

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ИМИТАЦИОННОЙ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ГТД В СИСТЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ DVIGw**

**Кривошеев И.А., Горюнов И.М., Рожков К.Е., Кривцов Д.А.**

*ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»*

Рассматриваются способы представления и обращения к универсальной характеристике компрессора в системе имитационного моделирования DVIGw. Показана необходимость и возможность представлять характеристики в максимально широком диапазоне изменения параметров. Приведен пример алгоритма уточнения характеристик компрессоров испытываемого двигателя на основе типовых характеристик и параметров их образмеривания. Выбран наиболее целесообразный способ обращения и представления характеристики для сохранения возможности применения ее при масштабировании в процессе идентификации модели ГТД. Усовершенствован процесс идентификации имитационной модели двигателя, в том числе решение задачи при недостатке экспериментальной информации. Представлен способ ускорения процесса идентификации посредством создания тиражированных по режимам имитационных сетевых моделей и проведена идентификация математической имитационной сетевой модели на примере ТРДД для учебно-тренировочного самолета.

Ключевые слова: авиационные двигатели, имитационное моделирование, универсальная характеристика компрессора, идентификация.

## **DEVELOPMENT OF METHOD FOR IDENTIFICATION OF MATHEMATICAL SIMULATION NETWORK GTE MODEL IN THE SIMULATION SYSTEM DVIGw**

**Krivosheev I.A., Goryunov I.M., Rozhkov K.E., Krivtsov D.A.**

*FGBOU VPO "Ufa State Aviation Technical University"*

The methods of representation and appeal to an universal compressor characteristic in the simulation system DVIGw are considered. The necessity and the opportunity to represent the characteristics of the widest possible range of parameters. An example of an algorithm refinement compressor performance test engine based on the model characteristics and parameters of their dimensioning. There was chosen the most appropriate way of features handling and representing to preserve the possibility of using it when scaling during the identification of the turbine engine model. Improved identification process simulation model of the engine, including the solution of the problem with a lack of experimental data. There is presented the method for accelerating the process of identification through the creation of simulation network models replicated by the modes and there is realized the identification of a mathematical simulation network model with an example two spooled turbojet for training aircraft.

Key words: aircraft engines, simulation modeling, an universal characteristic of the compressor, identification.

### **Введение**

Выполненный авторами анализ [1,2,3,4] показал, что в современных условиях на протяжении всего жизненного цикла изделия, от начала проектирования ГТД до его сдачи в серийное производство и далее в эксплуатации его должна сопровождать непрерывно развивающаяся вместе с ним математическая модель. Для поддержания целостности единого информационного пространства (ЕИП) в процессе доводки и эксплуатации ГТД необходимо согласовывать модели разного уровня между собой, взаимно идентифицировать модели, в том числе по результатам испытаний и контроля. В работе [3] авторами была предложена методика идентификации математической модели газотурбинного двигателя в системе

имитационного моделирования DVIGw. Использование данной методики на практике показало, что она обладает следующими недостатками:

1) Для использования данных нескольких режимов итерационно попеременно решаются задачи подбора значений рода «нережимных» параметров, в том числе параметров образмеривания априорно введенных характеристик компрессоров, камер сгорания, турбин, сопел и других элементов газотурбинного двигателя.

2) В базовой универсальной характеристике компрессора нижняя часть границы помпажа по степени повышения давления (которая начинается в единице) при масштабировании смещается, так как системой DVIG производятся операции умножения или деления коэффициента масштабирования на это число. В то же время известно, что для любого компрессора при расходе газа, равном нулю, граница помпажа должна проходить через точку, где степень повышения давления равняется единице.

**Целью** является рассмотрение особенностей получения и использования характеристик компрессора при имитационном моделировании.

#### **Материалы и методы исследования**

В развитие данной методики авторы предлагают указанные выше недостатки решать следующими способами:

1) Предлагается использовать многорежимную тиражированную математическую модель авиационного газотурбинного двигателя в системе имитационного моделирования DVIGw (по числу используемых при идентификации эксплуатационных режимов).

2) Для ликвидации второго недостатка предлагается переводить характеристики компрессора в другие координаты (на первом этапе вместо степени повышения давления использовать изоэнтروпический напор ( $H_S$ ), а в дальнейшем перейти к представлению теоретического ( $H_{T,}$ ) и изоэнтропического ( $H_S$ ) напоров как функций приведенной скорости на входе  $\lambda_{1a}$  и приведенной частоты вращения  $n_{np}$ ) [5]. При этом показано, что дополнительно такое представление позволяет экстраполировать напорные ветки, находить линию номинальных режимов компрессора, прогнозировать протекание границы помпажа.

