

## МОДЕЛИ ОТКАЗОВ КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ДЕГРАДАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

А.С. Кирилук

(представил д.т.н., проф. Б.Н. Ланецкий)

*Обосновываются математические модели отказов комплектующих изделий радиоэлектронных станций с различными типами взаимодействий деградационных процессов при их известных диагностических моделях.*

**Постановка проблемы.** При расчетах показателей надежности и, в частности, показателей долговечности проектируемых радиоэлектронных станций (РЭС) используются модели отказов комплектующих изделий (к.и.) в виде функций распределения наработок к.и. до отказов. Известно [1, 3], что расхождение в оценках показателей надежности проектируемых РЭС в зависимости от выбранных моделей отказов к.и. может составлять несколько порядков. Выбор таких моделей отказов для высоконадежных к.и. и, в частности, для интегральных схем, полупроводниковых приборов, резисторов и др. с помощью известных статистических критериев согласия затруднителен из-за отсутствия приемлемых объемов выборок об отказах таких к.и. В связи с этим корректный выбор моделей отказов высоконадежных и других к.и. РЭС определяется знанием процессов функционирования к.и., технологии их изготовления, исследованием механизмов отказов элементов к.и., установлением закономерностей процессов деградации элементов к.и., приводящих к отказу к.и., причин возникновения отказов к.и. и их предвестников и др.

Известные подходы в этой области для построения моделей отказов к.и. используют модель одного превалирующего деградационного процесса, либо модели нескольких независимых деградационных процессов, приводящих к отказу к.и., что не приводит к существенному повышению точности расчетов показателей надежности проектируемых РЭС. В связи с этим возникает проблема разработки моделей отказов высоконадежных к.и. путем исследования причин возникновения отказов к.и. и их предвестников и механизмов деградации элементов к.и., приводящих к отказу к.и.

**Анализ литературы.** Для расчетов показателей надежности к.и. РЭС в [1 – 5] используют следующие модели отказов: строго вероятностные (стати-

стические), вероятностно-физические, коэффициентные. Неприемлемость строго вероятностных моделей отказов для расчетов показателей надежности высоконадежных к.и. была рассмотрена выше. Вероятностно-физические модели отказов к.и. [2, 3] получают на основании анализа физических процессов деградации, происходящих в изделии и приводящих к возникновению отказа, при этом параметры получаемого распределения наработки до отказа к.и. имеют конкретную физическую интерпретацию. Такие модели отказов устанавливают связь вероятности появления отказа с характеристиками физических процессов деградации, приводящих к отказу к.и. [2]. В [3] предлагается многомерный деградационный процесс элементов к.и. свести к результирующему одномерному в виде модуля вектора. При этом различные механизмы взаимодействия деградационных процессов элементов к.и. аппроксимируются модулем вектора, что приводит к большим погрешностям расчетов показателей надежности комплектующих изделий.

Построение коэффициентных моделей отказов [4, 5] основано на теоретических и экспериментальных исследованиях влияния температуры, влажности, давления, механических и других воздействий, режимов функционирования (ток, напряжение), свойств конструкции (прочность, пластичность, гибкость, электропроводность) и др. Перечисленные параметры имеют разные величины при работе в реальных условиях по отношению к базовым и учитываются в виде коэффициентов. При таком подходе также не рассматриваются взаимодействия различных механизмов отказов к.и.

Для разработки модели отказов необходимо рассматривать к.и. как сложное изделие, состоящее из взаимодействующих элементов, исследовать процессы деградации элементов к.и., их причинно-следственные связи при диагностике отказов к.и., механизмы взаимодействий деградационных процессов элементов к.и., приводящих к отказу к.и. в целом, т.е. необходимо разрабатывать модели отказов к.и., используя известные диагностические модели к.и.

**Цель статьи.** Разработка моделей отказов к.и. с различными типами взаимодействий деградационных процессов элементов к.и. с использованием их диагностических моделей.

