

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Кожин Д. Г., Кривошеев И. А., Горюнов И. М.

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Россия (450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12), e-mail: office@ugatu.su

Предлагается методология имитационного моделирования (ИМ) авиационных двигателей, основанная на объектно-ориентированном подходе и алгоритмах вложенных вычислительных процедур. Объектно-ориентированный подход позволяет декомпозировать предметную область на конечное число объектных классов, сводя решение сложных задач (прямых, обратных, оптимизационных) к взаимно вложенным процедурам, решаемым вариационными методами. В алгоритме процессора (решателя) разработанной системы имитационного моделирования (СИМ) реализуется решение обратных задач на основе принципов идентификации. При этом реализуются взаимно вложенные процедуры: структурного синтеза, одновариантного параметрического анализа, многовариантного параметрического анализа, параметрического синтеза, параметрической оптимизации, структурного анализа, структуры оптимизации. Это позволяют формализовать практически любые проектно-доводочные ситуации, с которыми сталкивается разработчик и эксплуатант авиационных двигателей (и других сложных систем). Разработанная методология направлена на организацию системной автоматизированной разработки и эксплуатации двигателей, энергоустановок и других изделий и успешно используется в ряде промышленных предприятий и высших учебных заведений.

Ключевые слова: моделирование, проектирование, авиационный двигатель, объектно-ориентированный подход.

SIMULATION OF AIRCRAFT ENGINES

Kozhinov D. G., Krivosheev I. A., Gorjunov I. M.

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia (450000, Bashkortostan, Ufa, K. Marx street, 12), e-mail: office@ugatu.su

A methodology of aircraft engines simulation is proposed. The methodology is based on object-oriented approach and mutually nested computational procedures. Object-oriented approach allows decomposing problems into tasks, reducing complexity to several mutually nested procedures, which are solvable using numerical methods. The designed simulation system includes a solver, which is able to process inverse tasks using identification principles. This involves mutually nested tasks, such as structural synthesis, parametric analysis, parametric synthesis, parametric optimization, structural analysis, and structural optimization. This allows formalizing almost any design and finishing situations, which an aircraft engines designer may encounter. The proposed methodology is aimed to organize automated design and operation of aircraft engines, power plants, and other products. It is successfully used in a number of industries and high schools.

Keywords: simulation, modeling, design, aircraft engine, object-oriented approach.

Введение

Сложность задач по созданию авиационных двигателей (АД) новых поколений требует использования новых методов и средств. Разрабатывая в течение более чем 20 лет оригинальную методологию структурного, имитационного моделирования технических объектов, авторы в последнее время обнаружили близкие подходы и взгляды в работах Егера С. М. [1] и Нариньяни С. А. [2]. Это подтверждает правильность выбранного направления исследований.

Цель исследования

Целью данного исследования является разработка объектно-ориентированной методологии имитационного моделирования авиационных двигателей и других сложных

систем.

Материал и методы исследования

Материал исследования включает данные о существующих авиационных двигателях и энергетических установках и методах их проектирования, методы исследования основаны на современных информационных технологиях.

Технология структурирования модели объекта

Эффективный способ «анализа иерархий» предложил Томас Саати [5]. Он позволяет проанализировать структуру сложных систем, разбив их на более простые подсистемы. В этом смысле взгляды авторов согласуются с соотношением «внешнего» и «внутреннего» проектирования, описанного Егером С. М. [1]. При «внешнем проектировании» (для «самолетчиков») АД представляет собой единое целое, но уже можно анализировать и задавать ограничения на его параметры и характеристики (которые, по А. П. Тунакову, разработавшему известный в авиадвигателестроении программный комплекс ГРАД, не что иное, как «передаточные модели»). Затем следует этап «внутреннего проектирования», где анализу подлежит принцип работы АД и решается, из каких структурных элементов (СЭ) он будет состоять (это могут быть узлы – входное устройство, компрессор, камера сгорания и т.д.), сколько их и как они связаны между собой. Каждый из этих СЭ можно, абстрагируясь от их сложности, рассматривать как цельный объект, хотя на следующем этапе детализации и они состоят из более специализированных СЭ – элементов автоматики, ступеней, ротора и статора, а они в свою очередь из деталей и т.д. При создании модели авиационного двигателя (или любой другой сложной системы), таким образом, можно справиться с его сложностью путём использования иерархических абстракций.

