

УДК 629.78

**В. Н. Спиридонов**, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики и компьютерных технологий Днепропетровской государственной финансовой академии

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ: СОСТОЯНИЯ И ПЕРЕХОДНЫЕ ФУНКЦИИ

*У статті розглядається задача моделювання одного із класів складних технічних об'єктів методом перехідних функцій. Відповідно до задачі дослідження обрано простір станів і формалізовані перехідні функції об'єкта моделювання.*

*В статті розглядається задача моделювання одного із класів складних технічних об'єктів методом перехідних функцій. В відповідності з задачею дослідження вибрано простір состояний і формалізовані перехідні функції об'єкта моделювання.*

*In article the application problem of transitive functions method for modeling of one of classes of complex technical objects is considered. According to the research problem the space of states is chosen and transitive functions of modeling object are formalized.*

**Ключевые слова.** Задача прогноза состояния, моделирование сложных систем и технических объектов, математическая модель системы с постоянной структурой.

**Введение.** При решении задачи прогноза состояния сложных систем и объектов [1, 2] существует проблема размерности модели. Одним из методов теории систем, позволяющих существенно снизить размерность модели, является применение переходной функции системы для описания связей в пространстве состояний системы. В работе [3] предложена формализованная постановка задачи моделирования и математическая модель одного из классов сложных систем – дискретных динамических систем с постоянной структурой. Метод моделирования базируется на описании переходов элементов и подсистем системы в пространстве состояний переходными функциями состояния. Однако в работе [3] задача была решена в общем виде, и вопрос о выборе пространства состояний конкретной системы, а следовательно, и переходных функций, описывающих правила перехода в пространстве состояний системы, не рассматривался.

© В. Н. Спиридонов, 2010

**Постановка задачи.** Предложенная в работе [3] математическая модель применима для сложных систем, имеющих следующие особенности моделирования:

- система состоит из конечного множества подсистем;
- подсистема состоит из конечного множества элементов;
- система состоит из конечного множества элементов;
- пространство состояний элемента является конечным;
- множество команд управления системой является конечным;
- система управляется множеством временных программ управления;
- программа управления представляет собой упорядоченную во времени последовательность команд управления с временами их выдачи;
- система описывается конечным множеством переходных функций;
- состояние системы в любой момент времени представляет собой кортеж состояний ее элементов;
- пространство состояний системы является конечным.

В данной работе решается задача выбора состояний и описания переходных функций для моделирования технического объекта с приведенными особенностями моделирования.

**Результаты исследования.** Согласно теории систем, пространство состояний системы выбирается исходя из задачи исследования. В качестве задачи моделирования рассматривается задача прогноза состояний сложного технического объекта. Эта задача актуальна для объектов, способных выполнять специальные задания автономно в течение определенного времени без связи с устройствами управления, по заранее заданной временной программе управления. Процесс управления таким объектом представляет собой процесс планируемого перевода состояний элементов и подсистем объекта под действием команд временной программы управления для выполнения ими заданных программой управления функций. К данному классу объектов можно отнести роботы, гибкие производственные системы, космические аппараты, межпланетные станции [4] и другие объекты. Модель объекта должна обеспечить операторов, управляющих объектом, полной информацией о прогнозируемых состояниях объекта на выданные команды программы управления.

В работе [3] были введены также следующие ограничения на выбор пространства состояний системы:

- абстрагирование от физических свойств элемента, то есть возможность описания любого элемента системы;
- возможность представления отказа или неисправности элемента системы в модели.

В качестве объекта моделирования рассматривается технический объект, поэтому можно применить подход, который используется для автоматизированного контроля и оценки надежности другого класса технических объектов – изделий авиационной техники, и в частности термины “техническое состояние” [5] и “вид технического состояния” [6]. Для этого класса объектов используют следующие виды технического состояния: исправность и неисправность, работоспособность и неработоспособность, правильное функционирование и неправильное функционирование [6]. Эти термины можно использовать при описании технического состояния любого элемента объекта, определяя его как необходимую совокупность видов технического состояния.

