

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И СТОИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ РЭТ

Рассматривается пример прогнозирования показателей надежности и стоимости эксплуатации сложных объектов РЭТ на основе применения имитационной статистической модели. На примере продемонстрировано, как показатели надежности и стоимости эксплуатации зависят от состава, структуры и надежностных свойств объекта РЭТ.

Ключевые слова: имитационная статистическая модель, показатели надежности и стоимости, ремонт, техническое обслуживание.

Вступление и постановка задачи. Данную статью можно рассматривать как продолжение ранее опубликованной статьи [1], в которой приведены сведения об имитационной статистической модели (ИСМ) процессов технического обслуживания и ремонта сложных объектов радиоэлектронной техники (РЭТ). Основное предназначение ИСМ состоит в получении прогнозных оценок показателей надежности (ПН) и стоимости эксплуатации (СЭ) сложных объектов РЭТ с учетом их параметров, а также параметров процесса технического обслуживания и ремонта. Применение ИСМ позволяет оценивать влияние этих параметров на ожидаемые значения ПН и СЭ и на основе этого выбирать их оптимальные значения.

Характерными признаками рассматриваемых объектов РЭТ являются:

- наличие в их составе большого количества комплектующих элементов (десятки, сотни тысяч);
- разнотипность комплектующих элементов (радиоэлектронные, механические, электромеханические, гидравлические и т.д.);
- иерархическая конструктивная структура (объект может состоять из шкафов (агрегатов), блоков (узлов), печатных плат (микросборок) и т.п.);
- произвольная надежностная структура (наиболее типичной является последовательно-параллельная надежностная структура);
- наличие встроенной системы технического диагностирования (СТД).

Еще одной особенностью сложных объектов РЭТ является их многофункциональность: возможность одновременно или последовательно выполнять несколько функций (например, радиолокационная станция может обнаруживать цели в заданном секторе, определять государственную принадлежность цели, работать в условиях наличия или отсутствия внешних помех и т.п.). Многофункциональность всегда должна учитываться при определении критерия отказа объекта. Для простоты мы далее будем рассматривать объекты РЭТ как однофункциональные и полагать, что объект находится в состоянии отказа, если не выполняется хотя бы одна из заданного подмножества его функций, или в работоспособном состоянии в противном случае.

Исходная информация об объекте РЭТ, которая используется ИСМ, представляется следующими обобщенными параметрами:

Параметр Б (состав, структура, показатели безотказности элементов):

$$B = \{G, E_o, \langle \langle T_{cpi}, v_i, te_i, ts_i \rangle; i = \overline{1, |E_o|} \rangle\}, \quad (1)$$

где $G = \langle E, V \rangle$ - дерево конструктивной структуры (E - множество узлов дерева, представляющих все конструктивные элементы объекта; V - множество дуг, соединяющих эти узлы и тем определяющих вхождение одних конструктивных элементов в другие);

E_o - множество всех *восстанавливаемых* элементов (элементов, входящих в структурную схему надежности объекта, $E_o \subset E$);

$\langle T_{cpi}, v_i, te_i, ts_i \rangle$ - параметры, характеризующие отдельные конструктивные элементы:

T_{cpi} - средняя наработка до отказа i -го элемента; v_i - коэффициент вариации случайной наработки до отказа; te_i - тип элемента; ts_i - тип надежностной структуры элемента ($i = \overline{1, |E|}$).

Каждый элемент $e_i \in E$ может быть *простым* ($te_i = 0$), то есть рассматриваться как целое, без уточнения его внутренней структуры, или *составным* ($te_i = 1$), содержащим другие элементы, которые, в свою очередь, могут быть как составными, так и простыми. Надежностная структура составного элемента может быть трех типов: одиночный элемент ($ts_i = 0$), последовательное соединение однотипных элементов ($ts_i = 1$) или параллельное соединенных однотипных элементов ($ts_i = 2$ - постоянное резервирование; $ts_i = 3$ - замещающее резервирование);

Параметр В (характеристики ремонтпригодности объекта):

$$B = \{ \tau_{ктс}, \tau_{пн}, \langle \langle \tau_{зам i}, \tau_{то i}, p_{зам i} \rangle; i = \overline{1, |E_o|} \rangle \}, \quad (2)$$

