

Невлюдов И. Ш.<sup>1</sup>, Андрусевич А. А.<sup>2</sup>, Аллахверанов Р. Ю.<sup>3</sup><sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина<sup>2</sup>Д-р техн. наук, доцент, начальник Криворожского колледжа Национального авиационного университета, Украина<sup>3</sup>Канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина

## МОНИТОРИНГ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА РЭС ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье рассмотрен подход к мониторингу процессов жизненного цикла радиоэлектронных средств (ЖЦ РЭС) при эксплуатации. Объектом исследования являются процессы жизненного цикла радиоэлектронных средств на этапе эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры. Предметом исследования являются методы и модели извлечения информации о процессах жизненного цикла радиоэлектронных средств на этапе эксплуатации. Целью исследований является разработка методов и моделей процессов мониторинга технического ресурса РЭС при ее эксплуатации. Главный научный результат заключается в усовершенствовании модели процесса изменения технического ресурса на стадии эксплуатации РЭС, основанной на термодинамическом описании физико-химического механизма явлений массопереноса и структурных превращений в материалах, формирующих свойства РЭС и значения информативных параметров РЭС, что дало возможность приводить оценку кинетики деградационных процессов и динамики ресурсных характеристик РЭС. На базе модели изменения технического ресурса разработан метод визуализации технического состояния и ресурсных характеристик РЭС, основанный на геометрической интерпретации ситуации, допускающей аналогию описания кинетики деградационных процессов и изменения параметров РЭС, что дало возможность создать математическое и программное обеспечение систем, позволяющих на основе визуализации изменения технического ресурса прогнозировать отказы РЭС. Проведены эксперименты по исследованию свойств предложенного метода. Результаты экспериментов позволяют рекомендовать предложенный метод для использования на практике.

**Ключевые слова:** мониторинг, жизненный цикл, прогнозирование, радиоэлектронные средства.

### НОМЕНКЛАТУРА

$Z(t, T)$  – 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;

$I_j$  – 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;

$y_j(0)$  – неравновесные или стационарные значения соответствующих параметров системы в зависимости от рассматриваемого масштаба эволюции;

$L_{jk}$  – кинетические коэффициенты;

$\tau_k$  – времена релаксации соответствующих необратимых процессов в системе;

$y$  – макроскопический параметр системы;

$\Delta y$  – интервал изменения  $y$ ;

$C_i$  – концентрация участвующей в реакции  $i$ -той компоненты;

$r_i$  – суммарный порядок реакции по  $i$ -тому веществу, он может равняться нулю, быть целым или дробным числом;

$r$  – порядок реакции, он может равняться нулю или единице для линейной и двум для нелинейной модели;

$D_n(\Delta V)$  – дисперсия ошибок на момент  $t_n$ ;

$\delta(t - \tau)$  – дельта-функция Дирака;

$v(t)$  – процесс, обусловленный погрешностями наблюдения;

$D_v$  – дисперсия обусловленная погрешностями наблюдения.

### ВВЕДЕНИЕ

К числу наиболее важных функций мониторинга, реализуемых в настоящее время, относится контроль и прогнозирование состояния РЭС и процессов обеспечения ее жизненного цикла (ЖЦ) [1]. Для сложных систем, в том числе и ЖЦ РЭС, возникает необходимость принятия решений в ситуации отсутствия формальных методов постановки и решения задач, возникающих в ЖЦ РЭС.

В свою очередь в центре внимания мониторинга в период эксплуатации РЭС могут находиться процессы, обеспечивающие и ограничивающие живучесть РЭС.

Очевидно, что в первую очередь представляют интерес деградиационные процессы. Главным проявлением ограниченности ресурсных характеристик РЭС являются дефекты, возникающие и развивающиеся в течение эксплуатации РЭС.

В настоящее время для прогнозирования состояния РЭС, обусловленного развитием дефектов предлагаются методы, основанные на интерполяции случайных реализаций временных функций, получаемые в процессе наблюдения за параметрами в начальной и последующих стадиях жизненного цикла РЭС [2]. Однако достоверность такого прогноза незначительна, и не отвечает требованиям при решении практических задач обеспечения надежности РЭС. Предлагается применить метод прогнозирования основанный на принципах распознавания, где может быть задействовано лицо, принимающее решение, которое наблюдает за процессом и принимает решение о состоянии РЭС на основе этих наблюдений и анализа ситуации. Этот подход принят в качестве основного для прогнозирования процессов, происходящих в сложных системах и обладает достоинствами, связанными с возможностями принятия гарантированного решения и качеством прогноза [3].

