УДК 681.321

МЕТОД МНОГОВЕРСИОННОГО МАЖОРИТАРНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

д.т.н., проф. В.С. Харченко, И.В. Пискачева

Проведена разработка имитационной модели для оценки надежности многоверсионных мажоритарно-резервированных систем, с учетом различных законов распределения времени до отказа аппаратных и программных средств и алгоритмов мажоритирования.

Постановка проблемы. Нарушение работоспособности цифровых управляющих вычислительных систем (ЦУВС) может быть вызвано как отказами элементов аппаратных средств (АС), так и проявлением дефектов программных средств (ПС). Доля отказов, обусловленных последней причиной растет [1]. Поэтому важное теоретическое и практическое значение имеет решение вопросов, связанных с совершенствованием метода повышения надежности ЦУВС, устойчивых к отказам АС и ПС на основе многоверсионного мажоритарного резервирования, а также с оценкой надежности таких систем [2 – 4].

Анализ литературы. Наиболее действенным для повышения надежности ЦУВС является применение мажоритарного резервирования АС [2, 4, 5] и принципа N-версионного программирования, предложенного в работах Авизениса [6] и развитого затем в трудах Б. Литтлвуда [7, 8], А. Романовского [9], Б.А. Головкина [10] и др. Многоверсионные системы с мажоритарной и другими типами структур исследованы в [2, 4, 11].

В перечисленных работах не в полной мере решены важные вопросы: исследования влияния числа каналов m, числа версий r ($1 \le m \le 5$, $1 \le r \le 5$) на надежность многоверсионных мажоритарно-резервированных систем (ММРС); разработки имитационных моделей надежности ММРС, учитывающих различные законы распределения времени до отказа как АС, так и ПС, а также различные алгоритмы адаптивного мажоритирования. Актуальность этих задач подтверждается широким применением ММРС в различных критических приложениях [1, 6, 8].

Цель статьи. Исследование ММРС с использованием имитационного моделирования, оценка надежности отказоустойчивых архитектур ММРС, учитывающей различные законы распределения времени до отказа АС и ПС и алгоритмы мажоритирования.

Имитационная модель надежности ММРС. В качестве показателей для оценки надежности ММРС принято среднее время функционирования (T) до потери работоспособности и вероятность безотказной работы (P(t)) на интервале времени от 0 до t, а также число каналов (m), количество версий ПС (r), интенсивности отказов АС и ПС ($\lambda 1$ и $\lambda 2$), а также порог срабатывания мажоритарного элемента (2 из 3, 2 из 4 и т.д.). Время отказа системы является случайным и определяется временем отказов АС или ПС каналов ММРС. При проведении имитационного моделирования приняты следующие допущения: отказы ПС и АС каждого канала независимы; абсолютно надежный мажоритарный элемент ($P_{МЭ} = 1$). Блок-схема моделирующего алгоритма изображена на рис. 1.