Для формализации метода иерархических абстракций используется объектно-ориентированный подход (ООП) [7, 8], основанный на инкапсуляции, наследовании и полиморфизме, что позволяет создать среду моделирования, которая поддерживает разработку гораздо более масштабных и гибких моделей, чем традиционные процессно-ориентированные компьютерные программы. Применяя объектно-ориентированный подход, авторам удалось объединить отдельные части сложной программы для построения связанного, устойчивого к ошибкам и работоспособного целого. Разработанная авторами методология имитационного моделирования САМСТО [4] является конкретизацией объектно-ориентированного подхода для построения систем моделирования сложных технических объектов, таких, например, как авиационные двигатели.

Классы. Для создания гибкой и мощной системы моделирования необходимо определить классы объектов, которые предполагается использовать в создаваемой системе моделирования. Для этого необходимо провести декомпозицию моделируемой системы на

СЭ, которым будут соответствовать объекты модели. Объекты являются экземплярами классов, т.е. необходимо определить набор объектных классов, способных составить модель системы любой конструктивной схемы. Например, объектный класс “компрессор” может использоваться для создания объектов модели “компрессор низкого давления” и “компрессор высокого давления”. Остальные классы должны быть способны добавить в модель соответствующие объекты, дополнив её до законченной модели двигателя любой конструктивной схемы. Оптимальное разбиение предметной области на объектные классы является важной частью процесса создания системы моделирования.

Если создать крупные классы (каждый объектный класс имеет много свойств), а самих классов будет мало, то из них сложно будет компоновать новые топологические схемы моделируемых технических систем, решать различные задачи имитационного моделирования и проектирования – среда моделирования получится недостаточно гибкой.

Если разбить предметную область на слишком простые по своим функциям классы объектов, и их будет много, трудоемкой процедурой будет составление из них сложной модели объекта. Повышенная сложность, кроме того, повышает вероятность ошибок.

Декомпозиция предметной области должна выполняться по СЭ моделируемой технической системы – например, для авиационного двигателя в функциональном аспекте это: входное устройство, компрессор, камера сгорания, турбина, реактивное сопло и т.д.

Итак, *объектный класс* – это единое, неделимое информационное образование, описывающее функционирование определённого типа СЭ моделируемой технической системы, либо отдельную проектную процедуру, из которых складывается весь процесс проектирования или моделирования технической системы.

Информационные взаимосвязи. В соответствии с методом абстракции и объектно-ориентированным подходом, объекты, из которых состоит модель, должны быть максимально независимы друг от друга (принцип инкапсуляции ООП). Это позволяет свести к минимуму вероятность ошибок в структуре модели. В то же время должен существовать механизм, позволяющий связывать объекты в единую имитационную модель технической системы. Такой механизм должен быть унифицированным, инвариантным по отношению к классу объекта модели (принцип полиморфизма ООП). В качестве такого механизма в рамках предлагаемой методологии предлагается использовать унифицированные *информационные взаимосвязи («потоки»*).

Информационная взаимосвязь – это информационное образование, являющееся составной частью математической модели, служащее для передачи параметров между объектами, составляющими модель.

Составные имитационные модели. Используя унифицированные классы и

универсальные информационные взаимосвязи, можно создать составную модель любого уровня сложности, отражающую конструктивную схему моделируемого АД, которая в среде СИМ (системы имитационного моделирования), имеющей пре-, постпроцессор и процессор, обеспечивает имитационное моделирование поведения двигателя в различных проектно-доводочных и эксплуатационных ситуациях. Это полностью согласуется с подходом, изложенным Нариньяни С. А. в работе [2].

Структурирование решаемой задачи моделирования

Недостаточно только составить модель системы из классов. Над моделью могут проводиться различные вычислительные эксперименты. Всё разнообразие вычислительных экспериментов может быть сведено к нескольким типовым задачам, вложенным друг в друга, т.е. на каждом шаге решения внешней задачи каждый раз путем вариаций решается внутренняя. В предлагаемой методологии имитационного моделирования реализована взаимная вложенность универсальных процедур (рис. 2), моделирующих реальные проектно-доводочные ситуации. Данная концепция на основе методов идентификации была предложена авторами в [2], затем обнаружилось, что это согласуется с работой Норенкова И. П. [3]. Ниже эти типовые задачи моделирования рассматриваются подробнее.

