



DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146
УДК 621.165.533

Научная статья

Моделирование решетки профилей транспортного газотурбинного двигателя

В.К. Мамаев, Л.В. Виноградов, П.П. Ощепков

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

История статьи:

Поступила в редакцию: 11 апреля 2019

Доработана: 16 мая 2019

Принята к публикации: 18 июня 2019

Ключевые слова:

газовая турбина; профиль С8626;

аппроксимация кривыми Безье;

решетка профилей

При разработке газотурбинных двигателей необходимо моделировать проточную часть лопаточных машин (турбины, компрессора). При этом рационально использовать ранее спроектированные профили и решетки профилей. Это связано с тем, что процесс создания профилей сопловых и рабочих решеток требует участия большого коллектива и значительных трудовых и временных затрат. Многие решетки создавались для графоаналитического метода проектирования, что приводит к увеличению сроков разработки, снижению универсальности в плане применения языков программирования и цифровых технологий. В статье представлены расчетная схема решетки сопловых профилей типа С8626, основные фрагменты математической модели решетки, а также результаты проектирования и сравнения геометрических параметров исходного и построенного профилей. Обводы исходного профиля аппроксимированы кривыми Безье 2-го порядка, а входная и выходная кромки – дугами окружностей. Определены координаты точек сопряжения окружностей входной и выходной кромок с выпуклой (спинка) и вогнутой (корытце) поверхностями профиля. После аппроксимации обводов исходного профиля была получена интегральная система уравнений исходного турбинного профиля типа С8626. Предлагаемая математическая модель может рассматриваться как самостоятельная или как подсистема (программный модуль) САПР, представлять страницу электронного атласа профилей и т.д.

Введение

Задача создания высокоэффективной проточной части лопаточных машин, в том числе и турбин, – актуальная, ответственная и очень трудоемкая многопараметрическая задача [1–5]. В практике проектирования профилей турбомашин существует много методов [6; 7]. Один из них – проектирование проточной части с использованием

ранее разработанных профилей (обычно представленных в атласах с известными характеристиками). Для его применения необходимо аналитически описать обводы профиля. Хотя общий алгоритм аналитического описания через аппроксимацию координат можно считать установившимся, возможны и варианты [8; 9].

1. Данные и методы

В настоящей статье применен метод аппроксимации обвода кривыми Безье 2-го порядка [1; 2; 10].

Были исследованы два объекта: первый – математическая модель и алгоритм проектирования, второй – турбинный профиль типа С8626.

На рис. 1 представлена расчетная схема решетки профилей С8626.

Мамаев Владимир Константинович – старший преподаватель департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии.

Виноградов Леонид Валерьевич – учебный мастер департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, кандидат технических наук, доцент.

Ощепков Петр Платонович – доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии, кандидат технических наук; oshchepkov-pp@rudn.ru

© Мамаев В.К., Виноградов Л.В., Ощепков П.П., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Объектом исследования и проектирования был профиль С8626 и решетка из этих профилей с атласными параметрами: хорда профиля $b = 52$ мм, радиусы входной и выходной кромок $R = 0,5$ мм, угол установки профиля в решетке $\gamma = 47^\circ$, относительный шаг $t = 0,66$. В табл. 1 приведена матрица координат обвода исходного профиля, где первая строка – абсциссы, вторая – ординаты спинки, третья – ординаты корытца.

Для контроля корректности исходных данных строим точечный график профиля в исходной системе координат (рис. 2).

Из графика видно, что «выпадающих» точек нет.

Для аппроксимации области входной кромки со стороны спинки было записано уравнения окружности радиусом $r_1 = 0,5$ мм (в статье и на графиках все линейные размеры указаны в миллиметрах).

