

УДК 629.124

Г.Ф. РОМАНОВСКИЙ, А.А. ТАРАСЕНКО

Национальный университет кораблестроения и.м. адм. Макарова, Николаев, Украина

ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕССОРОВ С УСТРОЙСТВАМИ ПЕРЕПУСКА ВОЗДУХА С ПОМОЩЬЮ ОБОБЩЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Предлагается алгоритм построения характеристики компрессора с устройствами перепуска воздуха или системы компрессоров. При построении характеристик используются обобщенной характеристики компрессора и устройств перепуска полученные на основе использования газодинамических функций и общих соотношений. В качестве исходных данных используются следующие параметры номинального режима: степень повышения давления; адиабатический кпд компрессора; газодинамическая функция лямбда на входе в компрессор; газодинамическая функция лямбда на выходе из компрессора. Характеристика получена в системе координат, степень повышения давления – относительный приведенный расход на входе в компрессор и представлена в виде изодром.

Ключевые слова: газодинамические функции, характеристика, расход, кпд, степень повышения давления, изодрома, устройства перепуска воздуха.

Введение

При осуществлении запуска газотурбинных двигателей очень часто используют перепуск воздуха в компрессорах [1, 2].

В качестве устройств перепуска используют клапана и ленты перепуска воздуха (ЛПВ). Характеристика устройств перепуска известна и может быть описана как устройство типа газодинамическое сопротивление [3]. Характеристика компрессора может быть получена с помощью методики [4].

При построении характеристик компрессоров полагают момент закрытия ЛПВ известным и строят общую характеристику одну для всего диапазона. Можно построить две разных характеристики: одну – для случая открытых устройств перепуска; другую – для случая закрытых устройств перепуска.

При расчете частичных режимов можно менять момент закрытия ЛПВ, переходя с одной характеристики на другую.

Имея обобщенную методику расчета характеристики можно варьировать точкой установки ЛПВ с целью ее рационального выбора.

1. Формулирование проблемы

Требуется разработать методику расчета характеристик компрессора или системы компрессоров, в которых установлены устройства перепуска воздуха. Характеристики компрессоров и устройств перепуска считаются известными и определены соотношениями, полученными в [3, 4].

Цель работы – получить характеристику системы компрессоров с устройствами перепуска воз-

духа по известным характеристикам отдельных элементов.

1.1 Общие соотношения

Компрессор с устройствами перепуска воздуха рассматриваем как два компрессора, между которыми смонтировано устройство перепуска воздуха (рис. 1). Устройство перепуска воздуха будем в дальнейшем называть ЛПВ.

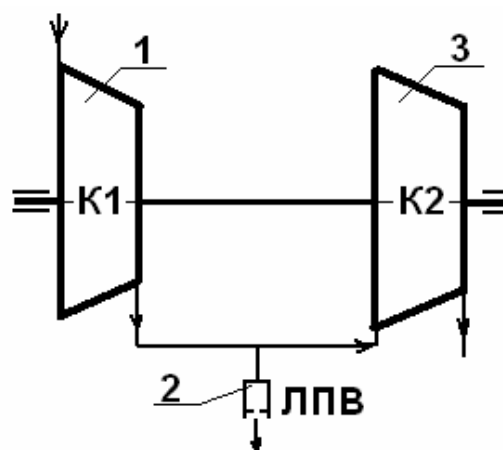


Рис. 1. Схема компрессора с перепуском воздуха: 1 – первый компрессор (K1); 2 – устройство перепуска воздуха (ЛПВ); 3 – второй компрессор (K2)

На номинальном режиме обычно известны:

- степень повышения давления – π_{KH} ;
- расход воздуха – G_{KH} ;
- адиабатический кпд – η_{KH} .

Расход воздуха через оба компрессора считаем постоянным.

