

## РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИСПЫТАНИЙ ГТД

В. Н. Рыбаков, В. С. Кузьмичев (Самара)

Метод имитационного моделирования может рассматриваться как своеобразный экспериментальный метод исследования. От обычных прямых экспериментальных методов он отличается тем, что испытанию подвергается не сам объект, а реализованная на ЭВМ его имитационная модель.

При разработке авиационного двигателя одним из приоритетных направлений является создание виртуальной модели ГТД, которая охватывает весь его жизненный цикл. Из-за невозможности получения полностью адекватных моделей авиационных ГТД большая часть всех возникающих проблем решаются при помощи испытаний, которые проводятся на различных этапах жизненного цикла. Виртуальная лаборатория испытаний ГТД предназначена для имитации испытаний двигателя по определению основных эксплуатационных характеристик двигателей (дроссельных, скоростных, высотных и климатических) и является составной частью его виртуальной модели.

Проведение физических экспериментов по испытаниям авиационных ГТД – трудоемкий и дорогостоящий процесс, что значительно снижает количество проводимых испытаний. В связи с этим целесообразно сочетать натурные испытания ГТД с имитацией их испытаний на ЭВМ. Это позволит сократить объем испытаний, затраты на эксплуатацию стенда, а в процессе обучения существенно расширить количество потенциальных лабораторных работ и, таким образом, повысить качество подготовки специалистов.

В состав виртуальной лаборатории входят следующие основные компоненты: подсистема математического моделирования ГТД АСТРА; подсистема планирования эксперимента; подсистема имитации погрешностей измерений; подсистема идентификации математической модели; подсистема документирования; подсистема визуализации процесса испытаний; информационная подсистема.

Основу виртуальной лаборатории испытаний ГТД составляет автоматизированная САЕ-система АСТРА, разработанная в СГАУ. С её помощью реализованы модели различных типов и схем ГТД. Подробно система АСТРА описана в работе [1].

*Подсистема планирования эксперимента* предназначена для проведения виртуального эксперимента по нескольким планам: полный факторный эксперимент, дробный факторный эксперимент, центральное композиционное планирование эксперимента (ортогональное и ротатабельное).

Например, при проведении эксперимента по получению высотно-скоростных характеристик применяют ротатабельный центрально-композиционный план 2-го порядка, включающий 15 опытов при различных сочетаниях факторов высоты  $H$ , скорости полета  $M$  и частоты вращения ротора  $n$ . Это позволяет уменьшить объем испытаний примерно в 3 раза [2].

*Подсистема имитации измерений* позволяет вносить в расчетные величины случайную погрешность измерения  $\delta$  и отклонение параметров испытываемого двигателя от проектных значений  $\Delta$ , имитирующее индивидуальные особенности каждого конкретного экземпляра двигателя, которые возникают при его изготовлении (например, погрешности изготовления лопаток, сборки ротора, камеры сгорания и т.п.).

Схема моделирования погрешности измерений и отклонений представлена на рис. 1.

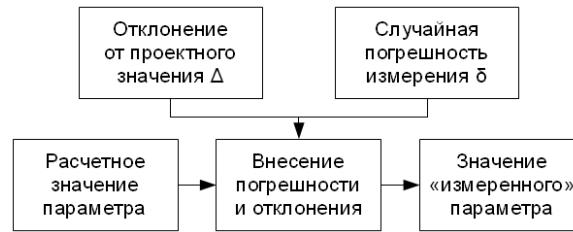


Рис. 1

Для получения значений параметров серии измерений реализуется цикл, на каждом этапе которого определяется новое значение случайной погрешности  $\delta$ .

*Подсистема идентификации математической модели.* В настоящее время в практике создания двигателя чаще всего используются математические модели первого уровня. Это система нелинейных уравнений, описывающая рабочий процесс и совместную работу узлов двигателя и связывающая параметры двигателя  $P$  с параметрами его узлов  $Q$  и входными воздействиями  $X$  (внешними условиями и режимом работы):

$$P = f(Q, X).$$

Идентификация такой математической модели заключается в уточнении оценок параметров узлов  $Q$  по значениям параметров двигателя  $P$ , определенным в результате испытаний. При испытаниях двигателя количество ( $M$ ) неизвестных параметров  $Q$  намного больше, чем измеренных параметров двигателя  $P$ .