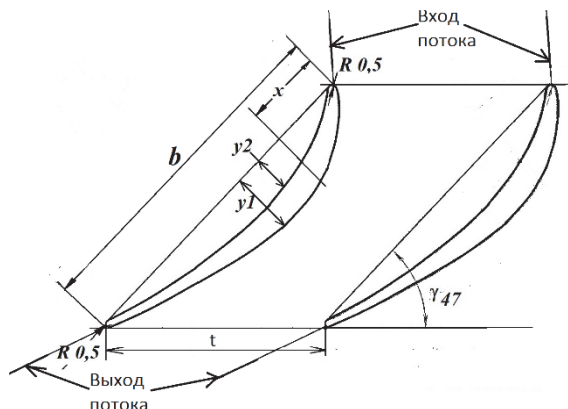


Рис. 1. Расчетная схема решетки профилей С8626: b – хорда профиля; R – радиусы входной и выходной кромок профиля; x – абсцисса исходной системы координат; y_1, y_2 – ординаты спинки и корытца профиля соответственно; γ – угол установки профиля в решетке; t – шаг профиля в решетке
[Figure 1. Design scheme for lattice profiles with C8626: b – profile chord; R – leading and trailing edge radius; x – abscissa of original coordinate system; y_1, y_2 – profile suction and pressure side ordinates; γ – angle of installation of a profile in a lattice; t – profile step in a lattice]

Таблица 1

Матрица координат компрессорного профиля С8626
[Table 1. Matrix of coordinates of compressor profile with C8626]

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| x | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | – | – |
| y_1 | 1,9 | 2,49 | 3,02 | 3,54 | 4,52 | 5,37 | 6,82 | 7,94 | 8,91 | 9,43 | – | – |
| y_2 | 0 | 0,12 | 0,45 | 0,76 | 1,38 | 1,96 | 3,0 | 3,87 | 4,55 | 5,13 | – | – |
| x | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | – | – |
| y_1 | 9,81 | 10,02 | 10,08 | 10,01 | 9,82 | 9,53 | 9,17 | 8,75 | 8,3 | 7,81 | – | – |
| y_2 | 5,58 | 5,89 | 6,08 | 6,12 | 6,14 | 6,07 | 5,92 | 5,71 | 5,43 | 5,06 | – | – |
| x | 34 | 36 | 38 | 40 | 42 | 44 | 46 | 48 | 50 | 51 | 51,5 | 52 |
| y_1 | 7,3 | 6,73 | 6,12 | 5,46 | 4,76 | 4,03 | 3,29 | 2,53 | 1,75 | 1,34 | 1,03 | 0,5 |
| y_2 | 4,64 | 4,17 | 3,7 | 3,15 | 2,59 | 2,01 | 1,42 | 0,8 | 0,21 | 0,12 | 0 | 0,5 |

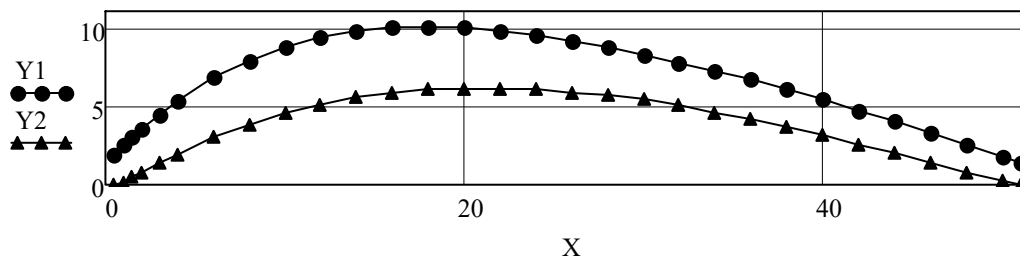


Рис. 2. Точечный график исходного профиля С8626:
 ● – точки обвода спинки профиля; ▲ – обвод корытца
[Figure 2. A scatter plot of the nominal profile C8626:
 ● – suction side contour points; ▲ – pressure side contour]

2. Результаты вычислений

Анализ области входной кромки со стороны спинки профиля с учетом угла установки профиля в решетке $\gamma = 47^\circ$ и угла натекания потока

$\beta_1 = 860$ показал, что координаты аппроксимационной кривой Безье могут быть приняты равными $x_A = 0, y_A = r_1 = 0,5$. Правая опорная точка (точка C характеристического треугольника кри-

вой Безье) первого участка аппроксимации была найдена итерационным методом, ее координаты $x_C = 1, y_C = 2,49$. Средняя опорная точка B определялась на пересечении касательной из точки C с осью ординат Y .

