



DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-299-307

УДК 621.165.533

## ТУРБИННЫЙ ПРОФИЛЬ АЗК7 — НАСА: АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

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

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

В работе представлены результаты проектирования турбинного реактивного профиля типа АЗК7 с использованием САПР, реализующей метод нелинейных преобразований. Авторами применено преобразование Гирста. Все вычисления и построения выполнены в интегрированном математическом пакете *Mathcad*. Для вычислений и построений средняя линия, заданная координатным способом, аппроксимируется двумя отрезками прямых в области входной и выходной кромок с заданными углами наклона и тремя криволинейными участками в виде дуг кривых Безье 2-го порядка. Координаты точек сопряжения соседних аппроксимируемых участков определяются итерационным методом с оптимизацией индекса корреляции. Для определения координат точки перегиба использовалось условие равенства нулю второй производной интерполяционного обвода профиля. В работе определены координаты точки сопряжения входной кромки в виде дуги окружности и серии точек обвода контура, аппроксимированной кривой Безье 2-го порядка. Определив начальную и конечную опорные точки параболы Безье 2-го порядка, определялись координаты промежуточной опорной точки на пересечении касательных, исходящих из начальной и конечной опорных точек. После аппроксимации трех участков кривыми Безье 2-го порядка было записано интегральное уравнение обвода спинки (выпуклой части контура) профиля АЗК7 с учетом того, что входная и выходная кромки выполнены в виде дуг окружностей.

**Ключевые слова:** турбина, профиль, САПР, нелинейные преобразования

В НАСА был разработан турбинный реактивный профиль (серия АЗК7), для построения которого задана координатным способом форма средней линии изогнутого профиля и исходный симметричный профиль, толщина которого наращивается на среднюю линию. (Это один из возможных вариантов проектирования турбинных профилей осевых машин [5].) Толщина профиля приводится в зависимости от расстояния вдоль хорды, однако, если средняя линия имеет значительную кривизну (при большом угле поворота потока), т.е. если длина средней линии на 30% превышает длину хорды, распределение толщины дается обычно вдоль средней линии [2].

В работе применено преобразование Гирста  $I_2$  с несобственным центром  $F_1^\infty$  [3]. У рассматриваемой специализации кремоновых инволюций  $I_n$  с несобственным центром  $F_1^\infty$  есть очень важное метрическое свойство: такое преобразование является эквиформным, т.е. сохраняют площади преобраза и образа.

В использованной в данной работе специализации квадратичной инволюции  $I_2$ , инвариантной коникой является серия квадратичных парабол  $d^2$  в виде кривых *Bezier* 2-го порядка.

Прообразом турбинного изогнутого профиля является симметричный исходный турбинный профиль *A3K7* [2], аэродинамические характеристики которого известны из экспериментальных данных.

Все вычисления и построения выполнены в интегрированном математическом пакете *Mathcad*, для чего была разработана система автоматизированного проектирования (САПР), включающая ряд ранее разработанных программный модулей.

Объектом конструирования был профиль серии *A3K7* [1] симметричный, с максимальной относительной толщиной 20%, хордой профиля 100 мм, относительная абсцисса сечения с максимальной толщиной — 20%, радиус входной кромки  $r_1 = 4,407\%$  от хорды, радиус выходной кромки  $r_2 = 1\%$  от хорды. Важно отметить, что *NACA* определяет входной и выходной углы (тангенсы углов) установки лопатки не на входной и выходной кромках, а на расстояниях 0,5 и 95% от длины хорды [2]. (Как указывалось ранее, заданы координаты средней линии в процентах от хорды.)

