

НЕЛИНЕЙНАЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРДД ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Лещенко И.А.¹, Добродеев А.В.¹, Буров М.Н.¹

¹ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск, igor.leschenko@uec-saturn.ru

Ключевые слова: моделирование характеристик ГТД, реальный масштаб времени

Применение полунатурных стендов при отработке и сертификации систем воздушного судна является одним из эффективных способов снижения технических рисков и сокращения сроков разработки авиационной техники. В рамках работ по созданию регионального самолета SJ-100-New для отработки и испытаний комплекса бортового оборудования предусмотрено создание полунатурного стенда «Электронная птица» (ЭП), в котором компоненты бортового оборудования и электронной цифровой системы управления двигателями ПД-8 представлены в натурном виде. При этом сами двигатели как объекты управления относятся к тем системам самолета, которые весьма проблематично включить в состав стенда в натурном виде. Единственный способ замкнуть электронный блок управления двигателем на объект управления – представить двигатель математической моделью (ММ), описывающей его динамическое поведение.

Главным требованием к ММ двигателя является способность работать в реальном масштабе времени при частоте обращений не менее 100 Гц. Модель должна описывать все возможные в эксплуатации фазовые состояния двигателя, такие как работа на установившихся и переходных режимах прямой и обратной тяги, состояние покоя на земле, запуск, выбег, авторотация в полете и т.д. Необходимо также обеспечить сходимость параметров двигателя, полученных в результате такого моделирования, с результатами проработки термодинамических параметров в ОКБ. Исходя из последнего требования, было принято решение о реализации ММ для стенда «ЭП» на платформе ПК ThermoGTE [1], той же, которая используется в ОКБ при решении задач термодинамического сопровождения разработки двигателя. Это соответствует сложившемуся направлению развития математического моделирования на предприятии, нацеленному на использование единой термодинамической ММ каждого изделия как в самом ОКБ, так и у всех заказчиков и смежных исполнителей [2].

ММ представляет собой поэлементную нелинейную термодинамическую модель ГТД. При расчете переходного процесса выполняется численное интегрирование дифференциальных уравнений динамики роторов и тепловой нестационарности, при этом на каждом шаге интегрирования численно решается система нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ), формализующая совместную работу элементов в составе двигателя. Независимые переменные СНАУ представляют собой описание координат рабочих точек на характеристиках элементов (компрессоров и турбин), представленных в табличном виде, а правые части уравнений определяются алгоритмически исходя из физических условий совместной работы элементов в составе ТРДД (балансов расходов и давлений в характерных сечениях).

Очевидные преимущества поэлементной нелинейной ММ перед линеаризованными либо имитационными вариантами представления двигателя состоят в весьма аккуратном воспроизведении физических процессов при достаточном для задач реального времени быстродействии. Кроме того, поэлементная нелинейная ММ требует меньше трудозатрат при сопровождении ее эксплуатации, т.к. построение линеаризованной ММ предполагает, помимо прочих действий, формирование большого массива данных и разработку адекватной техники многомерной интерполяции. В данной работе делается

акцент на обеспечении всережимности ММ для стенда «ЭП», связанной с возможностью применения единого методического подхода для режимов прямой и обратной тяги, а также запуска, авторотации и выбега.

На режиме авторотации равновесное состояние двигателя обеспечивается при таких режимах работы вентилятора и компрессора высокого давления (КВД), когда давление в них не повышается, а наоборот, понижается. Традиционная форма представления характеристики компрессора с использованием в качестве одного из параметров его КПД не позволяет работать в области степени повышения давления π_K^* , меньших либо равных 1. При $\pi_K^* = 1$ КПД по его определению равен 0, поэтому вычисление работы и мощности компрессора невозможно. Аналогично, для турбин при степени понижения давления, близкой к 1,0, использование традиционного адиабатного КПД затруднительно.

