

АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТРУКТУРНО-ЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Можаева И.А., Нозик А.А., Струков А.В.

АО «СПИК СЗМА», С-Петербург, E-mail: info@szma.com

Аннотация.

Рассматриваются особенности программной реализации алгоритмов оценки показателей надежности и безопасности восстанавливаемых структурно-сложных систем и итерационного логико-статистического метода для решения задач большой размерности. Расчетные формулы для некоторых показателей надежности восстанавливаемых систем с произвольной структурой могут получены на основе использования правил дифференцирования функции многих переменных. Показаны возможности развития режима логико-статистических расчетов, реализованного в ПК АРБИТР, на основе использования преимуществ и итерационного логико-статистического метода. Приведен фрагмент программной реализации алгоритма имитационного моделирования на примере анализа надежности мостиковой структуры.

Ключевые слова: Вероятностная функция, система логических уравнений, схема функциональной целостности, программный комплекс АРБИТР, структурно-сложные системы.

Введение

Процесс функционирования систем, содержащих восстанавливаемые элементы, описывается как последовательность чередующихся интервалов работоспособности и простоя (восстановления). Поэтому для восстанавливаемых объектов используются такие специальные показатели как, например, средняя наработка на отказ (в иностранной литературе – средняя наработка между отказами – МТВФ), среднее время восстановления, параметр потока отказов. Особую группу комплексных показателей надежности восстанавливаемых объектов составляют показатели готовности. Автоматизированное структурно-логическое моделирование позволяет получить оценки показателей надежности и безопасности систем с произвольной структурой, заменив в вероятностной функции показатели безотказности элементов на соответствующие показатели готовности.

Одним из возможных путей решения проблем автоматизированного моделирования надежности и безопасности структурно-сложных систем большой размерности является программная реализация итерационного логико-статистического метода (ИЛСМ). ИЛСМ реализует событийно-логический подход в сочетании с методами статистических испытаний [1,2]. В настоящее время ИСЛМ реализован в программном комплексе (ПК) АРБИТР [3] в режиме логико-статистического расчета для решения задач анализа надежности и безопасности невосстанавливаемых систем.

1. Описание основных блоков алгоритма аналитического моделирования надежности восстанавливаемых структурно-сложных систем

Особенность анализа показателей надежности восстанавливаемых систем заключается в том, что в вероятностной функции $P_s(t) = P\{p_1(t), \dots, p_i(t), \dots, p_n(t)\}$, используемой для оценки вероятности безотказной работы системы $P_s(t)$, при оценке коэффициента готовности системы K_G , вместо вероятностей безотказной работы элементов $p_i(t)$ используются коэффициенты готовности элементов K_{Gi} .

Основные блоки алгоритма расчета показателей надежности восстанавливаемых систем, реализованного в ПК АРБИТР [3], показаны на рис.1.



Рисунок 1 – Алгоритм расчета показателей надежности восстанавливаемой системы

После вычисления в блоке №1 аналитического выражения для многочлена ВФ в блоке №2 осуществляется расчет точного значения стационарного коэффициента готовности системы $K_{Гs}$ подстановкой значений стационарных коэффициентов готовности элементов $K_{Гi}$ в многочлен ВФ, то есть

$$K_{Гs} = P\{K_{Г1}, \dots, K_{Гi}, \dots, K_{Гn}\}, \quad (1)$$

где $K_{Гi}$ - стационарный коэффициент готовности i -го элемента,

$$K_{Гi} = \frac{T_{0i}}{T_{0i} + \tau_{Bi}} \quad (2)$$

T_{0i} , τ_{Bi} – средняя наработка до отказа и среднее время восстановления i -го элемента.

В блоке №3 рассчитываются значимости элементов ξ_i по формуле частной производной от выражения для стационарного коэффициента готовности:

$$\xi_i = \frac{\partial K_{Гs}}{\partial K_{Гi}} = P\{K_{Г1}(t), \dots, K_{Гi} = 1, \dots, K_{Гn}(t)\} - P\{K_{Г1}(t), \dots, K_{Гi} = 0, \dots, K_{Гn}(t)\}. \quad (3)$$

Вычисление значимости элементов восстанавливаемой системы осуществляется по формуле, реализованной в ПК АРБИТР для невозстанавливаемых систем, но в качестве аргументов используются коэффициенты готовности элементов $K_{Гi}$.

