

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНЫМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ НЕОДНОРОДНЫХ РЕЗЕРВНЫХ КАНАЛОВ

д.т.н., проф. В.С. Харченко, к.т.н. В.И. Гридин

Предлагается имитационная модель надежности гибридных резервированных структур (ГРС), имеющих ненагруженные и облегченные режимы работы резервных каналов с аппаратной многоверсионностью. Моделируется наработка до отказа 3-х и 4-х канальных структур при нестационарном потоке отказов каналов для определения их надежности. Анализируются возможные варианты размещения каналов в основной и резервной системах ГРС в зависимости от законов распределения времени наработки до отказа.

Введение. Для выполнения высоких требований к безотказности цифровых устройств (ЦУ) и систем с длительной эксплуатацией используются методы гибридного резервирования, в том числе с ненагруженными и облегченными режимами работы резервных каналов (РК) [1].

Для подтверждения полученных аналитических моделей при допущениях об экспоненциальном законе распределения времени до отказа [1], а также исследования ГРС с каналами, имеющими неэкспоненциальные законы распределения из-за наличия внутри каналов ярусов резервирования или использовании программированных логических интегральных схем (ПЛИС) [2], вызывает необходимость имитационного моделирования.

Выполнение требований современных международных и национальных нормативных документов [3, 4] для систем критического применения, сопряжено не только с использованием многоверсионного программного обеспечения, но и многоверсионных аппаратных средств при многоканальных вычислениях, что накладывает отпечаток на необходимость учета различных реализаций версий каналов (различные параметры и законы распределения времени наработки до отказа).

Цель статьи – разработка и исследование имитационной модели надежности ГРС, имеющих ненагруженные и облегченные режимы работы резервных каналов с аппаратной многоверсионностью.

Допущения. Было сделано допущение об использовании экспоненциального закона распределения с параметрами $\lambda = \text{const}$. Для некоторых ГРС отказы каналов устройства не удовлетворяют условиям стационарного случайного процесса. При распределении времени возникновения отка-

зов таких устройств, частота отказов определяется по закону Рэлея и распределения Вейбулла (это распределение соответствует форсированному режиму работы канала [5]):

$$P^r(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}; \quad P^e(t) = e^{-\lambda t^k}. \quad (1)$$

При использовании в гибридной структуре каналов с различными законами распределения необходимо выполнить условия равноценности каналов по некоторым критериям. Как правило, в качестве критерия выступает средняя наработка до отказа (что согласуется с показателями надежности на импортную элементную базу), поэтому выбран критерий равенства площадей под кривыми вероятностей безотказной работы (ВБР) каналов. Для закона Рэлея и экспоненциального закона распределения времени до отказа:

$$\int_0^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt; \quad \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma = \frac{1}{\lambda}; \quad \sigma = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\lambda}. \quad (2)$$

Для распределения Вейбулла асимметрию и эксцесс распределения можно определить, воспользовавшись выражениями:

$$\int_0^{\infty} e^{-\lambda_0 t^k} dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt; \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{\lambda_0^{(-1/k)} \Gamma(1/k)}{k}. \quad (3)$$

При равенстве масштаба распределения λ_0 и интенсивности отказов λ экспоненциального распределения параметр $k=1$. Поэтому масштаб распределения определяется исходя из значений k . Для $k=0,5$ (при $k<1$ интенсивность отказов возрастает, характеристика времени возникновения отказов аппаратуры в течение времени ее приработки) $\lambda_0 = \sqrt{2\lambda}$; для $k=2$ (при $k>1$ интенсивность отказов убывает, характеристика времени возникновения отказов аппаратуры при износе) $\lambda_0 = \pi\lambda^2/4$.

Значения для соответствующих интенсивностей отказов облегченных каналов, восстанавливающих (мажоритарных) органов (МО) и коммутаторов для различных законов распределения получаются подстановкой значений коэффициентов h , l , k и m в выражения $\lambda_{CC}=l\lambda$, $\lambda_K=k\lambda$, $\lambda_M=m\lambda$, где l , k , $m<1$. При этом для закона Рэлея $\sigma_{CC}=\sigma/l$, $\sigma_K=\sigma/k$, $\sigma_M=\sigma/m$, где для облегченного РК $\sigma_{TK}=\sigma/h$, где $0<h<1$.

