

УДК 629.78

В.Н. СПИРИДОНОВ

*Днепропетровская государственная финансовая академия, Украина***ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ МОДЕЛИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА, МОДЕЛИРУЕМОЙ МЕТОДОМ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ**

Рассмотрена задача оценки точности модели бортовой аппаратуры космического аппарата, моделируемой методом переходных функций. Метод предназначен для моделирования одного из классов сложных систем – дискретных динамических систем с постоянной структурой. В качестве задачи, решаемой моделью системы, является одна из классических задач теории систем – задача прогноза состояния. Метод моделирования базируется на описании функционирования системы в пространстве состояний переходными функциями состояния. Рассмотрены аспекты математической и вычислительной точности моделирования, базирующиеся на результатах косвенной оценки и апробации метода моделирования при управлении нескольких КА.

Ключевые слова: моделирование сложных систем, метод переходных функций, оценка точности модели бортовой аппаратуры космического аппарата

Введение

Задача оценки точности модели актуальна для любого метода моделирования, поскольку определяет применимость метода для решения конкретных практических задач. Сложность объекта моделирования, каким является бортовая аппаратура (БА) космического аппарата (КА) не позволяет для них строить абсолютно адекватные модели. При этом в зависимости от решаемой задачи моделируемый объект представляется в модели с той или иной степенью точности. Поэтому можно говорить о точности модели объекта, полученной тем или иным методом моделирования в привязке к решаемой модели задаче. Важно отметить, что нежелательна как низкая, так и чрезмерная точность модели. В первом случае полученные результаты моделирования не будут иметь необходимой точности, что скажется на результатах решения задачи. Во втором, обеспечение избыточной точности может повлечь за собой существенное усложнение модели и полученных результатов моделирования.

Применение известных методов оценки точности моделирования [1] по входной, выходной или обобщенной ошибке для рассматриваемого класса сложных технических объектов проблематично. Это связано с тем, что весьма затруднительным и дорогостоящим является постановка эксперимента, в котором может быть получена для сравнения реакция бортовой аппаратуры КА и её модели при одновременной выдаче команд управления на БА и модель. Поскольку методы непосредственной оценки точности моделирования для объектов, подобных

БА, не могут быть использованы, оценка точности моделирования БА может быть выполнена лишь косвенно.

Постановка задачи

Модель, задача оценки точности которой рассматривается в статье, предназначена для решения задачи прогноза состояния бортовой аппаратуры КА. Необходимость решения этой задачи для сформированных программ управления КА на модели объекта обоснована в работе [2]. Полученные результаты моделирования предназначены для представления полной информации о состояниях БА операторам сектора управления КА. Информация должна использоваться во время штатного управления КА, передаче управления дежурными сменами, анализе нештатных ситуаций, возникших при управлении КА. Для обеспечения полноты прогноза необходимо представить в модели все бортовые системы и команды управления объектом.

Модель объекта создана методом переходных функций, предложенным в работе [3] для моделирования одного из классов сложных систем – дискретных динамических систем с постоянной структурой. Математическая модель управления системы с постоянной структурой в пространстве состояний представлена таблицей переходных функций и набором переходных функций, описывающих правила переходов элементов системы в пространстве состояний. Применение метода при решении задачи прогноза состояния сложных систем позволяет существенно снизить размерность модели.

В работе [4] рассмотрена задача моделирования методом переходных функций класса сложных технических объектов, к которому отнесена бортовая аппаратура КА. В соответствии с задачей исследования выбрано формализованное пространство состояний элементов объекта, представляющее собой совокупность трех видов технического состояния: функционирования, резервирования, работоспособности. Рассмотрены переходные функции элемента объекта моделирования в выбранном пространстве состояний.

Задача оценки точности модели рассматривается применительно к модели бортовой аппаратуры КА, созданной методом переходных функций [3], а также для формализованного пространства состояний элементов объекта и переходных функций, рассмотренных в работе [4]. В статье используются термины и определения, используемые в работах [3] и [4].

Результаты исследования

Задача, решаемая моделью объекта – задача прогноза состояния объекта формулируется следующим образом: задано состояние объекта X_0 в начальный момент времени T_0 и множество управляющих воздействий U , выдаваемых во времени T . Требуется определить состояния объекта X на выданные управляющие воздействия U .

$$F: X_0 \times T_0 \times U \times T \rightarrow X \times T \quad (1)$$

Входной информацией для модели БА является временная программа управления КА, представляющая упорядоченную во времени последовательность команд управления из конечного множества команд управления КА:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_J\}, j = \overline{1, J}, \quad (2)$$

где j – порядковый номер команды;

J – максимальное количество команд, используемых при управлении системой;

u_j – имя (номер) команды управления.

Известно [1], что модель содержит информацию трех видов:

о структуре в форме математических тождеств, блок-схем, сетей и графов, матриц связи;

значения параметров, т.е. величин, не зависящие от входов;

значения зависимых переменных (состояний) в фиксированный момент времени или как функция времени.

