

УДК 621.452.001.57

А.Н. ХУСТОЧКА, И.А. КАЛЮЖНЫЙ

ГП «Ивченко-Прогресс» им. А.Г. Ивченко, Запорожье, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТУРБОВАЛЬНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ АИ-450М

Изложен способ моделирования процессов в газотурбинном двигателе. Описан принцип построения и структура поэлементной стационарной математической модели турбовального двигателя. Для каждого из элементов модели указан способ задания его характеристики и метод, с помощью которого он экспериментально определялся. С помощью описанной математической модели был решён широкий круг инженерных задач, в их числе: расчёт дроссельных и высотно-климатической характеристик двигателя во всём эксплуатационном диапазоне температур и давлений окружающей среды, моделирование влияния на параметры двигателя перепуска воздуха за компрессором, отборы мощности от вала газогенератора, изменение проходных сечений сопловых аппаратов турбины компрессора и свободной турбины.

Ключевые слова: математическая модель, характеристики узлов ТВГТД, идентификация математической модели.

Введение

При создании новых газотурбинных двигателей, доводке экспериментальных и модифицированных серийных двигателей, в ГП «Ивченко-Прогресс» широко используются математические модели (ММ) ГТД. Большой опыт был накоплен при разработке ММ двигателей Д-18Т, Д-436-148, Д-27 АИ-222-25, и др. Применение ММ позволяет сократить время и затраты при проектировании и доводке двигателей, а в случае модификации серийных двигателей – обосновать возможность его модернизации [1]. В ГП «Ивченко-Прогресс» ММ также используются для создания семейств различных типов ГТД на базе газогенератора [2].

Существуют различные методы и уровни моделирования процессов ГТД. В соответствии с [3] условно выделяют следующие уровни:

- нулевой уровень – описание характеристик объекта как «черного ящика» с помощью формальных взаимосвязей;
- первый уровень – объект описан с помощью соотношений и уравнений, отражающих физические взаимосвязи между внутренними подсистемами, которые представлены нулевым уровнем;
- второй уровень – детальное моделирование взаимосвязей между подсистемами, представленными ММ первого уровня.

ММ каждого из уровней имеет свои достоинства и недостатки. Поэтому выбор типа ММ зависит от перечня задач, которые предстоит решить с ее помощью. Главное – что бы ММ была максимально адек-

ватна реальному объекту. Повышение адекватности ММ может быть обеспечена тремя способами [4]:

- повышение сложности модели для более полного и точного учета различных физических явлений, определяющих рабочий процесс объекта;
- идентификация моделей по результатам измерения параметров;
- идентификация рабочей модели по результатам расчета, выполненного по более точной и сложной модели (например, с подсистемами второго уровня).

Результаты исследований

Рассматриваемый турбовальный газотурбинный двигатель АИ-450М (рис. 1) разработан в ГП «Ивченко-Прогресс» и предназначен для установки на модифицированный многоцелевой вертолёт Ми-2М и лёгкий многоцелевых вертолётках

Двигатель выполнен по двухроторной схеме, включающей ротор газогенератора и ротор свободной турбины. Свободная турбина передает мощность редуктору, который установлен спереди двигателя, через вал, проходящий внутри вала ротора газогенератора. Каждый из роторов установлен на двух подшипниковых опорах, смонтированных в статор двигателя.

Двигатель состоит из трех модулей:

- 1) редуктора с коробкой приводов агрегатов, смонтированных в единый корпус;
- 2) газогенератора, объединяющего входное устройство, компрессор, камеру сгорания и турбину компрессора;

3) свободной турбины с ее валом.

Двигатель ТВГТД АИ-450М как объект моделирования, является сложной системой. Поэтому оптимальной ММ установившихся режимов ТВГТД для проектирования, доводки и расчета высотноклиматической характеристик (ВКХ) была выбрана

поэлементная (модульная) модель первого уровня и иерархическим построением алгоритмов. Такая модель обладает достаточно высокой информативностью, технологична при разработке, идентификации и эксплуатации. Методической основой послужили работы [3 – 8].