Поэтому целью исследований является разработка более совершенных методов и моделей мониторинга технического ресурса РЭС полнее отражающих процессы происходящие в РЭС при ее эксплуатации для обеспечения возможности принятия эффективных решений.

Для достижения поставленной цели в рамках данной работы необходимо:

- провести анализ возможных дефектов РЭС, методов и средств их обнаружения;
- разработать методологию моделирования процесса расходования ресурса РЭС и его отображения;
- разработать модель описания деградиационных процессов и процесса расходования ресурса РЭС.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для описания процесса расходования ресурса технических систем представляется возможным использование термодинамического подхода [4, 5, 6]. Термодинамический подход, основанный на необратимости физических процессов, объединяет различные точки зрения: уравнения баланса, классическую термодинамическую теорию устойчивости, флуктуационную и эволюционную теорию.

Определение ресурса как функционала от показателей надежности, в частности

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

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  $\lambda(t, T)$ .

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 [4, 7]

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

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

Фундаментальным принципом термодинамического подхода является справедливость выражения (1) 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  $BP$ , которая характеризуется объемом в многомерном или площадью в двухмерном пространствах.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ наиболее характерных дефектов и проявления их при эксплуатации РЭС дает основание предположить, что в основе механизмов возникновения и развития дефектов РЭС лежат преобразования микро- и макроструктуры исходных материалов и химические превращения, происходящие в производстве и эксплуатации РЭС [8, 9, 10]. При этом реализуется схема превращения субмикродефектов и микродефектов в макродефекты.

Анализ возможностей средств обнаружения дефектов и данных по причинам отказов РЭС показывает, что значительная часть дефектов может быть не обнаружена. Поэтому уделяют внимание прогнозированию параметрических отказов в процессе производственных испытаний и технического обслуживания РЭС, в результате принимают решение о техническом состоянии и технологии производства приборов и элементной базы РЭС.

Получение прогнозных результатов при действии переменных внешних факторов повышает эффективность прогноза, делает его действенным инструментом управления производством РЭС.

Однако, современные методы прогнозирования базирующиеся на функциональном анализе, теории рядов, теории экстраполяции и интерполяции, теории вероятностей и математической статистики, теории случайных функций и случайных процессов, корреляционном и спектральном анализе, теории распознавания образов [11–15] не учитывают механизм процессов, приводящих

к изменению состояния РЭС. Достоверность такого анализа информации в ряде случаев не может отвечать требованиям при решении практических задач обеспечения качества РЭС. Рассматриваемый метод, основанный на участии ЛПП, обладает достоинствами связанными с возможностью принятия решений о гарантированном прогнозе отказов РЭС, обусловленных развитием производственных дефектов [8].

### 3 ПРОЦЕССЫ И МЕТОДЫ

Два основных вида процессов расходования ресурса соответствует эволюционным и флуктуационным процессам, происходящим в термодинамической среде. Первый вид имеет характер флуктуаций параметров системы за счет внешних или внутренних факторов. Такой процесс является случайным и может иметь как обратимый, так и необратимый характер. Другой вид связан с эволюционными процессами, т. е. с процессами производства и накопления энтропии объекта. Такой процесс является детерминированным и имеют характер необратимой деградации.

Физическую основу эволюционных процессов составляют неравновесные состояния системы и соответствующие им необратимые процессы. Конечное значение производной энтропии по времени дает основание предположить, что процессы эволюции термодинамических систем носят монотонный релаксационный характер. Этот вывод совпадает с выводами, наблюдаемыми статистической теорией. Уравнения Онзагера при определенных допущениях, в частности при условии стабилизации термодинамических сил могут быть представлены как линейные дифференциальные уравнения во временной области относительно экстенсивных параметров  $y_j$  с постоянными коэффициентами  $L_{jk}$ , решения которых записываются в виде

$$y_j(t) - y_j(0) = \sum_k [L_{jk} \exp(-t/\tau_k)].$$

Очевидно, в оценку ресурса систем включается процесс измерений параметров. Необратимый характер процессов измерения как процессов взаимодействия измерительного прибора и объекта обуславливает определенную взаимосвязь (предельные соотношения) между термодинамическими характеристиками (энергия, энтропия) и информационными (точность, количество информации).

