

УДК 621.44.001.24.3

А.А. ОЛЕЙНИК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СИСТЕМ ГТД**

Рассмотрена концепция автоматизации структурно-параметрической идентификации систем ГТД. Предложено формализованное описание структуры модели, используемое как связующего звена между процедурами структурной и параметрической идентификации, при этом алгоритм управления параметрической идентификацией воспроизводится автоматически по заданной структуре модели.

**структурно-параметрическая идентификация, формализованное описание структуры модели****Введение**

Математические модели ГТД, его систем, узлов и агрегатов являются ключевыми компонентами большинства современных систем автоматизированного управления и диагностирования. При этом большое значение имеет степень соответствия модели действительным характеристикам объекта, обеспечиваемая процедурой параметрической идентификации.

В данной статье рассматриваются следующие виды моделей ГТД, подлежащих идентификации:

- быстросчетные модели, использующиеся для вычисления номинальных значений параметров двигателя в условиях ограниченности вычислительных ресурсов;
- модели нормального состояния, учитывающие индивидуальные особенности конкретного экземпляра ГТД;
- модели текущего состояния, учитывающие также и техническое состояние ГТД;
- модели развития неисправностей, учитывающие скорость ухудшения характеристик ГТД в течение эксплуатации.

Перечисленные виды моделей, как правило, являются статическими и описываются уравнением вида (1), называемым приведенным уравнением модели – т.е. разрешенным относительно зависимой

переменной [1]:

$$y = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}), \quad (1)$$

где  $y$  – зависимая переменная;  $\mathbf{x}$  – вектор независимых переменных;  $\boldsymbol{\theta}$  – вектор параметров модели.

Как известно, задача параметрической идентификации состоит в нахождении таких оценок параметров  $\boldsymbol{\theta}$ , которые обеспечат максимальное соответствие модели имеющимся экспериментальным данным.

Параметрической идентификации предшествует процедура структурной идентификации, заключающаяся в выборе наиболее подходящей (по различным факторам) структура модели. Структурная идентификация выполняется при адаптации автоматизированных систем к особенностям ГТД конкретной модели, а также при их модификации для учета качественных изменений характеристик при модификации объекта. В отличие от параметрической идентификации, для которой существует множество известных методов и алгоритмов, структурная идентификация по-прежнему является плохо поддающейся формализации областью инженерных исследований.

Тем не менее, многообразие моделей ГТД, обладающих качественно различными характеристиками, а также необходимость частого внесения изменений в структуры моделей при модернизации объ-

екта или выявлении новых или уточнении имеющихся сведений о моделируемых процессах требуют снижения трудоемкости структурной идентификации.

Помимо недостаточности теоретического базиса, основным фактором, определяющим высокую трудоемкость структурной идентификации, представляется отсутствие достаточно универсальных методов и алгоритмов параметрической идентификации. Необходимость учета характерных для ГТД нелинейных и дискретных факторов, таких как высотная и скоростная коррекция программы регулирования, выход на ограничения, положение клапанов, лопаток направляющего аппарата, переключателей системы управления и пр., требуют создания дополнительных алгоритмов управления параметрической идентификацией, формирующих исходные данные и обрабатывающих результаты работы алгоритмов непосредственного оценивания параметров. В результате, выбор новой структуры модели зачастую сопряжен с разработкой, модификацией или адаптацией алгоритмов, т.е. непосредственным внесением изменений в программное обеспечение, что помимо трудоемкости также характеризуется риском снижения надежности системы и требует дополнительных затрат на отладку и тестирование. Однако анализ используемых алгоритмов управления параметрической идентификацией показывает их однозначную обусловленность выбранной структурой модели и указывает на теоретическую возможность их автоматической генерации или воспроизведения на основе сведений о структуре модели.

## 1. Постановка задачи

Для автоматизации структурной идентификации систем ГТД предлагается использовать метод, обеспечивающий автоматическое воспроизведение алгоритма параметрической идентификации по заданным сведениям о структуре модели, что позволит в подавляющем большинстве случаев избежать необ-

ходимости внесения изменений в программное обеспечение при выборе новой структуры модели.