где $\tau_{ктс}$ - средняя продолжительность контроля технического состояния объекта; $\tau_{пн}$ - средняя продолжительность поиска неисправности; $\tau_{зам i}$ - среднее время замены i -го элемента; $\tau_{то i}$ - средняя продолжительность операции ТО; $p_{зам i}$ - вероятность замены элемента при проведении ТО;

Параметр С (стоимостные характеристики объекта):

$$C = \{ C_{ктс}, C_{пн}, \langle \langle C_{0i}, C_{зам i}, C_{то i} \rangle; i = \overline{1, |E_o|} \rangle \}, \quad (3)$$

где $C_{ктс}$ - стоимость операции контроля технического состояния объекта; $C_{пн}$ - стоимость операции поиска неисправности; C_{0i} - стоимость i -го элемента; $C_{зам i}$ - стоимость операции замены i -го элемента; $C_{то i}$ - стоимость операции ТО i -го элемента ($i = \overline{1, |E_o|}$).

В результате моделирования с помощью ИСМ получают оценки для следующих стандартных показателей надежности объекта РЭТ:

$T_0 = T_0(B, V)$ - средняя наработка на отказ объекта;

$T_B = T_B(B, V)$ - среднее время восстановления;

$K_r = K_r(B, V)$ - коэффициент готовности,

а также показатель стоимости эксплуатации

$c_3 = c_3(B, V, C)$ - удельная стоимость эксплуатации объекта.

Помимо указанных точечных показателей в качестве выходной информации в результате моделирования формируется оценка функции параметра потока отказов объекта $\Omega(t) = \Omega(t/B, V)$, которая содержит в себе весьма важную информацию о динамике свойства безотказности объекта в процессе его эксплуатации.

Оценки ПН и СЭ в ИСМ вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\tilde{T}_0 &= t_{0\Sigma} / n_{\text{отк}\Sigma}; \\ \tilde{T}_B &= t_{B\Sigma} / n_{\text{отк}\Sigma}; \\ \tilde{K}_r &= t_{0\Sigma} / (t_{0\Sigma} + t_{B\Sigma}); \\ \tilde{c}_3 &= C_{B\Sigma} / (T_3 N_I),\end{aligned}\tag{4}$$

где $n_{\text{отк}\Sigma}$ - накопленное суммарное число отказов объекта в течение времени моделирования;

$t_{0\Sigma}$, $t_{B\Sigma}$ - накопленное суммарное время наработки между отказами и время пребывания объекта в состоянии восстановления;

$C_{B\Sigma}$ - накопленные суммарные затраты стоимости на восстановление;

T_3 - моделируемый период эксплуатации объекта РЭТ;

N_I - количество выполненных итераций процесса моделирования (под итерацией понимается однократная модельная реализация процесса отказов-восстановлений объекта на заданном интервале его эксплуатации T_3).

Величины $t_{B\Sigma}$ и $C_{B\Sigma}$ определяются по формулам:

$$\begin{aligned}t_{B\Sigma} &= \sum_{i \in E_B} n_{oi\Sigma} (\tau_{кр} + \tau_{пн} + \tau_{зам i}), \\ C_{B\Sigma} &= \sum_{i \in E_B} (C_{зам i} + C_{0i}) n_{oi\Sigma},\end{aligned}\tag{5}$$

где $n_{oi\Sigma}$ - суммарное число отказов i -го элемента ($n_{oi} = \sum_i n_{oi\Sigma}$).

Приведенные формулы дают общее представление о механизмах получения оценок ПН и СЭ, реализованных в ИСМ.

В ИСМ вычисляется также относительная ошибка ε оценки среднего числа отказов на интервале T_3 , которая принимается в качестве характеристики точности получаемых результатов моделирования. Величина ε определяется как 95%-й доверительный интервал для случайного числа отказов объекта на интервале T_3 , отнесенный к соответствующему среднему числу отказов. Формулы для вычисления оценки функции параметра потока отказов $\tilde{\Omega}(t_i/B, V)$ можно найти в [2].

Цель данной статьи состоит в том, чтобы продемонстрировать применение ИСМ для прогнозирования ПН и СЭ сложного объекта РЭТ и одновременно показать, как прогнозируемые показатели зависят от выбора подмножества восстанавливаемых элементов E_0 .