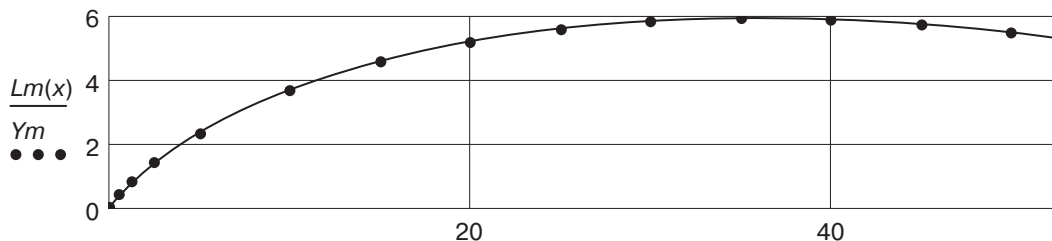
В таблице 1 приведена матрица координат средней линии профиля, где первая, третья, пятая строки — абсциссы, вторая, четвертая, шестая — ординаты. (Матрица координат параллельно записывается в текстовый структурированный файл для возможности последующего ее использования в других средах.)

Таблица 1

**Матрица координат средней линии турбинного реактивного профиля *A3K7***

$$\begin{pmatrix} 0 & 0,5 & 1,25 & 2,5 & 5,0 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 \\ 0 & 0,4287 & 0,836 & 1,428 & 2,359 & 3,689 & 4,597 & 5,217 & 5,623 & 5,852 \\ 35 & 40 & 45 & 50 & 55 & 60 & 65 & 70 & 75 \\ 5,936 & 5,897 & 5,753 & 5,516 & 5,200 & 4,814 & 4,387 & 3,870 & 3,328 \\ 80 & 85 & 90 & 96 & 100 \\ 2,746 & 2,183 & 1,485 & 0,801 & 0 \end{pmatrix}.$$

На рисунке 1 показан фрагмент векторного графика средней линии в исходной системе координат. График строится для получения первичного образа объекта проектирования и контроля корректности исходных данных и их ввода.



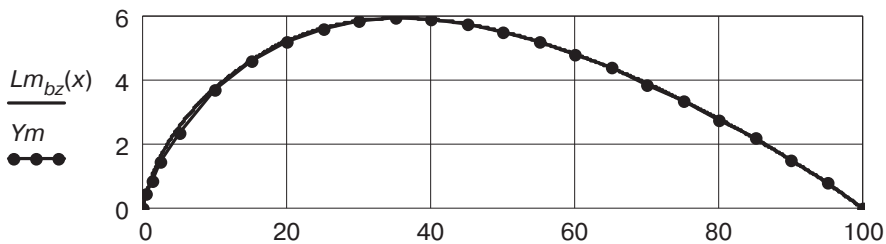
**Рис. 1.** Векторный график (фрагмент) средней линии профиля турбинного *A3K7* (*NACA*):  
 — интерполяция средней линии кубическим сплайном; ••• — точки средней линии, координаты которых заданы (векторный график средней линии)

Для последующих вычислений и построений средняя линия, заданная координатным способом, аппроксимируется двумя отрезками прямых в области входной и выходной кромок с заданными углами наклона и тремя криволинейными участками в виде дуг кривых Безье 2-го порядка. Координаты точек сопряжения соседних аппроксимируемых участков определяются итерационным методом с оптимизацией индекса корреляции (максимальное значение) [4]. Для вычисления индекса корреляции в *Mathcad* имеется специальная функция, что существенно сокращает время вычислений.

Следует отметить, что полученное уравнение аппроксимированной средней линии имеет аналитический формат, что дает возможность применять цифровую технологию не зависимо от языка программирования и соответствует современным технологиям при проектировании инженерных объектов. Интегральное уравнение средней линии имеет вид (формат *Mathcad*)

$$Lm_{bz}(x) := \begin{cases} T_{vx}(x) & \text{if } 0 < x \leq 0,5 \\ Yx_{bz}(x) & \text{if } 0,5 < x \leq Xm_7 \\ Y2'_{bz}(x) & \text{if } Xm_7 < x \leq Xm_{14} \\ Y3'_{bz}(x) & \text{if } Xm_{14} < x \leq Xm_{22} \\ T_{vux}(x) & \text{if } Xm_{22} < x \leq Xm_{23} \end{cases} \quad (1)$$

На рисунке 2 показана исходная средняя линия в виде интерполяционного графика и средняя линия, построенная по интегральному уравнению (1).



