

В. С. Кузьмичев, В. Н. Рыбаков

## ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИСПЫТАНИЙ ГТД

В статье описана концепция построения виртуальной лаборатории испытаний ГТД, которая является одной из составляющих виртуальной модели двигателя и позволяет проводить испытания по определению его эксплуатационных характеристик. Описано информационное обеспечение виртуальной лаборатории испытаний ГТД и принцип его функционирования. *Лаборатория виртуальная; структура; алгоритм; имитация испытаний; модель математическая*

При разработке авиационного двигателя одним из приоритетных направлений является создание виртуальной модели ГТД, которая охватывает весь его жизненный цикл. При разработке современных авиационных ГТД из-за невозможности получения полностью адекватных их моделей, большая часть всех возникающих проблем решается 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 (дрессельных, 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 (рис. 1): 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 ее помощью реализованы модели 16 типов и схем ГТД. Подробно система описана в работе [3].

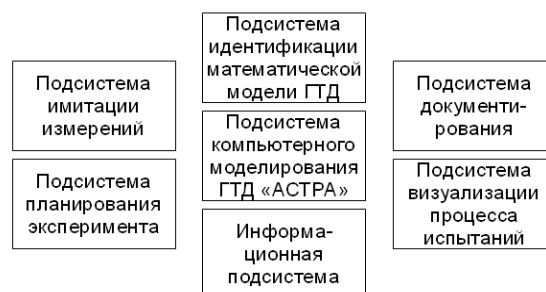


Рис. 1. Структура виртуальной лаборатории

### ПОДСИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

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.

### ПОДСИСТЕМА ИМИТАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ

Подсистема имитации измерений позволяет вносить в расчетные величины случайную погрешность измерения  $\delta$  и отклонение параметров испытываемого двигателя от проектных значений  $\Delta$ , имитирующее индивидуальные осо-

бенности 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. 2.

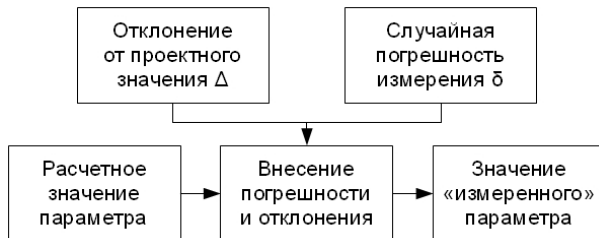


Рис. 2. Схема имитации погрешностей измерений и отклонений

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

#### ПОДСИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГТД

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:

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

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

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

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  $H_{\text{П}i}$ ,  $V_{\text{П}i}$ , (см. систему уравнений (2)). Часть параметров, например КПД компрессоров  $\eta_{\text{к}i}$ , определяются характеристикой узла и совместной работой узлов.

$$\begin{aligned} P_{i,j} - P_{i,j}^{\text{изм}} &= \delta_{P_{i,j}}, \\ P_{i+1,j} - P_{i+1,j}^{\text{изм}} &= \delta_{P_{i+1,j}}, \\ &\dots \\ P_{N,j} - P_{N,j}^{\text{изм}} &= \delta_{P_{N,j}}, \\ P_{i,j+1} - P_{i,j+1}^{\text{изм}} &= \delta_{P_{i,j+1}}, \\ P_{i+1,j+1} - P_{i+1,j+1}^{\text{изм}} &= \delta_{P_{i+1,j+1}}, \\ &\dots \\ P_{N,j+1} - P_{N,j+1}^{\text{изм}} &= \delta_{P_{N,j+1}}, \\ &\dots \\ P_{i,k} - P_{i,k}^{\text{изм}} &= \delta_{P_{i,k}}, \\ P_{i+1,k} - P_{i+1,k}^{\text{изм}} &= \delta_{P_{i+1,k}}, \\ &\dots \\ P_{N,k} - P_{N,k}^{\text{изм}} &= \delta_{P_{N,k}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $i = 1 \div N$  – количество измеряемых параметров на  $j$ -м режиме работы двигателя,  $j = 1 \div k$  – 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 ее 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.

