

УДК 621.396.94

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ТРОПОСФЕРНОЙ СВЯЗИ

С.Н. КАСАНИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 20 июня 2012

Предложены математические модели аварийных ситуаций в процессе эксплуатации систем тропосферной связи специального назначения на компьютерных тренажерах.

Ключевые слова: компьютерные тренажеры, математические модели аварийных ситуаций, системы тропосферной связи.

Введение

Изучение опыта тренажерной подготовки показывает, что одним из слабых мест подготовки операторов технических средств является неумение пользоваться диагностической информацией для идентификации аварийной ситуации (АС) [1–4].

Проведенный анализ эксплуатации реальных образцов систем тропосферной связи (СТС) по опыту войсковых учений и отзывов на выпускников военного факультета Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники доказывает необходимость проведения тренажерной подготовки операторов с имитацией АС, возникающих в процессе эксплуатации СТС.

Используемые в подготовке операторов образцы компьютерных тренажеров СТС (цифровой тропосферной станций Р-423-1, тропосферной станции Р-412) не позволяли проводить тренажерную подготовку с использованием имитации АС, так как в моделирующем устройстве компьютерных тренажеров отсутствовали математические модели аварийных ситуаций.

В статье предлагаются разработанные и реализованные в компьютерных тренажерах математические модели аварийных ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации СТС, изучаемые по дисциплине «Военные системы тропосферной связи» на кафедре связи военного факультета Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Моделирование аварийных ситуаций поглощающей марковской цепью

С целью отработки вопросов эксплуатации СТС в аварийных ситуациях предлагается алгоритм аварийных ситуаций смоделировать заранее, используя для этого методологию экспертных систем [5].

Сущность методологии экспертных систем состоит в том, что для каждой аварийной ситуации эксперты (высококвалифицированные операторы с большим опытом работы), используя инструкции по эксплуатации, определяют причины ее возникновения и ранжируют их. Если нет возможности отранжировать причины АС, то их можно считать равновероятными. По каждой причине эксперты записывают в словесной форме алгоритмы идентификации и локализации АС. После обработки мнения экспертов [6, 7] алгоритмы управления СТС в АС переводятся на формальный уровень и моделируются, образуя библиотеку эталонных алгоритмов деятельности операторов СТС в аварийных ситуациях.

В математическом плане моделирование аварийных ситуаций производится с помощью поглощающей марковской цепи [8, 9]. Общая постановка задачи выглядит следующим образом.

Пусть имеется некоторая система N произвольно соединенных между собой элементов, для которых априори известны вероятности отказа p_i , $\sum_{i=1}^N p_i = 1$. Дано также некоторое конечное пространство проверок $A = \{a_j\}$ системы, каждая из которых обладает своей стоимостью (временем, техническими средствами обеспечения и т.п.), охватывает некоторое подмножество элементов и может иметь два исхода: положительный (причина аварии не обнаружена) и отрицательный (причина аварии обнаружена).

Пусть $X = \{x_i\}$, $i = 0, \dots, L$, где L – конечное (фазовое) пространство состояний системы. В этом пространстве x_i представляется N -мерным вектором, k -я компонента которого равна нулю, если элемент проверен и исправен, и равна единице, если k -й элемент не проверен.

Известно, что случайный процесс поиска причин аварийной ситуации с дискретным временем

$$\xi = \{\xi_n, n = 0, 1, \dots\}, \quad (1)$$

где $\xi_n \in X$, образует марковскую цепь, если с вероятностью единицы (относительно меры этого процесса) будет иметь место равенство

$$P(\xi_{n+1} = x_{n+1} / \xi_0, \dots, \xi_n) = P(\xi_{n+1} = x_{n+1} / \xi_n). \quad (2)$$

Физически это означает, что результаты $(n+1)$ проверки не зависят от результатов n -й проверки.

Если задано пространство проверок A или значений управляющих воздействий, то можно говорить об управляемой цепи, когда задан набор переходных вероятностей (матриц, вероятностей перехода): $\{P(\xi_{n+1} = x_{n+1} / \xi_n, A_n) | n = 0, 1, \dots\}$, зависящих от проверок $A_n \in A$.

Предполагается, что в каждый из моментов времени t_n , где $n = 0, 1, 2, \dots$, решение о выборе конкретной проверки A_n может осуществляться на основе результатов предыдущих наблюдений x_0, \dots, x_n ; $A_n = d_n(x_0, \dots, x_n)$. Каждая из таких решающих функций, определенных в пространстве X со значениями A , задает некоторое управление в момент времени t . Говорят, что набор $\delta = \{d_n, n \geq 0\}$ решающих функций:

$$\begin{aligned} A_0 &= d_0(x_0), \\ A_1 &= d_1(x_0, x_1), \\ &\dots \\ A_n &= d_n(x_0, \dots, x_n), \end{aligned}$$

задает некоторую нерандомизированную стратегию поиска причин аварии δ . Стратегия δ называется рандомизированной [10], если на каждом шаге в зависимости от состояния задается некоторое вероятностное распределение в пространстве допустимых решающих функций.