В качестве примера объекта РЭТ для моделирования возьмем тот же тестовый объект, который использовался нами в [1]. Дерево конструктивной структуры тестового объекта изображено на рис. 1.

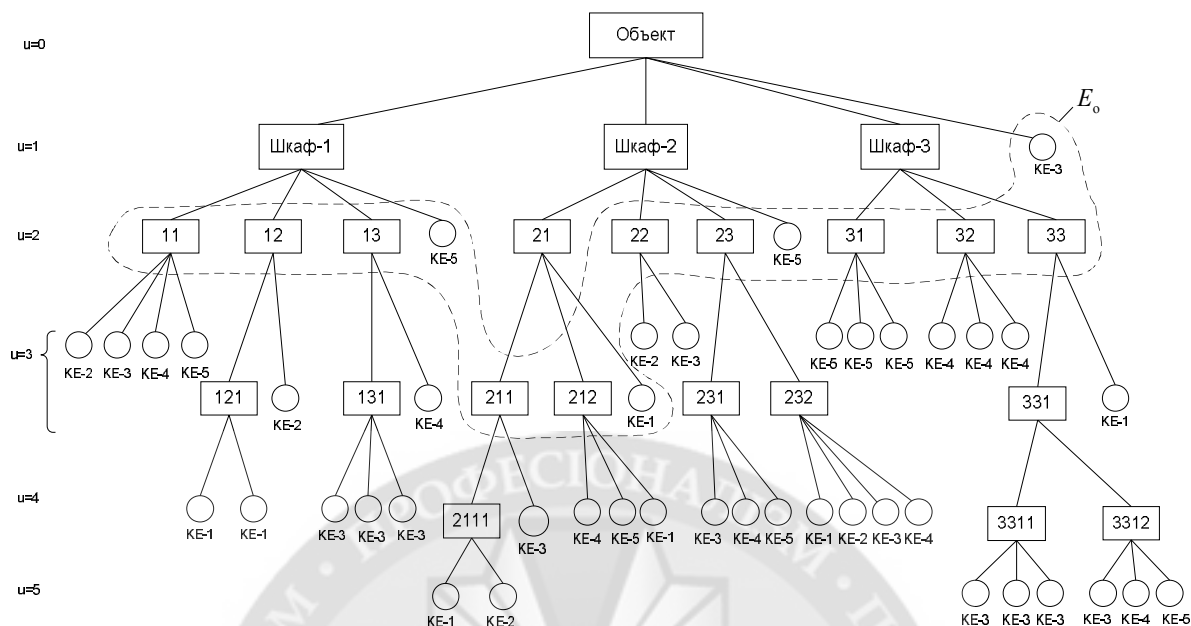


Рис. 1. Конструктивная структура тестового объекта

Все составные элементы имеют последовательную надежность структуру. Для всех простых элементов (элементов нижнего конструктивного уровня) KE-1 – KE-5 заданы следующие значения средней наработки до отказа $T_{срi}$: 10^5 ч; $5 \cdot 10^4$ ч; $33,5 \cdot 10^3$ ч; $25 \cdot 10^3$ ч; $20 \cdot 10^3$ ч; коэффициент вариации для всех типов комплектующих элементов задан одинаковым: $V_i = 1,0$.

Для генерирования случайной наработки до отказа элементов в ИСМ используется диффузионное немонотонное (DN) распределение, которое считается наиболее адекватной моделью отказов для разнотипных элементов [3].

Показатели безотказности для всех составных элементов старших конструктивных уровней (включая и объект в целом) вычисляются в процессе моделирования.

Показатели ремонтпригодности (входящие в параметр В) заданы следующие: $\tau_{кис} = 0$; $\tau_{пн} = 0,5$ ч; $\tau_{замi}$ - заданы одинаковыми для элементов различных конструктивных уровней: для $u = 1$ (уровень шкафов) – 5 ч; для $u = 2$ – 0,5 ч; для $u = 3$ – 1 ч; для $u = 4$ – 1,5 ч; для $u = 5$ – 2 ч.

Показатели стоимости (параметр С) не анализировались и поэтому заданы произвольно: $C_{кис} = 0$; $C_{пн} = 10$ у.е.; $C_{oi} = 10$ у.е.; $C_{замi} = 5$ у.е.