### ПОДСИСТЕМА ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ

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

### ПОДСИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИСПЫТАНИЙ

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.

### ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДСИСТЕМА

Информационное обеспечение виртуальной лаборатории испытаний ГТД представляет собой совокупность баз данных: база данных (БД) математических моделей ГТД; БД исходных данных, и БД результатов испытаний (рис. 3).

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.



Рис. 3. Структура информационной подсистемы виртуальной лаборатории испытаний ГТД

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.

В частности по каждому двигателю содержится следующая информация:

- страна-разработчик;
- фирма-разработчик;
- название модели двигателя;
- тип двигателя;
- схема двигателя;
- год сертификации;
- основные данные двигателя;
- основные узлы двигателя;
- основные данные узлов двигателя;
- источник информации;
- примечание (дополнительная информация).

База исходных данных позволяет:

- просматривать, редактировать, добавлять записи (в зависимости от прав пользователя);
- производить выборку ГТД по значению (диапазону значений) любого поля;
- производить сортировку выбранных двигателей по любому полю;
- группировать двигатели по значению любого поля;
- передавать данные выбранного двигателя в Excel;
- строить графические зависимости параметров ГТД в координатной плоскости двух выбранных параметров.

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. 4 представлена схема алгоритма работы виртуальной лаборатории ГТД.

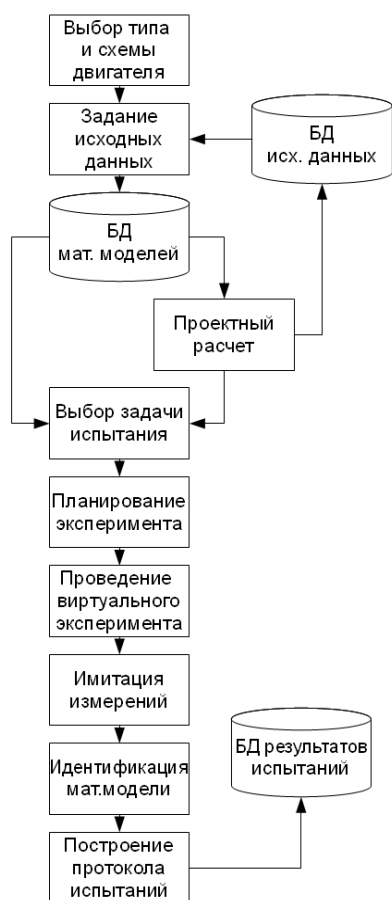


Рис. 4. Схема алгоритма работы виртуальной лаборатории испытаний ГТД

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 расчета

или расчета выполненного двигателя) выбирается соответствующая математическая модель.

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

Если в базе исходных данных содержатся данные только для проектного расчета, то проводится проектный расчет, результатом которого являются данные для расчета 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 ее данных строятся различные графические зависимости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулагин В. В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учеб. В 2 кн. М.: Машиностроение, 2003. 615 с.
2. Испытания авиационных двигателей: Учеб. для вузов / под общ. ред. В. А. Григорьева, А. С. Гишварова. М.: Машиностроение, 2009. 504 с.
3. Автоматизированная система термогазодинамического расчета и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей / И. Н. Крупенич [и др.] // Вестник Самарск гос. аэрокосм. ун-та. 2006. № 2(10). Ч. 2. С. 66–73.

#### ОБ АВТОРАХ

**Кузьмичев Венедикт Степанович**, проф. каф. теории двигателей летательн. аппаратов Самарск гос. аэрокосм. ун-та, проректор по информатизации. Дипл. инженер по авиац. двигателям и энергетическ. установкам (КуАИ, 1972). Д-р техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам летательн. (СГАУ, 2000). Иссл. в обл. оценки науч.-техн. уровня ГТД, САПР ГТД.

**Рыбаков Виктор Николаевич**, асп. той же каф. Дипл. инженер по авиац. двигателям и энергетическ. установкам (СГАУ, 2009). Иссл. в обл. математического моделирования ГТД.