Для нерандомизированной стратегии на каждом шаге с вероятностью 1 указывается решающая функция, которой следует воспользоваться для выбора следующей проверки. Стратегия δ называется марковской, если каждая из решающих функций d_n в действительности зависит только от последнего аргумента:

$$A_n = d_n(x_n).$$

Стратегия δ называется однородной марковской, если $d'_n(x) \equiv d''_n(x)$ для всех $n' \neq n''$ (n – номер проверки от начала поиска, один шаг – одна проверка). Однородная марковская страте-

гия δ полностью определяется заданием лишь одной решающей функции. Обнаружение причины аварийной ситуации означает попадание процесса поиска в поглощающее состояние [11].

Находясь в рамках марковского процесса, примем следующую схему поведенческой модели оператора СТС при поиске причины АС и ее локализации.

Анализ АС у человека-оператора начинается с выдвижения гипотез о причинах ее возникновения и выбора (реализации) алгоритмов проверок этих гипотез. Пространство гипотез $\Gamma = \{\Gamma_j\}$, как и пространство проверок A , является конечным. Пространство гипотез обусловлено квалификацией оператора, а пространство проверок – аппаратурной реализацией.

Далее производится описание алгоритма проверки АС по каждой гипотезе. Работа группы экспертов оформляется в виде дерева обнаружения ситуаций (ДОС) [12]. Такая форма представления информации является весьма наглядной и, что существенно, не требует специальной подготовки экспертов.

Следующим этапом является построение дерева поведенческой модели по дереву гипотез в соответствии с логикой ДОС. Дерево поведенческой модели строится на основе теоремы о полной вероятности – на всех этапах сумма вероятностей появления веточек дерева должна быть равна единице. Процесс ветвления продолжается до попадания в поглощающее состояние, что означает обнаружение причины аварийной ситуации.

После обнаружения причины аварийной ситуации начинаются операции восстановления или перехода на резервные средства, которые к процессу поиска отношения не имеют, выполняются другими специалистами, но при необходимости могут быть включены в дерево поведенческой модели. Если есть возможность априори упорядочить гипотезы по вероятности их появления, то проводить проверку гипотез необходимо по мере убывания вероятности. Это, безусловно, отразится на внешнем виде дерева, но методика построения не изменится.

Навигация на дереве поведенческой модели может определяться и другими факторами: временем проверки, наличием приборов на пульте управления, наличием оператора на рабочем месте и т. п.

Аналогично строится дерево поведенческой модели и по остальным базовым гипотезам. Алгоритмическая часть дерева поведенческой модели разворачивается до необходимой степени детализации. Такая детализация может производиться до отдельных операций (нажатие кнопки, поворот переключателя, считывание информации с прибора), до уровня типовых блоков операций (контроль работоспособности, диагностика) или до уровня законченных фрагментов программ (пуск насоса системы охлаждения передатчика, включение системы вентиляции станции и т. п.).

Моделирование аварийных ситуаций методом декомпозиции множества признаков

Упорядочить процесс поиска причины АС можно за счет иерархического построения модели декомпозиции множества признаков по уровням стратификации объекта, в котором произошла авария.

Объекты в СТС описываются набором признаков: $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$. Очевидно, что существует несколько уровней описания одного и того же аварийного объекта с различной степенью детализации, которая зависит от того, какую ступень иерархии управления занимает обучающийся: механик станции, водитель-дизелист, начальник станции и т. п.

Чтобы в процессе отработки на тренажере не использовать полный набор признаков, их множество декомпозируется по уровням стратификации объекта группой экспертов или экспертом:

$$\bar{x} = \left[\begin{array}{c} (x_1, \dots, x_{r_1}), (x_{r_1+1}, \dots, x_{r_2}), \dots, (x_{r_{m-1}+1}, \dots, x_r) \\ R_1 \quad R_2 \quad \dots \quad R_m \end{array} \right],$$

где $R_i, i = \overline{1, m}$ – подмножества признаков.