Рассмотрим точность представления этой информации в модели объекта.

Информация о структуре объекта задана в модели перечнем элементов объекта:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n\}, i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где i – порядковый номер элемента;

n – количество элементов в объекте.

Перечень элементов объекта получен в результате декомпозиции объекта на подсистемы:

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_m, \dots, c_M\}, m = \overline{1, M}, \quad (4)$$

где m – индекс подсистемы;

M – количество подсистем в составе объекта и элементы:

$$c_m = \{a_1^m, a_2^m, \dots, a_g^m, \dots, a_G^m\}, g = \overline{1, G}, G \leq n, \quad (5)$$

где G – максимальное количество элементов в подсистеме c_m .

Метод переходных функций предполагает использование реальной (физической) декомпозиции системы на подсистемы и элементы (3). Кроме того, в модели может быть представлен полный перечень команд управления объектом (2). Это позволяет в соответствии с априорной информацией о составе БА, перечне команд управления и выполняемых ими функциях, адекватно представить эту информацию в модели в виде таблицы переходных функций [4]. Использование реальной декомпозиции позволяет не включать в состав модели элементы БА, информация о которых не представляет интереса, например, функционирующих непрерывно, а также команды управления, не изменяющие состояний элементов БА, например, технологические команды. Такое исключение не влияет на результаты моделирования.

При моделировании систем методом переходных функций параметрами модели являются собственно переходные функции элементов:

$$x(t+1) = \left(d_1 \{x_i(t), u_j(t+1)\}, x_{A \setminus i}(t) \right), \quad (6)$$

где $x_i(t)$ – состояние элемента a_i в момент времени t ;

$x_{A \setminus i}(t)$ – состояния остальных элементов системы, которые по команде $u_j(t+1)$ в момент времени $(t+1)$ не изменились.

d_1 – переходная функция элемента и подсистем:

$$x(t+1) = \left(d_f^m \{x_{c_m}(t), u_j(t+1)\}, x_{A \setminus c_m}(t) \right), \quad (7)$$

где $x_{c_m}(t)$ – состояния подсистемы в момент времени t ;

$x_{A \setminus c_m}(t)$ – состояния остальных элементов системы, которые по команде $u_j(t+1)$ в момент времени $(t+1)$ не изменились;

d_f^m – переходная функция подсистемы c_m .

Перечень переходных функций объекта реализован в виде программных процедур (модулей):

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_1, \dots, d_L\}, \quad l = \overline{1, L}, \quad (8)$$

где l – индекс переходной функции;

L – максимальное количество переходных функций, используемых при описании объекта.

Величина L определяет количество правил переходов, используемых при описании объекта, и в итоге, количество модулей в библиотеке переходных функций.

Предложенная в работе [3] реализация переходных функций элементов БА на основе элементарных переходных функций, описывающих все возможные переходы в бинарных подмножествах состояний элементов, принципиально позволяет описать все возможные переходы в выбранном пространстве состояний элементов и адекватно представить их в модели объекта. Любая переходная функция из перечня (8) может быть элементом таблицы переходных функций, что обеспечивает возможность задания в модели для любой команды управления любой переходной функции для любого элемента объекта.

Информация о зависимых переменных (состояниях объекта) в фиксированный момент времени представляют в следующих таблицах. В таблице исходных состояний вводятся состояния бортовых систем объекта на момент начала его функционирования. Таблица последовательно обновляется моделью после моделирования отработки программ управления КА. В таблице текущих состояний фиксируются состояния бортовых систем в каждый текущий момент времени, совпадающий с моментом времени текущей программы управления. В выходной таблице прогноза состояний (результаты моделирования) представлены как функция времени изменения состояний бортовых систем КА.

Отметим, что поскольку пространство состояний элементов системы выбирается исходя из задач исследований, решаемых с помощью модели, ответ на вопрос об адекватности выбора пространства состояний системы могут дать лишь результаты экспериментов. Если выбранное пространство состояний системы позволяет решать задачи исследования, оно выбрано правильно.

Различают [5] математическую (адекватность отражения математической моделью функционирования реальной физической системы) и вычислительную (влияние конечного представления чисел и ошибок округления на результаты моделирования) точность моделирования. Математическая точность моделирования обеспечивается адекватностью математической модели. Относительно вычислительной точности моделирования можно отметить, что моделью вычисляются только переменные состоя-

ния. Вычисление переменных состояния, принимающих только целые значения, не может привести к ухудшению вычислительной точности моделирования. Времена изменения состояния элементов определяются временами выдачи команд управления с точностью до времени переходного процесса в исполнительных элементах и не вычисляются.

Таким образом, по всем аспектам оценки точности моделирования методом переходных функций получены косвенные оценки. Они могут быть подтверждены результатами экспериментов с моделью.