Расчетный алгоритм оценки показателей надежности для структур с восстанавливаемыми элементами, реализованный в ПК АРБИТР, построен на предположении об экспоненциальном распределении времени наработки на отказ и времени восстановления системы. Предположение об экспоненциальном распределении времени наработки на отказ системы при наличии резервированных элементов в общем случае нарушается. При этом погрешность оценки показателей надежности пропорциональна коэффициенту неисправности, то есть отношению среднего времени восстановления к средней наработке на отказ системы.

В рамках сделанного предположения средняя наработка на отказ системы T_{cp} рассчитывается по известной формуле:

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda}, \quad (4)$$

где Λ – интенсивность отказов системы.

Интенсивность отказов системы $\Lambda(t)$ как отношение функции плотности к вероятности

безотказной работы системы в общем виде с учетом формулы для дифференцирования сложных функций представляется выражением (4):

$$\Lambda(t) = \frac{f_s(t)}{P_s(t)} = \frac{1}{P_s(t)} \sum_{i=1}^n \frac{\partial P_s(t)}{\partial p_i(t)} \frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{1}{P_s(t)} \sum_{i=1}^n \xi_i f_i(t), \quad (5)$$

где $\frac{dp_i(t)}{dt} = f_i(t)$ – плотность вероятности случайной наработки до отказа i -го элемента;

$$\frac{\partial P_s(t)}{\partial p_i(t)} = \xi_i - \text{значимость } i\text{-го элемента системы.}$$

Для случая экспоненциального распределения времени наработки на отказ восстанавливаемой системы выражение (5) после замены вероятностей безотказной работы системы и элементов на соответствующие коэффициенты готовности может быть записано в виде:

$$\Lambda(t) = \Lambda = \frac{1}{K_{\Gamma_s}} \sum_{i=1}^n \xi_i \lambda_i K_{\Gamma_i}, \quad (6)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го элемента отказов.

Тогда

$$T_{cp} = \frac{1}{\Lambda} = K_{\Gamma_s} \left\{ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\partial K_{\Gamma_s}}{\partial K_{\Gamma_i}} f_i(t)} \right\} = \frac{K_{\Gamma_s}}{\sum_{i=1}^n \xi_i \lambda_i K_{\Gamma_i}}. \quad (7)$$

Расчет эквивалентной средней наработки на отказ системы T_{cp} осуществляется в блоке №4. Термин «эквивалентная» здесь объясняется принятием гипотезы об экспоненциальном распределении наработки на отказ системы, что эквивалентно замене структуры одним элементом, имеющим экспоненциальное распределение наработки на отказ с параметром T_{cp} . Формула (7) соответствует формуле (1) в [5].

Выражение для приближенной оценки *среднего времени восстановления системы* τ_B находится из формулы стационарного коэффициента готовности системы:

$$K_{\Gamma_s} = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + \tau_B}. \quad (8)$$

Из (8) следует:

$$\tau_B = \frac{1 - K_{\Gamma_s}}{K_{\Gamma_s}} T_{cp}. \quad (9)$$

Подставляя в (9) выражение для средней наработки на отказ системы (7), получим

$$\tau_{B_s} = (1 - K_{\Gamma_s}) \left\{ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\partial K_{\Gamma_s}}{\partial K_{\Gamma_i}} \lambda_i K_{\Gamma_i}} \right\} = (1 - K_{\Gamma_s}) \left\{ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \xi_i \lambda_i K_{\Gamma_i}} \right\}. \quad (10)$$

Расчет оценки среднего времени восстановления системы τ_B осуществляется в блоке №5. Формула (10) соответствует формуле (2) в [5].

В блоке №6 осуществляется вычисление приближенной оценки вероятности безотказной работы системы по следующей формуле:

$$P_{B_s}(t) \approx \exp[-t/(T_{cp} + \tau_{B_s})]. \quad (11)$$

В блоке №7 осуществляется вывод результатов моделирования.

Приведенный алгоритм аналитического моделирования справедлив при предположениях об экспоненциальном распределении времени наработки до отказа и времени восстановления элемента в случае неограниченного восстановления.

шения задачи представлены на рис.2.