Метод, отвечающий указанным требованиям, был разработан нами ранее для структурно-параметрической идентификации моделей нормального состояния в адаптивной системе допускового контроля параметров ГТД [2], однако эта работа носила скорее технический и узкоспециализированный характер. С тех пор накоплен опыт успешного применения разработанного метода для решения различных задач, в том числе не связанных с диагностированием ГТД, научно обоснованы его основные положения, на практике подтверждена возможность развития метода в сторону расширения области его применения на другие виды моделей.

## 2. Описание метода

Концептуальной основой метода является введение *формализованного описания структуры модели* – структуры данных, которая содержит априорные сведения о модели, позволяющие автоматически воспроизвести необходимый алгоритм параметрической идентификации. Это позволяет полностью интегрировать процедуры структурной и параметрической идентификации – результатом структурной идентификации является формирование данных описания модели, которое в свою очередь однозначно формулирует поставленную задачу для подсистемы параметрической идентификации.

В основе формализованного описания структуры модели лежит понятие *элемента модели*, объединяющее класс математических функций с предназначенным для него специализированным алгоритмом идентификации и структурой данных априорных сведений, необходимых для функционирования этого алгоритма. Само формализованное описание представляет собой древовидный граф, в вершинах которого находятся экземпляры элементов модели. При этом связи родительских элементов с дочерними отражают иерархию вхождения математических

функций в качестве аргументов в составные функции уравнения модели.

По наличию связей с дочерними элементами различаются два основных типа элементов модели – сложные и простые, соответствующие узлам и листьям дерева описания модели. Сложные элементы всегда соответствуют классам функций, описывающим влияние нелинейных и дискретных факторов – например, произведение функций, функции дискретного аргумента, кусочно-непрерывная функция и др. Аргументы таких функций рассматриваются как самостоятельные математические модели. Простые элементы соответствуют классам функций, для которых применяются алгоритмы непосредственно оценивания параметров – например, обобщенная линейная функция, ее частные случаи, экспоненциальная, логарифмическая и др. нелинейные функции. Помимо простых и сложных элементов, также используется тип элементов «функция-аргумент», соответствующий ребрам графа описания структуры модели и предназначенный для хранения специфических атрибутов, присущих аргументам составных функций уравнения модели. Он также используется для описания классов функций нескольких аргументов, среди которых только один подлежит идентификации, – например, сумма или произведение известной базовой характеристики и поправки к ней, которая подлежащей идентификации.

Алгоритм идентификации, связанный со сложным элементом в общем случае производит формирование исходных данных для алгоритмов, связанных с дочерними элементами, и обработку результатов их выполнения, независимо от вида и структуры функций-аргументов. Для учета нелинейных факторов используются итеративные алгоритмы последовательного приближения, а для учета влияния дискретных факторов производится последовательная идентификация функций-аргументов, каждая из которых описывает особенности поведения объекта при одном значении дискретного фактора. Непосредственное оценивание параметров модели производится алгоритмами идентификации простых элементов на основе переданных им исходных данных.

Корневым элементом описания структуры модели обычно является сложный элемент, кроме частного случая, когда структура описания модели состоит только из одного простого элемента. Алгоритм идентификации, связанный с корневым элементом формирует исходные данные для алгоритмов, связанных с дочерними элементами, которые в свою очередь также могут являться сложными и управлять алгоритмами, связанными с собственными дочерними элементами. В результате такого взаимодействия полностью формируются исходные данные для алгоритмов оценивания, связанных с простыми элементами, производится оценивание неизвестных параметров, и, в конечном итоге, автоматически воспроизводится необходимый алгоритм параметрической идентификации, заданный описанием структуры модели.

