

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИВУЧЕСТИ И ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ МНОГОЯРУСНЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СТРУКТУР

д.т.н., проф. В.С. Харченко, З.Г. Мухаметов, В.И. Токарев

*Приводится имитационная модель (ИМ) многоярусной мажоритарно-резервированной системы (ММРС), обладающей свойством живучести. ИМ рассматривается как совокупность модели исследуемой системы (МС), модели внешнего экстремального воздействия (МЭВ) и модели взаимодействия (МВ).*

**Постановка проблемы.** Для систем управления (СУ) современных летательных аппаратов (ЛА) [1] характерна организация бортового оборудования с применением большого числа цифровых устройств и введением резервирования для повышения надежности управления полетом. С другой стороны, сами ЛА могут функционировать в условиях неблагоприятных экстремальных воздействий (ЭВ). ЭВ могут быть как природного характера («жесткие» ионизирующие излучения космического пространства, грозовые разряды и т.д.) [7], так и искусственного происхождения, например, ошибки оператора (человека), воздействие противника и другие факторы. ЭВ приводят к нарушению ординарности потока отказов элементов и возникновению так называемых кратных отказов (одновременный отказ более одного) элементов системы в целом. Это обуславливает тенденцию развития СУ в направлении придания им свойств живучести [3], которая характерна для технических комплексов критического использования (ТККИ) в целом [6], примером которых могут быть информационно-управляющие системы АЭС. В таких системах реализуется глубокое многоканальное резервирование, определяемое уровнем требований к их безопасности с учетом функционирования в условиях радиационных, сейсмических, электромагнитных воздействий.

Обычно в аналитических моделях теории надежности предполагается, что поток отказов элементов систем – простейший. В условиях кратных отказов использование аналитических моделей становится слишком громоздким и трудоемким, а в некоторых случаях невозможным. ИМ позволяет устранить эти ограничения и учесть время диагностирования и реконфигурации в системах, обладающих свойством живучести.

**Анализ литературы.** Рассматриваемые в [1, 3] понятия, модели и их

структурная организация послужили базой для составления исходной исследуемой модели, что, по сути, являются входными данными ИМ. Теоретической основой построения ИМ являются положения работ [2, 4, 5]. В [6] анализируются показатели живучести ТККИ. Анализ приведенных в [6] моделей показал, что такие модели позволяют оценивать резервированные системы, обладающие свойством живучести, с ограниченной структурной сложностью. Возможности предлагаемой ИМ позволяют существенно снизить эти ограничения и в основном зависят от детализации и адекватности описания. При формализации МЭВ были использованы сведения из [7].

**Цель статьи** – используя методики, описанные в [2 – 7], разработать ИМ, которая позволила бы получить показатели живучести ММРС СУ ЛА практически любой структурной сложности.

**Разработка ИМ.** Структурная исходная схема ММРС приведена на рис. 1.

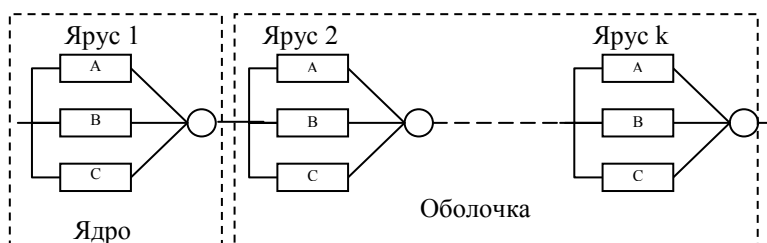


Рис. 1. Вариант структурной схемы ММРС

При разработке имитационной модели приняты следующие **допущения**: 1) система состоит из групп равнонадежных элементов с точечными размерами; 2) система представляет собой ММРС с плавающим ядром (под ядром понимается функциональный модуль со средствами мажоритирования; плавающее – в смысле, что ядром может быть любая  $g \geq 1$  группа ярусов, остальные ярусы, при этом, считаются оболочкой; причем, отказ яруса оболочки приводит к снижению уровня качества функционирования – деградации на одну ступень [3], а отказ яруса ядра – к отказу системы); 3) ЭВ точечное, имеет импульсную природу; 4) область действия ЭВ совпадает минимум с одним элементом системы; 5) все элементы имеют одинаковую вероятность попадания в область действия ЭВ; 6) поток естественных отказов (ЕО, старение либо производственный дефект) элементов – пуассоновский; 7) интенсивность ЭВ достаточна для перехода любого элемента системы в неработоспособное состояние. **Параметры исследуемой системы**: интенсивность отказов нерезервированной системы (канала ММРС) –  $\lambda_{\text{нрс}}$ ; интенсивность отказов блока мажоритирования и коммутации –  $\lambda_{\text{м}}$ ; общее количество яру-

