Э-моделей для определения показателей надежности ИС, МЭМС, МСТ представляется вполне оправданным. Подход Аррениуса базируется только на эмпирической связи электрического параметра компонента, или элемента, входящего в состав изделия, и механизма отказа с энергией активации E_a (А-модель). Этот недостаток преодолен теорией Эйринга (Э-модель), который ввел понятие активированного комплекса частиц, обосновав его, используя методы статистической и квантовой механики. Таким образом,

Э-модель > А-модели,

где символ «>» означает полноту и полноценность (эффективность) модели применительно к изделию (ИС, МЭМС, МСТ).

Следует отметить, что здесь предпринята простая формализация (символ «>»), осуществленная на основе критерия Гиббса. Сам Гиббс дал только семантическую формулировку критерия и изложил требования к теоретическим моделям (или, говоря языком времен Гиббса, теориям). Современный взгляд на соотношение понятий «теория» и «модель» основан на осмыслении теоретико-множественных представлений теории моделей и понятия каузальности (причинности) в естественных и точных науках [8–10].

Коренное отличие идей Гиббса [11] от других, например идей К. Больцмана, – это использование понятия ансамбля (совокупности) реализаций процесса деградации параметров объекта, принятого на сегодняшний день в теории случайных процессов и широко используемого в статистической радиотехнике. «При настоящем состоянии науки едва ли можно разработать динамическую теорию молекулярного взаимодействия, которая охватывала бы явления термодинамики, излучения и электрические явления, присущие совокупности атомов. Однако всякая теория (читай модель), не учитывающая все эти явления, очевидно является неполноценной» [11, с. 352–353], что и

составляет суть критерия Гиббса. Это важно для ИС, МЭМС, МСТ как гражданского, так и военного, особенно аэрокосмического, применения.

По существу, символ «>» указывает на результат сравнения Э- и А-модели. Можно было бы это сравнение выполнить и другим способом, например делением или вычитанием, и получить специальную формулу «сухого остатка» или поправочного коэффициента к А-модели, а также довести его до числа, но остановимся на более простом подходе – сравнении семантики моделей между собой и обозначении результата сравнения в виде символа «>».

Символ «>» на языке упорядоченных множеств используется как «строго мажорирует» [10, с. 385], т.е. Э-модель строго мажорирует А-модель.

Отметим, что в Э-модели не учитываются достижения российской термодинамической школы материаловедов, освоивших и творчески переработавших идеи Д. Гиббса. В частности, В.К. Семенченко [12] на основе обобщенных функций, связанных с уравнениями Пфаффа, предложил свою С-модель и модифицировал фундаментальное уравнение Д. Гиббса.

Необходимо отметить, что Д. Гиббс провиденчески подтолкнул исследователей к развитию своих идей. В предисловии к своей книге он признает «неполноценность всякой теории, которая не учитывает свойств веществ, наличия излучения и других электрических явлений» [11, с. 352–353].

Фундаментальное уравнение вещества по Гиббсу (с учетом термических, механических и химических свойств) имеет вид полного дифференциала (G-модель):

$$d\varepsilon = td\eta - pdv + \mu_1 dm_1 + \dots + \mu_n dm_n, \quad (5)$$

или (для удобства визуального анализа)

$$d\varepsilon = td\eta - pdv + \sum \mu_i m_i,$$

где m_1, \dots, m_n – массы фаз; μ_1, \dots, μ_n – химические потенциалы, соответствующие массам фаз; ε – энергия; t – температура; η – энтропия; p – давление; v – объем; μ – химический потенциал; m – мольная доля i -го компонента ($i = 1, \dots, n$).

В уравнении (5) использованы обозначения, введенные Гиббсом.

Семенченко, используя метод обобщенных функций (пфаффовы формы), ввел в G-модель напряженности электрического E и магнитного H полей, а также соответствующие им «координаты» – электрическую P и магнитную M поляризации, модифицировал G-модель до вида [12] (С-модель):

$$d\varepsilon = td\eta - pdv + \sum_n \mu_i m_i + EdP + HdM \quad (6)$$

(здесь все обозначения по Гиббсу, за исключением двух последних членов).

И, наконец, учитывая, что в космосе на надежность изделий МСТ, ИС решающим образом влияют галактические и солнечные космические лучи, можно вместо 3-го члена

на С-модели (6) ввести $\sum_{i,j=0}^{N,L} \mu_{i,j} dn_{i,j}$, где n_{ij} – концентрация частиц (i – вид частицы,

j – концентрация), и записать ее в форме (α-модель)

$$d\varepsilon = td\eta - pdv + \sum_{i,j}^{N,L} \mu_{i,j} dn_{i,j} + EdP + HdM, \quad (7)$$

где i – вид частицы ($i = 1, \dots, N$); j – количество частиц определенного вида в единичном объеме ($j = 1, \dots, L$).

