

УДК 629.124:

А.А. ТАРАСЕНКО

*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина***ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕССОРОВ С ПОМОЩЬЮ ЭВМ**

Предлагается алгоритм построения обобщенной характеристики компрессора на основе использования газодинамических функций и общих соотношений. В качестве исходных данных используются следующие параметры: степень повышения давления на номинальном режиме; адиабатический КПД компрессора на номинальном режиме; газодинамическая функция λ на входе в компрессор; газодинамическая функция λ на выходе из компрессора. Характеристика получена в системе координат, степень повышения давления – относительный приведенный расход на входе в компрессор и представлена в виде изодром и линий относительной плотности тока на выходе.

Ключевые слова: *газодинамические функции, характеристика, расход, КПД, степень повышения давления, изодрома.*

Введение

При расчетах параметров газотурбинных двигателей на частичных режимах важно иметь характеристику компрессора во всем диапазоне рабочих режимов. Самый лучший вариант – это экспериментально полученная характеристика. Однако такие эксперименты трудоемки и получить экспериментальные данные во всем диапазоне затруднительно.

Можно использовать обобщенные характеристики, приведенные в [1, 2]. Применение таких характеристик при расчетах с помощью ЭВМ затруднительно и не ясно как использовать экспериментальные данные, имеющиеся для части диапазона, например, для режимов близких к номинальному.

1. Формулирование проблемы

Требуется разработать алгоритм, использующий минимальное количество исходных данных, который позволит получить характеристику компрессора. Важно минимальное количество исходных данных, которые необходимо вводить и как-то получать. Трудоемкость расчетов во внимание приниматься не должна, т.к. их выполняет ЭВМ.

Разрабатываемый алгоритм не заменяет подробного «честного» расчета характеристики компрессора, а предлагает более гибкую и приспособленную для использования ЭВМ обобщенную характеристику компрессора.

В работах [1 – 3] приведены методики, позволяющие получить обобщенную характеристику компрессора. Эти методики опираются на экспериментально полученные общие зависимости, которые

затруднительно использовать на ЭВМ и которые не позволяют учесть экспериментальные данные по конкретному компрессору.

Цель работы – получить характеристику компрессора по следующим исходным данным:

- степень повышения давления на номинальном режиме;
- адиабатический КПД компрессора на номинальном режиме;
- газодинамическая функция λ_{in} на входе в компрессор;
- газодинамическая функция λ_{out} на выходе из компрессора.

1.1. Общие соотношения

Характеристику компрессора традиционно представляют в виде набора изодром в системе координат степень повышения давления–приведенный расход на входе в компрессор. В работе [3] показано, что приведенный расход на входе в компрессор пропорционален газодинамической функции относительная плотность тока – $q(\lambda_{in})$. Если приведенный расход отнести к приведенному расходу номинального режима, то

$$\bar{G}_{пр} = \frac{G_{пр}}{G_{пр н}} = \bar{q}_{in} = \frac{q_{in}}{q_{in н}}, \quad (1)$$

где $G_{пр}$ – приведенный расход воздуха на входе в компрессор на рассматриваемом режиме;

$G_{пр н}$ – приведенный расход воздуха на входе в компрессор на номинальном режиме;

Из определения газодинамической функции

относительная плотность тока следует:

$$\bar{q}_{in} = \frac{G\sqrt{T}}{P} \frac{P_H}{G_H\sqrt{T_H}} = \frac{\bar{G}_{in}\sqrt{\bar{T}_{in}}}{\bar{P}_{in}}, \quad (2)$$

где $\bar{G}_{in} = \frac{G}{G_H}$ – относительный расход воздуха на входе в компрессор на рассматриваемом режиме;

$$\bar{T}_{in} = \frac{T_{in}}{T_{inH}} \text{ – относительная температура воз-}$$

духа на входе в компрессор на рассматриваемом режиме;

$$\bar{P}_{in} = \frac{P_{in}}{P_{inH}} \text{ – относительное давление воздуха}$$

на входе в компрессор на рассматриваемом режиме.