Для флуктуаций, вызванных наблюдениями, существует понятие характерного интервала или минимального масштаба времени, которое определяет масштаб флуктуации

$$\tau = \frac{\Delta y}{\partial y / \partial t}.$$

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

Таким образом, при отображении процессов развития дефектов должен учитываться эволюционный и флуктуационный характер процессов.

Статистическая физика дает возможность объяснить кинетику термодинамических параметров среды на основе поведения ансамбля частиц, из которых эта среда состоит. Микроскопическое состояние ансамбля полностью задается каноническими переменными ( $X$ ). С макроскопической же точки зрения состояние вещества определяется весьма ограниченным числом параметров, достаточных для макроскопической характеристики среды. Задание этих параметров, измеряемых в макроскопическом опыте, определяет макроскопическое состояние среды. Макроскопические параметры, в том числе объем ВР являются функциями канонических переменных  $V_k(X)$ , причем  $k = 1, 2, \dots, n$ , где  $n \ll N$ .

Исходя из макроскопических измерений, можно сделать только статистические суждения о значениях микроскопических переменных  $X$ . Таким образом, макроскопически задаваемая система изображается посредством задания плотности вероятности переменных  $\omega(X, t)$ . Зная  $\omega(X, t)$ , можно вычислить статистическое среднее значение  $V(X)$  согласно формуле

$$V = \int_{(X)} V(X) \omega(X, t) dX,$$

а также среднее квадратическое отклонение

$$\Delta V = \sqrt{(V - \bar{V})^2},$$

проявляемое как флуктуация наблюдаемой области ВР.

Рассматривая процесс превращения вещества как физико-химическую реакцию, оценивая скорость процесса через изменение объема ВР или ИР в единицу времени, можно предположить, что скорость изменения концентрации  $j$ -той компоненты

$$\frac{dC_j}{dt} = K \prod_i C_i^{r_j}.$$

Для адекватного описания процессов предлагается ограничиваться порядками, равными 0, 1, 2. Константа скорости  $K$  является одним из основных параметров процесса, определяя, по сути, время релаксации и поэтому называется постоянной релаксации.

Для нашего отображения приняты следующие гипотезы:

- двухкомпонентный состав среды;
- зависимость скорости протекания процесса от объема ВР  $W_0 - V$ , где  $W_0$  – начальный объем среды, а  $V$  – объем ВР;
- правило пропорциональности между количеством вещества и его концентрацией при распределении по объему среды, тогда рассматриваемый объем среды и ВР можно воспринимать как концентрацию компонентов, участвующих в реакциях;

– предположение о том, что при протекании реакций термодинамические коэффициенты, также могут зависеть от состояния среды, отражая возможность использования уравнения Онзагера для нелинейных процессов.

Тогда уравнение процесса, объединяющего термодинамический и физико-химический подходы, можно представить в виде

$$\frac{dV}{dt} = K(W_0 - V)^r = f(V). \quad (2)$$

Решение этого уравнения может быть использовано для нахождения детерминированной части временной зависимости объема ВР.

Используя уравнение (2) для выделенных механизмов процессов развития дефектов можно сделать вывод:

– диффузии при  $D$ , пропорциональном концентрации  $W_0 - V$ ,  $r = 2$ , при постоянном  $D$  можно принять  $r = 1$  или  $r = 0$ ;

– различных видов коррозии, с учетом зависимости энергии активации и постоянных реакций от концентрации ИР  $r = 2$ , для линейного описания  $r = 0$  или  $r = 1$ ;

– испарении материала  $r = 0$ .

Так как результатом процесса является  $W_0 = V$ , можно предположить, что  $W_0$  определяется системой равенств

$$\left. \begin{aligned} W_0 &= a^i a^j \\ a^i &= x^i(t_n) - x^i_{\min}, \text{ если } \delta x^i < 0 \\ a^i &= x^i_{\max} - x^i(t_n), \text{ если } \delta x^i \geq 0 \end{aligned} \right\}$$

Отсутствие информации о порядке реакции приводит к задаче его выбора на основе наблюдений. Критерием выбора может быть максимальное значение ошибок  $\Delta V$ , получаемых как разность между наблюдаемым и вычисленным размером области ВР.