Авторами высказано предположение о возможности учета в уравнении α -модели факторов космического пространства, в частности хрононо-антихрононных взаимодействий, которые могут быть описаны уравнениями деградации при нарушении устойчивого состояния вещества. Формально это знак второй производной d^2G/dn^2 (например, известных изменений изобарно-изотермического потенциала как критерия надежности).

Сравнивая Э-модель (3) с С-моделью (6), с использованием критерия Гиббса делаем вывод, что С-модель $>$ Э-модели.

Учитывая, что А-модель $<$ Э-модели, а Э-модель $<$ С-модели и применяя первую фигуру силлогизма АЭС, получим триаду фигурно вложенных (гнездо) посылок – большой, средней, меньшей. И согласно теории доказательств истинности, принятых в логике еще со времен Аристотеля [13], отобразим соотношения А-, Э- и С-моделей в форме прямоугольников. Приведем графическое представление соотношения моделей [14], отметив, что согласно древнегреческим представлениям подобное изображение являлось доказательством (рис.2):

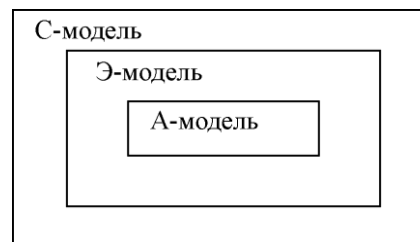


Рис.2. Графическое представление ранжирования моделей химической кинетики, используемых для оценки параметров надежности

С-модель $>$ Э-модели $>$ А-модели.

Таким образом, истинность данного утверждения с использованием критерия Гиббса доказана. Это доказательство коррелирует с основным принципом индукции, графически интерпретированным диаграммами Венна, в многомерном варианте широко используемыми А.Н. Колмогоровым во многих его трудах. Отсюда следует рекомендация о преимуществе использования в вопросах надежности модели Семенченко при анализе процессов деградации и других неравновесных процессов [7, 10], что подтверждается на практике.

В частности, применение упрощенной С-модели можно найти в теоретической разработке электрострикционных преобразователей МЭМС [15, 16]. А.А. Харкевич использовал уравнения Лагранжа, Ломоносовский закон сохранения энергии и G-модель. Правда, в отличие от Гиббса, который опирался на уравнения Гамильтона, он активно использовал теорию многополюсников, широко применяемую разработчиками микроэлектронных устройств [16]. Это позволяет надеяться на возможность синтетического применения С- и α -моделей в разработках чувствительных элементов МЭМС, новых преобразователей (угловой скорости, линейного ускорения, углового положения и др.) с учетом подходов Харкевича (использование уравнений Лагранжа при применении в конкретных изделиях теории многополюсников).

В С- и α -моделях (см. их 4-й и 5-й члены в (6), (7)) в отличие от моделей Аррениуса и Эйринга описывается влияние на рассматриваемый объект (элемент ИС, МЭМС, МСТ и наносистемной техники (НСТ) [17]) электрических и магнитных полей, что является несомненным достоинством этих моделей. В частности, учет типов частиц необходим для изучения их воздействия на элементы и компоненты в условиях применения таковых в космосе или с учетом воздействия факторов космического пространства (радиации). Под факторами космического пространства понимаются все виды излучений,

связанные с галактическими космическими лучами, солнечными космическими лучами, потоками тяжелых заряженных частиц и т.д.

Заключение. Проблемы деградации изделий электронной техники рассмотрены с позиций статистической термодинамики с использованием моделей, отраженных в уравнениях Аррениуса (А-модель), Эйринга (Э-модель) и Семенченко (С-модель), которые являются основой для построения прогностических моделей показателей надежности изделий ИС, МЭМС, МСТ и НСТ (соответственно А-модель, Э-модель и С-модель). Анализ теоретической полноты и полноценности моделей проведен по критерию Гиббса [11]. На основании этого критерия сделан вывод, что С-модель > Э-модели > > А-модели (где символы «>», «>>» означают полноту, полноценность и эффективность модели).

На сегодняшний день С-модель является наиболее перспективной для обеспечения и оценки надежности изделий ИС, МЭМС, МСТ и НСТ, поскольку учитывает не только классические составляющие термодинамики, но и электромагнитные свойства веществ. В частности, поскольку СВЧ-, УФ-излучения и другие его виды описываются уравнениями Максвелла, куда, как и в (6), входят векторы напряженностей электрического E и магнитного H полей, можно считать, что влияние излучений в общем случае учитывается. Учет видов воздействующих элементарных частиц возможен при оценке надежности с помощью предложенной α -модели, что потребует в дальнейшем экспериментального подтверждения.