Указанные числовые значения параметров перед началом расчетов были введены в базу данных (БД) модели. Кроме того были заданы параметры моделирования: период эксплуатации $T_s = 20$ лет, количество итераций $N_i = 600$. Детальное описание процесса подготовки исходных данных для ИСМ приведено в [2].

Расчеты были произведены для 5 вариантов задания множества E_0 , соответствующих 5 уровням конструктивной структуры тестового объекта (в каждом варианте в множество E_0 включались элементы только заданного конструктивного уровня). Все полученные результаты моделирования представлены в табл. 1. Прямыми скобками $|E_0|$ (второй столбец) обозначается число элементов множества E_0 .

Таблица 1

Прогнозируемые оценки ПН и СЭ объекта РЭТ, полученные при различных вариантах задания множества E_0

u	$ E_0 $	$\tilde{T}_0$, ч	$\tilde{T}_в$, ч	$\tilde{c}_3$, у.е./ч	ε
1	4	2380	5,50	0,07990	0,220
2	12	1352	1,19	0,04229	0,161
3	26	945	1,57	0,04076	0,144
4	38	784	1,79	0,04105	0,129
5	43	730	1,89	0,04197	0,120
БД	14	1316	1,24	0,04145	0,160

На рис. 2 для примера показан вид экрана ПК с результатами, полученными для варианта $u = 5$ (в этом варианте в множество E_0 включаются все простые элементы). В центральной части экрана отображается график функции параметра потока отказов $\tilde{\Omega}(t/B, B)$, слева внизу отображаются полученные в результате моделирования точечные оценки ПН и СЭ.

