

УДК 621.45

МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕССОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

С. В. Авдеев¹, А. Ю. Ткаченко²

¹avdeevsergeyvik@gmail.com, ²tau@ssau.ru

¹ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени С. П. Королева»

Поступила в редакцию 29.11.2020

Аннотация. В данной статье предлагается способ аппроксимации характеристик компрессоров газотурбинных двигателей (ГТД), а также метод изменения их представления для последующего использования в САЕ-системах. Цель данного исследования состояла в повышении эффективности обработки результатов испытаний, а также в повышении достоверности математических моделей ГТД. Предлагается проводить аппроксимацию характеристик компрессоров ГТД с использованием функции эллипса, заданной в полярной системе координат. Также предлагается метод перехода от аналитической формы представления характеристик к табличной форме с использованием численного метода. Проведена апробация предложенного способа аппроксимации на характеристике осевого компрессора авиационного ГТД.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; компрессор; характеристика компрессора; аппроксимация; обобщение характеристик; математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Создание эффективных математических моделей газотурбинных двигателей и установок в значительной степени определяется достоверностью способов представления характеристик узлов ГТД, в том числе компрессора.

В настоящее время в математических моделях ГТД используются различные методы представления характеристик компрессора [1–9]. Однако универсального способа, удовлетворяющего всем требованиям, которые возникают при решении практических задач, не существует. Каждый способ имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют границы его применения. Из основных требований, предъявляемых к способам представления характеристик, можно выделить следующие: точность определения точки на характеристике, удобство использования в математической модели, в частности, удобство реализации алгоритма

в программных комплексах термодинамического расчета, удобство и точность интерполяции, экстраполяция по характеристике за пределы заданной области, а также возможность получения характеристик подобных компрессоров.

На практике при проектировании значительный объем расчетов выполняется с помощью математических моделей 1-го уровня сложности, которые представляют из себя поузловые модели, в которых характеристики узлов предполагаются априори известными и задаются в виде исходных данных [10]. Соответственно, повышение точности математических моделей ГТД происходит по двум направлениям. Первое направление основано на идентификации при создании моделей конкретных двигателей с использованием имеющихся экспериментальных данных по результатам испытаний (признаки состояния), в ходе которого проводится уточнение характеристик уз-

лов, а также коэффициентов модели (параметры состояния). Второе направление основано на более детальном описании физических процессов основных узлов двигателя. В свою очередь это приводит к повышению уровня сложности математической модели, а значит, и к увеличению трудоемкости ее создания, а также времени расчета по таким моделям.

Идентификация моделей осложняется характерными условиями при решении такого рода задач, когда количество параметров состояния значительно превосходит количество признаков состояния. Таким образом, основной проблемой идентификации является недостаток экспериментальных данных, что связано с трудностью препарирования двигателя. Большинство разработанных в настоящее время методик идентификации модели ГТД не учитывают режимный фактор и проводятся для какого-либо конкретного режима. В частности, формальные методы при построении матрицы коэффициентов взаимного влияния составляются для конкретного режима работы ГТД, поэтому частота вращения в числе переменных отсутствует [11]. Характеристики узлов при этом описываются линейными либо полиномиальными функциями в окрестности заданного режима, что, в свою очередь, может стать причиной неточности при идентификации модели. В связи с этим перспективным с точки зрения увеличения количества известной информации о работе двигателя без использования дополнительного препарирования является учет многорежимности. Это определяет необходимость разработки соответствующих способов представления характеристик узлов ГТД, позволяющих решать задачу идентификации математической модели с учетом многорежимности.

Рассматриваемые в [1–8] способы представления характеристик компрессоров ГТД в различной степени соответствуют предъявляемым к ним требованиям, однако в полной мере ни один из способов не удовлетворяет требованиям, возникающим при решении многорежимной идентификации.

Все способы представления характеристик можно условно разделить на три группы: табличные (табулированные), аналити-

ческие способы и способы с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС).