Однако в связи с особенностями функционирования моделируемого объекта, обусловленными тем, что объект функционирует в течение определенного времени автономно, отсутствует возможность наблюдения состояний элементов. Информация о состояниях элементов объекта может быть получена только после отработки текущей программы управления. В результате обработки этой информации


делается заключение о работоспособности подсистем и элементов объекта. При изменении состояний работоспособности оператор должен скорректировать модель, изменив эти состояния вручную. Что же касается остальных элементов и подсистем объекта, то они считаются работоспособными на период прогноза состояний – следующую временную программу управления. В связи с этим введем для описания элементов объекта состояния функционирования – вид технического состояния, в котором элемент объекта выполняет в текущий момент времени алгоритмы функционирования – элемент функционирует (состояние “включен”) и, соответственно, не выполняет в текущий момент времени алгоритмы функционирования – элемент не функционирует (состояние “выключен”). Эти состояния, в отличие от состояния правильного функционирования, не включают в себя факторы, связанные с работоспособностью элемента. Для элементов объекта достижение этих состояний заключается, например, в подаче (снятии) напряжения питания на элементы от системы энергопитания.

Технический объект отнесен к системам с постоянной структурой, при этом допускается использование резервирования – метода повышения надежности систем введением избыточности. Поэтому в составе объекта может быть несколько одинаковых элементов, один из которых (или несколько из них) в данный момент времени выполняет предписанный ему (им) алгоритм функционирования. Остальные элементы находятся в “резерве” и подключаются к общей схеме функционирования объекта вместо перешедшего в состояние неработоспособности элемента по командам управления, сформированным оператором. Для описания этих состояний вводим следующий вид технического состояния – состояния резервирования:

- элемент “задействован”;
- элемент в “резерве”.

В связи с тем, что рассмотренные виды технического состояния могут принимать только два значения, удобно представить их булевыми переменными с тем, чтобы можно было использовать аппарат булевой алгебры и математической логики. Состояние любого элемента объекта в каждый момент времени можно представить как упорядоченную тройку значений этих переменных:

$$x_i(t) = (x_i^1(t), x_i^2(t), x_i^3(t)), \quad (1)$$

где  – переменная состояния  $i$ -го элемента в момент времени  $t$ ;

$x_i^1(t)$ ,  $x_i^2(t)$ ,  $x_i^3(t)$  – соответственно, переменные состояния функционирования, резервирования и работоспособности  $i$ -го элемента в момент времени  $t$ .

Состояния функционирования и резервирования являются управляемыми и формируются моделью. Состояния работоспособности не являются управляемыми. Оператор не может “неправильными действиями”, например неправильной последовательностью команд управления, привести элемент в состояние неработоспособности, а другой последовательностью команд “отремонтировать” его. В такой ситуации, как правило, обеспечивается защита элементов объекта различного рода блокировками. Для отдельных объектов нештатные действия оператора могут привести к неработоспособности элементов или подсистем, а также другим нежелательным ситуациям – потере информации и т. п. В связи с этим возникает важная задача – контроля правильности сформированной программы управления. Основные же причины выхода элементов из строя – это изменение физических свойств элементов, то есть обычные отказы, обусловленные воздействием внешней среды, а также в результате выработки ресурса элементов. Тем не менее состояния работоспособности могут условно считаться управляемыми в том смысле, что после установления факта неработоспособности элемента необходимо изменить его состояние, скорректировав модель объекта. С учетом приведенных рассуждений модель состояния элемента объекта можно представить в виде “черного ящика” с управляемыми состояниями, приведенного на рис. 1.

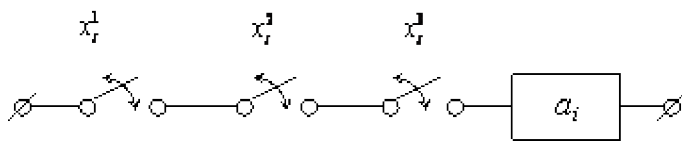


Рис. 1. Модель состояния элемента технического объекта

В соответствии с рис. 1 закодируем состояния элемента объекта следующим образом: состояния функционирования:

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{} \\ \hline \end{array} \quad (2)$$

состояния резервирования:

$$x_i^2(t) = \begin{cases} 1 - \text{задействован} \\ 0 - \text{резерв} \end{cases}, \quad (3)$$

состояния работоспособности:



(4)

Таким образом, каждый элемент объекта в любой момент времени может находиться в одном из  $2^3 = 8$  возможных состояний, описываемых тройками  $(0, 0, 0) \dots (1, 1, 1)$ . Пространство состояний объекта составляет  $8^n$ , где  $n$  – количество элементов объекта.