В результате было получено уравнение аппроксимационной кривой Безье 2-го порядка для первого участка с учетом особенности ее положения в декартовых координатах в виде

$$y_{app}(x) = 0,207114 \cdot x + 1,782886 \cdot \sqrt{x} + 0,5.$$

Второй участок аппроксимации сопрягается по 1-му классу гладкости [4], то есть до первой производной, когда начало последующего участка совпадает с концом предыдущего участка. Как

указывалось ранее, координаты конца участка находятся итерационным вариантом. Для второго участка правая граница аппроксимации имеет координаты $x_{2C} = 20, y_{2C} = 10,01$.

Уравнение кривой Безье второго участка имеет вид

$$y_{2app}^2(x) := 16,551078 \cdot y_{2A} \cdot t_2(x) - 9,031078 \cdot t_2(x)^2 + 2,49,$$

где

$$t_2(x) := 0,254207 \sqrt{3,933806 \cdot x + 52,813744} - 1,914964.$$

Важным показателем результата аппроксимации является индекс корреляции. В настоящей работе в качестве примера был исследован ряд вариантов ширины второго участка аппроксимации, результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Индекс корреляции второго участка в зависимости от правой границы участка
[Table 2. Correlation index of the second plot depending on the right border of the plot]

| Абсцисса [Abscissa] | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| Индекс корреляции [Correlation index] | 0,99998 | 0,99997 | 0,99995 | 0,99992 | 0,99989 | 0,99981 | 0,99967 | 0,999386 | 0,99893 |

Из таблицы видно, что до точки $x = 30$ индекс корреляции достаточно высокий, практически не ниже 0,999. Однако для последующих построений конечной точкой второго участка и начальной точкой третьего участка была принята точка 14 с индексом корреляции 0,99989. Естественно, можно сделать вывод о том, что для повышения индекса корреляции следует уменьшать ширину аппроксимируемого участка, однако тогда на обводе кривой будет больше теоретических участков с разрывом кривизны (места сопряжения).

Следует отметить, что суммарный индекс корреляции аппроксимации первого и второго участков составил 0,99992.

Следующий участок – третий – с абсциссой правой границы $x = 46$. В результате итерационных расчетов было получено следующее аппроксимационное уравнение:

$$y_{3bz}(x) := 10,01 - 1,275468 \cdot t_3(x) - 5,444532 \cdot t_3(x)^2,$$

где

$$t_3(x) := 0,150555 \cdot \sqrt{6,642074 \cdot x - 39,159155} - 1,45722.$$

Четвертый участок аппроксимации спинки сопрягается с дугой окружности выходной кромки. Итерационным способом были определены координаты точки сопряжения: $x_{4C} = 51,75, y_{4C} = 0,933013$. После этого было записано уравнение кривой

Безье 2-го порядка для четвертого участка спинки в виде

$$y_{4bz}(x) = 1,148795 \cdot t_4(x)^2 - 3,505782 \cdot t_4(x) + 3,29,$$

где

$$t_4(x) = -0,273422 \cdot \sqrt{-3,657348 \cdot x + 190,362557} + 1,286089.$$

Дуга окружности выходной кромки спинки строится в интервале $51,75 \leq x \leq 52$.

На рис. 3 показана спинка профиля, построенного по четырем уравнениям кривых Безье 2-го порядка и уравнению верхней полуокружности выходной кромки.

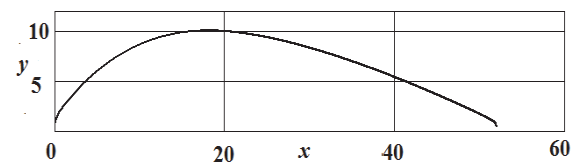


Рис. 3. Спинка профиля S8626, построенная по аппроксимационным уравнениям кривых Безье 2-го порядка и уравнению верхней полуокружности выходной кромки
[Figure 3. Profile 8626 suction side, constructed by approximation equations of Bezier curves of the 2nd order and the equation of the upper semicircle of the output edge]

Заключительным шагом этапа аппроксимации спинки профиля был расчет индекса корреляции

обвода спинки в целом. Расчет показал, что этот индекс равен 0,999896. Таким образом, можно утверждать, что аппроксимация по предлагаемой математической модели удовлетворительная. Как отмечалось ранее, можно несколько повысить индекс корреляции, но для этого следует увеличить число сопрягаемых участков, имеющих 1-й уровень гладкости [4].