Табличные способы представления характеристик основаны на использовании данных, заданных в табличной форме с использованием методов интерполяции и экстраполяции [2]. С развитием средств моделирования и компьютерных технологий (в частности, с увеличением объема оперативной памяти компьютеров) данные методы получили широкое распространение, однако для решения задачи идентификации, а также для получения характеристик подобных компрессоров эти методы малоэффективны и неудобны. И главным образом это связано с отсутствием аналитических зависимостей, отражающих взаимосвязь входных и выходных параметров характеристик.

Среди аналитических методов следует выделить следующие:

1. Аппроксимация характеристик двумя функциями [4], которая требует подбора соответствующих коэффициентов полиномиальной функции (не более четвертой степени). Характеристики компрессоров в данном случае представляются в виде набора двух аналитически заданных зависимостей следующего вида: $\pi_k^* = f_1(\bar{G}_{впр}, \bar{n}_{пр})$, $\eta_k^* = f_2(\bar{G}_{впр}, \bar{n}_{пр})$. Среди недостатков этого способа аппроксимации следует отметить необходимость выбора очень малого шага по $\bar{G}_{впр}$ на режимах, близких к запиранию, и на высоких режимах – во всем диапазоне.

2. Метод эллипса, предложенный в работе [8], позволяющий получать характеристики подобных компрессоров.

3. Аппроксимация характеристик компрессоров и турбин с использованием многомерного параболического сплайна [7]. Этот метод использует непрерывные и гладкие по первой производной функции, которые имеют дополнительные степени свободы в узлах интерполяции, что позволяет им точнее подстраиваться под специфику сложных функций.

Установлено, что аналитические методы имеют удовлетворительную погрешность аппроксимации исходной характеристики компрессора [3], а также существуют трудности в интерполяции и экстраполяции аппроксимированных характеристик. Также

среди недостатков многих аналитических методов следует отметить использование пошаговой аппроксимации экспериментальных данных.

Способы представления характеристик компрессоров с использованием ИНС рассмотрены в работах [5 и 6]. Преимущества метода обобщения и представления характеристик с использованием ИНС состоят в следующем: метод позволяет проводить аппроксимацию функций любой сложности, метод может быть реализован в большинстве существующих прикладных программ для статистического нейросетевого анализа (Statistica Neural Networks, NeuroShell Predictor, MATLAB, Neural Networks Toolbox и др.). Однако эти методы имеют существенные недостатки. Во-первых, ИНС не позволяют получить аналитические зависимости, которые крайне полезны для корректировки аппроксимации, необходимой для получения характеристик подобных компрессоров, а также для решения задачи идентификации модели ГТД. Это является следствием того, что ИНС – «черный ящик». Во-вторых, построение ИНС имеет эвристический характер. Это означает, что проектировщик не может быть уверен в том, что полученное им решение наилучшее. Эти недостатки определяют сложность применения данных методов для идентификации моделей ГТД.

В данной работе предлагается аналитический метод задания характеристик компрессоров, а именно аппроксимация изолиний КПД и напорных веток по экспериментальным данным, который позволяет выполнять их последующую интерполяцию и экстраполяцию. Разработанный способ позволяет проводить аппроксимацию по всему объему экспериментальных данных, таким образом не требуя пошаговой аппроксимации каждой отдельной изолинии КПД и напорной ветки. Также метод избавлен от выбора малого шага по расходу воздуха на малых режимах и на высоких – во всем диапазоне за счет использования полярной системы координат (СК). Способ основан на совместном использовании эллиптических и полиномиальных функций.

СПОСОБ АППРОКСИМАЦИИ ИЗОЛИНИЙ КПД

На рис. 1 показана схема характеристики компрессора ГТД, на которой изображены основные ее элементы: изолинии КПД, напорные ветки (изодромы) и граница помпажа. Экспериментальные точки на характеристике компрессора с одинаковым значением КПД образуют изолинии, которые имеют визуальное сходство с эллиптическими кривыми. В соответствии с этим предлагается проводить аппроксимацию изолиний КПД функцией эллипса.