Использование предложенного представления характеристики компрессора апробировано при создании имитационной модели ТРДД для учебно-тренировочного самолета (на базе АЛ-55И). В результате авторами предложена методика, позволяющая усовершенствовать процесс идентификации имитационной модели двигателя, в том числе решать задачи при недостатке экспериментальной информации – путем последовательного изменения в процессе идентификации структуры модели и привлечения дополнительной информации с учетом степени ее достоверности включает ряд этапов:

- 1) Приведение структуры модели в соответствие со структурой экспериментальной информации и поэтапное изменение модели в процессе идентификации;
- 2) Анализ корректности задач, решаемых на каждом этапе идентификации с помощью сети, изображающей взаимосвязь параметров;
- 3) Формирование соответствующих промежуточных моделей;
- 4) Задание условий проведения идентификации (составление законов расчетов);
- 5) Задание экспериментальных значений параметров в модели (в виде функций и таблиц);
- 6) Получение (итерационным методом, на основе принципа наибольшего правдоподобия) функций поправок для параметров “образмеривания” характеристик узлов;
- 7) Введение функций поправок в модель, уточнение имеющихся характеристик узлов;
- 8) Получение недостающих характеристик узлов с помощью предлагаемой методики;
- 9) Последовательное включение получаемых зависимостей в исследуемую модель при идентификации[2].

При эксплуатации газотурбинных двигателей необходимо иметь возможность оперативно оценивать параметры работы, техническое состояние двигателя, а также основные отдельные узлы ГТД. Это требуется для выявления и устранения неисправностей отдельных узлов системы, а также для уменьшения времени на поиски и устранения неисправностей и оптимизации нормальных режимов работы двигателя. Авторами последовательно развивается метод параметрической диагностики на основе идентификации имитационной модели двигателя в системе имитационного моделирования *DVIGw*. Авторами для апробации данного метода использована модель ТРДД для УТС на основе двигателя АЛ-55И (рисунок 1). При этом предложена технология оценки технического состояния основных узлов ТРДД в эксплуатации, а также технология доводки и усовершенствования двигателя при разработке. При этом рассмотрены в качестве отдельных объектов исследования (с точки зрения контроля и возникающих дефектов):

- осевой компрессор в целом (компрессор низкого и высокого давления совместно);
- осевая турбина в целом (турбина высокого и низкого давления совместно);
- камера сгорания;
- реактивное сопло.

Разработанная математическая имитационная модель, включающая взаимосвязанные модели узлов и систем ТРДД (рис. 2), реализована в разработанной в НИЛ САПР-Д УГАТУ СИМ *DVIGw*[1]. Данная система имитационного моделирования позволяет моделировать, исследовать и прогнозировать различные режимы работы ГТД произвольных схем совместно с элементами их систем управления, при этом решать различные расчетные и проектно-доводочные задачи.



Рис. 1. Авиационный двигатель АЛ-55И

Для решения исследовательских или проектно-доводочных задач в системах типа *DVIGw* задаются условия моделирования [2] («закон расчета»). Для решения задачи идентификации и для диагностики отдельных узлов двигателя предложено создавать имитационные модели для соответствующих режимов (например, режим малого газа, номинальный, крейсерский, максимальный режим), которые позволяют получить значения всех остальных параметров на этих режимах. При этом Решатель (процессор) СИМ *DVIGw* обрабатывает такую тиражированную модель, как единую (*n*-режимную) имитационную модель двигателя. Дополнительно сохраняется возможность получить с их помощью зависимости от варьируемых параметров узлов, а затем протабулировать полученные значения для любых выходных параметров составленной модели. В частности, таким образом можно сразу получить отрезки ЛРР или ДрХ по всем трем моделям, например, если на этих режимах ВНА находится в различном положении и, соответственно, используются различные характеристики компрессоров.