Параметрический анализ. Алгоритмические модели (реализованные по процедурному принципу) характеризуются наличием вектора входных данных \mathbf{X} , вектора выходных данных \mathbf{Y} и направленного алгоритма, вычисляющего значения компонентов вектора \mathbf{Y} по заданным значениям компонентов вектора \mathbf{X} (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритмическая модель технического объекта

Очевидно, самой простой расчетной задачей в этом случае является однократное задание значений \mathbf{X} , затем однократный расчет по алгоритму \mathbf{A} значений \mathbf{Y} . Назовем такую расчетную задачу *одновариантным параметрическим анализом* (анализируется поведение выходных параметров \mathbf{Y} при задании различных значений входных параметров \mathbf{X}). Кроме одновариантного параметрического анализа можно провести *многовариантный* – в этом

случае для некоторых параметров в векторе \mathbf{X} последовательно задаются различные значения (значения параметров табулируются), после каждого изменения значений производится расчет по алгоритму \mathbf{A} новых значений выходных параметров \mathbf{Y} . Это позволяет свести результаты расчёта в таблицу, или построить график.

Параметрический синтез. Несмотря на полезность параметрического анализа, одного этого типа расчётной задачи недостаточно для решения всего многообразия задач моделирования. При переходе от проектировочных расчётов к проверочным, многие параметры перемещаются из вектора входных данных \mathbf{X} в вектор выходных данных \mathbf{Y} и наоборот. Решение такой задачи требует либо изменения алгоритма \mathbf{A} (что нежелательно, поскольку различных расчетных задач может существовать множество), либо введения нового вида расчетной задачи, при которой значения некоторых параметров вектора \mathbf{Y} заранее заданы, а значения некоторых параметров вектора \mathbf{X} должны варьироваться. Назовем такой вид расчетной задачи *параметрическим синтезом* (синтезируются значения некоторых параметров вектора \mathbf{Y} за счет варьирования некоторых параметров вектора \mathbf{X}).

При этом для решения различных проектно-доводочных задач нужно использовать внешний Решатель (процессор), который с учетом условий проектно-доводочной задачи получает решение без модификации алгоритма расчета \mathbf{A} за счет вариации значений компонентов вектора \mathbf{X} , оказавшихся незадаанными, и анализа значений заданных компонентов вектора \mathbf{Y} путем минимизации вектора «невязок» по каждому из них. Условием останова процедуры является соблюдение требуемой точности по каждому из заданных компонентов вектора \mathbf{Y} .

Параметрическая оптимизация. Хотя параметрический анализ и расширяет в значительной степени круг задач функционального моделирования, поддающихся решению на основе предлагаемой методологии, но всё же охватывает не всю область задач, которые могут возникнуть в процессе моделирования. Классическим примером задачи, решаемой любым ОКБ при проектировании нового изделия, является поиск оптимального сочетания параметров (используя некоторый критерий оптимальности) в пределах области допустимых значений параметров. Такие задачи принято называть оптимизационными; в рамках предлагаемой методологии структурного моделирования назовём такую задачу задачей *параметрической оптимизации*.

Возвращаясь к структуризации модели объекта, можно выделить ещё один вид задачи – задачу *структурного синтеза*.

Структурный синтез. Под структурным синтезом будем понимать процесс создания составной алгоритмической модели объекта, т.е. определения набора элементов, из которых состоит составная модель и определения способов их соединения и взаимодействия.

На данном этапе развития средств автоматизации моделирования и проектирования задача структурного синтеза, как правило, решается вручную, т.е. проектировщик в интерактивном режиме составляет модель технического объекта, с которой в дальнейшем и производит расчёты. Хотя решений этой задачи может быть множество, эксперт-проектировщик выбирает лишь одно из них, полагаясь на свой опыт и знания предметной области. Учитывая необходимость автоматизации этого процесса, а также необходимость отыскания оптимальной структуры проектируемого изделия, а следовательно, и его модели, можно в предлагаемой методологии моделирования выделить также задачу *структурной оптимизации*.

Структурная оптимизация. Предположим, что удалось формализовать решение задачи структурного синтеза. Тогда, имея некоторый критерий оптимальности параметров изделия, можно поставить задачу отыскания оптимальной структуры моделируемого объекта среди возможных. Для решения подобных задач в комбинаторике существуют соответствующие методы, например, метод ветвей и границ [3], хотя их применение на практике и встречается с определёнными трудностями.

Составные расчётные задачи. Выше были рассмотрены несколько видов унифицированных расчётных задач. Очевидно, решение отдельного вида такой задачи в отрыве от других не представляет большой ценности. Поэтому введём понятие *составной расчётной задачи*. Составная расчётная задача состоит из вложенных друг в друга типовых расчётных задач, таким образом, что на каждом шаге решения внешней задачи каждый раз решается внутренняя. В общем виде составная расчётная задача (рис. 2) состоит из нескольких расчётных задач, типы которых, количество и порядок вложенности зависят от решаемой задачи моделирования.