Аппроксимация корытца профиля осуществлялась по алгоритму, аналогичному реализованному для спинки профиля. В результате корытце профиля С8626 было аппроксимировано дугой нижней полуокружности входной кромки, четырьмя кривыми Безье 2-го порядка и дугой нижней полуокружности выходной кромки. В порядке проведения аппроксимации корытца далее приведены уравнения аппроксимации с интервалами их применения.

Дуга нижней полуокружности входной кромки

$$C2(x) = -\sqrt{0,25 - (x - 51,5)^2} - 0,5 \quad \text{при } 0 \leq x \leq 0,5;$$

первая кривая Безье 2-го порядка

$$y1w_{app}(x) := 0,45 \cdot t1w(x)^2,$$

где

$$t1w(x) = 2,934238 \cdot \sqrt{0,340804 \cdot x - 0,061767} - 0,967119$$

при $0,5 \leq x \leq 1,5$;

вторая кривая Безье 2-го порядка

$$y2w_{app}(x) := 11,381624 \cdot t2w(x) - 5,690816 \cdot t2w(x)^2 + 0,45,$$

где

$$t2w(x) = 0,302297 \cdot \sqrt{3,308002 \cdot x + 66,915481} - 2,562894$$

при $1,5 \leq x \leq 21,76412$;

третья кривая Безье 2-го порядка

$$y3w_{app}(x) = 6,140808 - 4,130808 \cdot t3w(x)^2,$$

где

$$t3w(x) = 0,175341 \cdot \sqrt{5,703184 \cdot x - 55,792272} - 1,449427$$

при $21,76412 \leq x \leq 44$;

четвертая кривая Безье 2-го порядка

$$y4w_{app}(x) = 2,01 \cdot (1 - t4w(x))^2,$$

где

$$t4w(x) = -0,164074 \cdot \sqrt{-6,094802 \cdot x + 314,375948} + 1,115278$$

при $44 \leq x \leq 51,5$;

уравнение нижней полуокружности выходной кромки

$$C2(x) = -\sqrt{r_2^2 - (x - b + r_2)^2} + r_2 \quad \text{при } 51,5 \leq 52.$$

В процессе проведения аппроксимации корытца на каждом этапе контролировался индекс корреляции. В результате индекс корреляции аппроксимации корытца профиля дугами нижних полуокружностей входной и выходной кромок и четырьмя кривыми Безье 2-го порядка составил 0,999851. С учетом того, что координаты обводов профиля изначально заданы в матрице с округлением, результат реализации предлагаемой математической модели профиля типа С8626 можно считать удовлетворительным.

На рис. 4 представлен профиль С8626 с центром тяжести, построенный по аппроксимационным аналитическим уравнениям для спинки и корытца.

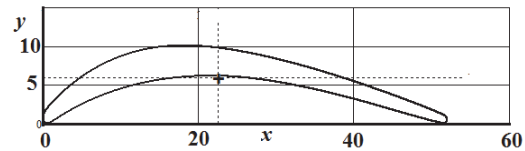


Рис. 4. Профиль С8626, построенный по аппроксимационным уравнениям:
— обводы профиля; + центр тяжести профиля
[Figure 4. С8626 profile, built on approximating equations:
— profile contour; + the center of gravity of the profile]

На рис. 5 показана развертка сопловой решетки с номинальным относительным шагом 0,66.

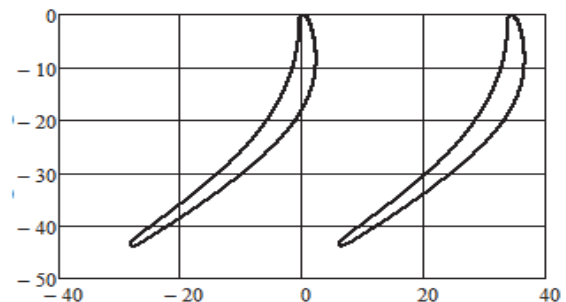


Рис. 5. Развертка сопловой решетки
[Figure 5. Development of a nozzle lattice]