Корневым элементом описания структуры модели обычно является сложный элемент, кроме частного случая, когда структура описания модели состоит только из одного простого элемента. Алгоритм идентификации, связанный с корневым элементом формирует исходные данные для алгоритмов, связанных с дочерними элементами, которые в свою очередь также могут являться сложными и управлять алгоритмами, связанными с собственными дочерними элементами. В результате такого взаимодействия полностью формируются исходные данные для алгоритмов оценивания, связанных с простыми элементами, производится оценивание неизвестных параметров, и, в конечном итоге, автоматически воспроизводится необходимый алгоритм параметрической идентификации, заданный описанием структуры модели.

### 3. Пример применения метода

Для объяснения сути метода, рассмотрим достаточно простой пример. Задана программа регулирования ГТД, описанная уравнением (2), которое и является уравнением модели. График зависимости представлен на рис. 1:

$$y = \begin{cases} k_{12}, & \text{если } i_{3MG} = 0; \\ k_{11}, & \text{если } i_{3MG} = 1, \end{cases} \quad \text{если } x < x_1; \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{cases} k_{21}x^2 + k_{22}x + k_{23}, & \text{если } x_1 < x < x_2; \\ k_3, & \text{если } x > x_2, \end{cases}$$

где  $y$  – управляемый параметр;  $x$  – влияющий фактор ( $\alpha_{PVD}$ );  $k_i$  – параметры модели;  $x_i$  – границы участков;  $i_{3MG}$  – признак режима земного малого газа.

Структура дерева формализованного описания данной модели представлена на рис. 2. Корневой элемент модели соответствует кусочно-непрерывной функции, которая описывает варьирование результатов в зависимости от области значе-

ний переменной  $x$ . Его дочерние элементы соответствуют функциям, определяющим характер зависимости в каждой области. При этом первый дочерний элемент также является сложным и соответствует функции дискретного аргумента, описывающей варьирование результатов в зависимости от положения переключателя земного малого газа  $i_{ЗМГ}$ .

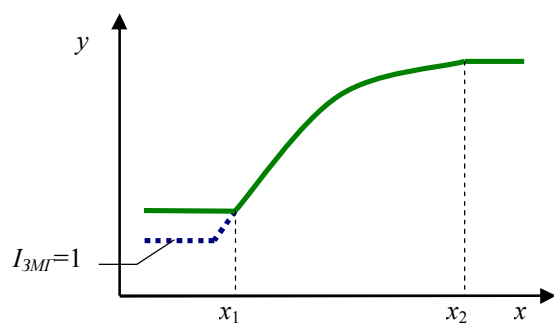


Рис. 1. Пример программы регулирования ГТД

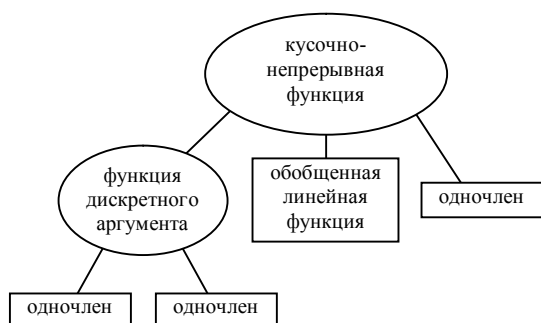


Рис. 2. Пример схемы формализованного описания структуры модели

Алгоритм идентификации, связанный с корневым элементом (кусочно-непрерывной функцией) последовательно формирует выборки экспериментальных данных, принадлежащих к различным областям значений переменной  $x$  для передачи в алгоритмы идентификации, связанные с дочерними элементами. Алгоритм, связанный с дочерним сложным элементом (функцией дискретного аргумента) производит последующую выборку исходных данных по значению признака  $i_{ЗМГ}$ . Полученные выборки экспериментальных данных используются для оценки параметров модели в алгоритмах, связанных с простыми элементами.

Разумеется, параметрическая идентификация такой модели может быть выполнена известными методами линейной или нелинейной идентификации. Однако это потребует обработки неоправданно большого объема данных, так как например, для определения параметров каждого участка кусочно-непрерывной функции достаточно проанализировать только часть экспериментальных данных, которая принадлежит соответствующей области значений переменной  $x$ , к остальным же данным параметры участка нечувствительны.