Измеренное значение параметра  $P_i^{\text{изм}}$  отличается от значения параметра, полученного при расчете по математической модели  $P_i$  на величину  $\delta_i$  с учетом имитации конкретного экземпляра двигателя:

$$P_i - P_i^{\text{изм}} = \delta_{P_i}, \text{ где } P_i = P_i^{\text{расч}} + \Delta_i.$$

Если при испытании двигателя определяется  $N$  параметров, то можно составить систему нелинейных уравнений, состоящую из  $N$  уравнений:

$$\begin{cases} P_i - P_i^{\text{изм}} = \delta_{P_i} \\ P_{i+1} - P_{i+1}^{\text{изм}} = \delta_{P_{i+1}} \\ \dots \\ P_N - P_N^{\text{изм}} = \delta_{P_N} \end{cases} \quad (1)$$

Так как неизвестных величин  $Q$  больше, чем уравнений в системе, то эта система является незамкнутой.

Для решения системы уравнений  $L$  неизвестными параметрами узлов необходимо задаться:

$$L = M - N,$$

где  $M$  – общее количество неизвестных параметров узлов.

Для уменьшения количества неизвестных параметров  $L$  система уравнений дополняется аналогичными уравнениями, но для всей совокупности режимов работы двигателя или внешних условий, например  $H_{\Pi_i}$ ,  $V_{\Pi_i}$ . Часть параметров, например КПД компрессоров  $\eta_{ki}$ , определяются характеристикой узла и совместной работой узлов.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{i,j} - P_{i,j}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i,j}} \\ P_{i+1,j} - P_{i+1,j}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i+1,j}} \\ \vdots \\ P_{N,j} - P_{N,j}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{N,j}} \\ P_{i,j+1} - P_{i,j+1}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i,j+1}} \\ P_{i+1,j+1} - P_{i+1,j+1}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i+1,j+1}} \\ \vdots \\ P_{N,j+1} - P_{N,j+1}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{N,j+1}} \\ \vdots \\ P_{i,k} - P_{i,k}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i,k}} \\ P_{i+1,k} - P_{i+1,k}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{i+1,k}} \\ \vdots \\ P_{N,k} - P_{N,k}^{\text{ИЗМ}} = \delta_{P_{N,k}} \end{array} \right. , \quad (2)$$

где  $i = \overline{1, N}$  – количество измеряемых параметров на  $j$ -м режиме работы двигателя,  $j = \overline{1, k}$  – количество режимов работы двигателя.

Для определения наиболее значимых параметров, которыми следует задаться, рассчитываются значения коэффициентов влияния каждого параметра  $\delta P_j / \delta Q_i$ .

Из всех неизвестных параметров узлов двигателя  $Q$  выбираются параметры с наибольшим значением коэффициента влияния  $\delta P_j / \delta Q_i$  в количестве, равном количеству уравнений системы (2). Значения оставшихся неизвестных параметров задаются на основе статистических или экспериментальных данных, которые содержатся в базе данных. Таким образом, система уравнений (2) становится замкнутой – количество уравнений равняется числу неизвестных.

После решения системы уравнений (2) проводится проверка ограничений полученных значений параметров узлов  $Q$ . Если значение параметра выходит за допустимые пределы, то для данного параметра оно принимается равным его значению на границе предела, и этот параметр исключается из числа искомых. В число искомых параметров включается параметр, коэффициент влияния которого следующий по убыванию, и система уравнений снова становится замкнутой.

Далее находится её решение и проводится проверка ограничений на значения найденных параметров. Итерационный процесс решения системы нелинейных уравнений (2) проходит до тех пор, пока все найденные значения параметров узлов не будут лежать в заданном диапазоне.