Моделирующий алгоритм процесса функционирования ГРС реализован на основе метода Монте-Карло. Его сущность в том, что:

а) все множество событий рассматриваемого процесса отвечает некоторым случайным моментам времени, связанным с отказами каналов, МО и

коммутатора и соответствует вектору случайных чисел, находящемуся в строке матрицы. Число элементов вектора равно числу элементов структуры;

б) матрица чисел формируется из столбцов векторов чисел, подчиняющихся соответствующим законам распределения времени между отказами каналов, МО и коммутатора;

в) количество элементов вектора чисел и строк в матрице соответствует количеству итераций процесса моделирования;

г) смена состояний устройства, связанная с отказами каналов, отвечает значениям чисел в строке матрицы, располагающимся в порядке возрастания после сортировки;

д) случайное время работы ненагруженного канала увеличивается на время изменения состояния устройства, связанное с его включением;

е) конечное состояние устройства (отказ устройства), связанное с отказами каналов, согласно алгоритму работы соответствующей структуры, отвечает значениям чисел столбца матрицы.

Таким образом, моменты времени отказа ЦУ являются случайными и определяются моментами отказов каналов.

Если среднее время $t_{эj}^0$ безотказной работы j -го элемента ($j=1, \dots, N$) есть случайная величина с функцией распределения $F_{эj}(t)$, для которой существует алгоритм вычисления обратной функции $F_{эj}^{-1}(t)$, то в соответствии с [5, 6]:

$$t_{эj}^0 = F_{эj}^{-1}(\xi_j),$$

где ξ_j - элемент последовательности $\{\xi_i\}$, $i=1, \dots, N$ псевдослучайных чисел (ПСЧ), равномерно распределенных на (0, 1). Считая потоки отказов простейшими для экспоненциального закона, значение $t_{эj}^0$ по формуле [7]:

$$t_{эj}^0 = -\frac{1}{\lambda_{эj}} \ln(1 - \xi_j), \quad (4)$$

где $\lambda_{эj}$ - интенсивность отказа канала ЦУ, которая в соответствии с ранее принятым допущением, для облегченных каналов, МО и коммутатора определяется, как $\lambda_{эj}^T = h\lambda_{эj}$; $\lambda_{эj}^K = k\lambda_{эj}$; $\lambda_{эj}^M = m\lambda_{эj}$; $\lambda_{эj}^{CC} = l\lambda_{эj}$.

Для закона Рэлея, значения $t_{эj}^{0P}$ можно вычислять по формуле:

$$t_{эj}^{0P} = \sqrt{-2 \ln(1 - \xi_j)} \sigma_{эj}, \quad (5)$$

где $\lambda_{эj}$ - параметр распределения Рэлея, для которого действительны допущения, сделанные для $\lambda_{эj}$.

Для распределения Вейбулла значения $t_{эj}^{0B}$ вычисляются по формуле

$$t_{эj}^{0B} = \exp\left(\ln\left(-\frac{\ln(1 - \xi_j)}{\lambda}\right)\right) / k. \quad (6)$$

Очевидно, что для канала, находившегося в облегченном резерве и

не отказавшего до некоторого момента времени τ отказа канала основной системы, в момент τ происходит изменение режима работы до нагруженного. При этом канал имеет расход ресурса надежности по сравнению с ненагруженным РК, выражающийся в уменьшении времени функционирования до отказа. Данный аспект учитывается на основании сделанных допущений и формулы (5) для экспоненциального закона распределения:

$$t_j^{0T} = (t_{эj}^T - \tau) \cdot h. \quad (7)$$

Из времени функционирования облегченного канала t_j^T с параметрами $h\lambda$ вычитается τ_j и остаточное время умножается на параметр h . Значение t_j^{0T} характеризует время до отказа j -го РК в облегченном режиме.