Если на номинальном режиме степень повышения давления в компрессоре $\pi_{кн}$, то точка установки устройства перепуска воздуха определена степенью повышения давления $\pi_{к1н}$ в компрессоре К1 на номинальном режиме. Значение $\pi_{к1н}$ должно быть задано. Степень повышения давления $\pi_{к2н}$ в компрессоре К2 на номинальном режиме определяется с помощью выражения

$$\pi_{к2н} = \frac{\pi_{кн}}{\pi_{к1н}}. \quad (1)$$

Адиабатический КПД компрессоров К1 и К2 может быть определен из условия равенства КПД элементарной ступени компрессоров на номинальном режиме

$$\eta_{к1н} = \frac{\pi_{к1н}^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\pi_{к1н}^{\frac{k}{k-1}} - 1}; \quad (2)$$

$$\eta_{к2н} = \frac{\pi_{к2н}^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\pi_{к2н}^{\frac{k}{k-1}} - 1}, \quad (3)$$

где k – показатель адиабаты; η_0 – КПД ступени компрессора.

Формулу аналогичную (2) или (3) можно записать для КПД всего компрессора, который известен и найти КПД элементарной ступени, а затем с помощью выражений (2) и (3) найти КПД компрессоров.

Характеристика устройств перепуска воздуха может быть определена расходом воздуха $G_{лпвн}$ на номинальном критическом режиме. Предполагается, что при продувке клапана температура воздуха 15 °С, а давление равно критическому

$$P_{лпвн}^* = P_0 \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (4)$$

где P_0 – давление наружного воздуха.

Введем обозначение

$$\begin{aligned} k_G &= \frac{G_{лпвн}}{G_{кн}}; & k_T &= \frac{T_{к1н}^*}{T_{лпвн}^*}; \\ k_P &= \frac{P_{к1н}^*}{P_{лпвн}^*}; & k_{лпв} &= \frac{k_P \cdot k_G}{\sqrt{k_T}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда

$$\bar{P}_{лпв}^* = \frac{P_{к1н}^*}{P_{лпвн}^*} = \frac{P_{к1н}^*}{P_{к1н}^*} \frac{P_{к1н}^*}{P_{лпвн}^*} = \bar{P}_{к1}^* \cdot k_P; \quad (6)$$

$$\bar{T}_{лпв}^* = \frac{T_{к1н}^*}{T_{лпвн}^*} = \frac{T_{к1н}^*}{T_{к1н}^*} \frac{T_{к1н}^*}{T_{лпвн}^*} = \bar{T}_{к1}^* \cdot k_T. \quad (7)$$

Коэффициенты k_G ; k_T ; k_P можно легко вычислить. Действительно при $T_{лпвн}^* = T_0$

$$k_T = \frac{1 + \left(\pi_{к1н}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{к1н}}}{T_{лпвн}^*} T_0 = 1 + \left(\pi_{к1н}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{к1н}};$$

$$k_P = \frac{P_0 \cdot \pi_{к1н}}{P_0 \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}}} = \pi_{к1н} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,528 \pi_{к1н}.$$

Уравнение тока для ЛПВ можно записать в следующем виде

$$\frac{G_{лпв} \sqrt{T_{лпв}^*}}{P_{лпв}^*} \frac{1}{m F} = q(\lambda).$$

Для номинального режима ЛПВ

$$\frac{G_{лпвн} \sqrt{T_{лпвн}^*}}{P_{лпвн}^*} \frac{1}{m F} = 1.$$

Разделив первое из этих уравнений на второе, получим

$$\frac{\bar{G}_{лпв} \sqrt{\bar{T}_{лпв}^*}}{\bar{P}_{лпв}^*} = q(\lambda).$$

Здесь символ надчеркивания означает, что параметры отнесены к параметрам перед ЛПВ на номинальном режиме ЛПВ т.е. к тем, на которых проводилась продувка ЛПВ (перепускного клапана).