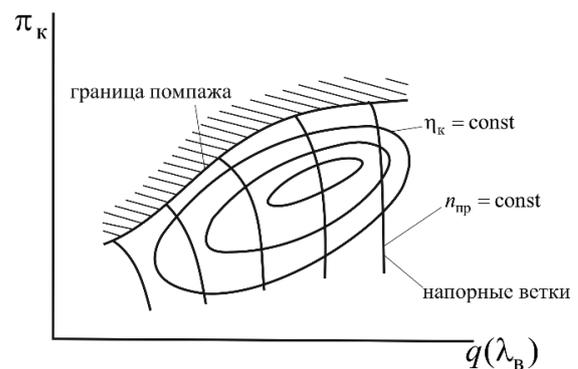


Рис. 1. Схематичное изображение характеристики компрессора

Таким образом, аппроксимация изолиний КПД характеристики компрессора ГТД осуществляется в полярной системе координат функцией, заданной в следующем виде:

$$\rho(\bar{\eta}_k) = \frac{a^2}{\sqrt{1+b^2 \cdot \sin^2(\varphi)}} \cdot (k_1 \cdot \bar{\eta}_k^2 + k_2 \cdot \bar{\eta}_k + k_3),$$

где a и b – коэффициенты, определяющие размеры полуосей исходного эллипса, а k_1 , k_2 и k_3 – это коэффициенты полиномиальной функции второго порядка, которая определяет изменение исходного эллипса в зависимости от значения относительного КПД ($\bar{\eta}_k$). Коэффициенты определяются в ходе минимизации среднеквадратичного отклонения для всей совокупности экспериментальных точек.

Аппроксимация по указанной функции проводится только после смещения набора экспериментальных точек, образующих изолинии КПД, в центр координат и пово-

рота – на определенный угол. Соответственно, сначала предварительно определяются координаты центров эллипсов и углы их наклона. Начальное приближение этих значений можно получить в результате пошаговой аппроксимации каждой изолинии КПД либо аппроксимации только исходной изолинии с перенесением полученных значений на остальные изолинии. Это, в свою очередь, позволит повысить устойчивость решения, а также сократить время его поиска. Для получения аппроксимированных изолиний КПД в декартовой СК выполняются обратные операции (смещения и поворота), а также соответствующие преобразования для перехода из одной системы координат в другую. В дальнейшем координаты центра и угол наклона эллипсов также аппроксимируются полиномиальными функциями, зависящими от значения относительного КПД. Таким образом, аппроксимирующие функции для координат центров эллипсов и угла поворота можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\bar{G}_{в пр ц}(\bar{\eta}_k) &= l_1 \cdot \bar{\eta}_k^2 + l_2 \cdot \bar{\eta}_k + l_3; \\ \bar{\pi}_{к ц}^*(\bar{\eta}_k) &= p_1 \cdot \bar{\eta}_k^2 + p_2 \cdot \bar{\eta}_k + p_3; \\ \psi(\bar{\eta}_k) &= t_1 \cdot \bar{\eta}_k^2 + t_2 \cdot \bar{\eta}_k + t_3,\end{aligned}$$

где l , p и t – коэффициенты, подбираемые исходя из условия минимизации погрешности.

Таким образом, уравнения всех изолиний КПД могут быть выражены системой аппроксимирующих уравнений, которые зависят только от значения относительного КПД.

СПОСОБ АППРОКСИМАЦИИ НАПОРНЫХ ВЕТОК

Способ аппроксимации напорных веток, предложенный в данной работе, использует за основу идеи, изложенные И. Е. Ивановым в работах [8 и 9]. Предлагается проводить аппроксимацию характеристик компрессоров фрагментами эллипсов и использовать в дальнейшем эти аппроксимации для получения характеристик подобных компрессоров. Параметры эллипса, а именно координаты его центра и величины полуосей, полученные при совмещении его фрагмента с набором экспериментальных точек, заносились в

таблицу и интерполировались либо аппроксимировались полиномиальными функциями в зависимости от относительной частоты вращения.

В данной работе предложено проводить аппроксимацию в полярной системе координат. Это позволит уйти от необходимости выбора очень малого шага по $\bar{G}_{в пр}$ на режимах, близких к запиранию, и на высоких режимах – во всем диапазоне.