Выполнена оценка точности моделирования методом переходных функций по результатам экспериментов. Метод прошел апробацию при моделировании бортовой аппаратуры ряда космических аппаратов. Модель БА использовалась в контуре автоматизированного управления КА. Полученные практические результаты подтвердили результаты косвенной оценки точности модели:

- в модели были представлены все бортовые системы и все команды управления КА;
- в модели представлены все состояния бортовых систем, которые были необходимы для решения поставленной задачи;
- представленные в модели переходные функции обеспечили описание всех необходимых правил переходов элементов в выбранном пространстве состояний.

Максимальная размерность модели получена для объекта со следующими параметрами: количество команд управления – 120, количество управляемых элементов – 99, количество переходных функций – 5. Пространство состояний моделируемого объекта составило 8^{99} состояний. Применение метода переходных функций для данного класса объектов не встретило каких-либо ограничений, связанных с обеспечением требуемой точности моделирования. Этому в значительной степени способствовало наличие методики создания модели сложных технических объектов [6], обеспечивающая возможность создания моделей объектов в автоматизированном режиме с требуемой точностью модели.

Выводы

Выполнена косвенная оценка точности модели бортовой аппаратуры ряда КА. Полученные результаты показали, что при моделировании бортовой аппаратуры КА методом переходных функций обеспечивается необходимая для решения задачи прогноза состояния точность моделирования. Результаты косвенной оценки были подтверждены экспериментально при использовании моделей в контуре автоматизированного управления нескольких КА.

Литература

1. Эйкхоф. Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния / Эйкхоф. – М.: Мир, 1975. – 684 с.
2. Конохов С.Н. Об одной задаче моделирования полета космического аппарата / С.Н. Конохов, А.Г. Меланченко, В.Н. Спиридонов // Ракетно-космическая техника. Сер. 1 – 1989, Вып. 2. – С. 32-37.
3. Спиридонов В.Н. Построение математической модели дискретных динамических систем с постоянной структурой / В.Н. Спиридонов // Вестник Академии таможенной службы Украины. Сер. Технические науки. – 2009. – № 2 (42). – С. 73-79.
4. Спиридонов В.Н. Моделирование сложных технических объектов: состояния и переходные функции / В.Н. Спиридонов // Вестник Академии таможенной службы Украины. Сер. Технические науки. – 2010. – № 1 (43). – С. 119-125.
5. Сигорский В.П. Адаптация точности моделирования при схемотехническом проектировании / В.П. Сигорский, Р.А. Заболотин // Электронное моделирование. – 1986. – № 6. – С. 56-59.
6. Спиридонов В.Н. Методика создания модели сложной системы методом переходных функций/В.Н. Спиридонов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №1 (42). – С. 122-126.
7. Спиридонов В.Н. Методика верификации программ управления космического аппарата на основе прогноза состояния бортовой аппаратуры / В.Н. Спиридонов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №2 (69). – С. 72-78.

Поступила в редакцию 3.05.2010

Рецензент: д-р тех. наук, профессор, зав. кафедры высшей математики и компьютерных технологий А.А. Рядно, Днепропетровская государственная финансовая академия, Днепропетровск, Украина.

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ МОДЕЛІ БОРТОВОЇ АПАРАТУРИ КОСМІЧНОГО АПАРАТА, ЩО МОДЕЛЮЄТЬСЯ МЕТОДОМ ПЕРЕХІДНИХ ФУНКЦІЙ

В.М. Спиридонов

Розглянута задача оцінки точності моделі бортової апаратури космічного апарата, яка моделюється методом перехідних функцій. Застосований метод призначений для моделювання одного із класів складних систем - дискретних динамічних систем з постійною структурою. Задача, що розв'язується моделлю системи, є одна із класичних задач теорії систем - задача прогнозу стану системи. Метод моделювання базується на описі функціонування системи в просторі станів перехідними функціями стану. Розглянуто аспекти математичної й обчислювальної точності моделювання, що базуються на результатах непрямой оцінки й апробації методу моделювання при управлінні декількох КА.

Ключові слова: моделювання складних систем, метод перехідних функцій, оцінка точності моделі бортової апаратури космічного апарата.

ACCURACY ESTIMATION OF MODEL OF SPACE VEHICLE ONBOARD EQUIPMENT USING THE TRANSITIVE FUNCTIONS METHOD

V.M. Spiridonov

The problem of an accuracy estimation of model of space vehicle onboard equipment using the transitive functions method is considered. The method is intended for modelling of one of classes of complex systems - discrete dynamic systems with constant structure. As a problem solved by system model is one of the classical problems of the theory of systems - a problem of states forecast. The modelling method is based on the description of system functioning in space of states by transition functions. The aspects of mathematical and computing accuracy of the model, based on the results of indirect estimation and approbation of a modelling method, are considered at control of several space vehicle.

Key words: modelling of complex systems, method of transitive functions, accuracy estimation of model of space vehicle onboard equipment.

Спиридонов Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики и компьютерных технологий, Днепропетровская государственная финансовая академия, Днепропетровск, Украина, e-mail: spiridonov-vladimir@rambler.ru.