сов –  $k$  и мажоритарных элементов –  $m$ ; количество ярусов оболочки –  $n$ ; количество ярусов ядра  $k$ - $n$ ; тип алгоритма реконфигурации. **Параметры ЭВ:** количество ЭВ –  $l$ ; кратность отказов элементов от ЭВ –  $r$ ; моменты времени ЭВ –  $t_{bi}$ ; элементы, которые отказали как по естественным причинам, так и вследствие ЭВ, также могут быть повторно поражены очередным ЭВ.

В основу моделирования положена программная реализация имитационной модели процесса функционирования ММРС в условиях ЭВ, которые обуславливают кратные отказы элементов. Данная модель построена в соответствии с методами статистического моделирования на ЭВМ [2, 5] и базируется на следующих формализациях, касающихся моделей системы (МС), ЭВ (МЭВ) и взаимодействий (МВ):

– **МС** представляет собой двухмерный массив времен  $MT(i, j)$ , где  $i = \overline{1, k}$  соответствует номеру яруса, причем, если  $j = 0$ , – он соответствует мажоритарному органу этого яруса, а если  $j = \overline{1, m}$ , – каналам соответствующих ярусов. Содержание элементов массива – это среднее время наработки на отказ элементов каналов системы и мажоритарных элементов:

$$MT(i, j) = -\frac{\ln(\text{Random})}{\lambda_m}, \text{ если } j=0; \quad MT(i, j) = -\frac{\ln(\text{Random})}{\lambda_k}, \text{ если } j \neq 0. \quad (1)$$

где **Random** – генератор случайных чисел в интервале  $[0, 1]$ , что соответствует вероятности безотказной работы (ББР) элементов каналов  $P_k(t)$  и мажоритарных элементов  $P_m(t)$  соответственно.

Соотношение (1) получено, исходя из экспоненциальности закона распределения отказов, что вытекает из следующих зависимостей:

$$P(t) = e^{-\lambda t}; \quad t = -\frac{\ln(P(t))}{\lambda}. \quad (2)$$

– **МЭВ** состоит из программных счетчиков возникновения ЭВ, и разработана с учетом предположений пунктов (3) – (5), (7) допущений и ограничений относительно ЭВ;

– **МВ** определяет логические связи между МС и МЭВ и фиксирует следующие положения: 1) согласно пунктов (1) и (5) допущений поражаемые элементы системы (элементы массива  $MT(i, j)$ ) выбираются случайным образом по равномерному закону [2, 4], а их суммарное число при одном ЭВ равно  $r$ ; 2) при поражении элементов соответствующие элементы массива обнуляются; 3) из счетчика событий ЭВ отнимается соответствующее количество нанесенных экстремальных воздействий; 4) для выбора индексов массива используется  $i = \text{Random}(k) + 1$  и  $j = \text{Random}(m + 1)$ , что отвечает случайному выбору номера яруса ( $i$ ) и канала ( $j$ ).

На рис. 2 показаны два варианта распределения ЕО элементов системы и моменты ЭВ. Времена  $t_{b1}$ ,  $t_{b2}$ ,  $t_{b3}$  соответствуют ЭВ и определяют

математические ожидания случайных моментов времени воздействий, распределенных по нормальному закону с задаваемой дисперсией [4];  $t_m$ ,  $t_{k.m}$  – моменты отказов мажоритарных элементов и элементов каналов системы, описываемые формулами (2).