Следующей задачей является описание переходных функций, то есть правил переходов элементов в выбранном пространстве состояний. Введем следующее определение. Назовем переходную функцию  $d_i$ , обеспечивающую переход в одном бинарном подмножестве состояний некоторого элемента  $a_i$  из множества элементов объекта  $A$  под действием некоторой команды управления  $U_j$  из множества команд управления  $U$ , элементарной переходной функцией.

Воздействие команды  $U_j$  в одном бинарном подмножестве состояний носит двоякий характер (рис. 2):

1) функция обеспечивает перевод элемента  $a_i$  из одного состояния в другое, например из состояния “выключен” в состояние “включен”;

2) если при выдаче команды  $U_j$  элемент  $a_i$  уже находился в данном состоянии, его состояние не изменяется.

Математически рассмотренное воздействие команды  $U_j$  на элемент  $a_i$  можно описать двумя булевыми функциями:

1) функцией отрицания, описывающей переход из одного состояния бинарного подмножества в другое;

2) функцией повторения, описывающей “не изменение” состояния бинарного подмножества (аналогично петле автоматного графа).

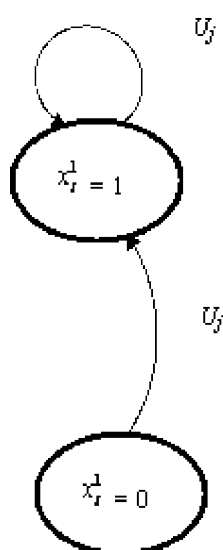


Рис. 2. Графическое представление элементарной переходной функции

Таким образом, любую элементарную переходную функцию можно представить совокупностью двух булевых функций: отрицания и повторения. Поскольку состояния элемента объекта представлено в виде трех бинарных подмножеств, определим 6 элементарных переходных функций, требующихся для описания переходов элемента в его бинарных подмножествах состояний. Назовем их в соответствии с состояниями, в которые выполняется переход, и определим следующим образом:

элементарная функция включения:



(5)

элементарная функция выключения:

$$x_i^1(t+1) = \begin{cases} \overline{x_i^1(t)}, & \text{если } x_i^1(t) = 1 \\ x_i^1(t), & \text{если } x_i^1(t) = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

элементарная функция задействия:

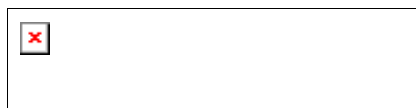
$$x_i^1(t+1) = \begin{cases} \overline{x_i^1(t)}, & \text{если } x_i^1(t) = 0 \\ x_i^1(t), & \text{если } x_i^1(t) = 1 \end{cases}, \quad (7)$$

элементарная функция резерва:



(8)

элементарная функция работоспособности:



(9)

элементарная функция неработоспособности:

$$x_i^1(t+1) = \begin{cases} \overline{x_i^1(t)}, & \text{если } x_i^1(t) = 1 \\ x_i^1(t), & \text{если } x_i^1(t) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Управление некоторыми элементами предусматривает возможность переходов более чем в одном бинарном подмножестве состояний элемента при выдаче одной команды. Например, в ряде случаев изменение состояний резервирования сопровождается изменением состояния функционирования. Если по команде управления переводится в резерв элемент, резервируемый методом “холодного” резервирования, находящийся в состоянии “включен”, то, кроме изменения состояния резервирования, произойдет изменение состояния функционирования – элемент будет выключен. При этом для некоторых элементов, например передатчиков, антенно-фидерных устройств, переключение во включенном состоянии запрещено, так как это может привести к неработоспособности элемента. На такие элементы в инструкции по управлению объектом указываются соответствующие ограничения по управлению. В таких случаях переходную функцию элемента можно представить как соответствующую совокупность элементарных переходных функций.