На основе интервального оценивания математического ожидания  $M_n(\Delta V)$  ошибок на момент  $t_n$  и того, что  $\max_n \Delta V$  располагается на границе полученного интервала, для одинаковых условий выбора для всех моделей, характеризующихся достоверностью оценок

$$\max_n \Delta V = M_n(\Delta V) + \frac{\sqrt{D_n(\Delta V)}}{\sqrt{n}}.$$

Так как целью такого мониторинга является предсказание, то можно воспользоваться теорией экстраполяции случайных процессов, в частности методами оптимальной фильтрации.

Особенностью решения задачи, связанной с применением оптимальной фильтрации для выделения и предсказания случайной составляющей рассматриваемой модели, является нелинейность эволюционных уравнений. Предлагается линеаризация задачи на основе концепции опорной траектории и разложения нелинейной функции  $f(V)$  в ряд Тейлора. В качестве опорной траек-

тории, достаточно близкой к истинной, используется решение  $V_{on}(t)$  дифференциальных уравнений для различного порядка реакций, тогда оцениванию и предсказанию подлежит случайная аддитивная поправка  $Z$  к детерминированному  $V_{on}$ , которое является решением дифференциальных уравнений и для истинной траектории  $V(t)$ , характеризующей деградационный процесс

$$V(t) = V_{on}(t) + Z(t).$$

Выдвинув гипотезу о нормальности закона распределения, окончательная форма уравнения эволюции примет вид

$$\frac{dV_{on}}{dt} + \frac{dz}{dt} = f(V_{on}) + \frac{df(V)}{dV} \Delta V.$$

$f(V_{on})$  – левая часть дифференциальных уравнений, соответствует система уравнений

$$\frac{dV_{on}}{dt} = f(V_{on}),$$

полагая  $z = \Delta V$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{df(V)}{dV} z.$$

Рассматривая решение задачи предсказания случайной составляющей на основе алгоритма экстраполяции Калмана, предусматривающего использование моделей эволюции случайной составляющей и наблюдения в дискретные моменты времени задаваемые номером  $k$ . Начальные условия определяются при  $k = 0$ , при  $k = 1$  выполняется наблюдение, прогнозирование осуществляется для  $k = 2$ . Эти модели определяются уравнениями

$$z(k+1) = \frac{df(V)}{dV} z(k) + w(k),$$

$$g(k) = z(k) + v(k).$$

Здесь  $w(t)$  нормальный белый шум с нулевым средним значением  $\text{cov}\{\omega(t), \omega(\tau)\} = d_w \delta(t - \tau)$ . Можно предположить, что начальные значения случайной составляющей  $z(0)$  и начальная дисперсия  $d_w$  определяются средними значениями  $z(t)$  и дисперсией, полученными в предыдущие моменты наблюдений.

Уравнения экстраполяции имеют вид

$$z(k+1/k) = \frac{df(V)}{dV} z(k/k-1) + K(k+1, k) \cdot [g(k) - z(k/k-1)],$$

с коэффициентом усиления  $K(k+1, k)$ , определяемым из уравнения

$$K(k+1, k) = \frac{df(V)}{dV} D(k/k-1) [D(k/k-1) + D_v]^{-1}.$$

Уравнение дисперсии имеет вид

$$D(k+1/k) = \left( \frac{df(V)}{dV} \right)^2 D(k/k-1) + d_w - \left( \frac{df(V)}{dV} D(k/k-1) \right)^2 [D(k/k-1) + D_v]^{-1}.$$

Очевидно, полученные выражения по результатам наблюдений  $g(k)$  в момент времени, соответствующий  $k=1$ , позволяют оценить значение  $z(\delta t_p) = z(k+1/k)$  и  $D(\delta t_p) = D(k+1/k)$  через интервал времени прогноза  $\delta t_p$ , соответствующий  $k+1=2$ , т.е. сделать прогноз развития процесса и оценить ошибку прогноза.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Основные положения экспериментальных работ включают: методику получения достаточного количества образцов, имеющих дефекты; экспериментальную проверку процесса отображения информации, модели изменения ресурса; сравнение предлагаемых методов прогнозирования с существующими, основанными на анализе случайных реализаций временных функций, получаемых в процессе наблюдения за параметрами РЭС, с применением МНК.

