

# МОНИТОРИНГ ЖИВУЧЕСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.А. АНДРУСЕВИЧ, Е.П. ВТОРОВ

Решается задача мониторинга процесса изменения технического ресурса на стадии эксплуатации радиоэлектронных средств (РЭС). Предложена модель, которая характеризуется использованием термодинамического описания физико-химических механизмов в материалах, формирующих свойства РЭС. Это позволило производить оценку кинетики деградационных процессов и динамики ресурсных характеристик РЭС при ее эксплуатации.

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

## ВВЕДЕНИЕ

К числу наиболее важных функций мониторинга, реализуемых в настоящее время, относятся контроль и прогнозирование состояния РЭС и процессов обеспечения ее жизненного цикла (ЖЦ). 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 деградационные процессы. Главным проявлением ограниченности ресурсных характеристик РЭС являются дефекты, возникающие и развивающиеся в течение эксплуатации РЭС [1].

Целью данной работы является разработка методов и моделей мониторинга изменения технического ресурса РЭС при ее эксплуатации.

## 1. АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ РЭС, МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИХ ОБНАРУЖЕНИЯ

Анализ наиболее характерных дефектов и проявления их при эксплуатации РЭС дает основание предположить, что в основу механизма возникновения дефектов РЭС и задач, связанных с их развитием, лежат преобразования микро- и макроструктуры исходных материалов и химические превращения, происходящие в производстве и эксплуатации РЭС. При этом реализуется схема превращения субмикрододефектов и микрододефектов в макродефекты.

В основе процессов развития дефектов полупроводниковых материалов, применяемых в РЭС, лежит изменение параметров зонной структуры, нарушение кристаллической структуры, изменение чистоты материала, наличие электрически активных и неактивных примесей, неоднородность распределения примесей дефектов по объему материала, механические напряжения, изменение структуры переходных областей в  $p-n$  гомо- и гетеропереходах.

Анализ показывает, что существует три вида превращения свойств материалов,

характеризуемое кинетикой – диффузия компонентов, коррозия, испарение материала.

Возникшие 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 РЭС. Кинетика процессов определяется неоднородностью внутренней и внешней материальной среды пребывания РЭС, обусловленной внутренней структурой и внешними условиями ее производства и эксплуатации.

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.

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСХОДОВАНИЯ РЕСУРСА

При использовании концепции геометрического подхода к распознаванию образов отображается признаковое пространство и области соответствующие граничным и реальным контролируемым значениям параметров системы во время жизненного цикла системы. Наблюдая динамику развития этой области, можно извлекать полезную информацию об изменении параметров системы.

В предлагаемой модели процесса, представляется результативным использование концепции, которая предусматривает отображение информации в виде области признакового пространства. При этом можно наблюдать как в области, сформированной предельными значениями параметров, зафиксированная в момент наблюдения точка превращается в область, в которой динамика, конфигурация и ее размеры определяются динамикой изменения состояния системы и может характеризовать процесс расходования ресурса. Этим областям можно присвоить соответствующие названия – область имеющегося ресурса (ИР), область выработанного ресурса (ВР).

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

Объем вещества, соответствующего разности объемов ИР и ВР может служить мерой ресурса системы. Процесс изменения ВР можно представить как физическую основу модели расходования ресурса системы.

Для описания процесса расходования ресурса технических систем представляется возможным использование термодинамического подхода [2-4]. 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

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

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

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

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 [1-3]

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

где  $I_j$  – поток составляющих термодинамической среды (скорость изменения параметров, характеризующих состояние среды, вещества, зарядов,

тепла и т.д.), который определяет скорость изменения параметров  $V_j$ ,  $F_{kj}$  – термодинамические силы (градиенты плотности, напряжений, температуры и т.д.);  $M_k$  – линейные феноменологические коэффициенты.

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 ВР, которая характеризуется объемом в многомерном или площадью в двухмерном пространствах.

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

### 3. МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ПРОЦЕССА РАСХОДОВАНИЯ РЕСУРСА РЭС

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. На основании второго начала термодинамики эволюция термодинамических систем происходит в направлении перехода системы из неравновесного состояния  $\delta(S) > 0$  в стационарное  $\delta(S) = \min$  и далее в состояние полного термодинамического равновесия  $\delta(S) = 0$ . Подобный характер эволюционных процессов предполагает существование двух масштабов времени релаксации системы: время релаксации неравновесного состояния и время релаксации стационарного состояния. Эти времена релаксации существенно различны, что является основанием введения временной иерархии и соответственно понятия временной организации физических систем вообще и РЭС в частности.