Аппроксимирующая функция задается в полярной системе координат в следующем виде:

$$\rho(\bar{n}_{пр}) = \frac{c^2}{\sqrt{1 + d^2 \cdot \sin^2(\varphi)}} \cdot (v_1 \cdot \bar{n}_{пр}^2 + v_2 \cdot \bar{n}_{пр} + v_3),$$

где c и d – параметры эллипса; v_1 , v_2 , v_3 – коэффициенты полинома, а $\bar{n}_{пр}$ – относительная частота вращения ротора компрессора. Кроме аппроксимации, в полярной системе координат определяются аппроксимации координат центра эллипса:

$$\begin{aligned}\bar{G}_{в пр ц}(\bar{n}_{пр}) &= r_1 \cdot \bar{n}_{пр}^2 + r_2 \cdot \bar{n}_{пр} + r_3; \\ \bar{\pi}_{к ц}^*(\bar{n}_{пр}) &= m_1 \cdot \bar{n}_{пр}^2 + m_2 \cdot \bar{n}_{пр} + m_3,\end{aligned}$$

где r и m – коэффициенты аппроксимирующих полиномиальных функций.

В ходе исследования было установлено, что при аппроксимации напорных веток угол наклона эллипса остается неизменным, поэтому его зависимость от значения КПД не учитывается.

Для повышения точности аппроксимации можно использовать кусочно-заданные полиномиальные зависимости, входящие в уравнение аппроксимирующей функции, однако это приведет к увеличению количества коэффициентов математической модели.

СПОСОБ ПЕРЕХОДА ОТ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ К ТАБУЛИРОВАННОМУ

Изменение представления полученных аналитически заданных аппроксимаций характеристик компрессоров является важной составляющей при выполнении математического моделирования с использованием различных САЕ-систем [12]. В частности, крайне важно получение характеристик уз-

лов двигателя в табулированном виде, который используется, например, в САЕ-системе «АСТРА» [13], разработанной в Самарском университете. В САЕ-системе «АСТРА» характеристики представлены в виде двух отдельных зависимостей, заданных в табулированном виде. Соответственно, для того чтобы загрузить полученную аппроксимацию характеристики компрессора в программу, требуется способ, позволяющий перейти от аналитической к табличной форме представления.

Предлагается определять точки пересечения изолиний КПД с напорными ветками характеристик путем минимизации целевой функции, имеющей следующий вид:

$$Z = \sqrt{(\bar{G}_{в пр нап.} - \bar{G}_{в пр кпд})^2 + (\bar{\pi}_{к нап.}^* - \bar{\pi}_{к кпд}^*)^2},$$

где $\bar{G}_{в пр нап.}$, $\bar{\pi}_{к нап.}^*$ – значения приведенного относительного расхода воздуха и степени повышения давления соответственно, рассчитанные по уравнению для напорной ветки компрессора при данных оборотах ротора; $\bar{G}_{в пр кпд}$, $\bar{\pi}_{к кпд}^*$ – значения приведенного относительного расхода воздуха и степени повышения давления соответственно, рассчитанные по уравнению аппроксимации для изолинии КПД компрессора при заданном значении КПД.

В ходе минимизации данной функции подбираются углы для уравнений в полярной системе координат изолиний КПД и напорных веток, а значит, и соответствующие им значения на характеристике. Решение при Z , стремящееся к нулю, будет найдено в точках пересечения соответствующей напорной ветки и изолинии КПД. Так как изолиния КПД представляет собой замкнутую линию, то пересечений с напорной веткой будет два, и им будут соответствовать два решения. Для стабильного получения двух решений в решателе накладываются соответствующие ограничения на значения углов в полярной системе координат для уравнения изолинии КПД. В дальнейшем из множества полученных точек формируется характеристика компрессора, заданная в табличной форме, готовая к импорту в САЕ-систему «АСТРА».

АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ

Апробация метода выполнялась применительно к характеристике осевого компрессора авиационного газотурбинного двигателя. Результаты аппроксимации экспериментальных данных приведены на рис. 2 (аппроксимация изолиний КПД) и на рис. 3 (аппроксимация напорных веток).

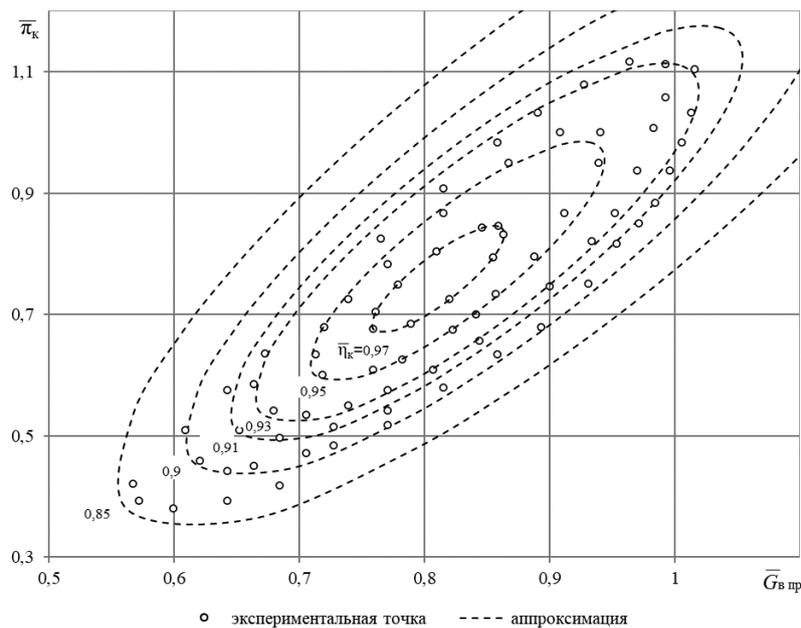


Рис. 2. Аппроксимация изолиний КПД

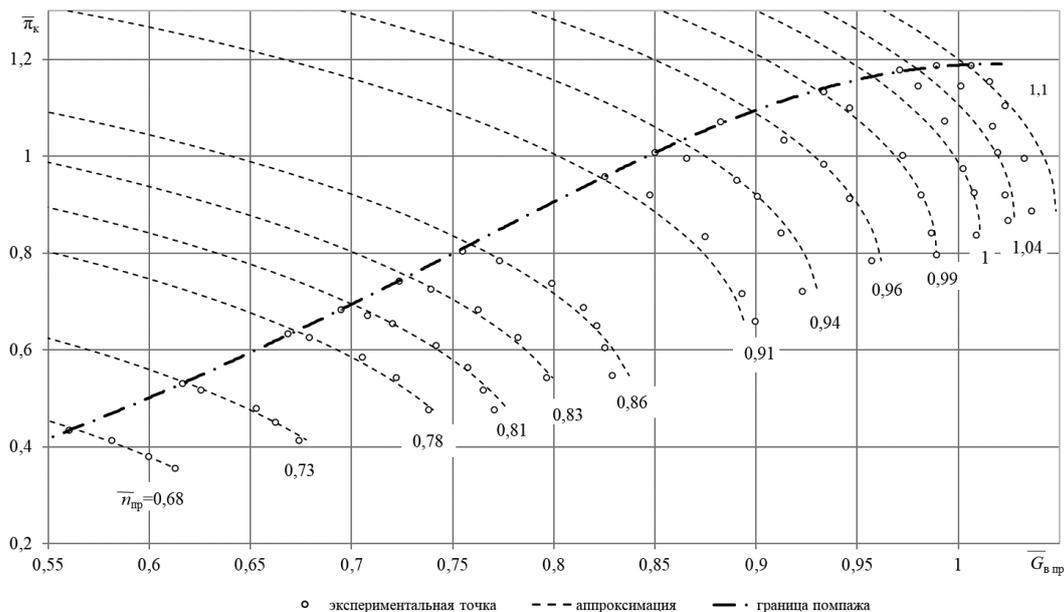


Рис. 3. Аппроксимация напорных веток

Таким образом, из рис. 2 и 3 видно, что полученные аппроксимации характеристик компрессора позволяют выполнять не только интерполяцию, но и вполне адекватную экстраполяцию за пределы линии помпажа. Для аппроксимации изолиний КПД среднеквадратичное отклонение в полярной СК составило 8,17 %. Для напорных характеристик среднеквадратичное отклонение в полярной СК составило 0,67 %.