В результате формируется математическая модель исследуемого экземпляра двигателя, согласованная с экспериментальными данными.

Схема алгоритма идентификации математической модели представлена на рис. 2.

*Подсистема документирования* предназначена для формирования протоколов испытаний и построения характеристик двигателя.



Рис. 2

Подсистема визуализации процесса испытаний обеспечивает мультимедийную (графическую и звуковую) имитацию испытаний - шум двигателя, имитацию движения рабочего тела по проточной части двигателя, графическое отображение измеряемых параметров и т.д.

Информационное обеспечение виртуальной лаборатории испытаний ГТД представляет собой совокупность баз данных: база данных (БД) математических моделей ГТД; БД исходных данных и результатов испытаний.

База данных математических моделей является составной частью подсистемы математического моделирования ГТД АСТРА, в которой хранится информация о математических моделях двигателей. Эти модели позволяют проводить проектный расчет двигателя и расчет его эксплуатационных характеристик.

База исходных данных предназначена для записи, хранения и редактирования информации о ГТД. Помимо информации о двигателе, в каждой записи хранятся исходные данные для расчета по математической модели двигателя.

База данных результатов испытаний обеспечивает запись, хранение и просмотр информации о проведенных ранее испытаниях: план эксперимента; отклонение параметров двигателя от проектного значения; протокол испытаний и др.

Информационная подсистема предназначена для хранения исходных данных и результатов экспериментов в виде базы данных. Это позволяет использовать исходные данные и результаты проведенного ранее эксперимента или же провести эксперимент заново по уже использованной ранее модели ГТД.

На рис. 3 представлена схема алгоритма работы виртуальной лаборатории ГТД.

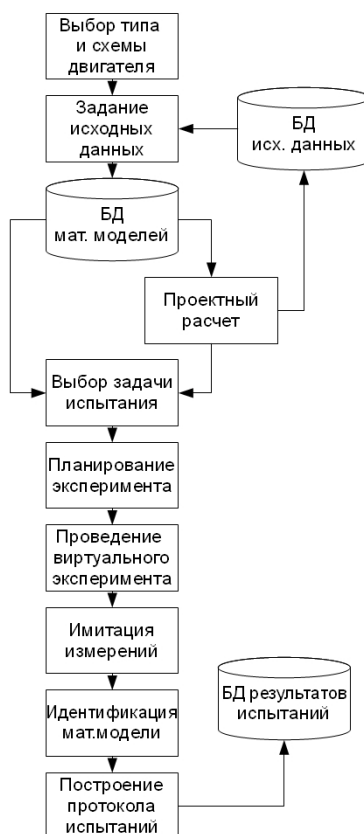


Рис. 3

После выбора типа и схемы двигателя из базы исходных данных исходные данные передаются в подсистему АСТРА, где совместно с математической моделью они составляют виртуальную модель двигателя. В зависимости от вида исходных данных (для проектного расчёта или расчёта выполненного двигателя) выбирается соответствующая математическая модель.

Если в базе исходных данных содержатся данные для расчёта выполненного двигателя, в подсистеме АСТРА выбирается задача испытаний, проводится расчёт характеристик (расчёт выполненного двигателя), виртуальный эксперимент и идентификация математической модели.

Если в базе исходных данных содержатся данные только для проектного расчёта, то проводится проектный расчёт, результатом которого являются данные для расчёта выполненного двигателя. Эти данные записываются в базу исходных данных и будут использованы при дальнейшем проведении виртуального испытания этого двигателя.

После проведения виртуального эксперимента формируется протокол испытаний, который записывается в БД результатов испытаний. На основе её данных строятся различные графические зависимости.

### Литература

1. Крупенич И. Н., Кузьмичев В. С., Кулагин В. В., Ткаченко А. Ю. Автоматизированная система термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей // Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та. Ч. 2. 2006. №2(10). С. 66–73.
2. Испытания авиационных двигателей: Учебник для вузов / Под общ. ред. В.А. Григорьева и А.С. Гишварова. М.: Машиностроение, 2009. 504 с.: ил.