Известные диагностические модели к.и. [6] разрабатываются на основе представления возможных состояний к.и. в процессе эксплуатации, процессов функционирования элементов и к.и. в целом с учетом его конструкции, технологии изготовления. Диагностическая модель представляет собой [8] перечень элементов к.и., механизмы их отказов и взаимодействий и др. Анализ диагностических моделей к.и. [6] показывает, что при разработке моделей отказов к.и. могут быть положены следующие типы взаимодействий деградационных процессов элементов к.и.:

1) деградационные процессы, протекающие в различных элементах к.и., приводят к возникновению независимых отказов к.и.;

2) деградационные процессы  $\xi_i(t)$  элементов к.и., не приводящие к отказу к.и., при достижении определенного «предельного состояния» являются причинами возникновения других процессов  $\zeta_{\varphi}(t)$ , приводящих к отказам к.и.;

3) деградационные процессы  $\xi_i(t)$  элементов к.и., приводящие к отказу к.и., развиваются в зависимости от того, достигают ли определенного состояния другие деградационные процессы  $\zeta_{\varphi}(t)$ , не приводящие к отказу;

4) различные комбинации вышеназванных схем взаимодействий.

Получим основные расчетные соотношения показателей надежности к.и. для первых трех типов взаимодействий.

При первом типе взаимодействий элементов комплектующее изделие можно представить состоящим из  $L$  элементов, в каждом из которых может возникнуть отказ, обусловленный деградационным процессом определенного типа. Тогда, по теореме умножения вероятностей независимых событий получим выражение для вероятности безотказной работы к.и. в течение наработки  $t$ :

$$P(t) = \prod_{l=1}^L P_l(t) \quad (1)$$

и вероятности отказа 
$$F(t) = 1 - \prod_{l=1}^L (1 - F_l(t)), \quad (2)$$

где  $P_l(t) = 1 - F_l(t)$ .

Плотность распределения наработки к.и. до отказа  $f(t)$  получим, дифференцируя (2) по  $t$ :

$$f(t) = \sum_{l=1}^L \frac{f_l(t)}{1 - F_l(t)} \prod_{i=1}^L (1 - F_i(t)). \quad (3)$$

Средняя наработка до отказа и интенсивность отказов к.и. определяются по известным формулам [4]:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) dt; \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (4)$$

При  $f_1(t) = \frac{1}{\lambda} \exp(-\lambda t)$ ,  $f_2(t) = (\sqrt{2\pi}\sigma)^{-1} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$  и  $L = 2$  в [4],

как частный случай, получены формулы для расчета показателей  $P(t)$  и  $T_{cp}$ :

$$P(t) = e^{-\lambda t} \Phi\left(\frac{\mu-t}{\sigma}\right); \quad T_{\text{н\ddot{o}}d} = \frac{1}{\lambda} \left(1 - e^{-\lambda\mu + \lambda^2\sigma^2/2}\right), \quad (5)$$

$$\text{где } \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{x^2}{2}} dx.$$

При втором типе взаимодействий случайную наработку  $T$  до отказа к.и. можно представить в виде суммы с.в.  $T_1$  и  $T_2$ :

$$T = T_1 + T_2, \quad (6)$$

где  $T_1$  – наработка элемента к.и. до своего «предельного состояния», обусловленного достижением в момент  $\tau$  деградационного процесса  $\xi_i(t)$  этого состояния, характеризуемая п.р.  $f_1(t)$ ;  $T_2$  – наработка элемента к.и. с момента  $\tau$  до отказа к.и., обусловленного деградационным процессом  $\zeta_\varphi(t)$ , характеризуемая п.р.  $f_2(t)$ .

