МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А. Н. Привалов
Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого
г. Тула, Россия
privalov.61@mail.rul
В. А. Шаров
Шуйский филиал Ивановского государственного университета,
г. Шуя, Россия
vs@aqs.ru

Аннотация. Рассматриваются цифровые управляющие системы. Отмечается, что с точки зрения надежности подобные системы имеют иерархическую четырехуровневую структуру. Показано, что при работе системы на нижнем уровне возникают как перемежающиеся отказы (сбои), так и отказы оборудования, которые могут приводить к отказу системы в целом.

Ключевые слова: *надежность, отказ, иерархическая структура, сеть Петри-Маркова*

В настоящее время при управлении различными объектами широко применяются электронные цифровые управляющие системы (ЭЦУС) [1, 2]. Увеличение роли цифровой техники породило техническую проблему обеспечения надежности систем управления [3, 4, 5]. Для обеспечения требуемых показателей надежности на этапе проектирования необходимо иметь адекватную модель их оценки, которая учитывает особенности функционирования аппаратных средств системы, вытекающие из цифрового характера управления [6, 7, 8]. Таким образом, потребности в широком внедрении ЭЦУС и отсутствие общей теории анализа и расчета эффективности и отказоустойчивости указанных систем объясняет необходимость и актуальность исследований в данной области.

Под электронными цифровыми управляющими системами ниже будут пониматься технические средства, в которых взаимодействие между узлами и блоками осуществляется посредством передачи/приема цифровых сигналов. Под цифровыми, в контексте решаемой задачи, понимаются сигналы, принимающие два значения, которые при технической реализации кодируются, как правило, хорошо различающимися значениями информативных параметров сигнала: высоким и низким уровнем постоянных напряжений. В ряде технических комплексов ЭЦУС имеют настолько значительный вес, что их сбои и отказы приводят, как минимум, к затруднениям в выполнении целевых функций комплекса, а в отдельных случаях могут привести к серьезным авариям и даже техногенным катастрофам.

Иерархическая структура типовой ЭЦУС приведена на рис. 1. Иерархия представлена следующими уровнями:

0 — уровень цифрового управляющего комплекса;

1 — уровень отдельных подсистем, обеспечивающих определенные функции комплекса;

2 — уровень узлов и блоков ЭЦУС, состоящих из элементов;

3 — уровень элементов (интегральных схем, транзисторов, резисторов, и т. п.).

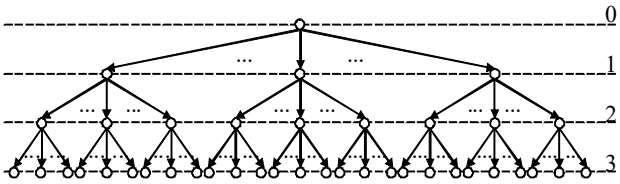

Рис. 1. Иерархическая структура ЭЦУС

На нижнем уровне иерархии ЭЦУС находятся элементы. Наиболее распространенными в настоящее время являются потенциальные элементы, в которых значения *TRUE* и *FALSE* закодированы в виде соответствующих уровней напряжений:

где $u := \begin{cases} TRUE \text{ when } u_n \geq u \geq u^1; \\ FALSE \text{ when } 0 \geq u \geq u^0, \end{cases}$ u_n — напряжение питания элементов, u^0 — пороговое напряжение значения *FALSE*; u^1 — пороговое напряжение значения *TRUE*.

В диапазоне $u^0 < u < u^1$ сигнал может быть воспринят элементами цифровых управляющих устройств и как *TRUE*, и как *FALSE*.

В динамическом режиме работы, т. е. при переключениях логических элементов, возникает наибольшее количество как устойчивых, так и перемежающихся отказов. Это явление связано со следующими обстоятельствами. В состав реальных логических элементов, кроме электрических

© Привалов А. Н., Шаров В. А., 2022

элементов, проектируемых разработчиком и выполняющих в изделии заранее запрограммированные функции, входят также т. н. «паразитные» элементы, формируемые в процессе изготовления, но не предусмотренные конструкторской документацией. К элементам подобного рода можно отнести сопротивления и индуктивности проводников, емкости близко расположенных проводников и т. п.

Статические отказы, как правило, возникают при превышении нагрузки на выходе логического элемента его допустимой нагрузочной способности. В этом случае выходной сигнал нагружаемого элемента сдвигается в область $u^0 < u < u^1$, что может привести к сбоям в работе нагружающих элементов. Кроме того, перегрузка приводит к повышенному расходу энергии на нагруженном элементе, что может привести его в неработоспособное состояние.

Динамические отказы на этом уровне возникают за счет эффекта «гонок».

Эффект «гонок» приводит при разбросе формирования сигналов на входах комбинационных схем к ложному срабатыванию комбинационной схемы.

На уровнях со второго по нулевой ЭЦУС функционирует как конечный автомат, включающий J элементов, каждый из которых при переходе ЭЦУС из текущего состояния в следующее должен сработать безошибочно. Исходя из этой особенности, моделью отказов ЭЦУС может быть сеть Петри-Маркова, представленная на рис. 2 [10]. В сети Петри-Маркова места $a_1, ..., a_j, ..., a_J$ моделируют пребывание соответствующих элементов в работоспособном или неработоспособном состоянии; место a_{J+1} фиксирует факт бессбойной работы системы на текущем временном интервале функционирования; место a_{J+2} фиксирует факт отказа системы; переходы z_1, z_2, z_3 являются синхронизирующими. Плотность распределения времени пребывания сети в состояниях $a_1, ..., a_j, ..., a_J$ определяется как $\delta(t - T)$, где T — период следования тактирующих импульсов; $\delta(\ldots)$ — δ-функция Дирака; плотность распределения времени пребывания в месте a_{J+1} определяется как $\delta(t)$; время пребывания в месте a_{J+2} определяется как $f_{J+1}(t)$, т. е. плотность распределения времени, затрачиваемого на восстановление системы.