Подмножество признаков – это комбинация признаков из исходного набора $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$ такая, что

$$R_i < (\bar{x}); R_i \cap R_j = \emptyset; i \neq j; \bigcap_{i=1}^k R_i = \bar{x}.$$

В моделирующее устройство тренажера (МУТ) вводится библиотека аварийных ситуаций и их признаков. Переходы с подмножества верхнего уровня на другие уровни осуществляются с помощью предикатов [13, 14]. Библиотека АС представляет собой множество предикатов $A_{ij} = (A_{ij}^1, A_{ij}^2)$, где i – вектор подмножества признаков АС, $i = \overline{1, m}$; j – номер АС, $j = \overline{1, k}$; A_{ij}^1 – продукционная компонента: $A_{ij}^1 \Leftarrow \varphi_{ij} ([\chi_{ij}^l]_{l \in L_{ij}})$, где L_{ij} – множество индексов признаков, характеризующих аварийную ситуацию j по подмножеству i ; \Leftarrow – правило «если-то»; φ_{ij} – допускает операции «and», «or», «not», A_{ij}^2 – функциональная компонента:

$$A_{ij}^2 = \psi_{ij} ([\chi_{ij}^l]_{l \in L_{ij}}), \psi_{ij} \in \{R^n \rightarrow R^1\}.$$

где ψ_{ij} – решающее правило.

Решающее правило формируется следующим образом. Векторы $\bar{x} = (x_{i1}, \dots, x_{in})$, $i = \overline{1, p}$, соответствующие определенным состояниям аварийного объекта с указанием конкретной АС, объединяются в линейную систему неравенств:

$$\begin{aligned} (c_i, x_i) &\geq 0, \quad i = \overline{1, p}, \\ (c_j, x_j) &< 0, \quad i = \overline{p_1 + 1, p}, \end{aligned} \quad (3)$$

где (\bar{c}, \bar{x}) – скалярное произведение; знак « \geq » приписывается векторам состояний, характерным для данной АС, знак « $<$ » – нехарактерным.

Набор векторов решений системы (3) и есть решающее правило. Для случая, когда система (3) несовместна, необходимо воспользоваться так называемым комитетным методом решения систем несовместных линейных неравенств [13].

Современные средства вычислительной техники позволяют осуществлять визуальную оценку картины несовместности системы неравенств. Метод приведения системы линейных неравенств (3) к двумерной системе представлен в работе [14].

Каждое неравенство представляется на плоскости в виде полукруга определенного цвета. При наложении допустимых областей различных неравенств на экране ПЭВМ сразу можно увидеть области совместности нескольких неравенств в виде секторов единичного круга. Область, допустимая для максимального количества неравенств, будет соответствовать комитету системы (комитет – максимальная совместная подсистема данной системы с наибольшим числом неравенств).

Общая схема применения метода декомпозиции включает в себя несколько этапов:

1. Подготовка исходных данных. Группой экспертов множество признаков АС подразделяется на подмножества по уровням стратификации объекта, формируются решающие правила в качестве функциональных составляющих библиотеки АС и их признаков и записываются продукционные составляющие правил перебора признаков конкретной аварии. Эти правила еще называются правилами отсечения;

2. Алгоритм поиска причин АС. Пусть i – номер подмножества признаков, уровень агрегатирования в описании аварийного объекта.

Шаг 1. Оператору предлагается список вопросов по подмножеству i -уровня. Ответы формируются в векторы $\{[\chi_{ij}^l]_{l \in L_{ij}}\}$, $j = \overline{1, k}$, которые подставляются в решающие правила $\{\psi_{ij}\}$, $j = \overline{1, k}$.

Шаг 2. Вычисляются правила перебора признаков (правила отсечения) A_{ij} , $j = \overline{1, k}$, определяющие переход к подмножеству следующего уровня.

Шаг 3. Если оператор сомневается в идентификации АС на i -м подмножестве, то необходим переход к шагу 1;

3. Выбор программы выхода из АС. При наличии экспериментально (или статистически) полученного материала с количественными параметрами протекания аварии его необхо-

димом включить в библиотеку АС, что будет существенным дополнением правил продукций. Пусть x_i – переменная, которая описывает выбор i -й программы выхода из АС, $x_i = \{0, 1\}$ или i -й вход в правила продукций $\{P_i\}$, где P_i – правило, содержащее текстовую рекомендацию по выбору программы выхода из АС. Тогда задача выбора программы выхода из АС записывается как одно из допустимых решений системы:

$$\Theta_i : \alpha_i \leq Y_i \leq b_i, \quad \{i\}_i^m = I, \quad \bar{x} \in X \subset E^n, \quad (4)$$

где $Y_i = f_i(x), f_i(\bar{x}) \in \{E^n \rightarrow E^1\}$ – функциональные связи между показателями состояния аварийного объекта и возможными программами выхода из АС, причем

а) $M = \bigcap_{i \in I} M_i \neq \emptyset, M_i = \{ \bar{x} : f_i(x) \in [\alpha_i, b_i] \}$;

б) ограничения Θ_i не одинаковы по своим последствиям;

в) параметры $\bar{\alpha} = \{\alpha_1, \dots, \alpha_m; b_1, \dots, b_m\}$ могут изменяться руководителем обучения.