Рис. 2. Составная расчётная задача в общем виде

Используя перечисленные выше базовые типы расчётных задач, комбинируя их в различном порядке, можно формализовать расчёт практически для любой задачи

моделирования. Таким образом, имеем в формализованном обобщённом виде решение абстрактной задачи моделирования технического объекта. Данная методология позволяет решать любые расчётные задачи, даже неизвестные заранее. Таким образом, в данной работе предлагается новый *шаблон проектирования*.

Термин «шаблоны проектирования» был введён в 1977 г. архитектором Кристофером Александером (Christopher Alexander) [6]. Позже понятие шаблонов проектирования было подхвачено и развито многими специалистами в области разработки программного обеспечения, такими как Грэди Буч (Grady Booch), Ричард Хелм (Richard Helm), Эрих Гамма (Erich Gamma), Кент Бек (Kent Beck), и др. [7, 8].

Каждый шаблон описывает проблему, которая возникает в данной среде снова и снова, а затем предлагает принцип её решения таким способом, который можно будет применять многократно, получая каждый раз результаты, не повторяющие друг друга. В авиадвигателестроении, например, это может позволить спроектировать двигатель следующего поколения, не меняя системы проектирования.

Результаты исследования

На основе разработанной методологии имитационного моделирования САМСТО в НИЛ САПР-Д УГАТУ были созданы СИМ для моделирования ГТД (DVIGw), его узлов (Компрессор, Камера, Турбина...) и элементов в их составе (Ступени, Венец...), успешно применяемые в ряде промышленных предприятий и высших учебных заведений. Для решения задач отладки включения форсажа при ПСИ (приемо-сдаточных испытаний) ТРДДФ АЛ-31Ф, диагностики состояния ГТД и ГТУ в эксплуатации разработаны специализированные версии. Все они успешно применяются в ряде авиамоторных ОКБ и заводов, в эксплуатирующих организациях.

Заключение

Сформированная в НИЛ САПР-Д УГАТУ методология моделирования направлена на организацию системной автоматизированной разработки и эксплуатации двигателей, энергоустановок и других изделий. Эта методология поддерживается разрабатываемыми средствами многоуровневого имитационного сетевого моделирования, МетаСАПР САМСТО, CAD/CAM/CAE/PDM – приложениями, средствами поддержки принятия проектно-доводочных решений (СППР). Ряд полученных результатов и опыт выполнения этих работ может быть уже сейчас успешно использован на предприятиях в условиях развертывания систем менеджмента качества (в соответствии со стандартами серии ISO 9000) и внедрения компонент CALS-технологии. В частности, компьютерная среда DVIGw обеспечивает выполнение термогазодинамических расчетов ГТД произвольных схем различного назначения. Она получила широкое распространение в учебном процессе в

авиационных вузах (УГАТУ, СГАУ, КГТУ) и успешно используется в промышленности (Энергомаш-корпорация, СНТК им. Н. Д. Кузнецова).

Список литературы

1. Егер С. М., Лисейцев Н. К., Самойлович О. С. Основы автоматизированного проектирования самолетов: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
2. Нариньяни А. С. Модель или алгоритм: новая парадигма информационной технологии // Информационные технологии. – М., 1997. – № 4.
3. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для ВУЗов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 360 с., ил.
4. Кожин Д. Г., Кривошеев И. А., Рахимов Б. Э. Информационные связи и алгоритмы выполнения универсальных проектных процедур в САПР // Автоматизация разработки авиационных двигателей. МежВУЗовский научный сборник № 1. – Уфа: Изд-во УАИ, 1989. – С. 37.
5. Саати Т. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
6. Alexander C., Ishikawa S., Silverstein M. A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction (Center for Environmental Structure Series). – Oxford University Press, 1977. – 1216 pages.
7. Booch, G., “Object Oriented Design with Applications”, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., New York, 1991.
8. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software, Reading, MA: Addison-Wesley, 1995. – 416 p.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0398 «Создание перспективной промышленной информационной технологии и подготовка кадров для системной автоматизированной разработки и эксплуатации сложных наукоемких изделий на основе интеграции МетаСАПР/Framework, имитационного моделирования, CAD/CAM/CAE/PLM, SCADA, ERP и СППР».

Рецензенты:

Ахмедзянов Дмитрий Альбертович, д.т.н., профессор, профессор кафедры авиационных двигателей, ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (Министерство образования и науки РФ), г. Уфа.

Кульга Константин Станиславович, д.т.н., профессор кафедры «Мехатронные станочные системы» ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (Министерство образования и науки РФ), г. Уфа.

Бошенятов Борис Владимирович, д.т.н., ведущий научный сотрудник, ФГБУ Институт прикладной механики РАН, г. Москва.