Для проведения идентификации на каждом *i*-м режиме (по каждой *i*-й экспериментальной точке) в закон расчета модели добавлены циклы для подбора значений параметров «образмеривания» характеристик компрессора высокого давления, низкого давления, камеры сгорания и свободной турбины, а именно:

- приведенный расход воздуха в точке «образмеривания» характеристики,
- адиабатический коэффициент полезного действия компрессора высокого давления в точке «образмеривания» характеристики,
- степень повышения давления в точке «образмеривания» характеристики,
- приведенная частота вращения компрессора высокого давления в точке «образмеривания» характеристики,
- коэффициент полноты сгорания топлива,
- коэффициент расхода.

При этом такие параметры указаны в законе расчета для каждого режима (т.е. для каждой составляющей составной имитационной модели).

Разработанная технология и система моделирования *DVIG<sub>w</sub>* позволяют решать задачи идентификации моделей на разных режимах (при разных параметрах, задающих режим, например, частоте вращения ротора ( $n$ ), задаваемого в одном из компрессоров имеющейся модели или приведенном расходе воздуха через двигатель, задаваемом во входном устройстве ( $G_{впр}$ )) и в составе разных моделей. Эти данные могут быть получены экспериментальным путём и далее заносятся в базу данных при параллельном проектировании ГТД.

На примере ТРДД для УТС воспроизведены несколько режимов работы двигателя. В данном примере режимные параметры двигателя заданы на режиме малого газа, крейсерском и максимальном режиме. Для демонстрации работоспособности, тиражированной по режимам имитационной модели двигателя, ниже показано, как решаются задачи параметрического синтеза и анализа, объединяющие сразу все три математические имитационные модели. Для этого выбираются поддерживаемые и варьируемые параметры для каждой модели в отдельности, и это позволяет провести расчет дроссельной характеристики двигателя сразу на трех режимах (рис. 2). В частности, такая модель сразу позволяет получать три участка ЛРР на характеристиках КВД и КНД двигателя и соответственно три отрезка ДрХ, соответственно вблизи малого газа, крейсерского и максимального режимов. При идентификации таким образом появляется возможность решения задачи подбора значений «нережимных» параметров (геометрии, параметров «образмеривания» характеристик узлов) путем составления тройной модели двигателя, которая позволяет одновременно использовать данные сразу нескольких режимов и вести их расчет.

Это в три раза сокращает количество необходимых итераций, а также время, необходимое для идентификации математической модели газотурбинного двигателя в СИМ *DVIG<sub>w</sub>* в сравнении с методикой, предложенной в [1].

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Идентификация модели – уточнение фактических характеристик узлов и ГТД в целом, требующаяся для последующей доводки двигателя. Такое уточнение обычно реализуется с использованием результатов испытаний двигателя или контроля его параметров в эксплуатации. Такая индивидуальная модель (после идентификации по итогам приемо-сдаточных испытаний) в дальнейшем может использоваться для отладки и контроля технического состояния ГТД в эксплуатации.

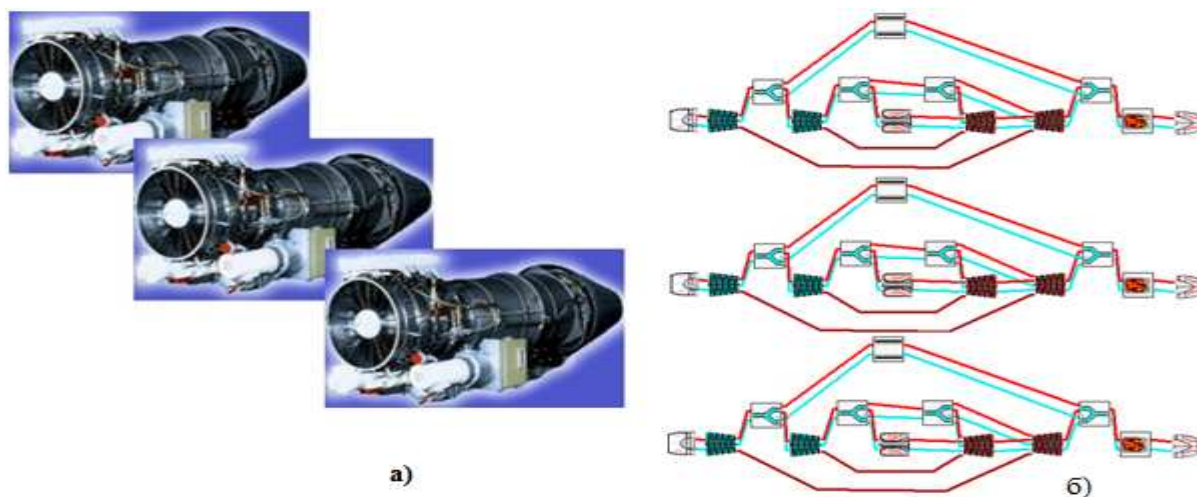


Рис. 2. Физическая (а) и имитационная модель (б), моделирующая ТРДД для УТСв системе DVIGw одновременно на трех различных режимах