В ММ используется подход, предложенный в работах [3, 4], где КПД компрессоров и турбин заменяются приведенным крутящим моментом, который определяется выражениями:

$$M_{кр пр Компр} = c_p \cdot (\pi_K^{* \frac{k-1}{k}} - 1) \cdot \frac{G_{B пр}}{n_{пр}} \cdot 2751,63 \quad (1)$$

$$M_{кр пр Турб} = c_p \cdot (1,0 - \frac{1}{\pi_T^{* \frac{k-1}{k}}}) \cdot \frac{G_Z}{\frac{n}{\sqrt{T_{Г}^*}}} \cdot 9,8666 \quad (2)$$

Приведенный крутящий момент является критериальным параметром, т.к. однозначно определяется через традиционные критериальные параметры. Характеристики компрессоров и турбин в области пусковых и авторотационных режимов можно определять как расчетным путем, так и с помощью экстраполяции результатов пересчета традиционных характеристик. На рис. 1 в качестве примера показан фрагмент характеристики абстрактного компрессора, адаптированной для применения в составе элементарных термодинамических моделей в областях π_K^* как больших, так и меньших 1,0.

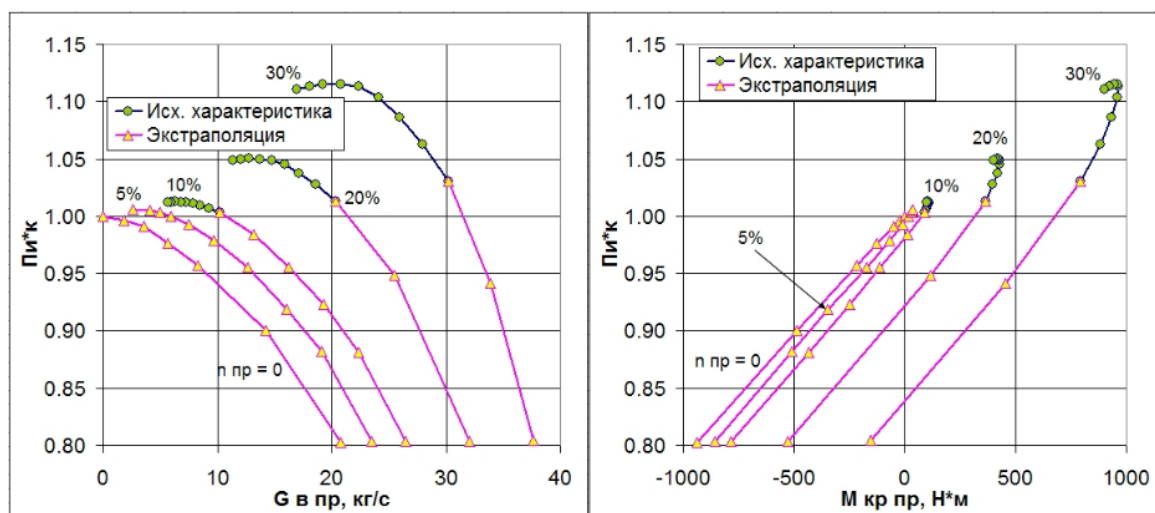


Рис. 1 – пример экстраполированной характеристики компрессора для пусковых режимов

Включение режима реверса тяги на ТРДД со смесителем предполагает перекрытие специальной заслонкой наружного контура (НК) и выпуск воздуха из него в атмосферу через решетчатое сопло, расположенное на боковой поверхности мотогондолы. Такое воздействие на течение потока в двигателе приводит к существенному изменению условий работы ТНД и смесителя – давление за вентилятором и перед соплом может значительно уменьшаться. Для расчета реверса тяги используются характеристики

элементов реверсивного устройства, полученные расчетным путем с использованием 3D CFD методов, такие как зависимость параметра расхода заслонки в НК от перепада полных давлений на нем, зависимости коэффициента расхода решетки реверса и угла потока на выходе из нее от перепада давления и скорости полета. На рис. 2 представлены примеры траекторий рабочей точки на характеристике вентилятора, полученные ММ при расчете динамики включения и выключения реверса.