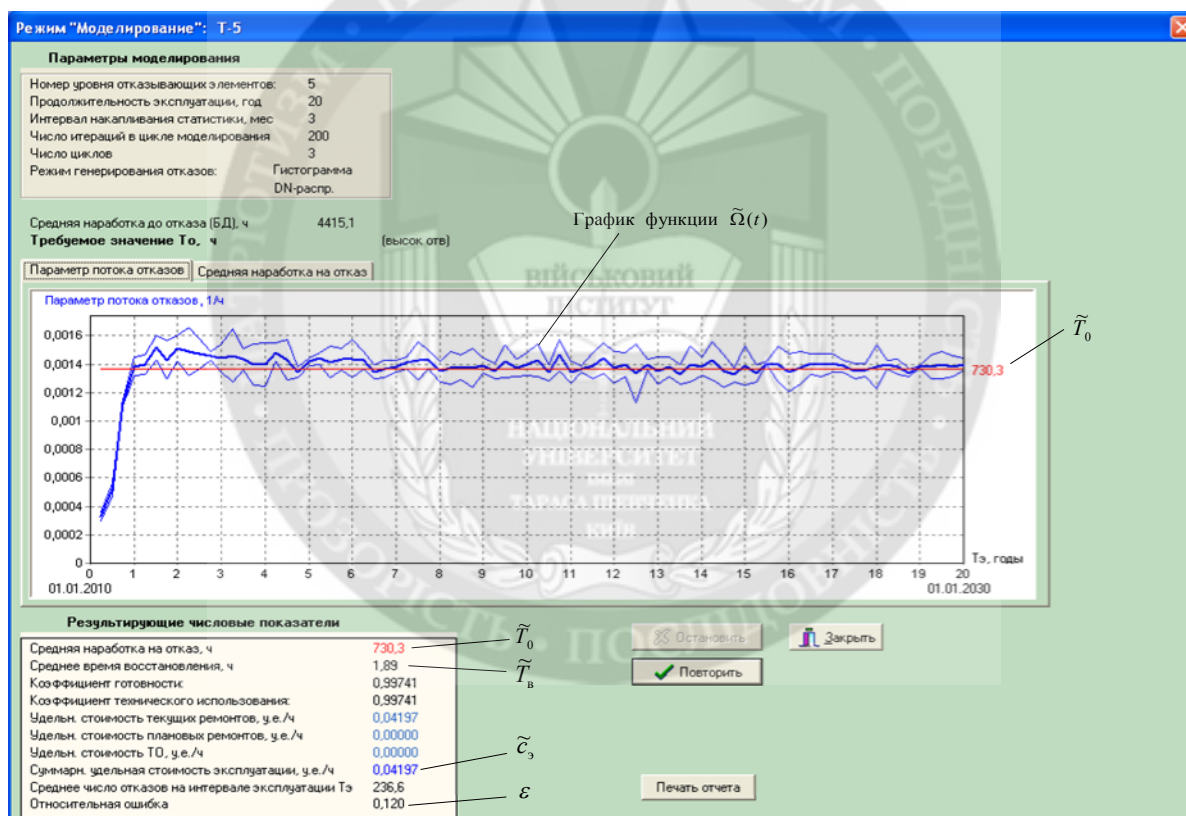


Рис. 2. Вид экрана ПК после завершения моделирования

По полученным результатам моделирования (данным, приведенным в табл. 1) можно сделать такие выводы:

- 1) средняя наработка на отказ объекта T_0 возрастает при возрастании конструктивного уровня восстанавливаемых элементов (при уменьшении номера конструктивного уровня u);
- 2) среднее время восстановления $T_в$ изменяется в зависимости от заданных значений среднего времени замены элементов различных конструктивных уровней.

Выявленная в рассмотренном примере зависимость ПН от выбора множества восстанавливаемых элементов E_0 показывает, что расчетные (прогнозируемые) значения ПН и СЭ сложного восстанавливаемого объекта РЭТ могут существенно зависеть от выбора множества E_0 . Чем ближе множество E_0 будет соответствовать реальной эксплуатационной практике, тем более адекватными будут получаемые оценки ПН и СЭ объекта РЭТ.

Очевидно, что в процессе эксплуатации с наибольшей вероятностью будут заменяться те конструктивные элементы, которые требуют наименьших затрат времени на их замену. Пусть, например, для рассматриваемого тестового объекта такими являются элементы, которые на рис. 1 обведены пунктирной линией. Полученные для этого случая результаты моделирования приведены в нижней строке табл. 1 (отмеченной символом “БД”, обозначающим, что состав множества E_0 определяется информацией, введенной в базу данных модели). Если предположить, что именно эти элементы будут с наибольшей вероятностью восстанавливаться (заменяться) в процессе реальной эксплуатации, то полученные оценки ПН и СЭ будут наиболее адекватным результатом прогнозных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ленков С.В., Цыцарев В.Н., Браун В.О., Царев Ю.А., Березовская Ю.В. Прогнозирование надежности и стоимости эксплуатации сложных объектов РЭТ с учетом их технического обслуживания и ремонта // Научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология». – Харьков, - 2014. – №1(34). – С. 210 – 214.
2. Имитационное статистическое моделирование процессов технического обслуживания и ремонта сложных объектов РЭТ: модели и оптимизация. [монография] / С.В.Ленков, В.О. Браун, В.А. Осыпа и др.; под ред. С.В. Ленкова. – Николаев: Сент-Гросс, 2013. – 244 с.
3. Стрельников В.П., Федухин А.В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. – К.: Логос, 2002. – 486 с.

Без рецензії.

к.т.н., доц. Браун В.О., Березовська Ю.В.,
д.т.н., проф. Ленков С.В., к.т.н., доц. Осыпа В.А., к.т.н., доц. Цицарев В.М.

**ЗАСТОСУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОГО СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ
ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ Й ВАРТОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ РЕТ**

Розглядається приклад прогнозування показників надійності й вартості експлуатації складних об'єктів РЕТ на основі застосування імітаційної статистичної моделі. На прикладі продемонстровано, як показники надійності й вартості експлуатації залежать від складу, структури й надійнісних властивостей об'єкта РЕТ.

Ключові слова: імітаційна статистична модель, показники надійності й вартості, ремонт, технічне обслуговування.

V. Braun, J. Berezovskaya, S. Lenkov, V. Osipa, V. Tsitsarev

**APPLICATION FOR A SIMULATION OF STATISTICAL MODELING
FORECASTING OF RELIABILITY AND COST OF OPERATION OF COMPLEX
OBJECTS RADIOELECTRONIC EQUIPMENT**

n example of forecasting reliability and cost of operation of complex electronic equipment facilities based on the use of simulation statistical model. Gives the example of how reliability and operating costs depend on the composition, structure and properties of the object of reliability of electronic equipment.

Keywords: statistical model simulation, reliability and cost, repair and maintenance.