Конечное значение производной энтропии по времени дает основание предположить, что процессы эволюции термодинамических систем носят монотонный релаксационный характер. Этот вывод совпадает с выводами, наблюдаемыми

статистической теорией. Уравнения Онзагера при определенных допущениях, в частности при условии стабилизации термодинамических сил могут быть представлены как линейные дифференциальные уравнения во временной области относительно экстенсивных параметров  $y_j$  с постоянными коэффициентами  $L_{jk}$ , решения которых записываются в виде

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

где  $y_j(0)$  – 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.

Примерами подобной формы эволюционных или релаксационных процессов являются решения во временной области феноменологических уравнений диффузии, теплопроводности, линейных химических реакций. Термин «эволюционные процессы» можно использовать в качестве обобщения понятия «деградационных процессов», учитывая закономерный, направленный характер необратимых процессов изменения термодинамического состояния РЭС.

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

$$\tau = \frac{\Delta y}{\partial y / dt} ,$$

где  $y$  – макроскопический параметр системы;  $\Delta y$  – интервал изменения  $y$ .

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

Для крупномасштабных эволюционных процессов время релаксации составляет: для тепловых процессов  $\tau = 10^{-1} \dots 10^3$  с, процессы изменения физической структуры  $\tau = 10 \dots 10^3$  ч, процессы расходования ресурса  $\tau = 10^4 \dots 10^6$  ч.

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

$$\frac{dC_j}{dt} = K \prod_i C_i^{r_i} ,$$

где  $C_i$  – концентрация участвующей в реакции  $i$ -той компоненты; показатель  $r_i$  – суммарный порядок реакции по  $i$ -тому веществу, он может равняться нулю, быть целым или дробным числом.

Для адекватного описания процессов предполагается ограничиваться порядками, равными 0, 1, 2.

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

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

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

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

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

где  $f(V_{on})$  – 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, при начальных значениях случайной составляющей  $z(0)$  и начальной дисперсии  $d_w$ , уравнения экстраполяции имеют вид

$$z(k+1/k) = \frac{df(V)}{dV} z(k/k-1) + K(k+1, k) \cdot [g(k) - z(k/k-1)] \quad (2)$$

с коэффициентом усиления  $f(x, y)$ , определяемым из уравнения

$$f(x, y).$$

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.

Предложен 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, 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 технологии. Наблюдаемое изображение в достаточной мере характеризует размер ВР и ее расположение относительно границ допустимой области изменения параметров. Канва вокруг ВР (отображение размытости границ области ВР) дает возможность оценить гарантированную ошибку предсказания.

#### 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА РАСХОДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО РЕСУРСА

Алгоритм реализован в виде программного модуля. Разработанный интерфейс рассчитан на отслеживание 5 параметров. Результатом работы программы является построение графика изменения значений параметров на специальном поле и вывод значения времени, через которое произойдет отказ.

Выбранные в качестве образцов полупроводниковые диоды ГД511В отвечают требованиям в части проверки основных положений предлагаемого мониторинга РЭС. Для имитации дефектов использовался перегрев выводов диодов,

который можно квалифицировать как нарушение режимов лужения выводов или пайки при монтаже РЭС. Выводы диодов погружались на 5 минут в расплавленный припой типа ПОС-61, имеющий температуру 270 °С. Для обеспечения приемлемого времени проведения мониторинга и получения достаточного количества образцов стимулировалось развитие дефектов. С этой целью были использованы принципы ускоренных испытаний, предусматривающие в качестве основного стимулирующего воздействия выдержку РЭС при повышенной температуре.

Методика проведения исследований включала:

- проведение ускоренных испытаний, с целью стимулирования развития дефектов;
- оценка качества работы алгоритма предсказания;
- оценка влияния внешних воздействий на качество алгоритма предсказания.

Для сравнения с существующими методами прогнозирования проводилась дополнительная обработка результатов исследований. Учитывая проведенный анализ методов прогнозирования, в качестве уравнения, позволяющего предсказывать поведение параметра РЭС во времени, можно взять выражение (2).

С использованием разработанного программного средства проведено моделирование ситуации, когда после испытаний в течение 389 часов было принято решение об отказе одного из диодов через  $50 \pm 15$  час, фактически диод отказал в интервале 442-447 час, т.е. в худшем случае через 58 час. Качество предсказания для этого диода  $\alpha = 0,47$ .