Используя коэффициенты k_G , k_T , k_P и выражения (6) и (7), получим

$$\frac{G_{лпв} \sqrt{\bar{T}_{к1}^* \cdot k_T}}{G_{кн} \cdot k_G \cdot \bar{P}_{к1}^* \cdot k_P} = q(\lambda)$$

или

$$\frac{G_{лпв}}{G_{кн}} = q(\lambda) \frac{\bar{P}_{к1}^*}{\sqrt{\bar{T}_{к1}^*}} \frac{k_G \cdot k_P}{\sqrt{k_T}} = q(\lambda) \frac{\bar{P}_{к1}^*}{\sqrt{\bar{T}_{к1}^*}} k_{лпв}. \quad (8)$$

Часто в газодинамике используют параметр расхода [1, 2]

$$g = \frac{G \cdot \sqrt{T}}{P}.$$

Полезно отметить, что относительный параметр расхода численно равен отношению газодинамической функции $q(\lambda)$ к этой же функции на номинальном режиме.

Относительный параметр расхода на входе в компрессор К2

$$\bar{g}_{K2in} = \frac{G_K - G_{ЛПВ}}{G_{KH}} \frac{\bar{P}_{K1}^*}{\sqrt{\bar{T}_{K1}^*}} = \bar{g}_{K1ou} - q(\lambda) \cdot k_{ЛПВ} \cdot (9)$$

Функцию $q(\lambda)$ можно определить, рассмотрев ЛПВ как устройство типа «гидравлическое сопротивление». Восстановления полного давления в ЛПВ на частичном режиме можно определить из следующего выражения [3]

$$1 - v = (1 - v_{кр}) \frac{q(\lambda)^2}{\bar{\varepsilon}}, \quad (10)$$

где $v_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,528$ – степень восстановления полного давления при критическом истечении; $v = 1/\pi_{K1}$; π_{K1} – степень повышения давления в компрессоре К1 на частичном режиме; $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon(\lambda)}{\varepsilon(1)}$;

q, ε – газодинамические функции.

Выражение (10) можно переписать в виде

$$\frac{q(\lambda)^2}{\bar{\varepsilon}} = \frac{1 - 1/\pi_{K1}}{1 - 0,528}. \quad (11)$$

Выражение (11) позволяет определить газодинамическую функцию λ , а по известной λ легко находим $q(\lambda)$.

В статье [4] приведена методика построения характеристик компрессора, которая завершилась двумя процедурами:

$$\pi_K = \pi_K(\bar{n}_{пр}, \bar{g}_{Kou}, \eta_{KH}, \pi_{KH}); \quad (12)$$

$$\bar{g}_{Kou} = \bar{g}_{Kou}(\bar{n}_{пр}, \bar{g}_{Kin}, \eta_{KH}, \pi_{KH}). \quad (13)$$

Приведенную скорость вращения компрессора К2 можно определить с помощью выражения

$$\bar{n}_{K2пр} = \bar{n}_{K1пр} / \sqrt{\bar{\theta}_{K1}}, \quad (14)$$

где $\bar{\theta}_{K1}$ – отношение температур (относительных) на выходе и входе компрессора.

Полученные выражения позволяют построить характеристику компрессора с открытыми устройствами перепуска воздуха.

2. Построение характеристики компрессора

Характеристику компрессора с открытой ЛПВ строят в следующей последовательности:

1. По заданному $\pi_{K1н}$ с помощью выражений (1–3) определяем $\pi_{K2н}$ и $\eta_{K1н}, \eta_{K2н}$;

2. По заданному $G_{ЛПВн}$ определяем коэффициент $k_{ЛПВ}$;

3. Задаемся $\bar{n}_{пр}$ для компрессора К1 и по заданному $\bar{g}_{Kin}$ с помощью (13) находим $\bar{g}_{Kou}$ и с помощью (12) находим π_{K1} ;

4. С помощью выражения (14) определяем приведенные обороты для компрессора К2, с помощью (9) определяем $\bar{g}_{K2in}$, а с помощью выражений (13) и (12) находим π_{K2} ;

5. Определяем общую степень повышения давления компрессора по формуле $\pi_K = \pi_{K1} \cdot \pi_{K2}$.

С помощью изложенной методики построена характеристика компрессора, приведенная на рис. 2.