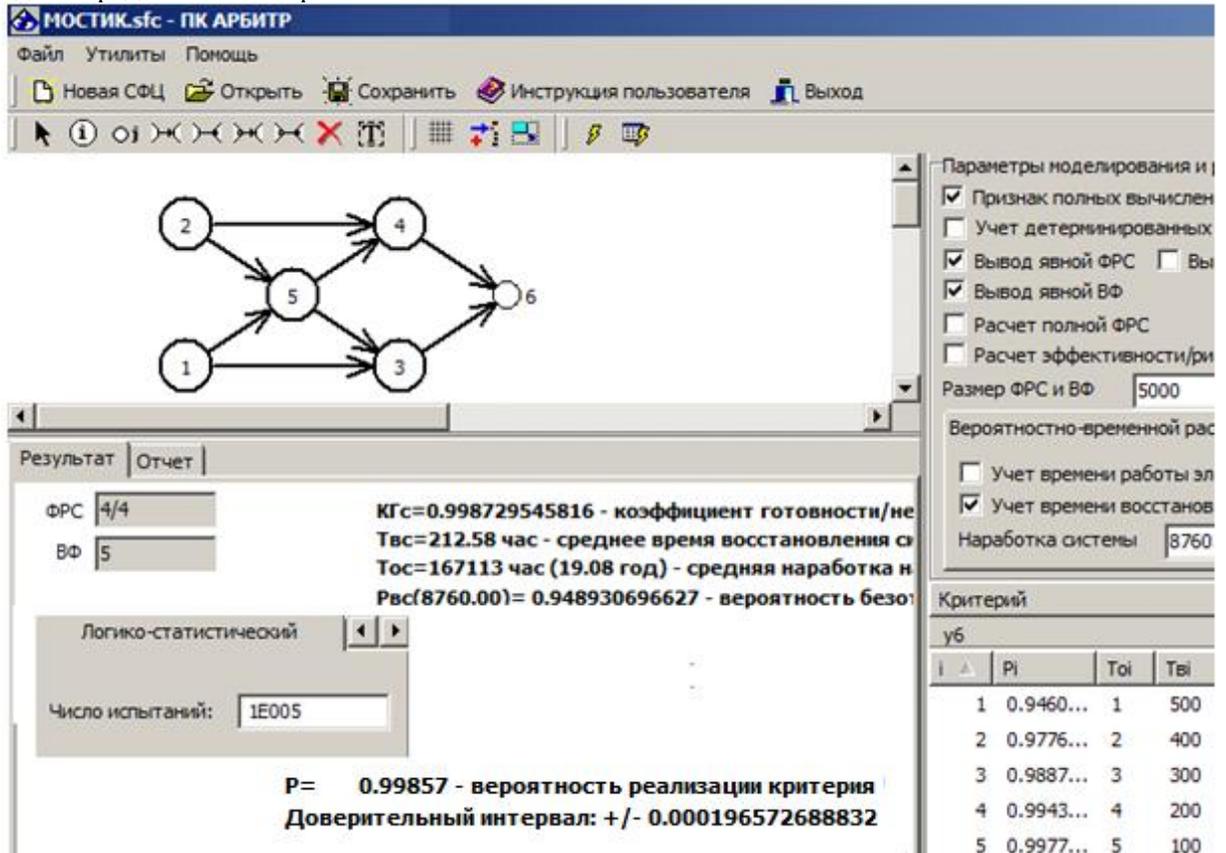


Рисунок 2 – СФЦ мостиковой структуры

Расчет показателей надежности восстанавливаемой системы.

Вероятностная функция мостиковой схемы, полученная в ПК «АРБИТР» с помощью комбинированного метода [1], имеет вид:

$$Ps = P_1P_3 + P_2P_4 + Q_1P_2P_3Q_4P_5 + P_1Q_2Q_3P_4P_5 - P_1P_2P_3P_4, \quad (14)$$

где $Ps, P_1...P_5$ – вероятности безотказной работы схемы и ее элементов (переменная t для краткости опущена).

Для расчета коэффициента готовности системы $K_{Гс}$ в формуле (14) показатели безотказности элементов заменяются на соответствующие показатели готовности. Тогда

$$K_{Гс} = K_{Г1}K_{Г3} + K_{Г2}K_{Г4} + (1 - K_{Г1})K_{Г2}K_{Г3}(1 - K_{Г4})K_{Г5} + K_{Г1}(1 - K_{Г2})(1 - K_{Г3})K_{Г4}K_{Г5} - K_{Г1}K_{Г2}K_{Г3}K_{Г4}$$

Для исходных данных, приведенных в табл.7 [6] и на рис.2, $K_{Гс} = 0.99873$.