**Рис. 2.** Средняя линия профиля АЗК7: ••• — исходные точки, заданные координатным способом; — — аппроксимированная средняя линии, построенная по формуле (1)

Рассчитанный индекс корреляции между исходным вектором значений и аппроксимированными равен  $corr = 0,999723$ . С практической точки точность аппроксимации близка к точности округления исходных данных. (В сложных случаях для лучшего приближения исходных и аппроксимированных данных можно увеличить количество участков аппроксимации.)

Следующим этапом проектирования было построение исходного симметричного профиля, заданного распределением толщины профиля по длине хорды.

В таблице 2 представлена матрица координат обводов симметричного исходного профиля АЗК7.

Для оценки корректности исходных данных был построен векторный график исходного профиля и интерполяционный вариант (рис. 3).

Таблица 2

Распределение толщины профиля (абсциссы и ординаты в процентах от хорды)

$$\left( \begin{array}{cccccccccccc} 0 & 1,25 & 2,5 & 5,0 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 \\ 0 & 3,469 & 4,972 & 6,918 & 9,007 & 9,827 & 10,00 & 9,899 & 9,613 & 9,106 & 8,594 \end{array} \right) \cdot$$

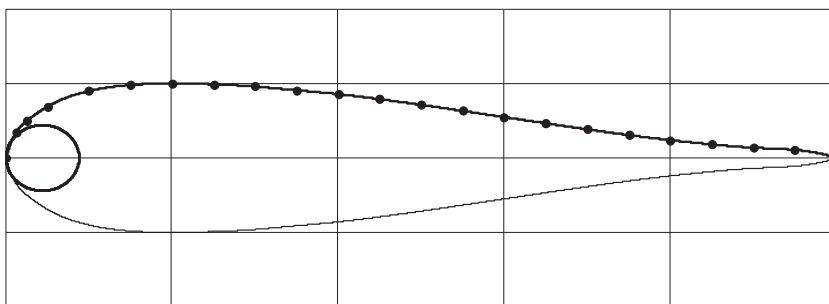
$$\left( \begin{array}{cccccccccccc} 45 & 50 & 55 & 60 & 65 & 70 & 75 & 80 & 85 & 90 & 95 & 100 \\ 7,913 & 7,152 & 6,339 & 5,500 & 4,661 & 3,848 & 3,087 & 2,406 & 1,830 & 1,387 & 1,101 & 0 \end{array} \right) \cdot$$


Рис. 3. Векторный график исходного турбинного профиля AZK7:

••• — исходные точки обводов профиля; ——— интерполяция исходных данных кубическим сплайном

Как отмечалось ранее входная и выходная кромки профиля оформлены в виде дуг окружностей соответствующих радиусов. Как можно видеть из графика (см. рис. 3), в области выходной кромки имеется особенность обвода профиля — перегиб контура. Эту особенность следует учесть при аппроксимации профиля кривыми Безье 2-го порядка. Для определения координат точки перегиба использовалось условие равенства нулю второй производной интерполяционного обвода профиля. На рисунке 4 в формате *Mathcad* показан фрагмент алгоритма решения для точки перегиба контура.

Определение координат точки перегиба обвода спинки профиля

$$x := 60$$

$$X_{pg} := \text{root} \left( \frac{d^2}{dx^2} Lc(x), x \right)$$

$$X_{pg} = 60,152$$

Рис. 4. Фрагмент программы для определения абсциссы точки перегиба контура (формат *Mathcad*)

Следующим этапом проектирования является определение координат точки сопряжения входной кромки в виде дуги окружности и серии точек обвода контура, аппроксимированной кривой Безье 2-го порядка. Итерационным способом, варьируя абсциссу начальной точки на дуге окружности и задавая конечную точку вектора аппроксимации, при условии максимума индекса корреляции  $corr_{\max}$  были найдены координаты начальной опорной точки *A* кривой Безье для про-

филя АЗК7. Продолжение этого этапа — процедура максимального увеличения интервала аппроксимации для сокращения участков аппроксимации обводов при условии максимума индекса корреляции.