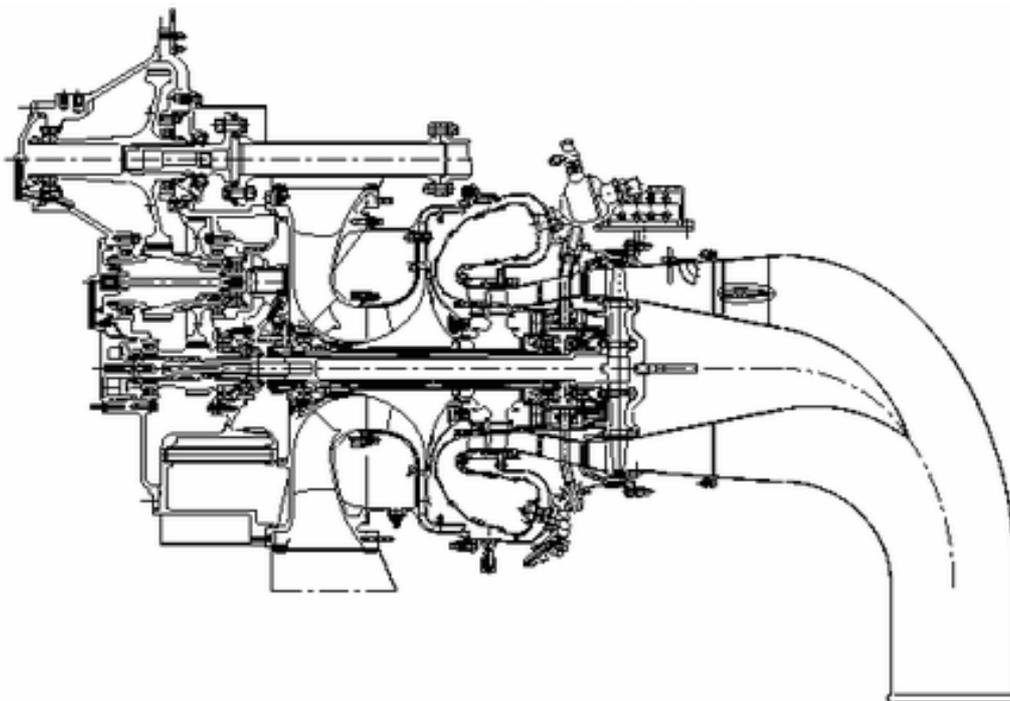


Рис. 1. Продольный разрез турбовального газотурбинного двигателя АИ-450М

В течение доводки двигателя ведутся работы по идентификации как характеристик отдельных узлов, так и характеристик двигателя в целом. Достаточно полный анализ современных методов идентификации ММ ГТД представлен в работе [9].

Математическая модель двигателя АИ-450М состоит из следующих подмодулей: входное устройство, редуктор, компрессор, камера сгорания, турбина компрессора; свободная турбина, выходное устройство, система отбора воздуха на двигательные нужды.

Основные связи между подмодулями описаны уравнениями неразрывности потока и сохранения энергии.

Термогазодинамические процессы описаны зависимостями с допущениями типичными для инженерных расчетов. [10] Термодинамические соотношения, применяемые для описания процессов в узлах двигателя представлены в ММ в зависимости свойств рабочего тела от температуры и химического состава продуктов сгорания. Балансировка ММ сводится к численному решению системы нелинейных дифференциальных уравнений методом Ньютона - Рафсона с заданной точностью. Библиотека базовых стандартных подпрограмм была разработана в ГП «Ивченко-Прогресс» в рамках САПР и со-

вершенствуется до настоящего времени. Представленная ММ ТВГТД АИ-450М реализована в виде программного продукта на языке Visual Fortran. Далее описана методология и источники определения характеристик элементов ММ.



Рис. 2. Структурная схема математической модели турбовального ГТД АИ-450М

Характеристика входного устройства получена в результате продувок входного устройства на стенде ГП «Ивченко-Прогресс». Представляет собой зависимость коэффициента восстановления полного давления от массового расхода воздуха.

$$\sigma_{вх} = f(G_{в пр}). \quad (1)$$

Характеристики редуктора заданы передаточным отношением – $i_{ред}$ и его механическим КПД – $\eta_{мех}$.