Аналогично (2) для выходного сечения компрессора можно записать:

$$\bar{q}_{ou} = \frac{G_{ou}\sqrt{T_{ou}}}{P_{ou}} \frac{P_H}{G_H\sqrt{T_H}} = \frac{\bar{G}_{ou}\sqrt{\bar{T}_{ou}}}{\bar{P}_{ou}}, \quad (3)$$

где $\bar{G}_{ou} = \frac{G}{G_H}$ – относительный расход воздуха на выходе из компрессор на рассматриваемом режиме;

$$\bar{T}_{ou} = \frac{T_{ou}}{T_{ouH}} \text{ – относительная температура воз-}$$

духа на выходе из компрессора на рассматриваемом режиме.

$$\bar{P}_{in} = \frac{P}{P_H} \text{ – относительное давление воздуха на}$$

выходе из компрессора на рассматриваемом режиме.

$$\text{Обозначим } \theta = \frac{T_{ou}}{T_{in}} \text{ – отношение температур}$$

$$\text{или } \bar{\theta} = \frac{\theta}{\theta_H} = \frac{\bar{T}_{ou}}{\bar{T}_{in}}.$$

Разделив (3) на (2) запишем:

$$\frac{\bar{q}_{ou}}{\bar{q}_{in}} = \frac{\sqrt{\bar{\theta}}}{\bar{\pi}_k}, \quad (4)$$

где $\pi_k = \frac{P_{ou}}{P_{in}}$ или $\bar{\pi}_k = \frac{\pi_k}{\pi_{kH}} = \frac{\bar{P}_{ou}}{\bar{P}_{in}}$ – степень повышения давления;

Выражение (4) можно записать в следующем виде

$$\bar{\theta} = \left(\bar{\pi}_k \frac{\bar{q}_{ou}}{\bar{q}_{in}} \right)^2. \quad (5)$$

Если известны \bar{q}_{in} , \bar{q}_{ou} и $\bar{\pi}_k$, то можно определить кпд компрессора. Действительно с помощью выражения (5) определим $\bar{\theta}$. Далее определим

$$\theta_H = (\pi_{kH}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1) / \eta_{кH} + 1.$$

Напомним, что параметры номинального режима известны. Определяем $\theta = \bar{\theta} \cdot \theta_H$ и кпд компрессора

$$\eta_k = \frac{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\theta - 1}. \quad (6)$$

2. Построение характеристики компрессора

Проведем в системе координат $\bar{\pi}_k - \bar{q}_{in}$ линии $\bar{q}_{ou} = \text{const}$. Для всех линий известна точка, соответствующая $\pi_k = 1$ или $\bar{\pi}_k = 1/\pi_{кH}$. Действительно для этого случая $\theta = 1$ и, используя (4) получим

$$\bar{q}_{in \text{ min}} = \bar{q}_{ou} \frac{\sqrt{\theta_H}}{\pi_{кH}}. \quad (7)$$

Для $\bar{q}_{ou} = 1$ известна еще одна точка – это номинальный режим $\bar{\pi}_k = 1$ и $\bar{q}_{in} = 1$. По двум точкам можно провести прямую линию. Но это не совсем подходит, т.к. нет возможности влиять на кпд вдоль линии $\bar{q}_{ou} = 1$, которая отождествляется с линией максимума кпд. Поэтому проводим параболу, но для этого необходима третья точка. Этой точкой задаемся в центре участка $\bar{q}_{in \text{ min}} - 1$. Координата по оси $\bar{\pi}_k$ отыскивается с учетом заданного отклонения от прямой линии. Это отклонение от прямой линии выбирают так, чтобы график кпд имел экстремум примерно 1,02.

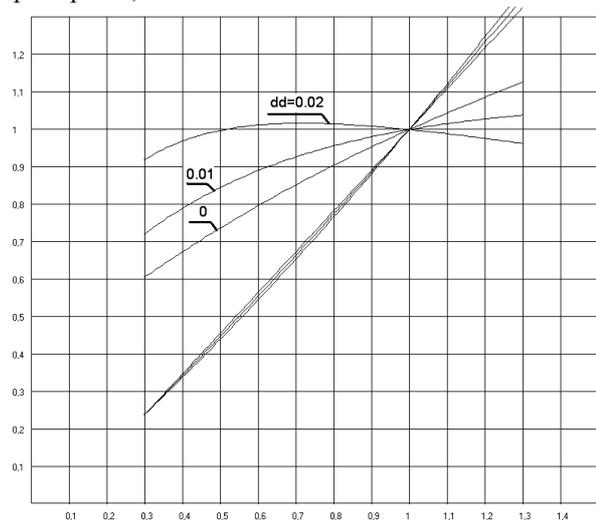


Рис. 1. Выбор параметров линии $\bar{q}_{ou} = 1$

Из рис. 1 видно, что приемлемый характер изменения кпд достигается при отклонении линии $\bar{q}_{ou} = 1$ от прямой на величину равную 0,02, что соответствует точности 2%. Такой подход трудно реализовать, используя графо-аналитические мето-

ды. Однако, если использовать только расчеты на ЭВМ, то такой подход приемлем.