Аналитический формат обводов профиля позволил рассчитать некоторые геометрические ха-

рактеристики профиля в исходной системе координат, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Геометрические характеристики профиля C8626
[Table 3. Profile geometry with C8626]

| № п/п | Наименование параметра [Name of parameter] | Обозначение [Designation] | Величина [Value] |
|-------|--|------------------------------|--------------------------|
| 1 | Площадь профиля, мм ² [The area of profile, mm ²] | F | 157,316 |
| 2 | Статический момент инерции относительно оси X, мм ³ [Static moment of inertia with respect to the X-axis, mm ³] | S_x | 923,314 |
| 3 | Статический момент инерции относительно оси Y, мм ³ [The static moment of inertia about the Y-axis, mm ³] | S_y | 3,544114×10 ³ |
| 4 | Момент инерции относительно оси Y, мм ⁴ [Moment of inertia about Y-axis, mm ⁴] | I_y | 1,084702×10 ⁵ |
| 5 | Момент инерции относительно оси X, мм ⁴ [Moment of inertia about X-axis, mm ⁴] | I_x | 6,359121×10 ³ |
| 6 | Центробежный момент инерции относительно осей X, Y, мм ⁴ [The product of inertia with respect to axes X, Y, mm ⁴] | I_{xy} | 1,97848×10 ⁴ |
| 7 | Абсцисса центра тяжести, мм [The abscissa of the centre of gravity, mm] | X_c | 22,528685 |
| 8 | Ордината центра тяжести, мм [The ordinate of the centre of gravity, mm] | Y_c | 5,926392 |
| 9 | Максимальный момент инерции относительно главной центральной оси V, мм ⁴ [Maximum moment of inertia relative to the main central axis V, mm ⁴] | J_{max} | 2,867936×10 ⁴ |
| 10 | Минимальный момент инерции относительно главной центральной оси U, мм ⁴ [Minimum moment of inertia relative to the main central axis U, mm ⁴] | J_{min} | 780,496335 |
| 11 | Угол наклона главных центральных осей к исходным координатным осям, град. [The angle of inclination of the main central axes to the initial coordinate axes, deg.] | δ | -2,51 |
| 12 | Максимальная толщина профиля (абсолютное значение) [Maximum profile thickness (absolute value)] | D_{max} | 4,080 |
| 13 | Относительная максимальная толщина профиля (относительно хорды) [Relative maximum profile thickness (relative to the chord)] | $D_{отн}$ | 0,078 |
| 14 | Относительная абсцисса центра окружности максимальной толщины [Relative abscissa of the center of the circle of maximum thickness] | $x_{Дотн}$ | 0,275 |
| 15 | Относительная абсцисса места максимальной вогнутости [Relative abscissa of the place of maximum concavity] | b_f | 0,365 |

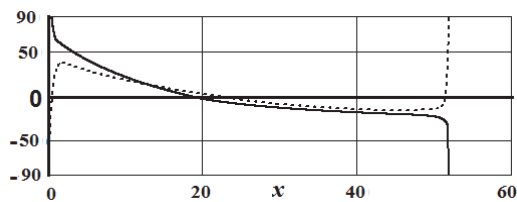


Рис. 6. Изменение угла наклона касательной к обводу профиля:
 — — спинка; - - - корытце
[Figure 6. Change of a tilt angle of a tangent to profile contour:
 — — suction side of the airfoil; - - - pressure side of the airfoil]

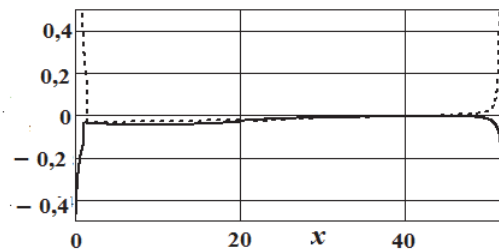


Рис. 7. Изменение кривизны по обводу профиля:
 — — спинка профиля; - - - корытце профиля
[Figure 7. Change of curvature on profile length:
 — — suction side of the airfoil; - - - pressure side of the airfoil]

На рис. 6 и 7 показаны важные геометрические характеристики для решетки профилей: изменение угла наклона касательных к обводу профиля и распределение кривизны профиля.