Характеристики компрессора получены в результате испытаний газогенератора. Линия рабочих режимов была определена по результатам испытания двигателя на гидротормозном стенде. Характеристики компрессора переставляют собой зависимости:

$$G_{в пр}, \eta_k^* = f(\pi_k^*, n_k). \quad (2)$$

Характеристики камеры сгорания (КС) представлены в виде зависимостей:

$$\sigma_{КС} = f\left(\frac{G_{в пр} \sqrt{T_k^*}}{P_k}\right); \quad (3)$$

$$\eta_{г} = f\left(\frac{T_{г}^* - T_k^*}{T_{г}^*}\right). \quad (4)$$

Характеристики турбин представлены в виде:

$$A_{т}, \eta_{т}^* = f\left(\pi_{т}^*, \frac{n_{т}}{\sqrt{T_{г}^*}}\right). \quad (5)$$

Данные зависимости получены по результатам стендовых испытаний газогенератора. Расчётные характеристики проидентифицированы с полученными экспериментальными данными.

Определение характеристики свободной турбины осуществлялось экспериментально, на гидротормозном стенде, изменением загрузки гидротормоза, при неизменном режиме работы газогенератора.

Характеристика выходного устройства представлена в виде коэффициента скорости

$$\varphi_c = f\left(\frac{G_c \sqrt{T_c^*}}{P_c^*}\right). \quad (6)$$

Характеристики системы отбора воздуха от компрессора на двигательные нужды представлены схемой отборов и подводов воздуха. Двигательные нужды включают все отборы на охлаждение деталей турбины и компрессора, компенсацию осевых усилий на опорах роторов, уплотнение масляных полостей, суфлирование и утечки. Воздух, отбираемый на нужды вертолѐта, входит в состав воздуха, невозвращаемого в тракт двигателя.

Основным законом управления турбовального двигателя АИ-450М двигателя является поддержание постоянной заданной физической частоты вращения свободной турбины: $n_{СТ зад} = const$. Управление двигателем осуществляется за счёт изменения расхода топлива, подаваемого камеру сгорания. Данный закон реализован в модуле системы автоматического управления двигателем.

Математическая модель, состоящая из перечисленных выше элементов, позволяет производить расчёты дроссельных характеристик и ВКХ двигателя во всём эксплуатационном диапазоне температур и давлений окружающей среды. С её помощью возможно моделирование влияния на параметры, как двигателя в целом, так и отдельных его узлов, перепуска воздуха за компрессором, отборы мощности от вала газогенератора, изменение проходных сечений сопловых аппаратов турбины компрессора и свободной турбины.

Благодаря использованию данной ММ были рассчитаны ВКХ двигателя АИ-450М, определены мощностные и расходные характеристики, выполнен расчёт параметров про тракту и частоты вращения ротора газогенератора, послужившие основой для прочностных расчётов. При проведении доводочных работ, ММ используется для моделирования влияния внедряемых изменений на параметры двигателя и предварительной оценки эффективности их применения.

Существующая ММ имеет потенциал для её дальнейшего совершенствования. Одним из направлений является объединение ММ турбовального двигателя с моделью несущего винта вертолѐта Ми-2М и его трансмиссии в единый вычислительный комплекс. Такое объединение позволит моделировать более широкий спектр процессов в силовой установке вертолѐта, а также будет являться заделом для разработки её динамической ММ. В числе других направлений совершенствования модели, ведущихся в ГП «Ивченко-Прогресс» следует отметить: применение современных методов идентификации [11].

Литература

1. Денисюк В.М. *Об'грунтування та результати модернізації двигуна АИ-25ТЛ для літака ЛІ-39У ВПС України* / В.М. Денисюк, О.М. Хусточка // Зб. наук. пр. НЦ ВПС ЗСУ. – К., 2003. – Вип. 6. – С. 278-283.
2. Кравченко И.Ф. *Разработка семейства ГТД на базе газогенератора двигателя АИ-222-25* / И.Ф. Кравченко, А.Н. Хусточка, В.А. Поклад, П.Д. Жеманюк // *Новые рубежи Авиационной науки: международная конференция ЦАГИ*. – М., 2007.