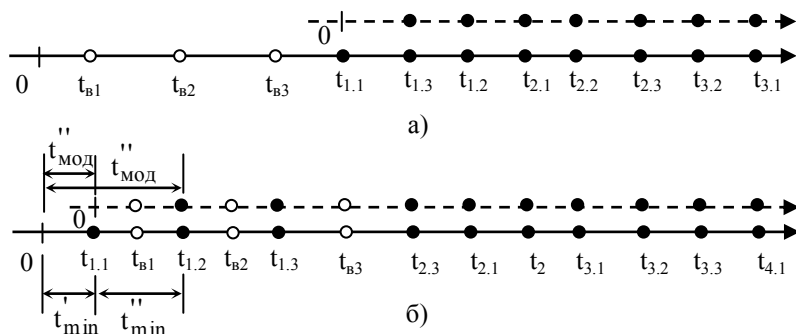


Рис. 2. Варианты распределения ЭО элементов системы и моментов ЭВ: до (а) и после (б) начала отказа элементов системы

В самом общем виде МВ реализуется следующим образом: в массиве  $MT(i, j)$  выбирается наименьший элемент и обнуляется его содержимое (ЭО элемента); все элементы массива уменьшаются на значение выбранного элемента  $t_{min}$  (сдвиг начала отчета времени, на рис. 2 указано пунктирной линией), а модельное время  $t_{mod}$  увеличивается на то же значение (система отработала выбранное время); если в выбранном интервале (наименьший элемент в массиве  $MT(i, j)$ ) есть ЭВ, то моделируется ЭВ; процедура повторяется, пока не будет отказ очередной оболочки или не откажут все оболочки или система. По отказу оболочек или системы фиксируется модельное время (время наработки оболочек или системы на отказ). Таким образом, данный алгоритм повторяется в соответствии с заданным количеством экспериментов.

**Результаты исследования ИМ.** В результате эксперимента получаем массив времен наработки на отказ  $T(i1, i2)$ , где  $i1 = \overline{1, d+1}$  ( $d$  – количество уровней деградации);  $i2 = \overline{1, n}$  ( $n$  – номер эксперимента, причем,  $n_{max}$  соответствует заданному числу экспериментов); то есть времена наработки на отказ оболочек и системы в конкретном эксперименте. Массив результатов  $T(i1, i2)$  схематично показан на рис. 3. В результате обработки массива  $T(i1, i2)$  получаем среднее время наработки на отказ ярусов оболочки и системы, как среднее арифметическое полученных значений. Данное положение принимается в соответствии с первой теоремой Чебышева о схо-

дмости матожидания к среднему арифметическому [4]. Вероятности нахождения исследуемой системы на уровнях деградации и сохранения работоспособности на соответствующих уровнях деградации вычисляются как частоты появления того или иного события [4]. Зависимости этих вероятностей от времени, как результат ИМ, графически изображены на рис. 4.

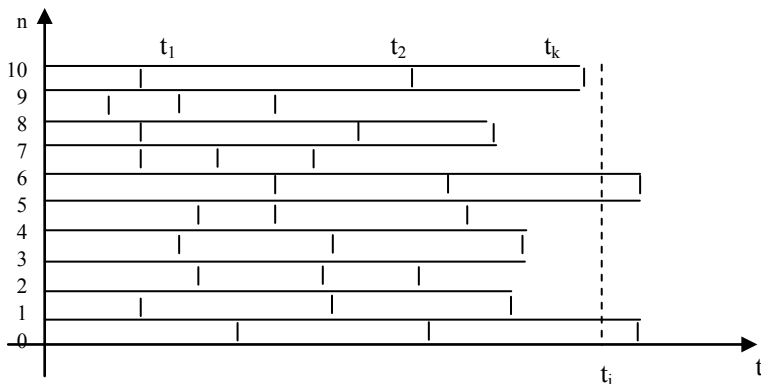


Рис. 3. Диаграмма результатов моделирования для системы с параметрами  $k = 3$  и  $n_{\max} = 10$ ;  $[0, t_i]$  – интервал исследования поведения системы;  $t_1$  – момент отказа первого яруса оболочки,  $t_2$  – момент отказа второго яруса оболочки,  $t_k$  – момент отказа системы