Значимости элементов мостиковой структуры рассчитаны по следующим формулам:

$$\xi_1 = \frac{\partial K_{Гс}}{\partial K_{Г1}} = K_{Г3} - K_{Г2}K_{Г3}(1 - K_{Г4})K_{Г5} + (1 - K_{Г2})(1 - K_{Г3})K_{Г4}K_{Г5} - K_{Г2}K_{Г3}K_{Г4} = 0.02233,$$

$$\xi_2 = \frac{\partial K_{Гс}}{\partial K_{Г2}} = K_{Г4} - (1 - K_{Г1})K_{Г3}(1 - K_{Г4})K_{Г5} - K_{Г1}(1 - K_{Г3})K_{Г4}K_{Г5} - K_{Г1}K_{Г3}K_{Г4} = 0.054016,$$

$$\xi_3 = \frac{\partial K_{Гс}}{\partial K_{Г3}} = K_{Г1} + (1 - K_{Г1})K_{Г2}(1 - K_{Г4})K_{Г5} - K_{Г1}(1 - K_{Г2})K_{Г4}K_{Г5} - K_{Г1}K_{Г2}K_{Г4} = 0.005716,$$

$$\xi_4 = \frac{\partial K_{\Gamma_5}}{\partial K_{\Gamma_4}} = K_{\Gamma_2} - (1 - K_{\Gamma_1})K_{\Gamma_2}K_{\Gamma_3}K_{\Gamma_5} + K_{\Gamma_1}(1 - K_{\Gamma_2})(1 - K_{\Gamma_3})K_{\Gamma_5} - K_{\Gamma_1}K_{\Gamma_2}K_{\Gamma_3} = 0.01139,$$

$$\xi_5 = \frac{\partial K_{\Gamma_5}}{\partial K_{\Gamma_5}} = (1 - K_{\Gamma_1})K_{\Gamma_2}K_{\Gamma_3}(1 - K_{\Gamma_4}) + K_{\Gamma_1}(1 - K_{\Gamma_2})(1 - K_{\Gamma_3})K_{\Gamma_4} = 0.00053.$$

Расчет средней наработки на отказ мостиковой схемы по формуле (7) дает следующий результат:

$$T_{cp} = K_{\Gamma_5} \left\{ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \xi_i \lambda_i K_{\Gamma_i}} \right\} = \frac{K_{\Gamma_5}}{\sum_{i=1}^5 \xi_i \frac{1}{T_{oi}} K_{\Gamma_i}} = 19.077 (e) = 167\ 113 (ч).$$

Расчет среднего времени восстановления мостиковой схемы по формуле (10) дает следующий результат:

$$\tau_B = (1 - K_{\Gamma_5}) \left\{ \frac{1}{\sum_{i=1}^n \xi_i \lambda_i K_{\Gamma_i}} \right\} = \frac{(1 - K_{\Gamma_5})}{\sum_{i=1}^5 \xi_i \frac{1}{T_{oi}} K_{\Gamma_i}} = 212.58 (ч).$$

Расчет вероятности безотказной работы мостиковой схемы за заданное время $t_o=8760$ (час) дает следующий результат:

$$P(t_o) = \exp[-t_o / (T_{cp} + \tau_B)] = 0.94893.$$

Как видно из рис.2, результаты моделирования надежности мостиковой схемы с помощью ПК АРБИТР, совпадают с результатами аналитических расчетов. На рис.2 в левом нижнем углу показаны результаты логико-статистического моделирования невосстанавливаемой мостиковой структуры.

Вывод

Практика применения ПК АРБИТР для анализа структурно-сложных систем большой размерности [1] показала эффективность итерационного метода численного решения СЛУ за счет исключения этапа аналитического построения логической функции и преобразования ее в форму полного замещения. В дальнейшем перспективы развития ИСЛМ связаны с реализацией алгоритмов быстрого поиска минимальных сечений отказов системы заданной мощности.

Литература

1 Поленин В.И., Рябинин И.А., Свирин С.К., Гладкова И.А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противоборства/ Под научным редактированием Можяева А.С. СПб.: НИКА. 2011.

2 Можяев А.С., Алексеев А.О. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и вероятностный анализ сложных систем. В сб. 1: "Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем". Вып.2. Под редакцией И.А.Рябинина. Пре-принт 104. СПб.: ИПМАШ РАН. 1994. с.17-42.

3 Программный комплекс АРБИТР. URL: www.szma.com/pkasm.shtml.

4 Нечипоренко В.И. Структурный анализ и методы построения надежных систем. М.: Сов.Радио. 1968.

5 Б.А. Константинов, Э.А. Лосев. Логико-аналитический метод расчета надежности восстанавливаемых систем электроснабжения // Электричество. 1971. - №12. - с. 21–24.

6 К.А.Ветлугин, А.В.Струков. Алгоритмы автоматизированного структурно-логического моделирования надежности и безопасности информационных и телекоммуникационных систем. Учебное пособие/ СПб. ПГУПС. 2016.