Кроме того, теряется возможность проверки результатов идентификации – в случае, если линии участков не пересекаются в установленных пределах, результаты идентификации должны быть признаны недействительными. Также теряется и возможность не выполнять оценку параметров второстепенных участков, если в соответствующей области зарегистрировано недостаточно экспериментальных данных.

С другой стороны, алгоритм выборки данных, относящихся к различным участкам данной модели и проверки результатов идентификации достаточно прост. Однако, будучи разработан для заданной структуры модели, он будет непригоден для любой другой модели.

Использование же готовых элементов модели позволяет, задавая их структуру и конфигурацию в соответствии с уравнением модели, тем самым, полностью определять необходимый алгоритм параметрической идентификации.

#### 4. Реализация метода

На основе предложенного метода нами разработан программный продукт, получивший название Structor, предназначенный для структурно-параметрической идентификации моделей, используемых в прикладных и исследовательских системах. Он позволяет разработчику модели создавать и редактировать формализованное описание структуры мо-

дели, которое используется для выполнения параметрической идентификации по экспериментальным данным. Результаты идентификации вводятся в обслуживаемую систему, взаимодействие с которой осуществляется через подключаемый модуль-адаптер. В различных вариантах использования источником экспериментальных данных и информации о структуре модели может служить сама обслуживаемая система, либо, наоборот, программный продукт может использоваться для решения исследовательских задач, не связанных с обслуживанием конкретной системы.

В разработанном программном продукте множество доступных к использованию элементов моделей реализовано в виде библиотеки классов объектно-ориентированного программирования, основанных на базовых классах «Узел», «Ветвь» и «Лист» (рис. 3), соответствующих основным типам элементов формализованного описания структуры модели – сложный элемент, функция-аргумент и простой элемент.

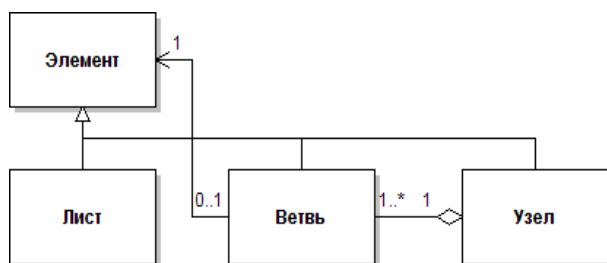


Рис 3. Диаграмма базовых классов элементов модели

Параметрическая идентификация выполняется иерархической структурой объектов, производных от библиотечных классов элементов модели, которая формируется в соответствии с деревом структуры модели и, в сущности, и является формализованным описанием структуры модели.

Если возникает необходимость использования в уравнениях модели новых классов функций, библиотека элементов модели может дополняться новыми классами, в том числе разработанными третьей стороной.

## Выводы

Представленный метод ни в коем случае не стоит рассматривать как принципиально новый математический метод идентификации, т.к. он является результатом автоматизации и интеграции общеизвестных методов и алгоритмов. Основная цель метода – позволить разработчику модели определять только саму задачу параметрической идентификации (описание структуры модели, подлежащей идентификации), а не путь ее решения (алгоритм управления параметрической идентификацией).

Использование формализованного описания структуры модели, которое может формироваться как вручную, так и программно, открывает возможность для дальнейшей автоматизации структурной идентификации – применения средств автоматизированного формирования структуры модели.

Предложенная концепция формализованного описания структуры модели как связующего звена между структурной и параметрической идентификацией может быть использована для автоматизации структурно-параметрической идентификации других, более сложных видов моделей ГТД, например динамических, поузловых и т.д., хотя, разумеется, структура данных формализованного описания в этих случаях будет другой.

## Литература

1. Бард Й. Нелинейное оценивание параметров. – М.: Статистика, 1979. – 340 с.
2. Олейник А.А., Елифанов С.В., Волков В.Г. Программный комплекс адаптивной идентификации моделей нормального состояния ГТД // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: ХАИ. – 2002. – Вып. 31. – С. 181-190.

Поступила в редакцию 21.06.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.