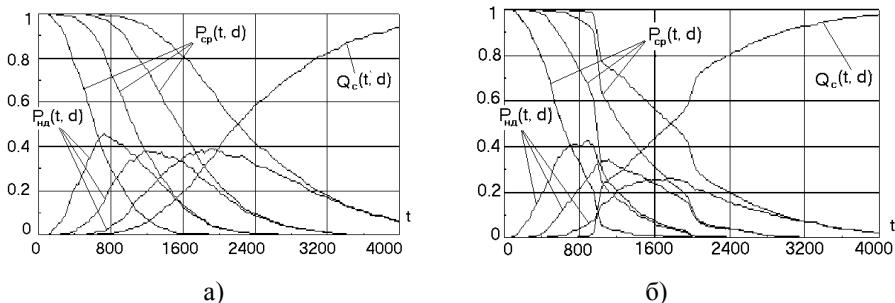


Рис. 4. Графики зависимостей вероятностей нахождения на соответствующих уровнях деградации  $P_{нд}(t, d)$ , сохранения работоспособности по уровням деградации  $P_{cp}(t, d)$  и отказа  $Q_c(t)$  системы с параметрами:  $k = 4$ ,  $\lambda_{нрс} = 5E - 3$ ,  $\lambda_m = 1.25E - 6$  при отсутствии ЭВ (а) и ЭВ с параметрами:  $r = 2$ ,  $t_{в1} = 1000 \pm 30$  часов,  $t_{в2} = 2000 \pm 30$  часов (б)

**Выводы.** В настоящее время сложность оснащения современных ЛА цифровыми системами достигает такого уровня, что использование аналитических методов оценки надежности, особенно с учетом развивающейся тенденции придания им свойств живучести (аналогично живым организмам) становится весьма проблематичным. Используя имитационное моде-

лирование процесса функционирования системы в условиях экстремального воздействия, на современных ЭВМ можно получить оценки надежности и живучести с вполне удовлетворительной точностью. Проведенное моделирование показывает, что функции вероятностей сохранения работоспособности скачкообразно меняют свои значения после воздействия ЭВ. При этом крутизна падения вероятности определяется дисперсией моментов воздействий, а ее амплитуда – кратностью ЭВ. Использование имитационного моделирования позволяет при получении показателей надежности и живучести существенно расширить диапазон исследуемых параметров, таких как кратность и число ЭВ, их временные характеристики, включая законы распределения, количество ярусов ММРС, учесть которые в аналитических моделях зачастую невозможно. Точность результатов, как показано на примере разработанной имитационной модели, зависит, в основном, от уровня формализации исследуемой системы. Данная модель может быть легко унифицирована для различных ТККИ путем уточнения соответствия между структурой системы и ее моделью МС, задания законов распределения параметра  $r$  в модели МЭВ и уточнения модели МВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Харченко В.С. Структурная организация отказоустойчивых и живучих систем летательных комплексов. Уч. пособие. – МО. – 1992. – 111 с.
2. Советов Б.Я. Моделирование систем. – М.: Наука, 1986. – 255 с.
3. Введение в теорию живучести вычислительных систем / А.Г. Додонов, М.Г. Кузнецов, Е.С. Горбачик – К.: Наук. думка, 1990. – 184 с.
4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 480 с.
5. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. – М.: Наука, 1968. – 64 с.
6. Харченко В.С., Лысенко И.В., Мельников А.В. Оценка и обеспечение живучести информационно-вычислительных и управляющих систем ТК критического использования // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – № 1. – С. – 34 – 39.
7. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 295 с.

Поступила 1.08.2003

**ХАРЧЕНКО Вячеслав Сергеевич**, доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем и сетей НАКУ им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”. Области научных интересов – надежность, живучесть и безопасность компьютерных систем управления критического применения, технологии их проектирования, моделирования и экспертизы.

**МУХАМЕТОВ Зариф Гарифович**, нач. лаборатории ИВЦ ХВУ. В 1985 году окончил Харьковское ВВКИУ РВ. Области научных интересов – надежность и живучесть систем управления летательными аппаратами, программное обеспечение компьютерных систем.

**ТОКАРЕВ Виктор Иванович**, генеральный конструктор ПО АСУ ТП ЗАО «Радий».

*В 1979 году окончил Одесский политехнический институт. Область научных интересов – методы, средства оценки и обеспечения надежности и безопасности ИУС АЭС.*