Для частоты вращения $\bar{n}_{пр} = 0,86$ выполнено тестирование методики изменения представления характеристики, а именно переход к зависимостям $\pi_k^* = f_1(\bar{G}_{в пр}, \bar{n}_{пр})$, $\eta_k^* = f_2(\bar{G}_{в пр}, \bar{n}_{пр})$ (рис. 4 и 5).

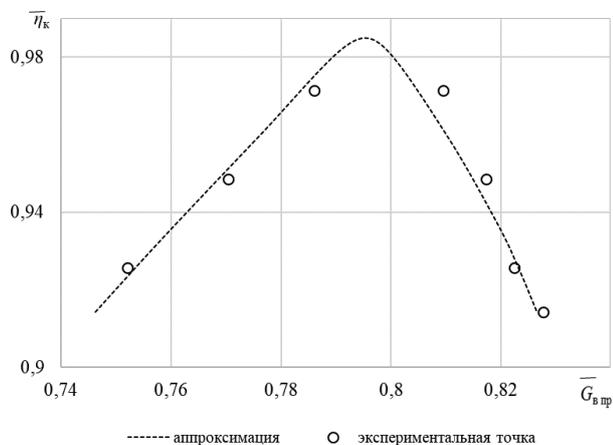


Рис. 4. Переход к зависимости вида $\pi_k^* = f_1(\bar{G}_{в пр}, \bar{n}_{пр})$

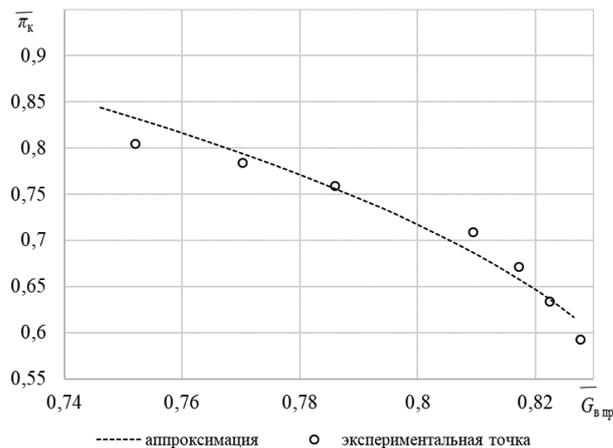


Рис. 5. Переход к зависимости вида $\pi_k^* = f_2(\bar{G}_{в пр}, \bar{n}_{пр})$

Для автоматизации процесса перехода от аналитического представления характеристики компрессора к табличному создан макрос, реализованный с помощью Visual Basic, позволяющий сформировать соответствующий текстовый документ, готовый к импорту в САЕ-систему «АСТРА».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получен метод аналитической аппроксимации характеристик компрессоров ГТД, позволяющий осуществлять интерполяцию и экстраполяцию характеристики за пределы линии помпажа. Разработанный метод учитывает требования, возникающие при решении задачи идентификации, и в даль-

нейшем может быть интегрирован в методику многорежимной идентификации. Также предложен способ перевода полученной аппроксимации из исходного представления к виду $\pi_k^* = f_1(\bar{G}_{в пр}, \bar{n}_{пр})$, $\eta_k^* = f_2(\bar{G}_{в пр}, \bar{n}_{пр})$, а затем и к табличному виду для последующего использования аппроксимации в различных САЕ-системах.