Для первого участка аппроксимации абсцисса начальной опорной точки равна  $X_{Ac} = 0,3$  мм. Конечной точкой первого участка аппроксимации была точка с абсциссой равной 20 мм. Определив начальную и конечную опорные точки параболы Безье 2-го порядка, определялись координаты промежуточной опорной точки на пересечении касательных, исходящих из начальной и конечной опорных точек. (Следует напомнить, что координаты опорных точек: начальной, средней и конечной, являются коэффициентами параметрических уравнений кривой Безье.)

Расчеты для первого аппроксимационного участка показали, что индекс корреляции равен  $corr = 0,999931$ .

Для решения второго участка аппроксимации характеристика начальной опорной точки известна, так как эта точка есть конечная опорная точка предыдущего участка. Поэтому следует только тем же методом найти конечную опорную точку второго (последующего) участка. Для второго участка были получены следующие данные: абсцисса начальной опорной точки 20 мм, конечной опорной точки — 60 мм, индекс корреляции —  $corr = 0,99969$ .

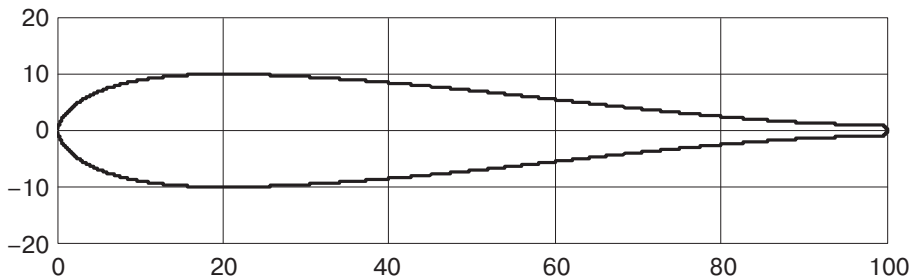
Третий участок аппроксимации. Особенность аппроксимации третьего участка заключается в том, что необходимо определить характеристики конечной опорной точки. Для заданного профиля конечной опорной точкой были координаты экстремальной точки дуги окружности выходной кромки с абсциссой равной  $X_c = (b - r_2)$  и ординатой  $r_2$ . Дополнительным условием для конечной точки было условие параллельности оси абсцисс исходной системы координат касательной, исходящей из конечной точки. При этих условиях можно построить характеристический треугольник для аппроксимирующей кривой Безье 2-го порядка. Для третьего участка аппроксимации индекс корреляции был получен равным  $corr = 0,99981$ .

После аппроксимации трех участков кривыми Безье 2-го порядка было записано интегральное уравнение обвода спинки (выпуклой части контура) профиля АЗК7с учетом того, что входная и выходная кромки выполнены в виде дуг окружностей. Спинка симметричного исходного профиля в аналитическом виде в формате *Mathcad* описывается интегральным уравнением

$$Lm_{bz}(x) := \begin{cases} T_{vx}(x) & \text{if } 0 < x \leq 0,5 \\ Yx_{bz}(x) & \text{if } 0,5 < x \leq Xm_7 \\ Y2'_{bz}(x) & \text{if } Xm_7 < x \leq Xm_{14} \\ Y3'_{bz}(x) & \text{if } Xm_{14} < x \leq Xm_{22} \\ T_{vux}(x) & \text{if } Xm_{22} < x \leq Xm_{23} \end{cases} \quad (2)$$

В силу симметричности обводов профиля, уравнение вогнутой части профиля (корытца) может быть записано тем же уравнением что и спинка, но со знаком минус.

На рисунке 5 показан симметричный исходный профиль *A3K7* в исходной системе координат, построенный по аппроксимационному интегральному уравнению (2).