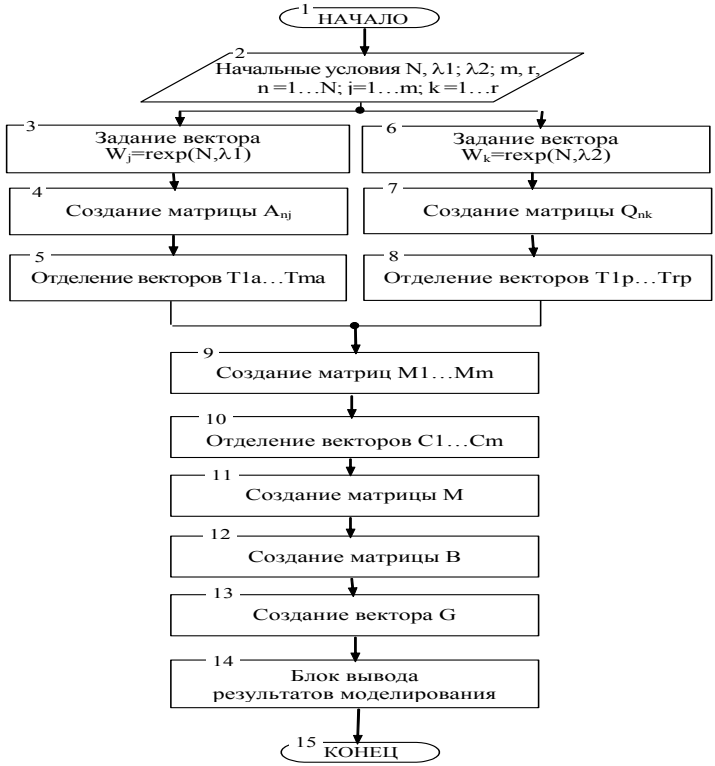

Рис. 1. Алгоритм работы имитационной модели

В блоке 2 задаются начальные условия моделирования (m, r, N – количество итераций (проведенных опытов), которое зависит от необходимой точности, λ1, λ2). Начало отсчета при моделировании ORIGIN = 1. Параллельно встроенными генераторами чисел при помощи процедур W_j = rexp(N, λ1) (блок 3) и W_k = rexp(N, λ2) (блок 6) генерируются вектора случайных чисел, изменяющихся по экспоненциальному закону, где j = 1 … m; k = 1 … r. Физический смысл каждого элемента полученного вектора – время отказа каждого из каналов с момента времени t = 0.

Блок 4 создает матрицу A_{nj} в зависимости от количества каналов, в которой j столбцов и N строк. Каждый столбец матрицы показывает время отказа АС каждого из m каналов ММРС. Блок 7 создает матрицу Q_{nk} в зависимости от количества версий ПС, в которой k столбцов и N строк. Каждый столбец матрицы показывает время отказа каждой из r версий ПС ММРС. Блок 5 предназначен для отделения от матрицы A_{nj} субматриц T1a … Tma, соответствующих состоянию АС каждого из m каналов (блок 5). Блок 8 предназначен для отделения от матрицы Q_{nk} субматриц T1p…Trp, соответствующих отказам каждой из r версий ПС канала (блок 8).

Блок 9 предназначен для объединения векторов T1a … Tma и T1p … Trp попарно (соответственно каждому каналу) в матрицы M1 … Mm (процедура augment(Tma, Trp)). В результате получаются матрицы, каждая из которых состоит из двух столбцов – состояния АС канала и состояния ПС этого же канала.

Так как канал считается отказавшим, если отказала или аппаратная, или программная его составляющая, или обе эти компоненты, то отделяются векторы C1 … Cm, соответствующие минимальным значениям матриц M1 … Mm (блок 10). Блок 11 обеспечивает объединение векторов C1 … Cm в матрицу M, в которой m столбцов и N строк (блок 11). Блок 12 создает матрицу B, в которой сортируются процедурой sort по возрастанию строки матрицы M. Таким образом, первым столбцом в матрице B будет время отказа первого отказавшего канала, вторым – время отказа второго канала и т.д.

Блок 13 производит выбор i-го столбца матрицы B согласно порогу срабатывания мажоритарного элемента (субматрица G). Следовательно, в i-м столбце получен вектор случайных чисел времени отказа ММРС согласно алгоритма работы МЭ. Для получения зависимости ВБР ММРС от времени в имитационной модели используется блок 14 [10, 11].

Анализ результатов исследований аналитической [4] и имитационной моделей трехканальной трехверсионной ММРС (рис. 2) показал, что они сходятся с высокой достоверностью. При $\lambda 1 = \lambda 2 = 10^{-6}$ 1/ч и шаге интегрирования (U = 5000) получим результаты, которые также можно

считать достоверными по критерию Колмогорова ($\lambda = 0.476$, $P \approx 0.99$). С увеличением числа опытов сходимость характеристик увеличивается.

Анализ имитационной модели трехверсионной трехканальной архитектуры при равномерном распределении времени до отказов АС и ПС показал, что по критерию Колмогорова при $N = 10000$ имеем $D = 5.76 \times 10^{-3}$ и $\lambda = 0.275$, $P(\lambda) \approx 1$.

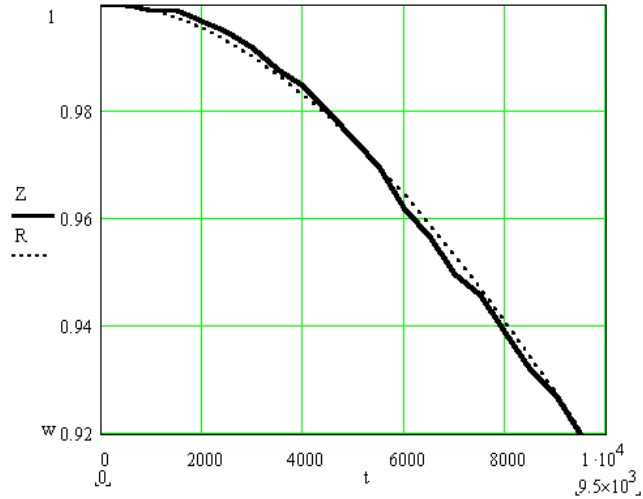

Рис. 2. График зависимости ВБР трехканальной трехверсионной ММРС от времени, полученный с помощью имитационного (Z) и аналитического (R) моделирования при условии экспоненциального закона распределения потока отказов АС и ПС во времени