В дальнейшем планируется разработать метод аппроксимации характеристик турбин, учитывающий особенности процесса многорежимной идентификации модели ГТД, а также методику многорежимной идентификации для ее применения в САЕ-системе «АСТРА».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гумеров Х. С., Магадеев А. Я., Гаврилов А. С. Аналитический метод задания характеристик компрессора // Известия вузов. Авиационная техника. 1974. № 2. С. 128-131. [H. S. Gumerov, A. Ya. Magadeev, A. S. Gavrilo, "Analytical method for setting compressor characteristics," (in Russian), in *Izvestiya vuzov. Aviacionnaya tekhnika*, no. 2, pp. 128-121, 1974.]
2. Бакулев В. И., Малиновский К. А., Якушев В. С. Представление характеристик компрессора в координатах, удобных для расчета на ЭВМ параметров ГТД // Известия вузов. Авиационная техника. 1977. № 3. С. 114-117. [V. I. Bakulev, K. A. Malinovskij, V. S. Yakushev, "Representation of compressor characteristics in coordinates convenient for calculating GTE parameters on a computer," (in Russian), in *Izvestiya vuzov. Aviacionnaya tekhnika*, no. 3, pp. 114-117, 1977.]
3. Сравнение погрешности аппроксимации характеристики компрессора аналитическими методами / А. Я. Магадеев [и др.] // Испытания авиационных двигателей: сб. статей. Уфа: УАИ, 1979. № 7. С. 102-106. [A. Ya. Magadeev, et al., "Comparison of the approximation error of the compressor characteristics by analytical methods," (in Russian), in *Ispytaniya aviacionnyh dvigatelej*. Ufa, 1979, no. 7, pp. 102-106.]
4. Дружинин Л. Н., Морозова Н. В. Аппроксимация характеристик компрессора аналитическими функциями двух переменных // Труды ЦИАМ. М.: ЦИАМ, 1975. Вып. 645. [L. N. Druzhinin, N. V. Morozova, "Approximation of compressor characteristics by analytical functions of two variables", (in Russian), in *Trudy CIAM*. Moscow, 1975. Issue 645.]
5. Григорьев В. А., Калабухов Д. С., Радько В. М. Применение методов теории искусственных нейронных сетей при обобщении и представлении характеристик осевых компрессоров авиационных ГТД // Вестник СГАУ. 2012. № 3, ч. 3. С. 67-75. [V. A. Grigor'ev, D. S. Kalabuhov, V. M. Rad'ko, "Application of methods of the theory of artificial neural networks in the generalization and presentation of the characteristics of axial compressors of aviation GTE", (in Russian), in *Vestnik SGAU*, no. 3, part 3, pp. 67-75, 2012.]
6. Григорьев В. А., Калабухов Д. С., Радько В. М. Применение методов нейросетевой аппроксимации при обобщении и представлении характеристик лопаточных машин авиационных ГТД // Известия вузов. Авиационная техника. 2015. № 1. С. 39-41. [V. A. Grigor'ev, D. S. Kalabuhov, V. M. Rad'ko, "Application of neural network approximation methods in the generalization and presentation of the characteristics of bladed machines of aviation GTE," (in Russian), in *Izvestiya vuzov. Aviacionnaya Tekhnika*, no. 1, pp. 39-41, 2015.]
7. Коварцев А. Н. Представление в расчетах на ЭВМ обобщенных характеристик компрессоров ГТД с помощью многомерного параболического сплайна со свободными граничными условиями // Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей. Куйбышев: КуАИ, 1983. С. 25-31. [A. N. Kovarcev, "Representation in computer calculations of generalized characteristics of GTE compressors using a multidimensional parabolic spline with free boundary conditions," (in Russian), in *Proektirovanie i dovodka aviacionnyh gazoturbinnnyh dvigatelej*, pp. 25-31, 1983.]
8. Иванов И. Е., Ерещенко В. Е. Аналитическая аппроксимация характеристик компрессоров // Вестник МАДИ. Транспортная техника. 2016. № 3. С. 23-28. [I. E. Ivanov, V. E. Ereshchenko, "Analytical approximation of compressor characteristics," (in Russian), in *Vestnik MADI. Transportnaya tekhnika*, no. 3, pp. 23-28, 2016.]
9. Иванов И. Е., Ерещенко В. Е. Методы подобия физических процессов. М.: МАДИ, 2015. 144 с. [I. E. Ivanov, V. E. Ereshchenko, *Similarity methods for physical processes*, (in Russian). Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University "MADI", 2015.]
10. Бойко Л. Г., Демин А. Е., Пижанкова Н. В. Метод расчета термогазодинамических параметров турбовального газотурбинного двигателя на основе повенцового описания лопаточных машин. Часть II. Определение параметров ступеней и многоступенчатых компрессоров // Авиационно-космическая техника и технология. 2019. № 1 (153). С. 18-28. [L. G. Wojko, A. E. Demin, N. V. Pizhankova, "A method for calculating the thermogasdynamic parameters of a turboshaft gas turbine engine based on the rotational description of blade machines. Part II. Determination of the parameters of stages and multistage compressors," (in Russian), in *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 1 (153), pp. 18-28, 2019.]
11. Кофман В. М. Методология и опыт параметрической идентификации математических моделей газотурбинных двигателей и их узлов по результатам испытаний. Уфа: УГАТУ, 2014. 182 с. [V. M. Kofman, *Methodology and experience of parametric identification of mathematical models of gas turbine engines and their units based on test results*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2014.]
12. Сравнительный анализ автоматизированных систем проектирования газотурбинных двигателей / В. С. Кузьмичев [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17, № 6 (3). С. 644-656. [V. S. Kuz'michev, et al., "Comparative analysis of automated design systems for gas turbine engines," (in Russian), in *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, vol. 17, no. 6 (3), pp. 644-656, 2015.]
13. Методы и средства концептуального проектирования авиационных ГТД в САЕ-системе «АСТРА» / В. С. Кузьмичев [и др.] // Вестник Самарск. гос. аэрокосм. ун-та. 2012. № 5 (36). Ч. 1. С. 169-173. [V. S. Kuz'michev, et al., "Methods and means of aircraft gas turbine engine conceptual design underlying the CAE system "ASTRA"", (in Russian), in *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, no. 5 (36), part 1, pp. 169-173, 2012.]