3. Дружинин Л.Н. Математическое моделирование ГТД на современных ЭВМ при исследовании параметров и характеристик авиационных двигателей: труды ЦИАМ №832 / Л.Н. Дружинин, Л.И. Швец, А.И. Ланин – М.: ЦИАМ, 1979. – С. 3-4.

4. Ахмедзянов А.М. Диагностика состояния ВРД по термогазо-динамическим параметрам / А.М. Ахмедзянов, Н.Г. Дубравский, А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 99-100.

5. Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей / А.П. Тунаков. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 93.

6. Математическое моделирование ГТД при проектировании и диагностике / С.В. Епифанов, А.Л. Гальченко, А.К. Бланковский, В.И. Письменный, А.Н. Хусточка // Тех. докл. Всесоюз. науч. конфер. ХАИ. – Х., 1980. – Т. 1. – С. 29-30.

7. Хусточка А.Н. Программа и методика расчета дроссельных характеристик ТРД различных схем (уровень рабочего проектирования): техн. отчет: №61/82. / А.Н. Хусточка. – Запорожье: ЗМКБ «Прогресс», 1982.

8. Муравченко О.Ф. Поэлементная математическая модель турбовинтовентиляторного дви-

гателя Д-27 / О.Ф. Муравченко, А.Н. Хусточка // Авіаційно-космічна техніка і технологія : зб. наук. пр.; М-во освіти і науки України, Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «ХАІ». – Х., 2003. – Вып. 6. – С. 61-64.

9. Епифанов С.В. Анализ современных подходов к идентификации математических моделей ГТД / С.В. Епифанов // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр.; М-во образования и науки Украины, Нац. аерокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2001. – Вып. 23 – С. 169-174.

10. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко, Г.Г. Грабовский, В.А. Дюков, С.А. Кузьменко, Н.А. Рюмишн, А.А. Самецкий. – К.: Техника, 1998. – С. 8-18.

11. Хусточка А.Н. Способ сверки частных критериев качества идентификации математической модели ГТД / А.Н. Хусточка // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр.; М-во образования и науки Украины, Нац. аерокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского. – Х., 2005. – Вып. 9. – С. 195-198.

Поступила в редакцию 12.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТУРБОВАЛЬНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА АІ-450М

О.М. Хусточка, І.А. Калюжний

Викладено спосіб моделювання процесів у газотурбінному двигуні. Описано принцип побудови і структура поелементної стаціонарної математичної моделі турбовального двигуна. Для кожного з елементів моделі вказано спосіб завдання його характеристики і метод, за допомогою якого він експериментально визначався. За допомогою описаної математичної моделі було вирішено широке коло інженерних задач, зокрема: розрахунок дросельних і висотно-кліматичної характеристик двигуна у всьому експлуатаційному діапазоні температур і тисків навколишнього середовища, моделювання впливу на параметри двигуна перепуску повітря за компресором, відбори потужності від вала газогенератора, зміна прохідних перетинів соплових апаратів турбіни компресора і вільної турбіни.

Ключові слова: математична модель, характеристики вузлів ТВГТД, ідентифікація математичної моделі.

MATHEMATICAL MODEL OF THE TURBOSHAFT GAS TURBINE AI-450M

A.N. Khustochka, I.A. Kaliuzhnyi

The method of gas turbine processes modeling is recounted. Principles of construction and structure of the stationary elementwise mathematical model of the turboshaft engine is described. For every structural element of the model the way of defining its characteristics and the method by which it was experimentally determined are specified. Described mathematical model make it possible to solve wide range of engineering problems which include: calculation of turboshaft gas turbine throttle and altitude-climatic performance in all operational range of ambient temperatures and pressures, the modeling of changing engine parameters initiated by air bypassing, gas generator shaft power takeoff, changing gas generator turbine and free turbine nozzle throat area.

Key words: mathematical model, turboshaft gas turbine units performances, identification of the mathematical model.

Хусточка Александр Николаевич – начальник отдела ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03527@ivchenko-progress.com.

Калюжний Иван Анатольевич – инженер-конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: Kaliuzhnyi.I@gmail.com.