На основе проведенного теоретического обоснования был разработан алгоритм отображения области ВР с учетом изменения ее размеров и формы на интервале предсказания. В результате на экране монитора отображается прямоугольная область, размеры и форма которой определяются в соответствии с предлагаемой моделью, и отображается канва (можно использовать цветовую палитру монитора), ширина которой соответствует интервалу ошибки предсказания при заданной гарантии. Приведенный алгоритм дает возможность наблюдать на экране монитора ситуацию, возникающую каждый раз, когда после измерения параметров необходимо принимать решение о возможности дальнейшей корректировке технологического процесса производства изделий. Наблюдаемое изображение в достаточной мере характеризует размер ВР и ее расположение относительно границ допустимой области изменения параметров. Характеристика ВР (отображение размытости границ области ВР) дает возможность оценить гарантированную ошибку предсказания.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены результаты отображения изменения параметров в виде графиков временных функций соответствующего процесса. Сплошными линиями приводятся графики уравнений регрессии, полученные с помощью традиционного метода МНК.

На рис. 2 отображена ситуация, когда после ускоренных испытаний в течение 389 часов было принято решение об отказе через  $50 \pm 15$  ч, фактически отказ произошел в интервале 442–447 ч, т.е. в худшем случае через 58 ч. Здесь с помощью разработанной программы отображено 64 прямоугольника, соответствующие элементарной области ВР.

В целом площадь затемненного участка равна части ВР и характеризует динамику изменения ресурса, РЭС. Координаты исходных вершин прямоугольников определялись после измерения параметров в моменты времени, разделенные промежутками 5 и 9 ч. Размеры и форма прямоугольников, дающие представление об области ВР, определяются согласно модели. Ширина отображаемой канвы соответствует интервалу ошибки предсказания при заданной гарантии и вычислялась по разработанному алгоритму.

На рис. 3 отображена ситуация, характеризующая стабильностью состояния РЭС. Здесь часть ВР, наблюдае-