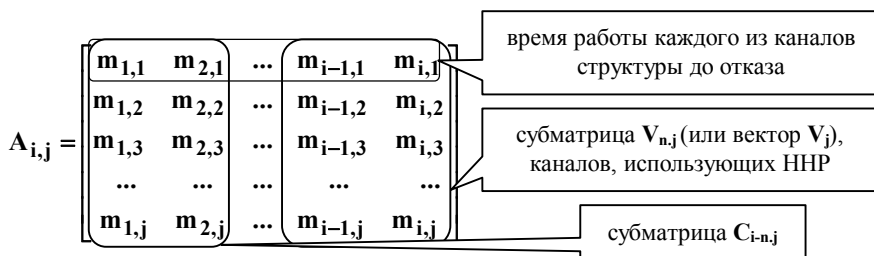
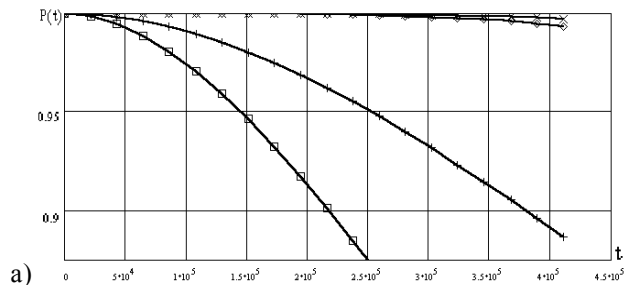


Рис. 1. Матрица $A_{i,j}$, поясняющая работу имитационной модели

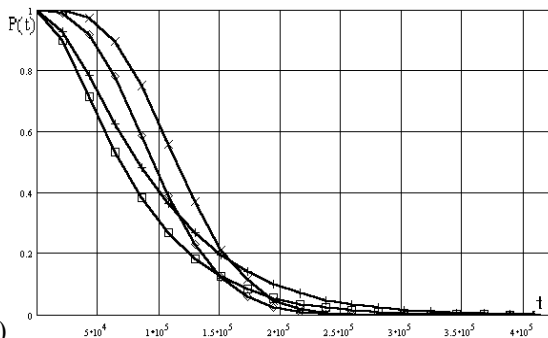
Для получения зависимости ВБР от времени в имитационной модели алгоритм с заданным шагом определяет промежутки времени до заданного фиксированного значения шагов q и подсчитывает количество значений вектора U , которые больше текущего значения t_q . Оно соответствует количеству работоспособных структур n в N итерациях для фиксированного значения t_q . Разделив n_q на N , получим ВБР $P(t_q)$ в точках t_q .

По результатам моделирования, полученным в ходе машинных экспериментов с имитационной моделью, построены графики зависимости $P(t)$ от времени эксплуатации трех- и четырехканальных ГРС ЦУ с облегченным и ненагруженным РК для рассматриваемого множества алгоритмов реконфигурации при различных значениях параметров устройства и законов распределения времени до отказа. Некоторые зависимости представлены на рис. 2.

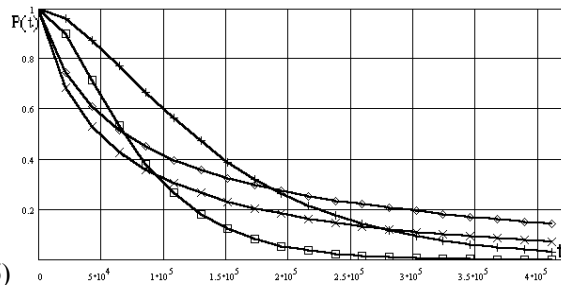
Выводы. Данная модель является гибкой (позволяет производить настройку под особенности каждой конкретной структуры) и может использоваться в САПР для исследования широкого круга резервированных структур и их выбора с учетом заданных требований. Она позволяет оценить безотказность ГРС со сложными алгоритмами реконфигурации с ненагруженными и облегченными режимами работы резерва и нестационарном потоке отказов.