Возможны случаи, когда переход элемента из одного состояния в другое в одном бинарном подмножестве состояний зависит от состояния в другом бинарном подмножестве. Например, при описании переходов элемента  $a_i$  резервируемого элементом  $a_{i+1}$  методом “холодного” резервирования по схеме, приведенной на рис. 3, видно, что включение и выключение элементов  $a_i$  и  $a_{i+1}$  по командам  $U_j$  и  $U_{j+1}$  зависит от состояния резервирования элементов  $x_i^1(t)$  и  $x_{i+1}^1(t)$ . При этом состояния резервирования элементов могут быть изменены командами  $U_{j+2}$  или  $U_{j+3}$  в моменты времени, предшествующие моменту времени выдачи команды  $U_j(t)$  или  $U_{j+1}(t)$ . Переходную функцию включения в этом случае можно представить в виде:

$$x_i^1(t+1) = \begin{cases} \overline{x_i^1(t)}, & \text{если } x_i^1(t) = 0, x_{i+1}^1(t) = 1 \\ x_i^1(t) = 1, & \text{если } x_i^1(t) = 1, x_{i+1}^1(t) = 1 \\ 0, & \text{если } x_{i+1}^1(t) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Возможно применение схемы “холодного” резервирования элементов, когда при выдаче одной команды управления происходит одновременное изменение состояний функционирования и резервирования, то есть выбирается необходимый элемент, который включается. Для данной схемы должна быть представлена соответствующая переходная функция элемента. В общем случае переходную функцию элемента можно представить как совокупность элементарных переходных функций, если по данной команде выполняется переход в более чем одном бинарном подмножестве состояний, или одной элементарной переходной функцией, если выполняется переход в одном бинарном подмножестве, но с учетом состояния других бинарных подмножеств элемента.

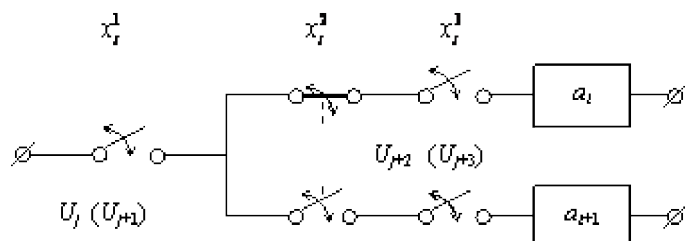


Рис. 3. Модель состояния элементов при раздельном управлении состояниями функционирования и резервирования

Множество возможных видов переходных функций элементов, полученных при описании элементов моделируемого объекта, образуют конечное множество переходных функций объекта. При этом одна и та же переходная функция может многократно использоваться для описания переходов различных элементов объекта. Переходные функции легко реализуются в вычислительной среде, представляя собой простые подпрограммы.

Этим обеспечивается компактность модели. Все возможное множество переходных функций, полученных при описании технических объектов моделируемого класса, например космических аппаратов, образуют формализованный аппарат описания переходов элементов в выбранном пространстве состояний. Понятно, что выбранное пространство состояний объекта и, соответственно, формализованный аппарат описания переходов объектов данного класса переходными функциями не являются единственно возможными. Они определяются задачами, решаемыми с помощью модели системы. Однако наличие формализованного аппарата описания объектов одного класса позволяет говорить об его универсальности в пределах данного класса и выбранного пространства состояний, так как любые переходы в нем любого элемента могут быть описаны соответствующими переходными функциями формализованного аппарата описания.

**Выводы.** В соответствии с задачей моделирования выбрано формализованное пространство состояний элементов объекта, соответствующих трем видам технического состояния: функционирования, резервирования, работоспособности. Формализация пространства состояний элементов объекта позволяет формализовать и правила переходов в пространстве состояний – переходные функции состояния. Компактно реализуемые в вычислительной среде в виде небольшого комплекта подпрограмм, они позволяют существенно снизить размерность модели [3], обеспечивая возможность создания моделей сложных технических объектов, пространство состояний которых может достигать астрономических величин.

#### Литература

1. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 400 с.
2. Бусленко Н. П. Лекции по теории сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко, И. Н. Коваленко, В. В. Калашников. – М. : Советское радио, 1973. – 440 с.
3. Спиридонов В. Н. Построение математической модели дискретных динамических систем с постоянной структурой [Текст] / В. Н. Спиридонов // Вісник Академії митної служби України. Серія: “Технічні науки”. – 2009. – № 2. – С. 73–79.
4. Беляев М. Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях [Текст] / М. Ю. Беляев. – М. : Машиностроение, 1984. – 264 с.
5. ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Термины и определения. – 1975.
6. ГОСТ 113777-75. Надежность в технике. Термины и определения. – 1976.
7. ГОСТ 20911-75. Техническая диагностика. Основные термины и определения. – 1976.