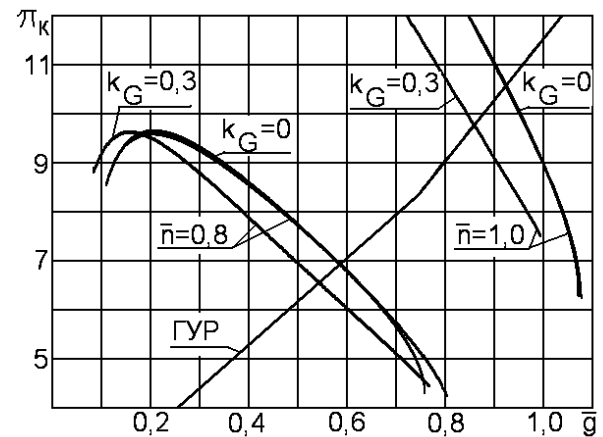


Рис. 2. Характеристика компрессора для $\pi_{KH} = 9$:

$k_G = 0$ – изодромы для случая закрытой ЛПВ;

$k_G = 0,3$ – изодромы для случая открытой ЛПВ

На рис. 2 приведена характеристика компрессора с $\pi_{KH} = 9$ с закрытой и открытой ЛПВ при $\pi_{K1н} = 3$ и $k_G = 0,3$. Видно существенное влияние устройств перепуска воздуха на характеристику компрессора.

Выражение (14) получено из условия, что приведенная скорость вращения на номинальном режиме для компрессора К2 является номинальной. Компрессор К2 считается специально спроектирован именно на такую скорость вращения, которая определяется температурой за компрессором К1.

Если данные по расходу через клапана получены для других условий, то необходимо пересчитать их к указанным с помощью формул приведения.

Заключение

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

Предложенная методика позволяет получить все результаты, ожидаемые от характеристики компрессора.

Экспериментальные данные по характеристикам устройств перепуска (ЛПВ) можно учесть с помощью коэффициента k_G и формул приведения.

Литература

1. 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.

2. Нечаев Ю.Н. *Теория авиационных газотурбинных двигателей. Ч. 1* / Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федоров. – М.: Машиностроение, 1977. – 312 с.

3. Тарасенко А.А. *Частичные режимы устройств типа газодинамическое сопротивление в судовых ГТД* / А.А. Тарасенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 8 (55) – С. 56-58.

4. Тарасенко А.А. *Применение обобщенных зависимостей для построения характеристик компрессоров с помощью ЭВМ* / А.А. Тарасенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64) – С. 74-77.

Поступила в редакцию 24.05.2011

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

ПОБУДОВА ХАРАКТЕРИСТИК КОМПРЕСОРІВ З ПРИСТРОЯМИ ПЕРЕПУСКУ ПОВІТРЯ ЗА ДОПОМОГОЮ УЗАГАЛЬНЕНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ

Г.Ф. Романовський, О.О. Тарасенко

Пропонується алгоритм побудови характеристики компресора з пристроями перепуску повітря або систем компресорів. При побудові характеристик використовуються узагальнені характеристики компресора та пристроїв перепуску повітря, одержаних на базі використання газодинамічних функцій і загальних співвідношень. В якості базових даних використовуються наступні параметри номінального режиму: ступінь підвищення тиску; адіабатичний коефіцієнт компресору; 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.

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

CHARACTERISTICS OF COMPRESSORS WITH AIR RERUN DEVICES USAGE WITH GENERALISED DEPENDANCE

G.F. Romanovsky, A.A. Tarasenko

Algorithm of construction integrated characteristic of the compressor with air rerun devices or compressor system is offered. During the characteristic building generalized compressors with air rerun devices characteristics that was got from gas-dynamic function usage are used. 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. Characteristic is taken in the coordinate system, pressure ratio – relative expenditure on the compressor entry and is given as isodromic view.

Key words: Gas-dynamic functions, characteristic, expenditure, efficiency, pressure ratio, isodromic. Air rerun devices.

Романовський Георгій Федорович – д-р техн. наук, проф., завідує кафедрою турбін Національного університету кораблестроєння ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна.

Тарасенко Олександр Олександрович – аспірант кафедри турбін Національного університету кораблестроєння ім. адм. Макарова, Николаєв, Україна, e-mail: tai777@ukrpost.net.