ОБ АВТОРАХ

АВДЕЕВ Сергей Викторович, асп. каф. теории двигателей летательных аппаратов. Дипл. инж.-констр. (Самарский университет, 2019). Готовит дис. о методике многорежимной идентификации модели ГТД.

ТКАЧЕНКО Андрей Юрьевич, доц. каф. теории двигателей летательных аппаратов. Дипл. инж.-констр. (СГАУ, 2005). Канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам ЛА (СГАУ, 2009). Иссл. в обл. разработки автоматизированных средств проектирования ГТД.

METADATA

Title: Method of Approximation of Characteristics of Gas Turbine Engines Compressors.

Authors: S. V. Avdeev¹, A. Yu. Tkachenko²

Affiliation:

Department of Aircraft Engine Theory, Samara National Research University, Russia.

Email: ¹avdeevsergeyvik@gmail.com, ²tau@ssau.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 4 (90), pp. 17-24, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: This article proposes a method for approximating the characteristics of gas turbine engine (GTE) compressors, as well as a method for changing their representation for subsequent use in CAE systems. The purpose of this study was to increase the efficiency of processing test results, as well as to increase the reliability of mathematical models of the GTE. It is proposed to approximate the characteristics of GTE compressors using the ellipse function specified in the polar coordinate system. A method of transition from the analytical form of representation of characteristics to a tabular form is also proposed using the numerical method. The proposed approximation method has been successfully tested on the characteristics of an aircraft compressor.

Key words: gas turbine engine; compressor; compressor characteristic; approximation; generalization of characteristics; mathematical model.

About authors:

AVDEEV, Sergey Viktorovich, Postgrad. (PhD) Student of theory of aircraft engines. Dipl. mechanical engineer for aircraft engine (Samara University, 2019).

TKACHENKO, Andrey Yurievich, Assoc. Prof., Dept. of theory of aircraft engines. Dipl. mechanical engineer for aircraft engine (SSAU, 2005). Cand. of Tech. Sci. (SSAU, 2009).