График рис. 1 получен для $\pi_{кн} = 4$. С увеличением $\pi_{кн}$ отклонение от прямой монотонно возрастает и для $\pi_{кн} = 9$ отклонение равно 0,032.

Для построения остальных линий $\bar{q}_{ou} = const$ также воспользуемся двумя точками и полученным для случая $\bar{q}_{ou} = 1$ отклонением от прямой. Нижнюю (минимальную) точку получим с помощью выражения (7). Верхнюю (максимальную) точку получим для $\bar{\pi}_к = 1$. Действительно из выражения (5) следует, что для случая $\bar{\pi}_к = 1$ имеет место выражение

$$\bar{q}_{in 1} = \bar{q}_{ou} \sqrt{\frac{\eta_k}{\eta_{кн}}}.$$

В приведенном выше выражении соблазнительно положить радикал равным единице. Однако, анализ имеющихся обобщенных характеристик позволил предложить следующее выражение

$$\bar{q}_{in 1} = \bar{q}_{ou} \sqrt{1 - 0,05 \sqrt{|\bar{q}_{ou} - 1|}}.$$

По имеющимся трем точкам можно провести параболу для любого $\bar{q}_{ou} = const$.

Следует отметить, что вдоль каждой линии $\bar{q}_{ou} = const$ можно определить КПД компрессора.

Для завершения построения необходимо определиться с изодромами. Для построения изодромы достаточно на линии $\bar{q}_{ou} = const$ найти точку соответствующую заданной скорости вращения компрессора. Имеется ввиду относительная приведенная скорость вращения

$$\bar{n} = \frac{n_{пр}}{n_{прн}}.$$

По аналогии с [3] можно записать

$$\lambda_{in} = \lambda_{inн} \cdot (\bar{n})^2 \cdot k_{ou}, \tag{8}$$

где k_{ou} – коэффициент, зависящий от \bar{q}_{ou} , и равный единице для $\bar{q}_{ou} = 1$.

При проведении линий $\bar{q}_{ou} = const$ важно определиться с линией, на которой произойдет запаривание компрессора (скорость на выходе станет равна скорости звука)

$$\bar{q}_{ou зап} = 1/q(\lambda_{ouн}). \tag{9}$$

Коэффициент k_{ou} в выражении (8) – это отклонение скорости от оптимальной. Оптимальный режим при $\bar{q}_{ou} = 1$. Если аппроксимировать k_{ou} параболой, то вершина этой параболы будет при $\bar{q}_{ou зап}$. Еще одна известная точка – это номинальный режим ($k_{ou} = 1$ при $\bar{q}_{ou} = 1$). Требуется еще

одна точка. Эту точку можно выбрать на линии $\bar{q}_{ou} = 0,1$, подобрав соответствующее значение коэффициента k_{ou} так, чтобы изодромы не имели перегиба вверх. Значение этого коэффициента равно 0,07.

Приведенная выше формула (8) некорректна для изодром соответствующих низким оборотам. Вместо нее можно воспользоваться следующим выражением

$$\lambda_{in} = (\bar{n})^2 k_{ou} (\lambda_{inн} - \lambda_{min} \sqrt{\bar{q}_{ou}}) + \lambda_{min} \sqrt{\bar{q}_{ou}}, \tag{10}$$

Величина λ_{min} выбирается так, чтобы изодрома $\bar{n} = 0,1$ была выше $\pi_k = 1$ или $\bar{\pi}_к = 1/\pi_{кн}$. Отношение $\bar{q}_{in min}$ может быть определено с помощью выражения (7) для $\bar{q}_{ou} = 0,1$. Тогда газодинамическая функция $q_{in min} = \bar{q}_{in min} \cdot q(\lambda_{inн})$. По известному $q_{in min}$ можно определить $\lambda_{in min}$, тогда

$$\lambda_{min} = \lambda_{in min} / \sqrt{0,1}.$$

Полученное таким образом значение можно использовать в выражении (10). Определив согласно этому выражению λ_{in} , вычисляется q_{in} и $\bar{q}_{in} = q_{in}/q(\lambda_{inн})$. Используя выражение для линии $\bar{q}_{ou} = const$ находим $\bar{\pi}_к$ и получаем таким образом точку изодромы.

Если нет данных по $\lambda_{inн}$ и $\lambda_{ouн}$, то их значения можно принять равными 0,5. Линий $\bar{q}_{ou} = const$ может быть проведено сколько угодно и, следовательно, изодромы могут быть построены подробно.