Литература

1. Тимошенко М.П., Заводян А.В., Симонов Б.М., Горошко В.Н. Оценка и обеспечение надежности изделий микро- и наноэлектроники, микросистемной техники: учеб. пособие: в 2 ч. – М.: МИЭТ, 2012. – Ч. 1. – 288 с.; 2013. – Ч. 2. – 164 с.
2. Об эквивалентности физико-вероятностного и физико-статистического подходов к построению моделей надежности на примере деградации механических элементов МЭМС/ С.П. Тимошенко, В.Н. Горошко, Б.М. Симонов и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 2. – 203–206 с.
3. Vaccaro J., Smith J.S. Methods of reliability physics // Proc. 12-th Ann. On Reliabilit. – 1967. – P. 354–363.
4. Тимошенко С.П., Симонов Б.М., Горошко В.Н. Основы теории надежности: учебник и практикум для академического бакалавриата. Сер.: Бакалавр. Академический курс. – М.: Юрайт, 2015. – 445 с.
5. Крестовников А.Н., Вигдорovich В.Н. Химическая термодинамика. – М.: Металлургия, 1973. – 256 с.
6. Motorola inc., DL, REV 3, USA, 1991.
7. Эйринг Г., Лин С.Г., Лин С.М. Основы химической кинетики: пер. с англ. А.Н. Розенберга / Под ред. А.М. Бродского. – М.: Мир, 1983. – 528 с.
8. Зиновьев А.А. Логика науки. – М.: Мысль, 1971. – 279 с.
9. Колмогоров А.Н., Драгалин А.Г. Введение в математическую логику. – М.: Изд-во Московского ун-та, 1982. – 120 с.
10. Бурбаки Н. Начала математики. Основные структуры анализа. Теория множеств. Кн.1: пер. с фр. Г.Н. Поварова и Ю.А. Шихановича / Под ред. В.А. Успенского. – М.: Мир, 1965. – 456 с.
11. Гиббс Д.В. Термодинамика. Статистическая механика: пер. с англ. под ред. Б.М.Зубарева. – М.: Наука, 1982. – 584 с.
12. Гиббс Д.В. Термодинамические работы: пер. с англ. под ред. В.К. Семенченко. – М. – Л.: Гос. изд-во технико-теоретической лит., 1950. – 492 с.
13. Аристотель. Аналитика первая и вторая: пер с греч. Б.А. Фохта / Под ред. М. Иткина. – Л.: Гос. изд-во политической лит. 1952. – 438 с.
14. Минто В. Индуктивная и дедуктивная логика: пер. с англ. М.С. Моделя. – СПб.: С.-Петербургская электропечатня, 1902. – 250 с.

15. **Варадан В., Виной К., Джозе К.** ВЧ МЭМС и их применение: пер. с англ. под ред. Ю.А. Заболотного. – М.: Техносфера, 2004. – 528 с.
16. **Харкевич А.А.** Избранные труды: в 3 т. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. – М.: Наука, 1973. – Т.1: Теория. – 400 с.
17. **Щука А.А.** Нанoeлектроника. – М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.

Статья поступила
1 июля 2015 г.

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой микроэлектроники (МЭ) МИЭТ. *Область научных интересов:* изделия МСТ, МЭМС, разработка конструкций и технологий изготовления микро- и нанoeлектронной аппаратуры.

Горошко Владимир Николаевич – ведущий инженер кафедры МЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* качество и надежность изделий микро- и нанoeлектронной аппаратуры, МСТ, МЭМС.

Симонов Борис Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры МЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* изделия МСТ, МЭМС, разработка конструкций и технологий изготовления микро- и нанoeлектронной аппаратуры, конструкторско-технологические методы повышения надежности изделий микроэлектроники. **E-mail:** serborsel@mail.ru

Петрова Валентина Захаровна – доктор технических наук, профессор-консультант кафедры МЭ МИЭТ. *Область научных интересов:* многокомпонентные стекловидные материалы, технология производства диэлектрических материалов, керамические материалы.

**Вниманию читателей журнала
«Известия высших учебных заведений. Электроника»**

Оформить годовую подписку на электронную
копию журнала можно на сайтах

- **Научной электронной библиотеки:** www.elibrary.ru
- **Национального цифрового ресурса «Руконт»:** www.rucont.ru
- **Урал-Пресс:** www.ural-press.ru