Из графиков на рис. 6 и 7 видно, что при аппроксимации обводов семейством аналитических функций имеет место автоматический сглаживающий эффект. Это позволяет более корректно при

необходимости рассчитывать параметры течения в решетке при учете их градиента поперек потока. (Теоретически имеющиеся разрывы кривизны обвода спинки в месте сопряжения аналитических кривых на графике не видны в силу их малости.)

Естественно, что наибольшее изменение параметров (углов и кривизны) наблюдается в области входной и выходной кромок. На большей части профиля геометрические характеристики плавно изменяются.

Выводы

В результате проведенного исследования разработана математическая модель аппроксимации обводов соплового профиля типа С8626 серией аналитических кривых: дуг окружностей и кривых Безье 2-го порядка. Спинка профиля (выпуклая часть) аппроксимирована четырьмя кривыми Безье 2-го порядка и дугой окружности верхней полуокружности радиусом выходной кромки. Корытце профиля (вогнутая часть) аппроксимировано дугой нижней полуокружности радиуса входной кромки, четырьмя кривыми Безье 2-го порядка и дугой нижней полуокружности радиусом выходной кромки.

Аналитическая форма описания обводов профиля позволяет вести проектирование профилей и решеток на их базе практически на любых языках. То есть разработанная математическая модель не «привязана» к определенному языку или пакету программирования типа Mathcad, Excel и т.д.

Аналитическая форма описания профиля позволяет применять нелинейные преобразования при малых изменениях угла поворота потока в решетке профилей.

Статистическая оценка результатов аппроксимации матрицы координат обводов спинки и корытца профиля показала, что спинка аппроксимирована с индексом корреляции 0,999896, а корытце – с индексом корреляции 0,999851. С учетом того, что значения исходных координат заданы с округлением до второго знака после запятой, результат можно признать удовлетворительным. Для повышения индекса корреляции следует увеличить число участков аппроксимации.

Список литературы

1. Батулин О.В. Профилирование рабочих колес радиально-осевых турбин с помощью кривых Безье // Вестник СГАУ. Авиационная и ракетно-космическая техника. 2011. № 3 (27). С. 125–130.
2. Виноградов Л.В., Алексеев А.П., Костюков А.В. Профиль лопатки турбины из кривых Безье. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2013. № 3. С. 10–14.
3. Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ощепков П.П. Турбинный профиль АЗК7 – НАСА: автоматизация проектирования. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. № 3. С. 299–307.
4. Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ощепков П.П. Компрессорный профиль С4: автоматизация проектирования. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. № 2. С. 155–164.
5. Виноградов Л.В. Профилирование лопаток турбин кривыми Безье // Инженерные системы – 2015: труды VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 20–22 апреля 2015 / под общ. ред. Н.К. Пономарева. 2015. С. 564–571.
6. Виноградов Л.В. Повышение эффективности работы дизелей в условиях высокогорья и жаркого климата: учеб. пособие. М.: РУДН, 2008. 187с.
7. Иванов Г.С. Конструирование технических поверхностей (математическое моделирование на основе нелинейных преобразований). М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
8. Макаров Е. Инженерные расчеты в Mathcad: учебный курс. СПб.: Питер, 2003. 448 с.
9. Concepts NREC. URL: <http://www.rescent.ru/software/axcent>
10. Грушин М.А. Аппроксимация профилей лопаток компрессора с помощью кривых Безье // Наука и образование. 2010. № 7. URL: <https://docplayer.ru/67835226-Approksimaciya-profiley-lopatok-kompressora-s-pomoshchyu-krivyh-beze.html>

Для цитирования

Мамаев В.К., Виноградов Л.В., Ощепков П.П. Моделирование решетки профилей транспортного газотурбинного двигателя // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 140–146. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146>

Modeling the set of blade profiles of a gas turbine engine

Vladimir K. Mamaev, Leonid V. Vinogradov, Petr P. Oschepkov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: April 11, 2019