Вероятности p_j, $1 \le j \le J$ выполнения полушагов из мест a_j в переход z_2 определяются вероятностями отсутствия сбоя j-х элементов на момент переключения. Вероятности $1 - p_j$, $1 \le j \le J$ выполнения полушагов из мест a_j в переход z_3 определяются вероятностями появления сбоя j-х элементов

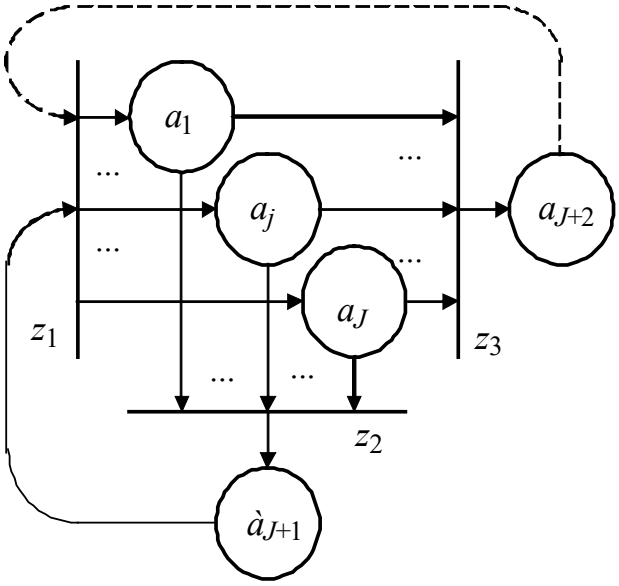

Рис. 2. Петри-Марковская модель отказов ЭЦУС

на момент переключения. Логические условия выполнения полушагов (z_2, a_{J+1}) и (z_2, a_{J+2}) являются следующими:

$$\lambda\left(z_2, a_{J+1}\right) = \bigwedge_{j=1}^{J} \lambda\left(a_j, z_2\right);$$

$$\lambda\left(z_2, a_{J+2}\right) = \bigvee_{j=1}^{J} \lambda\left(a_j, z_3\right),$$

где $\lambda(a_j, z_2)$ и $\lambda(a_j, z_3)$ — логические функции выполнения соответствующих полушагов; Λ — групповая конъюнкция; V — групповая дизъюнкция;

$$\lambda\left(a_j, z_2\right), \lambda\left(a_j, z_3\right) = \begin{cases} 1, \text{if semi-step is done;} \\ 0, \text{if semi-step is not done} \end{cases}.$$

По сети Петри-Маркова, приведенной на рис. 6, может быть получена общая зависимость для времени наработки ЭЦУС до отказа:

$$T_O = \frac{T \cdot \prod_{j=1}^{J} p_j}{1 - \prod_{j=1}^{J} p_j}.$$

Вероятности p_j могут быть оценены в результате анализа факторов, воздействующих на каждый элемент ЭЦУС в отдельности.

Таким образом, для иерархической структуры ЭЦУС выявлены основные факторы, вызывающие сбои в работе аппаратных средств. Построена модель, позволяющая рассчитать время наработки до отказа системы на уровнях со второго до верхнего.

Библиографический список

1. Landau I. D., Zito G. Digital Control Systems, Design, Identification and Implementation. Springer, 2006. 484 p.

2. Aström J., Wittenmark B., Computer Controlled Systems: Theory and Design. Tsinghua University Press. Prentice Hall, 2002. 557 p.

3. Sánchez-Silva M., Klutke G.-A. Reliability and Life-Cycle Analysis of Deteriorating Systems. Springer International Publishing. Switzerland. 2016. 355 p.

4. O'Conner P., Kleyner A. Practical Reliability Engineering, Willey and Sons, 2012. 456 p.

5. Додонов А. Г., Кузнецова М. Г., Горбачик Е. С. Введение в теорию живучести вычислительных систем / Отв. ред. В. А. Гуляев — Киев: Наукова думка, 1990. — 184 с.

6. Malik S. C., Rathee R. Reliability modelling of a parallel system with maximum operation and repair times. International Journal of Operational Research, Vol. 25, No. 1. 2016. Pp. 131–142.

7. Smith M. D. J., Simpson K. G.: Safety Critical Systems Handbook, Elsevier Ltd., NY. 2011. 270 p.

8. Rousand M. Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications, John Wiley & Sons, 2014. 466 p.

9. Балашов Е. П., Пузанков Д. В. Проектирование информационно-управляющих структур. — М.: Сов. радио, 1987. — 254 с.

10. Ларкин Е. В. К вопросу о расчете временных характеристик сетей Петри-Маркова // Известия ТулГУ. Сер. Вычислительная техника. Автоматика. Управление. Т. 1. Вып. 1. Вычислительная техника. — Тула: ТулГУ, 1997. — С. 68–75.

11. Ларкин Е. В., Сабо Ю. И. Применение сетей Петри-Маркова при моделировании структурных отказов в системе // Известия ТулГУ. Серия: Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Т. 4. Вып. 3. Системы управления. — Тула: ТулГУ, 2003. С.: 95–103. — 75.