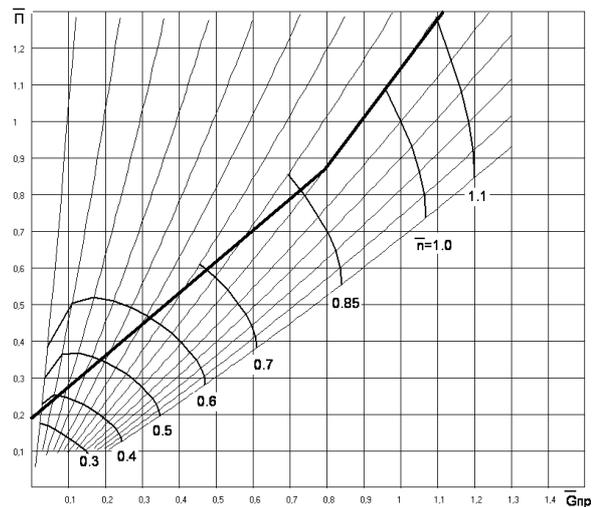


Рис. 2. Характеристика компрессора для $\pi_{кн} = 9$

На рис. 2 приведен пример характеристики компрессора, построенной по предлагаемой методике. Эта характеристика хорошо совпадает с обобщенной характеристикой [1]. На характеристике кроме изодром показаны линии $\bar{q}_{ou} = const$.

Если известны скорость вращения и $\bar{\pi}_k$, то проводя линии $\bar{q}_{ou} = \text{const}$ найдем то значение \bar{q}_{ou} , для которого на заданной изохроне $\bar{\pi}_k$ будет равно заданному. Значение \bar{q}_{in} определяется при получении точки, соответствующей заданной изохроне на линии $\bar{q}_{ou} = \text{const}$. Таким образом для рассматриваемой точки будут известны $\bar{\pi}_k$, \bar{q}_{in} и \bar{q}_{ou} . Эти параметры позволяют вычислить кпд с помощью выражения (6).

Заключение

Разработанная методика позволяющая построить обобщенную характеристику компрессора для широкого диапазона параметров.

Предложенная методика позволяет получить все результаты ожидаемые от характеристики компрессора. Экспериментальные данные можно учесть задаваясь лямбда на входе и выходе.

Литература

1. Сорока Я.Х. Теория и проектирование газотурбинных двигателей: Учебное пособие / Я.Х. Сорока. – Л.: Судостроение, 1982. – 112 с.
2. Романовський Г.Ф. Теоретичні основи проектування суднових газотурбінних агрегатів: Навчальний посібник / Г.Ф. Романовський, М.В. Ващиленко, С.І. Сербін. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 304 с.
3. Нечаев Ю.Н. Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. I. / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1977. – 312 с.

Поступила в редакцию 27.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Р. Ткач, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина.

ЗАСТОСУВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ДЛЯ ПОБУДОВИ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕСОРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕОМ

О.О. Тарасенко

Пропонується алгоритм побудови узагальненої характеристики компресора на базі використання газодинамічних функцій і загальних співвідношень. В якості базових даних використовуються наступні параметри: ступінь підвищення тиску на номінальному режимі; адиабатичний ккд компресора на номінальному режимі; газодинамічна функція лямбда на вході у компресор; газодинамічна функція лямбда на виході із компресора. Характеристика одержана в системі координат, ступінь підвищення тиску – відносна приведена витрата повітря на вході в компресор і представлена у вигляді ізодром і ліній відносної щільності току на виході.

Ключові слова: газодинамічні функції, характеристика, витрата, ккд, ступінь підвищення тиску, ізодрома.

USING OF INTEGRATED DEPENDENCES FOR CONSTRUCTION OF COMPRESSOR CHARACTERISTIC BY THE COMPUTER

A.A. Tarasenko

Algorithm of construction integrated characteristic of the compressor based on the using of gas-dynamic functions and general correlation is offered. Gas-dynamic functions lambda on the entrance and exit of the compressor, adiabatic efficiency of the compressor on the nominal mode, level of the rising pressure on the nominal mode are the initial information. Description is taken in the coordinate system, level of the rising of the pressure – comparative transformed expenditure on the entrance in the compressor and present as isodromic and line comparative density of current on exit.

Key words: Gas-dynamic functions, characteristic, expenditure, efficiency, level of the rising, isodromic.

Тарасенко Александр Александрович – аспирант кафедры турбин Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: tai777@ukrpost.net.