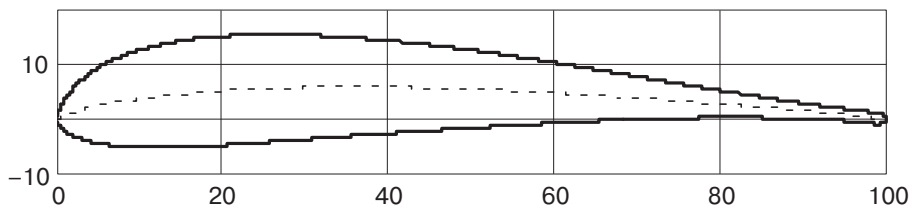
**Рис. 5.** Симметричный исходный профиль *A3K7*, построенный по аппроксимационному аналитическому уравнению

Как указано ранее, изогнутый турбинный реактивный профиль на базе профиля *A3K7*, проектируется методом нелинейных преобразований, где прообразом служит симметричный профиль, инвариантной кривой средняя линия, образом — изогнутый профиль. Для построения изогнутого профиля были получена система уравнений преобразования:

$$S_{NLa3k7}(x) := Lm_{bz}(x) + SA3K7_{app}(x);$$

$$W_{NLa3k7}(x) := Lm_{bz}(x) + WA3K7_{app}(x). \quad (3)$$

На рисунке 6 показан изогнутый турбинный реактивный профиль серии *A3K7* *NACA* с углом поворота потока  $50^\circ$ , построенный на базе симметричного исходного профиля и средней линии методом нелинейных преобразований Гирста с несобственным центром.



**Рис. 6.** Изогнутый турбинный реактивный профиль серии *A3K7* *NACA* с углом поворота потока  $50^\circ$

Полученная аналитическая форма описания обводов симметричного и изогнутого профилей серии *A3K7* позволяет аналитически рассчитать все геометрические характеристики, необходимые при расчете на прочность лопатки, формируемых профилями каналов решетки и др. Как указывалось ранее, примененный нелинейный метод обладает свойством эквивормности, т.е. площади исходного симметричного профиля и изогнутого профиля равны. Для сконструированного профиля площади оказались равными  $F = 1,199 \cdot 10^3 \text{ мм}^2$ .

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы.

1. Разработана система автоматизированного проектирования, которая позволяет проектировать турбинный реактивный профиль серии АЗК7.
2. Предложенная форма описания обводов профиля дает возможность аналитически исследовать весь комплекс геометрических параметров профиля, строить решетки в других программах и на других языках.
4. Разработанная САПР позволяет автоматически варьировать параметры профиля и решетки: геометрический масштаб, угол изгиба профиля, угол установки профиля в решетке, относительный шаг решетки и др.
5. САПР выполнена по модульной схеме, что делает систему модернизационно пригодной: совершенствование системы, дополнение ее новыми модулями встраивание системы в другие САПР более высокого уровня, например, в САПР «Турбина» и др.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Холщевников К.В.* Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1970. 610 с.
- [2] *Хорлок Дж.Х.* Осевые турбины (газовая динамика). М.: Машиностроение, 1972. 208 с.
- [3] *Иванов Г.С.* Конструирование технических поверхностей (математическое моделирование на основе нелинейных преобразований). М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
- [4] Статистические методы обработки эмпирических данных / Рекомендации ВНИИНМАШ. М.: Изд-во стандартов, 1978. 230 с.
- [5] *Гусаков С.В., Патрахальцев Н.Н.* Планирование, проведение и обработка данных экспериментальных исследований двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие. М.: Изд-во РУДН, 2004. 167 с.

© Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ошечков П.П., 2017

#### История статьи:

Дата поступления в редакцию: июнь 2017

Дата принятия к печати: сентябрь 2017

#### Для цитирования:

**Виноградов Л.В., Мамаев В.К., Ошечков П.П.** Турбинный профиль АЗК7 — НАСА автоматизация проектирования // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: «Инженерные исследования»*. 2017. Т. 18. № 3. С. 299—307. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-299-307

#### Сведения об авторах:

*Виноградов Леонид Валерьевич*, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии РУДН. *Сфера научных интересов*: системы автоматизированного проектирования, турбины, агрегаты турбонаддува. *Контактная информация*: e-mail: vinogradov\_lv@rudn.university

*Мамаев Владимир Константинович*, старший преподаватель департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии РУДН. *Сфера научных интересов*: системы автоматизированного проектирования, турбины, акустические и волновые процессы. *Контактная информация*: e-mail: mamaev\_vk@rudn.university

*Ощепков Петр Платонович*, кандидат технических наук, доцент департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии РУДН. *Сфера научных интересов:* системы автоматизированного проектирования, эксплуатация двигателей внутреннего сгорания, альтернативные топлива. *Контактная информация:* e-mail: oshchepkov\_pp@rudn.university

## **CAD OF TURBINE PROFILE TYPE A3K7 NACA BY THE METHOD OF NONLINEAR TRANSFORMATION**

**L.V. Vinogradov, V.K. Mamaev, P.P. Oschepkov**

Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*

The paper presents the results of designing a turbine profile type *A3K7 NACA* using CAD, which realizes the method of nonlinear transformation. Girst transformation was used by the authors. All calculations and graphical representations were made in the computer algebra system Mathcad. For the calculation and graphical representations the middle line, defined by coordinates, is approximated with two linear segments in the regions of the leading and tailing edges with specified angles and three nonlinear segments in the form of second order Bezier curves. The coordinates of the matching points of neighbor sections are calculated using an iterative method with an optimization of the correlation index. The coordinate of the bending point was found using the condition of equality to zero of the second derivative of the interpolative contour. The coordinates of the junction point of the leading edge are determined in the paper as ab arc and a series of points of the contour, approximated by a second order Bezier curve. After determining the first and last point of the second order Bezier curve, the coordinated of the middle point on the intersection of tangential lines that start at the first and last point of the curve. After the approximation of three sections with second order Bezier curves the integral function of the blade back (convex side of the contour) of the profile *A3K7* considering the leading and tailing edges are made as arcs.

**Key words:** turbine, computer-aided design, nonlinear transformation

### **REFERENCES**

- [1] Holshevnikov K.V. Theory and calculation of aircraft impeller machine. M.: Engineering, 1970. 610 p.
- [2] Horlock J.H. Axial flow turbine (gas dynamics). M.: Mashinostroenie, 1972. 208 p.
- [3] Ivanov G.S. Designing of technical surfaces (mathematical modelling on the basis of nonlinear transformations). M.: Mashinostroenie, 1987. 192 p.
- [4] Statistical methods for processing of empirical data. Recommendations VNIINMASH. M.: Publishing House of standards, 1978. 230 p.
- [5] Gusakov S.V., Patrahaltsev N.N. Planning, conducting and data processing of experimental researches of internal combustion engines: Textbook. allowance. M.: publishing house of PFUR, 2004. 167 p.

### **Article history:**

Received: June 2017

Accepted: September 2017



**For citation:**

**Vinogradov L.V., Mamaev V.K., Oschepkov P.P. (2017) Cad of turbine profile type A3K7 NACA by the method of nonlinear transformation. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(3), 299–307. DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-3-299-307**

**Bio Note:**

*Vinogradov Leonid Valerievich*, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of technology of mechanical engineering, machine tools and instruments at the Academy of Engineering of the Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests*: computer aided design systems, turbines and turbo machinery. *Contact information*: e-mail: vinogradov\_lv@rudn.university

*Mamaev Vladimir Konstantinovich*, senior professor of the the Department of technology of mechanical engineering, machine tools and instruments at the Academy of Engineering of the Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests*: computer aided design systems, turbines, acoustic and wave processes. *Contact information*: e-mail: mamaev\_vk@rudn.university

*Oshchepkov Petr Platonovich*, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of technology of mechanical engineering, machine tools and instruments at the Academy of Engineering of the Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests*: computer aided design systems, internal combustion engines operation, alternative fuels. *Contact information*: e-mail: oshchepkov\_pp@rudn.university