Предложенные модели и методы, программное обеспечение также использованы при разработке унифицированного комплекса для мониторинга цифровых модулей систем числовым программным управлением (ЧПУ).

Были апробированы разработанные средства мониторинга технологической среды, которые позволяют наблюдать состояния систем ЧПУ. Апробация проводилась на цифровых модулях следующих систем УЧПУ: 2С42, НЦ-31, BOSCH CC-300, CNC-600, ELSA-1000, SINUMERIC-8.5M, SIMATIC-S5.

Результаты мониторинга процесса развития дефектов в одном из блоков, полученные в процессе электротермотренировки при испытаниях, проводились в соответствии со стандартной методикой.

В процессе апробации велись наблюдения за пятью параметрами  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5$ , блока обработки измерительной информации. Блок выполняет функции переключения каналов при измерении сигналов, поступающих с датчиков освещенности и влажности. Основными контролируруемыми параметрами были выбраны:  $Y_1$  – сопротивление ключа 1;  $Y_2$  – сопротивление ключа 2;  $Y_3$  – ток потребления;  $Y_4$  – напряжение

срабатывания управляющего входа;  $Y_5$  – время задержки сигнала.

Выявлены критичные параметры  $Y_1 = X_1$  и  $Y_3 = X_2$ . Точность предсказания времени отказа составила 14% с достоверностью 0,98.

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

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методы и алгоритмы мониторинга процесса изменения технического ресурса РЭС на стадии эксплуатации позволили улучшить качество продукции еще на стадии ее проектирования и изготовления.

Разработана математическая модель процесса изменения технического ресурса на стадии эксплуатации РЭС, которая основана на термодинамическом описании, а также метод визуализации технического состояния и ресурсных характеристик РЭС, математическое и программное обеспечение, позволяющие прогнозировать отказы РЭС.

Проведенная апробация моделей показала существенное увеличение эффективности мониторинга и прогнозирования отказов РЭС при их эксплуатации, обеспечив точность предсказания времени отказа в пределах 14% и достоверность 0,98. Предложенные алгоритмы применимы для РЭС различного исполнения, поэтому в качестве образцов выбраны наиболее используемые и представляющие интерес цифровые модули современных систем УЧПУ и полупроводниковые диоды ГД511В.

Трудоемкость процесса с применением разработанного унифицированного комплекса диагностики и контроля снизилась в 3,6 раза.

### Литература.

- [1] Андрусевич А.А., Невлюдов И.Ш. Мониторинг процессов проектирования, производства и эксплуатации жизненного цикла электронной аппаратуры. Харьков: ФЛП Цуварев А.Ф., 2009. 272 с.
- [2] Лоренц Г.А. Статистические теории в термодинамике, М.: «РХД», 2001. 184 с.
- [3] Невлюдов И.Ш., Андрусевич А.А., Сотник С.В. Термодинамическая модель жизненного цикла электронной аппаратуры // Вестник Академии инженерных наук Украины. 2007. №3 (33), С. 132-135.

Поступила в редакцию 21.02.2012



**Андрусевич Анатолий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, начальник Криворожского колледжа Национального авиационного университета. область научных интересов: визуальный мониторинг физико-химических процессов в производстве и эксплуатации электронной аппаратуры.



**Второв Евгений Петрович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры технологии и производства РЭС и ЭВС. Область научных интересов: диагностика систем и теория надежности в производстве и эксплуатации электронной аппаратуры.

УДК 621.37/39.029.3

**Моніторинг живучості радіоелектронних засобів при експлуатації** / А.О. Андрусевич, Є.В. Второв // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. Том 11. № 1. – С. 95-99.

У статті було розглянуто підхід до моніторингу процесів життєвого циклу РЕЗ при експлуатації. Розроблено модель процесу зміни технічного ресурсу на стадії експлуатації РЕЗ, яка характеризується використанням термодинамічного опису фізико-хімічного механізму явищ масопереносу та структурних перетворень.

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

Бібліогр.: 03 найм.

UDC 621.37/39.029.3

**Monitoring of radio electronic equipment operability in operation** / A.A. Andrusевич, E.V. Vtorov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 1. – P. 95-99.

The paper solves the problem of monitoring the process of changing the mean life at the stage of radio electronic equipment (REE) operation. A model is suggested which is characterized by the use of thermodynamic description of physico-chemical mechanisms in materials which form REE features. It has allowed to estimate the kinetics of degradation processes and dynamics of REE life characteristics in operation.

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

Ref.: 03 items.