

УДК 681.3

Использование логического моделирования для исследования сложных систем

Е. И. СУКАЧ

Введение

При исследовании сложных систем (СС) в различных прикладных областях применяются разнообразные математические методы и средства моделирования. Всё многообразие подходов можно разделить на два больших класса: аналитические и имитационные методы. Выбор того или иного подхода обусловлен типом решаемой задачи, степенью её детализации и других особенностей СС. Аналитические методы применимы для изучения сравнительно простых систем. При этом зачастую приходится идти на упрощённое представление реальных явлений, дающее возможность описать поведение системы и получить явные зависимости, связывающие искомые величины с параметрами СС. При наличии вероятностных факторов, высокой степени детализации СС, как правило, применяют имитационное моделирование. В настоящее время существует много языков и систем имитационного моделирования [1]. Общим свойством всех этих систем является использование датчиков случайных чисел. Принципиальным ограничением ИМ является неточный, статистический характер получаемых результатов. В результате работы имитационной модели (ИМ) исследователь получает статистические данные, обработка и анализ которых позволяет выявить некоторые закономерности функционирования СС. В связи с этим актуальной является разработка системы, программных средств и методик исследования СС, сочетающей в себе достоинства аналитического и имитационного моделирования.

В основе логического моделирования лежит предикатное описание СС и законов её функционирования. Модель СС описывается множеством устройств, взаимодействующих между собой в соответствии с логическими правилами. Состояния устройств носят вероятностный характер и полностью определяют состояние всей системы в заданные моменты времени. На основе управляющих правил, представленных в предикатной форме происходит управление процессом изменения модели во времени. Логическое моделирование СС не использует датчиков случайных чисел и позволяет получить точные данные об изменении состояний СС.

1. Особенности логического моделирования сложных систем

Принципиальной особенностью имитационного моделирования является реализация с помощью алгоритмов различных траекторий, описывающих поведение СС при заданных значениях параметров и определённом начальном состоянии системы. Влияние случайных факторов на функционирование системы позволяет получить множество траекторий, которые могут иметь большие различия по изучаемым параметрам, но, как правило, дают общую картину изменения системы во времени.

При логическом моделировании СС рассматривается как объект, состоящий из определённого числа образующих его устройств Y_i , $i=1, \dots, m$. Состояния каждого устройства Y_i задаются линейно-упорядоченным множеством $S_i = \{S_j^i\}$, $j=1, \dots, n$. Вероятность нахождения устройства Y_i в состоянии S_j^i задаётся величиной P_j^i . Таким образом, описание каждого устройства в любой момент времени носит вероятностный характер и описывается вектором P_j^i , где

$$\sum_{j=1}^n P_j^i = 1.$$

Будем говорить, что устройство Y_3 является композицией устройств Y_1 и Y_2 $Y_3 = Y_1 \otimes Y_2$, если задано отображение, ставящее в соответствие элементу из множества $S \times S$ элемент из S . Таким образом, по состоянию S_{1i} устройства Y_1 и состоянию S_{2j} устройства Y_2 однозначно определяется состояние S_{3k} устройства Y_3 , $k = F(i, j)$. Это соответствие однозначно определяет вероятность состояний результирующего устройства по вероятностям состояний исходных устройств:

$$P_k^3 = \sum_{k=F(i,j)} P_i^1 \cdot P_j^2$$

Рассмотрим задание композиции устройств с помощью бинарных операторов \cup и \cap . Для оператора \cup отображение определяется следующим образом. Если Y_1 находится в состоянии S_{1i} , а Y_2 – в состоянии S_{2j} , то $Y_3 = Y_1 \cup Y_2$ находится в состоянии $S_{3k} = \max(S_{1i}, S_{2j})$. Вероятность нахождения устройства Y_3 в состоянии S_{3k} будет определяться формулой:

$$P_k^3 = P_k^1 \sum_{j < k} P_j^2 + P_k^2 \sum_{j < k} P_j^1 + P_k^1 P_k^2$$

Для оператора \cap отображение определяется следующим образом. Если Y_1 находится в состоянии S_{1i} , а Y_2 – в состоянии S_{2j} , то $Y_3 = Y_1 \cap Y_2$ находится в состоянии $S_{3k} = \min(S_{1i}, S_{2j})$. В этом случае вероятность нахождения устройства Y_3 в состоянии S_{3k} будет определяться формулой:

$$P_k^3 = P_k^1 \sum_{j > k} P_j^2 + P_k^2 \sum_{j > k} P_j^1 + P_k^1 P_k^2$$

Можно заметить, что для введённых бинарных операторов выполняются следующие свойства:

- Коммутативности $Y_1 \cap Y_2 = Y_2 \cap Y_1$, $Y_1 \cup Y_2 = Y_2 \cup Y_1$;
- Ассоциативности $(Y_1 \cap Y_2) \cap Y_3 = Y_1 \cap (Y_2 \cap Y_3)$, $(Y_1 \cup Y_2) \cup Y_3 = Y_1 \cup (Y_2 \cup Y_3)$;
- Дистрибутивности $Y_1 \cap (Y_2 \cup Y_3) = (Y_1 \cap Y_2) \cup (Y_1 \cap Y_3)$, $Y_1 \cup (Y_2 \cap Y_3) = (Y_1 \cup Y_2) \cap (Y_1 \cup Y_3)$;
- Идемпотентности $Y_1 \cap Y_1 = Y_1$, $Y_1 \cup Y_1 = Y_1$.

Таким образом, если устройство Z является композицией устройств Y_i , $i=1, \dots, m$ следующего вида

$$Z = \cap \cup Y_i,$$

то его состояние полностью определяется состоянием устройств, участвующих в композиции и вероятность нахождения устройства Z в любом из состояний может быть вычислена на основе введённых ранее формул.

Состояния устройств Y_i системы изменяются во времени. Кроме того, состояние любого устройства Y_i в любой момент времени зависит от предыдущих состояний устройств входящих в СС. Пусть X_t – состояние всей системы в момент времени t (оно определяется совокупностью состояний всех входящих в систему устройств), а X_1, \dots, X_{t-1} – состояния системы в моменты времени $1, \dots, t-1$. Тогда

$$X_t = R(X_1, \dots, X_{t-1}),$$

где R – совокупность правил описывающих динамику модели СС. Правила могут носить как процедурный, так и декларативный характер. Описание модели СС в предикатной форме по-

звolyет использовать в моделировании методы логического вывода. А именно, исходя из заданной структуры модели и правил функционирования модели во времени возможно получить и проанализировать все возможные состояния системы (прямой вывод). В том случае, если требуется исследовать возможность возникновения определённых (критических) состояний используется обратный логический вывод [2].

Традиционное имитационное моделирование возможно только с использованием датчиков случайных чисел. В некоторых случаях ИМ довольно точно отражают реальное положение дел в СС. Однако, ИМ в принципе не точна, и невозможно измерить степень этой неточности [1]. Логическое моделирование, основанное на детерминированном способе алгебраических преобразований, заданном множеством правил R , описывающих динамику СС, позволяет получить точное представление о состояниях всей системы в заданные моменты времени.

Имитационное моделирование удачно применяется при исследовании систем массового обслуживания (СМО), отображающих особенности поведения СС, подвергающихся воздействию потока тех или иных событий. При этом предполагается, что СС состоит из однотипных элементов, каждый из которых выполняет простейшие действия, сводящиеся в модели к одной операции по обслуживанию требований. Обычно требуется исследовать взаимодействие компонент СС, найти узкие места в структуре СС. В том случае, если СС представляет собой ряд взаимосвязанных элементов, правила, взаимодействия которых слабо изучены, но имеется вероятностная информация, характеризующая состояние этих элементов в определённые моменты времени, то предпочтительным является использование логического моделирования.

В аналитических моделях поведение СС записывается в виде некоторых функциональных соотношений или логических условий. Это позволяет изучить некоторые общие свойства СС, например, оценить устойчивость системы и сходимость реального переходного процесса к некоторому значению. Применение компьютерной системы моделирования значительно ускоряет получение таких оценок. Кроме этого, оно позволяет проводить эксперименты с моделью с целью оптимизации и поиска экстремальных значений.

2. Решение задач надёжности сложных технических систем с помощью логического моделирования

В различных прикладных областях часто приходится иметь дело с высокоинтегрированными сложными техническими системами (СТС), отличительной особенностью которых является неточная и неполная информации о взаимодействии составляющих их элементов.