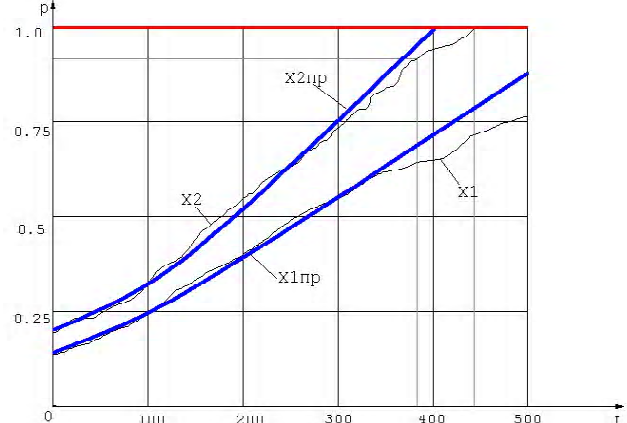


Рисунок 1 – Отображение изменения параметров в виде графиков временных функций

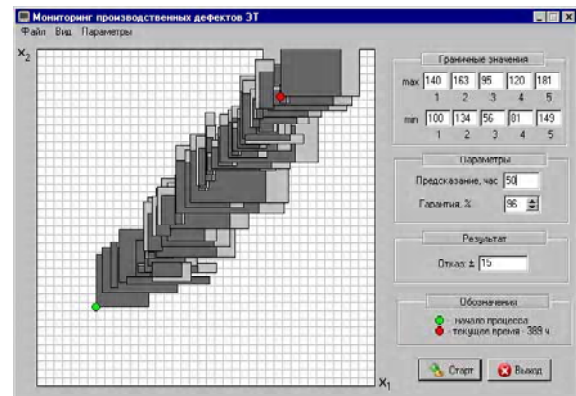


Рисунок 2 – Отображение процесса расходования ресурса РЭС

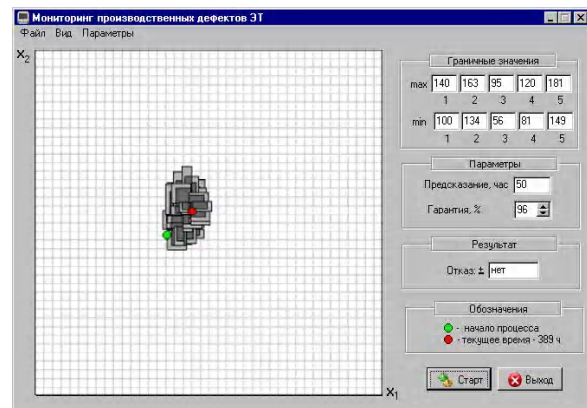


Рисунок 3 – Отображение процесса изменения технического состояния РЭС

мая также в течение 389 ч, занимает небольшую область, что дает основание сделать предположение об отсутствии дефектов и небольшой вероятности параметрических отказов на интервале предсказания 50 ч.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные работы и последующий дисперсионный анализ дают основание сделать вывод о том, что на уровне достоверности 0,96 вероятность выхода ошибки за прогнозируемые пределы составила 0,07, интервальная оценка точности прогноза в приведенном примере на уровне достоверности 0,04 составила 20 %, такая же оценка по МНК составила 38 %. В условиях проводимого в работе эксперимента точность прогнозирования была в 1,9 раз выше.

Сравнение отображений процесса, полученного на рис. 1, с рис. 2 и рис. 3 свидетельствует в пользу предложенного метода мониторинга, в части наглядности и достоверности прогнозирования. Что касается гарантии прогнозирования, то кроме количественной характеристики ее можно просматривать на экране монитора в виде вышеупомянутой канвы. Отображение процесса на экране кроме этого характеризует значение наблюдаемых в заданный момент времени параметров, техническое состояние и ресурс РЭС, что дает основание в достаточно эффективном совершенствовании мониторинга РЭС.

Аналогичные результаты наблюдались при отображении и предсказании изменения параметров различных изделий РЭС, они находились в рамках установленных возможностей предлагаемой модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье решается актуальная задача разработки теоретических основ мониторинга для обеспечения возможности принятия эффективных решений при поддержке ЖЦ РЭС на базе более совершенных моделей, полнее отражающих происходящие в ЖЦ РЭС процессы.

Научная новизна работы состоит в предложенной модели процесса изменения технического ресурса на стадии эксплуатации РЭС, основанной на термодинамическом описании физико-химического механизма явления массопереноса и структурных превращений, в материалах, формирующих свойства РЭС и значения информативных параметров РЭС. Это дало возможность проводить оценку кинетики деградационных процессов, динамики ресурсных характеристик РЭС и разработать метод визуализации технического состояния и ресурсных характеристик РЭС, основанный на геометрической интерпретации ситуации, допускающей аналогию описания кинетики деградационных процессов и изменения параметров РЭС.

Практическая ценность полученных результатов определяется разработанными математическими и программными средствами, которые реализованы в соответствии с разработанными теоретическими основами мониторинга жизненного цикла радиоэлектронных средств на этапе эксплуатации.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ) и Криворожском авиационном колледже в рамках госбюджетных тем: №189-1 «Теоретические основы логистических систем в технологии автоматизированного производства радиоэлектронного приборостроения» (ДР № 0105U002739); № 224 «Конструкторско-технологические основы создания перспективных компонентов микроэлектромеханических систем и технологий их производства» (ДР № 0108U002216); № 248-1 «Теоретичні основи мікроелектромеханічних систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем» (ДР № 0110U002594) на основании приказа Министерства образования и науки Украины № 686 от 22.07.09 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шептунов С. А. Жизненный цикл продукции / С. А. Шептунов. – М. : Янус-К, 2003. – 244 с.
2. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем / П. С. Давыдов. – М. : Радио и связь, 1991. – 256 с.
3. Стрельников В. П. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов систем / В. П. Стрельников, А. В. Федухин. – К. : Логос, 2002. – 486 с.
4. Лоренц Г. А. Статистические теории в термодинамике / Г. А. Лоренц. – М. : РХД, 2001. – 184 с.
5. Андрусевич А. А. Гетерогенные модели развития производственных дефектов / А. А. Андрусевич, И. Ш. Невлюдов, Ю. М. Роздоловский // Науч.-техн. журнал. Авиационно-космическая техника и технология. – 2003. – № 38. – С. 114–119.
6. Невлюдов И. Ш. Термодинамическая модель жизненного цикла электронной аппаратуры / И. Ш. Невлюдов, А. А. Андрусевич, С. В. Сотник // Вестник Академии инженерных наук Украины. – 2007. – № 3 (33). – С. 132–135.
7. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов / И. Пригожин. – М. : РХД, 2001. – 160 с.
8. 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.
9. Ефимов И. Е. Микроэлектроника: физические и технологические основы, надежность / И. Е. Ефимов, Ю. И. Горбунов, И. Я. Козырь. – М. : Высшая школа, 1986. – 463 с.
10. Маллер Р. Элементы интегральных схем : пер. с англ. / Р. Маллер, Т. Кейминс. – М.: Мир, 1989. – 630 с.
11. Горелова В. Л. Основы прогнозирования систем / В. Л. Горелова, Е. Н. Мельникова. – М. : Высш. шк., 1986. – 287 с.
12. Чаплыгин Д. Ю. Имитационная модель динамики отказов и восстановления работоспособности сложных радиоэлектронных систем / Д. Ю. Чаплыгин, П. Б. Абрамов, В. В. Цветков // Математическое моделирование систем обработки информации и управления: Сборник научных трудов. – Воронеж. : ин-т МВД России, 2001. – С. 14–19.
13. Воронцов В. Н. Контроль качества и прогнозирование надежности изделий электронной техники по электрофизическим параметрам. докт. техн. наук / В. Н. Воронцов. – Санкт-Петербург : Сев.-Зап. гос. заоч. техн. ун-т, 2002. – 39 с.
14. Радаев Н. Н. Повышение точности прогноза событий, инициирующих чрезвычайные ситуации / Н. Н. Радаев // Измерительная техника. – 2002. – № 5. – С. 13–20.
15. Кришук В. М. Вибір елементів при компенсації зовнішніх впливів / В. М. Кришук, Г. М. Шилоу А. О. Намлинський, М. П. Гапоненко // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2004. – № 2(12). – С. 36–41.