Выводы. Усовершенствованная имитационная модель процесса функционирования в необслуживаемом режиме ММРС позволяет производить в соответствии с выбранными показателями анализ ее надежности с учетом параметров АС и ПС, а также различных алгоритмов мажоритирования.

Анализ аналитических и имитационных моделей на примерах трехверсионной трехканальной и двухверсионной четырехканальной мажоритарно-резервированных архитектур с использованием критерия Колмогорова показал высокую сходимость полученных результатов при разных законах распределения потока отказов АС и ПС во времени.

Исследование полученных имитационных моделей позволяет построить приоритетные ряды ММРС с целью выбора наиболее отказоустойчивой архитектуры для использования в ЦУВС реального времени. В дальнейшем предполагается построить имитационную модель надежности ММРС с учетом различных схем адаптации, что позволит полнее

производить оценку метода повышения надежности ЦУВС на основе многоверсионного мажоритарного резервирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Харченко В.С., Скляр В.В., Ястребенецкий М.А. Информационные технологии и проблема безопасности информационно-управляющих систем АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. – 2003. – № 2. – С. 18 – 29.*
2. *Харченко В.С. Структурная организация отказоустойчивых и живучих систем летательных комплексов. Учебное пособие. МО, 1992. – 112 с.*
3. *ДСТУ 3524-97. Проектна оцінка надійностей складних систем з урахуванням технічного і програмного забезпечення та оперативного персоналу. – К.: Держстандарт України, 1997. – 20 с.*
4. *Харченко В.С. Теоретические основы дефектоустойчивых цифровых систем с версионной избыточностью. – Х.: МО Украины, 1996. – 506 с.*
5. *Кривоносов А.И., Благодарный Н.П., Харченко В.С. и др. Принципы построения и оценка надежности бортовых управляющих вычислительных систем с мажоритарной архитектурой // Космічна наука і технологія. – 1995. – № 1. – С. 67 – 73.*
6. *Avizienis A. Fault-tolerance: the survival attribute of digital systems // IEEE Transactions of Computers. – 1978. – V. 66. – № 10. – P. 1109 – 1026.*
7. *Littlewood B., Strigini L. A discussion of practices for enhancing diversity in software designs. DISPO Project Draft Technical Report LS-DI-TR-04, vers. 1.1d, 2000. – 55 p.*
8. *Littlewood, B., Popov, P. and Strigini, L., "Design Diversity: an Update from Research on Reliability Modelling", Proc. Safety-Critical Systems Symposium 2001, Bristol, U.K., Springer, In print.*
9. *A. Romanovsky. Class Diversity Support in Object-Oriented Languages // Journal of Systems and Software. – 1998. – V. 48. – P. 43 – 57.*
10. *Головкин Б.А. Многовариантное программирование и его применение // Автоматика и телемеханика. – 1986. – № 7. – С. 5 – 39.*
11. *Пискачева И.В., Харченко В.С., Гридин В.И. Имитационная модель надежности управляющих вычислительных систем ракетных комплексов с учетом различных периодов эксплуатации // Збірник наукових праць. – Х.: ХВУ, 2002. – Вип. 4(42) – С. 92 – 95.*

Поступила 18.07.2003

***ХАРЧЕНКО Вячеслав Сергеевич**, доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем и сетей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», эксперт Государственного научно-технического центра ядерной и радиационной безопасности. В 1974 году окончил Харьковское ВВКИУ. Области научных интересов – критические компьютерные технологии и системы, методы и средства обеспечения надежности, живучести и безопасности.*

***ПИСКАЧЕВА Ирина Викторовна**, младший научный сотрудник научного центра при ХВУ. Окончила ХПИ в 1980 году. Область научных интересов – методы и средства*

обеспечения надежности цифровых управляющих вычислительных систем.