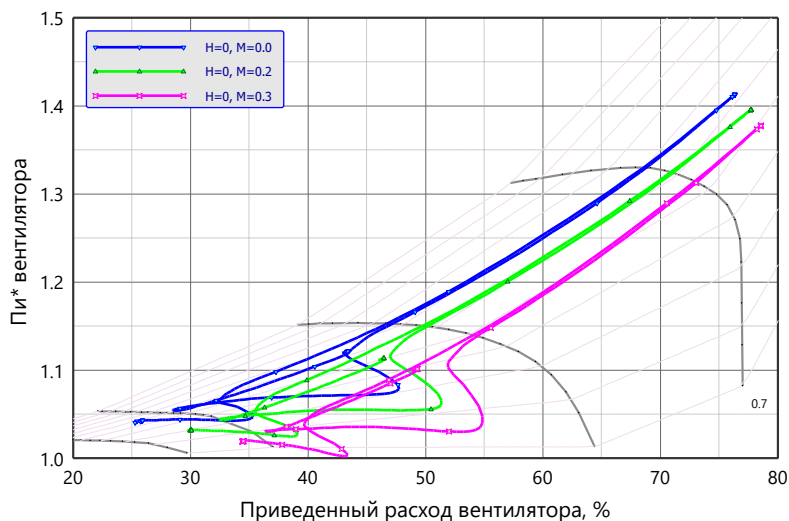


Рис. 2 – пример расчета динамики включения и выключения режима реверса тяги

Таким образом, использование поэлементной нелинейной ММ в составе имитатора МСУ на стенде «ЭП» позволило решить в полной мере задачу определения термодинамических параметров двигателя, необходимых для замыкания РЭД-8 на объект управления. Использование единой программно-методической базы для решения задач термодинамического сопровождения разработки проекта ПД-8 в ОКБ и на имитаторе МСУ стенда «ЭП» имеет значимое преимущество, связанное со снижением временных затрат на поддержание актуального состояния ММ двигателя и ее верификацию по ВСХ, выпускаемым на предприятии.

Список литературы

1. Web-ресурс www.thermogte.ru, дата обращения 12.05.2026 г.
2. Лещенко И.А., Буров М.Н. Всережимная математическая модель для расчета параметров и характеристик ТРДД коммерческого самолета. Сборник статей научно-технической конференции «Климовские чтения – 2024. Перспективные направления развития авиадвигателестроения». Скифия-принт. – СПб, 2024, – С. 110-120.
3. Pavlos K Zachos. Gas Turbine Sub-Idle Performance Modelling; Altitude Relight and Windmilling. Ph. D. Thesis. – UK, Cranfield University School of Engineering, 2010.
4. Лещенко И.А., Вовк М.Ю., Буров М.Н. Метод расчета пусковых и авторотационных режимов в поэлементных нелинейных квазиодномерных математических моделях газотурбинных двигателей. ISSN 1684-1301, Журнал «Полет». – 2022. – № 7. – С. 36-44.

Сведения об авторах

Лещенко Игорь Алексеевич – д.т.н., с.н.с.; начальник бригады; математическое моделирование газотурбинных двигателей;

Добродеев Андрей Валерьевич – к.т.н.; эксперт; разработка электронных САУ ГТД;

Буров Максим Николаевич – к.т.н.; главный конструктор по перспективным разработкам; формирование технического облика газотурбинных двигателей;

**NON-LINEAR THERMODYNAMIC MODEL OF PASSENGER
AIRCRAFT TURBOFAN ENGINE FOR SIMULATION OF POWER PLANT
DYNAMIC BEHAVIOR IN REAL TIME**

Leshchenko I.A.¹, Dobrodeev A.V.¹, Burov M.N.¹

¹PSC «UEC-Saturn», Rybinsk, igor.leschenko@uec-saturn.ru

Model is presented for engine dynamics simulation within semi-natural test bench “Electronic Bird”. The model provides real-time simulation of engine transient behavior with 100 Hz frequency for all possible states, including direct and reverse thrust, subidle and wind-mill, starting and run-out.