Статья поступила в редакцию 24.10.2014.

После доработки 07.11.2014.

Невлюдов І. Ш.<sup>1</sup>, Андрусевич А. О.<sup>2</sup>, Аллахверанов Р. Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

<sup>2</sup>Д-р. техн. наук, доцент, начальник Криворозького коледжу Національного авіаційного університету, Україна

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна

### МОНІТОРИНГ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ РЕЗ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

У статті розглянуто підхід до моніторингу процесів життєвого циклу РЕЗ при експлуатації. Об'єктом дослідження є процеси життєвого циклу радіоелектронних засобів на етапі експлуатації радіоелектронної засобів. Предметом дослідження є методи та моделі здобування інформації про процеси життєвого циклу радіоелектронних засобів на етапі експлуатації. Метою дослідження є розробка методів і моделей процесів моніторингу технічного ресурсу РЕЗ при її експлуатації. Основним науковим результатом є удосконалення моделі процесу зміни технічного ресурсу на стадії експлуатації РЕЗ, яка характеризується використанням термодинамічного опису фізико-хімічного механізму явищ масопереносу та структурних перетворень у матеріалах, формуючих властивості РЕЗ і значення інформативних параметрів РЕЗ, що дало можливість проводити оцінку кінетики деградаційних процесів і динаміки ресурсних характеристик РЕЗ. На базі моделі зміни технічного ресурсу розроблено метод візуалізації технічного стану і ресурсних характеристик РЕЗ, заснований на геометричній інтерпретації ситуації, яка допускає аналогію опису кінетики деградаційних процесів і зміни параметрів РЕЗ, що дало можливість створити математичне і програмне забезпечення систем, дозволяючих на основі візуалізації зміни технічного ресурсу прогнозувати відмови РЕЗ. Проведено експерименти по дослідженню властивостей запропонованого методу. Результати експериментів дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

**Ключові слова:** моніторинг, життєвий цикл, прогнозування, радіоелектронні засоби.

Nevliudov I. Sh.<sup>1</sup>, Andrushevich A. A.<sup>2</sup>, Allahveranov R. U.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dr.Sc., Professor, Head of department, Kharkov National University of Radio Electronics, Ukraine

<sup>2</sup>Dr.Sc., Associate Professor, Head of the Krivoy Rog College National Aviation University, Ukraine