Для оценки надёжности СТС по известным характеристикам надёжности её компонентов, а также для сравнения различных вариантов структуры системы по степени их надёжности предлагается использовать метод логического моделирования. При данном подходе СТС описывается моделью, состоящей из множества устройств $Y = \{Y_i\}$, где $i=1, \dots, n$. Каждое из устройств Y_i задаёт случайный процесс, отображающий реальное поведение элемента СС и представленный в виде вероятностной модели накопления повреждений (рис.1) [3].

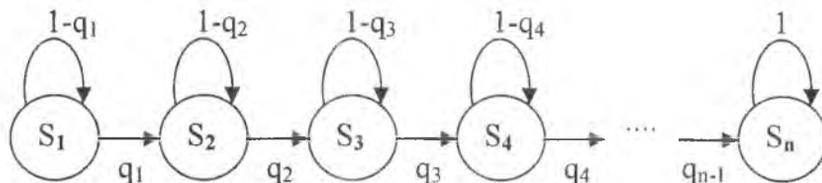


Рис 1. Схема вероятностной модели накопления повреждений

Для каждого устройства Y_i задаётся множество состояний $S_i = \{s_{ij}\}$ таким образом, что, во-первых, состояние устройства однозначно определяется по известной точке S_{ij} , и, во-вторых, последовательность состояний $S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in}$ образует марковскую цепь, то есть веро-

ятность перехода устройства Y_i из состояния S_{ij} в соседние состояния зависит только от самого состояния и времени. Каждое из состояний характеризует степень накопления повреждений, включая состояние отказа. Вероятности перехода устройства Y_i из состояния в состояние задаются матрицей переходов Q_i $[n \times n]$.

В ходе проведения экспериментов с моделью исследователь может перейти к использованию вероятностной модели накопления повреждений с восстановлением.

Законы композиции, введенные в п.1 позволяют по вероятностным характеристикам исходных устройств Y_i определить вероятностные (надёжностные) характеристики результирующих устройств. Операторы \cup и \cap имеют естественную интерпретацию при решении задач надёжности СТС. Отказ устройства $Y_3 = Y_1 \cap Y_2$ определяется отказом одного из устройств (последовательное соединение) и его состояние определяется состоянием наименее надёжного устройства. Отказ устройства $Y_3 = Y_1 \cup Y_2$ происходит в результате отказа обоих устройств Y_1 и Y_2 (параллельное соединение, резервирование) и его состояние определяется состоянием наиболее надёжного устройства.

Структура модели задается однотипным образом с помощью системы предикатов. Для любого из устройств схемы исследователем может быть задан более высокий уровень детализации. При этом детализируемое устройство Y_i также задаётся предикатом и отображается графически. Описанная система допускает естественное обобщение для случая непрерывного числа состояний и непрерывного времени.

Для выбранной структуры модели СТС в форме предикатов определяются логические правила, задающие следующую информацию:

- определяется, как изменится структура модели, в зависимости от её состояния в заданные моменты времени;
- указывается, каким образом изменяется режим работы системы (в частности, изменяется тип нагрузки на систему), в зависимости от текущего состояния системы;
- определяются правила изменения состояния одних устройств в зависимости от состояния других;
- указывается, какие из устройств являются однотипными и тождественными в смысле функционирования;
- задается время моделирования.

Результатом работы системы моделирования являются количественные характеристики изменения надёжности СТС и её элементов в процессе функционирования. Полученная в результате моделирования информация может быть использована для решения следующих задач:

- подбора структуры модели, оптимально описывающей имеющиеся экспериментальные данные;
- определения характеристик надёжности системы в результате изменения характеристик надёжности составляющих её элементов;
- выявления зависимых отказов и определения степени их влияния на жизнеспособность системы;
- тестирования традиционной ИМ, использующей случайные величины, реализуемые с помощью датчика случайных чисел;

Использование логических моделей СТС с вероятностным характером накопления повреждений оправдано их богатым содержанием, возможностью многочисленных обобщений и модификаций, а также возможностью использования в различных технических областях.

Abstract

The author considers a method of the research of complex technical systems, as well as its application for the decision of the problems of reliability.

Литература

1. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1988. – 230 с.
2. Попов Э.В. Динамические интеллектуальные системы в управлении и моделировании. М.: МИФИ, 1996.
3. Дж. Богдановф, Ф.Козин. Вероятностные модели накопления повреждений. М.: Мир, 1989. – 341с.

Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины

Поступило 12.04.04

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