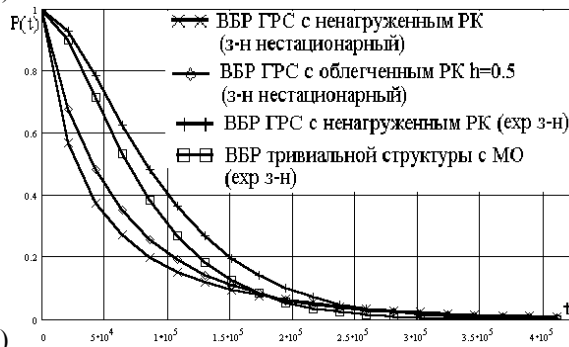
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Результаты моделирования трехканальной гибридной резервированной структуры:

– с адаптацией и трехканальной тривиальной структуры с МО при использовании в ГРС для всех каналов:

а) закона Рэлея с параметрами $\sigma=0.798 \cdot 10^5$ ч, $\lambda=10^{-5}$ 1/ч;

б) распределения Вейбулла с параметрами: $k=0.5$, $\lambda_0=\sqrt{2\lambda}$, $\lambda=10^{-4}$ 1/ч;

– с МО без адаптации при использовании:

в) для основной структуры - распределения Вейбулла; для РК - экспоненциального закона с параметрами $k=2$, $\lambda_0=\pi\lambda^2/4$, $\lambda=10^{-4}$ 1/ч;

г) для всех каналов распределения Вейбулла времени до отказа каналов с параметрами $k=0.5$, $\lambda_0=\sqrt{2\lambda}$, $\lambda=10^{-4}$ 1/ч

Применение многоверсионных каналов для повышения надежности ГРС должно сопровождаться выбором таких конструктивных параметров каналов, при которых обеспечивались бы условия выполнения требований по показателям $R_{ГРС}^{ТР}$ и $T_{СФ}$.

Результаты исследования показателей безотказности ГРС в предположении о различных законах распределения времени до отказа, позволяют сделать вывод о наличии точек пересечения графиков изменения показателей безотказности ГРС, имеющих сходные конфигурации и различные алгоритмы работы. Следовательно в рамках многоверсионных аппаратных каналов возможно создание бигибридных ГРС, т.е. структур, в которых алгоритм реконфигурации может корректироваться в зависимости от наработки каналов.

Применение каналов с «молодеющим» распределением времени до отказов в ГРС с ненагруженными каналами недопустимо, поскольку приводит к ухудшению показателей вероятности безотказной работы устройства по сравнению со структурами с обычными режимами работы резерва.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харченко В.С., Гридин В.И. Гибридное резервирование бортовых систем обработки информации с различными режимами включения резерва // Информатика. – К.: Наук. думка. – 1999. – Вып.7. – С. 54 - 63.
2. *The Programmable Logic Data Book.* – Xilinx inc., 1999. – 694 p.
3. НП 306.5.02/3.035 – 2000. Вимоги з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних та керуючих систем, важливих для безпеки АЕС. – К.: ДАЯР. – 2000. – 83 с.
4. *Software for Computer Based Systems Impotent to Safety in NPP. Safety Guide. №NS-G-1.1.* – IAEA. – 2000. – 90 p.
5. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. – М.: Высш. шк., 1985. – 272 с.
6. *Proceedings 35-th National Conference on Reliability and Quality Control in Electronics, 1989.* – 205 p.
7. Иванова В.М. Случайные числа и их применение. – М.: Финансы и статистика, 1984. – 112 с.

Поступила 08.01.2002

ХАРЧЕНКО Вячеслав Сергеевич, доктор техн. наук, профессор, зав. каф. «Компьютерные системы летательных аппаратов» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», тел. 44-25-14. Область научных интересов – исследование надежности программных и аппаратных средств систем критического использования.

ГРИДИН Владимир Иванович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ХВУ. Область научных интересов – исследование надежности многоверсионных систем с различными режимами работы резерва.