<sup>3</sup>PhD., Kharkov National University of Radio Electronics, Ukraine

### MONITORING OF LIFECYCLE OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT IN EXPLOITATION

The article describes the approach to the monitoring of life cycle processes in the operation of radio electronic equipment (REE). The object of research is the process of the life cycle of electronic resources during the operational phase of electronic equipment. The subject of the study are methods and models of extracting information about the processes of the life cycle of electronic resources during the operational phase. The purpose of research is to develop methods and models of processes for monitoring the service life of the appliance REE. The main scientific result is to improve the process model changes of a technical resource to the operation stage REE based on the thermodynamic description of the physico-chemical mechanism of mass transfer phenomena and structural transformations in materials forming properties of the REE and REE values informative parameters, which enabled the assessment of the result of the kinetics of degradation processes and dynamics of resource characteristics of REE. As part of the main scientific result has been further developed model of changes in the technical resources at the operational stage REE, which is based on the thermodynamic description of physico-chemical mechanism of mass transfer phenomena and structural transformations in materials forming properties of REE and REE values informative parameters, making it possible to assess the kinetics of lead degradation processes and the dynamics of the resource characteristics of REE. Model based on changes in the technical resource developed a method for visualization of technical condition and resource characteristics of REE based on a geometric interpretation of the situation, allowing an analogy describing the kinetics of degradation processes and change the REE, which made it possible to create a mathematical and software systems that allow visualization of the changes on the basis of a technical resource predict failures REE. Experiments were conducted to study the properties of the proposed method. The experimental results allow us to recommend the proposed method for use in practice.

**Keywords:** monitoring, life cycle, forecasting, radio electronic equipment.

### REFERENCES

1. Sheptunov S. A. Zhiznennyj cikl produkcii. Moscow, Janus-K, 2003, 244 p.
2. Davydov P. S. Tehniceskaja diagnostika radioelektronnyh ustrojstv i sistem. Moscow, Radio i svjaz', 1991, 256 p.
3. Strel'nikov V. P., A. V. Feduhin. Ocenka i prognozirovanie nadezhnosti jelektronnyh jelementov sistem. Kiev, Logos, 2002, 486 p.
4. Lorenc G. A. Statisticheskie teorii v termodinamike. Moscow, RHD, 2001, 184 p.
5. Andrushevich A. A., Nevljudov I. Sh., Rozdolovskij Ju. M. Geterogennye modeli razvitija proizvodstvennyh defektov, Nauch.-tehn. zhurnal. Aviacionno-kosmiceskaja tehnika i tehnologija, 2003, No. 38, pp. 114–119.
6. Nevljudov I. Sh., Andrushevich A. A., Sotnik S. V. Termodinamiceskaja model' zhiznennogo cikla jelektronnoj apparatury, Vestnik Akademii inzhenernyh nauk, 2007, No. 3 (33), pp. 132–135.
7. Prigozhin I. Vvedenie v termodinamiku neobratimyh processov. Moscow, RHD, 2001, 160 p.
8. Andrushevich A. A., Nevljudov I. Sh. Monitoring processov proektirovanija, proizvodstva i jeksplua-tacii zhiznennogo cikla jelektronnoj apparatury. Har'kov, FLP Cuvarev A. F, 2009, 272 p.
9. Efimov I. E., Gorbunov Ju. I., Kozyr' I. Ja. Mikroelektronika: fizicheskie i tehnologicheskie osnovy, nadezhnost'. Moscow, Vysshaja shkola, 1986, 463 p.
10. Maller R., Kejmins T. Jelementy integral'nyh shem: Per. s angl. Moscow, Mir, 1989, 630 p.
11. Gorelova V. L., Mel'nikova E. N. Osnovy prognozirovanija sistem. Moscow, Vyssh. shk, 1986, 287 p.
12. Chaplygin D. Ju., Abramov P. B., Cvetkov V. V. Imitacionnaja model' dinamiki otkazov i vosstanovlenija rabotosposobnosti slozhnyh radioelektronnyh sistem, Matematicheskoe modelirovanie sistem obrabotki informacii i upravlenija: Sbornik nauchnyh trudov. Voronezh, in-t MVD Rossii, 2001, pp. 14–19.
13. Voroncov V. N. Kontrol' kachestva i prognozirovanie nadezhnosti izdelij jelektronnoj tehniki po jelektrofizicheskim parametram. dokt. tehn. nauk. Sankt-Peterburg, Sev.-Zap. gos. zaoch. tehn. un-t, 2002, 39 p.
14. Radaev N. N. Povyshenie tochnosti prognoza sobytij, iniciirujushhij chrezvychajnye situacii, Izmeritel'naja tehnika, 2002, No. 5, pp. 13–20.
15. Krishhuk V. M., Shilou G. M., Namlins'kij A. O., Gaponenko M. P. Vibir elementiv pri kompensacii zovnishnih vpliviv, Radioelektronika, informatika, upravlinnja, 2004, No. 2(12), pp. 36–41.