Revised: May 16, 2019

Accepted: June 18, 2019

Keywords:

gas turbine; profile C8626; approximation by Bezier curves; profile grid

In the development of gas turbine engines (GTE) it is necessary to simulate the flow section of blade machines (turbines, compressors). At the same time, it is rational to use previously designed profiles and set of profiles with high aerodynamic and efficient performance. This is due to the fact that the process of creating profiles of a nozzle and moving blades set requires the participation of a large team and considerable labor and time costs. Many sets were created for the graphic-analytical design method, which leads to an increase in the development time and a decrease in the universality in terms of the use of programming languages and digital technologies. The article presents the design scheme of the nozzle profile sets of type C8626, the main fragments of the mathematical model of the sets, the results of the design of the original profile C8626 and the sets, comparison of the geometric parameters of the source and built profiles. The contours of the initial profile are approximated by second-order Bezier curves, and the leading and trailing edges are circular arcs. The coordinates of the points of conjugation of the circles of the leading and trailing edges with convex (suction side) and concave (pressure side) profile surfaces are determined. After approximation of the contours of the initial profile, an integral system of equations of the original C8626 turbine profile was obtained. The proposed mathematical model can be considered as independent, it can be a subsystem (software module) of CAD, to represent the shearer of the electronic atlas of profiles and etc.

References

1. Baturin OV. Profiling of impellers of radial-axial turbines using Bezier curves. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2011;3(27): 125–130. (In Russ.)
2. Vinogradov LV, Alekseev AP, Kostyukov AV. Profile of the turbine blade of Bezier curves. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering researches*. 2013;(3): 10–14. (In Russ.)
3. Vinogradov LV, Mamaev VK, Oschepkov PP. CAD of turbine profile type A3K7 NACA by the method of nonlinear transformation. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;18(3): 299–307. (In Russ.)
4. Vinogradov LV, Mamaev VK, Oschepkov PP. Computer-aided design of type C4: compressor blade profile. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018;19(2): 155–164. (In Russ.)
5. Vinogradov LV. Profilirovaniye lopatok turbin krivymi Bez'ye [Profiling of turbine blades by Bezier curves]. In: Ponomarev NK. (ed.) *Engineering systems – 2015: Proceedings of VIII International Scientific-Practical Conference*. 2015; 564–571. (In Russ.)
6. Vinogradov LV. Povysheniye effektivnosti raboty dizeley v usloviyakh vysokogor'ya i zharkogo klimata: uchebnoe posobie [*Improving the efficiency of diesel engines in the highlands and hot climate: textbook*]. Moscow: RUDN University Publ.; 2008. (In Russ.)
7. Ivanov GS. Konstruirovaniye tekhnicheskikh po-verkhnostey (matematicheskoye modelirovaniye na osnove nelineynykh preobrazovaniy) [*Designing of technical surfaces (mathematical modelling based on nonlinear transformations)*]. Moscow: Mashinostroenie Publ; 1987. (In Russ.)
8. Makarov E. Inzhenernyye raschety v Mathcad: uchebnyy kurs [*Engineering calculations in Mathcad: textbook*]. Saint Petersburg: Piter Publ.; 2003. (In Russ.)
9. Concepts NREC. Available from: <http://www.rescent.ru/software/axcent>
10. Grushin MA. Approksimatsiya profilei lopatok kompressora s pomoshch'yu krivyykh Bez'e [Approximation of compressor blade profiles using Bezier curves]. *Nauka i obrazovanie [Science and Education]*. 2010;(7). Available from: <https://docplayer.ru/67835226-Approksimatsiya-profiley-lopatok-kompressora-s-pomoshchyu-krivyyh-beze.html> (In Russ.)

For citation

Mamaev VK, Vinogradov LV, Oschepkov PP. Modeling the set of blade profiles of a gas turbine engine. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 140–146. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-140-146>. (In Russ.)

Vladimir K. Mamaev, senior lecturer at the Department of Mechanical and Instrument Engineering of Academy of Engineering.

Leonid V. Vinogradov, educational master at the Department of Mechanical and Instrument Engineering of Academy of Engineering, PhD in Technical Sciences, Associate Professor.

Petr P. Oschepkov, Associate Professor at the Department of Mechanical and Instrument Engineering of Academy of Engineering, PhD in Technical Sciences; oschepkov-pp@rudn.ru