В несовместности системы отображаются различные противоречия между программами выхода из АС (Y_i).

Компромисс между различными программами достигается за счет интерактивной процедуры поиска на основе модели (4):

$$\left\{ \begin{array}{ccc} \text{ПВ} R_i & & \text{ПВ} R_i \\ I_{\text{ПЭВМ}}^t(M^t) & \rightarrow & I_0^t \text{ var } \bar{d}^t \rightarrow M^{t+1} \end{array} \right\}_1^n;$$

$$M^n \subset \left(\bigcap_{i \in I} M_i(\alpha_i^N, b_i^N) \neq \emptyset \right), \quad (5)$$

где $I_{\text{ПЭВМ}}^t$ – информация о несовместности модели (4), получаемая от компьютера; t – шаг диалога; I_0^t – информация от оператора об изменении границ \bar{d}^t ; ПВ R_i – правило выбора программ выхода из АС.

Информацию от компьютера целесообразно представить в виде:

$$I_{\text{ПЭВМ}}^t = \{ I_{\text{осн}}^t(I^t), I_{\text{всп}}^t(I^t) \}, \quad (6)$$

где $I_{\text{осн}}^t$ – основная информация (в ней несовместность ограничений отражается на множестве I), $I_{\text{всп}}^t$ – вспомогательная информация о виде достигнутой допустимой области в x . Различные сочетания $I_{\text{осн}}^t, I_{\text{всп}}^t, I^t$ образуют правила выбора – элементы библиотеки АС и их признаков.

Заключение

Предложенные математические модели аварийных ситуаций положены в основу моделирования компьютерных тренажеров систем тропосферной связи. На этой основе синтезирована структура программного обеспечения, а также типовое алгоритмическое обеспечение компьютерных тренажеров систем тропосферной связи, доработан компьютерный тренажер цифровой тропосферной станции Р-423-1. Практическое использование тренажерной подготовки с использованием имитации аварийных ситуаций позволило улучшить подготовку операторов СТС, о чем свидетельствуют поступающие отзывы на выпускников военного факультета и опыт использования компьютерного тренажера цифровой тропосферной станции Р-423-1 в учебном процессе при изучении дисциплины «Военные системы тропосферной связи».

MATHEMATICAL MODELS OF EMERGENCIES IN OPERATING SYSTEMS TROPOSPHERIC COMMUNICATIONS

S.N. KASANIN

Abstract

Mathematical models of emergency in the operation of specialpurpose computer simulators tropospheric system have been suggested.

Список литературы

1. *Касанин, С.Н., Пискун В.В.* // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2007. №2. С. 51–54.
2. *Касанин, С.Н., Пискун В.В.* // Вестн. Нац. ун-та обороны Республики Казахстан. 2009. №4. С. 25–28.
3. *Касанин С.Н., Пискун В.В., Дюжов Г.Ю.* // Виртуальные тренажеры средств военной связи: материалы IV Межд. науч. конф., 20–21 мая 2009 г. Мн., ГУ» БелИСА». 2009. С. 209–211.
4. Обзор журнала «Military Training Technology» // [Электрон. ресурс]. Режим доступа <http://www.military-training-technology.com/department>.
5. *Кобзев В.В., Мироненко Г.М., Шилов В.А.* // Военно-морские экспертные системы. СПб., 1993.
6. *Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г.* // Экспертные оценки. М., 1973.
7. *Шрейдер Ю.А.* // Равенство, сходство, порядок. М., 1971.
8. *Кемени Дж., Снелл Дж.* // Конечные цепи Маркова. М., 1970.
9. *Тихонов В. И., Миронов М. А.* // Марковские процессы. М., 1977.
10. *Корн Г., Корн Т.* // Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1973.
11. *Ливанов Ю.В.* // Техническая кибернетика. 1990. №6.
12. *Чачко А.Г.* // Подготовка операторов энергоблоков. М.: Энергоатомиздат, 1985.
13. *Бордецкий А.Б., Маслов В.Г., Хавронина М.А.* // Техническая кибернетика. 1990. № 6.
14. *Мазуров В.Д., Казанцев В.С., Белецкий Н.Г.* // Пакет «Квазар» прикладных программ распознавания образов (версия 2). Свердловск. УНЦ АН СССР. 1979. №64.