Тогда п.р. наработки до отказа к.и. найдем по формуле свертки:

$$f(t) = \int_0^t f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau. \quad (7)$$

Вероятность безотказной работы к.и. в течение наработки  $t$  найдем как сумму вероятностей:

$$P(t) = P_1(t) + \int_0^t P_2(t-\tau) f_1(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где  $P_1(t)$  – вероятность того, что в течение наработки  $t$  процесс  $\xi_i(t)$  не достиг своего «предельного состояния»;  $P_2(t-\tau) f_1(\tau) d\tau$  – вероятность того, что в момент  $f_1(\tau) d\tau$  на интервале  $(\tau, \tau + d\tau)$  процесс  $\xi_i(t)$  достиг своего «предельного состояния» и после этого момента в течение наработки  $t - \tau$  деградационный процесс  $\zeta_\varphi(t)$  не привел к отказу к.и. Средняя наработка до отказа и интенсивность отказов к.и. определяются по формулам (4).

Рассуждая аналогично, можно получить расчетные соотношения для ф.р. наработки к.и. до отказа при третьем типе взаимодействий:

$$F(t) = \int_t^\infty f_\zeta(\tau) d\tau + \int_0^t f_\xi(\tau) d\tau + \int_0^t F_{\xi/\zeta}(t-\tau) f_\zeta(\tau) d\tau, \quad (9)$$

где  $F_{\xi/\zeta}(t-\tau)$  – условная ф.р. наработки  $\xi$  к.и. до отказа.

Средняя наработка до отказа и интенсивность отказов к.и. вычисляются по формулам (4). Для проведения расчетов по формуле (9) необходимо знание условной ф.р.  $F_{\xi/\zeta}(t)$ , определение которой требует дополнительных

испытаний к.и. Поэтому в большинстве случаев определение показателей надежности к.и. с таким типом взаимодействий деградационных процессов элементов к.и. целесообразно осуществлять моделированием процессов  $\xi_i(t)$  и  $\zeta_\varphi(t)$ . Параметры таких моделей могут быть уточнены по результатам их испытаний и последующей эксплуатации.

При разработке таких моделей отказов высоконадежных и других к.и. РЭС необходимо использование данных о деградации элементов, об ухудшении функциональных характеристик элементов, механизмах отказов элементов к.и., механизмах их взаимодействия и др., которые должны формироваться в банк данных диагностических моделей. Диагностические модели банка данных должны уточняться по результатам проводимых исследовательских и экспериментальных испытаний, а также эксплуатационных наблюдений.

**Выводы.** Предложено при разработке математических моделей отказов высоконадежных и других к.и. использовать известные диагностические модели к.и, т.е. учитывать механизмы отказов элементов к.и. и их взаимодействия, параметры этих моделей могут быть уточнены по результатам их испытаний и последующей эксплуатации. Модели отказов к.и. могут быть использованы для расчетов показателей надежности РЭС, в том числе показателей долговечности РЭС и, в частности, для решения задач продления ресурсов РЭС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шор Я.Б. *Статистические методы анализа и контроля качества и надежности*. – М.: Сов. радио, 1962. – С. 213 – 217.
2. ДСТУ 3004-95. *Надійійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними*. – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с.
3. Погребинский С.Б., Стрельников В.П. *Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ*. – М.: Радио и связь, 1988. – С. 61 – 129.
4. *Надежность и эффективность в технике: Справочник в 10 т. Т. 6: Экспериментальная обработка и испытания / Ред. совет: В.С. Авдеевский и др.* – М.: Машиностроение, 1989. – С. 83 – 111.
5. Фомин Г.П. *Анализ физики отказов элементов вычислительной техники*. – М.: Знание, 1980. – С. 3 – 19.
6. Бережной В.П., Дубицкий Л.Г. *Выявление причин отказов РЭА*. – М.: Радио и связь, 1983. – С. 5 – 96.

Поступила 7.11.2003

*КИРИЛЮК Анатолий Сергеевич, преподаватель кафедры ХВУ. В 1996 году окончил ХВУ. Область научных интересов – эксплуатация, надежность и эффективность в технике.*