В общем случае идентификация должна производиться по результатам испытаний конкретного авиационного двигателя [1] и сопоставления их с результатами моделирования. Однако в данном случае из-за недостатка данных испытаний рассматриваемого ТРДД (в связи со спецификой выбранного изделия), вместо результатов испытаний использованы результаты моделирования в системе СИМ DVIGw (т.е. использован компьютерный испытательный стенд).

Идентификация математической модели данного ГТД включает ряд этапов, описанных выше. Закон расчета построенной модели включает в себя варьируемые и поддерживаемые параметры двигателя на первом, втором и третьем режимах, а также параметры, которые позволяют связать модели разных режимов между собой. Анализ сети параметров, связывающих структурные элементы (СЭ) в рамках имитационной модели (ИМ) данного ГТД, представлен на рис.3. При этом на рис.3б тенью помечены параметры, которые могут быть заданы (с различной степенью достоверности), поскольку они либо измеряются датчиками, либо могут быть получены из параметров топлива, из чертежа двигателя, непосредственного измерения диаметра сопла и т.д. В результате идентификации получены значения «параметров образмеривания» характеристик узлов двигателя, что позволило их переобразмерить (отмасштабировать) и после этого сопоставить результаты моделирования в проидентифицированной модели в *DVIGw* и в исходной программе ПК *Gasturb* (имитирующей результаты испытаний), которые мы рассматриваем как эксперимент.

Анализ относительных взаимных отклонений модели и эксперимента позволяет оценить степень адекватности модели (в данном случае вдоль линии рабочих режимов (ЛРР)). Она может быть оценена по максимальному значению относительной погрешности (в данном примере наибольшая погрешность по параметру  $P_{0в}$  при  $n_{НД} = 100\%$  и составила 3,187% для



повышения давления используется изоэнтропический напор компрессора, что позволяет с меньшими искажениями масштабировать характеристику компрессора и использовать в моделях компрессоров самых разных размерностей.

Предложен новый вариант формализации и автоматизации процесса идентификации модели ГТД в системе *DVIGw* посредством создания тиражированных по режимам имитационных сетевых моделей. Это позволяет проводить идентификацию по методике [1] сразу на нужном количестве режимов (в данном случае на трех), в то время как ранее эта процедура выполнялась поэтапно и итерационно, на каждом из режимов по отдельности.

Апробация разработанных методов и средств идентификации модели конкретного двигателя проведена с помощью разработанной измененной версии *DVIGw* с использованием модели ТРДД для учебно-тренировочного самолета. Показано, что при недостатке экспериментальных данных для отладки методики идентификации можно использовать результаты численного эксперимента – моделирования испытаний рассматриваемого ТРДД в другом программном комплексе (*Gasturb 9*).

### Список литературы

1. Ахмедзянов Д.А. Моделирование переходных режимов работы авиационных ГТД в системе *DVIGw* / Методические указания к лабораторным работам по курсу «Моделирование АД и ЭУ» /. – Уфа: УГАТУ, 2004. – 44 с.
2. Иванова О.Н. Метод формирования и использования моделей ГТД на различных этапах проектирования, доводки и эксплуатации: Дис. ... канд.техн. наук. – Уфа, 2005. – 164 с.
- 3.Кривошеев И.А., Иванова О.Н., Горюнов И.М.Использование средств имитационного сетевого моделирования ГТД на этапе идентификации моделей по результатам испытаний // Вестник УГАТУ. – Т. 6, № 1 (12). – 2005.
4. Норенков И.П. Автоматизированное проектирование. – М., 2000. – 188с.
5. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин / К. В. Холщевников, О. Н. Емин, В. Т. Митрохин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.

### Рецензенты:

Бакиров Федор Гайфуллович, д.т.н., профессор кафедры Авиаракетной теплотехники и теплоэнергетики ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г.Уфа.

Ахмедзянов Дмитрий Альбертович, д.т.н., профессор кафедры авиационных двигателей



ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», г.Уфа.